



Proyecto Mecatrónico

Instrumentación y control de una máquina de ensayos triaxiales

Marzo 2017

Autor: Pedro Guardone

Tutor: Norberto Lereñdegui

Índice

1	Objetivo	5
2	Introducción	5
3	Marco teórico.....	5
3.1	Criterio de falla	6
3.2	Presión de poro	7
3.3	Obtención de resultados.....	9
3.4	Ensayos con medición de la presión de poro.....	11
3.4.1	Saturación	12
3.4.2	Consolidación	13
3.4.3	Compresión	14
3.5	Ensayos sin medición de presión de poro.....	14
3.6	Ensayos multistage.....	14
4	Descripción de la máquina.....	15
5	Especificaciones técnicas	19
5.1	Especificaciones de la muestra.....	19
5.1.1	Dimensiones.....	19
5.1.2	Material.....	19
5.2	Especificaciones mecánicas	19
5.2.1	Presión de confinamiento	19
5.2.2	Pistón hidráulico	19
5.3	Especificaciones eléctricas	20
5.3.1	Sensor de presión de confinamiento.....	20
5.3.2	Sensor de presión de pistón hidráulico	20
5.3.3	Sensor de desplazamiento (LVDT)	20
5.3.4	Sensor de deformación axial	20
5.3.5	Sensor de deformación radial	20
5.3.6	Electroválvula de confinamiento	20
5.3.7	Electroválvula de presión de pistón	20
5.3.8	PLC	20
5.4	Especificaciones de ensayo.....	20
6	Diseño del sistema de control.....	21
6.1	Análisis de factibilidad para medir la presión de poro	21

6.2	Selección de la instrumentación	23
6.2.1	Sensores	25
6.2.2	Actuadores	41
6.2.3	Control.....	41
6.2.4	Accesorios.....	41
6.3	Montaje del material comprado.....	43
6.4	Estudios preliminares del sistema.....	48
6.4.1	Comparación de los transductores de presión con los manómetros	48
6.4.2	Obtención de la curva característica de las electroválvulas	51
6.4.3	Características del pistón hidráulico	59
6.5	Programación del sistema de control.....	65
6.5.1	Ejecución del ensayo.....	66
6.5.2	Registro de datos	76
6.5.3	Visualización de variables en tiempo real	76
6.6	Estrategias de control	77
6.6.1	Control de la presión de confinamiento.....	77
6.6.2	Control de la presión del pistón	79
6.6.3	Control del desplazamiento del pistón	80
6.6.4	Control de la deformación axial de la muestra	82
7	Validación de las mediciones.....	83
8	Postproceso de resultados	88
8.1	Lectura de los datos de salida del PLC.....	88
8.2	Gráficos de las variables relevantes	90
8.3	Cálculos de E, G, K y ν	91
8.4	Círculos de Mohr y obtención de la envolvente de Mohr-Coulomb	92
8.5	Exportación de datos a Excel	94
9	Procedimiento del ensayo.....	94
9.1	Corte y pulido de la roca	95
9.2	Instrumentación de la muestra con strain gages.....	95
9.3	Instalación de la camisa protectora sobre la muestra.	95
9.4	Colocación de la muestra dentro de la cámara de confinamiento	96
9.5	Cierre de la celda triaxial	96
9.6	Realización del ensayo.....	97
9.7	Apertura de la celda triaxial	99
9.8	Extracción y análisis visual de la muestra.....	99

9.9	Extracción de datos y postproceso.	99
10	Resultados que se obtienen con cada ensayo	100
11	Resultados obtenidos sobre testigos de rocas	100
11.1	Ensayo Multistage	100
11.1.1	Etapa 1	103
11.1.2	Etapa 2.....	104
11.1.3	Etapa 3.....	105
11.1.1	Etapa 4.....	106
11.2	Ensayos Singlestage	108
11.2.1	Ensayo SST1.....	108
11.2.2	Ensayo SST2.....	111
11.2.3	Ensayo SST3.....	113
11.3	Envolvente Mohr-Coulomb	114
12	Conclusiones.....	116
13	Referencias.....	117
14	Anexo.....	118
14.1	Glosario	118
14.2	Plano del cableado eléctrico 1: Sensores y Actuadores.....	120
14.3	Plano del cableado eléctrico 2: Periféricos	121

1 Objetivo

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo y control de una máquina de ensayos triaxiales, que permita llevar a cabo ensayos automáticos de esfuerzo-deformación para medir las propiedades mecánicas de rocas presentes en yacimientos petrolíferos.

2 Introducción

A partir de 2013, y a raíz de las prospecciones geológicas hechas en la región de Vaca Muerta, la Argentina se convirtió en el segundo país con mayores reservas de gas no convencional (*shale gas*) y el cuarto en reservas de petróleo no convencional (*shale oil*) [1]. Esto motivó el interés de distintas empresas petroleras en comenzar a extraer estos recursos mediante la técnica de fractura hidráulica. En este tipo de perforación, el estudio de la geomecánica de los yacimientos es fundamental para determinar la estabilidad de pozo y las zonas óptimas para la perforación, permitiendo de esta manera reducir los costos.

Parte de los estudios realizados consisten en simulaciones en computadora a partir de modelos de elementos finitos que requieren parámetros asociados a las propiedades de la roca. Estos parámetros son obtenidos a partir de distintos tipos de ensayos que se hacen sobre muestras de roca; uno de ellos es el ensayo triaxial para cuya realización se diseñó y construyó en el ITBA una celda triaxial.

La celda triaxial desarrollada en el ITBA es el producto de un proyecto que se divide en tres etapas. En la primera etapa los alumnos, ahora graduados, el Ing. Santiago Blanco y el Ing. Federico Paterlini, bajo la tutela del Dr. Ing. Pablo Leslabay, realizaron el diseño mecánico de la celda triaxial, que fue derivado a la firma Rexroth del grupo Bosch para que construyera la central hidráulica requerida. En la segunda etapa, bajo la coordinación del Ing. Nicolás Oyarzabal, se llevó a cabo el mecanizado de las piezas diseñadas en la primera etapa. En la tercera etapa, el alumno y autor de este informe, Pedro Guardone, bajo la tutela del Ing. Norberto Lereendegui, diseñó e implementó el sistema de control de la celda triaxial. En esta etapa se incluyeron modificaciones en el diseño de la central hidráulica para adaptarla al sistema de control.

3 Marco teórico

En un ensayo triaxial, inicialmente se somete un testigo de roca cilíndrico a una presión hidrostática llamada presión de confinamiento; esta presión simula las condiciones de presión a la cual se encuentra la roca *in situ*. Una vez establecida esta presión confinante se comprime la muestra axialmente mediante el avance de un pistón. Mientras el pistón avanza y la muestra se comprime se registran los datos de las tensiones y las deformaciones que se generan en la roca y que luego determinan sus propiedades. La compresión continúa hasta que ocurre la falla en la roca. En la **Figura 1** se presenta un esquema simple de este ensayo.

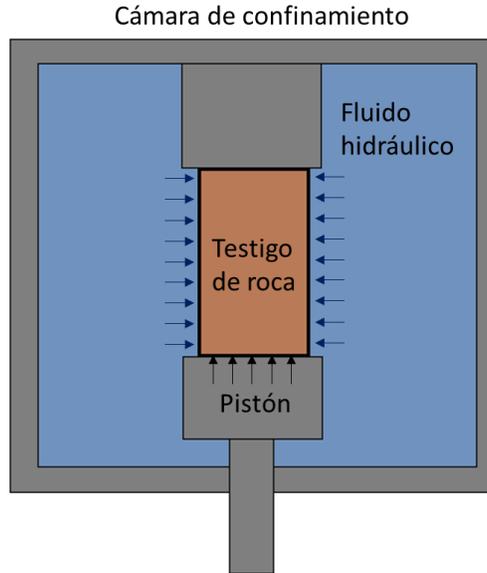


Figura 1. Ilustración simple del ensayo triaxial.

3.1 Criterio de falla

El criterio de falla más utilizado para el estudio de rocas es el de Mohr-Coulomb. Este criterio supone que la falla ocurre en determinado plano debido a que la tensión de corte en ese plano es superior a las fuerzas que resisten la falla. Estas fuerzas resistentes son la cohesión, definida como la resistencia que tiene la roca a esfuerzos cortantes, y la fricción interna. Esta última es la fricción entre las caras a ambos lados del plano de falla que depende del material de la roca y de la tensión axial, modelándose de manera similar a una fricción estática. La expresión del criterio de falla Mohr-Coulomb se presenta como:

$$\tau = C + \mu\sigma$$

- τ : Tensión de corte en el plano
- σ : Tensión normal al plano
- μ : Coeficiente de fricción interna
- C : Cohesión

Para el caso del ensayo triaxial, la roca, al momento de la falla, tiene un estado de compresión como se muestra en la **Figura 2**, y se desarrolla la falla en determinado plano a un ángulo Θ respecto del plano horizontal. Para obtener las tensiones en ese plano es necesario rotar el tensor de tensiones partiendo del plano cuyas tensiones son conocidas. Esto se representa gráficamente con el círculo de Mohr mostrado en la **Figura 3**, donde se rota del punto A, cuyas coordenadas están alineadas con las tensiones conocidas que se aplican sobre la muestra de roca, al punto B, cuyas coordenadas se alinean con el plano donde ocurre la falla.

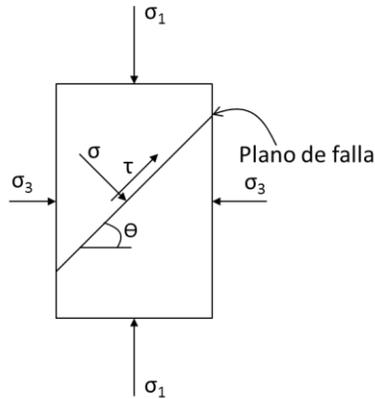


Figura 2. Esquemático del testigo de roca al momento de la falla.

σ_1 : Tensión axial
 σ_3 : Tensión radial

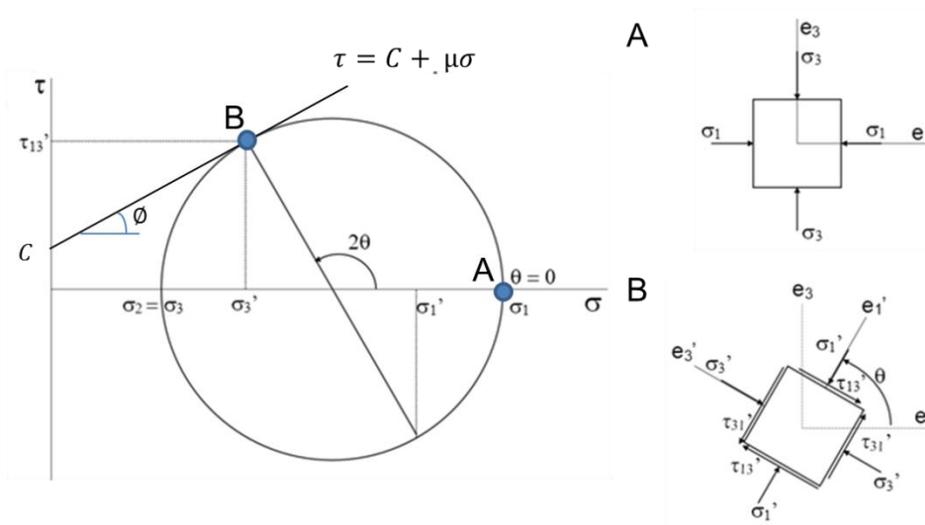


Figura 3. Círculo de Mohr para el estado de tensiones triaxial

En la **Figura 3** también se grafica la envolvente de Mohr-Coulomb, que se representa como una recta tangente al círculo de Mohr en el punto donde ocurre la falla, con ordenada al origen C y pendiente μ . La pendiente de la recta también puede referirse como $\tan(\phi)$ siendo ϕ el ángulo de fricción interna.

Este análisis de falla no contempla el efecto de la presión de poro de la roca, que es explicado en la siguiente sección 3.2.

3.2 Presión de poro

Las rocas son materiales permeables; cuando estas se encuentran *in situ*, los espacios porales suelen estar llenos de fluido, generalmente líquido, que tiene un efecto sobre la

resistencia mecánica de la roca. Cuando ésta se comprime, el volumen de los poros disminuye, generando un aumento en la presión del fluido en su interior. Esta presión se opone a las tensiones de compresión aplicadas sobre la roca, como se muestra en la **Figura 4**.

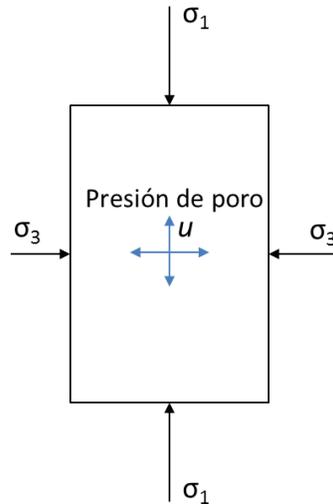


Figura 4. Estado de tensiones del testigo de roca considerando la presión de poro.

La presión de poro debilita a la roca ya que disminuye la fuerza de fricción que se opone al cizallamiento de la roca. Y el criterio de Mohr Coulomb pasa a ser:

$$\tau = C + \mu(\sigma - u)$$

Donde u es la presión de poro.

Para obtener las tensiones que realmente se generan en la roca se hace

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

Estas tensiones obtenidas se conocen como tensiones efectivas.

Gráficamente, este efecto se puede observar como un corrimiento hacia la izquierda del círculo de Mohr, como se muestra en la **Figura 5**.

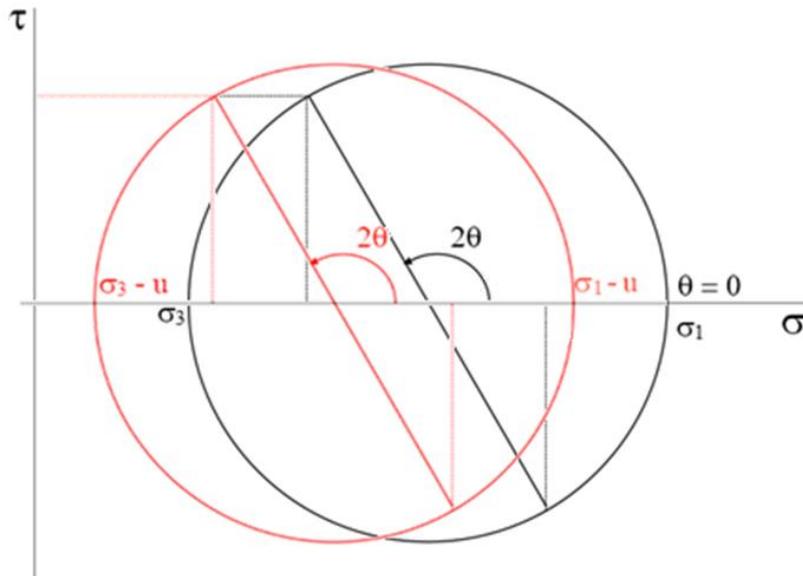


Figura 5. Efecto de la presión de poros en el círculo de Mohr.

La falla en la roca está controlado por las tensiones efectivas y no por las tensiones absolutas.

3.3 Obtención de resultados

Las propiedades de las rocas que se esperan obtener son las siguientes:

- Módulo de Young (E)
- Coeficiente de Poisson (ν)
- Módulo de elasticidad transversal (G)
- Módulo de compresibilidad (K)

Estas propiedades se obtienen a partir de la curva de tensión deviatorica - deformación. La tensión deviatorica es la que aparta a la roca de su estado de tensión hidrostática y equivale a:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

La **Figura 6** muestra curvas de tensión-deformación típicas, a las cuales se les hace un ajuste lineal en la zona de comportamiento elástico para obtener las pendientes de estas regiones.

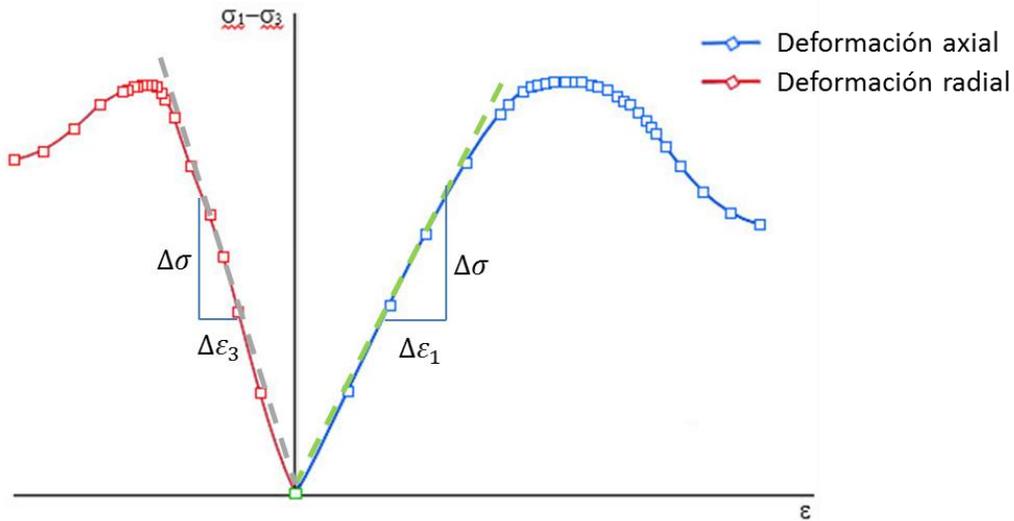


Figura 6. Curvas de tensión deviatorica – deformación

A partir del gráfico de la **Figura 6**, el módulo de Young se obtiene como:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_1}$$

El módulo de Poisson se obtiene como:

$$\nu = -\frac{E}{m}$$

$$m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_3}$$

El módulo de elasticidad transversal se obtiene como:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Finalmente, el módulo de compresibilidad se obtiene como:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Existen otros dos parámetros a obtener:

- Cohesión
- Coeficiente de fricción interna

Estos parámetros se obtienen realizando tres o más ensayos con muestras similares trabajando con distintas presiones de confinamiento, o a través de un ensayo *multistage* (Sección 3.6) con una misma muestra. De esta manera, se obtienen 3 o más círculos de Mohr y se hace el ajuste de una recta que sea aproximadamente tangente a los círculos, como se muestra en la **Figura 7**.

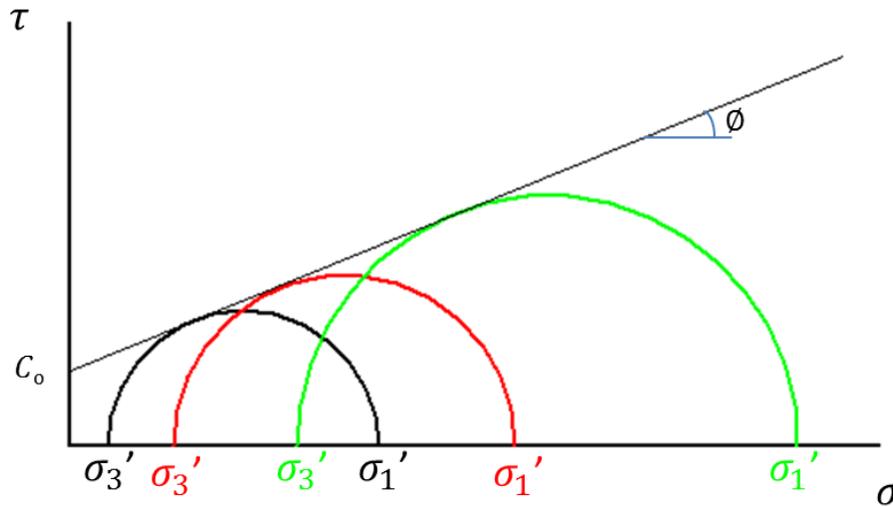


Figura 7. Obtención de la envolvente de Mohr – Coulomb a partir de 3 círculos de Mohr.

La ordenada al origen de esta recta es la cohesión, y la pendiente es el coeficiente de fricción interna.

3.4 Ensayos con medición de la presión de poro

Los procedimientos para este tipo de ensayos se toman en base al Volumen 3 del ‘Manual of Soil Laboratory Testing’ por H.C. Head. Si bien es un manual para el ensayo de suelos, del libro de Erling Fjar et al., *Petroleum Related Rock Mechanics*, se tiene la siguiente afirmación: “For testing of shales it has been recommended to perform so-called Consolidated Undrained (CU) tests (Steiger and Leung, 1992; Nakken et al., 1989; Horsrud et al., 1998). The procedure is adopted from soil testing (e.g. Head 1984).”

El instrumental usual para este tipo de ensayo se muestra en la **Figura 8**. Se observa el pistón utilizado para la compresión axial, la cámara de confinamiento llena de fluido hidráulico con una conexión al sistema que provea la presión de confinamiento, y dos conexiones que van a la muestra, una superior y otra inferior. Entre los asientos y la muestra de roca se anteponen discos porosos cuya función es la de facilitar el ingreso del fluido hacia la roca.

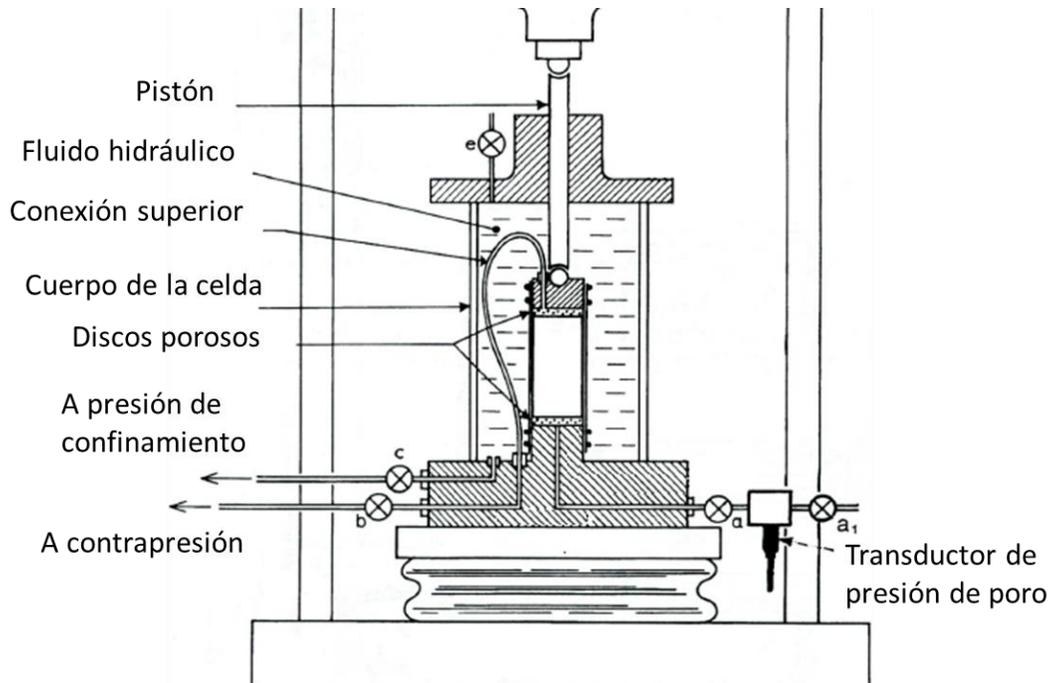


Figura 8. Esquemático de una máquina para ensayos triaxiales con medición de presión de poro.

El ensayo triaxial de tipo 'consolidated undrained' (consolidado, no drenado) se divide en tres etapas.

- 1) Saturación: en esta etapa se busca lograr una saturación de la muestra, con agua, lo más cercana al 100%. Esto se hace para evitar la presencia de aire durante la etapa de compresión ya que dificulta en gran medida la medición correcta de la presión de poro. La saturación se lleva a cabo aplicando una presión, denominada contrapresión, directamente sobre una de las caras de la muestra. Esto aumenta la presión de poro de la muestra y eventualmente fuerza al aire a entrar en solución con el agua.
- 2) Consolidación: en esta etapa se busca someter a la muestra a un valor prefijado de compresión efectiva, esto implica imponer una presión de confinamiento y una presión de poro de manera tal que se obtenga un valor de tensión efectiva inicial de partida para el ensayo. El valor prefijado depende de las condiciones *in situ* de la muestra.
- 3) Compresión: en esta etapa se lleva a cabo el desplazamiento axial del pistón para apartar a la muestra de su estado de cargas hidrostático y se la lleva a la fractura midiendo la presión de poro.

3.4.1 Saturación

Head presenta cinco procedimientos distintos para la saturación de la muestra con base en las normas BS 1377 y ASTM D4767, se hace referencia a dos de ellos considerados los más adecuados.

3.4.1.1 Saturación por incrementos de presión de poro

Este proceso consiste en aumentar de manera alternativa la contrapresión y la presión de confinamiento en incrementos controlados manteniendo en todo momento el estado de compresión efectiva, es decir, manteniendo la presión de confinamiento por encima de la presión de poro por cierto margen. El procedimiento se realiza hasta que el parámetro B es mayor a 0,95 o no registra más cambios. El parámetro B se define como el cociente entre el aumento de la presión de poro y la presión de confinamiento y es un indicador del grado de saturación de la muestra.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Cuando en una roca se aumenta la presión de confinamiento, la presión de poro aumenta en menor medida; cuando el aumento de la presión de poro es casi el mismo que el aumento de la presión de confinamiento, significa que la muestra está saturada.

Para valores de B mayores a 0,95 o, si con mayores incrementos de presión, B no cambia, se considera completa la saturación de la muestra [2].

A continuación se detalla paso a paso el procedimiento de este método de saturación.

- a) En cuanto se introduce la muestra en su lugar, realizar y registrar una primera medición de la presión de poro sin presión de confinamiento aplicada.
- b) Realizar un incremento de la presión de confinamiento con la válvula de drenaje cerrada (válvula b de la **Figura 8**) y registrar el aumento de presión de poro una vez que se estabiliza.
- c) Calcular el parámetro B.
- d) Si es menor a 0,95 o su valor cambia respecto de la medición anterior aplicar un incremento de contrapresión a la muestra y luego abrir la válvula de drenaje para que se comunique la presión, esperar a que la presión en el extremo inferior de la muestra sea igual a la contrapresión aplicada.
- e) Repetir los pasos b), c) y d) hasta llegar al criterio de saturación completa.

3.4.1.2 Saturación por aplicación de contrapresión en una sola etapa

Se aplica una presión de confinamiento mayor a la contrapresión que se aplicará a continuación. Luego se aumenta la contrapresión al nivel deseado con el drenaje cerrado para luego abrirlo. Este método es más simple y rápido pero requiere conocer de antemano la contrapresión necesaria.

3.4.2 Consolidación

Al finalizar la etapa de saturación, la muestra se encuentra en determinado estado de tensión efectiva; en la etapa de consolidación se busca llevar esta tensión efectiva a una deseada. Esto se hace aumentando la presión de confinamiento con el drenaje de la muestra cerrado hasta que se estabiliza la presión de poro en u_i como se observa en la **Figura 9**, luego se abre para que se disipe la presión de poro en exceso. El aumento de la presión de confinamiento que debe aplicarse tiene que ser de

$$P_c = \sigma_3' + u_b$$

donde σ_3' es la tensión efectiva deseada y u_b es la contrapresión. La etapa de consolidación finaliza cuando se registra la presión de poro y la disipación es mayor al 95%. Siendo la disipación:

$$U\% = \frac{u_i - u}{u_i - u_b} \times 100\%$$

La **Figura 9** muestra el resultado esperado de este procedimiento

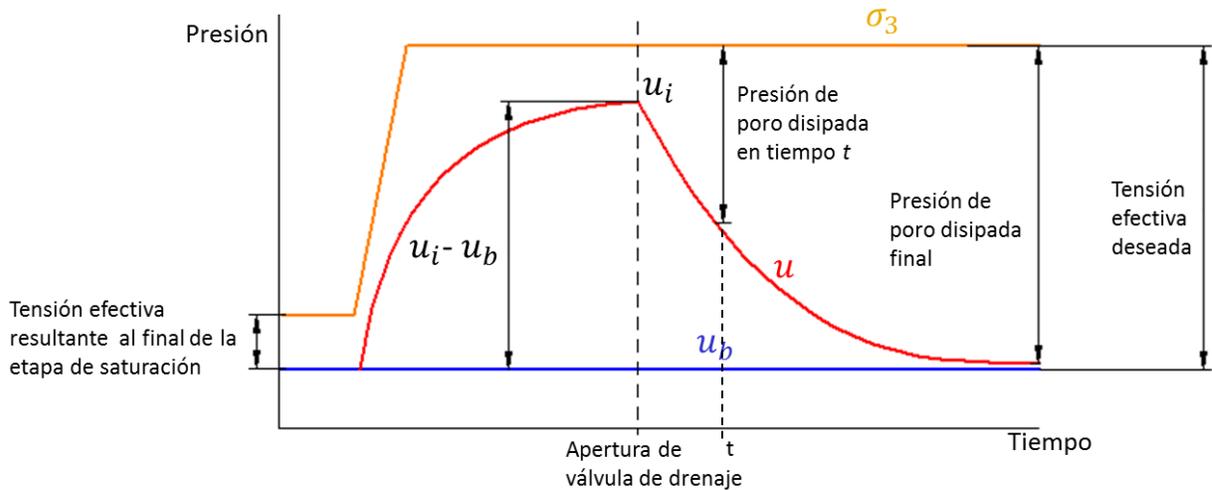


Figura 9. Diagrama de las presiones durante la etapa de consolidación.

3.4.3 Compresión

Mediante el avance a deformación axial constante del pistón hidráulico, se comprime la muestra con el drenaje cerrado hasta alcanzar el criterio de falla.

3.5 Ensayos sin medición de presión de poro

Son llamados ensayos de compresión rápidos (*quick compression tests* [3]) y son considerablemente más sencillos que los ensayos con medición de poro. No es necesario saturar la muestra con agua ni hacer una etapa de consolidación, únicamente se aumenta la presión de confinamiento a un nivel deseado y se comprime la muestra hasta la falla. Los resultados obtenidos son en función de tensiones absolutas y no efectivas.

3.6 Ensayos multistage

Los ensayos *multistage* (multietapa) se realizan para obtener 3 o más círculos de Mohr a partir de un único testigo de roca. Se realizan este tipo de ensayos ya que la obtención de muestras de roca es laboriosa y a menudo resulta difícil conseguir testigos idénticos [4].

En este tipo de ensayos se comprime y descomprime la roca suponiendo que en cada etapa de compresión y descompresión no hay deformación plástica. Cada etapa de compresión y descarga se realiza a una presión de confinamiento distinta y permite obtener un círculo de Mohr. La desventaja de usar este método es que la compresión y descompresión de la muestra puede generar pequeñas fracturas entre etapas que pueden generar la falla prematura de la roca.

El criterio que se usa para determinar el momento en el que se debe interrumpir la compresión para luego pasar a la siguiente etapa de compresión, es el del punto de dilatación positiva (*point of positive dilatancy*) o PDP. Este es el punto donde la pendiente de la curva de tensión deviatorica – deformación volumétrica se vuelve infinita; este evento se muestra en la **Figura 10**. Si bien esto indica que la muestra ingresa a la región de deformación plástica, se cree que la muestra mantiene sus propiedades mecánicas elásticas [4]. En la **Figura 11** se observa un ejemplo de ensayo *multistage* de 3 etapas.

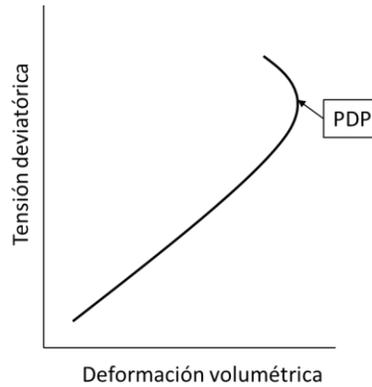


Figura 10. Curva donde ocurre la dilatación positiva de la roca

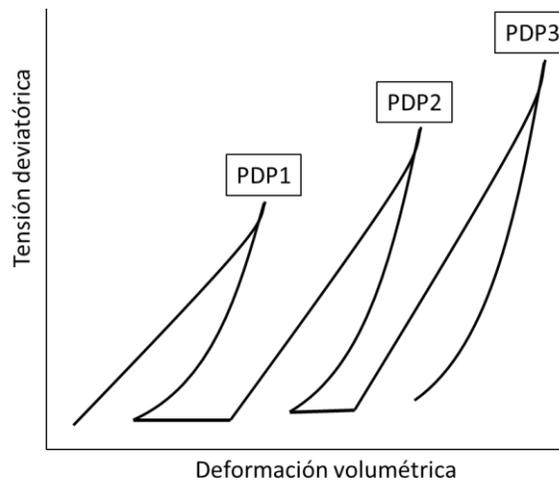


Figura 11. Curvas típicas de un ensayo *Multistage*.

4 Descripción de la máquina

La celda triaxial consiste en un cuerpo cilíndrico montado sobre una central hidráulica. Dentro del cuerpo cilíndrico se encuentra la cámara de confinamiento donde se coloca la muestra de roca, y el pistón hidráulico responsable de la compresión axial de la misma. La central hidráulica provee la presión para los circuitos de la presión de confinamiento y de la presión del pistón (P1 y P2 en la **Figura 12** y en la **Figura 13**). La **Figura 12** muestra un corte transversal de la celda diseñada por Blanco y Paterlini y la **Figura 13** el esquema de la central hidráulica.

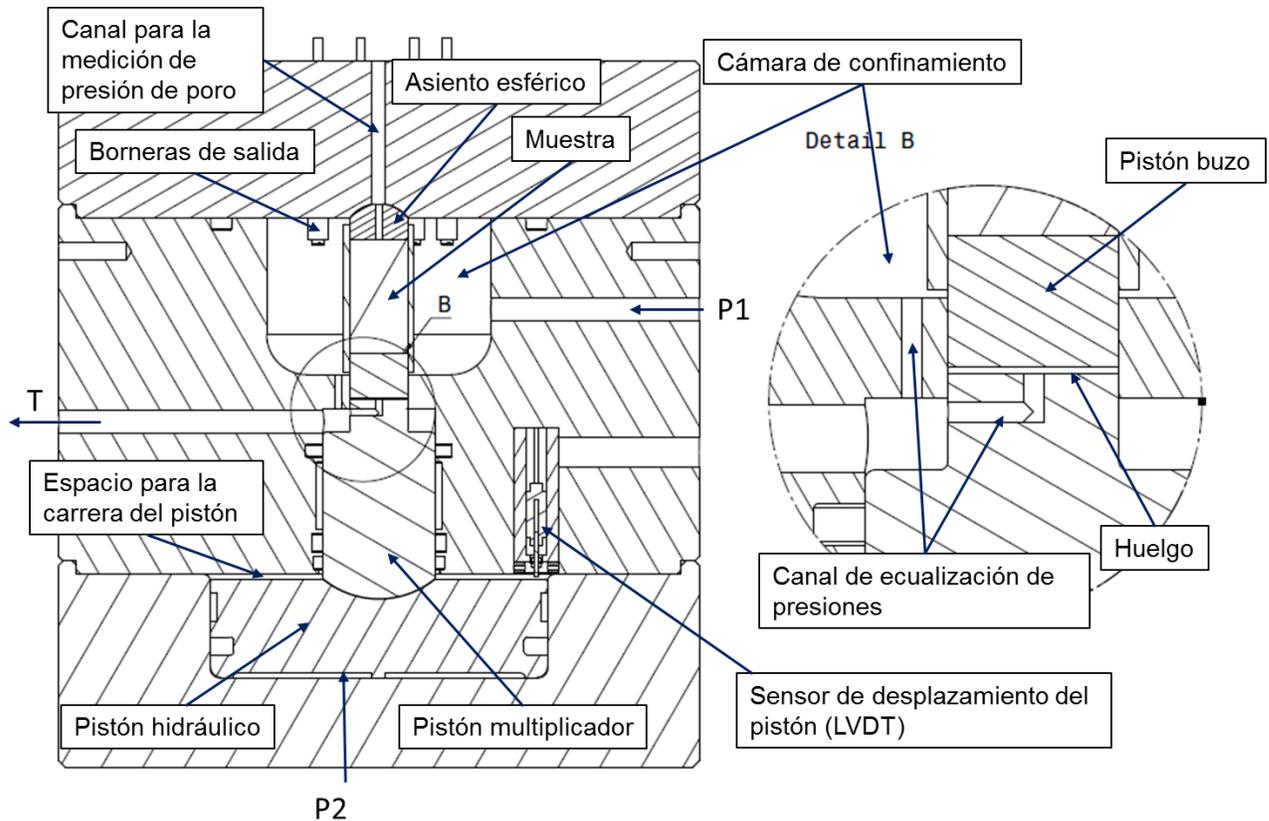


Figura 12: Vista en corte transversal de la celda triaxial

En la **Figura 12** se observa la cámara de confinamiento donde se inserta la muestra, esta se ubica entre dos asientos, uno de ellos esférico para compensar cualquier desalineación entre las caras del testigo. Se observa el pistón hidráulico responsable de la compresión axial, este empuja un pistón multiplicador. A este pistón se lo llama así ya que al tener un área transversal menor que el pistón hidráulico, multiplica la presión que finalmente se aplica sobre la muestra a través del pistón buzo.

Se observa también un canal para la medición de la presión de poro que se comunica con la cara superior de la muestra, un canal para el ingreso de la presión de confinamiento (P1) y un canal para desagotar el fluido hidráulico dentro de la cámara de confinamiento al finalizar el ensayo (T).

Durante el ensayo, al momento de aplicar la presión de confinamiento, el pistón se encuentra en su punto muerto inferior y existe un hueco entre el pistón buzo y el pistón multiplicador cuya función es permitir que el fluido de confinamiento actúe sobre la cara inferior de la muestra. El fluido llega a esta zona a través del canal de equalización de presiones. De esta manera, al aplicar presión de confinamiento la muestra se encuentra en un estado de tensiones hidrostático. Al momento de comprimir, el pistón hidráulico avanza y cierra el hueco para hacer contacto con la muestra y comenzar a aplicar la tensión deviatórica.

Se observa además el sensor de desplazamiento que mide la carrera del pistón, y las borneras de salida que permiten la extracción de las señales de los sensores de deformación que se pegan directamente sobre la muestra.

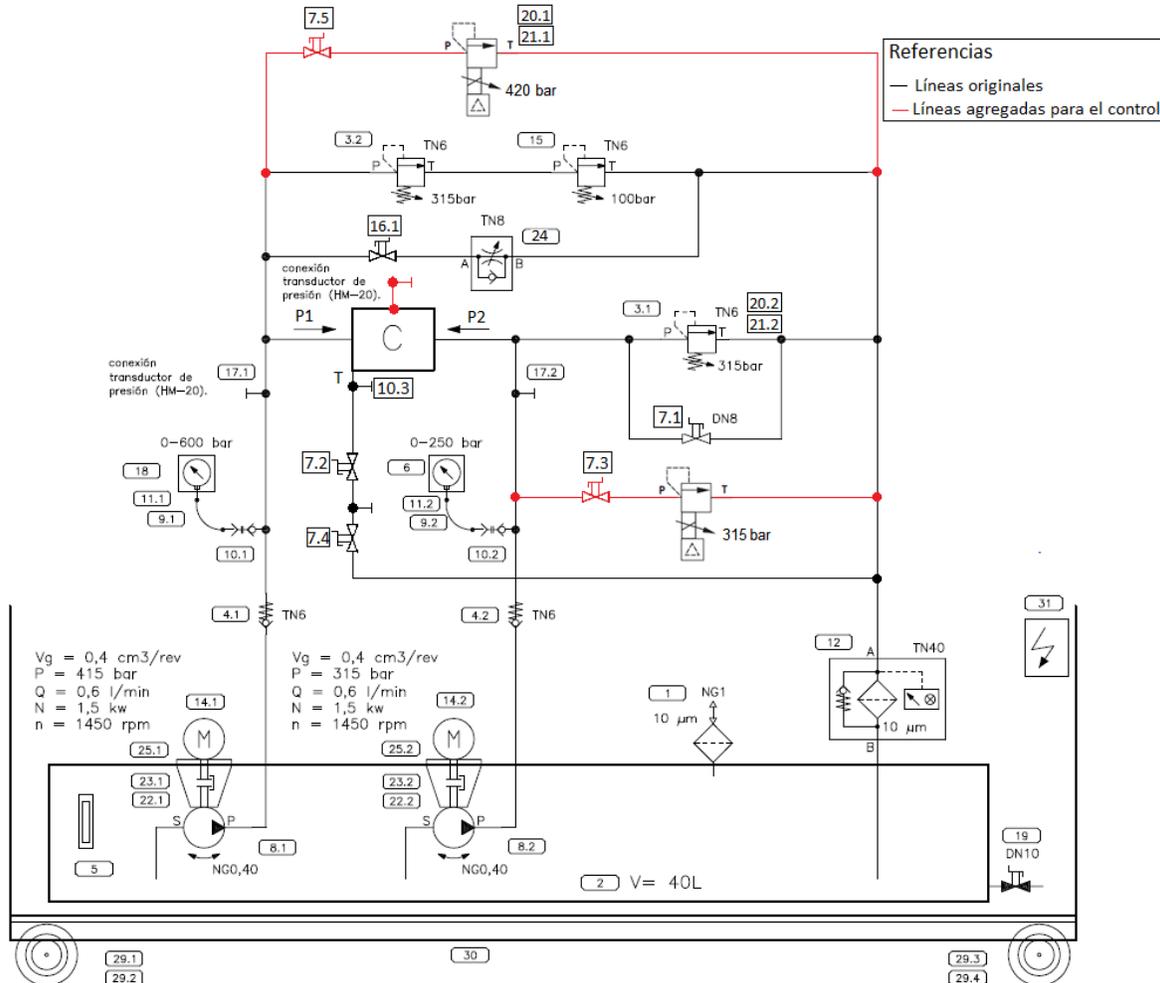


Figura 13: Esquema de la central hidráulica

Las presiones son generadas por dos bombas de desplazamiento positivo de pistones radiales, 8.1 y 8.2 en la **Figura 13** en conjunto con válvulas limitadoras de presión regulables, tanto manuales (3.1, 3.2 y 15) para una operación manual del ensayo, como actuadas eléctricamente (20.1 y 20.2), agregadas posteriormente para el control automático. Estas presiones son sensadas, junto con la presión del canal que se comunica con la cara superior de la muestra, mediante transductores de presión ubicados en las conexiones 17.1, 17.2 y en la tapa de la celda triaxial.

Con la introducción de las electroválvulas limitadoras de presión, en paralelo con las válvulas limitadoras manuales, estas últimas pasan a usarse como válvulas de seguridad regulando su presión de apertura a la presión máxima.

Otros elementos que se observan en la central hidráulica son las válvulas 16.1 y 7.1, que son de bypass de las válvulas limitadoras, las válvulas 7.5 y 7.3 que bloquean a las electroválvulas en caso de que se quiera controlar las presiones manualmente, y las válvulas 7.2 y 7.4 que se abren para descargar el fluido que queda en la cámara de confinamiento. También se puede ver un filtro de aceite (12), válvulas antirretorno para proteger las bombas (4.1 y 4.2), y un regulador de caudal (24) cuya función es evitar una descarga violenta en caso de que se abra la válvula 16.1 teniendo alta presión en la línea.

La conexión T de la **Figura 12** y de la **Figura 13** existe para descargar el fluido de la cámara de confinamiento al finalizar el ensayo.

Al momento del ensayo, las válvulas 7.1, 7.2, 7.4 y 16.1 deben estar cerradas y las válvulas 7.3 y 7.5 deben estar abiertas para que el fluido circule por las electroválvulas.

La celda triaxial cuenta con un sistema de control responsable de llevar a cabo los procedimientos de un ensayo triaxial o uniaxial y de registrar los datos necesarios para obtener los parámetros deseados de las rocas ensayadas. Los elementos del sistema de control se encuentran dentro de un tablero eléctrico montado a la pared. El tablero cuenta con una pantalla táctil, botones y luces que hacen de interfaz con el usuario. Los elementos utilizados para el sistema de control son aquellos que se mencionan en el informe 'Material a adquirir' [6]. Por último, se cuenta con un software de procesamiento de datos para que el usuario pueda obtener los parámetros de las rocas ensayadas con mínimo esfuerzo.

La **Figura 14** es un plano unifilar del cableado eléctrico. En el **Anexo sección 0** y **sección 14.3** se encuentran los planos eléctricos completos, la numeración de los planos se corresponde con la numeración que tienen los cables, asimismo, los colores en los planos son los mismos que los colores de los cables utilizados.

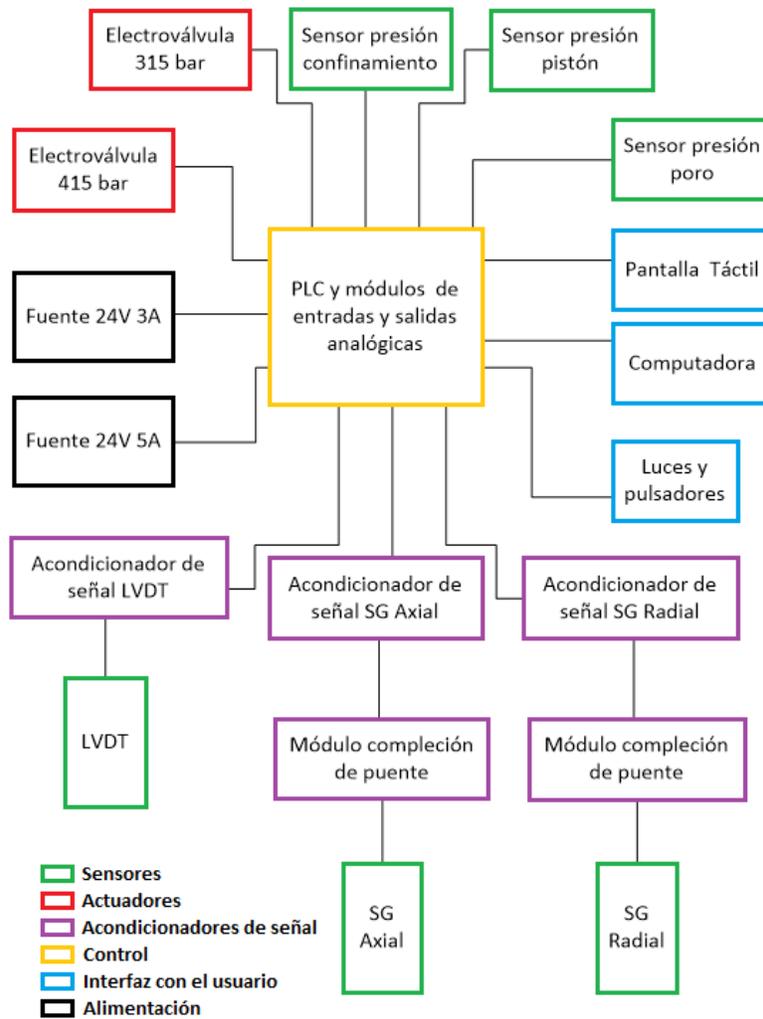


Figura 14. Plano unifilar de las conexiones eléctricas.

5 Especificaciones técnicas

5.1 Especificaciones de la muestra

5.1.1 Dimensiones

- Diámetro: 1" o menor.
- Largo: 50,5 mm \pm 0,2 mm

5.1.2 Material

- Cualquier material de superficie lisa.

5.2 Especificaciones mecánicas

5.2.1 Presión de confinamiento

- Presión de confinamiento mínima: 30 Bar / 435 Psi
- Presión de confinamiento máxima: 400 Bar / 5800 Psi

5.2.2 Pistón hidráulico

- Presión de pistón hidráulico mínima: 1,3 Bar / 189 Psi
- Presión de pistón hidráulico máxima: 300 Bar / 4350 Psi

- Carrera total: 1,7 mm
- Fuerza axial máxima sin presión de confinamiento: 530 kN
- Fuerza axial máxima con presión de confinamiento máxima: 471 kN

5.3 Especificaciones eléctricas

Todas las especificaciones eléctricas se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la norma ASTM D7012 [5].

5.3.1 Sensor de presión de confinamiento

- Rango de medición: 0 a 630 bar
- Resolución: 0,063 bar

5.3.2 Sensor de presión de pistón hidráulico

- Rango de medición: 0 a 400 bar
- Resolución: 0,04 bar

5.3.3 Sensor de desplazamiento (LVDT)

- Rango dinámico: 2,5 mm
- Resolución: 0,125 μm

5.3.4 Sensor de deformación axial

- Rango con *gage factor* 2: -240 $\mu\epsilon$ a 21700 $\mu\epsilon$ (Signo positivo compresión)
- Resolución con *gage factor* 2: 3,30 $\mu\epsilon$

5.3.5 Sensor de deformación radial

- Rango con *gage factor* 2: -8960 $\mu\epsilon$ a 2210 $\mu\epsilon$ (Signo positivo compresión)
- Resolución con *gage factor* 2: 1,67 $\mu\epsilon$

5.3.6 Electroválvula de confinamiento

- Rango: 30 a 400 bar.
- Resolución: 0,04 bar

5.3.7 Electroválvula de presión de pistón

- Rango: 1,2 a 300 bar.
- Resolución: 0,03 bar

5.3.8 PLC

- Tiempo de ciclo: 20 ms
- Período de la actualización del registro de datos: 320 ms

5.4 Especificaciones de ensayo

- Ensayos triaxiales de compresión rápida
- Ensayos *multistage*
- Ensayos uniaxiales
- Establecimiento de la presión de confinamiento en menos de 5 minutos
- Avance del pistón a tasa de deformación constante
- Visualización de variables relevantes en tiempo real.

6 Diseño del sistema de control

El diseño del sistema de control se realiza en base a los procedimientos de un ensayo triaxial y a las especificaciones determinadas por la norma ASTM D7012. Las especificaciones relevantes para el sistema del control son aquellas que determinan cómo debe ser aumentada la presión de confinamiento y cómo debe ser llevada a cabo la compresión.

Para la etapa de aumento de presión de confinamiento del ensayo triaxial se tienen las siguientes especificaciones [5]

- Aumento uniforme de la presión.
- Nivel deseado de presión en menos de 5 minutos.
- Presión axial y lateral no deben diferir en más del 5% en ningún instante.
- No debe desviarse por más del 1% de la presión establecida.

La última especificación se cumple inherentemente debido al diseño mecánico de la celda triaxial que permite que la presión de confinamiento actúe sobre todas las caras de la muestra.

Para la etapa de compresión del ensayo triaxial la norma indica las siguientes especificaciones

- Aplicación continua y suave de la carga hasta que la carga se vuelva constante, se reduzca, o se alcance un valor predeterminado de deformación.
- Aplicación de la carga a tasa de aumento de deformación constante con una tolerancia de +/-10%.
- La tasa de crecimiento debe ser tal que lleve a la rotura a una muestra similar sin confinar entre 2 y 15 minutos.
- Mínimo 10 lecturas de tensión y deformación equiespaciadas en el rango del ensayo.
- Se debe registrar la máxima tensión obtenida.
- Durante la aplicación de la carga axial, el nivel establecido de presión de confinamiento no debe variar más del 1%.

La norma ASTM D7012 no tiene indicaciones acerca de ensayos con medición de la presión de poro, esta información se obtiene a partir de bibliografía y *papers* relevantes y se resume en la sección 3.4.

El cuerpo de la celda triaxial, tal como fue diseñado y construido no permite una medición adecuada de la presión de poro, principalmente porque se cuenta con un único canal de conexión a la muestra cuando en la sección se explica que se necesitan dos. Por esta razón se decide llevar a cabo unos rediseños sobre la celda triaxial y verificar su factibilidad con el Ing. Pablo Leslabay.

6.1 Análisis de factibilidad para medir la presión de poro

El rediseño consiste en transformar el canal de desagote del fluido hidráulico que queda en la cámara de confinamiento al finalizar el ensayo, en un canal de conexión a la cara inferior de la muestra. Para esto es necesario bloquear la cámara de confinamiento del

canal de conexión a la muestra. Esto se observa en la **Figura 15**. Esto implica perder la ventaja de tener una presión hidrostática aplicada sobre la muestra con solo establecer una presión de confinamiento, ya que se bloquea el canal de equalizaciones. La solución a este problema es acompañar el aumento de presión de confinamiento con el avance del pistón de manera tal de tener la misma tensión en todas las caras de la muestra; esto es la manera usual en la que operan otras celdas triaxiales.

El desagote del fluido de la cámara de confinamiento puede hacerse practicando otro canal en la base de la cámara de confinamiento.

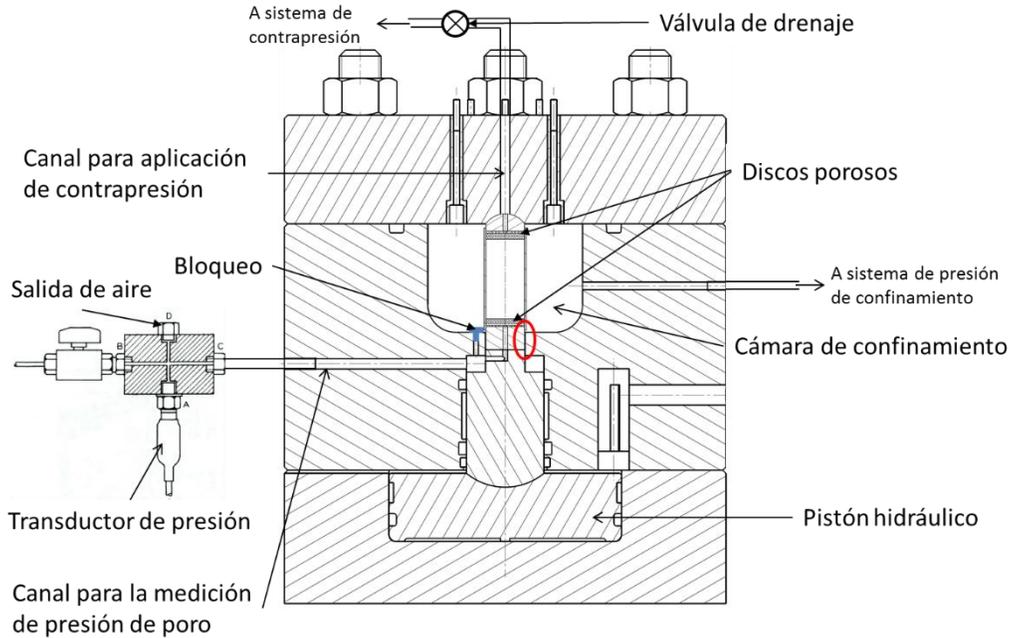


Figura 15. Esquema de la celda triaxial con las modificaciones propuestas.

Para incluir la utilización de discos porosos se reduce la longitud de los asientos de la muestra, a su vez a estos se les ranuran las bases para facilitar la dispersión del líquido de saturación como se ve en la **Figura 16** y al pistón buzo se le practica un canal para que haya una conexión hasta la cara inferior de la muestra.

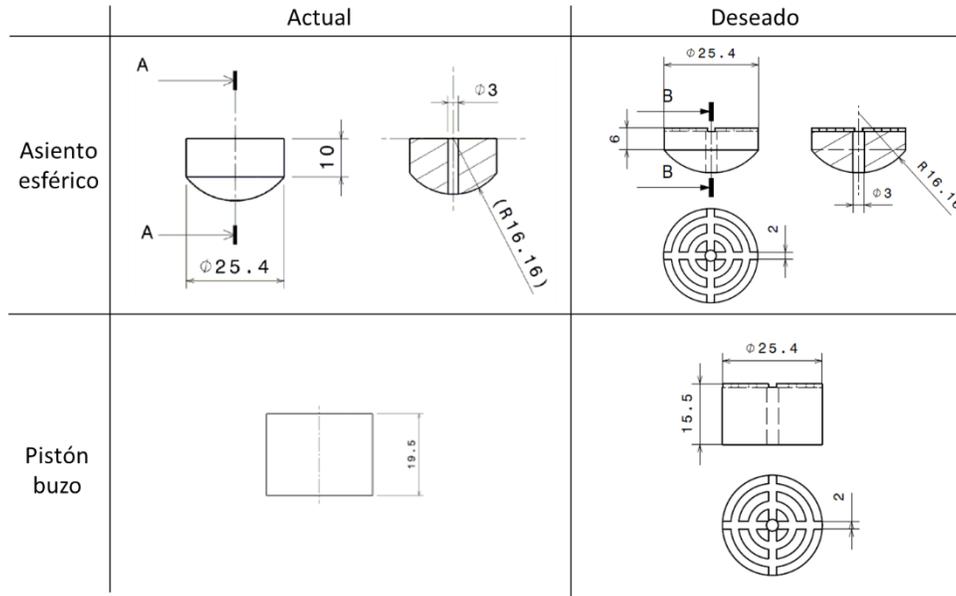


Figura 16. Modificaciones propuestas para los asientos de la muestra de roca.

Por último, es necesario incluir un tercer circuito de presión independiente en la central hidráulica para brindar la contrapresión.

El principal problema de este rediseño, además de los trabajos sustanciosos que se requieren, es la dificultad de sellar la zona entre el pistón buzo y el cuerpo de la celda marcado en rojo en la **Figura 15**.

La especificación de la medición de la presión de poro se abandona por las dificultades previamente detalladas y porque el Geólogo Agustín Sosa Masaro, en su experiencia realizando ensayos triaxiales en el laboratorio de geomecánica de la Universidad de Texas en Austin, no realizó ensayos con medición de la presión de poro por los tiempos que demoran estos tipos de ensayos (del orden de días); por lo tanto se comprende que la medición de la presión de poro no es fundamental para este tipo de ensayos.

6.2 Selección de la instrumentación

Para la selección de la instrumentación, además de averiguar e investigar las distintas posibilidades y los distintos modelos de equipos, se utilizaron contactos de gente que podía dar consejo en el tema. Se trabajó con 4 proveedores distintos, estos fueron

- Rexroth del grupo Bosch
- Omega
- Schneider
- Electro Tucumán

En la **Figura 17** y en la **Figura 18** se muestra la ubicación de los distintos sensores y actuadores necesarios para el control

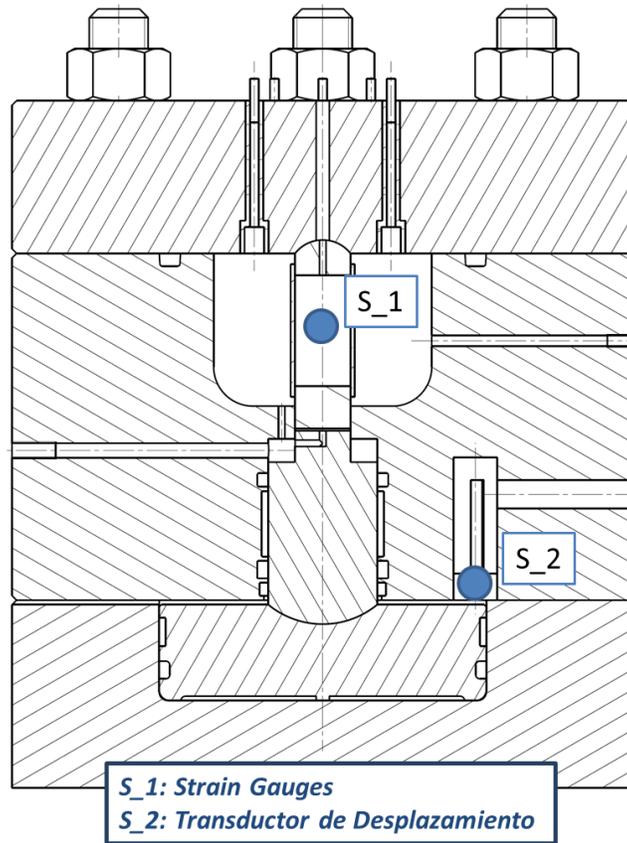


Figura 17. Ubicación de los sensores dentro de la celda triaxial.

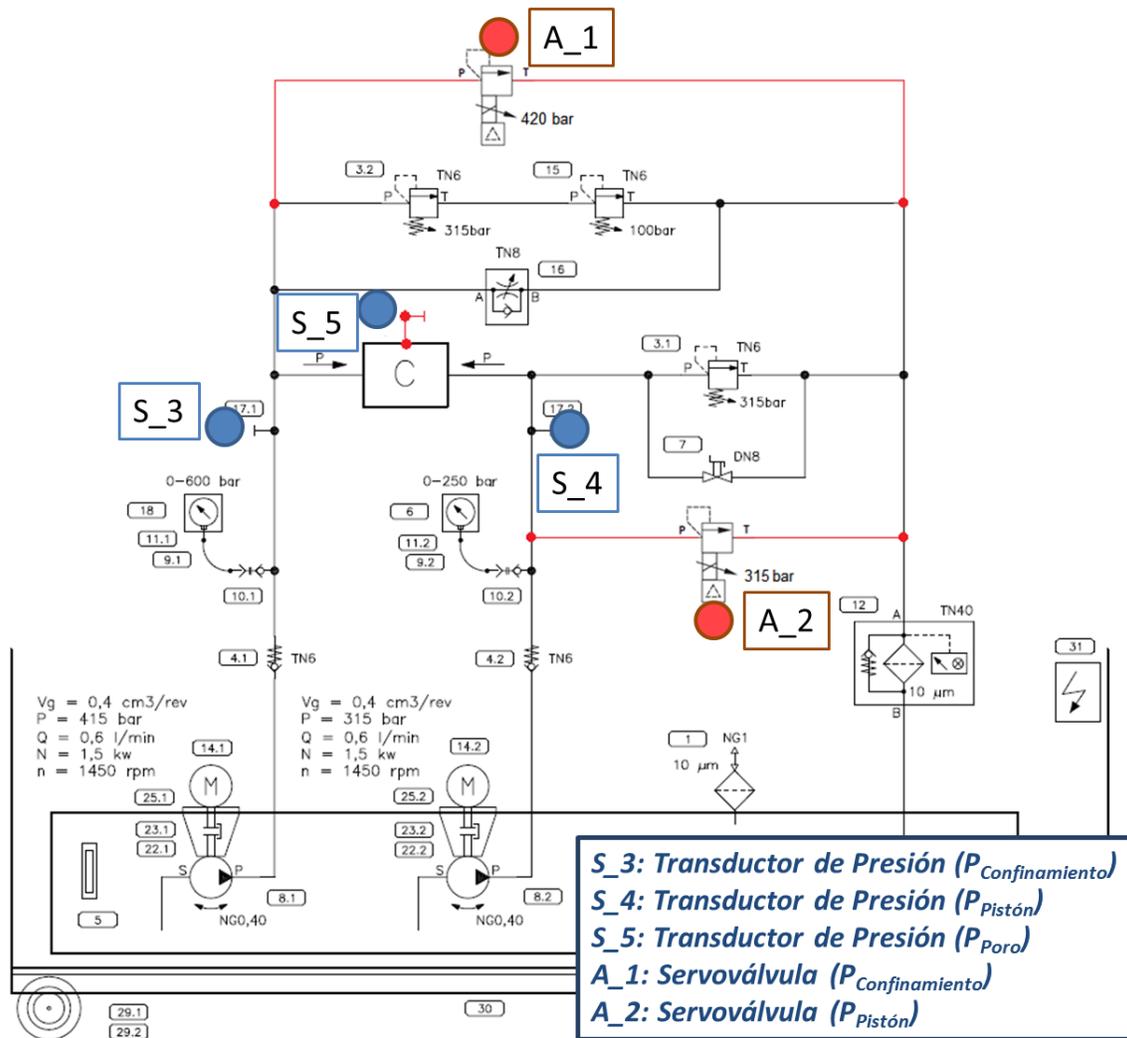


Figura 18. Ubicación de los sensores y actuadores en la central hidráulica.

Para mayor información de la instrumentación adquirida, incluyendo modelos, precios y características principales, referirse al informe 'Material a Adquirir' [5]

6.2.1 Sensores

6.2.1.1 Sensores de presión

Para la medición de las presiones se utilizan los transductores de presión de Rexroth HM20 eligiéndolos según el rango de presiones a medir. Se evalúa la posibilidad de comprar sensores HBM a raíz de una reunión con un ingeniero de ventas, el Ing. Bruno Binora, pero se descarta debido a la diferencia de precios.

6.2.1.2 Transductor de desplazamiento

En la primera etapa del proyecto se había previsto la utilización de un sensor de desplazamiento LVDT marca HBM cuya carrera es de 2 mm. En base al modelo elegido se tomaron las dimensiones de la cavidad para este sensor. También estaba previsto que el sensor fuera introducido en la cavidad utilizando una camisa que adaptara la forma

irregular del sensor al del espacio cilíndrico donde iría ubicado. Sin embargo, en la reunión con el ingeniero de ventas de HBM se detecta que el largo de la cavidad para el sensor no es el correcto y que es necesario profundizar la cavidad. A este problema se le suma el elevado precio de este sensor con lo cual se termina eligiendo un sensor LVDT de marca Omega más pequeño, de manera tal que entre en la cavidad sin necesidad de volver a mecanizar, y con un rango de 3 mm que deja un mayor margen para el montaje del mismo en una posición que abarque toda la carrera del pistón. En la **Figura 19** se observa el LVDT utilizado.



Figura 19. Sensor LVDT utilizado para la medición del desplazamiento del pistón.

El LVDT (*linear variable differential transducer*) consiste de un núcleo ferromagnético móvil con tres bobinas como se muestra en la **Figura 20**. La bobina primaria se excita con una corriente alterna y esta induce tensiones en las bobinas secundarias que están conectadas de manera tal que la salida es la resta de las tensiones inducidas en cada una de ellas. De esta manera, cuando el núcleo está en el centro, la tensión de salida es nula ya que se cancelan entre sí. Cuando el núcleo se mueve en una dirección, la tensión inducida en la bobina a la cual se acerca el núcleo aumenta y en la otra disminuye, obteniéndose a la salida una tensión de magnitud proporcional al desplazamiento del núcleo. Si se mueve en la dirección opuesta ocurre lo mismo pero invirtiéndose la fase de la salida.

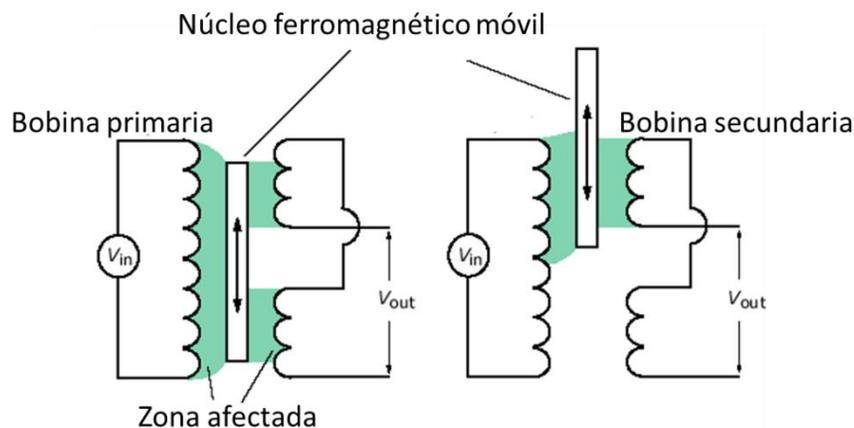


Figura 20. Esquema explicativo del principio de funcionamiento del LVDT.

Como la entrada y la salida son señales de corriente alterna, es necesario un acondicionador de señales. Para esto se eligió el modelo recomendado por Omega para este transductor.

Para el montaje del LVDT en la cavidad del cuerpo de la celda triaxial se diseña una camisa teniendo en cuenta ciertas consideraciones de montaje basados en el manual del producto.

- Preferentemente debe ser fijado con un agarre de tipo abrazadera
- Se debe ajustar la abrazadera con cuidado de no dañar el cuerpo del sensor
- La abrazadera no debe ser de un material magnético

También se tiene en consideración que la posición final del transductor debe poder ser regulable para poder ubicarlo en una posición donde el rango de medición abarque el recorrido completo del pistón. El diseño que se realiza y mecaniza en plástico se muestra en la **Figura 21**.

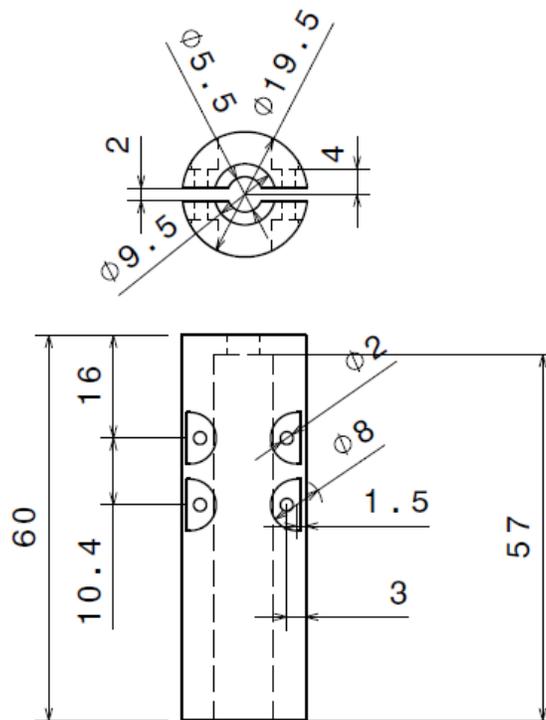


Figura 21. Dimensiones de la camisa que soporta al LVDT.

Se observa que la camisa consiste de un cilindro cortado longitudinalmente a la mitad con una fresa de 2 mm de diámetro. El diámetro interior del cilindro coincide con el diámetro exterior del LVDT para que funcione como una abrazadera. El diámetro exterior es medio milímetro menor al diámetro de la cavidad ya que no se quiere que la camisa entre a presión y lastime al sensor y a la vez no se quiere que haya libertad de movimiento lateral.

La **Figura 22** indica la posición en la cual va el LVDT y se ve que coincide con la posición de los tornillos de apriete; el largo en exceso de la camisa es para que haga tope en la parte superior de la cavidad. La posición del LVDT puede ser ajustada desplazándolo

para arriba o abajo a través del agujero interior de la camisa para luego fijarlo ajustando los tornillos.

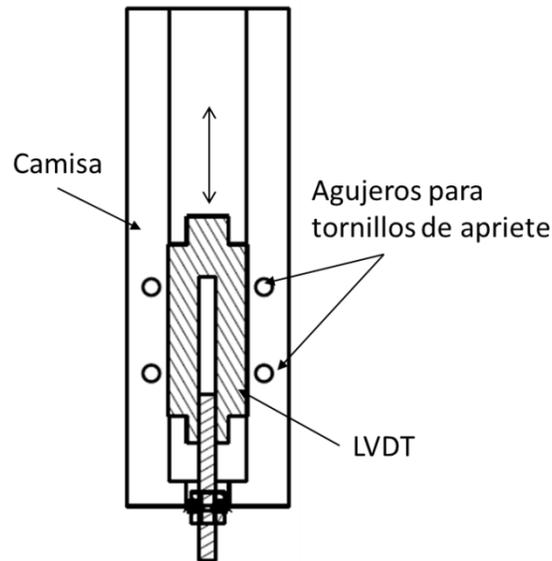


Figura 22. Esquema del montaje del LVDT en su camisa.

Para que el conjunto del LVDT y la camisa no caigan hacia abajo se construye otra pieza de plástico que hace de tapón al entrar forzado en la cavidad sosteniendo la camisa que a su vez sostiene al LVDT. Tiene un pequeño agujero de 1,5 mm de diámetro que sirve para extraer el tapón con un alambre, esto se observa en la **Figura 23**.

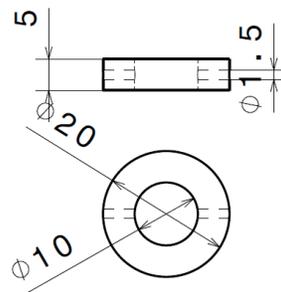


Figura 23. Dimensiones del tapón del conjunto.

La **Figura 24** muestra cómo queda montado este conjunto en la cavidad.

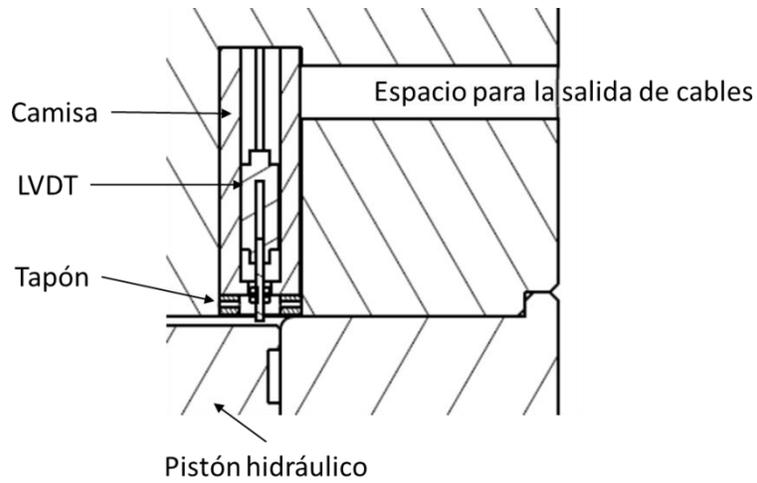


Figura 24. Conjunto del LVDT montado en la cavidad correspondiente de la celda triaxial.

En la **Figura 25** se puede observar el conjunto previo a ser ensamblado

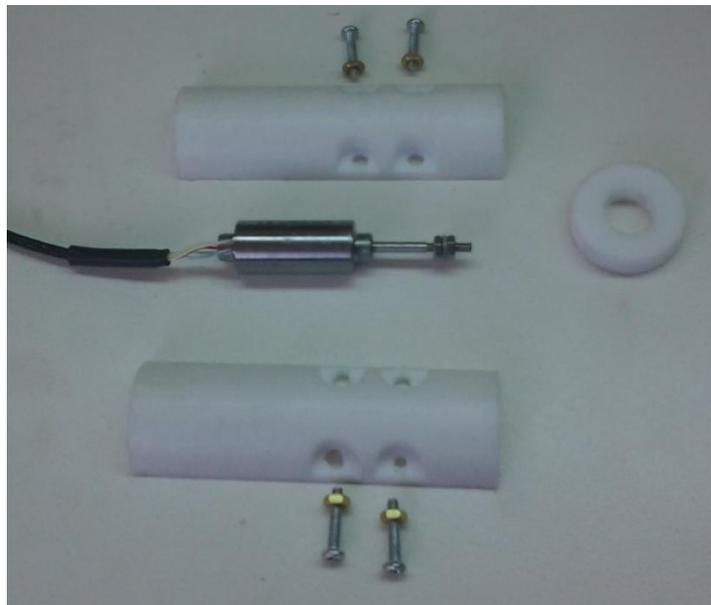


Figura 25. Piezas de la camisa del LVDT previas a ser ensambladas.

En la **Figura 26** se muestra el conjunto ensamblado



Figura 26. Conjunto camisa y LVDT ensamblado.

En la **Figura 27** se puede ver como se introduce la camisa y el LVDT en la cavidad



Figura 27. Montaje de la camisa y el LVDT en la cavidad.

En la **Figura 28** se muestra la camisa y el LVDT metidos hasta que hacen tope contra la pared superior de la cavidad.



Figura 28. LVDT con su camisa en su posición.

En la **Figura 29** se observa la cavidad con el tapón puesto



Figura 29. Conjunto completo montado en posición.

En la **Figura 30** se muestra el alambre que se usa para extraer el tapón



Figura 30. Aproximación del alambre para extraer el tapón.

En la **Figura 31** se observa el método de extracción del tapón

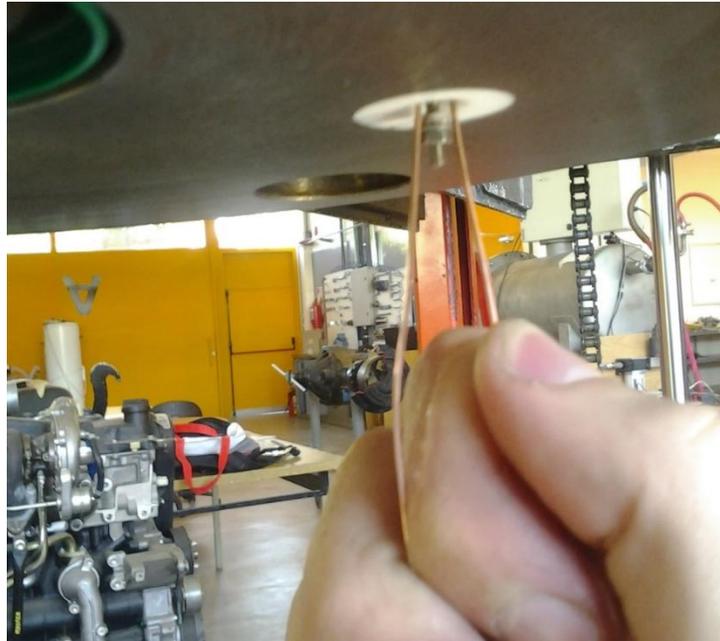


Figura 31. Extracción del tapón.

En la **Figura 32** se observa cómo se extrae la camisa junto con el LVDT con el mismo alambre utilizado en el paso anterior; si bien no hay interferencia con las paredes de la cavidad, el conjunto no cae por gravedad.



Figura 32. Extracción de la camisa y el LVDT.

Previo al montaje del LVDT, se calibra el acondicionador de señal del LVDT, esto se hace regulando un ajuste de offset y otro de ganancia. El procedimiento de calibración es el siguiente

1. Se anula el offset de la electrónica moviendo un jumper del acondicionador de señal a una posición de null, como indica el manual; esto cortocircuita las entradas del LVDT con lo cual la salida debe ser nula, si no lo es, con la perilla de offset se lleva la salida a 0V.
2. Se saca el jumper de la posición de null y se busca la posición del LVDT que dé 0V para ubicar el centro del rango mecánico. Para esto se usa un micrómetro como se muestra en la **Figura 33** y se registra la medición del micrómetro en la posición de 0V.



Figura 33. Proceso de calibración del LVDT.

3. Respecto de la posición del centro, se ajusta el micrómetro a 1,25 mm para un lado y se ajusta la ganancia para que a la salida haya 10V
4. Se verifica que a 1,25 mm y a -1,25 mm la salida sea $\pm 10V$ y también se registra la salida a $\pm 0,75$ mm para tener más puntos con los cuales evaluar la linealidad del sensor. Estos resultados se grafican en la **Figura 34** donde se puede observar una perfecta linealidad.

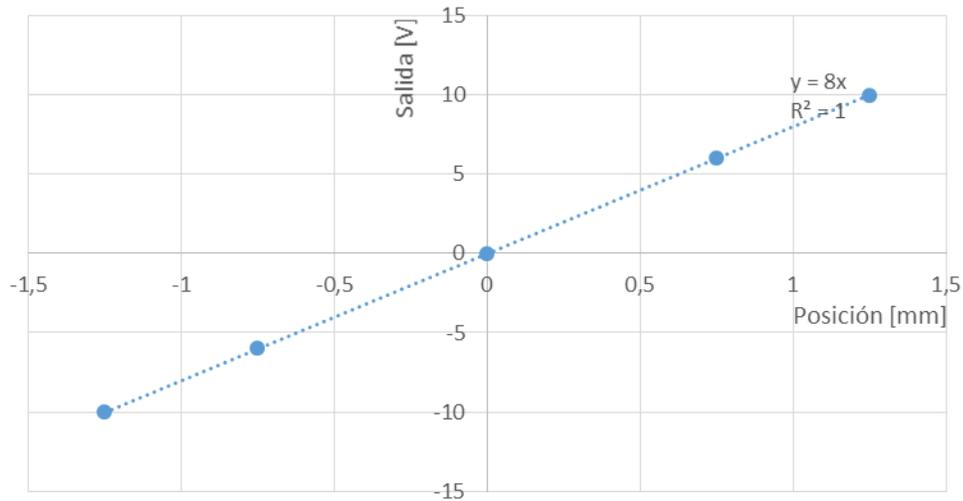


Figura 34. Curva característica del LVDT.

6.2.1.3 Sensores de deformación

Los sensores que se utilizan para medir la deformación son aquellos que fueron previstos en la primera etapa del proyecto, estos son *strain gages* que se ubican en posición radial y circunferencial alrededor del testigo de roca como se muestra en la **Figura 35**.

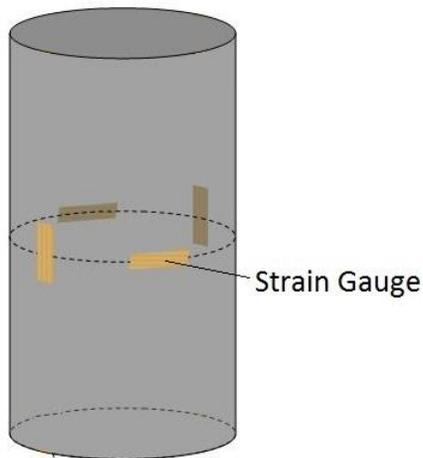


Figura 35. Ubicación de los *strain gages* en la muestra de roca.

Los *strain gages* son sensores cuya resistencia varía con la deformación. En la **Figura 36** se muestra el tipo de *strain gage* usado para medir deformación que es también el más común.

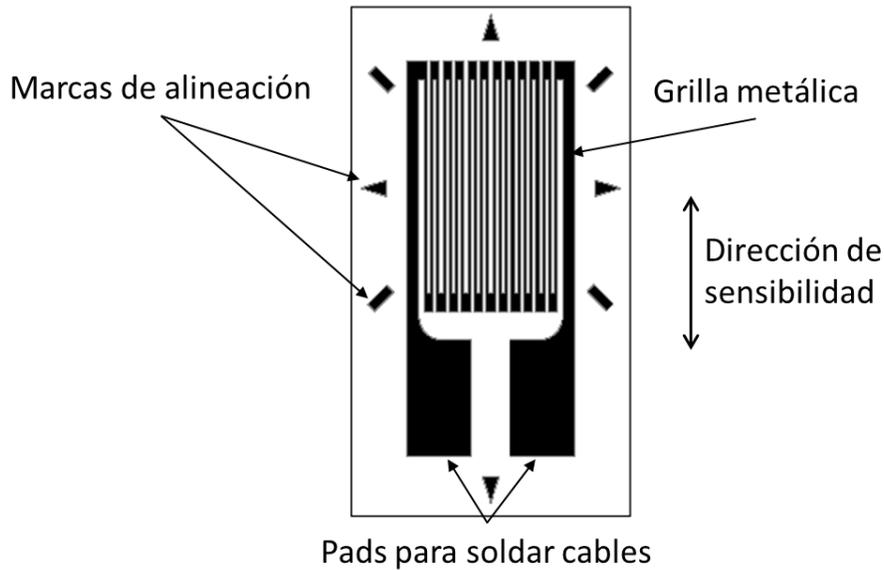


Figura 36. Esquema de un strain gage típico.

El *strain gage* va pegado sobre la superficie donde se desea medir la deformación. Al deformarse la pieza, el sensor acompaña la deformación provocando un cambio en la resistencia ya que cambia la sección y el largo del conductor. El diseño de la grilla metálica hace que el sensor sea sensible a una única dirección de deformación.

La sensibilidad del *strain gage* está determinada por el *gage factor* (GF) que se define como

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}$$

Donde ε es la deformación y R_0 la resistencia nominal del sensor. El GF de cada *strain gage* es un valor alrededor de 2, y siempre está especificado por el fabricante.

La variación de resistencia de los *strain gages* con la deformación es muy pequeña. Lo usual es usarlos en una configuración de puente de Wheatstone, alimentado con una tensión y obteniendo a la salida un voltaje que es nulo cuando no hay deformación, y que tiene distinto signo cuando hay compresión o tracción. En la **Figura 37** se muestra la configuración de puente de Wheatstone

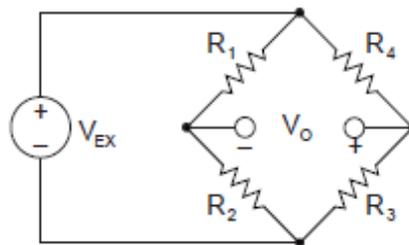


Figura 37. Circuito del puente de Wheatstone.

La tensión de salida de este circuito es

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] V_{EX}$$

De donde se puede observar que si $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$ la salida es nula y se dice que el puente está balanceado.

Si se utiliza un *strain gage* en lugar de R_4 se tiene

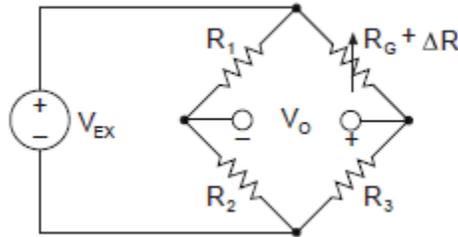


Figura 38. Circuito del puente de Wheatstone utilizando un *strain gage*.

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_G + \Delta R} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] V_{EX} \quad (1)$$

Suponiendo que $R_G = R_3$ y que $R_1 = R_2$, y a partir de la expresión de GF escribiendo $\Delta R = R_G GF \varepsilon$ y reemplazando en (1) se tiene

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = -\frac{GF \cdot \varepsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF \cdot \frac{\varepsilon}{2}} \right)$$

Que puede reescribirse como

$$\varepsilon = -\frac{4V_r}{GF(1 + 2V_r)}$$

Donde $V_r = \frac{V_o}{V_{EX}}$

Esto es en el caso en que el puente este perfectamente balanceado, lo cual no ocurre en la práctica debido a variaciones en las resistencias utilizadas. Para obtener la medición de deformación correcta, a la lectura de la medición se le resta la lectura de la salida con la pieza en reposo.

$$V_r = \frac{V_o}{V_{EX}} \Big|_{\text{bajo medición}} - \frac{V_o}{V_{EX}} \Big|_{\text{en reposo}}$$

Un último detalle para el cálculo de la deformación a partir de la medición de tensión es invertir el signo de la deformación ya que la convención de signos en el ambiente de la geomecánica es opuesta al de la mecánica de materiales. Entonces para los cálculos de deformación se usa

$$\varepsilon = \frac{4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \quad (2)$$

Otro aspecto a tener en consideración es el de la resistencia de los cables que van de las terminales del *strain gage* al puente de Wheatstone como se ve en la **Figura 39**. Estas resistencias en serie con la resistencia nominal del sensor pueden desbalancear el puente de manera considerable con lo cual a la salida, con la pieza en reposo, el voltaje puede ser muy distinto a 0V, y si bien puede corregirse matemáticamente como se explicó anteriormente, el rango de medición puede quedar comprometido. La presencia de estas resistencias de cables también disminuye la sensibilidad de los *strain gages* y cambios en la temperatura inciden en la resistencia de estos cables introduciendo error en la medición. La utilización de *strain gages* de mayor resistencia nominal disminuye la incidencia de estos factores.

Estos posibles problemas se pueden evitar con una conexión de tres cables como se muestra en la **Figura 40**. De esta manera la resistencia R_{L1} está en serie con R_G y R_{L2} en serie con R_4 y si estas resistencias de cable son idénticas, se mantiene la simetría del puente y queda balanceado. R_{L3} no tiene efecto en la salida del puente ya que es parte del cable de medición.

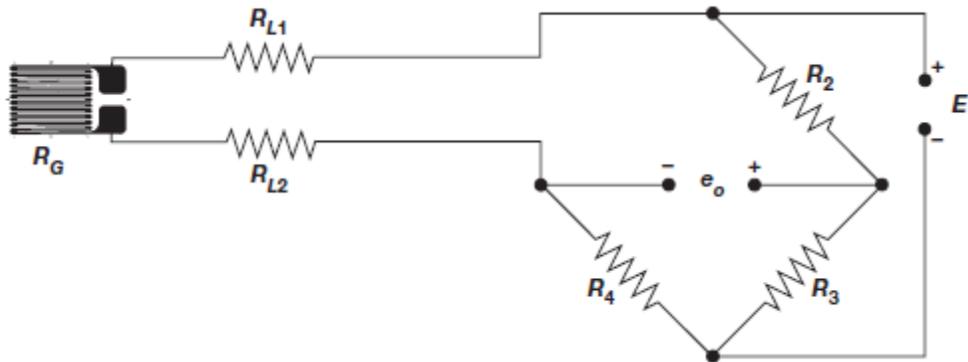


Figura 39. Conexión del *strain gage* de dos hilos.

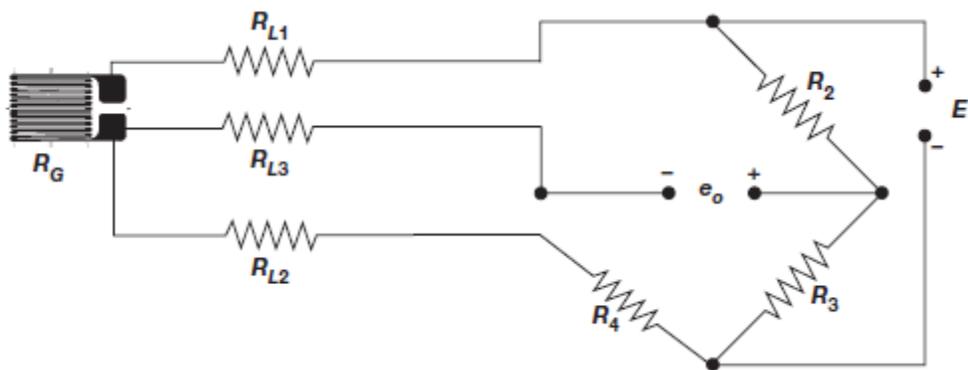


Figura 40. Conexión del *strain gage* de tres hilos.

Teniendo en cuenta estas características de los *strain gages*, se seleccionan los equipos necesarios del catálogo de la firma Omega.

Se eligen *strain gages* de 350 Ω debido a que son menos sensibles a cambios de temperatura que los de 120 Ω . El tamaño de la grilla se elige de 10 mm de largo, que por

un lado es un tamaño suficientemente chico como para poder ser ubicado en la roca alejado de los bordes, y suficientemente grande como para ocupar una superficie de medición que promedie deformaciones en lugar de medir defectos puntuales.

Se elige un módulo de compleción de puente compatible con los *strain gages* elegidos y un acondicionador de señal cuya salida se adecúe al rango de entrada de los módulos analógicos del PLC.

Se planifica el sistema de medición de deformación para 4 *strain gages*, 2 radiales y 2 axiales, para luego hacer un promedio de cada par de sensores. En base a esto se compran 4 módulos de compleción de puente pero sólo 2 acondicionadores de señal debido al precio más elevado de estos. Se deja la adquisición de 2 acondicionadores adicionales para un futuro en caso de que se desee tener la posibilidad de instalar 4 *strain gages* por muestra y promediar, en lugar de 2.

Los módulos de compleción de puente tienen resistencias de 120 Ω y 350 Ω precisas y estables para aceptar *strain gages* de estas resistencias nominales; cuentan con un potenciómetro de cerado para balancear el puente.

Para calibrar los *strain gages* se determina primero el rango en el cual se desea medir. El *strain gage* axial en teoría siempre mide compresión y se elige un rango máximo de compresión de 20000 $\mu\epsilon$ teniendo en cuenta los resultados de ensayos previos, y se deja un pequeño margen de tracción de 250 $\mu\epsilon$, suponiendo un GF de 2. Para el *strain gage* radial se elige un rango de deformación que contemple que habrá compresión al aplicar presión de confinamiento y luego tracción en el momento de compresión por efecto Poisson.

En la **Figura 41** se muestra la curva característica del acondicionador de señal calibrado para el *strain gage* axial. Se grafica la salida del puente de Wheatstone como entrada al acondicionador en milivolts, y la salida del acondicionador de señal en volts. Para obtener distintos puntos en la curva, se eligen distintas entradas en milivolt; para tener estas entradas distintas se conecta un *strain gage* al módulo de compleción, y en lugar de deformar el *strain gage* para obtener distintos valores de salida, se varía el potenciómetro de cerado del módulo de compleción para desbalancear adrede el puente y tener señales del orden de las decenas de milivolt estables. De esta manera no es necesario estar deformando una muestra con un *strain gage* pegado para realizar la calibración.

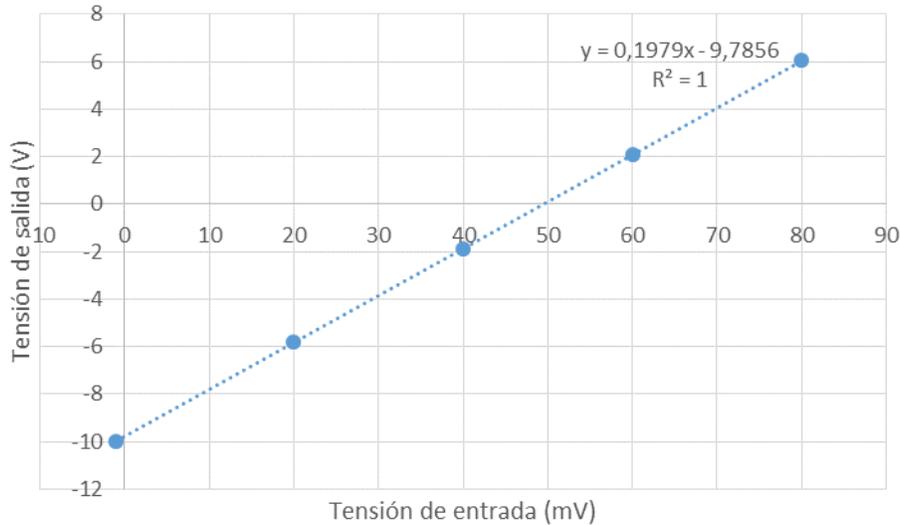


Figura 41. Curva característica del acondicionador de señales del *strain gage* axial.

En la **Figura 42** se observa la curva característica del acondicionador de señal calibrado para el *strain gage* radial

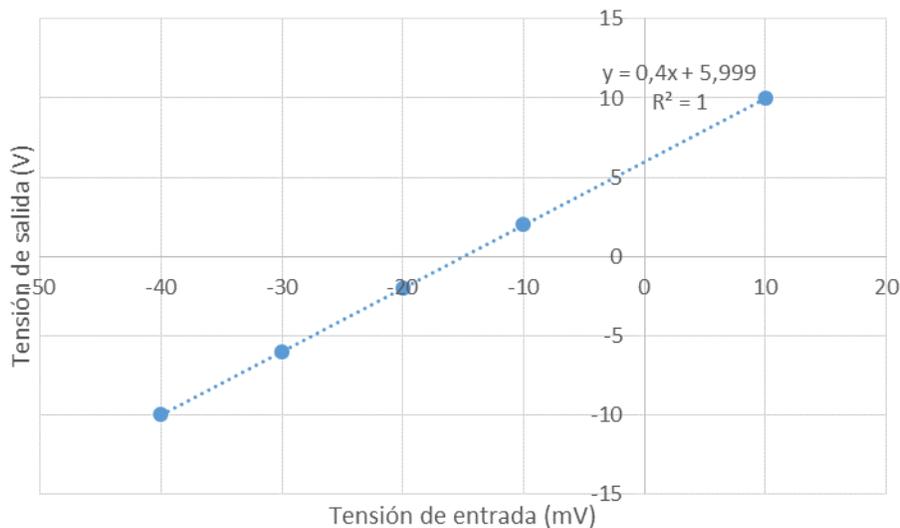


Figura 42. Curva característica del acondicionador de señal del *strain gage* radial.

En ambos casos se observa una linealidad casi perfecta. Las ecuaciones de las curvas de ajuste se utilizan para determinar, a partir de la lectura del PLC, el valor de la tensión de salida del puente de Wheatstone; luego este valor es convertido a deformación a partir de la ecuación (2).

El acondicionador de señal también proporciona la tensión de excitación del puente de Wheatstone, que se elige en 9V, para que sea menor a los 10V máximos que especifica el fabricante del *strain gage* y elevado para tener una mayor señal de salida del puente. De esta manera la amplificación del acondicionador de señales puede ser menor.

6.2.2 Actuadores

Las electroválvulas limitadoras de presión se eligen teniendo en cuenta que en el diseño hecho por Rexroth de la central hidráulica manual también se utilizan válvulas limitadoras de presión.

Estas dos electroválvulas limitadoras de presión actúan sobre la presión de confinamiento y la presión del pistón hidráulico. Las electroválvulas elegidas cuentan con la electrónica integrada y no requieren de un acondicionador de señal.

Para el ajuste de la presión se aplica un valor de tensión al mando de la electroválvula que es convertido en una corriente eléctrica que circula por un solenoide. Este solenoide le induce una fuerza a un vástago que bloquea el paso del fluido y solo se abre cuando la presión es la suficiente como para vencer esta fuerza. De esta manera se controla la presión aguas arriba de la válvula.

6.2.3 Control

Para el sistema de control se decide usar un PLC con los módulos de entradas y salidas analógicas necesarios. Como interfaz con el usuario se planea utilizar una pantalla táctil. La idea detrás de esto es tener un sistema de control que sea del tipo *stand-alone*, con instrumentos diseñados exclusivamente para el control de procesos y que no dependa de una computadora de uso general que puede traer problemas según el sistema operativo de la misma.

Se decide usar equipos de la marca Schneider. Para la compra de estos materiales se tuvo una reunión con el Ingeniero de Aplicaciones y Productos de Schneider, Eduardo Carro. En esta reunión se determinaron los modelos más adecuados para la aplicación.

6.2.4 Accesorios

Para conocer qué accesorios son necesarios para el montaje de un sistema de control, el autor de este informe se puso en contacto con el Ing. Juan Barbacci, quién tiene experiencia práctica en el armado de tableros eléctricos. El Ing. Juan Barbacci indicó qué elementos eran necesarios para el control y le mostró al autor de este informe distintos tableros para que pudiera observar la organización que llevan. Algunos de los elementos necesarios son:

- Interruptores termomagnéticos
- Borneras
- Rieles DIN
- Cablecanal ranurado
- Topes de borneras
- Identificadores de cables
- Numeradores de bornera
- Tablero

Para determinar el número aproximado de borneras a comprar se hizo un análisis previo de las conexiones como se observa en la **Tabla 1**.

Elemento	Conectores y/o cables necesarios	Nº Polos	Cantidad	Nº de conexiones
Electroválvulas	Conectores Macho - Hembra 6 polos + conductor de protección	6	2	12
	Cable 6 Polos + Conductor de protección + apantallado			
Transductores de Presión	Conectores Macho - Hembra 4 polos	4	3	12
LVDT	Conector Hembra BNC	4	1	4
Strain Gauges	-	4	4	16
Pulsadores	-	2	2	4
Indicadores luminosos	-	2	2	4
Borneras			Total	52
			Total + 10%	57

Tabla 1. Estimación de la cantidad de conexiones requeridas.

Para determinar la cantidad de cablecanal, riel DIN y el tamaño del tablero requeridos, se hizo un diseño de la topografía del tablero que se muestra en la **Figura 43**.

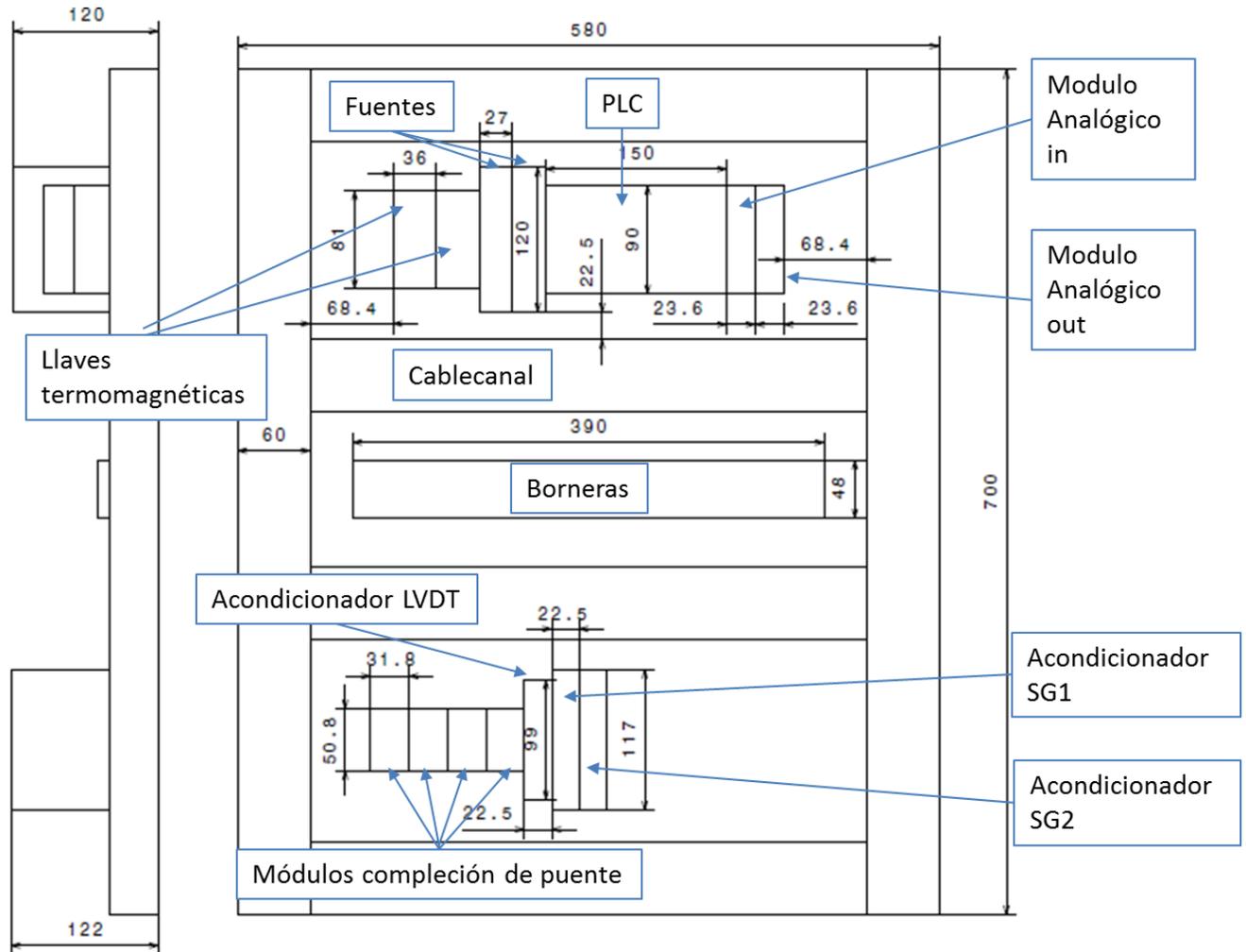


Figura 43. Esquemático de la disposición de equipos en el panel de control.

Como se observa en la **Figura 43** se utilizan dos fuentes, una para la lógica, y otra para la parte de potencia que alimenta a las electroválvulas. De esta manera se aísla a la lógica

de la parte de potencia que es más susceptible al ruido. Otro detalle de diseño es que las llaves termomagnéticas y las fuentes se encuentran en la esquina izquierda superior para limitar el espacio físico por donde pasan cables que transportan corriente alterna. Esta disposición de los equipos también deja espacio para futuras expansiones dentro del tablero eléctrico, por ejemplo, dos acondicionadores adicionales de SG como se mencionó en la sección 6.2.1.3.

6.3 Montaje del material comprado

Luego de efectuar la orden de compra y recibir el material adquirido, se hace el montaje de todos los elementos en su posición correspondiente. La **Figura 44** muestra el tablero eléctrico con todos los elementos montados en su posición. Se tiene el reparo de no pasar cables de corriente continua por donde están los cables de corriente alterna como se observa en la **Figura 45**. También se utilizan topes de bornera para separar los equipos entre sí, aprovechando la disponibilidad de espacio, para disminuir el riesgo de interferencias.

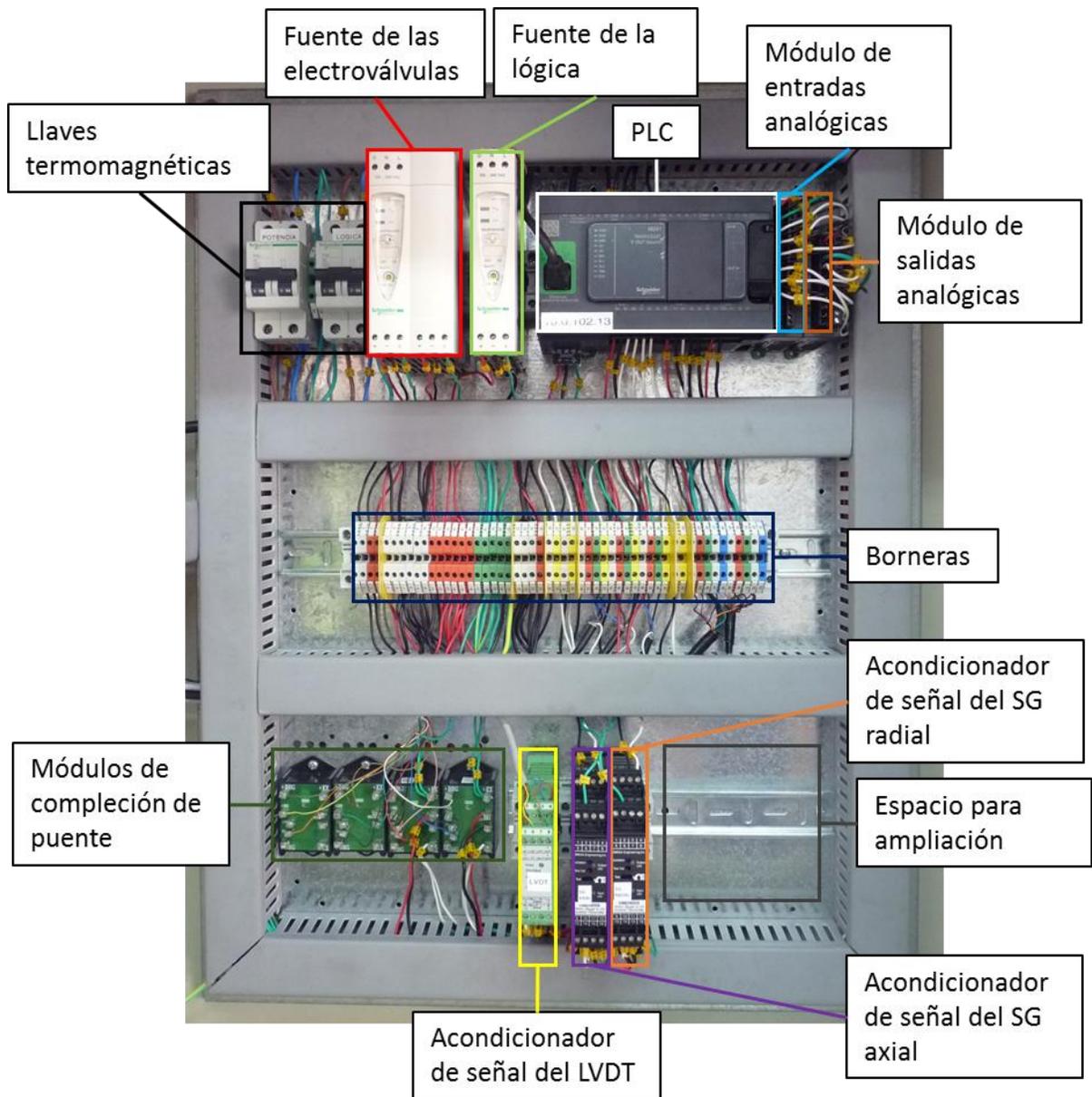


Figura 44. Panel eléctrico.

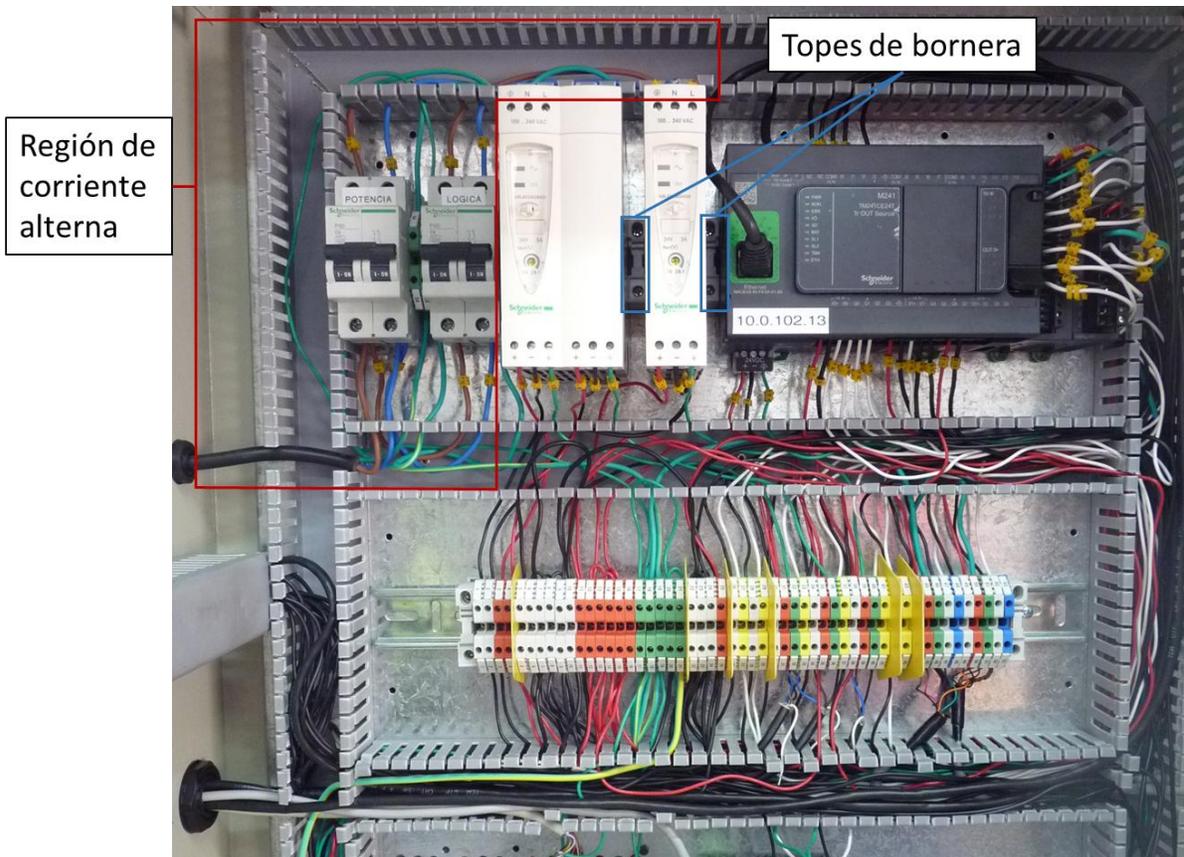


Figura 45. Detalle del cableado del tablero.

En la **Figura 46** se muestra en detalle los módulos de completación de puente. Debido a que deben ser cerados para balancear el puente de Wheatstone, se les incluyó un código de señales luminosas que indica en qué dirección debe ser girado el tornillo de cerado y en qué momento se balancea el puente. Esto también es indicado en la pantalla táctil, pero como la puerta del tablero debe ser abierta al momento de cerar, por comodidad del usuario se agregó el circuito de LEDs que se indica en la **Figura 47**.

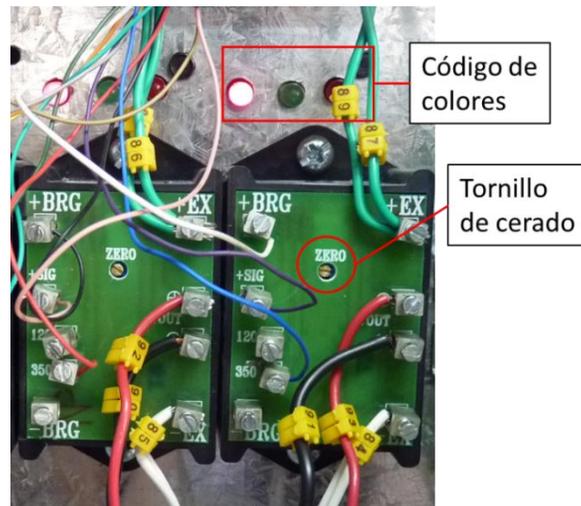


Figura 46. Módulos de completación de puente con su código de luces.

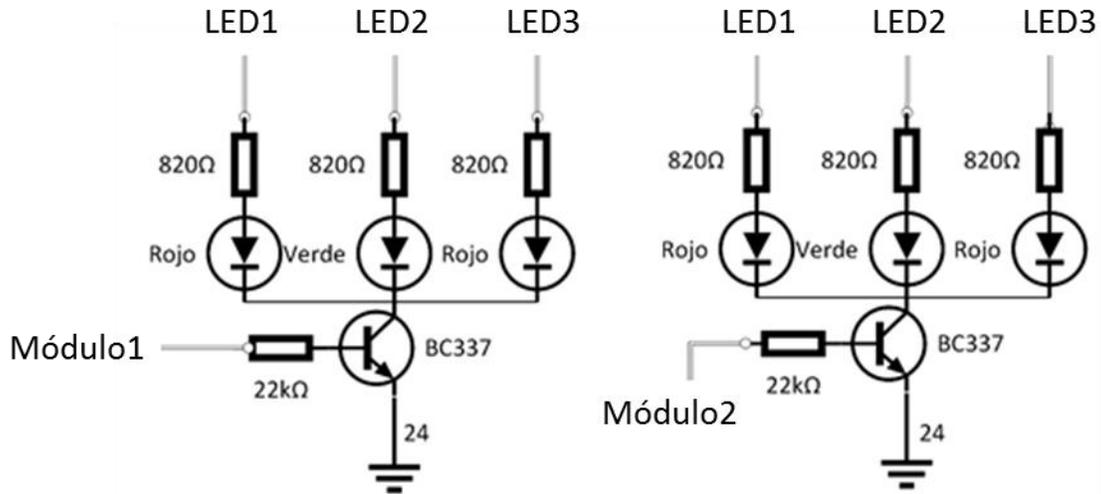


Figura 47. Circuito para el código de luces.

Se utilizó un circuito multiplexor para poder usar una menor cantidad de salidas digitales del PLC. Con cada ciclo del PLC se manda una señal positiva a la entrada Módulo1 o Módulo2 de manera alternativa, y se cambian los valores de LED1, LED2 y LED3 acorde al estado del cerado del módulo activo.

Cuando el LED rojo de la izquierda está encendido, el tornillo de cerado debe ser girado en sentido horario; intuitivamente, como si se quisiera llevar el punto iluminado hacia el centro donde está el LED verde que indica un cerado correcto. Al girar en este sentido, el LED encendido pasa de ser del rojo izquierdo al verde, y si se sigue girando, del verde al rojo de la derecha, con lo cual se debe girar el tornillo en sentido antihorario hasta que se vuelva a encender el LED verde. El código de luces se explica en la secuencia de imágenes de la **Figura 48**.



Figura 48. Instrucciones para el cerado de los *strain gages*.

Una vez realizado el cerado de los módulos de completación de puente, el tablero puede cerrarse para el resto de los procedimientos del ensayo.

La **Figura 49** muestra la disposición general de la celda triaxial y todos sus accesorios dentro del laboratorio de petróleo. Se observa la central hidráulica, el tablero eléctrico con su pantalla táctil y la pantalla de la computadora con la visualización de variables en tiempo real (Sección 6.5.3).

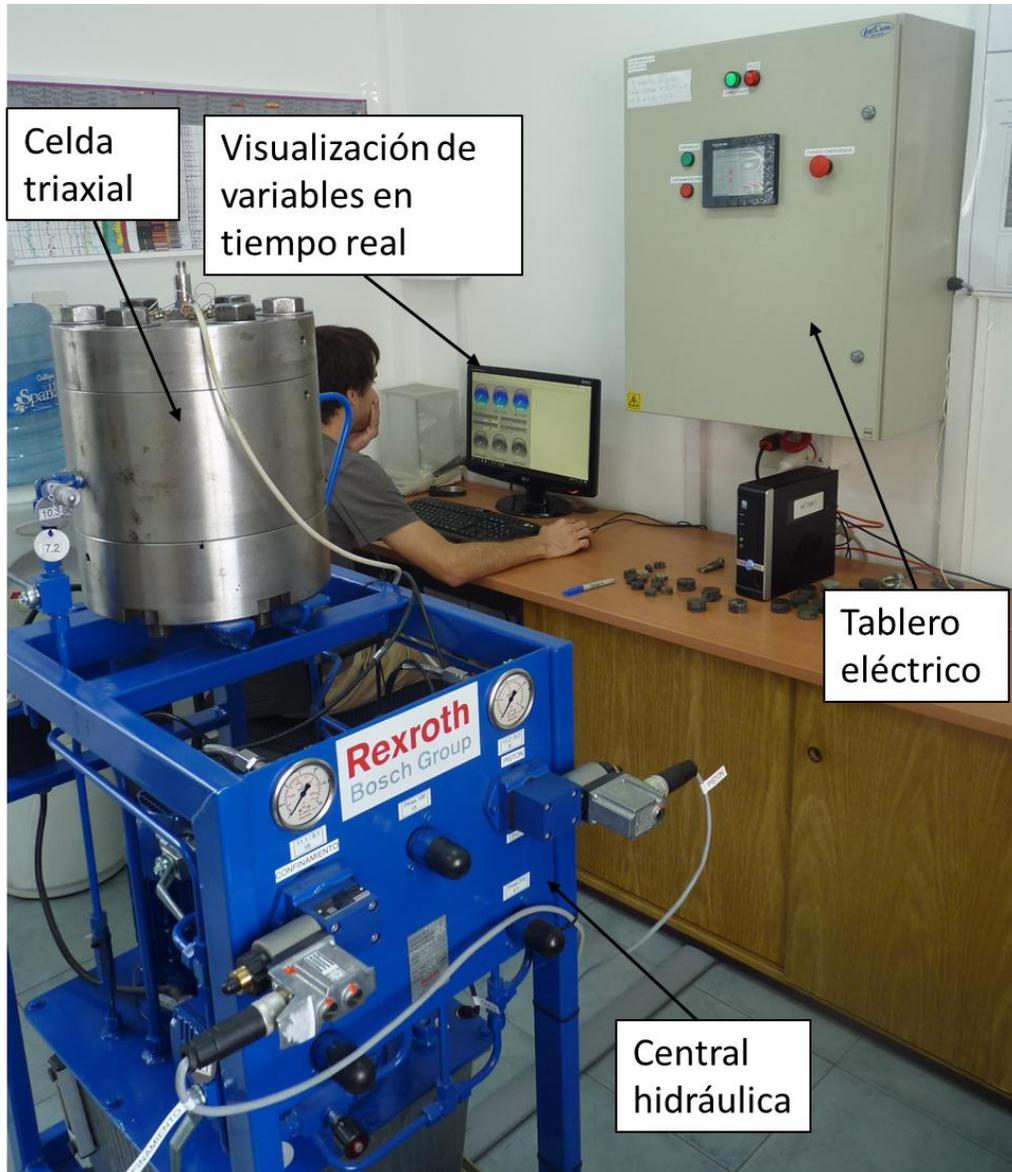


Figura 49. Ubicación de la máquina de ensayos triaxiales en el laboratorio de Petróleo.

Para la instalación del tablero en la pared y el montaje del cablecanal y el pisocanal se contó con la ayuda imprescindible de Antolín de mantenimiento del ITBA.

6.4 Estudios preliminares del sistema

Una vez realizados los montajes necesarios, se hacen distintos tipos de pruebas al sistema armado para determinar sus características.

6.4.1 Comparación de los transductores de presión con los manómetros

La central hidráulica cuenta con dos manómetros que miden la presión de confinamiento y la presión del pistón hidráulico provenientes del diseño original de Rexroth. Dado que estos sensores miden la misma presión que los transductores HM20, se hace una comparación entre mediciones para ver si efectivamente arrojan los mismos resultados.

Para esto se realiza el siguiente procedimiento.

1. Aumentar la presión hasta un valor en el cual la aguja del manómetro se ubique justo sobre una línea de división para facilitar la lectura.
2. Anotar la lectura del manómetro y el resultado de la conversión analógica digital del sensor de presión correspondiente.
3. Tabular los resultados y obtener un gráfico 'lectura del sensor de presión HM20 Vs. Lectura del manómetro'.

Para los sensores de presión de poro y de confinamiento, el ensayo se hace en simultáneo ya que sin una muestra de roca presente, ambos sensores miden la presión de la cámara de confinamiento. Los resultados se muestran en la **Figura 50**.

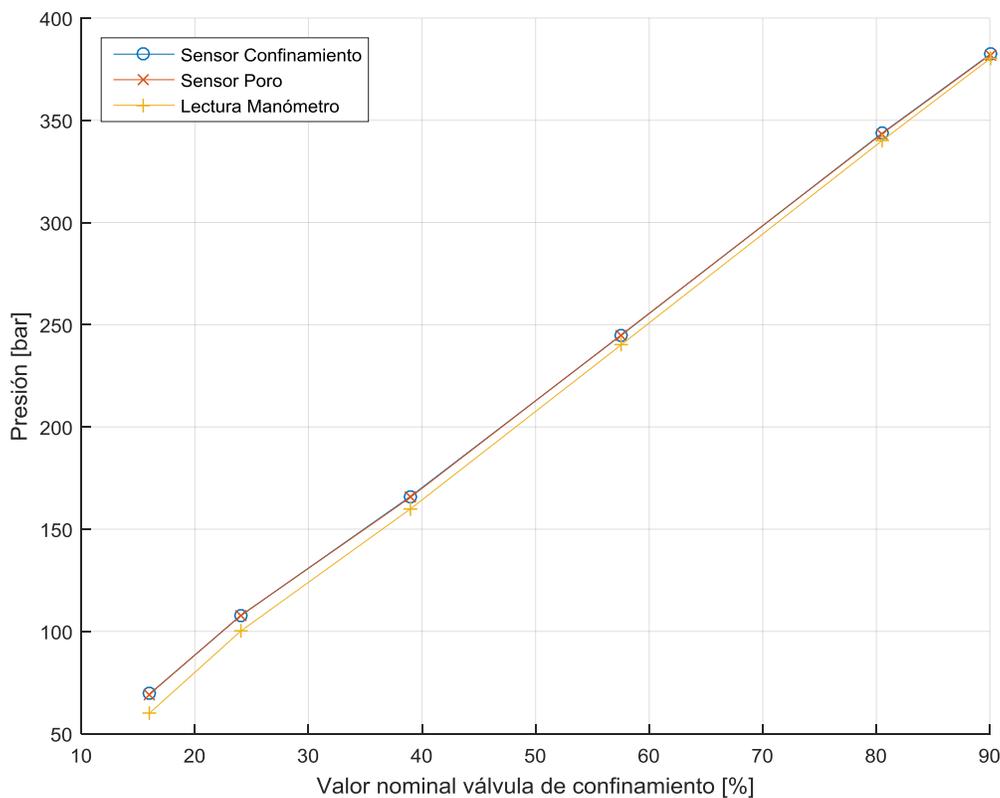


Figura 50. Comparación de la salida de los transductores HM20 con los manómetros para la medición de la presión de confinamiento.

Se observa que los sensores HM20 tienen una lectura casi idéntica en concordancia con la especificación de exactitud que tienen, mientras que el manómetro tiene una lectura de presión en todo momento menor. Teniendo en cuenta esto, es necesario determinar qué sensor tiene mejores características de precisión. En caso de que el manómetro tenga mejor precisión, se puede calibrar la curva del transductor HM20 con las mediciones del manómetro.

De las hojas de datos de ambos instrumentos se observa que los sensores de presión HM20 tienen una desviación de la curva característica menor al 0,5% del fondo de escala

incluyendo histeresis, este nivel de exactitud se observa en las mediciones casi idénticas de los dos transductores HM20 graficadas en la **Figura 50**. Los manómetros instalados tienen un nivel de precisión clase 1,6 según norma DIN EN 837, que indica que el error permisible es de $\pm 1,6\%$ del fondo de escala del sensor y que la histeresis es menor a 1,6%. En base a estas observaciones, no es necesario ni recomendable calibrar los sensores de presión tomando como referencia los manómetros ya que estos últimos son menos precisos.

A partir de los resultados de este ensayo, es esperable que si setea una presión de confinamiento de por ejemplo 100 bar, la aguja del manómetro esté por debajo de la marca correspondiente. Esto no debe ser tomado como un error estacionario en el control de la presión de confinamiento sino como una imprecisión en la salida del manómetro. La **Figura 51** muestra la lectura del manómetro cuando la presión se setea en 100 bar tomando como referencia la lectura del sensor HM20.



Figura 51. Lectura del manómetro cuando el transductor HM20 mide 100 bar.

Para el caso de los sensores que miden la presión del pistón los resultados son similares. Esto se observa en la **Figura 52** dónde la presión medida con el manómetro es menor que la medida por el transductor de presión HM20.

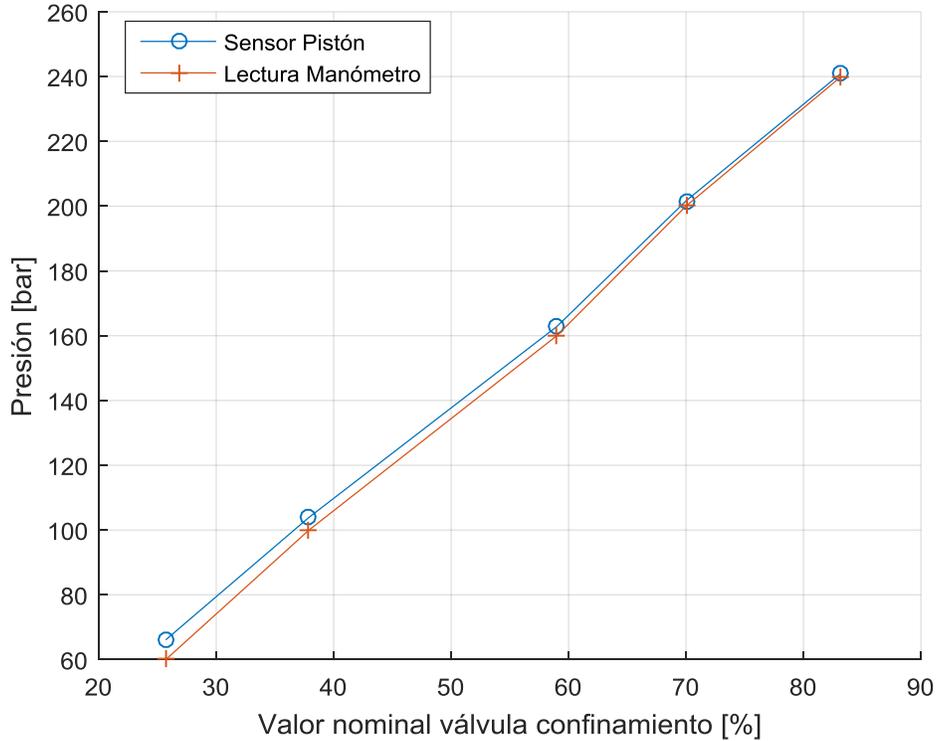


Figura 52. Comparación de la salida de los transductores HM20 con los manómetros para la medición de la presión de confinamiento.

6.4.2 Obtención de la curva característica de las electroválvulas

Para un adecuado control de las presiones es necesario un entendimiento de la respuesta de las presiones ante cambios en el comando de las válvulas. Para esto se comienza por la hoja de datos de estos actuadores.

La curva característica dada por el fabricante se muestra en la **Figura 53**.

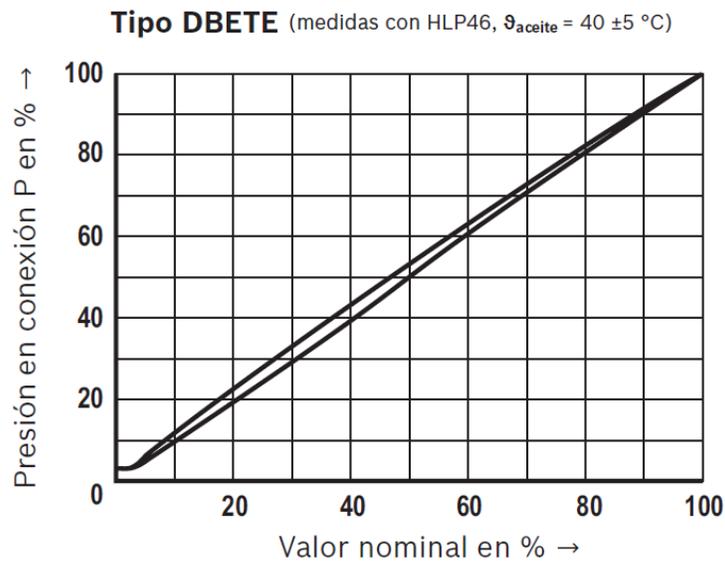


Figura 53. Curva característica de las electroválvulas proporcionada por el fabricante.

Se observa que hay una zona muerta hasta aproximadamente 5% de valor nominal donde la presión no aumenta. La **Figura 53** también muestra un efecto de histéresis en la curva característica. Al ser una curva para un determinado valor de temperatura, se intuye que puede haber variaciones con la temperatura. Para levantar las curvas de las electroválvulas se realiza el siguiente procedimiento.

1. Con la central hidráulica recién encendida aumentar de a pasos el valor nominal de la válvula de 0% a 100% y a cada paso registrar la presión correspondiente.
2. Al llegar al 100% de valor nominal de la válvula, inmediatamente repetir los mismos pasos utilizados en el punto 1 yendo de 100% a 0%
3. Llevar el valor nominal de las válvulas al 100% para calentar el fluido hidráulico y los solenoides de las mismas hasta obtener un valor de presión estable.
4. Repetir los pasos 1 y 2.
5. Realizar gráficos 'Valor nominal de la válvula Vs. Presión' y analizar los resultados.

En la **Figura 54** se observan 4 curvas obtenidas siguiendo los procedimientos previamente descritos; las curvas tienen las mismas características de insensibilidad a bajas presiones e histéresis que las que se observan en el catálogo. Se observa que en caliente las presiones son menores que en frío. A lo largo de los ensayos realizados también se detecta que la presión para un valor nominal de válvula tiende a disminuir con el tiempo (y con el calentamiento), esto genera que el par de curvas realizadas en frío tengan menor histéresis que en caliente y que se crucen en las zonas donde la histéresis es menor ya que primero se realiza la curva con presión en ascenso y luego la de descenso y durante este tiempo el calentamiento tiene efecto. En caliente esto no ocurre ya que se alcanza un estado estacionario y el sistema no puede seguir calentándose.

Se grafican también los datos obtenidos del catálogo para una electroválvula del mismo tipo (420 bar) que ayuda a corroborar los resultados.

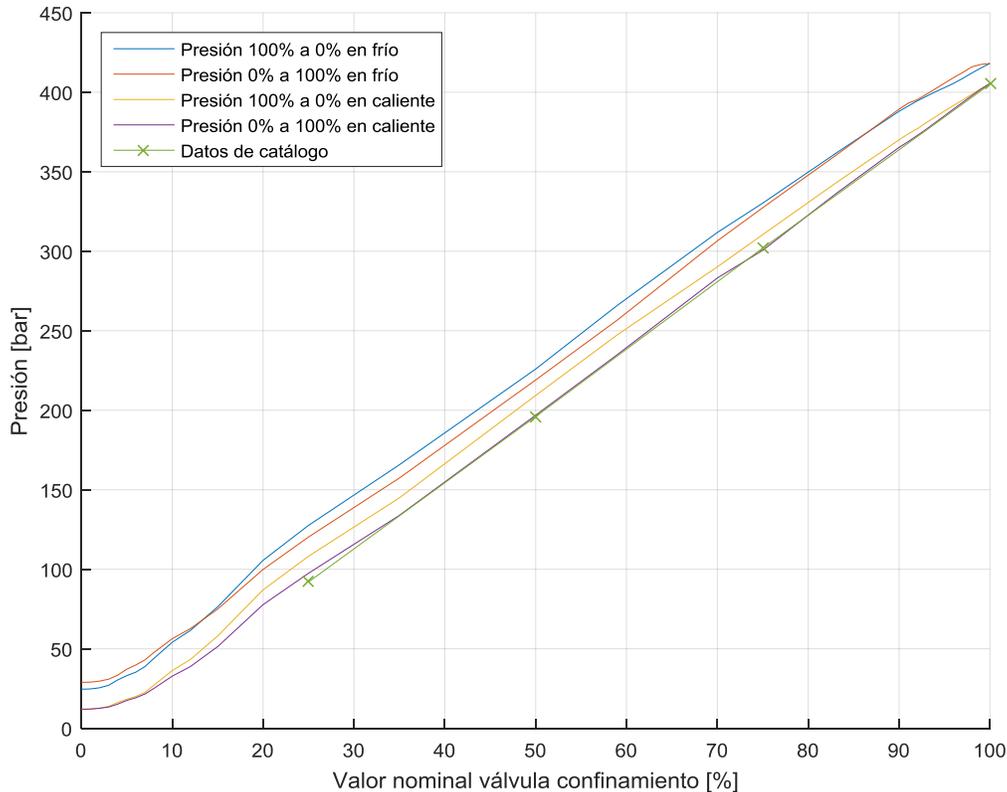


Figura 54. Curvas características obtenidas de la electroválvula de confinamiento.

La razón por la cual la presión disminuye con la temperatura para un mismo valor nominal de electroválvula es el calentamiento del solenoide provocado por el calentamiento del fluido y también por la corriente eléctrica que circula. Esto provoca que la resistencia del bobinado aumente y la corriente disminuya haciendo que la fuerza que se le genera al vástago inducido que se opone al paso del fluido sea menor. El aumento de temperatura del solenoide es notorio apoyando la mano sobre la carcasa del mismo.

En vista a estos resultados se decide obtener una representación de la curva característica de la electroválvula. Para esto se divide el modelo en dos tramos, un tramo lineal para la región de control de la electroválvula y otro tramo que modele la zona muerta de la válvula.

Para obtener la pendiente del tramo lineal se hace un ajuste por cuadrados mínimos incluyendo únicamente los datos en caliente ya que son datos del sistema en estado estacionario y no están afectados por un calentamiento durante su relevamiento. Se toman los valores a partir de 3% de valor nominal (se considera este valor como límite de la zona muerta) y se utiliza una mayor densidad de datos en la zona de baja presión para darle más peso a esta región en la aproximación lineal. Se hace esto ya que los valores nominales más bajos de la electroválvula son los que están involucrados en la etapa transitoria del control, y por eso se prioriza la precisión en esta región. En la **Figura 55** se muestran los datos tomados y el resultado de la aproximación lineal junto con los datos descartados en el ajuste. Los variables se expresan en LSB (*least significant bit*) ya que los resultados de estos procedimientos pasan a ser valores para el PLC que se maneja

con estas 'unidades' discretas. El valor nominal de la electroválvula se discretiza en 10000 intervalos.

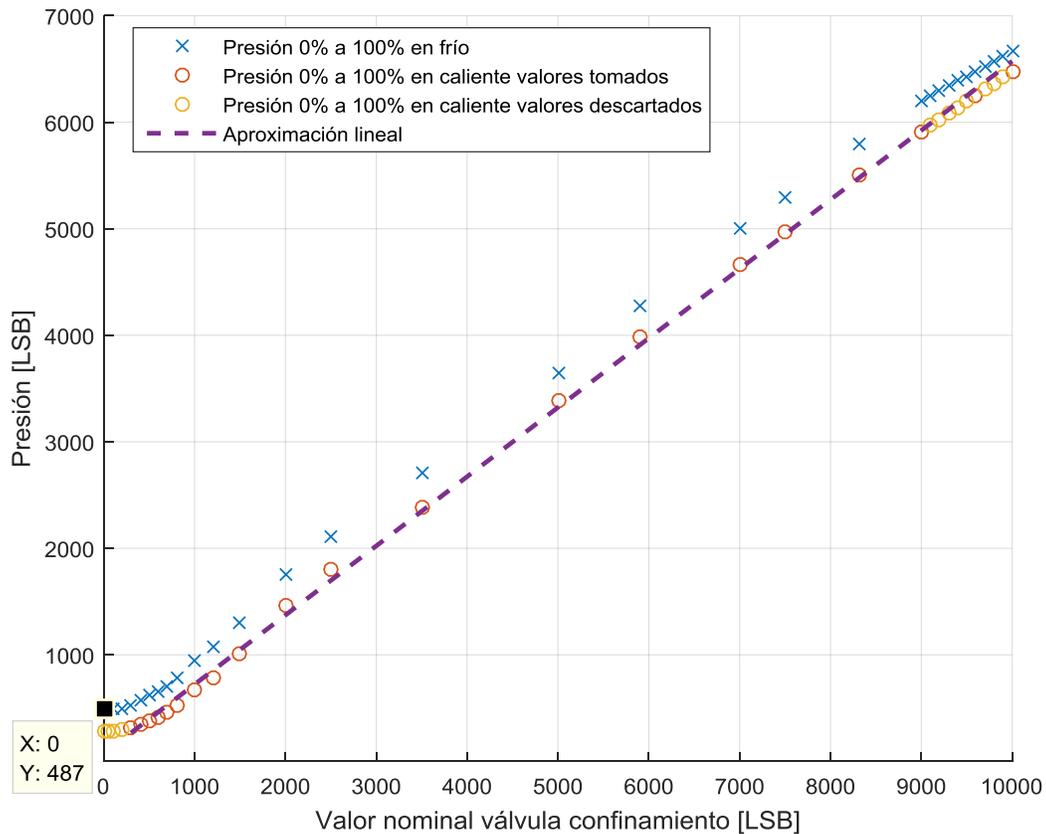


Figura 55. Aproximación lineal obtenida con los datos seleccionados.

De la recta de ajuste se extrae únicamente la pendiente:

$$m_c = 0,6501 \text{ LSB/LSB}$$

Como se ve en la **Figura 55**, es necesario ajustar la ordenada al origen según la temperatura del sistema, para resolver esto, se toma como referencia de temperatura la medición de presión de confinamiento inicial y a partir de ese valor se calcula la ordenada al origen. Por ejemplo, para el caso en frío se toma el valor inicial que es 487 LSB, se hace que el punto (300, 487) sea parte de la recta de ajuste, siendo 300 el valor en LSB que corresponde al 3% de valor nominal, y la ordenada al origen se calcula como:

$$c_c = 487 - m_c 300$$

En forma genérica:

$$c_c = P_{0c} - m_c 300$$

P_{0c} : Presión de confinamiento inicial.

De esta forma, la curva característica de la válvula se puede representar como

$$P_c = m_c \cdot V_c + c_c \quad 300 \leq V_c \leq 10000$$

$$P_c = P_{0c} \quad V_c < 300$$

P_c : Presión de confinamiento.

V_c : Valor nominal de la válvula de confinamiento.

P_{0c} : Presión inicial de confinamiento.

En la **Figura 56** se observa cómo el modelo se adapta a la curva real según la temperatura del sistema tomando como referencia la presión inicial.

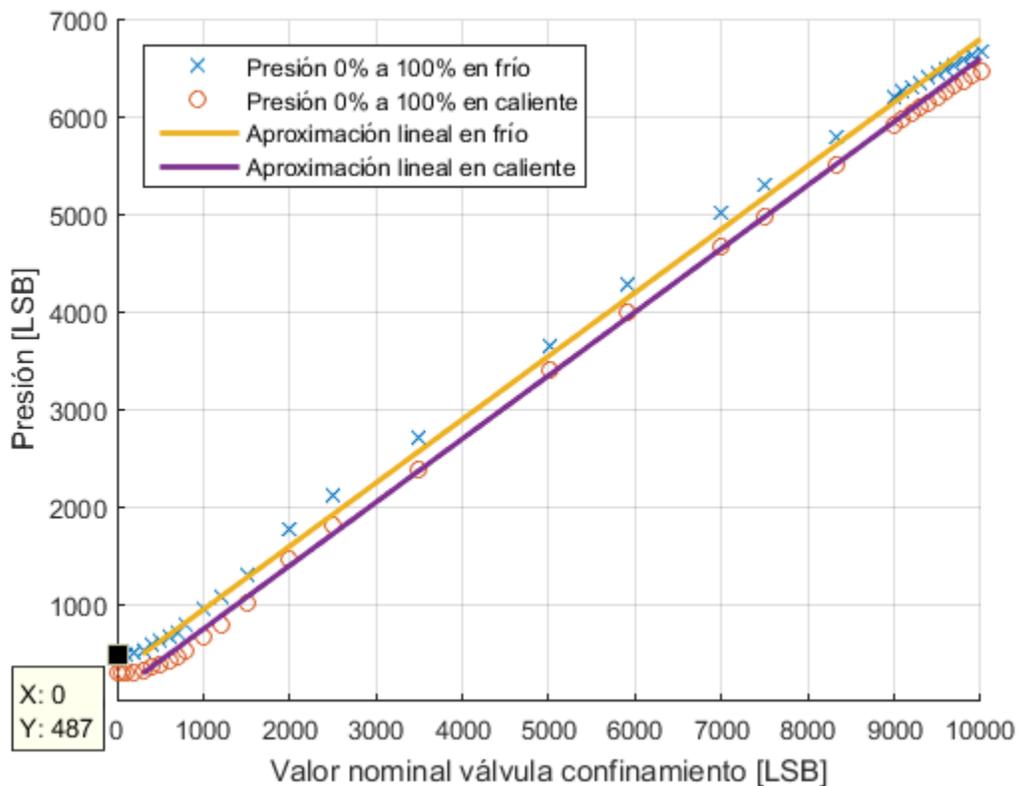


Figura 56. Adaptación de la recta de ajuste a los cambios de temperatura.

Para la electroválvula de la presión de pistón se procede de la misma manera. En la **Figura 57** se grafican las curvas obtenidas con el procedimiento anteriormente descrito. Se observa que hay una menor diferencia entre las curvas sacadas en frío y en caliente que en el caso de la electroválvula de confinamiento, posiblemente porque esta válvula trabaja a menor presión y se calienta menos.

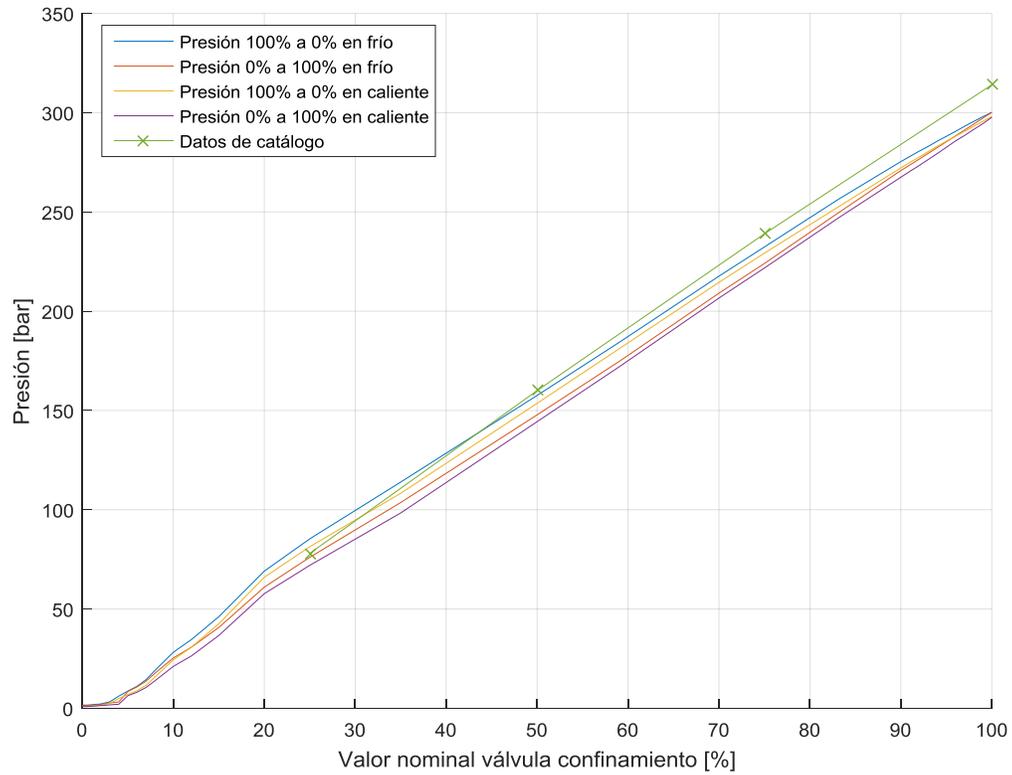


Figura 57. Curvas características obtenidas de la electroválvula de pistón.

En la **Figura 58** se grafica la aproximación lineal obtenida de los datos filtrados con el mismo criterio utilizado para la electroválvula de confinamiento.

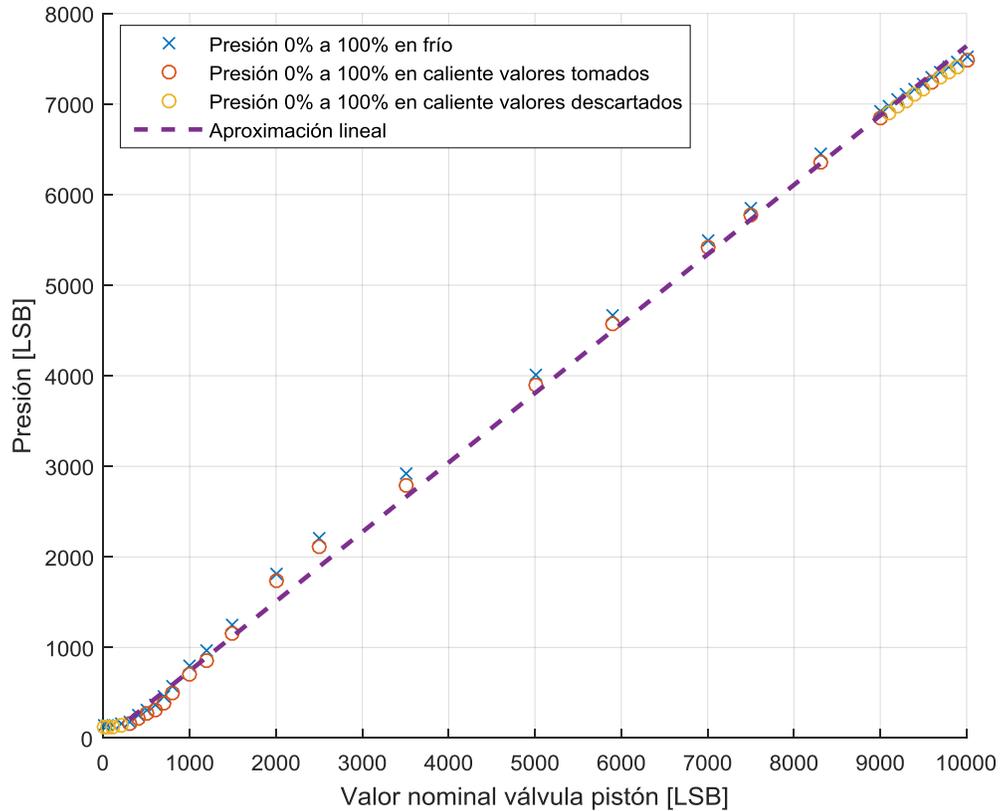


Figura 58. Aproximación lineal obtenida con los datos seleccionados.

La pendiente obtenida es de:

$$m_p = 0,7665 \text{ LSB/LSB}$$

Para obtener la ordenada al origen se procede de la misma manera haciendo que dependa de la presión inicial para que se ajuste a las variaciones con la temperatura.

En forma genérica:

$$c_p = P_{0p} - m_p 300$$

De esta forma, la curva característica de la válvula se puede representar como

$$P_p = m_p \cdot V_p + c_p \quad 300 \leq V_p \leq 10000$$

$$P_p = P_{0p} \quad V_p < 300$$

P_p : Presión de pistón

V_p : Valor nominal de la válvula de pistón

P_{0p} : Presión inicial de pistón

En la **Figura 59** se muestra cómo se adapta el ajuste a los datos obtenidos a distintas temperaturas. Se observa que el desplazamiento de la recta es menor que en el caso de la electroválvula de confinamiento debido a que las diferencias entre las presiones iniciales de los datos obtenidos es muy pequeña.

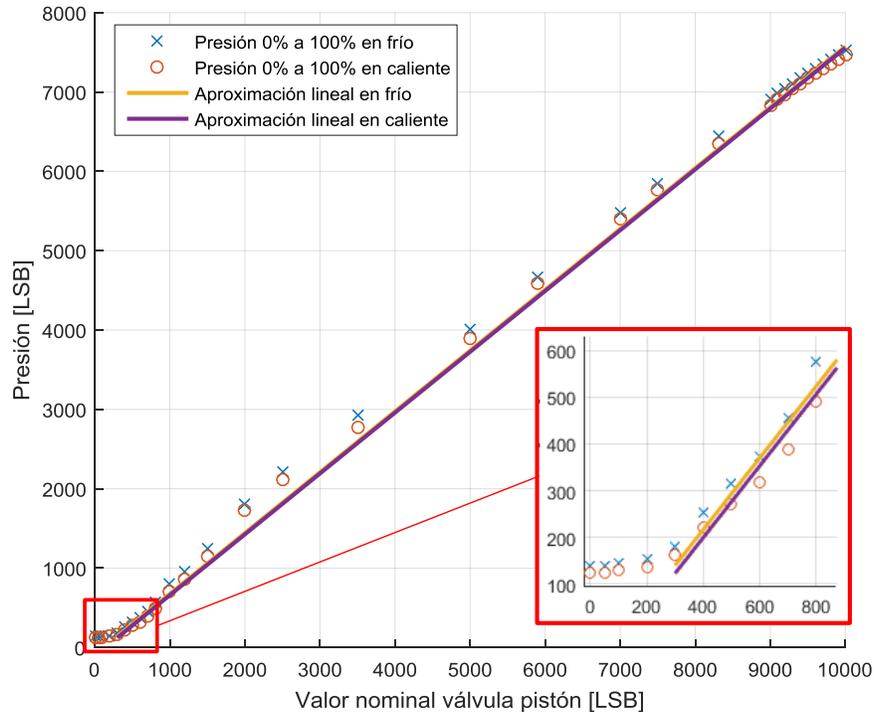


Figura 59. Adaptación de la recta de ajuste a los cambios de temperatura.

Por último, se verifica que las curvas características de las válvulas no varíen con la presión que existe en el circuito de presión aledaño. Para estudiar el caso de una posible variación de la presión de confinamiento con distintas presiones de pistón se sigue el siguiente procedimiento:

1. Comandar un valor nominal de válvula de confinamiento
2. Llevar el valor nominal de la válvula de pistón a 0%, 50% y 100%
3. Registrar la presión de confinamiento en cada valor de válvula de pistón
4. Repetir los pasos 1 a 3 con otros 2 valores más de válvula de confinamiento
5. Graficar resultados

La **Figura 60** muestra los resultados para este caso y la **Figura 61** los resultados para las variaciones de la presión de pistón a distintas presiones de confinamiento. Se observa que son nulas.

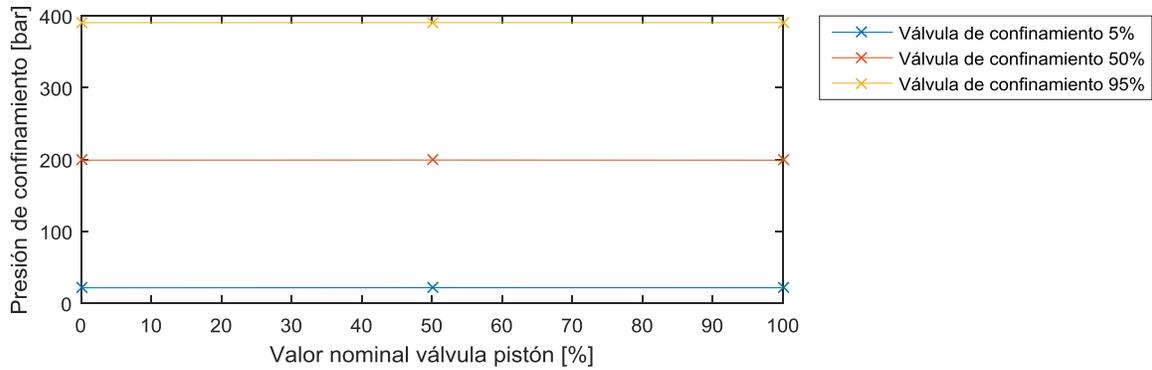


Figura 60. No variación de la presión de confinamiento con distintos valores de válvula pistón.

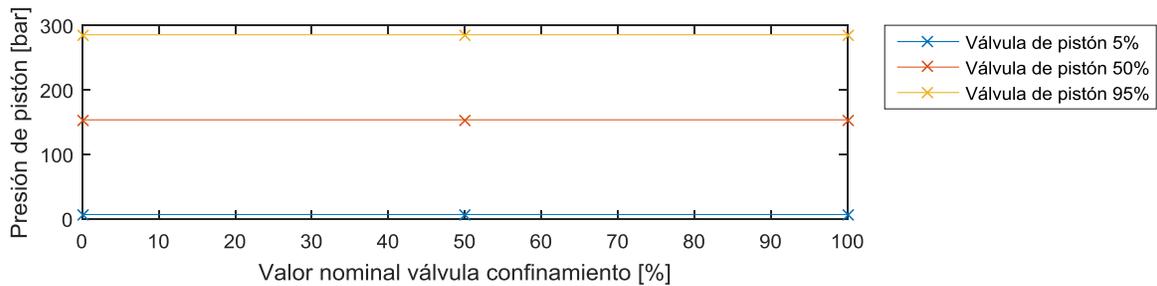


Figura 61. No variación de la presión de pistón con distintos valores de válvula de confinamiento.

6.4.3 Características del pistón hidráulico

Con el objetivo de tener un profundo conocimiento del sistema a controlar, se realizaron ensayos para obtener las características dinámicas del pistón hidráulico junto con el pistón multiplicador.

En la **Figura 62** se muestra un diagrama de las fuerzas y presiones que actúan sobre el conjunto que comprime a la muestra cuando este se encuentra en equilibrio, y en una posición en la cual el huelgo de ecualización de presiones está abierto.

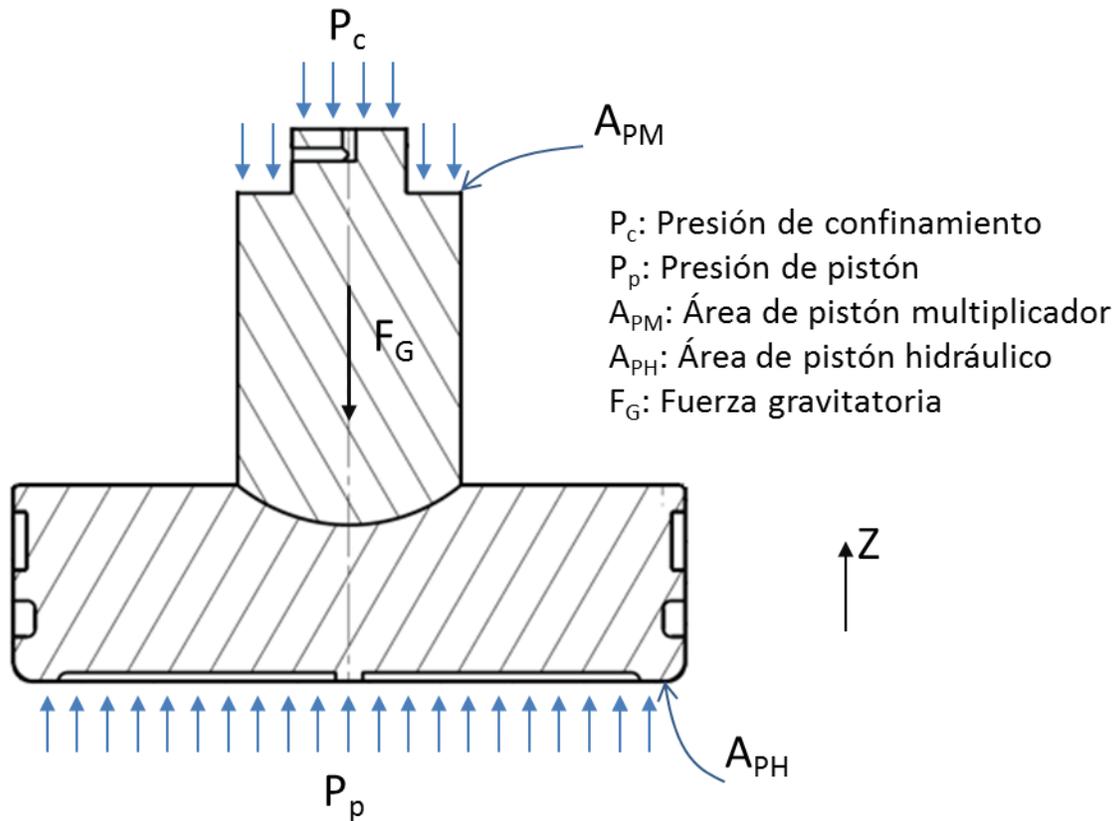


Figura 62. Diagrama de fuerzas actuando sobre el pistón.

Haciendo sumatoria de fuerzas en equilibrio se tiene:

$$\sum F_z = 0$$

$$P_p A_{PH} - P_c A_{PM} - F_G = 0$$

$$P_p A_{PH} = P_c A_{PM} + F_G \quad (3)$$

La fuerza de gravedad se obtiene a partir del volumen que se mide en los modelos CAD del pistón hidráulico y del pistón multiplicador, multiplicándolo por la densidad del acero y por la gravedad. Su valor es de

$$F_G = 63,832 \text{ N}$$

Para apartar del equilibrio al sistema y hacer que se mueva, se debe superar la fuerza de roce estático. En la sección 6.4.3.1 se obtiene el valor de la fuerza de roce estático cuando el movimiento es inminente.

6.4.3.1 Determinación del roce estático

El procedimiento para obtener este parámetro es el siguiente:

1. Fijar la presión de confinamiento en un valor deseado y mantenerlo en ese punto mediante control realimentado, registrar este valor de presión.
2. Aumentar la presión del pistón lentamente hasta notar que el pistón comienza a moverse para arriba, registrar este valor de presión.
3. Disminuir la presión del pistón hasta que queda quieto nuevamente.
4. Disminuir la presión del pistón lentamente hasta notar que el pistón comienza a moverse para abajo, registrar este valor de presión.
5. Repetir los pasos 2 a 5 utilizando distintas presiones de confinamiento.

La fuerza de roce estática se calcula despejándola de la expresión que resulta de la ecuación (3) cuando se le agrega esta fuerza.

$$P_P A_{PH} = P_C A_{PM} + F_G \pm F_E$$

Donde

P_P = Presión de pistón

P_C = Presión de confinamiento

A_{PH} = Área del pistón hidráulico

A_{PM} = Área del pistón multiplicador

F_G = Fuerza gravitatoria actuando sobre ambos pistones

F_E = Fuerza de roce estático

El signo de F_E depende del sentido de movimiento del pistón.

En la **Figura 63** se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito anteriormente y se grafica también la presión de pistón teórica necesaria para moverlo de no existir roce estático obtenido como:

$$P_P = \frac{P_C A_{PM} + F_G}{A_{PH}}$$

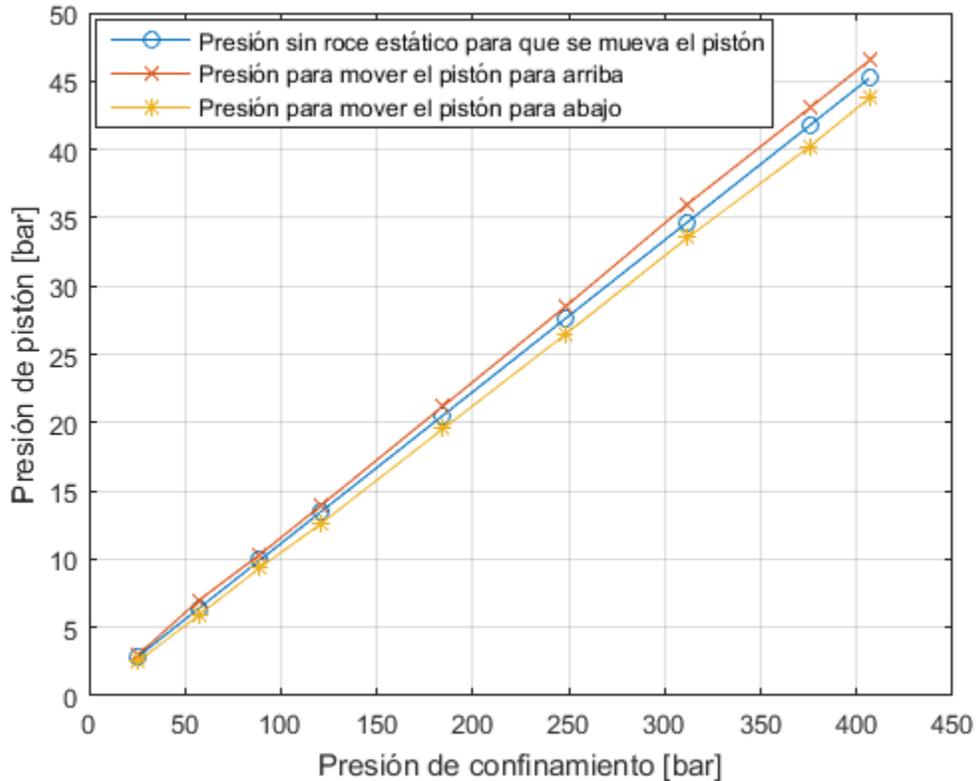


Figura 63. Comparación de las presiones reales necesarias para mover el pistón con la presión necesaria para mover el pistón de no existir roce estático.

Este gráfico sirve para verificar la coherencia de los resultados y la correcta medición de las tensiones (se miden utilizando los mismos parámetros que se utilizan en estas ecuaciones), ya que la presión para mover al pistón para arriba es mayor que la teóricamente calculada (sin considerar roce estático), y la presión para moverlo para abajo es menor. Entonces la curva teórica queda ubicada entre las dos curvas de presión obtenidas con los ensayos, siendo la diferencia entre las curvas el roce estático que actúa en un sentido u otro según el sentido del movimiento del pistón.

En la **Figura 64** se muestran los resultados de la magnitud de la fuerza de roce estático discriminando según el sentido del movimiento del pistón. Se observan diferencias entre un sentido y el otro y una tendencia general a aumentar con la presión de confinamiento. La disparidad de los resultados puede atribuirse a las dificultades para detectar el movimiento inicial del pistón y a un roce estático que varía con la posición de partida del pistón. Se decide hacer una aproximación lineal de esta nube de valores para obtener un valor de fuerza estática que varía con la presión de confinamiento. El ajuste no es bueno, pero de todas formas el cálculo de roce estático no es de vital importancia ya que no se usa en la cuenta del cálculo de tensiones al momento de ensayar la roca (el pistón en esta instancia está en movimiento), que son mediciones que requieren precisión.

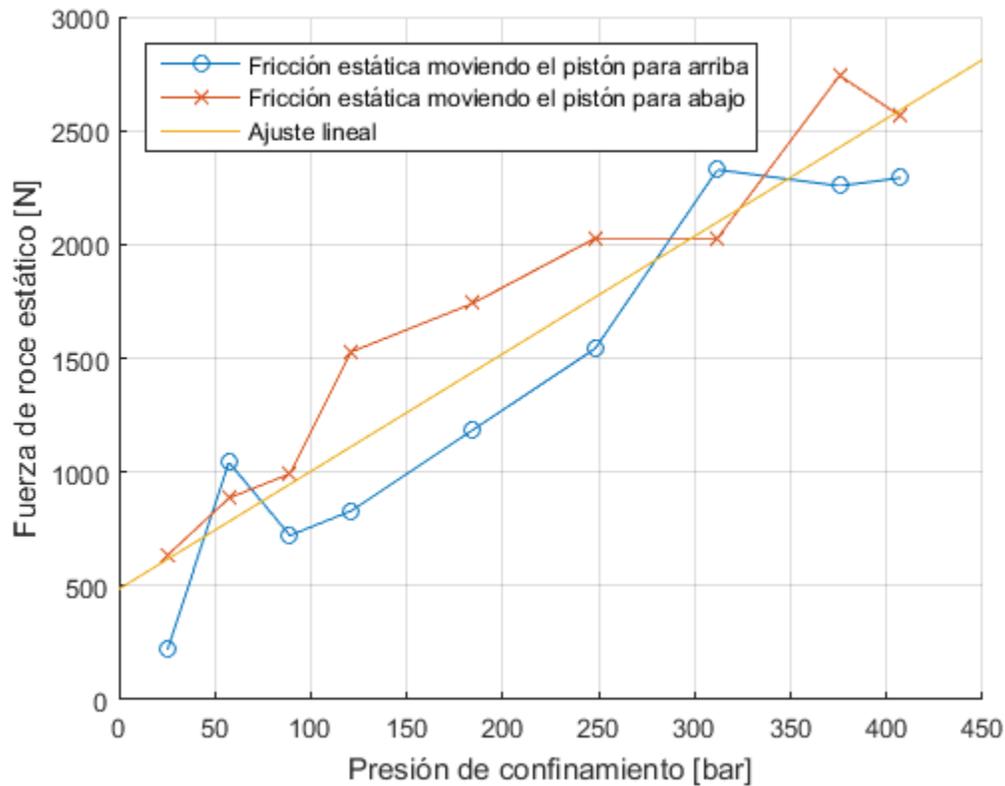


Figura 64. Fuerza de roce estático obtenida para cada presión de confinamiento evaluada.

La expresión del roce estático depende de la presión de confinamiento y se toma a partir de la ecuación de la recta del ajuste lineal de la **Figura 64**.

$$F_e = 51,68P_c + 486,07$$

6.4.3.2 Determinación del roce viscoso

En la **Figura 65** se grafica el movimiento del pistón con una presión de confinamiento y una presión de pistón constantes. La carrera completa del pistón es de 1,693 mm. Se observa que el pistón en su movimiento adquiere velocidad constante. Esto da el indicio de la presencia de una fricción viscosa del tipo

$$F_v = C_v v$$

Con C_v el coeficiente de roce viscoso y v la velocidad

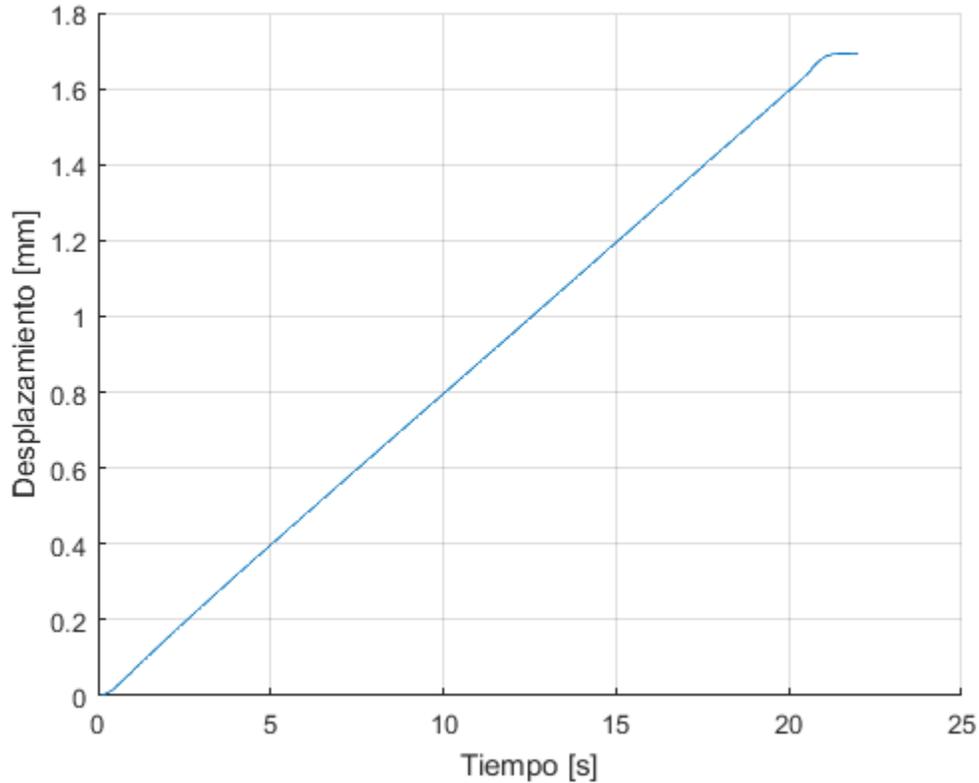


Figura 65. Desplazamiento del pistón al aplicarle una fuerza constante.

Para obtener el valor del roce dinámico se realiza el siguiente procedimiento:

1. Fijar una presión de confinamiento.
2. Comandar una posición de válvula de presión de pistón que haga que el pistón ascienda.
3. Registrar la posición del pistón en el tiempo.
4. Repetir los pasos 1 a 3 para distintas posiciones de válvula de presión.
5. Repetir los pasos 1 a 4 para distintas presiones de confinamiento.
6. Extraer los resultados del PLC, graficarlos y obtener la velocidad constante del pistón para cada caso.

En la **Figura 66** se muestran los resultados obtenidos a partir de este procedimiento. Donde la fuerza resultante es

$$F_R = P_P A_{PH} - P_C A_{PM} - F_G$$

Se observa que los datos pueden ser aproximados con una recta de ajuste cuya pendiente puede ser interpretada como el coeficiente de roce viscoso y su ordenada al origen como un roce cinético constante.

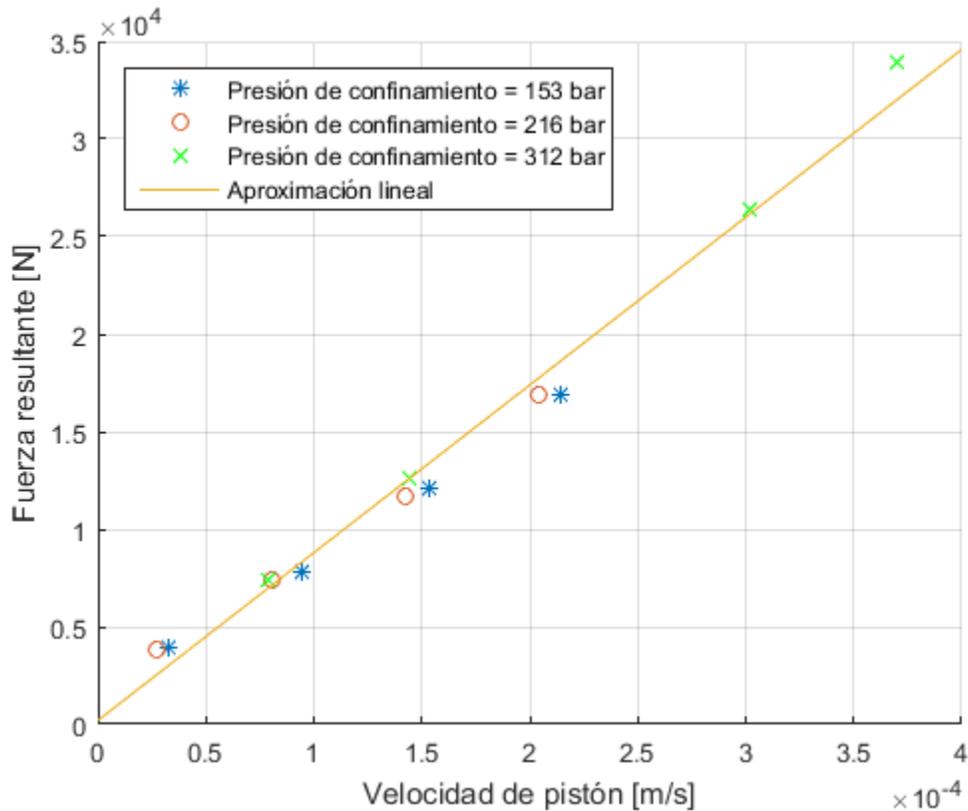


Figura 66. Datos utilizados para obtener el coeficiente de roce viscoso.

Por lo tanto

$$C_v = 8,597 \cdot 10^7 \frac{Ns}{m}$$

La ordenada al origen de esta recta puede ser interpretada como una fricción cinética, con lo cual:

$$F_c = 197,9 N$$

6.5 Programación del sistema de control

Conociendo las características mecánicas de la celda triaxial, los procedimientos de ensayos triaxiales, las especificaciones de ensayo y las características relevantes del sistema a controlar; se procede a diseñar y programar el sistema de control y la interfaz con el usuario.

El software de programación utilizado es el *SoMachine* versión 4.1, para programar el PLC de la firma Schneider Electric; y el *Vijeo Designer* versión 6.2.4.1065 para programar la pantalla táctil.

La programación del PLC se realiza utilizando una combinación de Ladder con Texto Estructurado y Grafcet.

Para la programación del HMI se utiliza la interfaz del *Vijeo Designer* para diseñar las pantallas y se embeben códigos en Java en los casos en los que se requiere mayor versatilidad.

El programa del sistema de control se puede dividir en las siguientes tareas:

1. Ejecución del ensayo
2. Registro de datos
3. Visualización de variables en tiempo real

6.5.1 Ejecución del ensayo

Esta es la tarea núcleo del programa y contiene las siguientes tareas

1. Inicialización del ensayo.
2. Ejecución de los procedimientos del ensayo.
3. Finalización por cancelación del ensayo.
4. Parada de emergencia.

6.5.1.1 Inicialización del ensayo

En esta etapa el usuario interactúa con la pantalla táctil para ingresar los parámetros necesarios para definir los procedimientos del ensayo, y para seguir las indicaciones que requieren acción por parte del usuario. La primera pantalla con la cual se encuentra el usuario al activar el interruptor del tablero eléctrico es la de la **Figura 67**.



Figura 67. Pantalla inicial de interfaz con el usuario.

Esta primera pantalla cumple la función de poner al usuario en espera hasta que la pantalla táctil establece la comunicación con el PLC (demora aproximadamente 5 segundos).

Las pantallas mostradas en la **Figura 68** son de ingresos de parámetros. Se definen las unidades de presión en las cuales se desea trabajar y el tipo de ensayo; en este caso de ejemplo, al ser triaxial se debe definir también el número de etapas para un ensayo *multistage* (si se elige una sola entonces el ensayo es *singlestage*).

Se ingresan las presiones de confinamiento para cada etapa, las dimensiones del testigo de roca, y los *gage factors* de los *strain gages*. Estos últimos tres parámetros tienen

rangos de validez. En caso de que el valor ingresado esté fuera de rango el usuario recibirá una advertencia que lo dejará continuar o no dependiendo de si el ensayo puede realizarse con ese valor de variable o no. Por ejemplo una presión de confinamiento ingresada que excede la máxima presión que se puede generar impedirá que el usuario pueda seguir avanzando hasta que corrija el valor. Un diámetro de muestra fuera de lo normal de 15,4 mm advertirá al usuario por si quiere corregir el valor, pero no impedirá que siga avanzando.

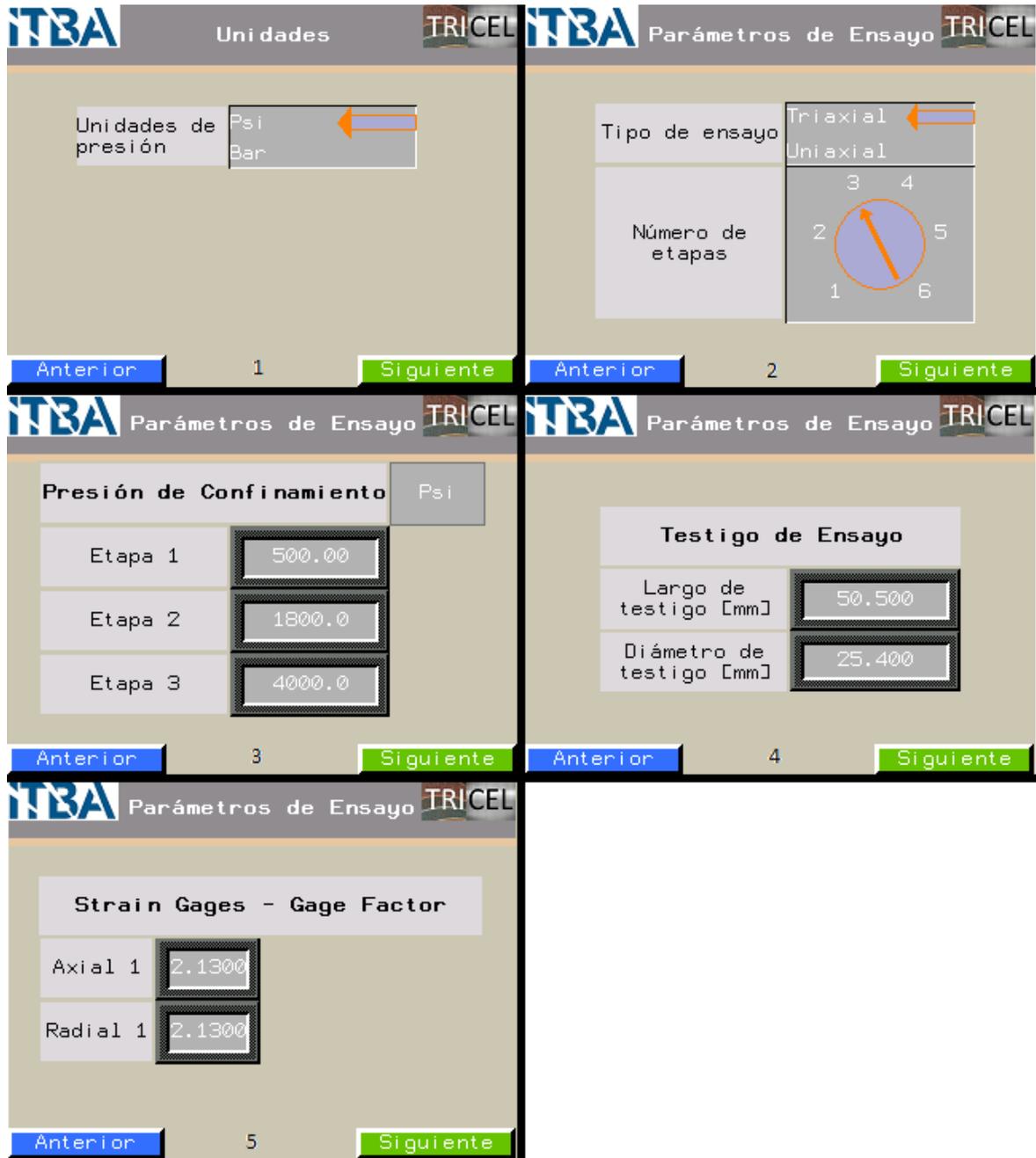


Figura 68. Pantallas de ingreso de parámetros.

La pantalla que sigue es la del cerado de los *strain gages*, en esta pantalla que se muestra en la **Figura 69** se indica al usuario si los *strain gages* están correctamente cerados. En el caso mostrado en la **Figura 69** es necesario cerar el *strain gage* axial. El usuario no podrá continuar hasta que ambos sensores estén correctamente calibrados.



Figura 69. Pantalla de cerado de *strain gages*.

Se observa que hay un botón de instrucciones. Al presionar este botón, se muestra la secuencia de imágenes de la **Figura 48**.

Luego de esta etapa se ingresa el nombre que sirve para identificar al ensayo. Por último se muestra una pantalla con todos los parámetros ingresados para que el usuario los pueda verificar por última vez. Existen además configuraciones avanzadas que consisten en las que se observan en la última pantalla de la **Figura 70**.



Figura 70. Pantallas para nombrar el ensayo y confirmar los parámetros.

Una vez que están todos los parámetros ingresados y confirmados se pasa al encendido de los motores. La pantalla táctil le indica al usuario el procedimiento que debe seguir como se muestra en la **Figura 71**.

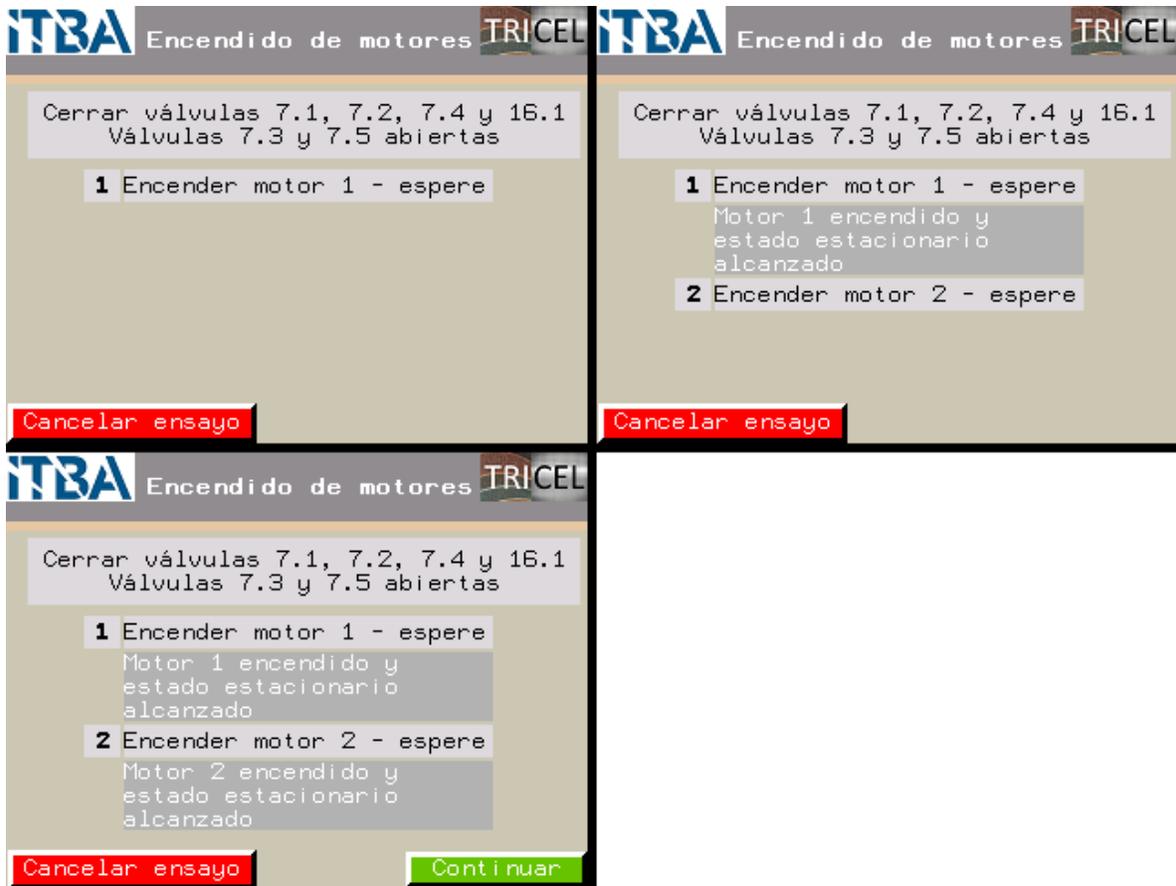


Figura 71. Pantallas para el encendido de motores.

Se arranca encendiendo el motor 1, que es el del circuito de confinamiento y se espera a que aumente la presión hasta la presión mínima. Cuando el programa detecta que se estabiliza la presión, se lo indica al usuario para que encienda el motor 2, que es el del circuito del pistón hidráulico.

Se sigue esta secuencia de encendido ya que si se enciende el motor 2 primero, la presión del pistón mínima que se establece hace que el pistón suba y haga fuerza sobre la muestra. Si antes de prender el motor 2 se enciende el motor 1, la presión de confinamiento mínima que se establece impide que el pistón suba al prender el motor 1.

Una vez que los motores se encienden siguiendo la secuencia indicada, el ensayo está listo para ser arrancado. Previo a esto, se realiza un chequeo general de todos los sensores para verificar que estén todos dentro de lo normal. La pantalla para este paso es la de la **Figura 72**. Durante este chequeo de 10 segundos se realizan las siguientes verificaciones.

- La presión de confinamiento es estable (no varía con el tiempo) y se encuentra dentro del rango esperado.
- La presión de pistón es estable (no varía con el tiempo) y se encuentra dentro del rango esperado.
- El pistón se encuentra ubicado en el punto muerto inferior y sin moverse.
- Los sensores de deformación se encuentran estables y dentro de rango.



Figura 72. Pantalla de evaluación de los sensores antes del inicio del ensayo.

Para dar arranque al ensayo se debe presionar el pulsador verde como se indica en la pantalla. Esto es para evitar que el usuario accidentalmente le de arranque al ensayo con los botones más sensibles de la pantalla táctil.

6.5.1.2 Ejecución de los procedimientos de ensayo

Para el caso del ensayo triaxial, el primer paso es aumentar la presión de confinamiento a la indicada para la primera etapa de compresión. Para esto se realiza un control de la presión de confinamiento de manera tal que siga una rampa hasta la presión objetivo. Durante esta etapa se muestra un medidor circular al cual se le marca la presión objetivo como se observa en la **Figura 73**. Esta etapa finaliza cuando se detecta que la presión de confinamiento se establece en la presión deseada.

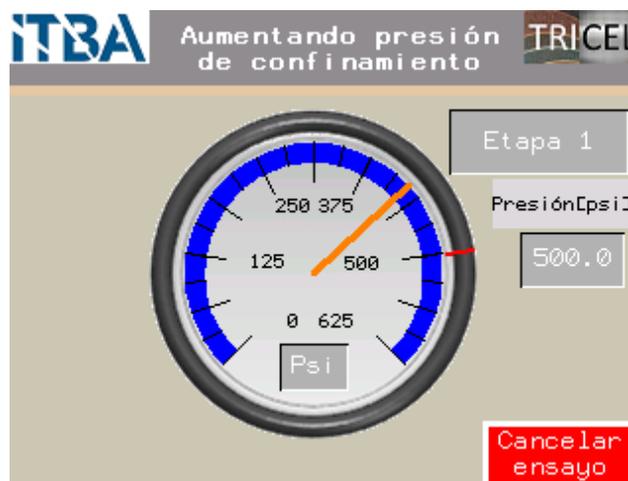


Figura 73. Pantalla visible durante el aumento de la presión de confinamiento.

Una vez establecida la presión de confinamiento, se debe aproximar al pistón hasta que obture el huelgo de equalización de presiones y haga contacto con la muestra. Para esto se hace avanzar al pistón siguiendo una rampa de desplazamiento mediante un control adecuado. Esta etapa continua hasta que se detecta una pequeña deformación axial

indicando que se hizo contacto con la muestra. Durante esta etapa se muestra una animación en la pantalla para indicar al usuario lo que está ocurriendo dentro de la celda triaxial como se muestra en la **Figura 74**. La animación consiste en un esquema donde se ve al pistón avanzando lentamente hacia el testigo de roca. No es una representación exacta del desplazamiento del pistón relativo a la muestra.



Figura 74. Pantalla visible durante la aproximación del pistón a la muestra.

Una vez que el pistón hace contacto con la muestra, se pasa a la etapa de compresión. Durante esta etapa se hace avanzar al pistón de manera tal que la deformación axial de la muestra siga una rampa de deformación deseada mediante un control adecuado. Durante esta etapa se grafica en tiempo real la curva de tensión deviatorica - deformación volumétrica para que el usuario pueda observar el momento en el que ocurre el punto de dilatación positiva (PDP), según sección 3.6. Cuando el usuario detecta que la pendiente se vuelve infinita, puede apretar el pulsador rojo para pasar de la compresión a la descarga.

La detección del PDP queda a cargo del usuario en lugar de automáticamente teniendo en cuenta que las mediciones digitales de derivadas son susceptibles al ruido existiendo el riesgo de falsas detecciones del cambio de pendiente, y que en la universidad de Texas utilizan el mismo método de detección. En la **Figura 75** se muestra la curva que se obtiene durante un ensayo de roca.

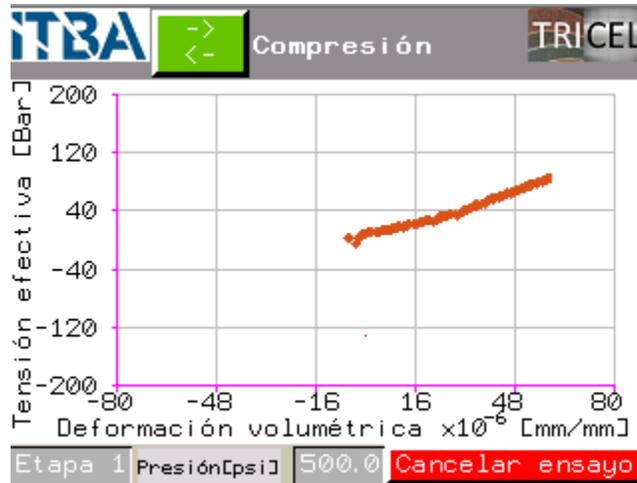


Figura 75. Pantalla visible durante la compresión de la muestra.

Al pulsar el botón rojo, se pasa a la etapa de descompresión. Se procede de la misma manera que en la etapa de compresión pero siguiendo una rampa de deformación axial de pendiente negativa. La etapa de descompresión finaliza cuando se detecta que el pistón pasa por la posición en la cual previamente había hecho contacto con la muestra. En la Figura 76 se muestra la pantalla para esta etapa.

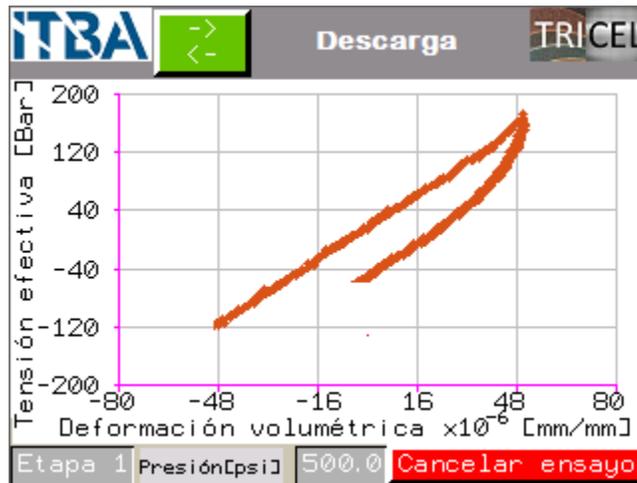


Figura 76. Pantalla visible durante la descarga de la muestra.

La siguiente etapa consiste en llevar al pistón a su punto muerto inferior para volver a habilitar el huelgo de ecualización de presiones. Para esto se realiza un control que haga bajar el pistón a una velocidad constante como en el caso de la aproximación del pistón a la muestra. En la pantalla se observa una animación mostrando el descenso del pistón. Cuando se detecta que el pistón llega al punto muerto inferior se finaliza este estado.



Figura 77. Pantalla visible durante el retorno del pistón al punto muerto inferior.

Si quedan más etapas del ensayo *multistage*, se vuelve al estado de aumento de presión de confinamiento. De lo contrario, se pasa al estado de finalización del ensayo en el cual se reducen las presiones al mínimo. Se reduce primero la presión del pistón y luego la de confinamiento, ambas siguiendo rampas decrecientes. Se sigue esta secuencia para que el pistón no suba y ejerza una fuerza sobre la muestra. Las pantallas de esta etapa se muestran en la **Figura 78** donde se espera a que bajen las presiones para poder continuar con un nuevo ensayo o finalizar el actual.



Figura 78. Pantalla visible durante la finalización del ensayo.

Al finalizar el ensayo, se le indica al usuario el procedimiento que debe seguir para poder abrir la celda triaxial de forma segura. Durante esta etapa se sensan las presiones para determinar cuando estas son nulas y así habilitar al usuario a abrir la máquina. Esto se observa en la **Figura 79**.



Figura 79. Instrucciones para el apagado del equipo.

6.5.1.3 Finalización por cancelación de ensayo

Si se presiona el botón de 'Cancelar Ensayo' que se observa en la **Figura 77** entre otras. Se le pide al usuario confirmación para cancelar el ensayo. Si se confirma la cancelación, se interrumpe el estado actual para saltar al estado de reducción de presiones de la **Figura 78**. Esto permite tener un método de cancelar el ensayo poco agresivo.

6.5.1.4 Parada de emergencia

Al apretar el golpe de puño se interrumpe cualquier acción para abrir inmediatamente las electroválvulas de confinamiento y de pistón. Esto hace que las presiones caigan abruptamente y se pasa a la pantalla de la **Figura 80**.



Figura 80. Pantalla visible al presionar la parada de emergencia.

6.5.2 Registro de datos

Los datos se escriben en un archivo de texto que se almacena en la tarjeta SD del PLC. Al inicio del ensayo se escribe un encabezado con el significado de cada columna, el nombre del ensayo y los parámetros utilizados como se muestra en la **Figura 81**.

```
Tiempo RampaLVDT LVDT RampaConf PresionConf RampaPist PresionPist RampaDefAx DefAx DefRad ValvulaConf ValvulaPist PIDConf PIDPist Estado
Nombre Ensayo... UCS M13V5
nEt: 1 lM:50.515 dM:25.267 G1:2.13 G2:2.13 G3:2.13 G4:2.13 vD:0.2 vPc:1500
0 0 -1129 0 97 0 131 0 5.904469E-05 -8.867413E-06 0 0 -10000 -38 10
0.32 0 -1129 0 96 0 130 0 5.904469E-05 -8.867413E-06 0 0 -10000 -38 10
0.64 0 -1129 0 96 0 131 0 5.904469E-05 -8.867413E-06 0 0 -10000 -38 10
0.96 0 -1129 0 96 0 130 0 5.904469E-05 -8.867413E-06 0 0 -10000 -38 10
```

Figura 81. Encabezado del archivo de registro de datos.

Las variables útiles para el post-proceso de resultados que se registran son el tiempo, la presión de confinamiento, la presión del pistón, la deformación axial, la deformación radial, la deformación volumétrica y la salida del LVDT.

Se registran también las rampas de presión de confinamiento, de presión de pistón y de desplazamiento del pistón, los esfuerzos de control del PID de la presión de confinamiento y de la presión del pistón y los valores nominales de las electroválvulas. Estas variables se registran con el objetivo de evaluar el sistema de control y hacer ajustes en base a los resultados.

Por último se registra una variable 'Estado' que es un número que indica en qué estado del ensayo se está, por ejemplo un estado de 5 indica que se está en la etapa de compresión del ensayo triaxial.

Las variables registradas se muestrean cada 320 ms. Se toma este período ya que es menor a la que se usa en Terratec (1 s).

El archivo de texto contiene 30000 líneas y cuando se llega a la última línea se comienza a reescribir desde la primera. Esto permite registrar 160 minutos de ensayos.

6.5.3 Visualización de variables en tiempo real

El PLC permite crear una página html que se puede acceder desde cualquier computadora conectada a la misma red del PLC ingresando el número de IP del mismo en un explorador de internet. Se aprovecha esta utilidad para diseñar una página de visualización de variables en tiempo real como se muestra en la **Figura 82** para que el usuario pueda tener toda la información del ensayo que desee.

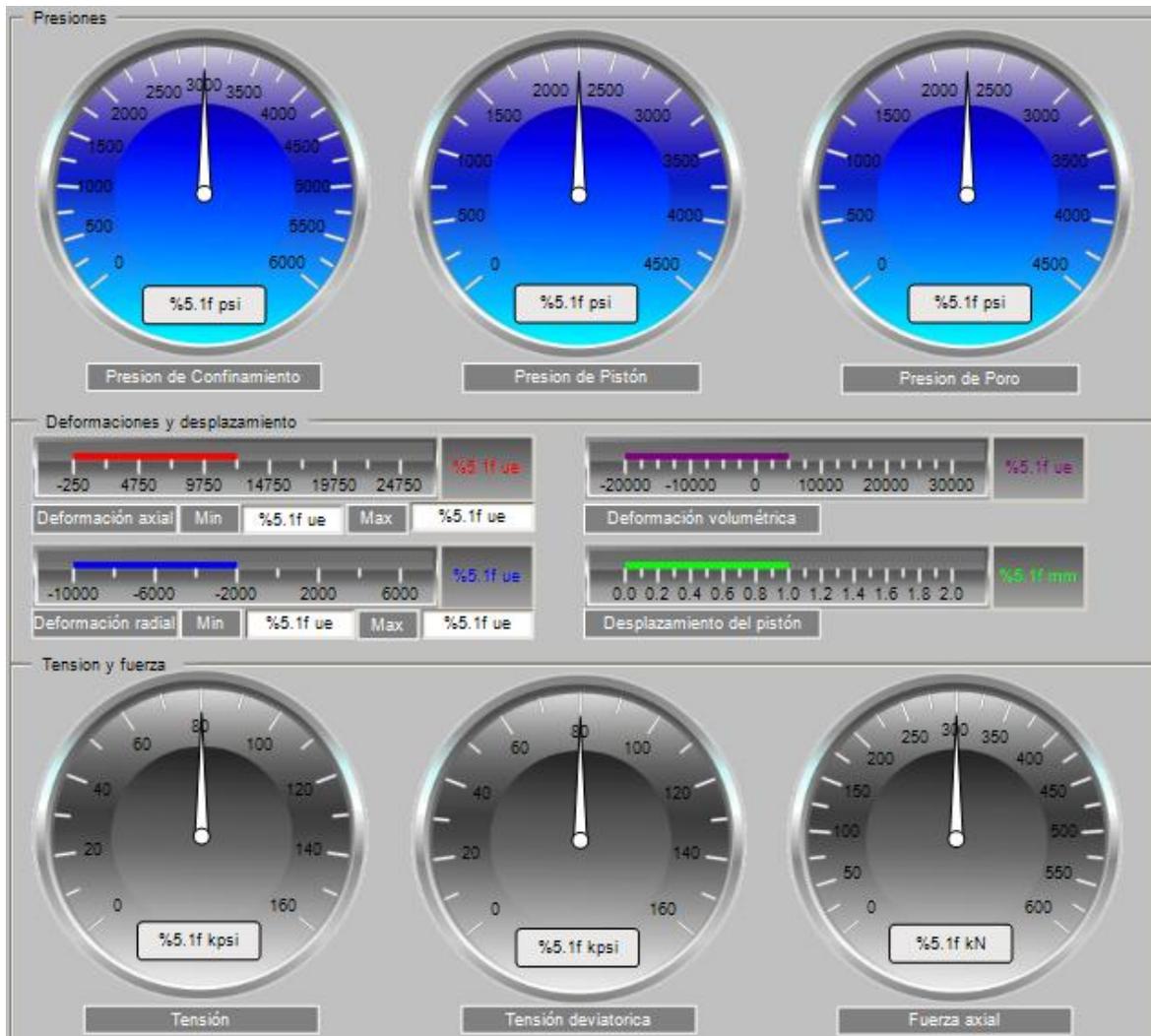


Figura 82. Interfaz para la visualización de las variables relevantes en tiempo real.

6.6 Estrategias de control

En el ensayo triaxial se hace el control de 4 variables, estas son

1. Presión de confinamiento.
2. Presión del pistón.
3. Posición del pistón.
4. Deformación axial de la muestra.

6.6.1 Control de la presión de confinamiento

La presión de confinamiento debe ser aumentada conforme a los requerimientos de la norma ASTM mencionadas en la sección 6.

La presión es aumentada uniformemente haciendo que siga una rampa hasta el nivel deseado, la tasa de aumento de la presión la puede configurar el usuario. La **Figura 83**

muestra esta etapa en donde se puede ver que se cumplen los requerimientos de la norma, en el detalle de la figura se muestra el transitorio de la respuesta. La estrategia de control utilizada para lograr esta respuesta es una combinación de *feedforward* con PID tal como se observa en la **Figura 84**.

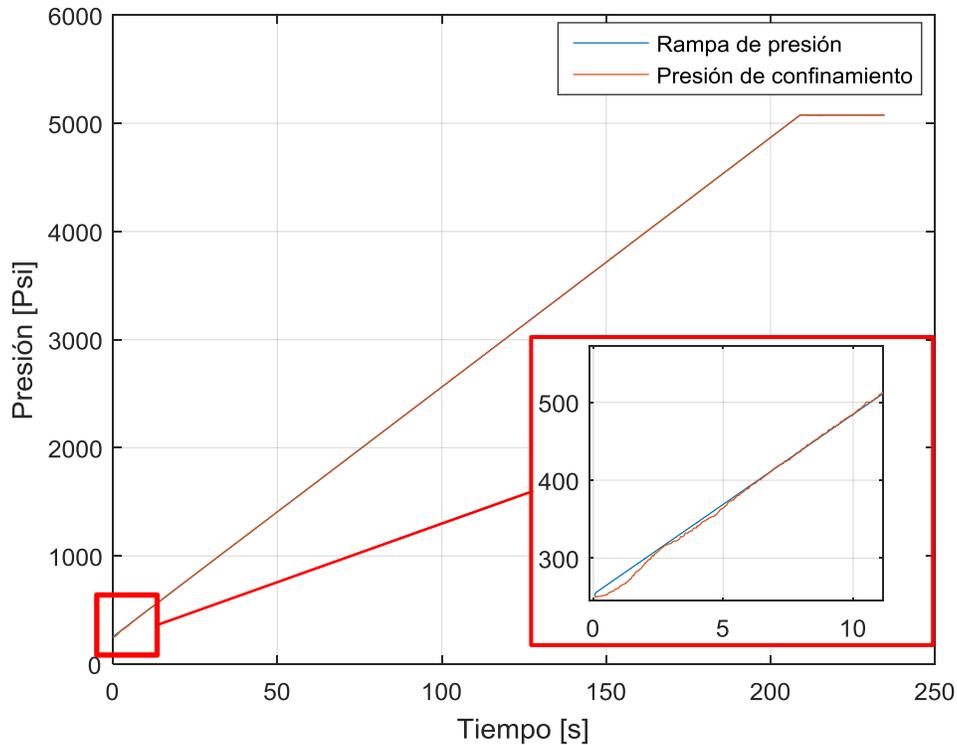


Figura 83: Respuesta del control de la presión de confinamiento

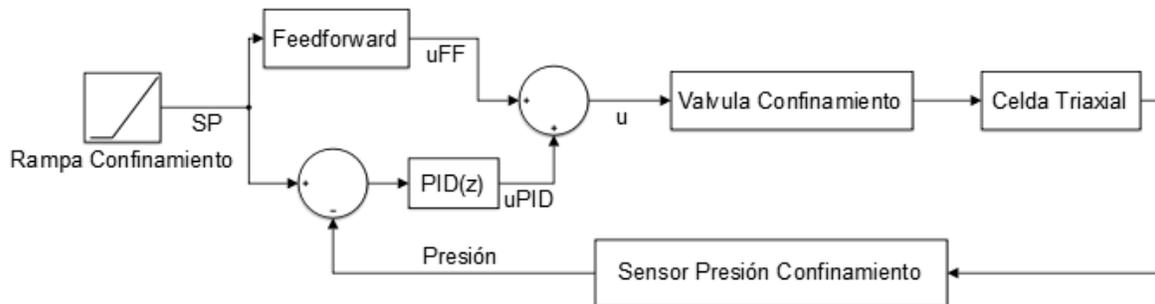


Figura 84: Esquema de la estrategia de control para la presión de confinamiento

Para la parte de *feedforward* es necesario obtener la señal que se le debe mandar a la válvula para obtener la presión deseada. Para esto se utilizan los resultados de la sección 6.4.2 que se repiten a continuación.

Pendiente: $m = 0,6501 \text{ LSB/LSB}$

Ordenada al origen: $c = 487 - m300$

Estos valores sirven para convertir la señal de válvula de confinamiento a presión de confinamiento obtenida a través de la ecuación de la recta, lo que se necesita es la inversa para saber qué señal hay que mandarle a la válvula de confinamiento para obtener la presión deseada. Se obtiene entonces la inversa.

$$m_c = \frac{1}{m} = \frac{1}{0,6501} = 1,5382 \text{ LSB/LSB}$$

Y para la ordenada al origen

$$c_c = 300 - m_c P_{0c}$$

En base a las respuestas obtenidas, la ordenada al origen se modifica a:

$$c_c = 175 - m_c P_{0c}$$

Esto reduce la zona muerta de la válvula de 300 LSB (ó 0,3 V) a 175 LSB (ó 0,175 V).

El esfuerzo de control que comanda el bloque de *feedforward* entonces es:

$$u_{ff} = P_c m_c + 175 - m_c P_{0c} \quad V_{0c} < 175$$

$$u_{ff} = P_c m_c + V_{0c} - m_c P_{0c} \quad V_{0c} \geq 175$$

V_{0c} : Valor de la válvula de confinamiento inicial

A este esfuerzo de control se le suma el esfuerzo de control del PID, este se encarga de corregir los errores del *feedforward*. Se utiliza el algoritmo en forma velocidad y los valores de los parámetros de control se tomaron, luego de algunos ajustes como:

$$K_{pc} = 5$$

$$K_{ic} = 8$$

$$K_{dc} = 0$$

Con lo cual estrictamente es un control PI.

El control de confinamiento sigue activo durante todo el ensayo para compensar cualquier perturbación. La perturbación más significativa a la presión de confinamiento es el movimiento del pistón ya que este afecta el volumen de la cámara de confinamiento y con eso la presión. Es por esta razón que todos los movimientos del pistón deben ser controlados para que sean suaves ya que de lo contrario las perturbaciones son demasiado bruscas como para ser compensadas.

6.6.2 Control de la presión del pistón

Este control se utiliza al momento de finalizar el ensayo para reducir las presiones al mínimo de manera controlada. Se sigue la misma estrategia que para el control de la presión de confinamiento, como se muestra en la **Figura 85**.

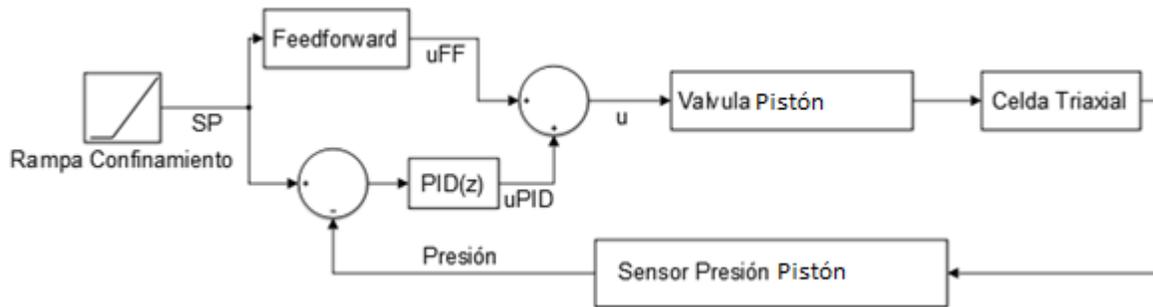


Figura 85: Esquema de la estrategia de control para la presión del pistón

Las ecuaciones del bloque de *feedforward* son

$$u_{ff} = P_p m_p + 175 - m_p P_{0p} \quad V_{0p} < 175$$

$$u_{ff} = P_p m_p + V_{0p} - m_p P_{0p} \quad 175 \leq V_{0p}$$

Con $m_p = 1,3047 \text{ LSB/LSB}$

Las constantes del PID utilizadas son las mismas que para el control de la presión de confinamiento.

$$K_p = 5$$

$$K_i = 8$$

$$K_d = 0$$

6.6.3 Control del desplazamiento del pistón

El desplazamiento del pistón en las etapas de aproximación hacia la muestra y de retorno al punto muerto inferior, se realiza a velocidad constante haciendo que siga una rampa de desplazamiento como se observa en la **Figura 86**. La estrategia de control utilizada para lograr esta respuesta es una combinación de *feedforward* con PID similar al control de presión de confinamiento, esto se observa en la **Figura 87**.

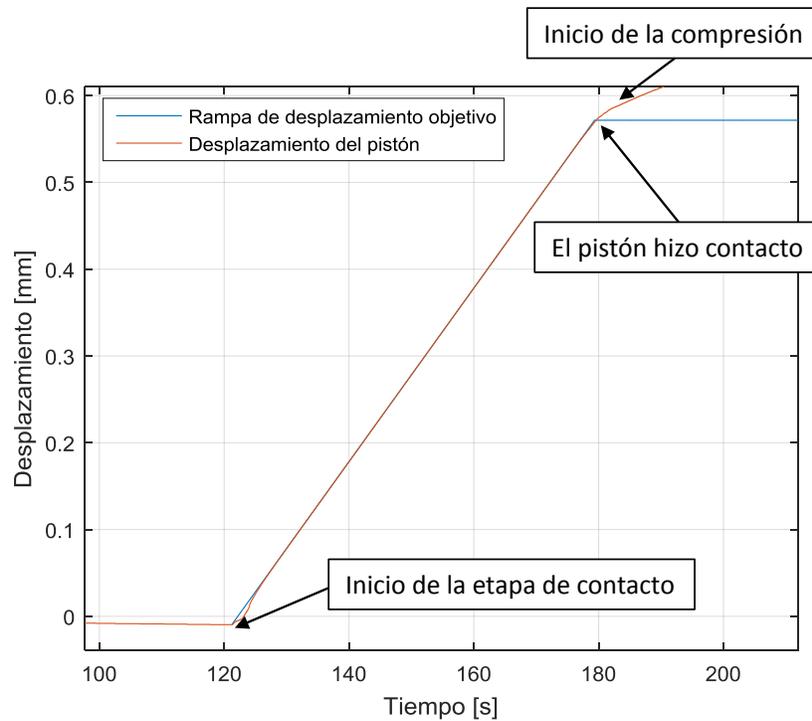


Figura 86: Respuesta del control de la posición del pistón

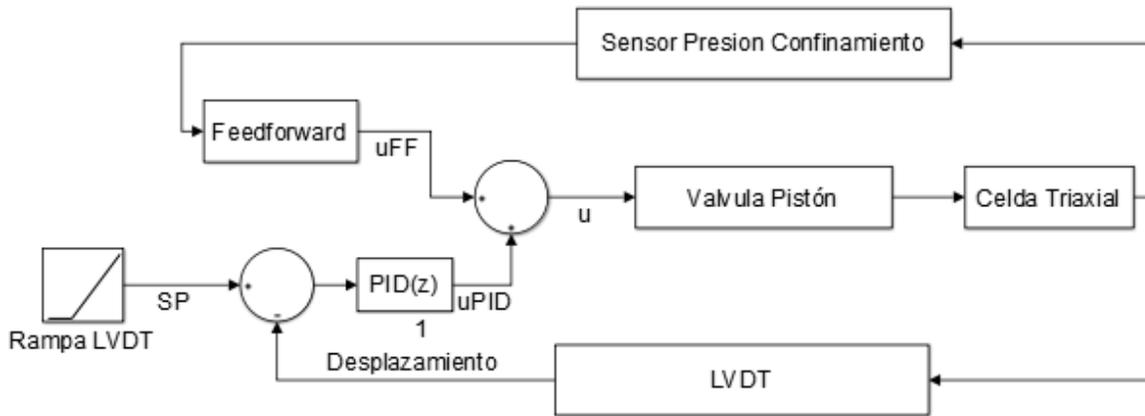


Figura 87: Esquema de la estrategia de control para la posición del pistón.

En este caso, el bloque de *feedforward* se divide en dos porciones. En la primera, se calcula la presión del pistón necesaria para que el pistón se mueva teniendo en cuenta la presión de confinamiento de la cámara. Luego con esta presión de pistón se hace el cálculo de la sección 6.6.2 para obtener el esfuerzo de control que se le debe aplicar a la electroválvula del pistón.

De esta manera se elimina la zona muerta en la cual se aumenta la presión del pistón pero éste no se mueve.

Para calcular la presión del pistón necesaria para que éste se mueva, se aplica la ecuación obtenida en la sección 6.4.3.1.

$$P_P = \frac{P_C A_{PM} + F_G \pm F_E}{A_{PH}}$$

P_P = Presión de pistón

P_C = Presión de confinamiento

A_{PH} = Área del pistón hidráulico

A_{PM} = Área del pistón multiplicador

F_G = Fuerza gravitatoria actuando sobre ambos pistones

F_E = Fuerza de roce estático

Donde el signo de F_E es positivo si se quiere mover el pistón para arriba y negativo si se lo quiere mover para abajo. La expresión de F_E se obtuvo en la sección 6.4.3.1.

Las constantes del PID utilizadas son las siguientes:

$$K_p = 1,5$$

$$K_i = 1$$

$$K_d = 0,2$$

6.6.4 Control de la deformación axial de la muestra

La compresión axial de la muestra comienza inmediatamente después de que el pistón multiplicador hace contacto con el pistón buzo. La compresión se realiza a tasa de deformación axial constante. Para esto se hace un control PID realimentando la salida del *strain gage* axial como se observa en la **Figura 89**. El resultado del control se muestra en la **Figura 88**. Se observa un error de estado estacionario constante en el seguimiento a la rampa, este resultado se acepta ya que la pendiente de la curva, que es lo que realmente importa, se mantiene constante. Tratar de reducir el error estacionario requeriría la implementación de un control más agresivo con mayor posibilidad de volverse inestable.

Las constantes del PID utilizadas son las siguientes:

$$K_p = 1,2 \times 10^6$$

$$K_i = 4 \times 10^5$$

$$K_d = 4 \times 10^5$$

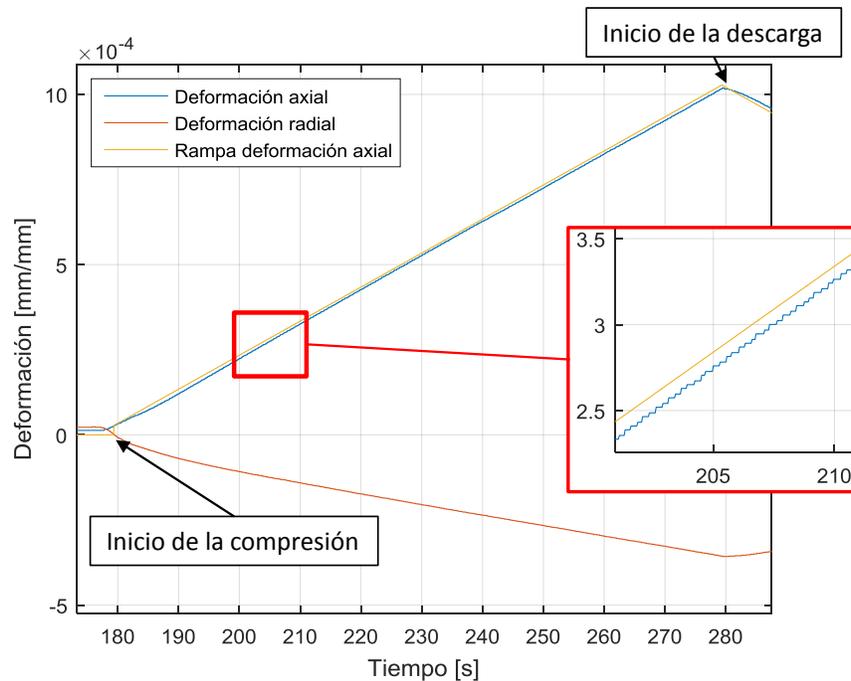


Figura 88: Respuesta del control de la deformación axial.

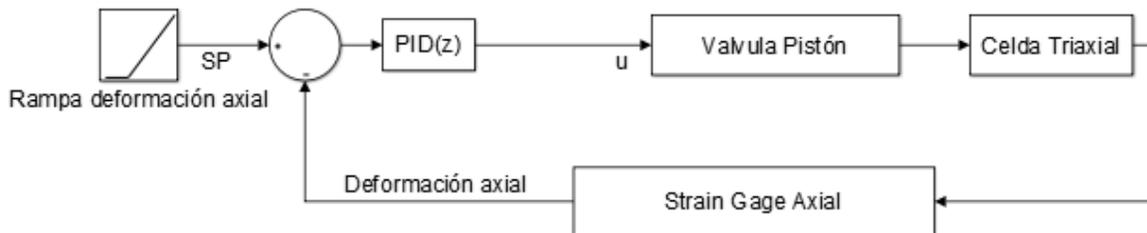


Figura 89: Esquema de la estrategia de control para la deformación axial.

7 Validación de las mediciones

Los primeros ensayos fueron realizados sobre una probeta de acero de propiedades conocidas que permitió cotejar los resultados con el teórico esperado y validar el correcto funcionamiento de la máquina. Los resultados obtenidos en la sección 6.4.3.1 dan una evaluación positiva de las mediciones de las tensiones, en esta sección se corroboran más profundamente y se validan las mediciones de las deformaciones.

En la **Tabla 2** se resumen las propiedades de la probeta utilizada.

Material	Módulo de Young teórico [GPa]	Coefficiente de Poisson teórico	Largo [mm]	Diámetro [mm]
Acero	200	0,3	50,4	25,3

Tabla 2. Propiedades de la probeta utilizada.

Se realiza un ensayo de compresión axial a la muestra con una baja presión de confinamiento de 30 bar. A partir de los resultados obtenidos se grafican las curvas de tensión – deformación y se obtiene el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. En la **Figura 90** se muestra el resultado de estas curvas.

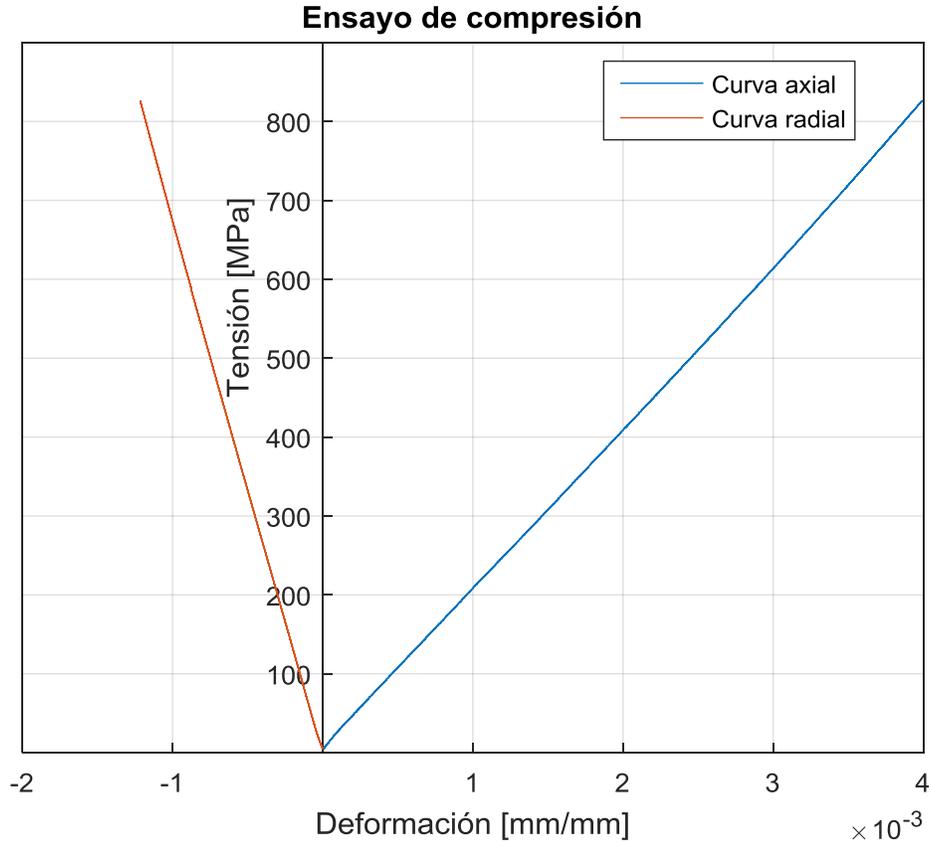


Figura 90. Resultado del ensayo de compresión de la probeta metálica.

Se observa la linealidad propia del material dentro de su límite elástico, al obtener las pendientes de los ajustes lineales de estas curvas se tienen los siguientes resultados

- Pendiente de la curva axial (módulo de Young): 204 GPa
- Pendiente de la curva radial: 678 GPa
- Cociente de pendientes (coeficiente de Poisson): 0,3009

Con lo cual quedan validadas las mediciones del ensayo.

Se realizó además un ensayo de tipo *multistage* de 3 etapas sobre esta probeta. La **Figura 91** muestra la presión de confinamiento durante el ensayo donde se distinguen las 3 etapas, la primera a 120 bar, la segunda a 240 bar y la tercera a 360 bar.

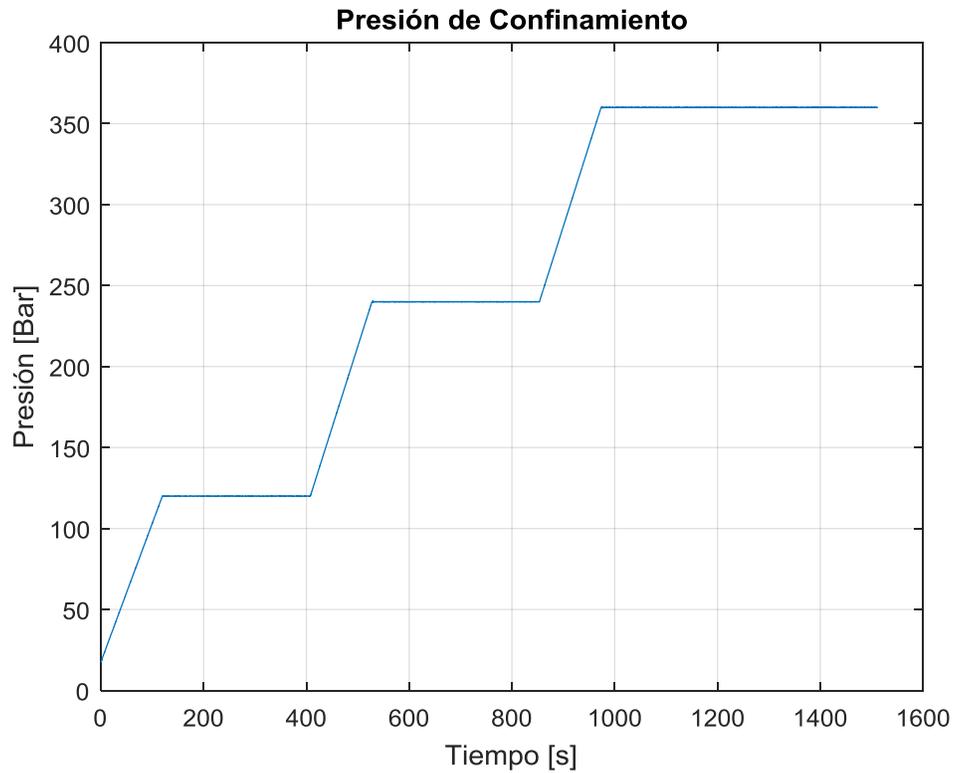


Figura 91. Historial de presión de confinamiento del ensayo *multistage*.

La **Figura 92** muestra las curvas de deformación axial durante la carga y descarga. Se observan las rampas de tasa de deformación constante tanto durante la carga como durante la descarga.

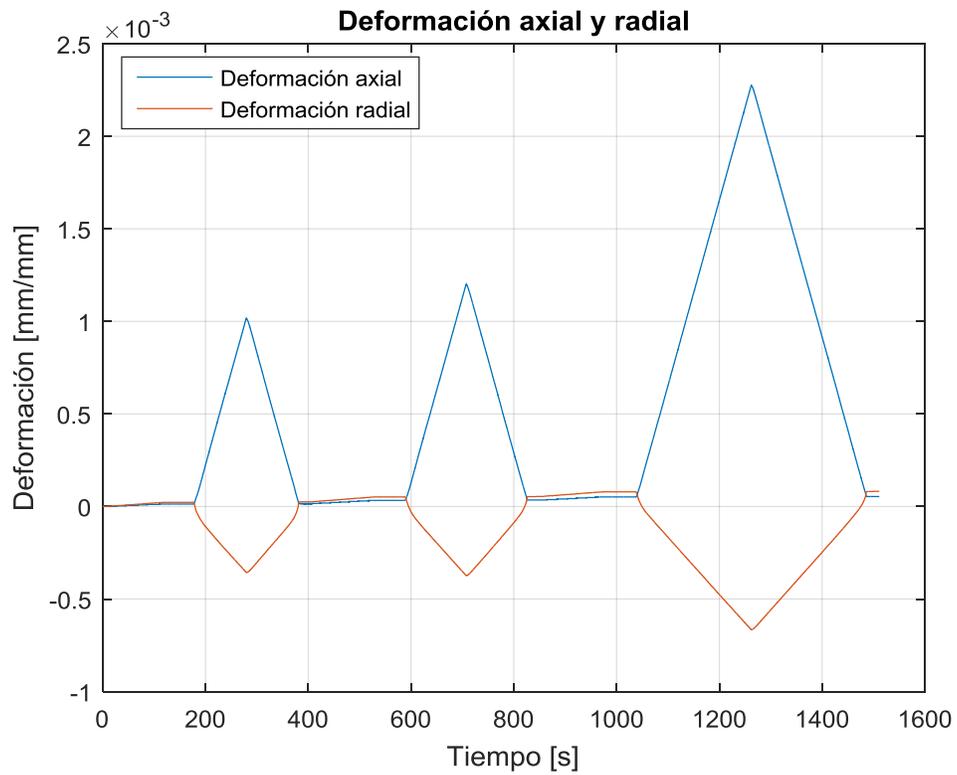


Figura 92. Historial de deformaciones durante el ensayo *multistage*.

En la **Figura 93** se observa las curvas de tensión – deformación para las distintas etapas de compresión. Como es de esperar para este material isotrópico, las pendientes de las curvas no varían con la presión de confinamiento.

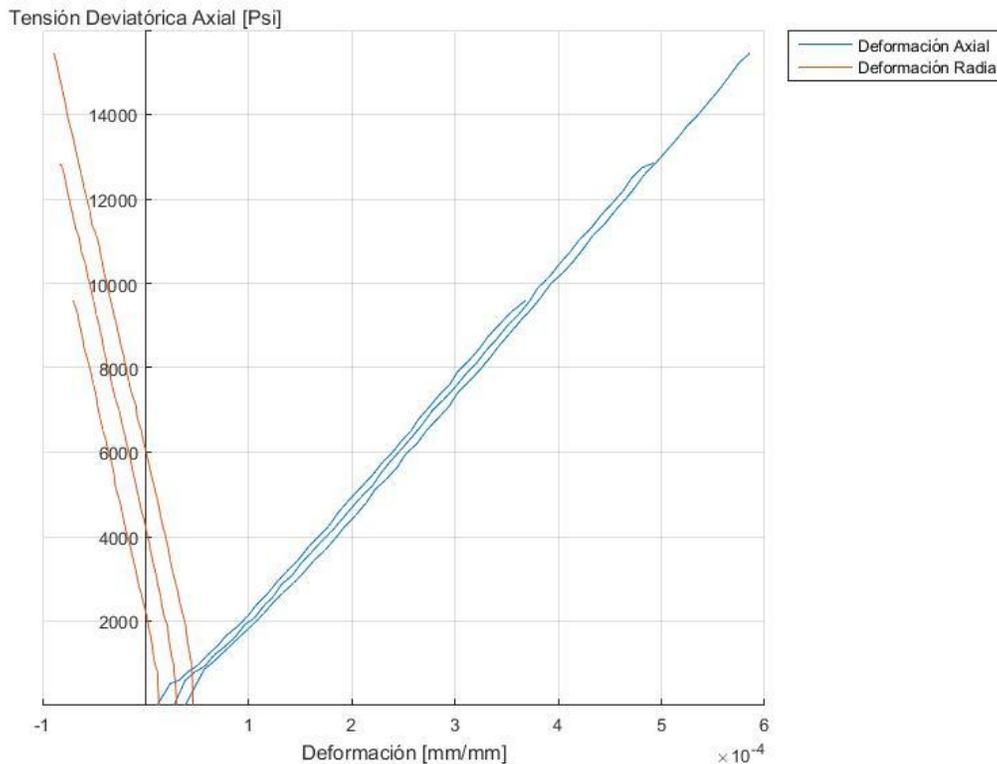


Figura 93. Curvas tensión deviatórica – deformación para las 3 etapas de compresión.

Para seguir verificando las correctas mediciones de deformación se compararon los resultados obtenidos por la celda triaxial con los resultados obtenidos por un adquisidor de datos capaz de medir deformaciones. El equipo utilizado se muestra en la **Figura 94**. Es un adquisidor de datos marca HBM modelo MX1615B



Figura 94. Adquisidor de datos utilizado para comparar las mediciones de deformación.

En la **Figura 95** se muestra los resultados de la comparación de la medición de deformación entre ambos equipos durante una etapa de compresión. Se observa que las lecturas coinciden.

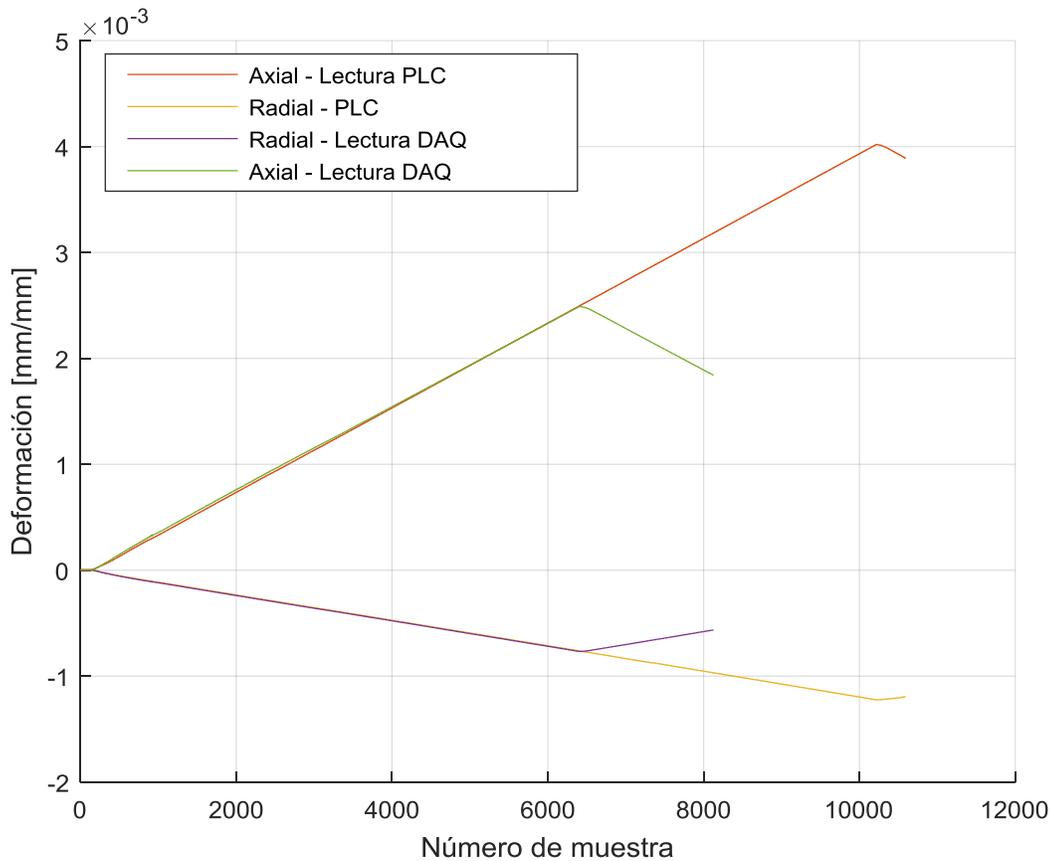


Figura 95. Resultado de la comparación entre mediciones de deformación.

8 Postproceso de resultados

Para facilitar la tarea de post-procesar los resultados al usuario, se desarrolla una interfaz gráfica en MATLAB. Las tareas que realiza el programa son:

- Lectura de los datos de salida del PLC.
- Gráficos de las variables relevantes.
- Cálculo de módulos de Young, de corte, de compresibilidad y coeficiente de Poisson (E , G , K y ν).
- Gráfico de los círculos de Mohr del ensayo y obtención de la envolvente de Mohr-Coulomb.
- Exportación de datos a Excel.

8.1 Lectura de los datos de salida del PLC

Exceptuando las deformaciones, el PLC registra los valores de las variables en unidades del PLC, es decir, en valores en LSB. Al cargar el archivo de salida del controlador el programa de postproceso convierte las variables a unidades del sistema métrico.

En el archivo de salida del PLC se encuentran almacenados los datos de distintos ensayos, con lo cual al finalizar la lectura del archivo, se le permite al usuario elegir el ensayo a post-procesar según el nombre que se le asignó durante la interacción con la pantalla táctil. Este paso se muestra en la **Figura 96**.

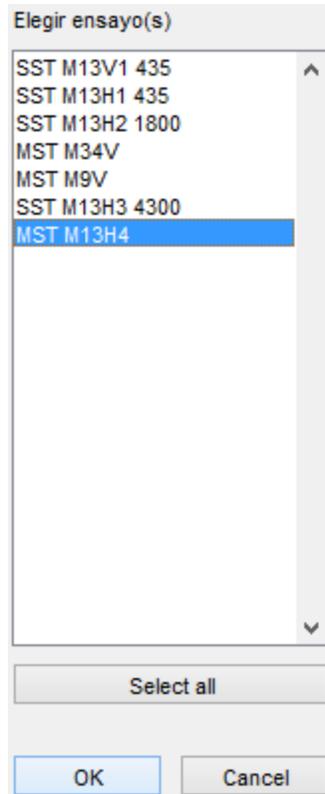


Figura 96. Selección del ensayo a post-procesar.

Una vez seleccionado el ensayo se ofrece al usuario almacenar los datos del mismo en un archivo de texto por separado. En este archivo de texto se guardan únicamente los datos del ensayo seleccionado, en unidades del sistema métrico, y que luego puede ser cargado de la misma manera que el archivo de salida de datos del PLC. En la **Figura 97** se observa el encabezado de este nuevo archivo de texto.

```

[*Resultados levantados el 14-Feb-2017
Cantidad de Resultados: 3613
Cantidad de Ensayos: 1
Nombre de Ensayo: SST M13H1 435
N° de etapas: 1 Largo de muestra [mm]: 50.45 Diámetro de muestra [mm]: 25.413 GF1: 2.13 GF2: 2.13
Tiempo_[s] PresionConfinamiento_[MPa] TensiónAxial_[MPa] TensionDeviatóricaAxial_[MPa] FuerzaAxial_[N]
0.000000 0.000000 0.000000 0.038182 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.005000 1
0.320000 0.000000 0.000000 0.038182 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.005000 1
0.640000 0.000000 0.000000 0.038182 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.005000 1
0.960000 0.000000 0.000000 0.031818 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.005000 1
1.280000 0.000000 0.000000 0.031818 0.000000 0.000000 1.564882 3.129764 0.005000 1

```

Figura 97. Encabezado del archivo de texto del ensayo seleccionado.

En la carga de resultados se calcula además la tensión axial, la tensión deviatórica axial y la fuerza axial aplicando las siguientes fórmulas.

Cuando el huelgo deja pasar el fluido hidráulico de la cámara de confinamiento:

$$F_A = P_C A_M$$

Cuando el huelgo se cierra y el pistón hace contacto con la muestra:

$$F_A = P_P A_{PH} - P_C (A_{PM} - A_M) - F_G - F_C - C_v v \quad \text{Pistón moviéndose hacia arriba}$$

$$F_A = P_P A_{PH} - P_C (A_{PM} - A_M) - F_G + F_C - C_v v \quad \text{Pistón moviéndose hacia abajo}$$

$$\sigma_A = \frac{F_A}{A_M}$$

$$\sigma_{dev} = \sigma_A - P_C$$

F_A = Fuerza axial

σ_A = Tensión axial

σ_{dev} = Tensión deviatorica

P_P = Presión de pistón

P_C = Presión de confinamiento

A_{PH} = Área del pistón hidráulico

A_{PM} = Área del pistón multiplicador

A_M = Área de la muestra

F_G = Fuerza gravitatoria actuando sobre ambos pistones (Sección 6.4.3)

F_C = Fuerza de roce cinético (Sección 6.4.3.2)

C_v = Coeficiente de roce viscoso (Sección 6.4.3.2)

v = Velocidad del pistón

La velocidad del pistón se obtiene a partir de la señal del LVDT.

8.2 Gráficos de las variables relevantes

Se facilita al usuario graficar las variables que desee en dos espacios de ploteo. En la **Figura 98** se ejemplifica el uso del gráfico superior para representar la presión de confinamiento y la tensión axial superpuestas, y el uso del gráfico inferior para representar la tensión deviatorica en función de la deformación radial haciendo uso de filtros.

Se le permite al usuario filtrar los datos a graficar por etapa y por estado de compresión o descarga.

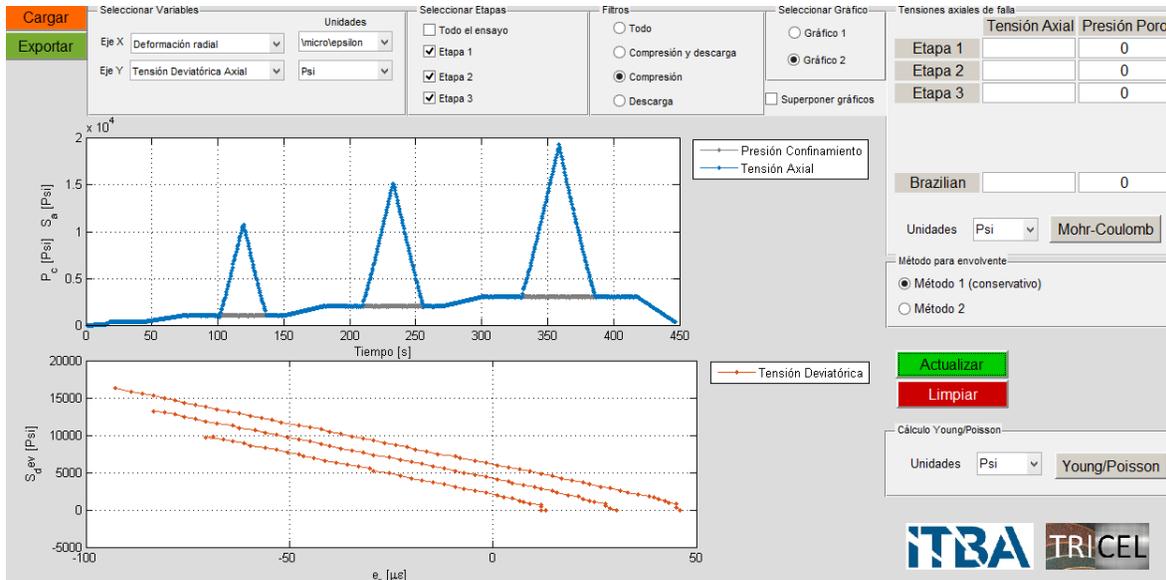


Figura 98. Interfaz gráfica para el post-proceso de resultados.

8.3 Cálculos de E, G, K y ν

Se le permite al usuario seleccionar el tramo de la curva tensión deviatórica – deformación axial que le resulte más apropiado (la zona lineal) para el cálculo de los parámetros E, G, K y ν . Esto se observa en la **Figura 99** donde se utilizaron filtros para aislar la parte de compresión de la etapa 1. Esto facilita la selección de los datos.

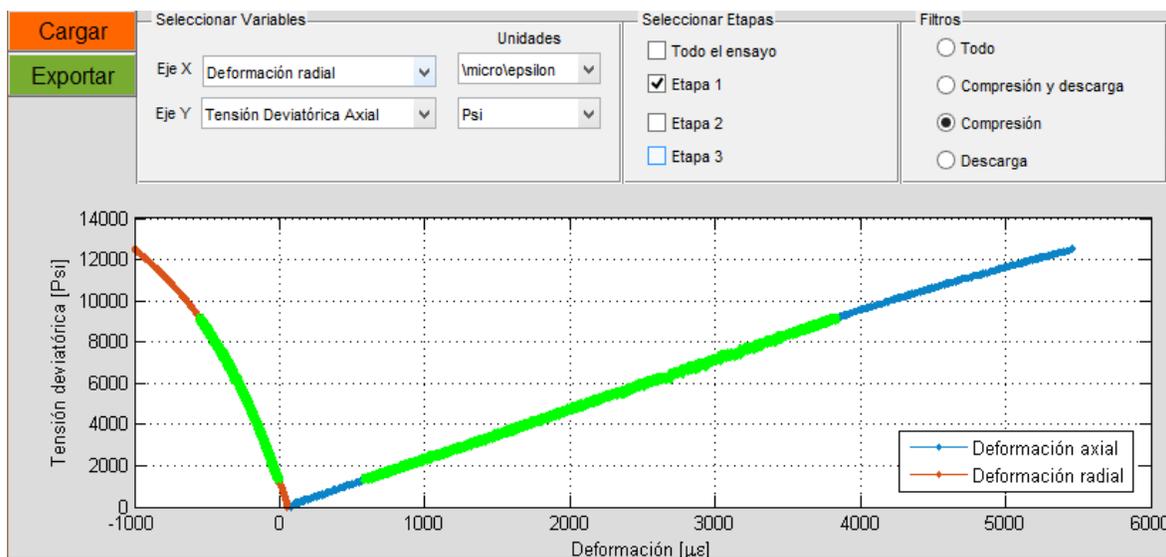


Figura 99. Selección de datos para el cálculo de E, G, K y ν .

Los resultados que se obtienen a partir de la selección se muestran en un gráfico aparte como se muestra en la **Figura 100**.

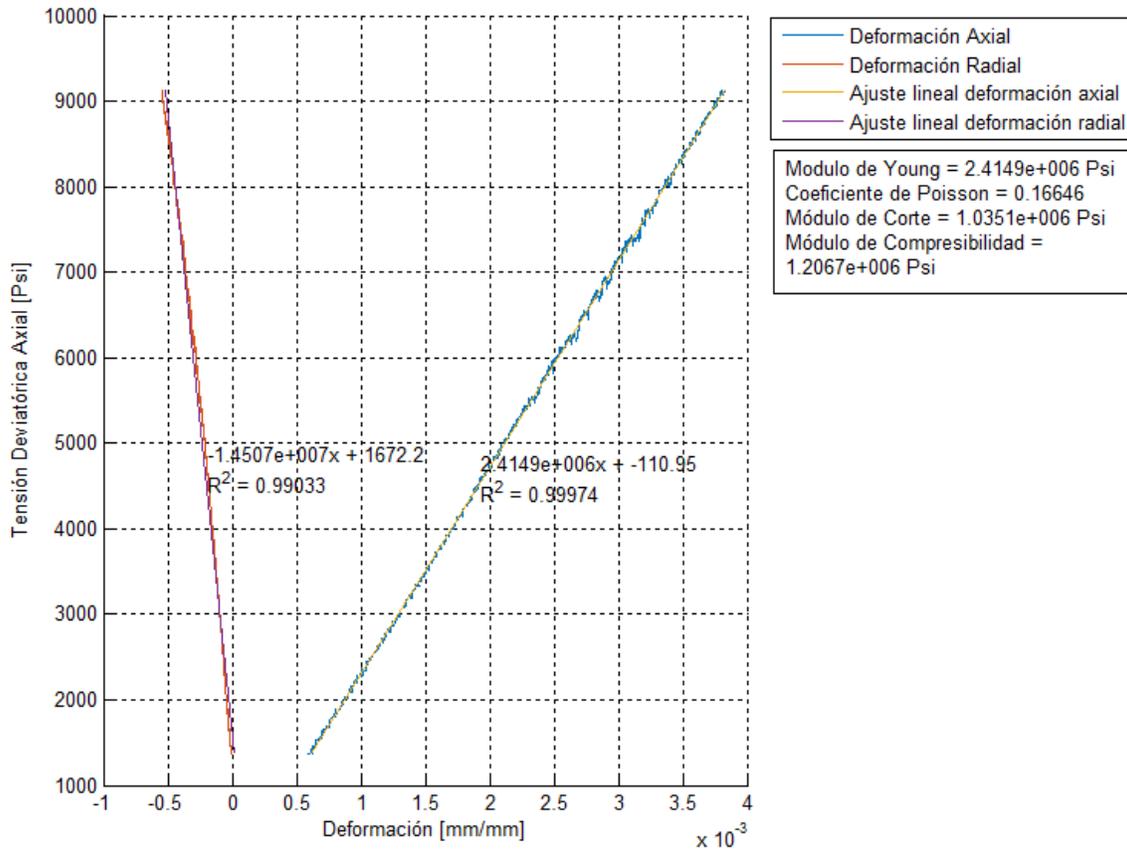


Figura 100. Resultados obtenidos a partir de la selección de datos.

8.4 Círculos de Mohr y obtención de la envolvente de Mohr-Coulomb

El usuario debe identificar las tensiones axiales de falla e ingresarlas en el espacio correspondiente, como se muestra en la **Figura 101**. Se permite agregar una etapa más llamada *Brazilian*. Este es un ensayo en donde se mide la resistencia a la tracción de la roca a partir del uso de una máquina que se compró para el laboratorio de geomecánica para tal propósito. También se puede agregar la presión de poro en caso de tener datos de la misma.

Para el cálculo de la envolvente se sigue un método heurístico que consiste en obtener rectas tangentes de a 2 círculos por vez. Por ejemplo, la recta tangente al círculo de Mohr de la etapa 1 y de la etapa 2, luego de la etapa 1 con la etapa 3 y así hasta cubrir todas las combinaciones. Para obtener la pendiente de la recta envolvente, se hace un promedio de las pendientes de todas las rectas obtenidas. Para obtener la ordenada al origen se tienen dos métodos. El primero, más conservativo, consiste en hacer que la recta de pendiente ya determinada sea tangente al círculo más externo, de esta manera, la recta envuelve a todos los círculos como se muestra en la **Figura 102**. El segundo método encuentra la tangencia de la recta con pendiente ya determinada con cada círculo, obteniendo distintas ordenadas al origen que se promedian para obtener la ordenada al origen de la recta de ajuste. El resultado se muestra en la **Figura 103**. Se

puede notar que la pendiente (y el ángulo de fricción interna) es el mismo que en el caso anterior, pero la cohesión es menor.

Tensiones axiales de falla

	Tensión Axial	Presión Poro
Etapa 1	20000	0
Etapa 2	25000	0
Etapa 3	30000	0

Brazilian 0

Unidades

Método para envolvente

Método 1 (conservativo)

Método 2

Figura 101. Carga de los valores de tensión axial de falla.

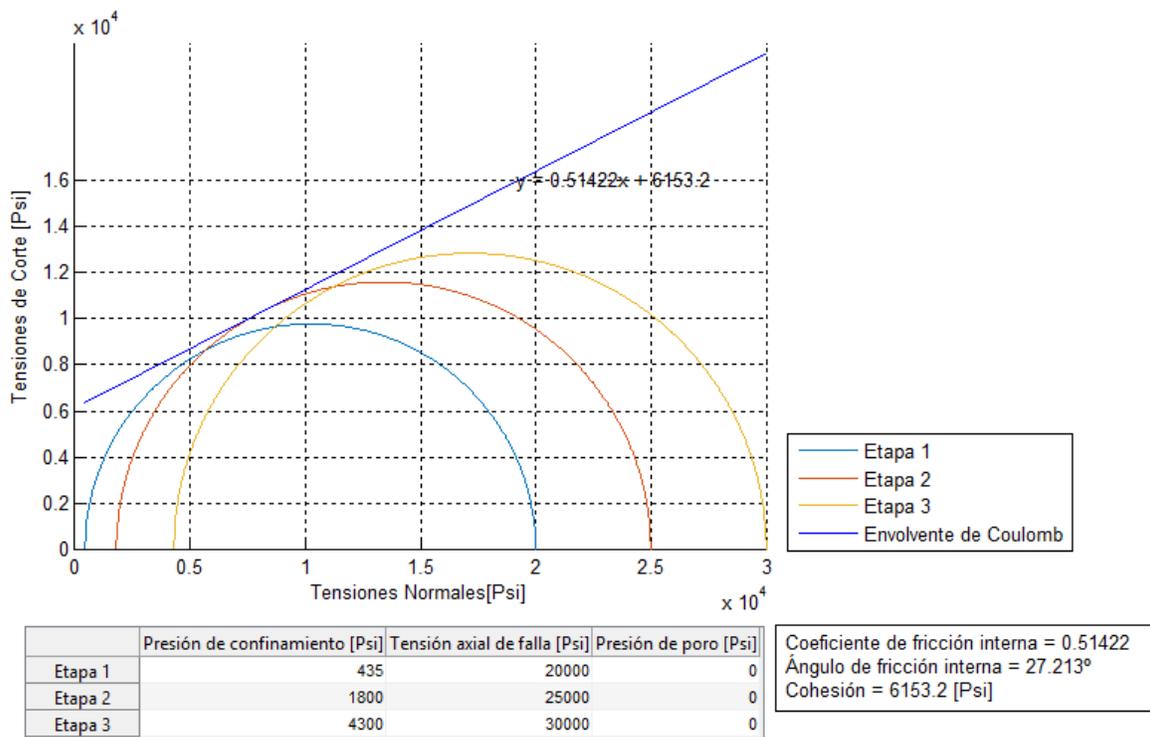


Figura 102. Resultados obtenidos con el criterio conservativo.

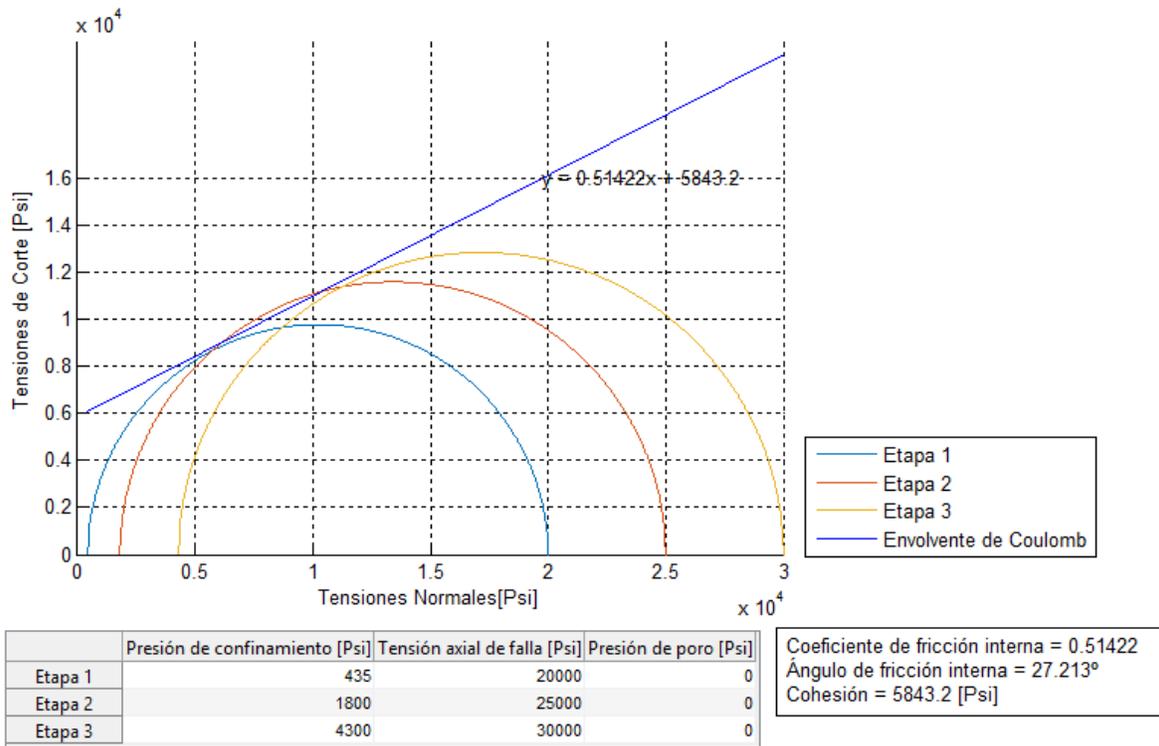


Figura 103. Resultados obtenidos con el criterio no conservativo.

8.5 Exportación de datos a Excel

Por último, se le permite al usuario exportar los datos a una planilla de Excel. Esto le da al usuario libertad para hacer cualquier procesamiento de datos adicional que el programa en Matlab no soporte.

9 Procedimiento del ensayo

El procedimiento del ensayo consta de las siguientes 9 etapas:

1. Corte y pulido de la roca.
2. Instrumentación de la muestra con *strain gages*.
3. Instalación de la camisa protectora sobre la muestra.
4. Colocación de la muestra dentro de la cámara de confinamiento.
5. Cierre de la celda triaxial.
6. Realización del ensayo.
7. Apertura de la celda triaxial.
8. Extracción y análisis visual de la muestra.
9. Extracción de datos y postproceso.

9.1 Corte y pulido de la roca

Los testigos de roca deben cumplir con las especificaciones de las dimensiones enunciados en la sección 5.1.1. Para extraer las muestras cilíndricas de roca, se usa un taladro con mecha de copa sobre una porción de corona de roca. Luego con una sierra circular se cortan los extremos y con la pulidora se lleva la muestra a medida y se hace que las caras extremas sean paralelas entre sí.

Las regiones donde se pegarán *strain gages* son lijadas para que tengan una superficie lisa. Si la superficie donde se pegan los *strain gages* es rugosa o porosa, al aumentar la presión de confinamiento, el sensor se deforma con estas irregularidades causando que la señal de salida no sea confiable.

Una vez extraído el testigo, se le sacan fotos para que queden registros de su apariencia superficial.

9.2 Instrumentación de la muestra con *strain gages*

Se coloca un *strain gage* en posición axial y otro en posición circunferencial, siguiendo un procedimiento de pegado que aprendió el Ing. Nicolás Oyarzabal en un curso de pegado de *strain gages*, y que luego transmitió al autor de este informe que a su vez pasó estos conocimientos a los técnicos del laboratorio de petróleo. La **Figura 104** muestra 3 muestras distintas instrumentadas con estos sensores.



Figura 104: Instrumentación con *strain gages* de distintas muestras

9.3 Instalación de la camisa protectora sobre la muestra.

El testigo de roca debe ser aislado del fluido de confinamiento para evitar que una filtración incida sobre los resultados obtenidos y para que el fluido hidráulico no se contamine con pedazos de roca en caso de una fragmentación del espécimen. Para esto se utiliza cinta autosoldable, termocontraíble y sellador como se muestra en la **Figura 105**. El conjunto obtenido se coloca luego en la cámara de confinamiento conectando los cables de los *strain gages* a las borneras de salida.



Figura 105: Aislamiento de una muestra

9.4 Colocación de la muestra dentro de la cámara de confinamiento

La muestra instrumentada se coloca con la mano dentro de la cámara de confinamiento y se conectan los cables a las borneras.

9.5 Cierre de la celda triaxial

Se ajustan los bulones de la celda triaxial utilizando un multiplicador de torque para aplicar un torque de apriete de 25 ft-lbf. La **Figura 106** muestra este paso.



Figura 106. Cierre de la celda triaxial.

9.6 Realización del ensayo.

El ensayo triaxial consta de 8 etapas

1. Ingreso por parte del usuario de los parámetros de ensayo.
2. Encendido de los motores
3. Aumento de la presión de confinamiento hasta la presión deseada.
4. Acercamiento del pistón hacia la muestra hasta que haga contacto.
5. Compresión axial de la muestra
6. Descarga axial de la muestra
7. Retorno del pistón a su posición inicial
8. Finalización del ensayo

Estas etapas se realizan siguiendo el diagrama de flujo de la **Figura 107**.

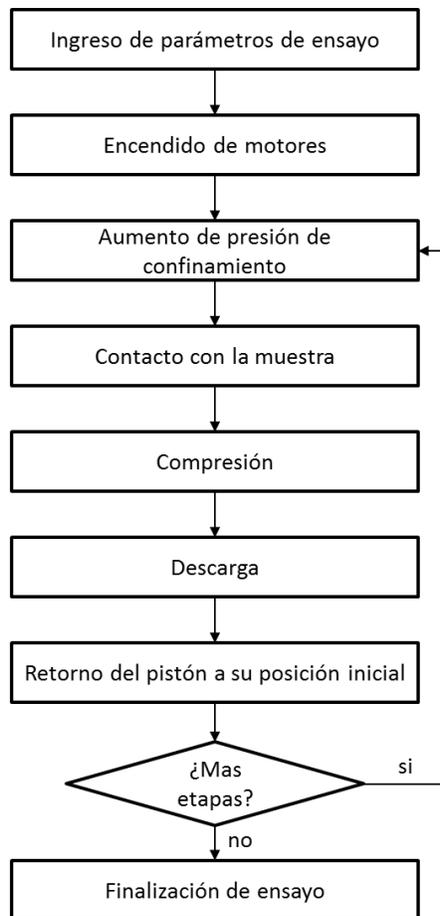


Figura 107: Diagrama de flujo de la secuencia de ensayo

El ensayo uniaxial consta de las siguientes 5 etapas

1. Ingreso por parte del usuario de los parámetros de ensayo.
2. Encendido de los motores
3. Compresión axial de la muestra
4. Descarga axial de la muestra
5. Finalización del ensayo

Estos procedimientos se describen en la sección 6.5.1.

La **Figura 108** muestra un procedimiento completo de ensayo triaxial *multistage* de 3 etapas realizado sobre una probeta metálica y la **Tabla 3** la descripción de cada estado.

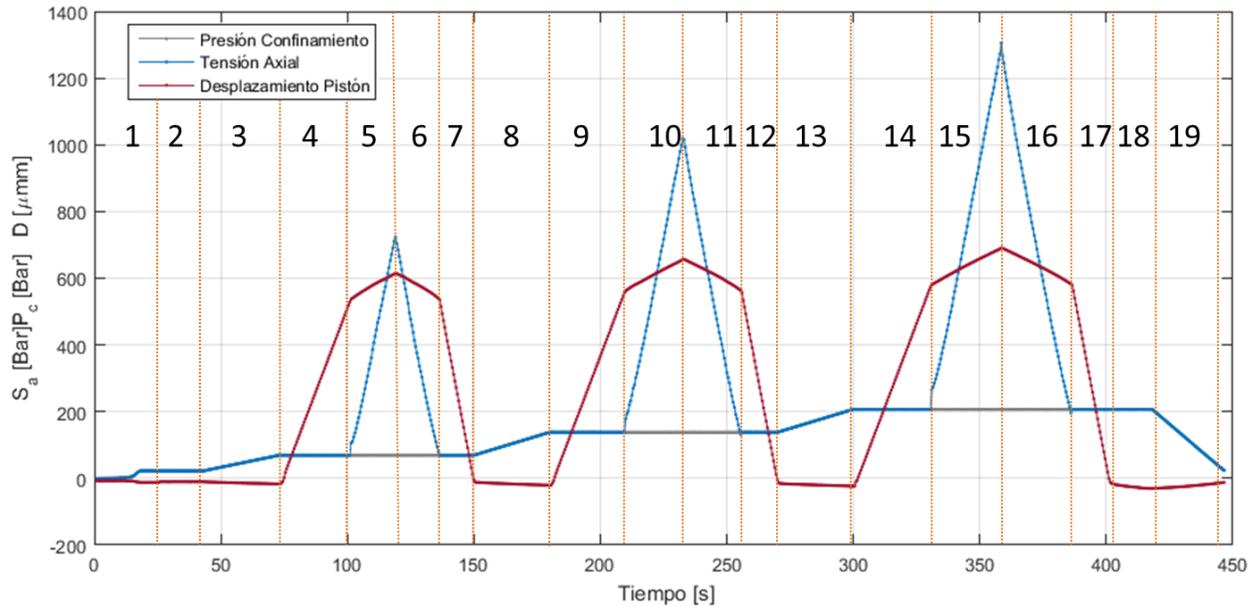


Figura 108: Procedimiento completo de ensayo triaxial *multistage* de 3 etapas

Estado	Descripción	Estado	Descripción		
1	Encendido motores	11	Etapa 2 Descarga		
2	Chequeo sensores	12	Etapa 2 Retorno pistón		
3	Etapa 1	13	Etapa 3 Aumento presión conf.		
4		Aproximación pistón		14	Aproximación pistón
5		Compresión		15	Compresión
6		Descarga		16	Descarga
7	Retorno pistón	17	Retorno pistón		
8	Etapa 2	18	Reducción presión pistón		
9		Aproximación pistón	19	Reducción presión conf.	
10		Compresión			

Tabla 3: Identificación y descripción de cada estado.

9.7 Apertura de la celda triaxial

Se abre la celda triaxial utilizando nuevamente el multiplicador de torque.

9.8 Extracción y análisis visual de la muestra.

Una vez abierta la celda triaxial, se hace un examen visual de la muestra para verificar que el aceite hidráulico no haya penetrado la camisa y de ser posible, ver planos de falla en la muestra.

9.9 Extracción de datos y postproceso.

Se utiliza el programa desarrollado en Matlab para obtener los resultados deseados del ensayo como se explica en la Sección 88.

10 Resultados que se obtienen con cada ensayo

Para un ensayo triaxial, se obtienen los siguientes parámetros de las rocas:

- Módulo de Young
- Coeficiente de Poisson
- Módulo de corte
- Módulo de compresibilidad
- Coeficiente/ángulo de fricción interna
- Cohesión

Para un ensayo uniaxial:

- Módulo de Young
- Coeficiente de Poisson
- Módulo de corte
- Módulo de compresibilidad

11 Resultados obtenidos sobre testigos de rocas

Se realizan ensayos sobre rocas provenientes de la región de Vaca Muerta con el objetivo de armar una base de datos con las propiedades mecánicas de estas rocas.

11.1 Ensayo *Multistage*

Se realiza un ensayo *multistage* de 4 etapas, siendo la primera etapa un ensayo uniaxial, y llevando la roca a la rotura en la cuarta y última etapa. En la **Tabla 4** se muestran los parámetros utilizados para este ensayo.

Parámetros definidos por el usuario				
Número de etapas	4			
Presión de etapas [Psi]	1	0	4	4300
	2	435	5	-
	3	1800	6	-
Diámetro muestra [mm]	25.267			
Largo muestra [mm]	50.515			
<i>Gage Factor</i>	Axial 1	2.13	Axial 2	-
	Radial 1	2.13	Radial 2	-
Tasa de cambio de presión de confinamiento [psi/min]	1500			
Tasa de cambio de deformación axial ue/s	0.2			

Tabla 4. Parámetros utilizados para el ensayo *multistage*.

En la **Figura 109** se muestran las distintas etapas, con su compresión y descarga, y el momento de la rotura completa de la roca.

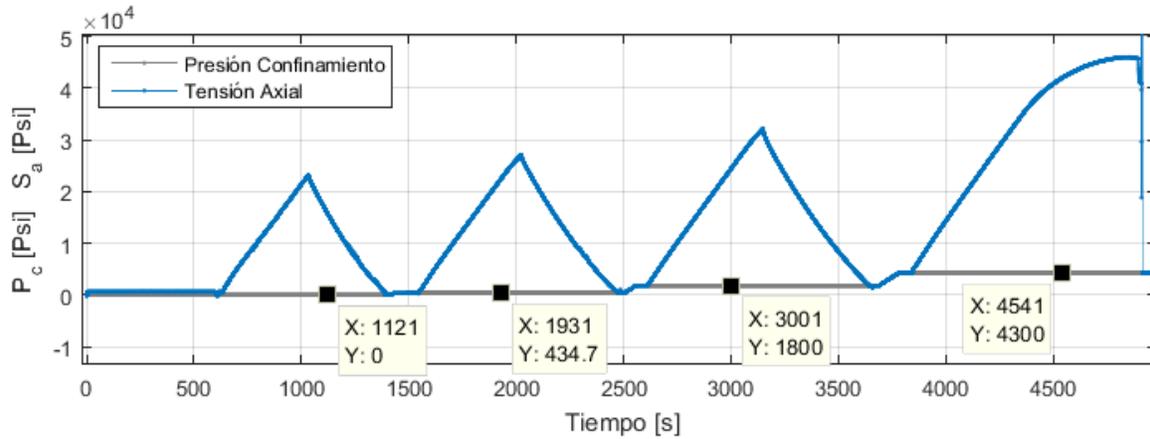


Figura 109. Historial de presión de confinamiento y de tensión axial durante el ensayo.

En la **Figura 110** se observa la tensión deviatorica en función de la deformación volumétrica para las etapas de compresión. En el detalle se puede ver el punto de dilatación positiva para cada curva en el cual se interrumpió la compresión durante el ensayo. Se marcan las tensiones deviatoricas axiales de fluencia que luego se utilizan para dibujar los círculos de Mohr.

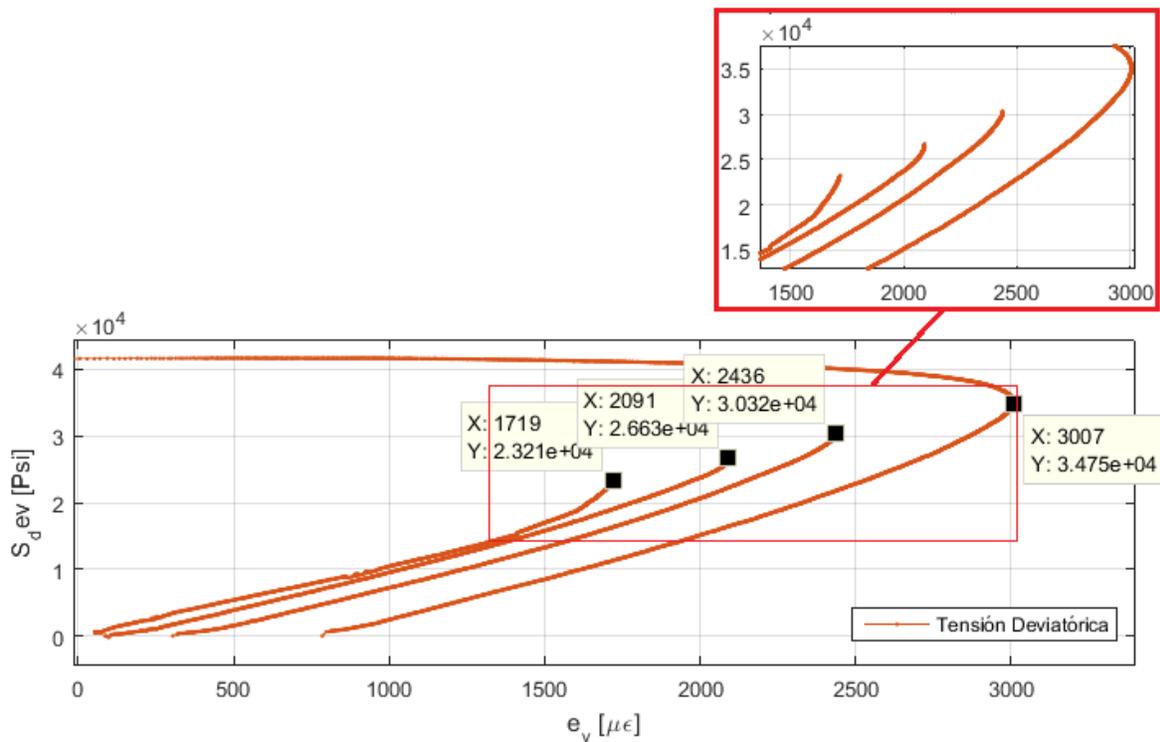


Figura 110. Tensiones deviatoricas vs. Deformación volumétrica durante las etapas de compresión.

Utilizando los valores de tensiones axiales marcadas y las presiones de confinamiento, se obtiene el círculo de Mohr para cada etapa y la envolvente que se ajusta a estos círculos.

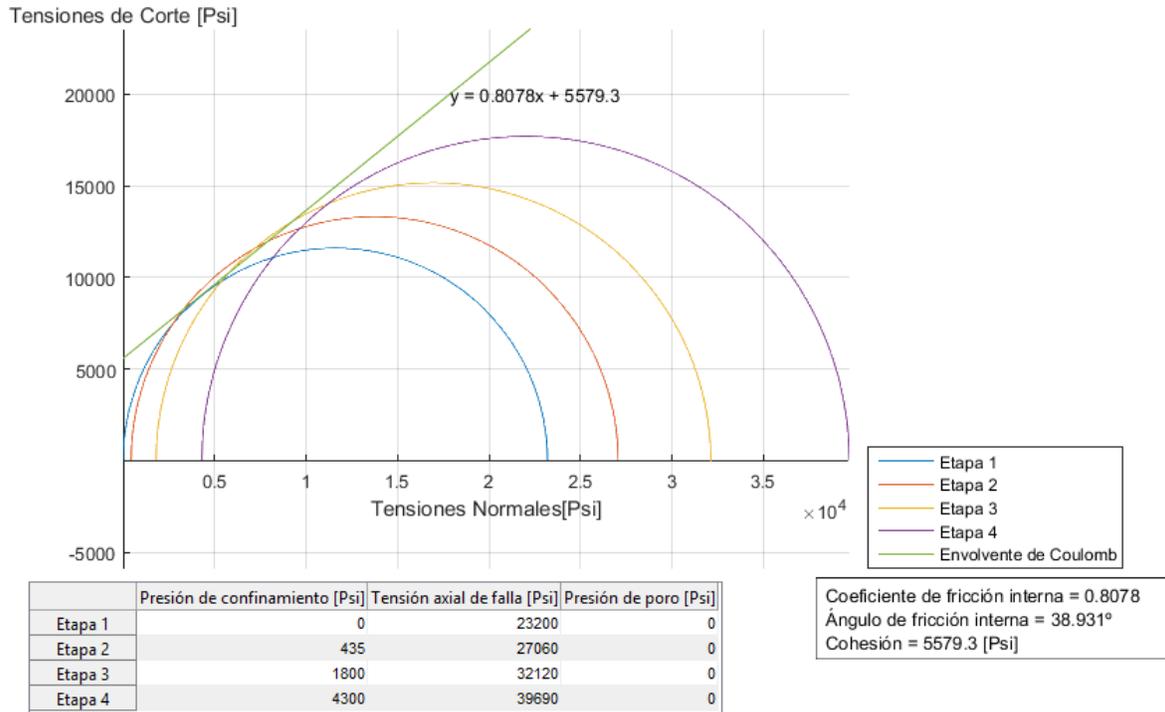


Figura 111. Obtención de círculos de Mohr de cada etapa y envolvente de Mohr-Coulomb.

Se observa que el círculo de la etapa 1 no se alinea bien con los círculos de la etapa 2, 3 y 4 que sí tienen una mejor alineación para una tangente que se ajuste mejor. Si se descarta el círculo del ensayo uniaxial se tiene el resultado de la **Figura 112** donde se observa que la envolvente tiene una mejor tangencia con los círculos.

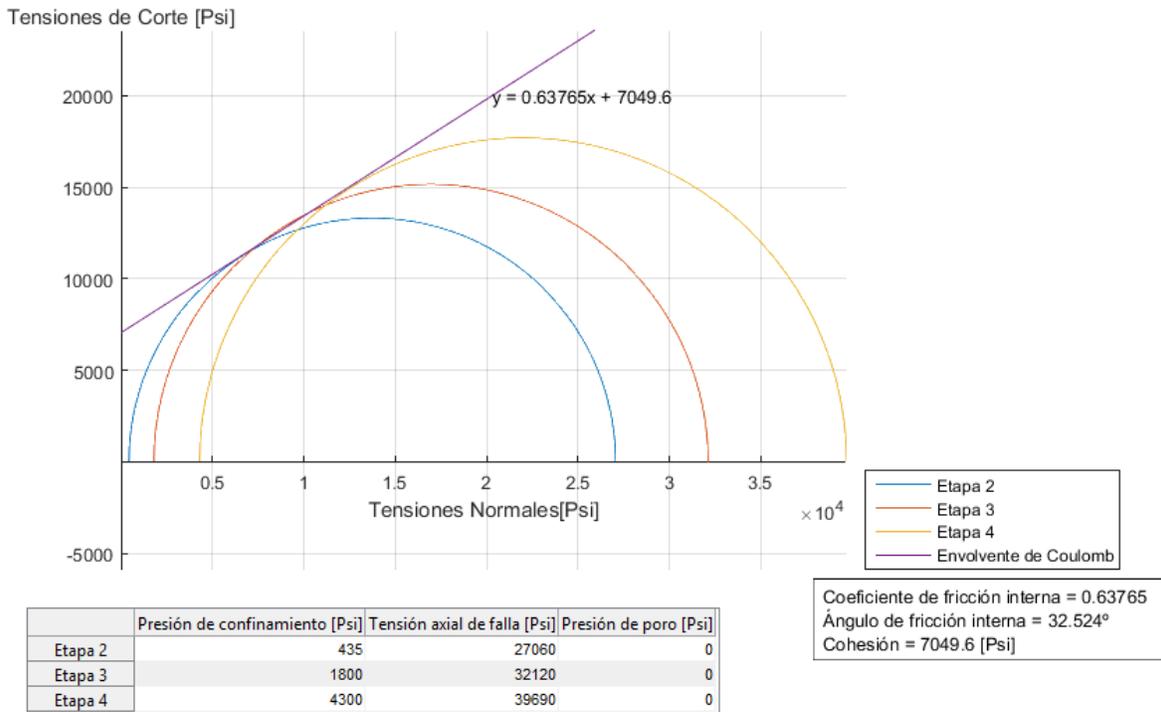


Figura 112. Resultados obtenidos descartando la etapa uniaxial.

Se calcula el módulo de Young y el coeficiente de Poisson para cada etapa seleccionando los datos de la parte más lineal de la curva de tensión deviatorica - deformación axial como se muestra desde la **Figura 113** a la **Figura 120**.

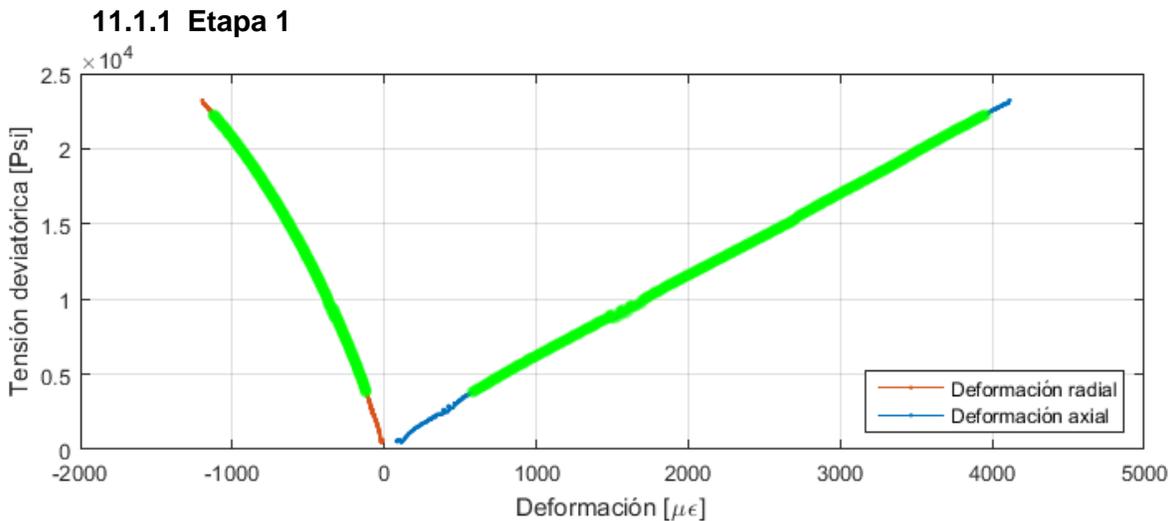


Figura 113. Datos seleccionados para calcular los parámetros mecánicos de la etapa 1.

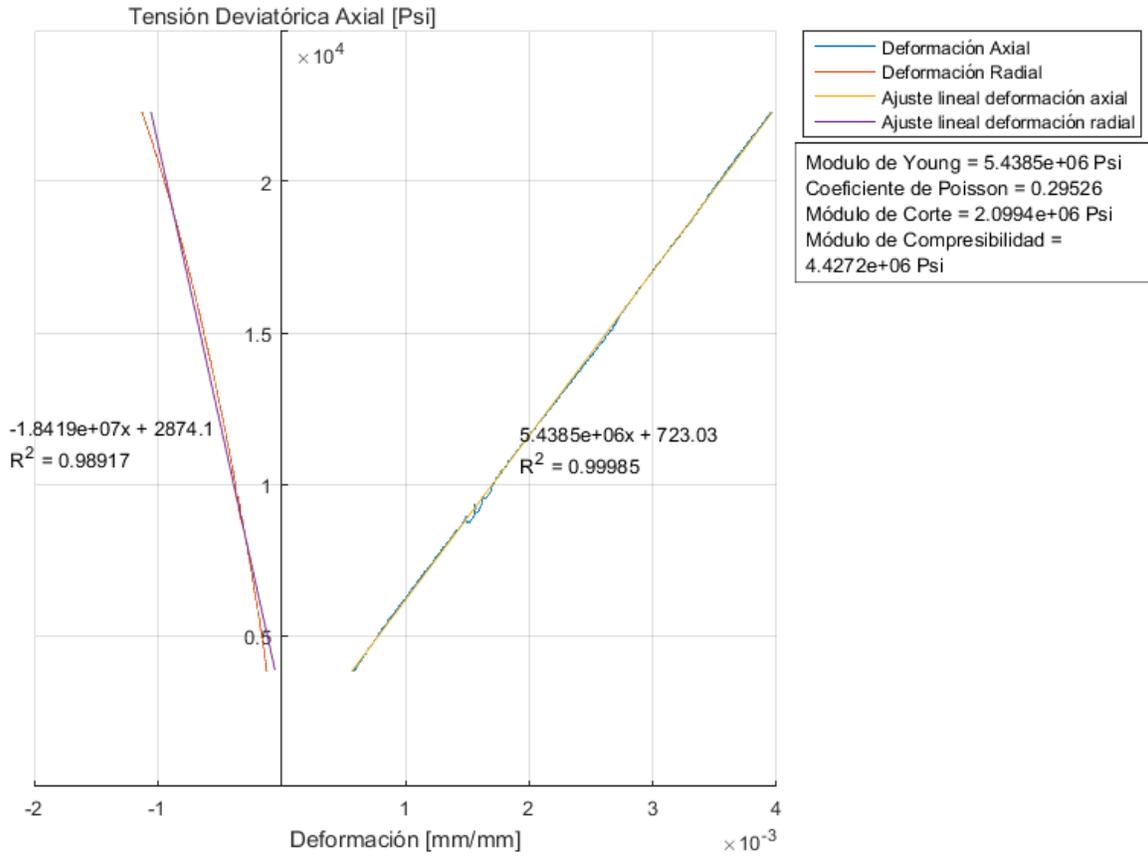


Figura 114. Resultados obtenidos a partir de los datos seleccionados para la etapa 1.

11.1.2 Etapa 2

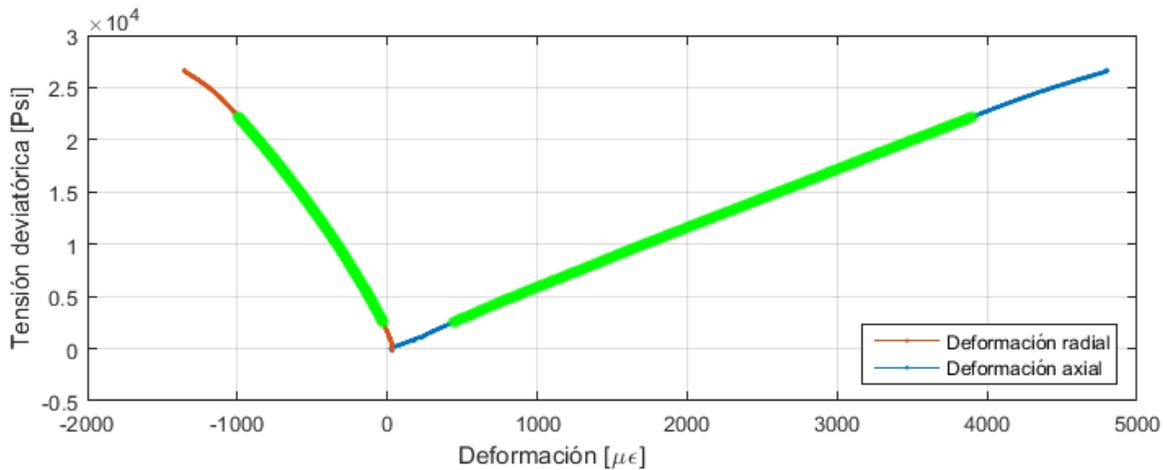


Figura 115. Datos seleccionados para calcular los parámetros mecánicos de la etapa 2.

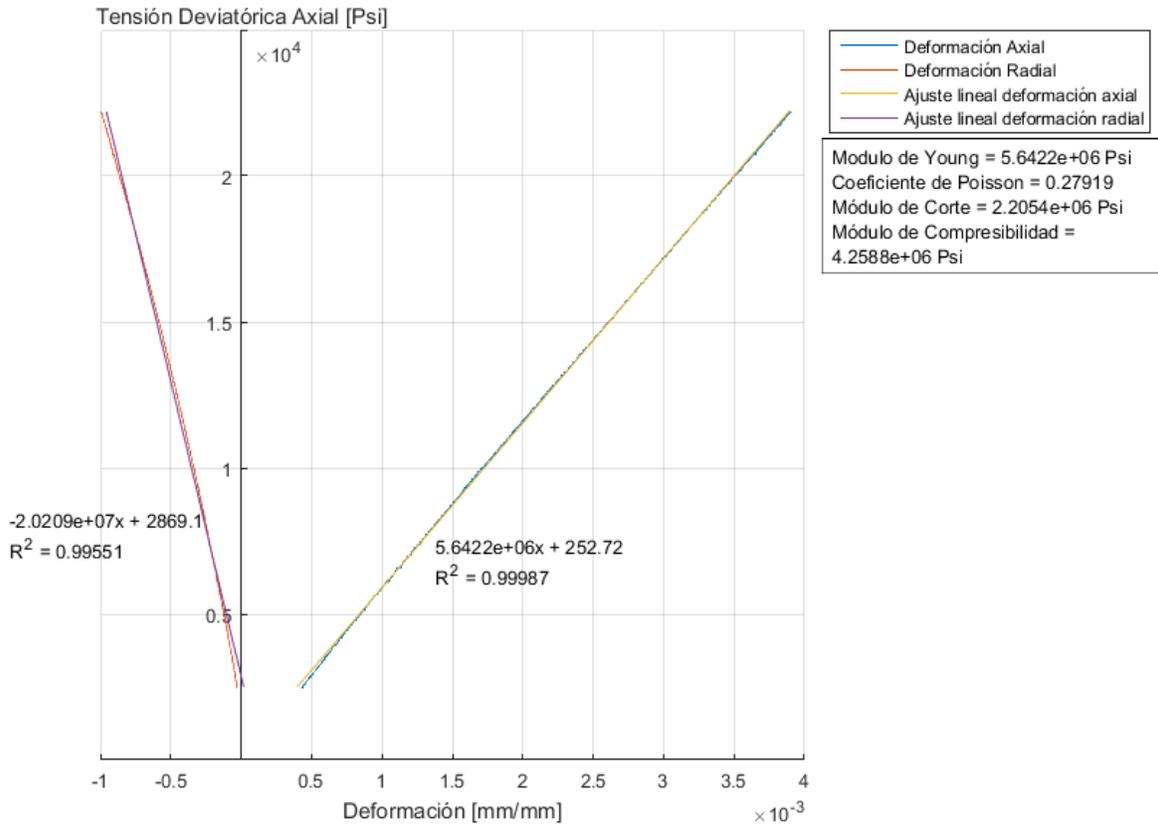


Figura 116. Resultados obtenidos a partir de los datos seleccionados para la etapa 2.

11.1.3 Etapa 3

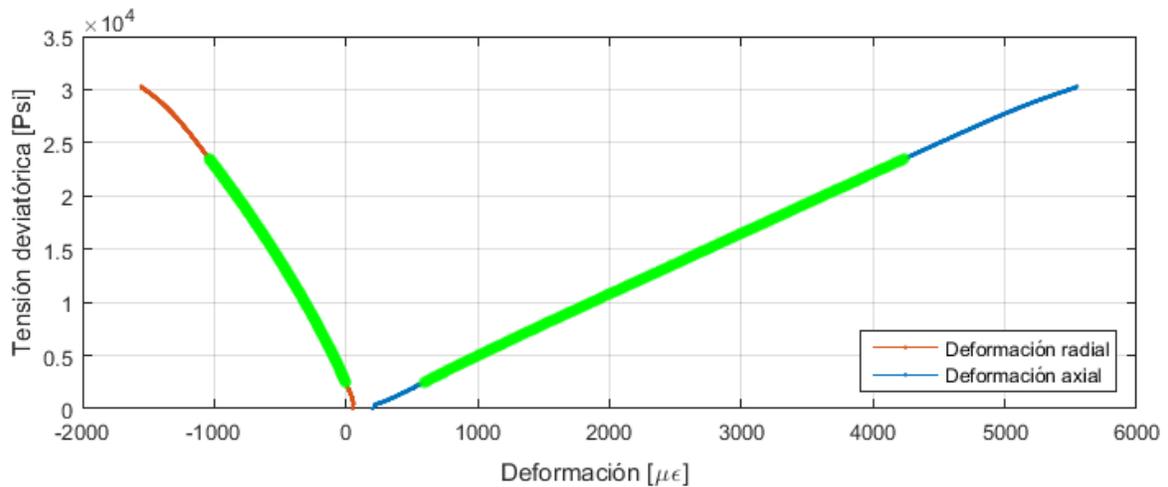


Figura 117. Datos seleccionados para calcular los parámetros mecánicos de la etapa 3.

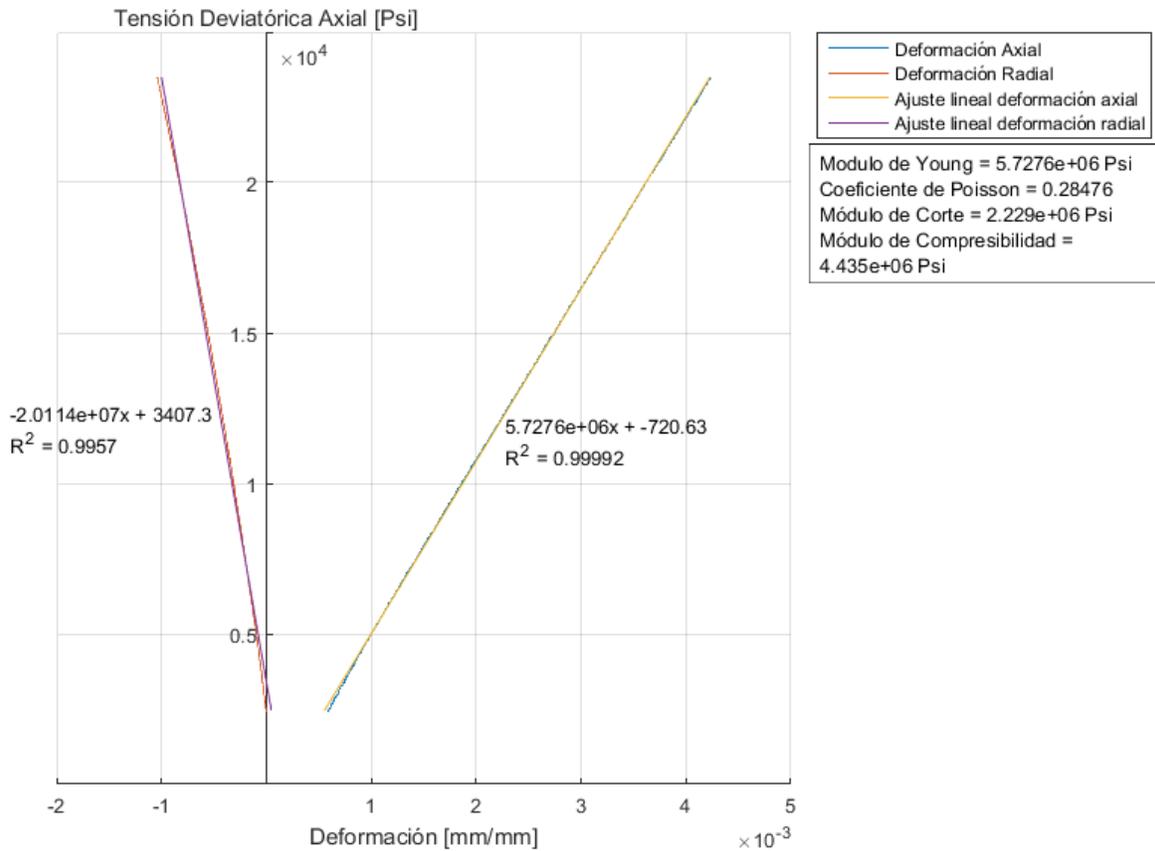


Figura 118. Resultados obtenidos a partir de los datos seleccionados para la etapa 3.

11.1.1 Etapa 4

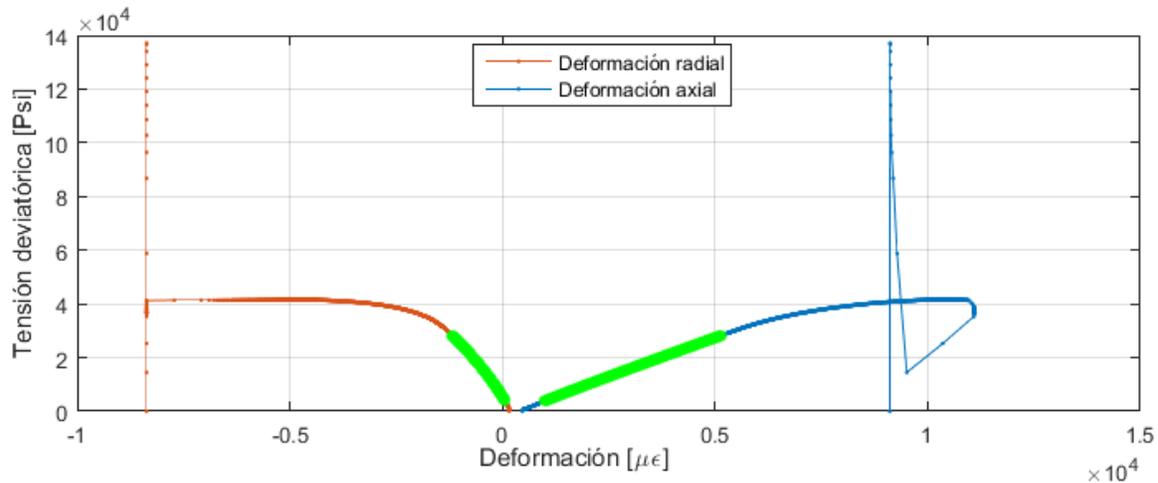


Figura 119. Datos seleccionados para calcular los parámetros mecánicos de la etapa 4.

En la **Figura 120** se observa la curva que se obtiene llevando la roca a la rotura, cuando esta se fractura, los *strain gages* que están pegados sobre la roca ya no pueden medir más la deformación y puede ocurrir que se vayan de escala o que manden una señal cualquiera como en este caso.

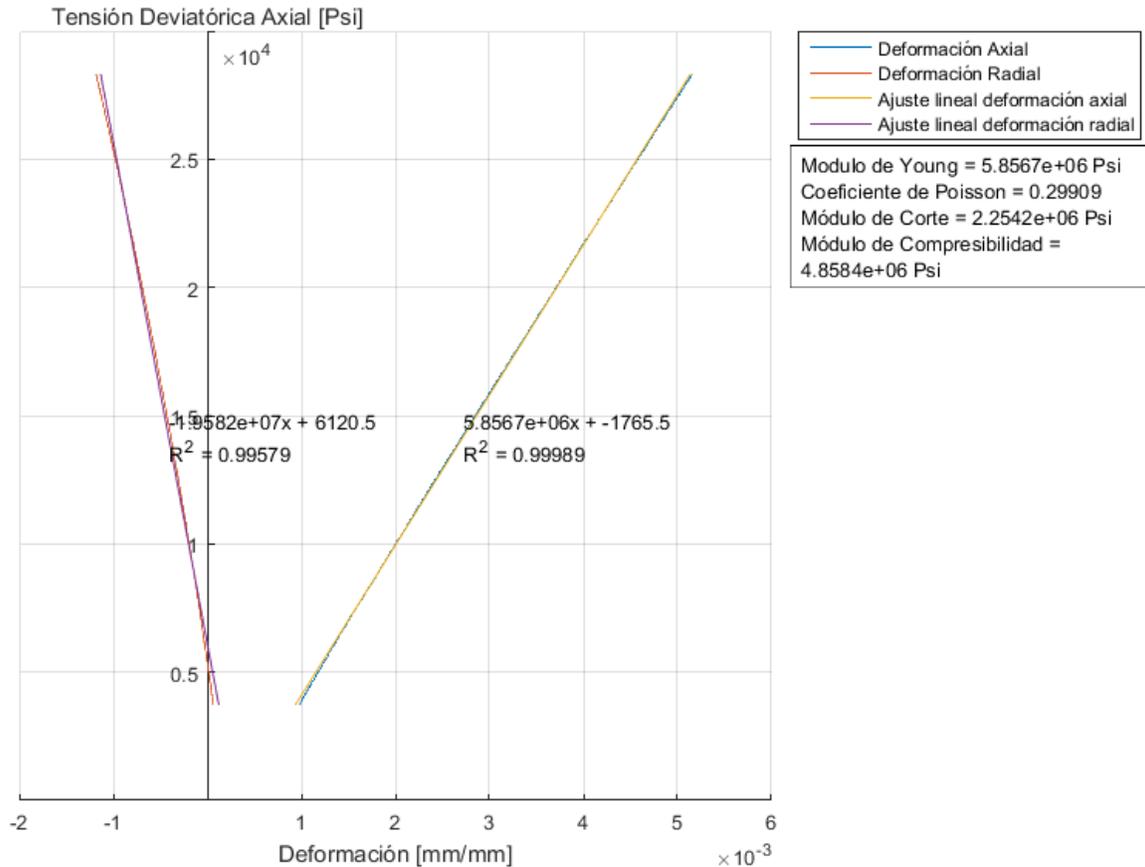


Figura 120. Resultados obtenidos a partir de los datos seleccionados para la etapa 4.

En la **Tabla 5** se resumen los resultados obtenidos. Se observa que la tensión de fluencia y el módulo de Young aumentan con mayor presión de confinamiento en concordancia con la teoría. El coeficiente de Poisson no presenta variaciones significativas.

Resultados del ensayo				
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Tensión deviatorica de fluencia [Psi]	23210	26630	30320	34750
Tensión deviatorica última [Psi]	-	-	-	41700
Módulo de Young [Psi]	5.44E+06	5.64E+06	5.73E+06	5.86E+06
Coeficiente de Poisson	0.295	0.279	0.285	0.299
Módulo de corte [Psi]	2.10E+06	2.21E+06	2.23E+06	2.25E+06
Módulo de compresibilidad [Psi]	4.43E+06	4.26E+06	4.44E+06	4.86E+06
Coeficiente de fricción interna	0.611			
Ángulo de fricción interna [°]	31.4			
Cohesión [Psi]	6598			

Tabla 5. Tabla resumen de resultados.

11.2 Ensayos *Singlestage*

Se hacen 3 ensayos SST (*Singlestage test*) para 3 muestras de rocas similares a la utilizada en el ensayo *multistage* de la sección 11.1. Esto se hace para tener una comparación entre estos dos tipos de ensayo. Se ensayan las muestras a 435 psi, 1800 psi y 4300 psi, para luego cotejar los resultados con las etapas 2, 3 y 4 del ensayo *multistage*.

11.2.1 Ensayo SST1

En este ensayo no se obtienen buenos resultados. La deformación volumétrica en lugar de aumentar, disminuye con la compresión axial de la muestra, esto se muestra en la **Figura 121**. Esto implica que la muestra se dilata desde el comienzo del ensayo y que el Poisson que se calcula a la misma es mayor que el límite teórico de 0,5. Como no es posible detectar el punto de dilatación positiva, tampoco es posible obtener a partir de este ensayo un valor de la tensión de fluencia

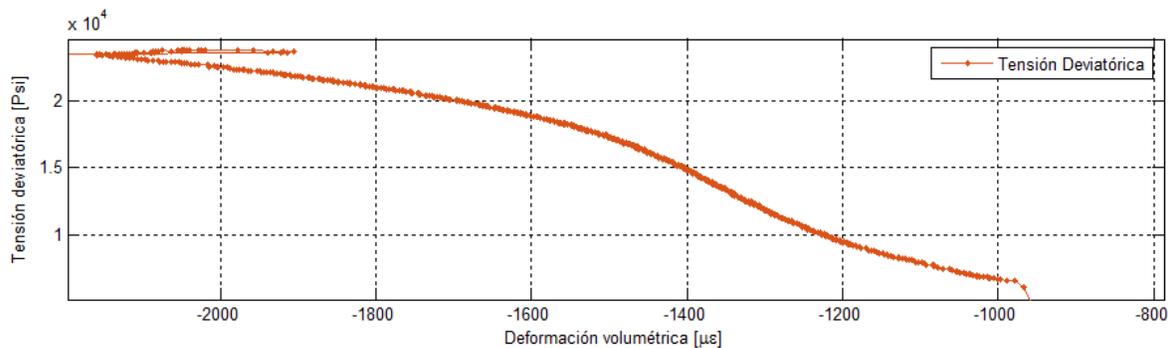


Figura 121. Tensión deviatorica – Deformación volumétrica del ensayo SST1.

En la **Figura 122** se observan las curvas de tensión – deformación de donde se seleccionan los datos para obtener los valores de los parámetros para el modelo isotrópico de la roca. Los resultados se muestran en la **Figura 123**.

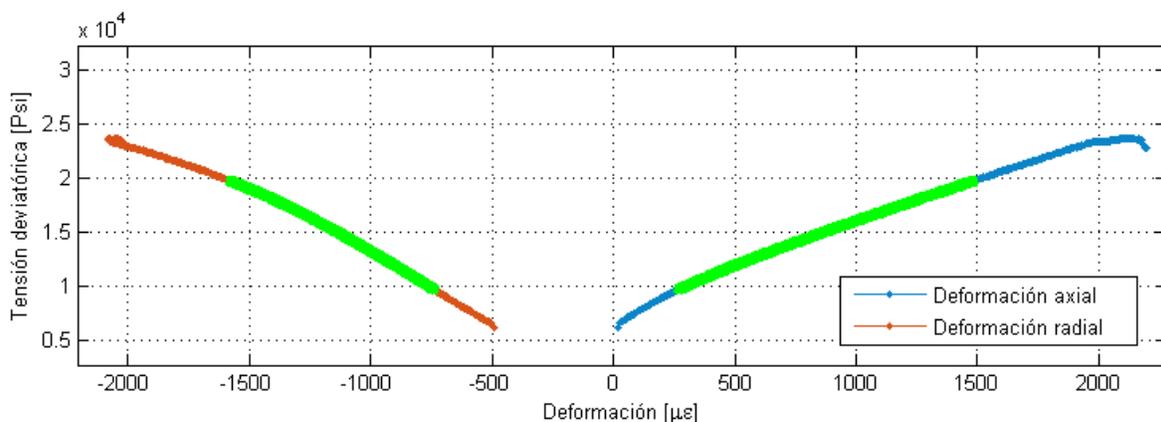


Figura 122. Datos seleccionados para calcular los parámetros mecánicos del ensayo SST1.

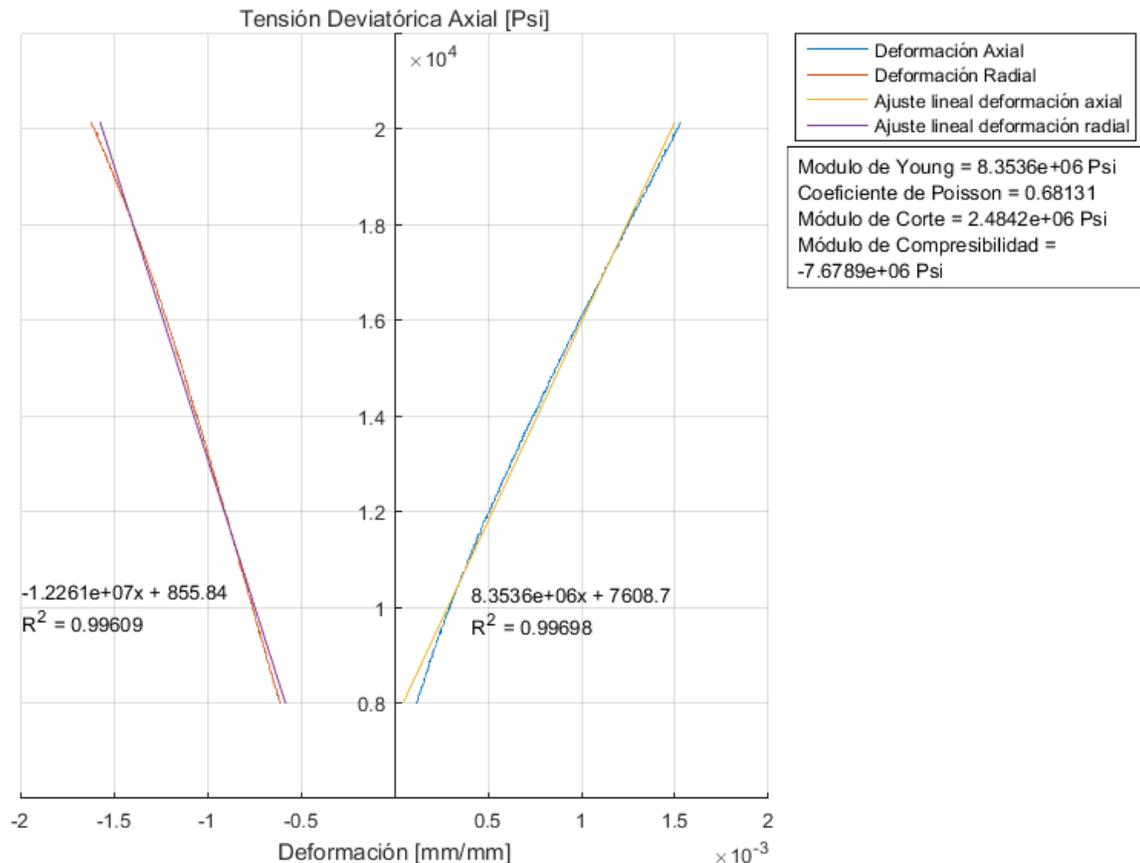


Figura 123. Resultados obtenidos a partir de los datos seleccionados para el ensayo SST1.

Se observa en la **Figura 123** el coeficiente de Poisson mayor a 0.5 con lo cual el módulo de compresibilidad es negativo.

Cuando ocurre un ensayo de resultados no esperados, se debe prestar atención a la muestra instrumentada, ya que es lo único que cambia entre ensayo y ensayo. El problema puede estar en el pegado de los *strain gages*, o en la roca misma que puede contener inclusiones o grietas que modifican sus propiedades y la alejan de un modelo isotrópico.

El módulo de Young obtenido en este ensayo es un 54% mayor al que se obtuvo en la etapa correspondiente del ensayo *multistage*. La pendiente de la curva de deformación radial es un 60% menor que la pendiente del ensayo análogo. Como ambas pendientes son considerablemente distintas, es más probable que la roca haya tenido imperfecciones que afectaron su comportamiento ya que es poco probable que haya habido defectos en el pegado de ambos *strain gages*, en especial teniendo en cuenta que hasta ese momento nunca había ocurrido un caso semejante.

La **Tabla 6** compara estos resultados con los obtenidos en la sección 11.1.2.

	Etapa 2 <i>Multistage</i>	Ensayo SST1	Diferencia porcentual (%)
Tensión deviatorica de fluencia [Psi]	26630	-	-
Tensión deviatorica última [Psi]	-	23720	-
Módulo de Young [Psi]	5.64E+06	8.35E+06	48.06
Coefficiente de Poisson	0.279	0.681	144.03
Módulo de corte [Psi]	2.21E+06	2.48E+06	12.64
Módulo de compresibilidad [Psi]	4.26E+06	-7.68E+06	-

Tabla 6. Tabla comparativa de resultados de ensayo SST1 con la etapa 2 del ensayo *multistage*.

De la tabla, si se compara la tensión última del ensayo SST1 con la tensión de fluencia de la etapa 2 *multistage*, se observa que la primera es menor, cuando se espera que la tensión última sea mayor a la tensión de fluencia.

En vista a estos resultados no esperados se recurre a las fotos sacadas al testigo previo al ensayo. Las imágenes revelan la presencia de una grieta, como se muestra en la **Figura 124** que además coincide con el plano por donde fracturó la roca como se observa en la **Figura 125**. Esto explica de manera terminante la dilatación de la roca desde el comienzo del ensayo y la fractura prematura de la misma.

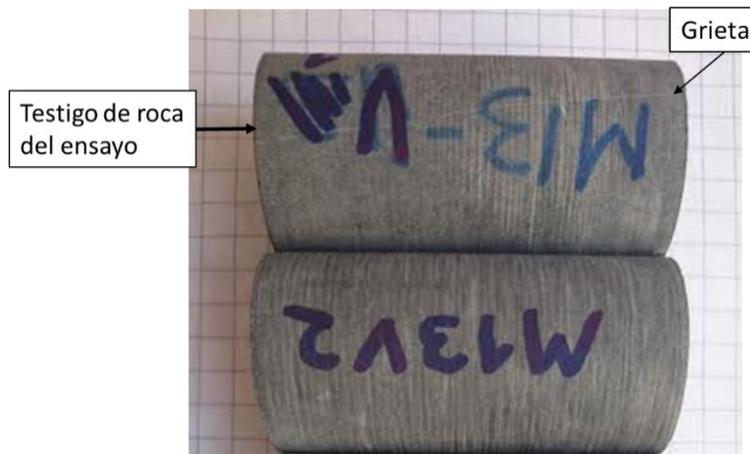


Figura 124. Imagen del testigo de roca utilizado previo al ensayo.



Figura 125. Imagen del testigo de roca utilizado luego del ensayo.

11.2.2 Ensayo SST2

La **Figura 126** muestra la curva de tensión – deformación volumétrica para el ensayo de la muestra a 1800 psi. En este caso se obtiene una curva acorde a lo esperado. Se marca en el gráfico la tensión de fluencia y la tensión última.

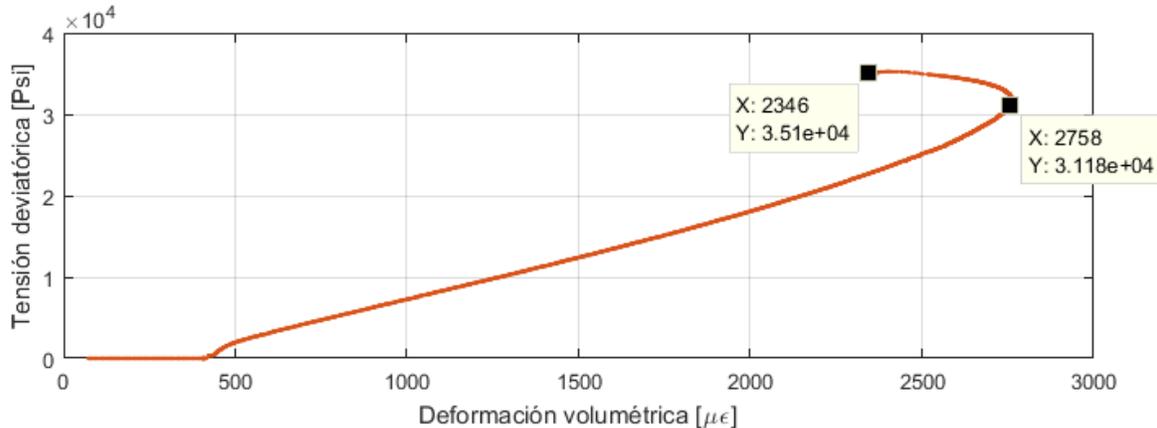


Figura 126. Tensión deviatorica – Deformación volumétrica del ensayo SST2.

Las curvas de tensión – deformación se muestran en la **Figura 127**. Se marca la región de la curva seleccionada para lo obtención de los parámetros de la roca. En la **Figura 128** se observan los resultados que se obtienen al seleccionar estos datos.

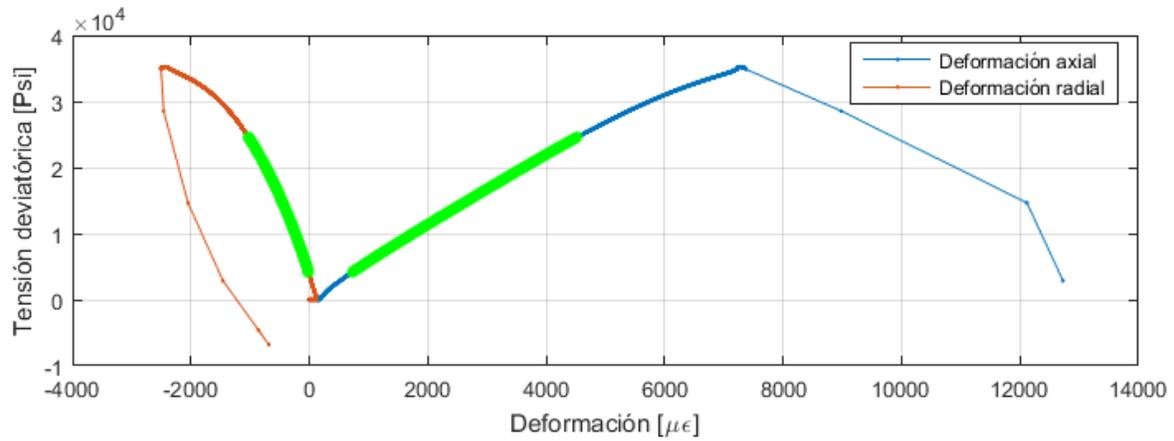


Figura 127. Datos seleccionados para calcular los parámetros mecánicos del ensayo SST2.

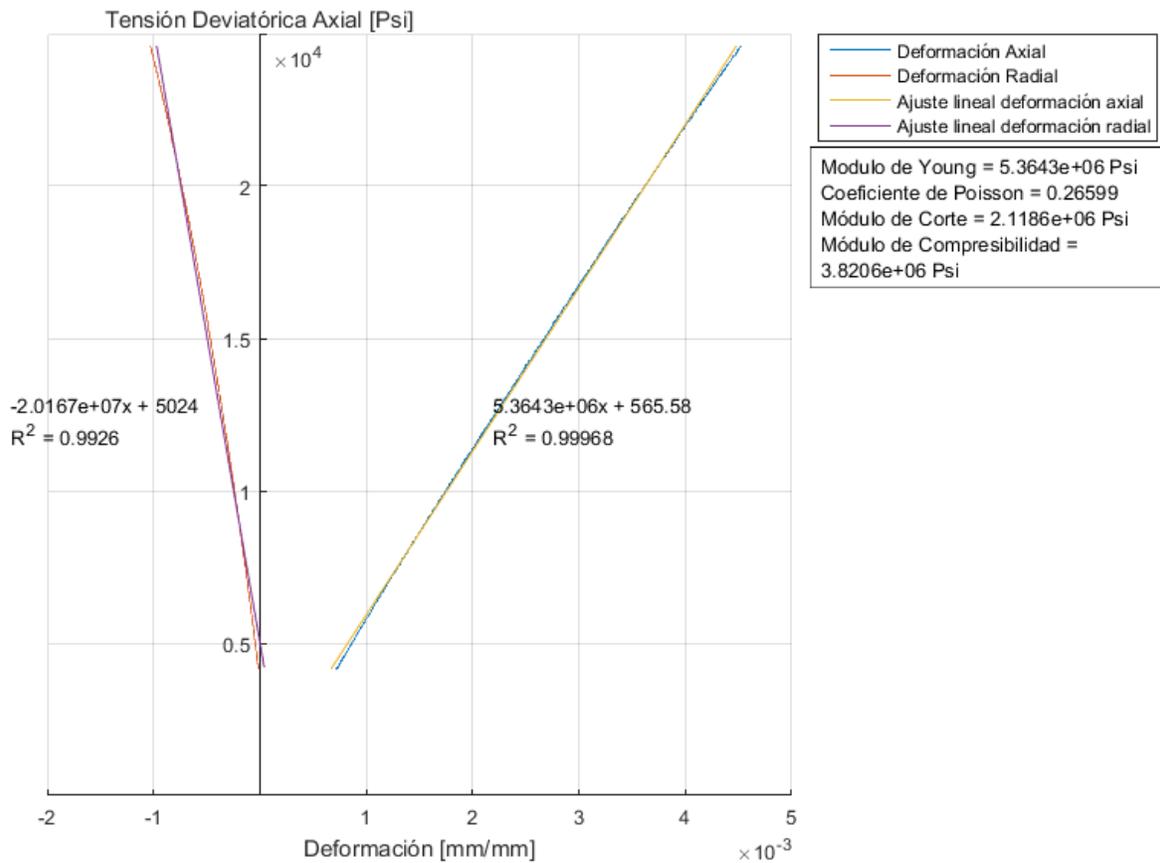


Figura 128. Resultados obtenidos a partir de los datos seleccionados para el ensayo SST2.

	Etapa 3 <i>Multistage</i>	Ensayo SST2	Diferencia porcentual (%)
Tensión deviatorica de fluencia [Psi]	30320	31180	2.84
Tensión deviatorica última [Psi]	-	35140	-
Módulo de Young [Psi]	5.73E+06	5.36E+06	-6.34
Coefficiente de Poisson	0.285	0.266	-6.59
Módulo de corte [Psi]	2.23E+06	2.12E+06	-4.95
Módulo de compresibilidad [Psi]	4.44E+06	3.82E+06	-13.85

Tabla 7. Tabla comparativa de resultados de ensayo SST2 con la etapa 3 del ensayo *multistage*.

11.2.3 Ensayo SST3

La muestra ensayada a una presión de confinamiento de 4300 psi tiene una curva de tensión – deformación volumétrica como se muestra en la **Figura 129** donde se marcan la tensión de fluencia y la tensión última

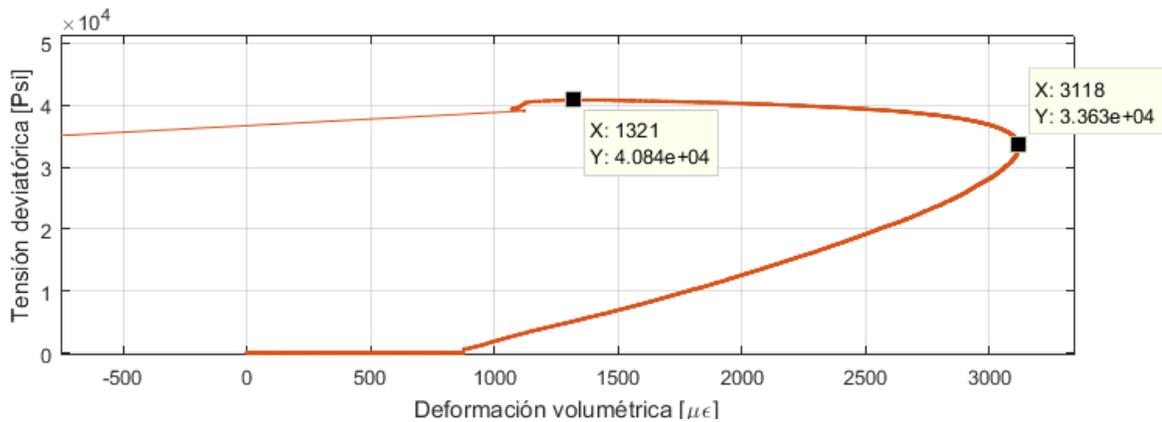


Figura 129. Tensión deviatorica – Deformación volumétrica del ensayo SST3.

En la **Figura 130** se observan las curvas de tensión deformación y los datos seleccionados para obtener los resultados de la **Figura 131**.

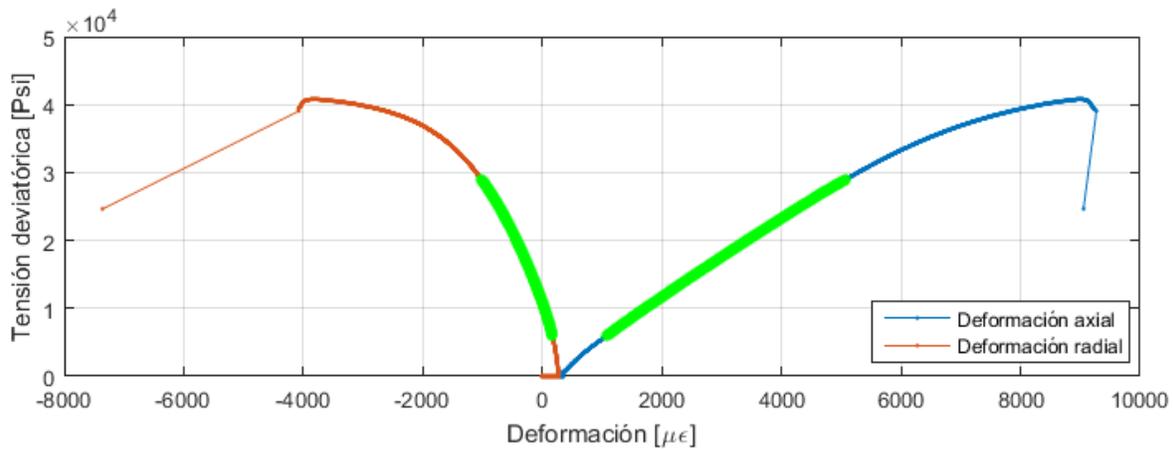


Figura 130. Datos seleccionados para calcular los parámetros mecánicos del ensayo SST3.

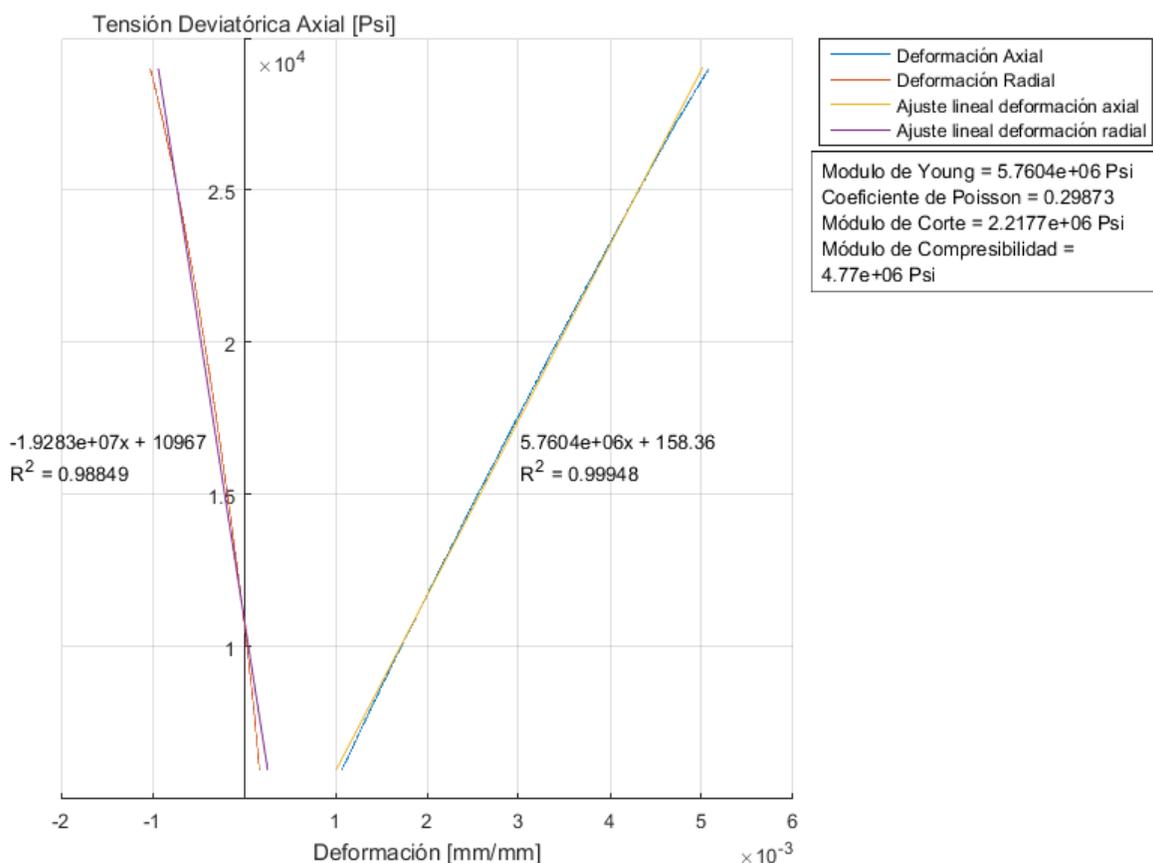


Figura 131. Resultados obtenidos a partir de los datos seleccionados para el ensayo SST3.

En la tabla **Tabla 8** se resumen los resultados y se los compara con el ensayo análogo.

	Etapa 4 <i>Multistage</i>	Ensayo SST3	Diferencia porcentual (%)
Tensión deviatórica de fluencia [Psi]	34750	33630	-3.22
Tensión deviatórica última [Psi]	41700	40840	-2.06
Módulo de Young [Psi]	5.86E+06	5.76E+06	-1.64
Coeficiente de Poisson	0.299	0.299	-0.12
Módulo de corte [Psi]	2.25E+06	2.22E+06	-1.62
Módulo de compresibilidad [Psi]	4.86E+06	4.77E+06	-1.82

Tabla 8. Tabla comparativa de resultados de ensayo SST3 con la etapa 4 del ensayo *multistage*.

La comparativa entre los resultados de los ensayos SST2 y SST3 demuestra que se obtiene buena repetibilidad de ensayos entre muestras similares.

11.3 Envolvente Mohr-Coulomb

En la **Figura 132** se muestran los círculos de Mohr de los ensayos SST2 y SST3 para obtener la envolvente de Mohr-Coulomb utilizando las tensiones últimas, que son las más interesantes ya que indican la tensión necesaria para efectivamente romper la roca.

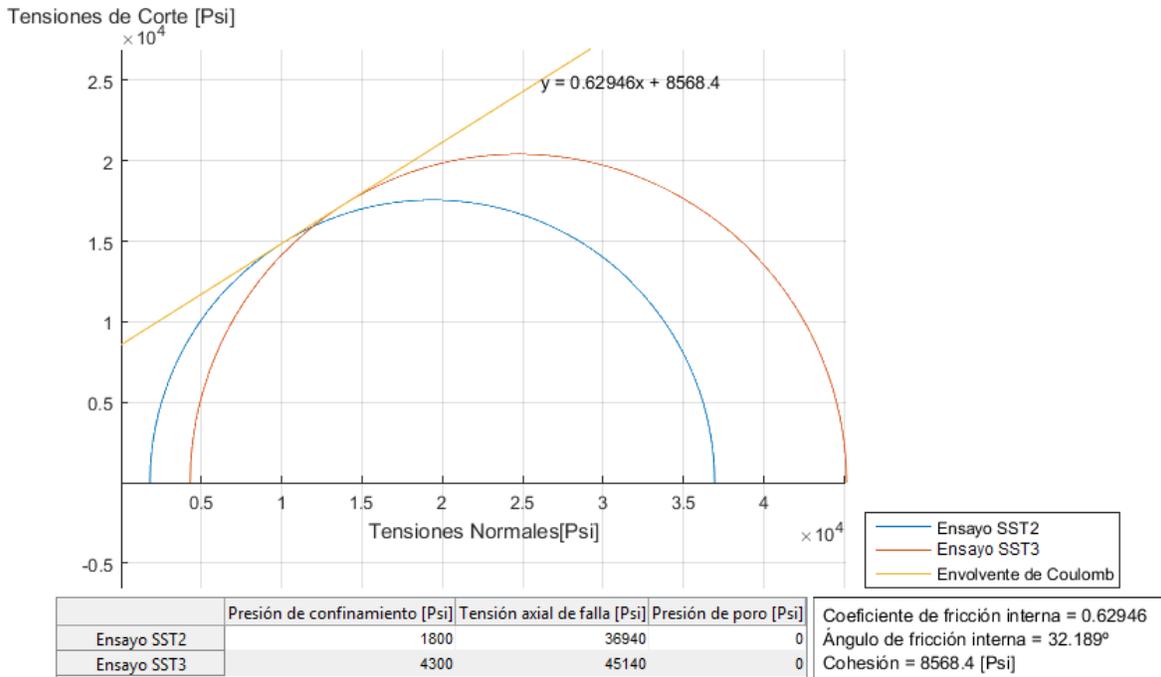


Figura 132. Círculos de Mohr y envolvente de Mohr-Coulomb para los ensayos SST2 y SST3.

En la

	<i>Multistage</i> - Fluencia	<i>Singlestage</i> - Última	Diferencia porcentual (%)
Cohesión [Psi]	7049.6	8568.4	21.54
Ángulo de fricción interna	32.524	32.189	-1.03

Tabla 9 se muestra la comparación entre los valores de cohesión y ángulo de fricción interna obtenidos a partir de las tensiones de fluencia del ensayo *multistage*, con las tensiones últimas obtenidas en los ensayos *singlestage*.

	<i>Multistage</i> - Fluencia	<i>Singlestage</i> - Última	Diferencia porcentual (%)
Cohesión [Psi]	7049.6	8568.4	21.54
Ángulo de fricción interna	32.524	32.189	-1.03

Tabla 9. Tabla comparativa de la cohesión y el ángulo de fricción interna obtenidos entre el ensayo *multistage* y *singlestage*.

Se observa que graficando los círculos de Mohr tomando las tensiones últimas en lugar de las de fluencia, el ángulo de fricción interna no tiene una variación significativa y que lo único que cambia es la cohesión, desplazándose la envolvente hacia arriba como se muestra en la **Figura 133**.

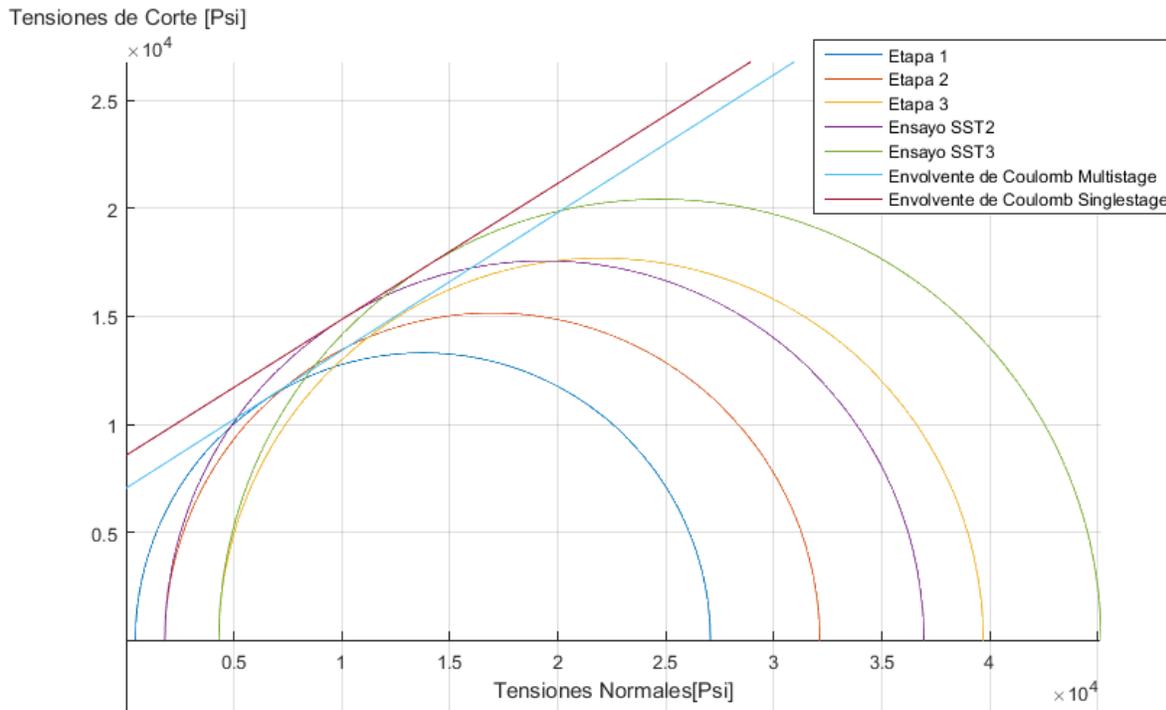


Figura 133. Círculos de Mohr y envolventes Mohr-Coulomb de ambos ensayos.

Este es el tipo de análisis que la celda triaxial permite realizar utilizando las muestras provenientes de la región de Vaca Muerta, en virtud del esfuerzo combinado de las áreas de Ingeniería en Petróleo e Ingeniería Mecánica.

12 Conclusiones

La celda triaxial desarrollada en el ITBA permite ensayar las muestras de roca siguiendo los procedimientos de un ensayo triaxial *singlestage*, de un ensayo triaxial *multistage* y de un ensayo uniaxial, todos llevados a cabo cumpliendo lo que dictan las normas que regulan estos ensayos.

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control que permite realizar ensayos automáticos con la celda triaxial, facilitando la obtención de las propiedades geomecánicas de muestras de roca obtenidas de yacimientos petrolíferos.

El desarrollo del sistema involucró la definición de especificaciones, selección de sensores, actuadores, dispositivos de control y de interfaz hombre-máquina, diseño de la estrategia de control, programación, montaje mecánico, electrónico y eléctrico, pruebas de verificación y validación y generación de documentación.

La elección de la instrumentación resultó acertada ya que permite obtener las propiedades mecánicas deseadas de las rocas que se encuentran presentes en yacimientos petrolíferos. La precisión de las mediciones de tensiones y deformaciones que determinan estas propiedades fue verificada a partir del uso de una muestra metálica

como patrón. La correcta medición de las tensiones también fue comprobada por separado durante el estudio del roce estático del pistón con sus paredes. Asimismo, la correcta calibración de los *strain gages* y su circuito de acondicionamiento de señal fue verificada por separado utilizando un equipo adquisidor de datos de alta precisión y prestaciones.

La celda triaxial desarrollada en el ITBA permite obtener las propiedades mecánicas de las rocas de la misma manera que lo hacen otras celdas triaxiales comerciales. La celda triaxial desarrollada en el ITBA tiene un costo de producción estimado de 40.000 USD, considerablemente inferior al precio de una celda triaxial comercial que arranca desde los 100.000 USD.

Este equipo se encuentra actualmente en operación en el Laboratorio de Geomecánica del Dpto. de Ingeniería en Petróleo y es usado regularmente por los investigadores y tecnólogos que allí trabajan.

13 Referencias

[1] Diario Uno, 2014, *Argentina está cuarta a nivel mundial en reservas de hidrocarburos no convencionales*, YPF, <https://www.ypf.com/energiaypf/Novedades/Paginas/argentina-esta-cuarta-a-nivel-mundial-en-reservas-de-hidrocarburos-no-convencionales.aspx>

[2] ASTM D4767-95, *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*, ASTM, West Conshohocken, 1995.

[3] K.H. Head, *Manual of Soil Laboratory Testing*, Volume 3, England, John Wiley & Sons Ltd, 1998.

[4] Myers M.T, Sharf-Aldin M.H. *Comparison of Multistage to Single Stage Triaxial Tests*. ARMA. 2015.

[5] ASTM D7012-14, *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*, ASTM International, West Conshohocken, 2014.

[6] Pedro Guardone, Material a Adquirir, Diciembre 2015. Informe Interno de Cátedra.

14 Anexo

14.1 Glosario

A

ASTM: *American Society of Testing and Materials*. Organización para la creación de estándares de ensayos de materiales.

B

Brazilian: Ensayo en el cual se mide la resistencia a la tracción de las rocas.

C

Cinta autosoldable: Cinta que al ser estirada y estar en contacto con sí misma se sueldan las partes en contacto.

Coefficiente de fricción interna: Propiedad de las rocas que, junto con la tensión axial aplicada sobre la misma, determina la fricción que se desarrolla entre ambas caras del plano de deslizamiento.

Cohesión: Propiedad de las rocas que determina la resistencia a los esfuerzos cortantes.

E

Esfuerzo de control: señal que se le envía al actuador para que éste realice una acción sobre la planta con el objetivo de controlarla.

F

Feedforward: Estrategia de control que consiste en realizar un esfuerzo de control conociendo de antemano la respuesta de la planta aproximada.

H

HMI: *Human Machine Interface*. Interfaz hombre-máquina. Término que usualmente se usa para referirse a la pantalla táctil de un tablero eléctrico.

L

LSB: *Least Significant Bit*. Bit menos significativo. En un número binario, es el bit ubicado en el extremo derecho.

LVDT: *Linear Variable Differential Transformer*. Transductor utilizado para medir desplazamientos lineales.

M

Multistage: Ensayo en el cual las etapas de compresión a distinta presión de confinamiento se realizan sobre el mismo testigo de roca.

P

PID: Estrategia de control mediante el cual se realimenta el error (diferencia entre el valor deseado y el valor real de la variable a controlar) y se opera sobre el mismo para obtener un esfuerzo de control que estabilice la planta.

PLC: Programmable Logic Controller. Controlador lógico programable. Es un equipo que recibe señales que representan estados de variables, las procesa según una lógica programable y realiza acciones según el resultado de la lógica en forma de señales de salida digitales, analógicas, o de comunicación.

Presión de poro: Presión que se genera en los poros de la roca debido a la reducción del volumen de la roca cuando esta es comprimida.

Puente de Wheatstone: Circuito eléctrico utilizado para medir una resistencia. Está compuesto de 3 resistencias conocidas y una resistencia que se desea medir. La medición es de forma indirecta midiendo la tensión que se genera en la salida del puente al aplicar una tensión en los puntos de alimentación del puente.

R

Riel DIN: Riel de metal de dimensiones normalizadas por la organización de normalización DIN. Esta barra se ubica dentro del tablero y sobre ella se montan los distintos equipos utilizados.

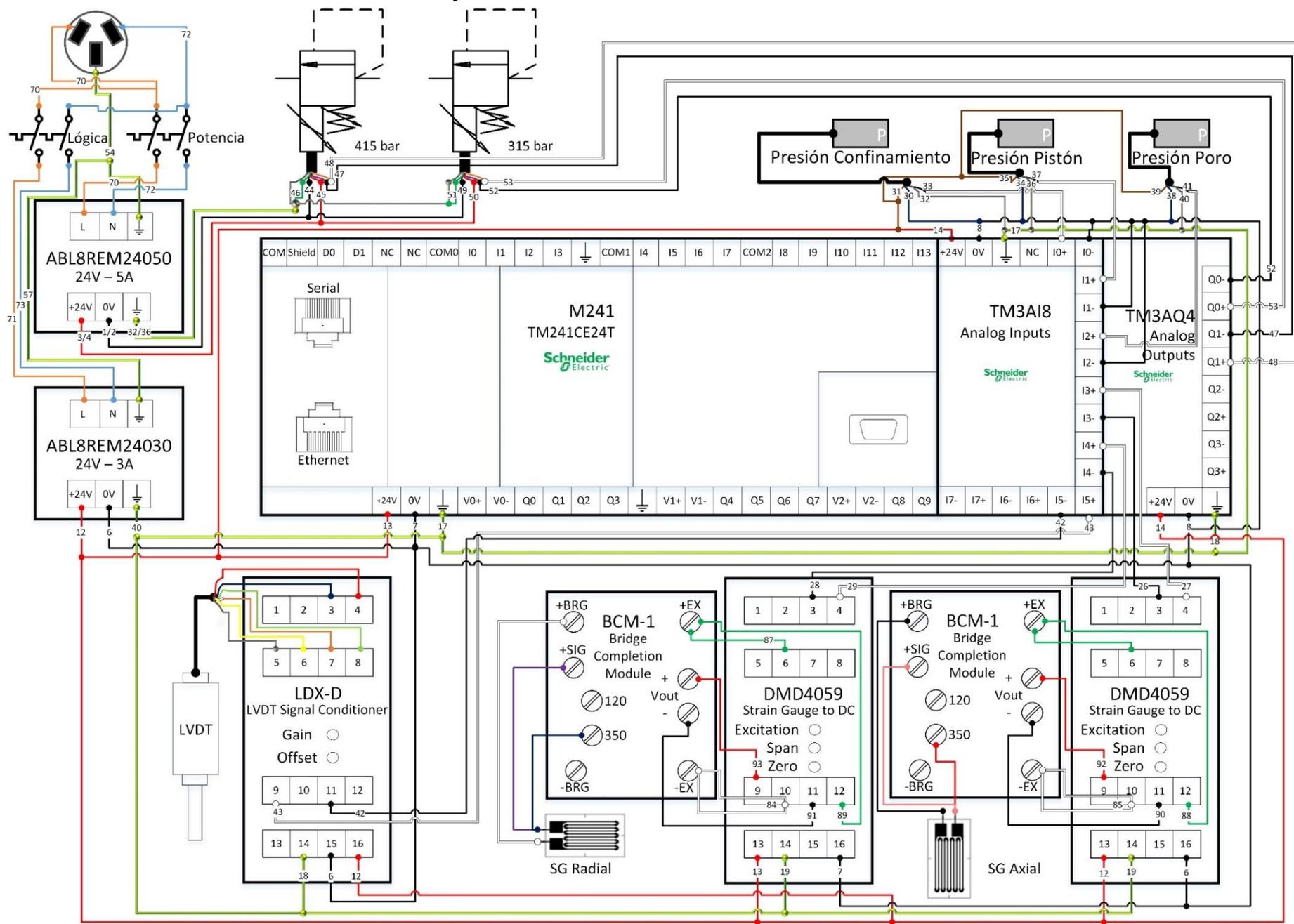
S

Strain Gage: También conocido como strain gauge o galga extensométrica. Es un sensor resistivo que mide la deformación en base a cambios en su resistencia.

T

Topes de borneras: Elementos plásticos que se montan sobre un riel DIN y poseen unos tornillos que hacen que se ajusten firmemente sobre el riel para evitar su deslizamiento sobre el mismo; de esta forma actúan como topes.

14.2 Plano del cableado eléctrico 1: Sensores y Actuadores



14.3 Plano del cableado eléctrico 2: Periféricos

