

CELDA TRIAXIAL

Montaje, control e instrumentación

ALUMNOS: Mujica Buj, Juan Martín (Leg. N° 60050)
Olivera, Marcos (Leg. N° 60420)
Torres, Jorge Pedro (Leg. N° 60184)

DOCENTES TITULARES O TUTORES: David, Martín
D'hers, Sebastián

31.58 - Proyecto Mecatrónico

Código y título del proyecto

167 - Armado y puesta en marcha de Celda Triaxial, y

168 - Control e instrumentación de Celda Triaxial

Fecha de entrega

3 de julio, 2023



Índice

Índice.....	2
1. Resumen.....	4
2. Introducción.....	4
3. Marco teórico.....	4
3.1 Medición de parámetros dinámicos.....	8
3.2 Medición de parámetros estáticos.....	9
4. Aspectos constructivos.....	11
4.1 Diseño mecánico.....	11
4.2 Funcionamiento básico.....	12
4.2.1 Montaje del sistema de medición.....	13
4.2.1 Funcionamiento durante ensayos.....	13
4.3 Modificaciones realizadas a las piezas ya mecanizadas.....	13
4.3.1 Tapa Superior Externa, Tapa Superior Interna y Porta Pistón: agujeros de izaje y roscado.....	14
4.3.2 Cuerpo Sellos: sellado de canal de fuga.....	14
4.3.3 Cuerpo Cámara: agujeros para feedthroughs.....	15
4.3.4 Cuerpo Cámara y Porta Pistón: agujeros para entradas y salidas hidráulicas.....	15
4.3.5 Tapa Superior Interna: hermanado de superficies esféricas.....	15
4.4 Piezas nuevas.....	16
4.4.1 Pusher y Catcher.....	16
4.4.2 Sujetadores de probeta.....	17
4.5 Sellos hidráulicos.....	18
4.5.1 Selección de O-rings.....	18
4.5.2 Feedthroughs.....	18
4.6 Central Hidráulica.....	20
4.6.1 Adaptaciones y adiciones.....	21
4.7 Accesorios complementarios.....	22
4.7.1 Acople torquimétrico.....	22
4.7.2 Tarimas de trabajo.....	22
4.7.3 Cables de izaje.....	23
4.7.4 Cuñas de centrado.....	24
4.8 Ensayos de materiales.....	24
4.8.1 AISI 1045.....	24
4.8.2 ASTM A105.....	25
4.8.3 Resultados de los ensayos.....	25
5. Simulaciones de Elementos Finitos.....	27
5.1 Celda completa.....	27
5.2 Rosca inferior.....	30
5.3 Rosca de potencia inferior.....	32
5.4 Roscas superiores.....	33
6. Instrumentación.....	34
6.1 Sensores ultrasónicos.....	36
6.2 Strain gages diametrales.....	42
6.3 LVDTs internos.....	44
6.4 LVDT externo.....	47

6.4 Sensores de presión.....	47
6.5 Electroválvulas proporcionales.....	48
6.6 Integración.....	49
7. Control.....	53
7.1 PLC.....	53
7.2 Variables a controlar.....	55
7.2.1 Presión de confinamiento.....	55
7.2.2 Presión de pistón.....	56
7.2.3 Avance del pistón previo al contacto.....	57
7.2.4 Avance del pistón luego del contacto.....	58
7.3 Flujo del programa.....	59
7.3.1 Inicio del ensayo.....	59
7.3.2 Ensayo triaxial.....	61
7.3.3 Ensayo uniaxial.....	64
7.3.4 Ensayo ultrasónico.....	64
7.4 Postproceso de datos.....	65
8. Puesta a punto eléctrica.....	65
9. Caracterización de parámetros e instrumentos.....	68
9.1 Sensores y Actuadores: curvas de calibración.....	68
9.1.1 Electroválvulas.....	68
9.1.2 Sensores de presión.....	70
9.1.3 Relación electroválvulas - sensores de presión.....	71
9.1.4 Sensor de desplazamiento LVDT externo.....	74
9.1.5 Sensores de desplazamiento lateral SG.....	75
9.1.6 Sensores de desplazamiento LVDT internos.....	76
9.2 Ensayos de parámetros de la Celda Triaxial.....	78
9.2.1 Determinación de la fricción estática.....	78
9.2.2 Determinación de la fricción cinética y el coeficiente de roce.....	80
10. Ensayos preliminares.....	81
10.1 Ensayos uniaxiales fuera de la celda.....	81
10.2 Ensayos ultrasónicos fuera de la celda.....	85
11. Protocolos de ensayos.....	86
12. Ensayos Ultrasónicos a presión de confinamiento.....	87
13. Pasos futuros.....	90
14. Conclusiones.....	92
15. Referencias y bibliografía.....	93
Anexo A. Señales de ensayos Ultrasónicos.....	95
A.1 Ensayos fuera de la celda.....	95
A.2 Ensayos dentro de la celda (P, S1, S2, en orden).....	101
Anexo B. Planos eléctricos y conexionado.....	108
Anexo C. Planos de mecanizado.....	110

1. Resumen

El objetivo de este informe es documentar el proyecto final de grado realizado por los alumnos Juan Martín Mujica Buj, Marcos Olivera y Jorge Pedro Torres. El mismo consiste en la finalización del mecanizado, montaje e instrumentación de una Celda Triaxial de ensayos. Se abordan las modificaciones y adiciones mecánicas requeridas para el correcto funcionamiento de la celda, la puesta a punto de los nuevos sensores adquiridos, el conexionado de los instrumentos de medición y actuación, y la actualización del programa de control utilizado en los ensayos. Se incluye también un análisis de material y resistencia de la celda, la caracterización de todos los sensores y actuadores, y ensayos preliminares para comprobación del correcto funcionamiento de estos.

2. Introducción

El presente informe trata sobre el armado, instrumentación y control de una Celda Triaxial. La misma fue diseñada en un proyecto anterior por M. Gonzalez Segura, para el ensayo de probetas de roca de Vaca Muerta por parte del Laboratorio de Petróleo del ITBA, bajo el financiamiento de Chevron.

La presente Celda Triaxial es una mejora de una versión anterior, diseñada por S. Blanco, F. Paterlini^[1] e instrumentada por P. Guardone^[2]. La principal incorporación es la posibilidad de realizar ensayos ultrasónicos, en paralelo a los ensayos estáticos, permitiendo correlacionar los resultados de laboratorio (propiedades estáticas) con los datos adquiridos en campo (propiedades dinámicas). Esta correlación es de gran interés geomecánico debido a que estos últimos se utilizan en cálculos de estabilidad de perforación y estabilidad de pared de pozo, o bien, en simulaciones de fractura hidráulica.

3. Marco teórico

La finalidad de una Celda Triaxial es determinar las propiedades mecánicas de materiales elástico-friccionales, como ser: arenas, rocas, o muestras de suelo. La particularidad de estos materiales es la sensibilidad de su respuesta frente a distintas condiciones de confinamiento. En el caso de este proyecto, se construye una Celda Triaxial para ensayar muestras de roca obtenidas de coronas de pozos petroleros, en particular, del tipo no-convencional, ubicados en el yacimiento de Vaca Muerta en la provincia de Neuquén. El reservorio no convencional se caracteriza por una litografía del tipo *shale* o esquisto, de muy baja permeabilidad y porosidad interconectada.

Se busca entonces simular las características de la roca en condición de reservorio, donde la misma se encuentra en un estado de compresión. Asumiendo un estado principal de esfuerzos en el subsuelo, la roca se ve comprimida por esfuerzos verticales que surgen de la presión resultante del peso acumulado de las distintas formaciones superiores y esfuerzos horizontales ortogonales causados por efectos tectónicos $\sigma_V, \sigma_{Hmax}, \sigma_{Hmin}$. A su vez, la roca en condición de reservorio presenta una presión interna debido al fluido saturado alojado en su espacio poral, denominada presión poral P_p o presión de formación. El esfuerzo efectivo en cada eje al que solicitada la matriz de roca resulta de la diferencia entre el esfuerzo principal y la presión poral, afectado por un coeficiente de compensación por la compresibilidad del fluido según el modelo poro-elástico de Biot^[23], denominado $\alpha = K_{Roca} / K_{Roca + Fluido}$. Debido a las limitaciones del instrumental de ensayo, la condición triaxial real no puede aplicarse en una Celda Triaxial convencional. En cambio, se puede aproximar la situación

a un estado hidrostático de confinamiento, donde las tensiones principales son iguales, siendo esta el promedio de la traza del tensor de tensiones efectivas:

$$\sigma_{confinamiento} = \frac{1}{3} * [(\sigma_v - \alpha P_p) + (\sigma_{Hmin} - \alpha P_p) + (\sigma_{Hmax} - \alpha P_p)] \quad (3-1)$$

Este estado triaxial hidrostático se obtiene sumergiendo la probeta en un fluido a presión. Las propiedades elásticas de las rocas responden en función a este confinamiento, por lo que los ensayos triaxiales consisten en someter primero la probeta a un estado hidrostático de confinamiento y luego comprimir axialmente la misma con una tensión diferencial (denominada tensión deviatorica), como se puede ver en la **Figura 3-1**.

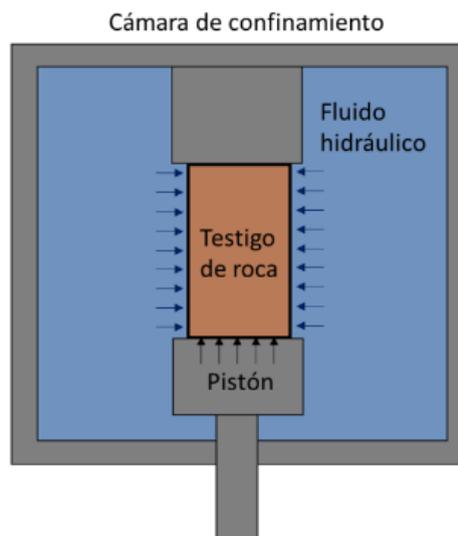


Figura 3-1. Modelo ilustrativo de un ensayo triaxial.^[2]

Como todo material, las rocas presentan una zona de deformación elástica, donde la deformación causada por las tensiones aplicadas es reversible, y una zona de deformación plástica, donde la deformación es irreversible. Generalmente las rocas exhiben un comportamiento frágil y por lo tanto esta deformación plástica es muy limitada. Realizando un ensayo de compresión a la probeta en estado triaxial, se puede obtener una curva tensión-deformación (tanto axial como radial), y de esta, extraer ciertas propiedades elásticas de la misma. Ejemplos de estas curvas se pueden hallar en la **Figura 3-2**. Las propiedades de interés en este caso son:

- Módulo de elasticidad o de Young (E): la constante de proporcionalidad entre la tensión deviatorica y la deformación durante la etapa elástica, aproximando la curva a una función lineal. Se obtiene como la pendiente de dicha curva, considerando solamente una región donde la aproximación lineal sea válida (se excluyen las secciones inicial y final de la etapa elástica ya que presentan en general grandes alinealidades).
- Coefficiente de Poisson (ν): la relación entre la deformación axial y la deformación lateral (radial en el caso de probetas cilíndricas) en la zona elástica. Se obtiene como el cociente de pendientes de las curvas tensión-deformación axial y tensión-deformación radial, en las zonas donde sea válida la aproximación a una función lineal en ambas.

- Módulo de elasticidad transversal (G): la relación entre la tensión de corte aplicada y la deformación angular de la misma debido a dicha tensión. A partir de la teoría de elasticidad se obtiene una fórmula a partir del módulo de Young y el coeficiente de Poisson:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3-2)$$

- Módulo de compresibilidad (K): la relación de proporcionalidad entre la tensión hidrostática (aquella aplicada en todas direcciones por igual) y la deformación volumétrica correspondiente. Nuevamente la teoría de elasticidad brinda una fórmula para obtener su valor a partir de los primeros dos parámetros:

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

Cabe aclarar que la roca del subsuelo presenta, en la macroescala, propiedades anisotrópicas que se originan por su naturaleza porosa y la secuencia de sedimentación en el suelo. Sin embargo, en la escala a ensayar, se puede aproximar el comportamiento de la roca como isotrópico. Se debe remarcar que los ensayos triaxiales se realizan sobre probetas cilíndricas de 1" de diámetro y 2" de alto, extraídas de coronas o testigos de perforación, con el fin de caracterizar localmente las propiedades mecánicas del pozo y determinar un perfil de las mismas respecto al estado tensional en el que se encuentran.

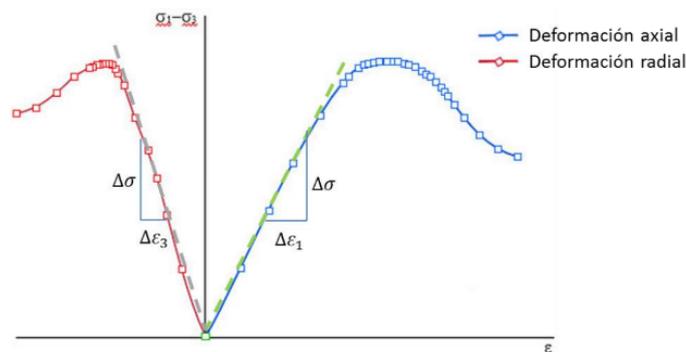


Figura 3-2. Curva típica tensión-deformación.^[2]

Por otro lado, los ensayos triaxiales permiten obtener los valores de resistencia mecánica de las rocas. Dado que las mismas son materiales friccionales y fallan de manera frágil, se utiliza el criterio de Coulomb-Mohr modificado (que no permite tracción sobre la roca), donde se considera que las mismas fallan cuando la tensión de corte en cierto plano crítico supera la propia resistencia al corte del material (denominada cohesión, C) y la fuerza de fricción interna entre ambas caras de dicho plano, ya que las mismas están comprimidas por un esfuerzo normal. Esta fricción, similar a la fricción estática entre diferentes piezas, se puede caracterizar con un coeficiente de fricción interna μ , de manera que el criterio de falla se puede presentar con la siguiente ecuación:

$$\tau = C + \mu\sigma \quad (3-4)$$

Gráficamente, se considera que el material falla si el círculo de Mohr del estado de tensiones en el que se encuentra supera el criterio lineal de Coulomb-Mohr, como se muestra en la **Figura 3-3**. Cabe aclarar que la convención de signos de este trabajo supone la compresión como positiva.

Otra forma de definir la fricción interna es mediante el concepto de ángulo de fricción interna ϕ , que coincide con el ángulo de la recta límite de la **Figura 3-3**, respecto a la horizontal. Por lo tanto:

$$\tan(\phi) = \mu \quad (3-5)$$

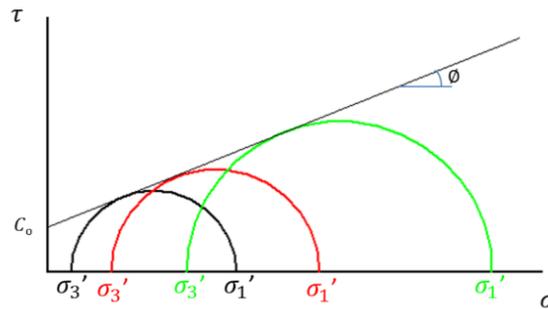


Figura 3-3. Criterio de Coulomb-Mohr.^[2]

Para un material poroso como la roca, es importante también tener en cuenta que en este análisis no se considera el efecto de la presión de poro producida por fluido infiltrándose entre los poros de la probeta. Al presionar la probeta, el fluido interno se comprime y genera una contrapresión. Esto disminuye la fricción al bajar la tensión normal neta aplicada, por lo que el material falla a una tensión de corte menor. Es posible realizar ensayos drenados que tomen en cuenta esta presión poral, los cuales pueden extenderse durante largos períodos (semanas, meses) en casos de muy baja permeabilidad. Dado que se trabaja con rocas poco permeables (*shale*), el efecto fue considerado no fundamental por el proyecto de Celda Triaxial anterior^[2]. Por lo tanto, la actual no fue diseñada para este tipo de ensayos.

La Celda Triaxial permite obtener la cohesión y el coeficiente de fricción interna por medio de dos métodos:

- Serie de ensayos (al menos tres) con muestras similares a distintas presiones de confinamiento, llevando las mismas hasta la falla.
- Ensayo multistage con una única muestra, comprimiendo y descomprimiendo a distintas presiones de confinamiento en distintas etapas, manteniéndose siempre en la zona elástica. Para determinar el punto de finalización de cada etapa se utiliza el punto de dilatación positiva, donde la pendiente de la curva tensión deviatorica - deformación volumétrica se vuelve infinita.

En ambos casos, se obtienen al menos tres círculos de Mohr distintos (debido a las distintas presiones de confinamiento) y con estos se puede trazar una recta tangente a los círculos denominada envolvente de falla. La pendiente de la misma será el coeficiente de fricción interna y la ordenada será la cohesión.

Otro parámetro muy importante para la geomecánica es la resistencia a la compresión no confinada o UCS por sus siglas en inglés. Este valor corresponde a la resistencia a la compresión que presenta la roca en un estado de tensión uniaxial, como se puede observar en el plano de tensiones principales de la **Figura 3-4**. El mismo se puede obtener a partir de la cohesión C y el ángulo de fricción interna ϕ a partir de la relación:

$$UCS = 2 C \sqrt{\frac{1+\sin(\phi)}{1-\sin(\phi)}} \quad (3-6)$$

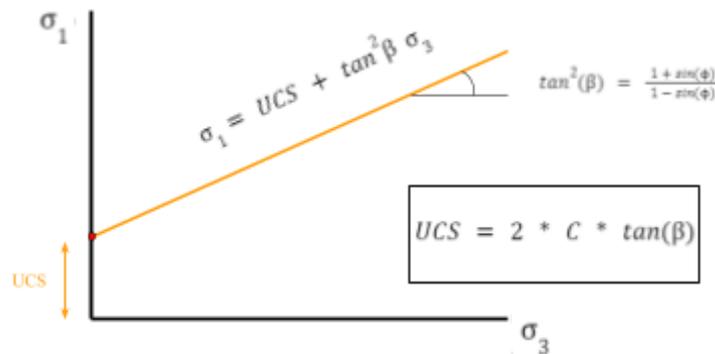


Figura 3-4. Criterio de Coulomb-Mohr para tensiones principales.

3.1 Medición de parámetros dinámicos

Por medio de los nuevos sensores ultrasónicos, se pueden obtener E , ν , G y K mediante mediciones de las velocidades de las ondas compresionales y transversales, o bien, principales y secundarias, a través de la roca.

Los sensores ultrasónicos funcionan en base a dos placas piezoeléctricas que producen ondas mecánicas de alta frecuencia. Estos producen tres ondas: una onda principal de compresión P (longitudinal) y dos ondas secundarias de corte $S1$ y $S2$ (ambas transversales), ortogonales entre sí. Midiendo el desfase temporal entre transmisión y recepción puede calcularse la velocidad de las ondas mecánicas primaria y secundaria que permiten estimar las propiedades mecánicas del medio material elástico por el que se propagan. Dado que el efecto piezoeléctrico es reversible, es indistinto qué pieza es transmisor y cuál es receptor. Es importante asegurar un buen contacto entre piezas para evitar distorsiones en la señal debido a interfases entre materiales con aire o fluido intermedio. Para esto, es recomendado el uso de acoplantes ultrasónicos, como gel acoplante o miel.

El ensayo triaxial ultrasónico consiste en el sometimiento de la probeta a un estado hidrostático para luego realizar mediciones ultrasónicas y obtener las propiedades elásticas a partir de las siguientes fórmulas:

$$E = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (3.1-1)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3.1-2)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (3.1-3)$$

$$K = \frac{1}{3} \rho (3V_p^2 - 4V_s^2) \quad (3.1-4)$$

Donde ρ es la densidad del material, V_p la velocidad de la onda P y V_s el promedio de las velocidades S1 y S2 que corresponden a ondas secundarias en direcciones ortogonales. Los valores obtenidos no necesariamente deben coincidir con los valores obtenidos en el ensayo de tensión-deformación, ya que este ensayo mide propiedades en respuesta dinámica, mientras que el ensayo convencional mide propiedades en respuesta estática.

Para realizar los ensayos ultrasónicos, se siguen los lineamientos detallados en la norma ASTM D2845-08^[3]. Según esta norma, las probetas ensayadas son cilíndricas de 25,4 mm (1 in) de diámetro y 50,8 mm (2 in) de largo, iguales en dimensiones a las de un ensayo triaxial de resistencia.

3.2 Medición de parámetros estáticos

Para obtener las propiedades detalladas anteriormente, es necesario medir durante los ensayos el estado de tensiones de las probetas, y las deformaciones axial, radial y volumétrica. Para ello se utilizan una variedad de transductores. La norma que da las pautas para la realización de ensayos triaxiales de esta índole es la ASTM D7012-14^[4].

- Deformación axial: se obtiene midiendo el cambio de longitud ΔL de la probeta con sensores de desplazamiento LVDT (*Linear variable differential transformer*). Conociendo la longitud L de la probeta, se puede determinar la deformación axial por medio de:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.2.1)$$

- Deformación radial: se mide el cambio de diámetro de la probeta con un transductor de desplazamiento diametral basado en *strain gages* sometidas a flexión. Con el diámetro de la probeta se obtiene la deformación radial:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta D}{D} \quad (3.2.2)$$

- Deformación volumétrica: se calcula en base a las deformaciones anteriores. Sabiendo que $\varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon_r$, se obtiene:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2 \varepsilon_r \quad (3.2.3)$$

- Estado de tensiones: se considera un sistema de ejes coordenados donde el eje X se encuentra alineado con el eje axial de la probeta. El estado de tensiones de la probeta es una superposición de dos estados de tensiones más sencillos, que pueden luego sumarse para hallar el estado de tensiones completo:

- Un estado de tensiones triaxial hidrostático, caracterizado por el siguiente tensor de tensiones:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (3.2.4)$$

Donde la tensión σ_3 corresponde a la presión de confinamiento (P_c).

- Un estado de tensiones uniaxial, correspondiente al siguiente tensor:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} (\sigma_1 - \sigma_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.5)$$

Donde $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ es la tensión deviatorica. La tensión σ_1 corresponde a la fuerza que realiza el pistón sobre la probeta (F_{axial}), distribuida en su sección circular (A_{pr}):

$$\sigma_1 = \frac{F_{axial}}{A_{pr}} \quad (3.2.6)$$

Realizando un análisis de fuerzas en el sistema pistón, se plantea el diagrama de cuerpo libre, ilustrado en la **Figura 3.2-1**, a partir del cual se deduce que esta fuerza es la resultante de la diferencia entre la presión de pistón (P_p), distribuida en el área del pistón hidráulico (A_{PH}), la presión de confinamiento, distribuida en el área mayor del pistón multiplicador (A_{PM}) menos esta presión sobre el área de la probeta (A_{pr}), el peso del pistón hidráulico, pistón multiplicador, acoples de los sensores ultrasónicos, sensores ultrasónicos o sujetadores de probeta y la probeta en sí (F_G), la fricción entre todas las partes del pistón y sus correspondientes cilindros (F_c) y el roce viscoso con el fluido de confinamiento ($F_{roce viscoso} = C_V V$):

$$F_{axial} = P_p A_{PH} - P_c (A_{PM} - A_{pr}) - F_G \pm F_c - C_V V \quad (3.2.7)$$

Donde el signo de la fricción depende de la dirección de movimiento.

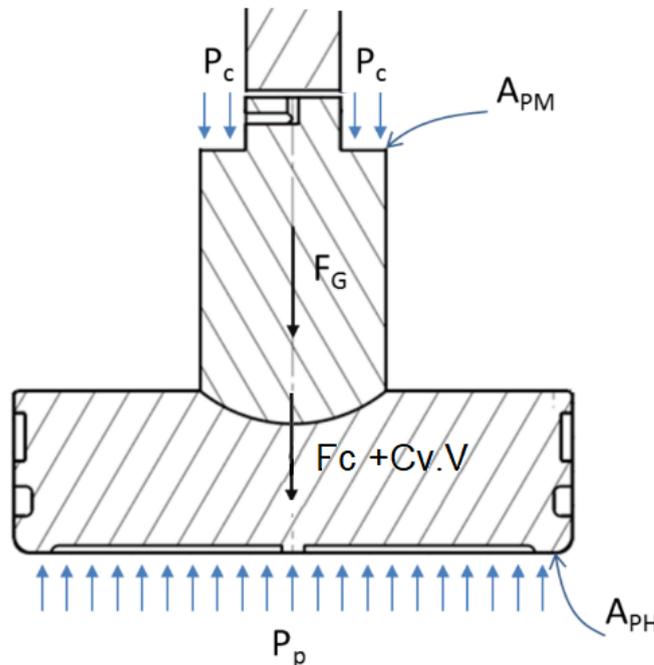


Figura 3.2-1. Diagrama de Cuerpo Libre del conjunto Pistón.

Las presiones de confinamiento y de pistón se miden con un transductor de presión, mientras que la velocidad del pistón se determina a partir de la medición de desplazamiento del pistón, junto con el registro de tiempo de cada medición. Los parámetros de pesos, fricción y coeficiente de roce viscoso se determinan en ensayos preliminares, detallados en la [Sección 9.2: Ensayos de parámetros de la Celda Triaxial](#). Las áreas se calculan en base a mediciones de los diámetros de las piezas.

4. Aspectos constructivos

La Celda Triaxial construida presenta dos características estructurales notorias. En primer lugar, posee una cámara de confinamiento de mayor altura, de manera de poder instrumentarla con sensores ultrasónicos. En segundo lugar, para soportar las altas presiones se utilizan tapas roscadas en la parte superior e inferior de la celda. En la parte superior la rosca se divide en dos piezas separadas, de manera que una soporta la mayoría de la presión de confinamiento mientras que la otra soporta la presión de pistón durante el ensayo. De esta manera, se distribuye la fuerza en una mayor cantidad de filetes de rosca.

El proyecto del cual trata el presente informe parte de la implementación realizada previamente, lo cual limita las posibilidades de reforma o cambios en el diseño. Adicionalmente, si bien se realizaron análisis de resistencia previo al mecanizado de las piezas, estos no cubren todos los aspectos constructivos y por lo tanto este proyecto incluye una sección de análisis y verificación de resistencia de la Celda Triaxial.

4.1 Diseño mecánico

La **Figura 4.1-1** detalla el diseño de la Celda Triaxial, enumerando cada una de sus piezas. Estas incluyen tanto las piezas mecanizadas previamente (sobre las cuales sólo se realizaron modificaciones menores de ser necesario) como nuevas piezas realizadas a lo largo del proyecto. La **Tabla 4.1-1** detalla la denominación de cada pieza, que se mantendrá a lo largo de este informe.

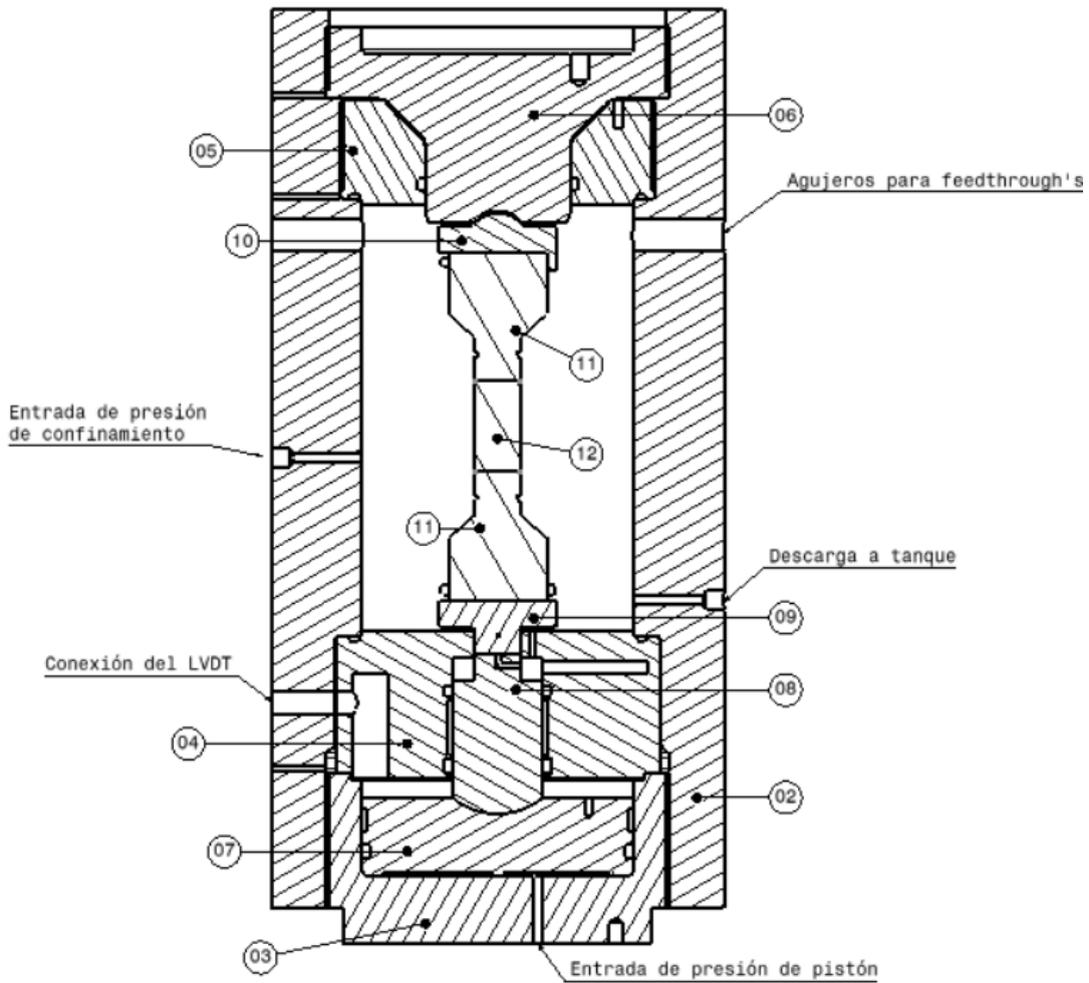


Figura 4.1-1. Celda Triaxial.

PIEZA	N° PLANO	Estado al iniciar el proyecto	MATERIAL
Cuerpo cámara	02	Pieza ya mecanizada.	AISI 1045
Porta pistón	03	Pieza ya mecanizada.	AISI 1045
Cuerpo sellos	04	Pieza ya mecanizada.	ASTM A105
Tapa superior externa	05	Pieza ya mecanizada.	AISI 1045
Tapa superior interna	06	Pieza ya mecanizada.	AISI 1045
Pistón hidráulico	07	Pieza ya mecanizada.	ASTM A105
Pistón multiplicador	08	Pieza ya mecanizada.	ASTM A105 TyR
Pusher	09	Pieza nueva.	ASTM A105 TyR
Catcher	10	Pieza nueva.	ASTM A105 TyR
Sujetadores de Probeta	11	Pieza nueva.	ASTM A105 TyR
Probeta	12	-	-

Tabla 4.1-1. Referencias de las piezas.

4.2 Funcionamiento básico

El funcionamiento de la Celda Triaxial se divide en dos partes: montaje del sistema de medición y funcionamiento durante ensayos.

4.2.1 Montaje del sistema de medición

Las tapas superiores se remueven para permitir el acceso a la cámara de confinamiento. Una vez colocada la columna de fuerza (formada por el Pusher, el Catcher, los Sujetadores de Probeta o Sensores Ultrasónicos y la Probeta), se cierran las tapas y se ingresa aceite a la cámara.

4.2.1 Funcionamiento durante ensayos

Una vez cerrada la celda, se sube la presión del aceite en la cámara y comienza a entrar aceite por el circuito de pistón a través del Porta Pistón. Éste, junto al Pistón Hidráulico, forman una segunda cámara de presión, de volumen variable. Esto genera el movimiento vertical del pistón hasta que éste hace contacto con la columna de fuerza y la presión del circuito hidráulico de pistón sube, comprimiendo la probeta.

El Cuerpo Sellos permite mover el pistón sin modificar sustancialmente el volumen de la cámara de confinamiento y proporciona un lugar donde colocar un sensor para medir su posición. Además, junto con un conducto en el Pistón Multiplicador, la presión de confinamiento llega también a la base de la columna de fuerza, de manera de que la presión de confinamiento somete a la probeta a un estado de tensiones hidrostático sin el uso del pistón (proceso denominado ecualización de presiones). El pistón únicamente se encarga de impartir la tensión deviatorica a la probeta. El canal de ecualización de presiones se ilustra a continuación en la **Figura 4.2.1-1**.

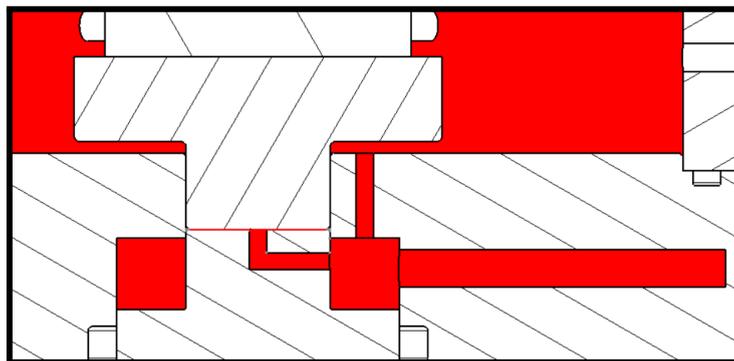


Figura 4.2.1-1. Ecualización de presiones. Todo el volumen en rojo se encuentra a igual presión.

La comunicación entre los sensores internos utilizados en los ensayos y el exterior se realiza mediante *feedthroughs*, que son piezas especiales que permiten el paso de cables de adentro hacia afuera, manteniendo el sellado a alta presión. Estos *feedthroughs* funcionan mediante la compresión de un elemento polimérico (denominado *LAVA*) por donde pasan los cables, que se comprime y sella el canal. La Celda Triaxial utiliza 4 *feedthroughs* de 8 cables cada uno. De los 32 disponibles, 28 son usados por los diversos sensores de adquisición de datos y 4 quedan disponibles para futuras aplicaciones.

En cuanto a los Sujetadores de Probeta, estos se utilizan durante los ensayos triaxiales, mientras que al realizar los ensayos ultrasónicos estos son removidos y en su lugar se colocan los transductores de ultrasonido, de igual forma y tamaño.

4.3 Modificaciones realizadas a las piezas ya mecanizadas

Si bien la mayoría de los mecanizados fueron realizados previos al inicio de este proyecto, restaban parámetros de ajuste inherentes a la puesta en marcha de la celda, sin definición. Por este motivo, en esta etapa del proyecto se deben realizar modificaciones sobre las piezas ya existentes.

4.3.1 Tapa Superior Externa, Tapa Superior Interna y Porta Pistón: agujeros de izaje y roscado

Debido al elevado peso de la celda, esta debe ser manipulada con maquinaria específica para este propósito, como plumas o montacargas. Por otro lado, se requiere también un método eficiente para roscar y torquear las tapas en el Cuerpo Cámara para colocar y remover las tapas entre ensayos.

Se decide entonces perforar tres agujeros roscados en cada tapa, que permitan la colocación de bulones para unirla a un acople torquimétrico, para el fácil roscado con una llave de ajuste. En la Tapa Superior Interna y el Porta Pistón, estos mismos agujeros permiten la colocación de cáncamos para su izaje mediante una pluma. Estimando el peso de la celda y por disponibilidad se eligen cáncamos y agujeros M10x1.5 de manera que cada cáncamo pueda soportar el peso de la celda entera por sí solo (en caso de fallar los otros dos), con un factor de seguridad de al menos 2. Por otro lado, debido a la geometría de las tapas, el tamaño del acople torquimetro es limitado y esto limita los agujeros en la Tapa Superior Externa a ser M6x1, por lo que estos no pueden utilizarse para colocar los cáncamos.



Figura 4.3.1-1. Tapa Superior Interna y Porta Pistón. Agujeros para cáncamos (rojo) y entrada de presión de pistón (azul).

4.3.2 Cuerpo Sellos: sellado de canal de fuga

Para evitar la complicación de mecanizar por completo el Cuerpo Sellos para esta versión de la celda, previo al proyecto se decidió cortar por electroerosión la base de la celda anterior y mecanizarla, manteniendo así los mecanizados de los alojamientos de los sellos del pistón. Sin embargo, esta pieza anterior incluía también el conducto de retorno de la celda anterior, conectada al canal de ecualización de presión y por ende a la cámara de confinamiento. En la celda actual, el retorno se realiza a través del Cuerpo Cámara, por lo que el conducto de retorno existente debe ser sellado, ya que proporciona un camino de fuga para el aceite de confinamiento.

Por lo tanto, este camino se sella mediante el roscado de dicho agujero, la colocación de un bulón M12, posteriormente amolado y soldado con electrodo rutilico (por su alta penetración), seguido de un torneado para mantener la superficie cilíndrica intacta. De esta manera, la rosca proporciona resistencia mecánica a la unión y la soldadura sella completamente el conducto. El cambio se ve en la **Figura 4.3.2-1**.

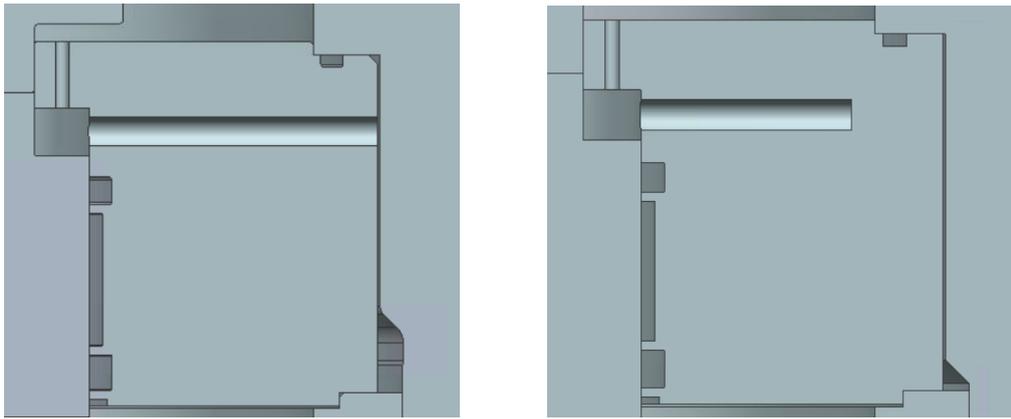


Figura 4.3.2-1. Comparación antes (izq.) y después (der.) del conducto discutido.

4.3.3 Cuerpo Cámara: agujeros para *feedthroughs*

Al comenzar el proyecto, el mecanizado del Cuerpo Cámara estaba empezado, pero no completo. Específicamente, los 4 agujeros para *feedthroughs* eran agujeros de posición, de diámetro 5 mm. Estos se agrandan a diámetro 18 mm y se roscan con rosca NPT 1/2" x 1/4" para colocar los *feedthroughs* comprados.

Debido al tamaño y precisión buscados, se utiliza la fresadora CNC para estas operaciones, pero surge el problema de la colocación de la celda dentro de la misma. Se mecanizan entonces unas cuñas especiales para proporcionar un mejor apoyo en la mesa de trabajo y poder fijar la pieza de manera más eficiente (ver [Sección 4.7.4: Cuñas de centrado](#)).

4.3.4 Cuerpo Cámara y Porta Pistón: agujeros para entradas y salidas hidráulicas

Similar al punto anterior, se mecanizan los agujeros de entrada y salida de aceite complementarios. Se colocan conductos de diámetro 5 mm con un aumento a 11,75 mm para el roscado de las roscas BSP 1/4", necesarias para colocar los acoples que unen la celda al circuito hidráulico. Uno de estos mecanizados se puede observar en la **Figura 4.3.1-1** anterior.

4.3.5 Tapa Superior Interna: hermanado de superficies esféricas

Durante el correcto funcionamiento de la celda, al comprimir la probeta, la Tapa Superior Interna es comprimida por el Catcher mediante una superficie esférica. Debido a las altas tensiones de trabajo, cualquier imperfección entre estas dos superficies entrará en fluencia y se acomodará de manera que aumente la superficie de contacto entre las dos. Resulta recomendable asegurar la mayor superficie de contacto posible previo a la compresión, para reducir la plastificación durante la misma. Se decide por ende hermanar ambas superficies esféricas, rotando una esfera respecto a la otra con una fina capa de material abrasivo entre ellas hasta observar un contacto significativo entre las superficies, por el método de azul de prusia. El resultado final del hermanado se muestra en la **Figura 4.3.5-1**.

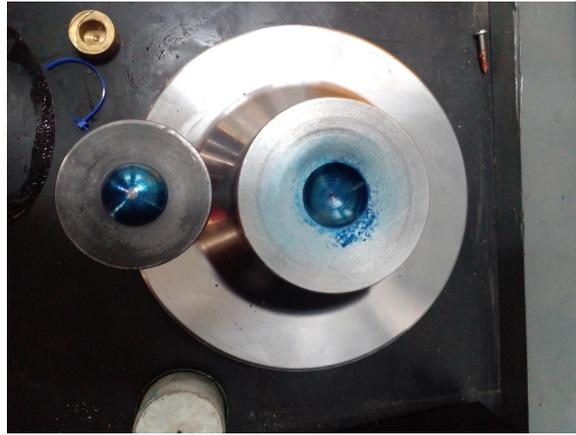


Figura 4.3.5-1. Resultados del hermanado esférico.

4.4 Piezas nuevas

4.4.1 Pusher y Catcher

Para incorporar los sensores ultrasónicos, se debe poder acomodarlos dentro de la columna de carga, de manera que se transmita la compresión de manera eficiente. Debido a la geometría de los transductores y la cámara de confinamiento, se deben diseñar y mecanizar nuevas piezas que acoplen los sensores a la celda. Se utiliza acero ASTM A105 Templado y Revenido ya que forman parte de la columna de carga y requieren alta resistencia mecánica.

La geometría diseñada permite un ajuste con los sensores ultrasónicos, garantizando su centrado respecto a estas piezas y al mismo tiempo permite el conexionado de los cables necesarios para el funcionamiento de los transductores.

Para el ajuste con la celda, se coloca un rebaje en la pieza inferior (Pusher) para que forme un ajuste deslizante con el Cuerpo-Sellos y un casquete esférico en la pieza superior (Catcher) para formar un contacto esférico con la Tapa Superior Interna, que permite ligeras desalineaciones angulares, lo cual facilita la colocación de la columna de carga y está permitido por la norma ASTM D7012-14^[4] para ensayos de compresión de rocas, hasta un valor máximo. La máxima desalineación angular permitida por el Catcher es de 1°, menor al máximo permitido por norma ASTM D2845-08^[3] de ensayos ultrasónicos de rocas de 2°. Ambas piezas pueden verse en la **Figura 4.4.1-1** y la columna de carga se esquematiza en la **Figura 4.4.1-2**.



Figura 4.4.1-1. Pusher y Catcher (izq.), ajuste con sensor ultrasónico (centro) y calzado entre Pusher y Catcher y Tapa Superior Interna y Cuerpo Sellos (der.), respectivamente.

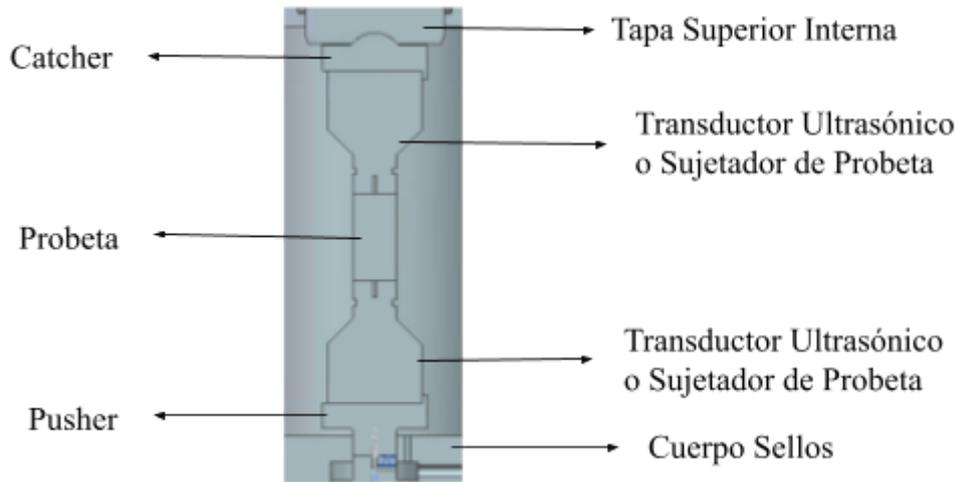


Figura 4.4-2. Esquema de la columna de carga, con Pusher y Catcher.

4.4.2 Sujetadores de probeta

Debido al alto costo de los sensores ultrasónicos utilizados, si se quiere realizar ensayos sin medición ultrasónica, llevando la probeta a altas tensiones hasta la fractura, resulta innecesario tenerlos en la línea de acción de fuerza de la máquina, donde sólo sirven de soporte para las probetas. Es por esto que se diseñan y fabrican dos piezas macizas de acero ASTM A105 Templado y Revenido con la forma general idéntica a la de los sensores, como se ve en la **Figura 4.4.2-1**. De esta manera, si no se pretende usar los sensores, se puede utilizar estas piezas y el ensayo se realiza de la misma manera.



Figura 4.4.2-1. Sujetadores de probeta con una probeta metálica entremedio.

4.5 Sellos hidráulicos

4.5.1 Selección de O-rings

El sellado de las cámaras por medio de juntas elastoméricas se puede dividir en 3 secciones:

- Pistón Hidráulico – Porta Pistón
- Pistón Multiplicador – Cuerpo Sellos
- Sellado de confinamiento

Para las primeras dos secciones se utilizan las mismas juntas elastómeras que en la celda anterior. La sección de sellado de confinamiento es nueva y consta de tres O-rings: entre las tapas superiores, entre Cuerpo Cámara y Tapa Superior Externa y entre Cuerpo Cámara y Cuerpo Sellos.

Se seleccionan del catálogo de Parker los O-rings correspondientes a las ranuras mecanizadas, de material compatible con el aceite a utilizar y alta dureza para evitar extrusión a altas presiones. La **Tabla 4.5.1-1** lista todos los sellos utilizados. En el caso de los O-Rings, se utilizan O-Rings Parker de Nitrilo dureza 90 Shore, que en base al manual de uso de Parker soporta presiones de hasta 69 MPa (10.000 psi), colocado correctamente.

Tipo	Piezas a sellar	Denominación
Anillo Sellante	Pistón Hidráulico Porta Pistón	SKF MPV-150x129x8.1
Anillo Guía	Pistón Hidráulico Porta Pistón	SKF PGR-150x144x13-PF
Anillo Amortiguador	Pistón Multiplicador Cuerpo Sellos	SKF RBB-50x65.1x6.3-J05
Anillo Guía	Pistón Multiplicador Cuerpo Sellos	SKF RGR-50x56x20-PF
Anillo Sellante	Pistón Multiplicador Cuerpo Sellos	SKF DZR-50x60x8-E2E
Anillo Rascador	Pistón Multiplicador Cuerpo Sellos	SKF HW-50x58x6-J2G
Junta tórica de disposición radial	Tapa Superior Externa Tapa Superior Interna	Parker 2-338 Nitrilo Shore 90 ^[5]
Junta tórica de disposición axial	Tapa Superior Externa Cuerpo Cámara	Parker 2-258 Nitrilo Shore 90 ^[5]
Junta tórica de disposición axial	Cuerpo Sellos Cuerpo Cámara	Parker 2-258 Nitrilo Shore 90 ^[5]

Tabla 4.5.1-1. Sellos utilizados.

4.5.2 Feedthroughs

Los *feedthroughs* actúan de sellos hidráulicos para las conexiones eléctricas dentro de la celda. Los *feedthroughs* utilizados son los SPECTITE WFR-1/2"NPT-18AWG-8-L^[11], ilustrados en la **Figura 4.5.2-1**. La hoja de datos del fabricante indica que se utilicen cables AWG 18, y para el sellado interno, el *feedthrough* debe torquarse con 190 Nm, para lo cual se utiliza una llave torquimétrica. Se coloca

teflón en la unión exterior para asegurar el sello hidráulico de la misma. Previo a su colocación, se realiza una prueba hidráulica en un *feedthrough* para asegurar que resista las presiones de trabajo. Una vez colocados los cables, torqueados y ajustados en la celda, se sueldan las conexiones internas y externas con conectores para los sensores y las unidades de acondicionamiento, respectivamente.

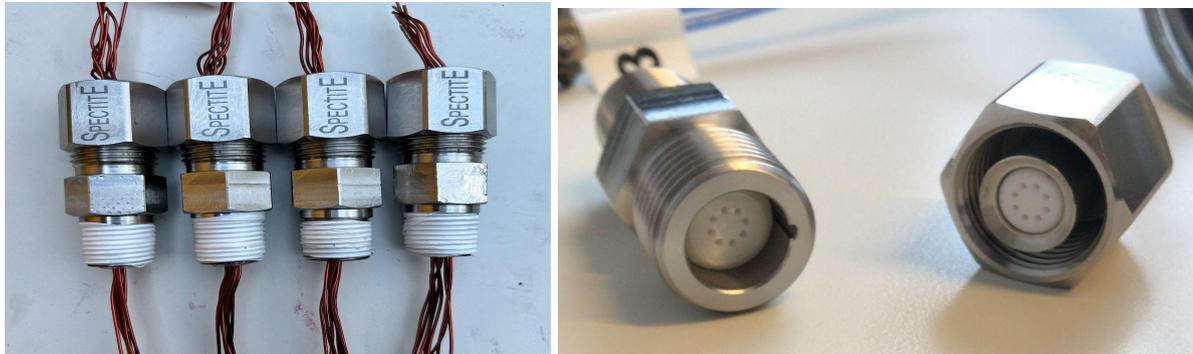


Figura 4.5.2-1. *Feedthroughs* utilizados con cables conectores (izq.) y detalle de su interior (der.).

La prueba hidráulica sobre el *feedthrough* consiste en el roscado del conector en la tapa de una cámara a presión a 80 MPa por aproximadamente 22 horas. Las **Figuras 4.5.2-2 y 4.5.2-3** muestran el montaje de la prueba y la presión máxima alcanzada. Tras análisis previos y posteriores, se verifica que no se encuentra fisura, deformación plástica ni fuga de líquido a presión, concluyendo que el mismo es seguro para su utilización en la Celda Triaxial.



Figura 4.5.2-2. Bomba utilizada (izq.) y montaje de la prueba hidráulica de los *feedthroughs* (der.).



Figura 4.5.2-3. Presión máxima alcanzada en la prueba hidráulica, sostenida por 22 horas.

4.6 Central Hidráulica

La central hidráulica es parte integral del sistema de ensayos triaxiales. Es el sistema que proporciona la presión tanto de confinamiento como de pistón, por medio de bombas y válvulas correspondientes. La central utilizada es la misma que en la celda anterior, e hidráulicamente no presenta cambios. Su esquema hidráulico se presenta a continuación, en la **Figura 4.6-1**.

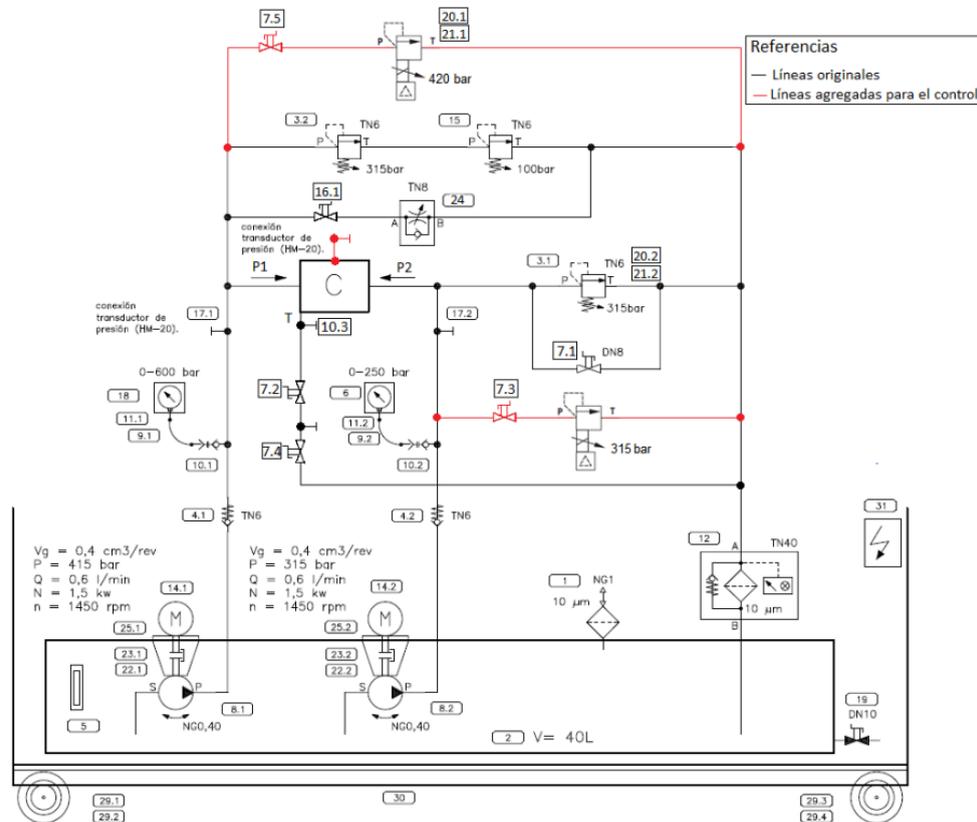


Figura 4.6-1. Esquema hidráulico de la central.

Donde C es la Celda Triaxial, P1 es el circuito de confinamiento, P2 el circuito de pistón (no están conectados entre sí) y T la descarga a tanque del circuito de confinamiento. Cada circuito consta de una bomba de pistones radiales (M1 y M2), una válvula antirretorno (4.1 y 4.2), una electroválvula para la regulación de presión por el sistema de control (20.1 y 20.2) así como válvulas limitadoras manuales para control manual (3.2 + 15 y 3.1). Además, cada circuito incluye una válvula para deshabilitar la rama de la electroválvula (7.3 y 7.5) cuando se quiere realizar un control manual y una válvula de bypass de las limitadoras (16.1 y 7.1) que al ser abiertas, no permiten el aumento de presión en el circuito. Finalmente, cada rama cuenta de un manómetro propio para visualización rápida de la presión en la línea. Ambos circuitos comparten la rama de retorno, aguas abajo de las electroválvulas y válvulas limitadoras manuales, que pasa por un filtro (12) antes de volver al tanque principal.

Las bombas utilizadas tienen una presión máxima de 415 bar (41.5 MPa) para la bomba en el circuito de confinamiento (M1) y 315 bar (31.5 MPa) para la bomba en el circuito de pistón (M2). Debido a la relación de áreas en el Pistón Hidráulico y el Pistón Multiplicador, la presión máxima a la que se puede someter la probeta es 36 veces mayor, en 1134 MPa, equivalente a una fuerza axial máxima de 575 kN.

4.6.1 Adaptaciones y adiciones

Hidráulicamente no es necesario realizar cambios a la central, ya que el sistema de control presenta suficientes similitudes con la versión de la celda anterior. Sin embargo, debido a la nueva geometría de la celda, se deben realizar dos cambios estructurales:

- Posicionamiento de las entradas y salidas de aceite de confinamiento.

Para solucionar la posición de las entradas y salidas de la celda, se deben reemplazar las cañerías que llevan a estas posiciones. Se utilizan caños de acero de 10 mm de diámetro exterior (6 mm interior), junto con codos a 90°, tuercas y virolas de alta presión compatibles con estos. Se elige utilizar codos separados en lugar de cañería doblada debido a la dificultad de conseguir proveedores que den la opción de doblar caños de acero de 2 mm de pared y la imposibilidad de hacerlo por cuenta propia. Cabe notar que como el aceite durante el funcionamiento está en estado cuasi estático, la utilización de codos a 90° no genera caídas de presión significativas.

El método de sellado utilizado es el de tuerca-virola, donde se coloca una virola en el caño, entre la tuerca y el codo/acople roscado, que al ser apretada por la tuerca se deforma y deforma ligeramente el caño, de manera que la misma se incrusta dentro de él, sellando la unión. Es importante dejar un espacio entre el final del caño y la virola ya que si la virola está muy cerca del borde del caño, al presionar, en lugar de incrustarse en él, la misma desliza hasta desprenderse del caño, y no se realiza un sellado correcto. Los conectores estándar tienen hecho un rebaje para considerar este tramo extra de caño.

La conexión de presión de pistón no cambia de ubicación, por lo que allí se mantiene la cañería original de la estación hidráulica.

- Fijación de la celda a la central.

Ante la altura y relación de aspecto de la nueva celda, su manipulación se vuelve complicada y se ve la necesidad de empotrarla a la central hidráulica. Los agujeros de la central previstos para abulonar la celda anterior ya no resultan utilizables, debido al menor diámetro de la celda actual, y no se considera suficiente una sujeción únicamente por medio de la conexión de presión de pistón.

Por otro lado, para evitar tener que mecanizar más agujeros en el Porta Pistón, es conveniente aprovechar para la sujeción los agujeros antes previstos para el izaje y torquedo. Por lo tanto, se fabrica por corte por agua una placa, la cual se abulona tanto a la central hidráulica como a la celda, uniéndolas entre sí. La placa incluye también un agujero por donde pasa la conexión de presión de pistón. La misma se muestra en la **Figura 4.6.1-1**.

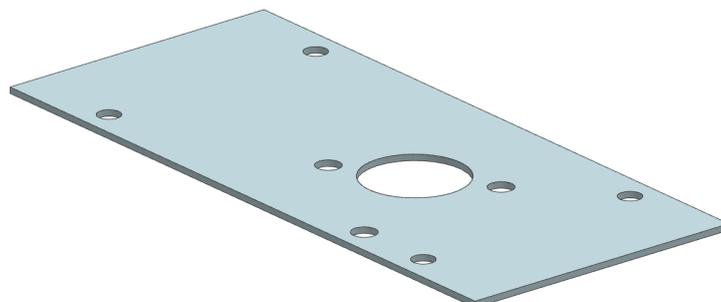


Figura 4.6.1-1. Placa de sujeción, de la celda con la central hidráulica.

4.7 Accesorios complementarios

Además del mecanizado de las piezas que conforman la Celda Triaxial, se fabrican múltiples accesorios e instrumentos que cumplen una función íntegra para el funcionamiento del sistema, o facilitan cierto proceso o tarea. A continuación, se detalla cada uno de estos accesorios y su función.

4.7.1 Acople torquimétrico

Consta de una pieza de unión entre las tapas (Superior Interna, Superior Externa y Porta Pistón) de la celda y una llave torquimétrica o llave de ajuste. Incluye una serie de agujeros para realizar la unión con las tapas (que incluyen agujeros roscados M10x1.5 o M6x1 en estas posiciones) y una pieza prismática en el centro, para colocar la llave torquimétrica (la cual incluye un acople propio de esta medida). Se fabrica a partir de dos piezas soldadas: el cubo central, cortado por electroerosión, y la base, obtenida por corte por agua. Adicionalmente se realiza un análisis sencillo por elementos finitos para asegurar que el acople pueda transmitir torque de manera efectiva (utilizando un torque de 200 Nm aplicado a las paredes del cubo y dejando empotrados los agujeros de la base, simulando la tapa ajustada). El acople torquimétrico se puede ver en la **Figura 4.7.1-1**.

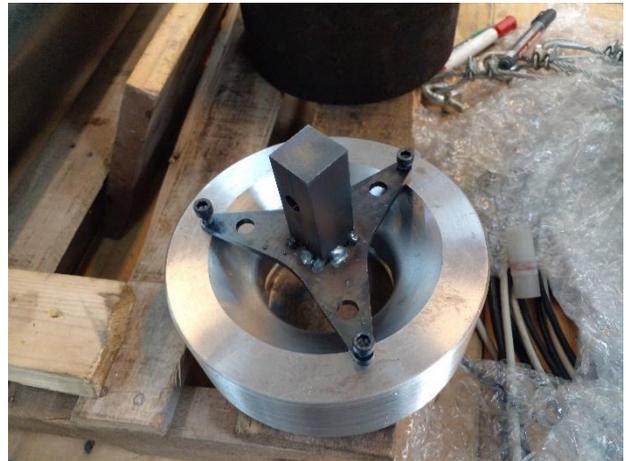
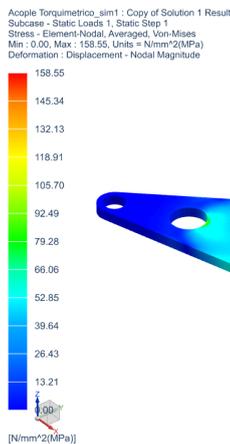


Figura 4.7.1-1. Acople torquimétrico. Simulación por elementos finitos (izq.) y acople abulonado a la Tapa Superior Externa (der.).

4.7.2 Tarimas de trabajo

Para asegurar que el aceite se retire de la celda por gravedad al abrir las llaves de retorno, la celda debe ser montada arriba de la central hidráulica, a mayor altura que los caños de recirculación. Como consecuencia, la posición de la celda resulta demasiado alta para ingresar y extraer piezas del interior cómodamente. Por lo tanto, se diseñan y fabrican 3 tarimas rectangulares y un banquito de menor altura, a modo de escalón (de alturas de 500 mm y 250 mm). Las mismas se fabrican con una estructura de caños rectangulares soldados, una placa de madera fenólica atornillada por arriba y regatones en las patas. Estas tarimas permiten un amplio espacio de trabajo, con posibilidad de manipulación de objetos a una altura mayor a la del suelo.

Adicionalmente, las tarimas pueden atornillarse entre sí y atornillarse a un caño rectangular por detrás para formar un espacio cerrado que rodea a la central hidráulica. Esto proporciona una mayor superficie de estabilidad para la central e impide que la misma se voltee. Se pueden ver las tarimas en posición en la **Figura 4.7.2-1**.



Figura 4.7.2-1. Tarimas y banquito rodeando a la Celda Triaxial.

4.7.3 Cables de izaje

Dado el peso de la Celda Triaxial, superior a los 150 kg, para trasladarla es necesario utilizar una pluma o mecanismo similar. Para esto, se armaron tres cables de izaje, que constan de eslingas de izaje de acero de 6 mm de diámetro, un guardacabos y dos pasacables por extremo. De una punta, se colocan en el gancho de una pluma, y de la otra, están equipados con cáncamos M10 que se roscan directamente a la tapa (Superior Interna o Porta Pistón) de la celda, como se muestra en la **Figura 4.7-3**.



Figura 4.7.3-1. Cables de izaje sosteniendo a la Tapa Superior Interna (izq.) y a toda la celda (der.).

4.7.4 Cuñas de centrado

Para el mecanizado de los agujeros en el Cuerpo Cámara de la Celda Triaxial, es necesario centrar correctamente la pieza en la fresadora CNC. Para ello, se idearon en el taller dos cuñas cortadas por electroerosión que calzan en las ranuras de la fresadora y permiten a la pieza descansar en dos líneas y de esta manera asegurar el centrado en profundidad de la misma (ya que se puede centrar respecto a la ranura fácilmente). Las mismas se muestran en la **Figura 4.7.4-1**.



Figura 4.7.4-1. Cuñas de centrado para mecanizado del Cuerpo Cámara en la fresadora CNC del taller.

4.8 Ensayos de materiales

Desde el punto de vista material, las piezas mecanizadas de la Celda Triaxial se dividen en 3 grupos:

- Piezas obtenidas de la celda anterior, de acero ASTM A105 sin templar: el Cuerpo Sellos y el Pistón Hidráulico.
- Piezas obtenidas de la celda anterior, de acero ASTM A105 Templado y Revenido, ya sea para la celda anterior (caso del Pistón Multiplicador), o austenizadas a 850°C por 1 hora, templadas y revenidas a 205°C por 30 minutos para el presente proyecto (caso del Pusher, Catcher y Sujetadores de Probeta).
- Piezas nuevas mecanizadas para esta celda, de acero AISI 1045.

Es imperativo asegurarse de que todas las piezas soporten los esfuerzos a los que estarán sometidas. A continuación se detalla la búsqueda de información y ensayos realizados para obtener las propiedades mecánicas de estos materiales.

4.8.1 AISI 1045

Las piezas de AISI 1045 fueron laminadas o forjadas en caliente, y posteriormente mecanizadas, por lo que no tuvieron tratamientos térmicos ni se considera que hayan sido endurecidas por trabajo en

frío. Se utilizan por lo tanto valores informados para AISI 1045 laminado en caliente en la bibliografía consultada^[6]:

- $S_u = 570 \text{ MPa}$
- $S_y = 310 \text{ MPa}$

4.8.2 ASTM A105

En el caso del acero ASTM A105, se realiza una búsqueda de información respecto a este material, sin encontrar datos relevantes. Por lo tanto, se decide utilizar partes de la celda anterior, de este mismo material, para generar probetas y realizar ensayos de materiales para determinar las propiedades mecánicas relevantes. Dado que algunas piezas son templadas y revenidas, se realizan ensayos de tracción para determinar la tensión de fluencia (S_y) y tensión última (S_u) para probetas con y sin templado y revenido, y un ensayo de Jominy para determinar la templabilidad. Los ensayos de tracción se realizaron bajo norma ASTM E8/E8M-13a^[7] y los ensayos de Jominy bajo norma ASTM A255-10^[8]. La **Figura 4.8.2-1** muestra el montaje de los ensayos.



Figura 4.8.2-1. Montaje de ensayos de tracción (izq.) y medición de dureza de Jominy (der.).

4.8.3 Resultados de los ensayos

- Ensayo de tracción

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de materiales previamente estipulados. En primer lugar, en la **Figura 4.8.3-1** se muestran las curvas obtenidas en los ensayos de tracción del ASTM A105 sin templar y templado y revenido.

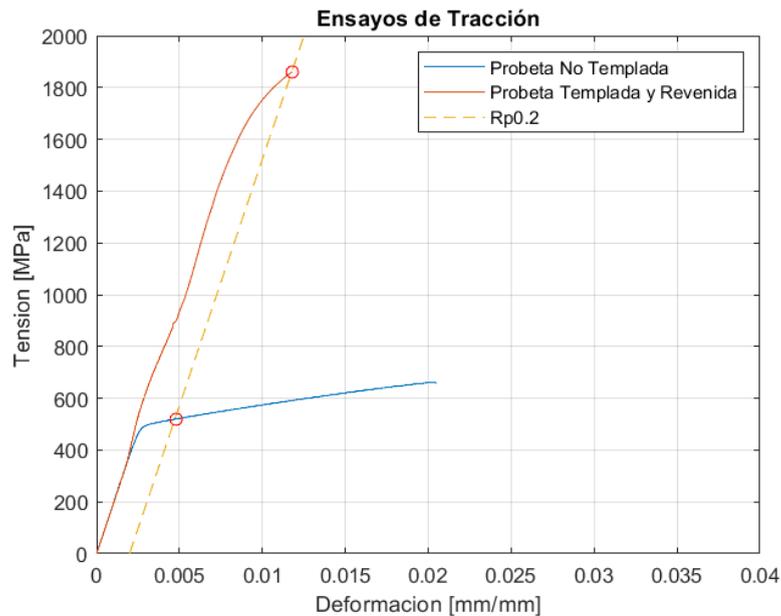


Figura 4.8.3-1. Curvas tensión-deformación obtenidas.

De estas curvas se puede obtener la Resistencia Última S_u y la Resistencia a Fluencia S_y . La tensión última se obtiene del máximo valor de tensión obtenido en el ensayo y la tensión de fluencia se determina a partir del método $R_{p0.2}$, donde se considera como punto de fluencia aquel que genera un 0,2% de deformación plástica. De esta manera, los resultados obtenidos fueron:

- ASTM A105 no templado:
 - $S_u = 662 \text{ MPa}$ $S_y = 519 \text{ MPa}$
- ASTM A105 templado y revenido:
 - $S_u = 1862 \text{ MPa}$ $S_y = 1859 \text{ MPa}$

Como se puede observar, el templado y revenido del ASTM A105 aumenta considerablemente su resistencia mecánica y de fluencia. Además se puede apreciar que la ductilidad posterior al tratamiento térmico es significativamente reducida, a tal punto que prácticamente no presenta deformación plástica previo a la rotura.

- Ensayo de Jominy

La **Figura 4.8.3-2** muestra la dureza en función de la distancia de Jominy ($1J = 1/16 \text{ in}$) desde el extremo templado. Previo al templado se realizó una medición de dureza en el material, obteniendo un valor de dureza superficial de 26.5 HRC. Se puede observar que toda la probeta ensayada, hasta pasadas las dos pulgadas se endurece durante el templado, por lo que se espera que la resistencia mecánica de toda la probeta sea mayor a los valores de la probeta sin templar, aún si no presenta 50% martensita. No obstante, una regla general para determinar el diámetro crítico de 50% martensita es tomar la distancia del punto de inflexión. Mediante un ajuste de curva se encuentra un punto de inflexión de 16,23 cm. Para determinar de manera cuantitativa si las piezas están completamente templadas se requiere un análisis térmico de curvas de calentamiento para la geometría específica de las piezas.

Para realizar una comparación de templabilidad, se añade en la **Figura 4.8.3-2** la banda de templabilidad de un acero AISI 4140^[9], considerado generalmente un acero de buena templabilidad. Se puede observar que la curva medida cae dentro de la banda de templabilidad, por lo que se concluye que la templabilidad del ASTM A105 es comparable a la de un AISI 4104.

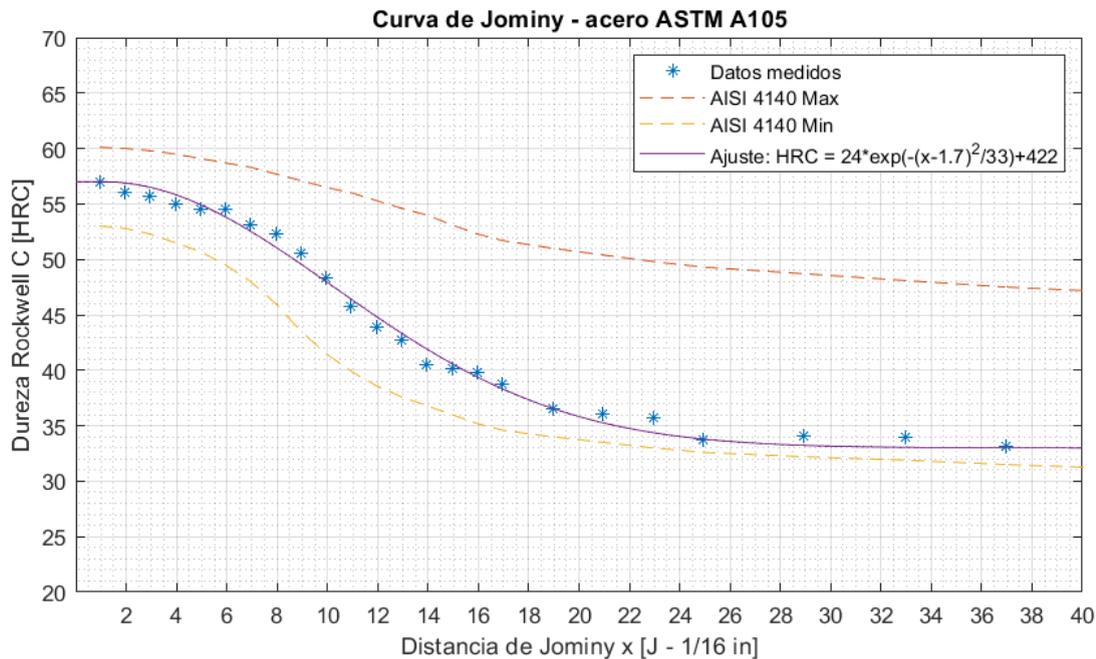


Figura 4.8.3-2. Curva de Jominy obtenida para ASTM A105.

5. Simulaciones de Elementos Finitos

El diseño de la celda realizado con anterioridad incluye simulaciones de elementos finitos para la celda sometida a las máximas presiones de bomba posibles. Estas simulaciones sin embargo eran axisimétricas, por lo que las simulaciones no contemplaban los varios agujeros y detalles que concentran tensiones.

5.1 Celda completa

Se decide por lo tanto realizar una nueva simulación que contemplen estos cambios. Las características generales de la simulación se presentan a continuación.

- La simulación es no lineal y contempla un modelo elastoplástico para los materiales, con un endurecimiento del 1% del módulo de elasticidad para el AISI 1045, y un modelo perfectamente elastoplástico para el ASTM A105, con y sin tratamientos térmicos. Los valores utilizados se encuentran en la [Sección 4.8: Ensayos de materiales](#).
- Se modelan los contactos entre las piezas. Para lograr la convergencia de la solución es necesario ignorar la penetración inicial entre mallas que ocurre debido a las imperfecciones del mallado.
- Debido al uso de contactos y elastoplasticidad, se utiliza el solver 401 (Multi Step Nonlinear) de NASTRAN, bajo la plataforma de NX 12.
- La celda es simétrica, aún con detalles, en 1 plano vertical, por lo que se modela solamente media celda. Además, se considera que el plano medio de la misma no se mueve en su dirección

ortogonal. Finalmente, la base está fija axialmente por la central hidráulica. De esta manera se fijan todos los grados de libertad de la celda.

- Para mantener la simulación en tamaños manejables, no se modelan las roscas entre las diferentes piezas, uniéndose rígidamente cada par. Las roscas fueron calculadas y verificadas analíticamente en la fase de diseño, previo a este proyecto.

La **Figura 5.1-1** muestra el mallado y la aplicación de las cargas en la simulación. Se realizan dos simulaciones, ambas con la presión máxima del circuito de pistón y una con presión máxima de confinamiento y otra sin presión de confinamiento. Esto se debe a que las máximas tensiones en la camisa externa de la celda se dan a las máximas presiones de ambas bombas, mientras que las máximas tensiones de la columna de carga se dan cuando no hay presión de confinamiento ya que la tensión deviatorica es mayor.

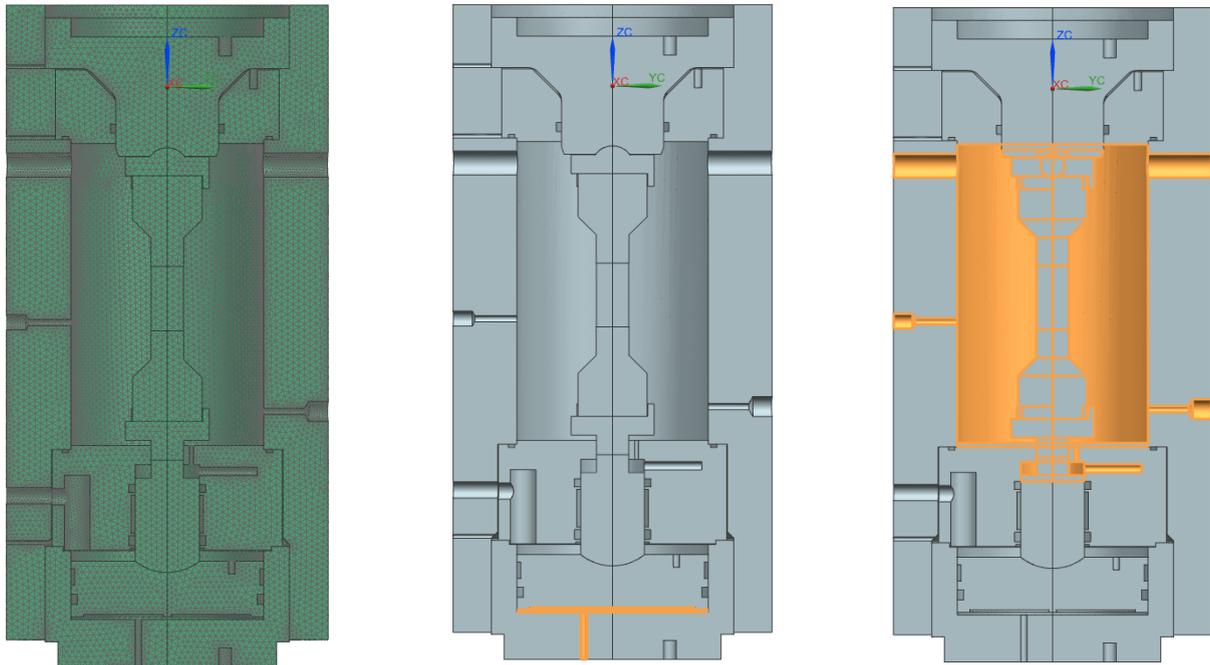


Figura 5.1-1. Mallado (izq.) y aplicación de presiones: pistón (centro) y confinamiento (der.).

Los resultados de las simulaciones se detallan a continuación en las siguientes figuras, donde se muestran las tensiones obtenidas en cada caso (**Figura 5.1-2**), y la deformación plástica obtenida para el Pistón Multiplicador y el Pusher, de ASTM A105 templado y revenido (**Figura 5.1-3**) y la deformación plástica obtenida en la Tapa Superior Interna, de AISI 1045 (**Figura 5.1-4**).

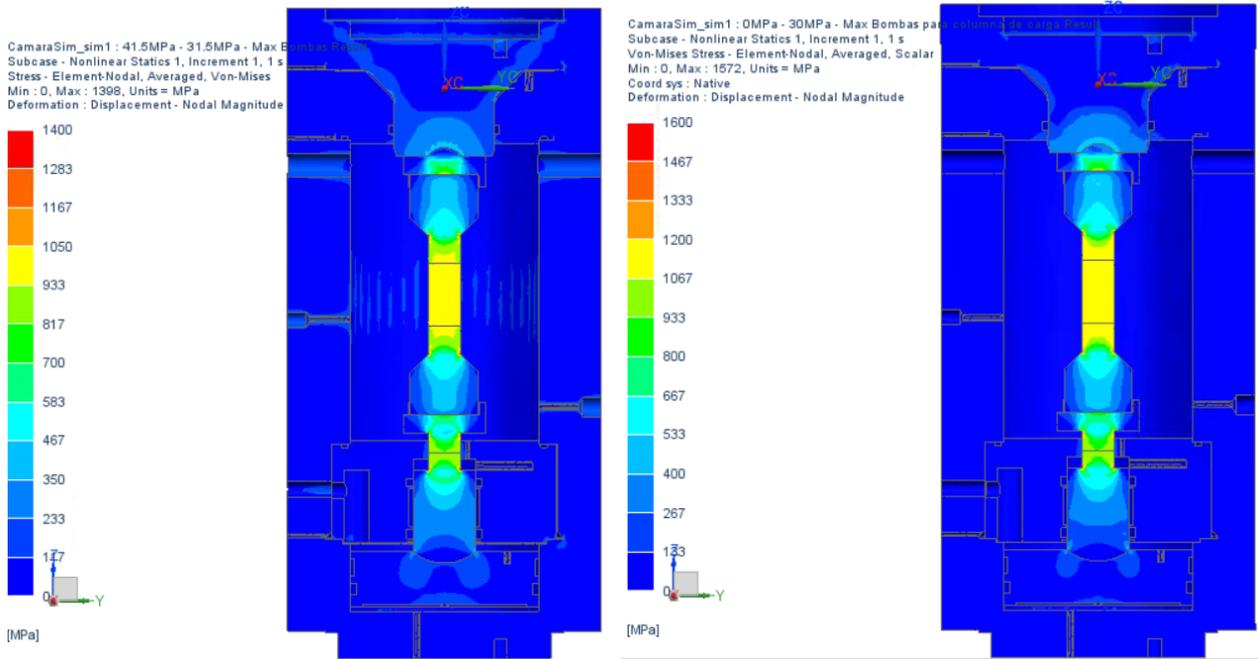


Figura 5.1-2. Tensiones de Von Mises para la celda completa con presión de confinamiento 40 MPa (izq.) y sin presión de confinamiento (der.).

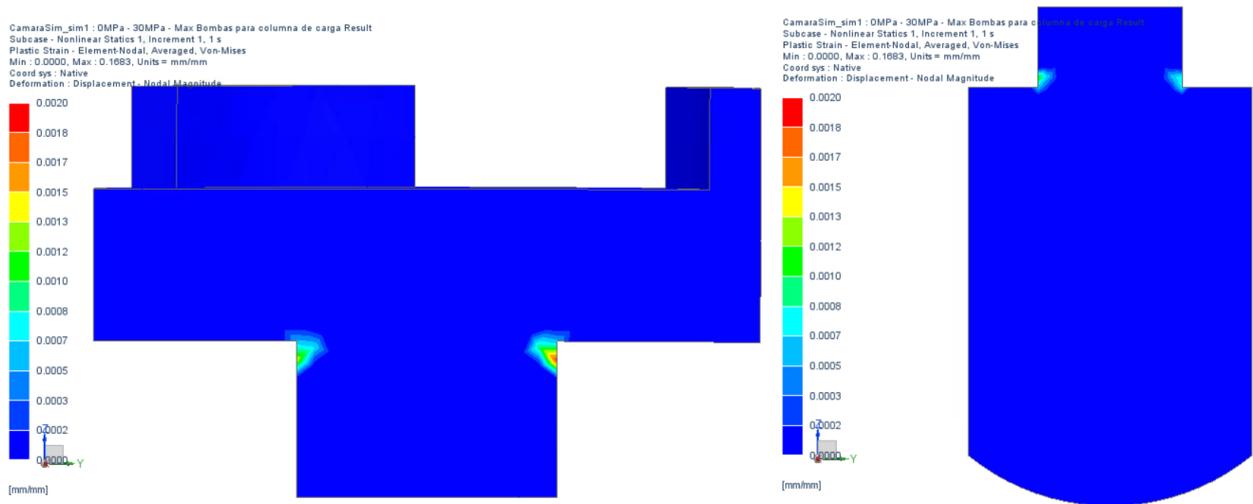


Figura 5.1-3. Detalle de deformación plástica en los rebajes de Pusher y el Pistón Multiplicador.

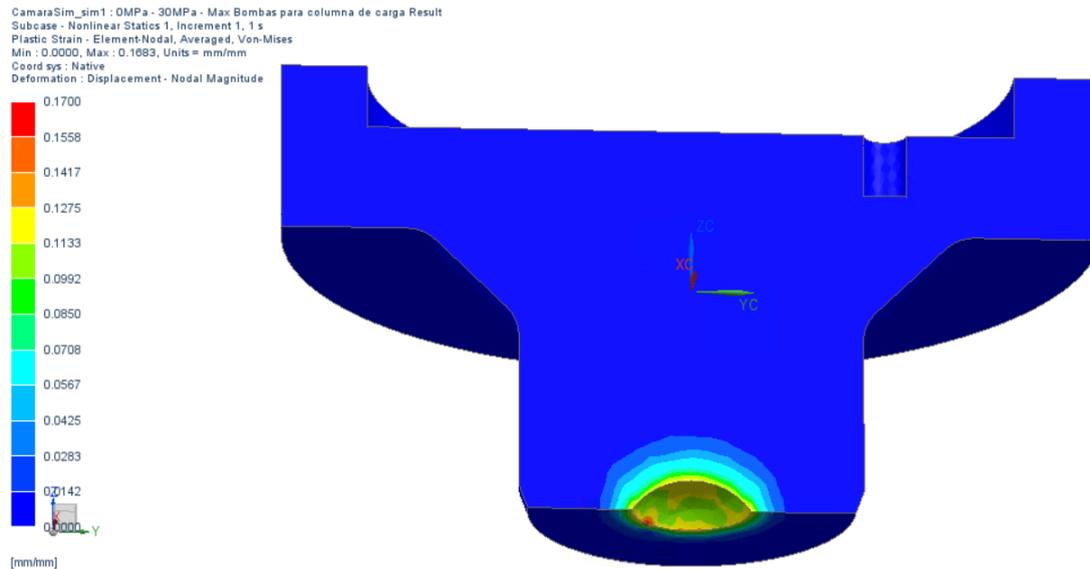


Figura 5.1-4. Deformación plástica en la Tapa Superior Interna.

Como se puede apreciar, con las bombas entregando su máxima presión, ocurre deformación plástica en ciertas piezas que concentran tensiones excesivas. En particular, en los cambios de sección del Pusher y el Pistón Multiplicador las tensiones son elevadas, pero se puede apreciar que la deformación plástica es localizada y de aproximadamente $2\mu\text{m}/\text{mm}$, por lo que llegado a este nivel de carga, ocurre deformación plástica, se endurece y la configuración se mantiene estable. Esto es considerado aceptable en esta situación. Por el otro lado se observa una mayor deformación plástica en la Tapa Superior Interna, en la zona del contacto esférico con el Catcher, de aproximadamente $0,1\text{ mm}/\text{mm}$ en toda la esfera, llegando a $0,17\text{ mm}/\text{mm}$ en su máximo. Esta deformación es apreciable y puede dejar una marca visible si ocurriese, por lo que es importante considerarla una zona de inspección al final de cada ensayo. Por fuera del contacto esférico, entre la Tapa Superior Interna y el Catcher hay $0,5\text{ mm}$ de espacio que permiten la desalineación angular entre las piezas. Con la deformación plástica, este espacio se reduce permanentemente y se limita la desalineación permitida por el conjunto, pero no se pierde funcionamiento.

Cabe aclarar que en estas simulaciones la probeta está sometida a aproximadamente 575 kN axialmente, lo cual es mayor que la fuerza máxima que soporta cualquier probeta para la que está diseñada la celda. En la realidad la probeta se rompe antes de que la fuerza axial crezca hasta los valores simulados. Estas simulaciones muestran simplemente la peor condición de carga, donde la probeta resiste dicha carga y las presiones de ambos circuitos hidráulicos son máximas.

5.2 Rosca inferior

Durante el proyecto se armó la celda y se sometió el confinamiento a 40 MPa de presión para las pruebas de calibración y parámetros de ensayo. A fecha de junio de 2023, al tratar de desarmar la celda se encuentra un enclavamiento en la rosca inferior. Para buscar una explicación se decide realizar una simulación de elementos finitos específicamente en esta rosca. Los resultados indican que ciertos filetes se deforman plásticamente aproximadamente $0,011\text{ mm}/\text{mm}$, lo que se considera suficiente para clavarse entre sí y evitar el desarmado de la rosca. Por lo tanto, esta rosca debe descartarse y se debe realizar la unión por medio de una solución aceptable. Las **Figuras 5.2-1 a 5.2-3** muestran el mallado y los resultados obtenidos.

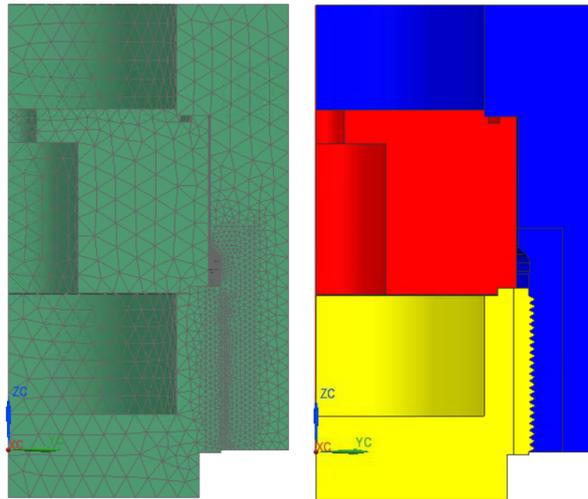


Figura 5.2-1. Mallado (izq.) y piezas modeladas (der.): Porta Pistón (Amarillo), Cuerpo Cámara (Azul) y Cuerpo Sellos (Rojo).

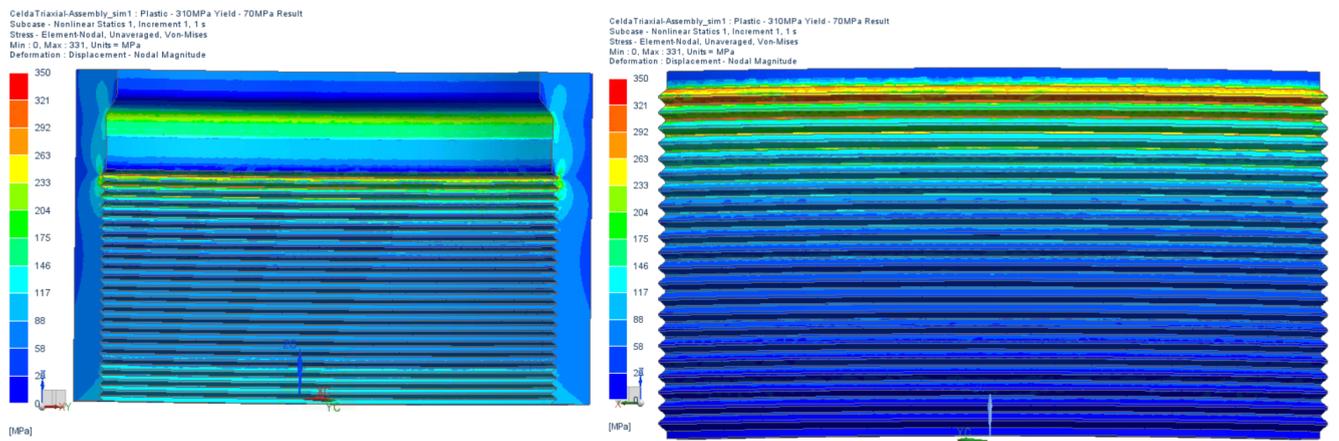


Figura 5.2-2. Tensión de Von Mises para la rosca interna (izq.) y rosca externa (der.).

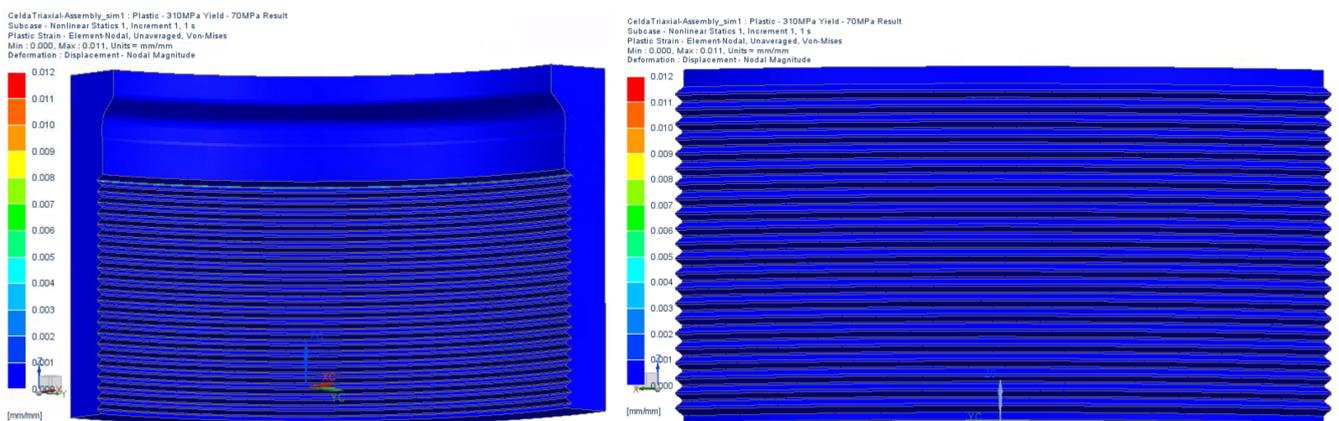


Figura 5.2-3. Deformación plástica para la rosca interna (izq.) y rosca externa (der.).

5.3 Rosca de potencia inferior

El problema de la rosca inferior debe ser solucionado para la finalización de la Celda Triaxial, ya que toda la celda debe ser desarmable en caso de problemas internos o mantenimiento. Se propone entonces la fabricación de una rosca de potencia en lugar de la rosca actual. Dicha rosca consta de una sección cuadrada de 9 mm de paso, o 4,5 mm de espesor de filete. Si bien el proyecto no abarca la realización de esta solución, se realizan simulaciones de elementos finitos para verificar que esta solución sea apropiada y se ilustran en las **Figuras 5.3-1 a 5.3-3**.

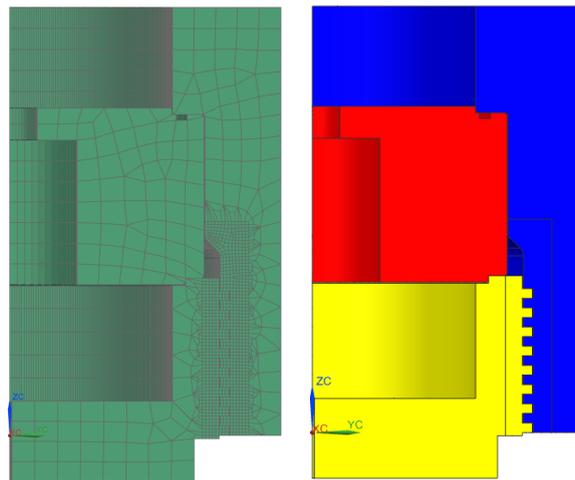


Figura 5.3-1. Mallado (izq.) y piezas modeladas (der.): Porta Pistón (Amarillo), Cuerpo Cámara (Azul) y Cuerpo Sellos (Rojo).

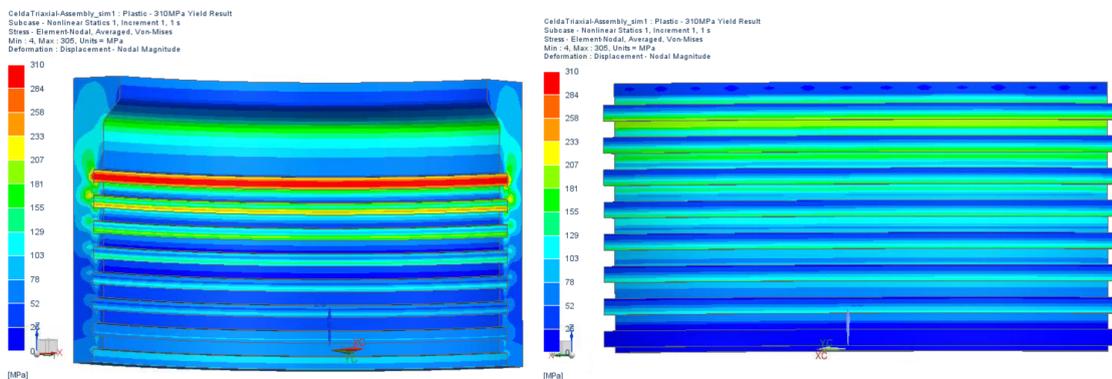


Figura 5.3-2. Tensión de Von Mises para la rosca interna (izq.) y rosca externa (der.).

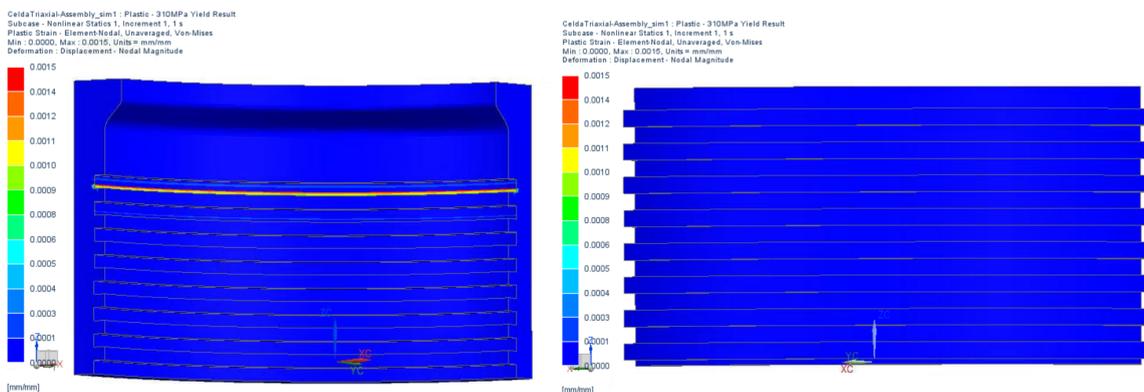


Figura 5.3-3. Deformación plástica para la rosca interna (izq.) y rosca externa (der.).

Como se puede observar, si bien existe nuevamente deformación plástica, la misma es mucho menor para el caso de la rosca de potencia, rondando $1,5 \mu\text{m}/\text{mm}$. Esta deformación es aceptable para la rosca de potencia, y no impone dificultad a la hora de roscar o desenroscar las piezas.

5.4 Roscas superiores

Se decide entonces verificar también que las roscas superiores soporten las presiones máximas de trabajo, para asegurar el no-enclavamiento de las mismas. Las **Figuras 5.4-1 a 5.4-3** muestran el mallado y resultados obtenidos.

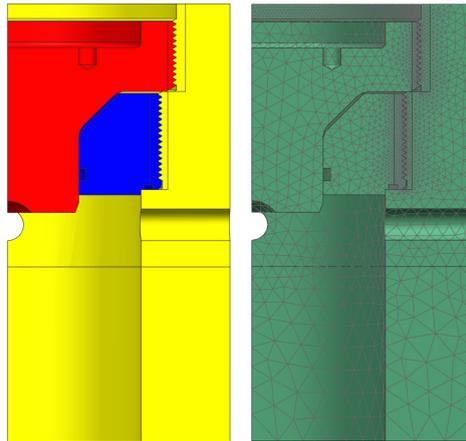


Figura 5.4-1. Mallado (izq.) y piezas modeladas (der.): Cuerpo Cámara (Amarillo), Tapa Superior Externa (Azul) y Tapa Superior Interna (Rojo).

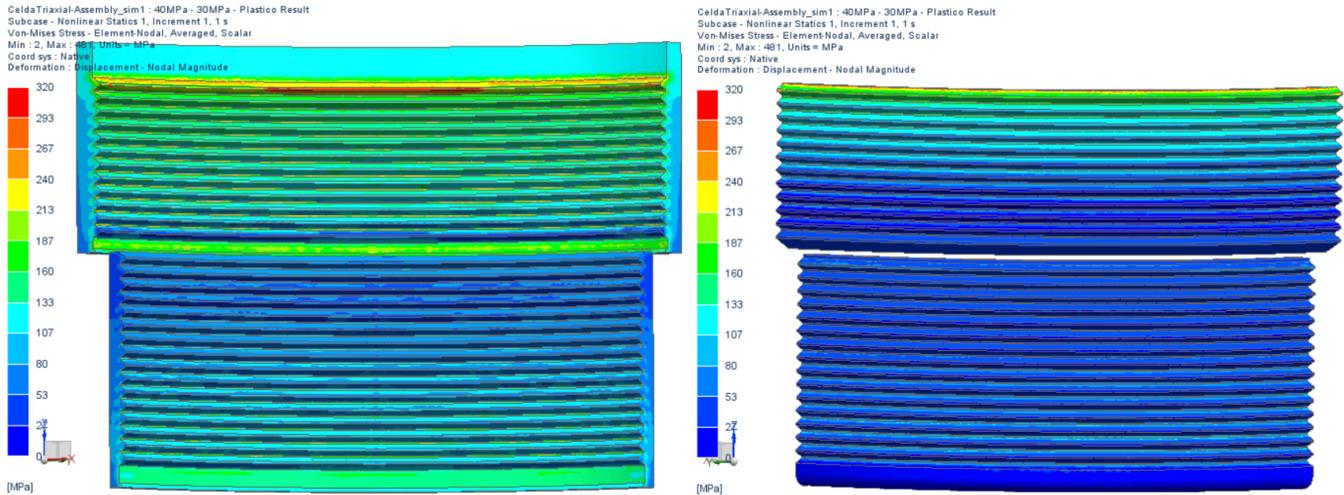


Figura 5.4-2. Tensión de Von Mises para las roscas internas (izq.) y roscas externas (der.).

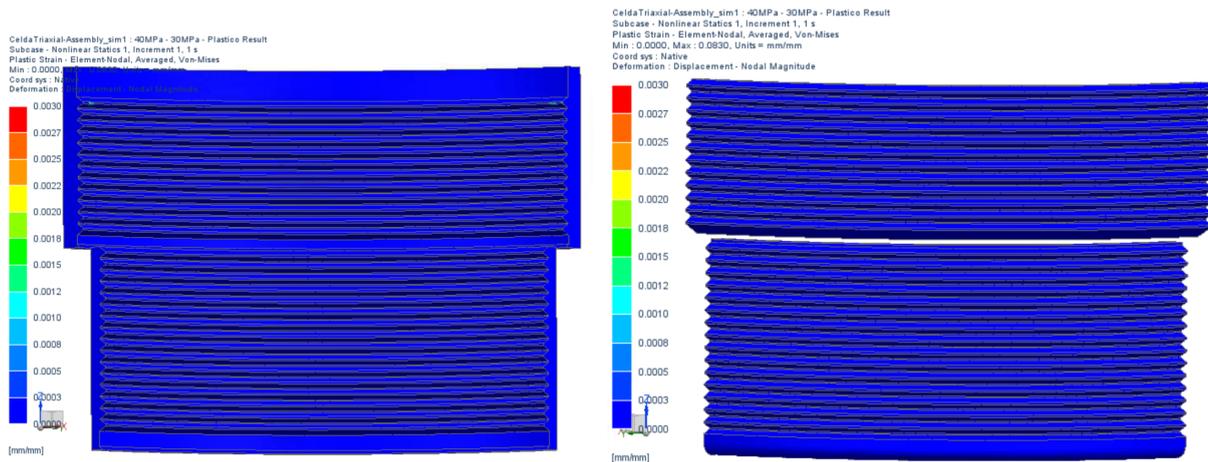


Figura 5.4-3. Deformación plástica para las roscas internas (izq.) y roscas externas (der.).

Nuevamente, los resultados indican cierto nivel de deformación plástica localizada, alcanzando un máximo de 3 $\mu\text{m}/\text{mm}$ de manera muy localizada. La rosca de la Tapa Superior Externa se mantiene completamente elástica mientras que la rosca de la Tapa Superior Interna (sometida a tensiones mucho mayores a las que ocurren en un ensayo real ya que la probeta falla antes) presenta una deformación plástica promedio en el primer filete de 1 $\mu\text{m}/\text{mm}$, llegando al máximo en un único nodo.

6. Instrumentación

En esta sección se abordan los temas relativos a la instrumentación del proyecto, detallando los sensores y actuadores a utilizar, su principio de funcionamiento, acondicionamiento de señal, y consideraciones particulares. Se detalla también la conexión física con el sistema y la integración de todos los componentes. Las curvas de calibración de estos componentes se encuentran en la [Sección 9: Caracterización de instrumentos y parámetros](#).

Sobre los sensores, aquellos que se encuentran dentro de la cámara de confinamiento, en contacto directo con aceite y la muestra se denominan Conjunto Interior. Su finalidad es obtener los datos de deformación pertinentes para el ensayo como así también las propiedades elásticas dinámicas en base a la medición ultrasónica. Este conjunto se conforma con un par de sensores ultrasónicos, dos *strain gages* diametrales que operan en flexión y dos sensores de desplazamiento lineal de la familia de los transformadores diferenciales variables lineales (LVDTs por sus siglas en inglés). Los sensores del Conjunto Interior y los respectivos módulos de acondicionamiento de señales se adquirieron del fabricante GCTS y se muestran en la **Figura 6-1**. La empresa YTec en su laboratorio de física de rocas, utiliza los mismos sensores, se pudo coordinar una visita de consulta y a lo largo del proyecto se los toma como referencia.

Externos a la cámara de confinamiento, se utilizan sensores para monitorear la posición del pistón de esfuerzo diferencial y las presiones de las cámaras de pistón y confinamiento. Para la primera variable se utiliza un LVDT del fabricante OMEGA detallado en la **Figura 6-2**. Para sensar las presiones, se utilizan dos transductores del fabricante REXROTH, y dos manómetros analógicos con la misma finalidad y del mismo fabricante.

En cuanto a los actuadores, la central hidráulica está instrumentada con dos electroválvulas limitadoras proporcionales del fabricante REXROTH, estas se utilizan para controlar la presión de las dos cámaras.

Un esquema de los límites operativos de los elementos de control de la central hidráulica se muestra en la **Figura 6-3**, donde se discriminan los sensores y válvulas en función de la cámara correspondiente.

La información adquirida por dichos sensores es gestionada en un controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés) para en base a ellos, actuar sobre las válvulas. Se aborda en detalle la operación del PLC y sus particularidades en la [Sección 7: Control](#).

Tanto las entradas como las salidas de los instrumentos mencionados anteriormente son analógicas. Las señales de los sensores de deformación del Conjunto Interior son procesadas por una unidad de acondicionamiento de señal (SCU por sus siglas en inglés), provista por el fabricante GCTS, antes de ingresar al PLC de control. El LVDT externo cuenta con un sistema de acondicionamiento de señal integrado en el cuerpo del sensor, su salida estandarizada se conecta sin módulos adicionales al PLC. Lo mismo ocurre con los sensores de presión. Las señales de los sensores ultrasónicos son adquiridas por el módulo ULT-200^[12] y procesadas por fuera del lazo de control del PLC, en una computadora auxiliar. Las electroválvulas proporcionales se controlan con señales analógicas de tensión.

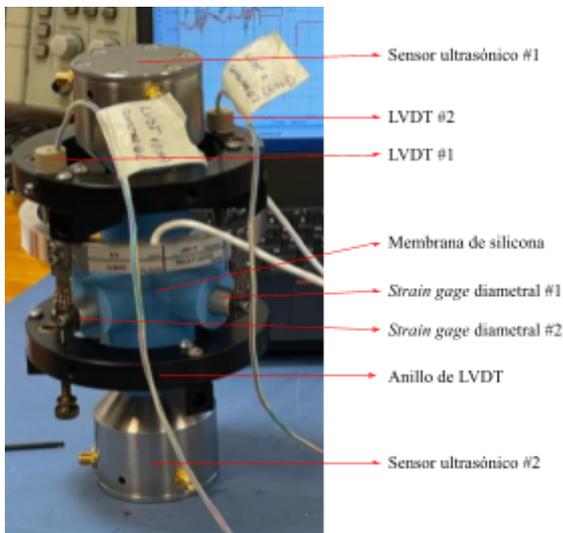


Figura 6-1. Conjunto de medición interior.



Figura 6-2. LVDT externo.



Figura 6-3. Sensores y electroválvulas de presión.

6.1 Sensores ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos constan de dos cabezales en los cuales se ubican tres pares emisor-receptor de ondas, generadas y recibidas por placas piezoeléctricas. Las ondas a enviar y recibir se denominan P, S1 y S2, como se explyaya en la [Sección 3: Marco Teórico](#). Cada cabezal contiene tres terminales SMA-no inverso-hembra, dos puntos de alineación angular y alojamientos para O-rings provistos por el fabricante para sellar la muestra. La **Figura 6.1-1** detalla las características constructivas de los cabezales. El cabezal inferior es aquel que posee un orificio en su base, un control rápido de la posición de los cabezales es comprobar la correcta orientación de las letras que indican la señal que se conecta en cada terminal.

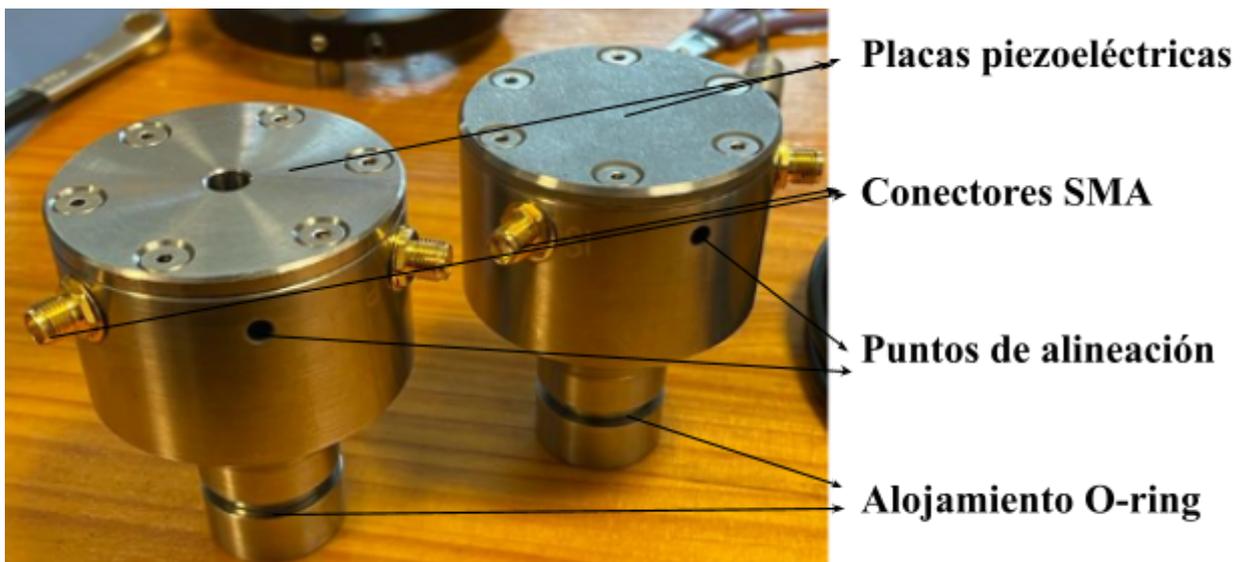


Figura 6.1-1. Sensores ultrasónicos.



Figura 6.1-2. Módulo ULT-200. Adquisidor y acondicionador de ondas.

Las señales son generadas y recibidas por el módulo ULT-200, de la **Figura 6.1-2**. Este módulo cuenta con seis terminales SMA-no inverso-hembra, de donde se diferencian las señales de emisores, denotadas como TXn y las de receptores como RXn. Si bien es indistinto para el funcionamiento del conjunto qué cabezal de los sensores es la emisora de la señal, se opta por normalizar las conexiones definiendo que las señales de emisor se conectan a la unidad inferior y las de receptor a la superior.

Los cables de salida y entrada del módulo ULT-200 son cables coaxiales provistos por el fabricante, con terminales SMA-no inverso-machos en sus dos extremos. Finalmente, el ULT-200 se comunica mediante un cable RJ-45 a una computadora con el programa licenciado CATS ULTRASONIC, en el cual se interpretan los tiempos de arribo de cada señal, según indica la **Figura 6.1-3**. El procedimiento de adquisición de propiedades mecánicas, de forma simplificada, es:

1. Colocar los sensores. Asegurar la orientación angular con los orificios de guía.
2. Abrir CATS ULTRASONIC.
 - a. Verificar en la esquina inferior izquierda que el archivo de configuración (.cfg) se encuentre cargado.
3. Verificar la conexión con el ULT-200.
 - a. En caso de no reconocer, asegurar que el ULT-200 se encuentre en modo *DHCP-Server*: Esto se puede modificar manteniendo presionado el botón (agujero pequeño al lado del visor) hasta que se indique el modo. A fecha de junio de 2023, se lo deja configurado.
4. Abrir la interfaz de trabajo de ultrasonido. **Figura 6.1-3 (a)**.
5. Cargar parámetros de la muestra en la sección de datos de muestra. **Figura 6.1-3 (b)**.
6. Adquirir secuencialmente las ondas P, S1, S2. **Figura 6.1-3 (b)**.
7. Obtener manualmente el tiempo de arribo, cliqueando sobre el gráfico cada onda. **Figura 6.1-3 (c)**.
8. Registrar los datos de velocidad y propiedades mecánicas dinámicas.

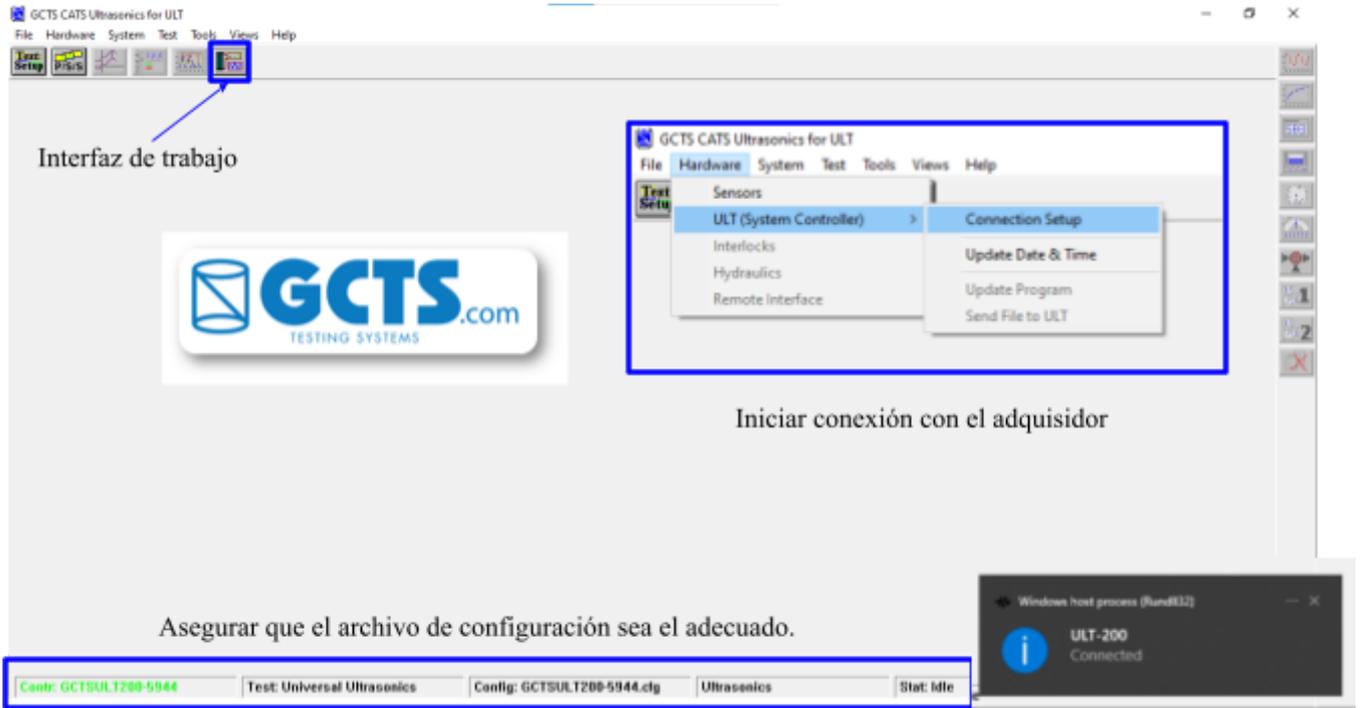


Figura 6.1-3a. Configuración inicial.

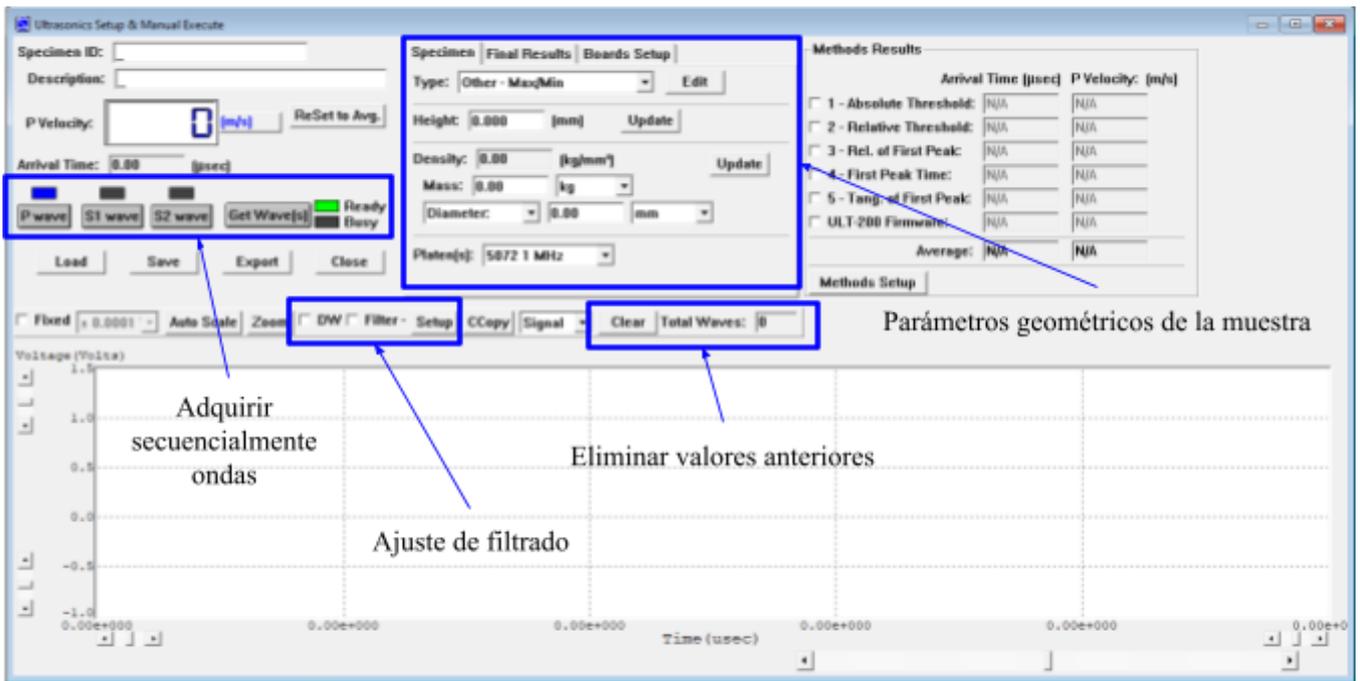
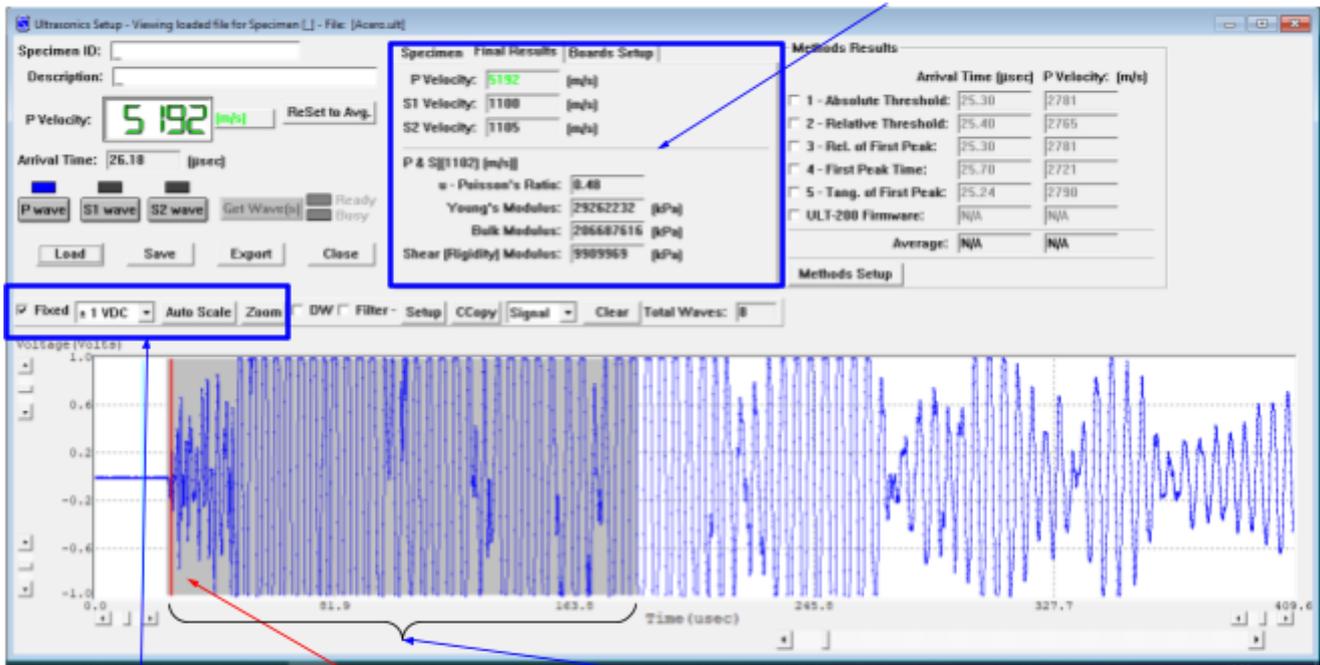


Figura 6.1-3b. Interfaz de trabajo ultrasónico.

Resultados finales



Ajustes de escala

Tiempo de arribo interpretado
 (Hacer click sobre el pico)

Intervalo nominal según
 dimensiones y material de muestra

Figura 6.1-3c. Operación del módulo ultrasónico.

En caso de requerir más información, remitirse a la documentación adjunta al proyecto. En esta se encuentra el contenido entregado por GCTS con manuales de uso y archivos de configuración.

En cuanto a las conexiones del sistema ultrasónico, desde los sensores dentro de la celda hacia los *feedthroughs*, se dan mediante acoples provistos por el fabricante. Estos poseen dos cables coaxiales con terminales SMA-no inverso-macho en un extremo, y en el opuesto, un conector Amphenol-PT-108 hembra. Éste último conector se une, dentro de la celda, con su contraparte macho, soldada a cuatro cables de cobre esmaltados que atraviesan la pared de la celda por medio del *feedthrough*. Desde el exterior, se recupera cada señal individualmente en un conector SMA-no inverso-hembra, que se conecta con el cable pertinente de salida del ULT-200. Las Figuras 6.1-4 a 6.1-6 muestran un esquema de las conexiones, en el interior y en el exterior de la celda.



Figura 6.1-4. Conexiones externas.

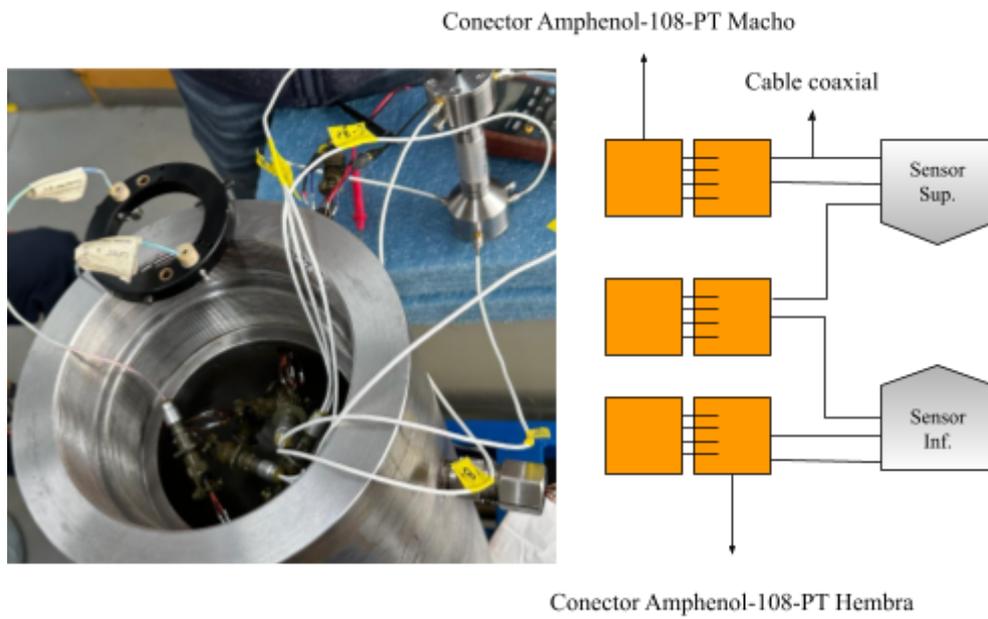


Figura 6.1-5. Conexiones internas y esquemático.

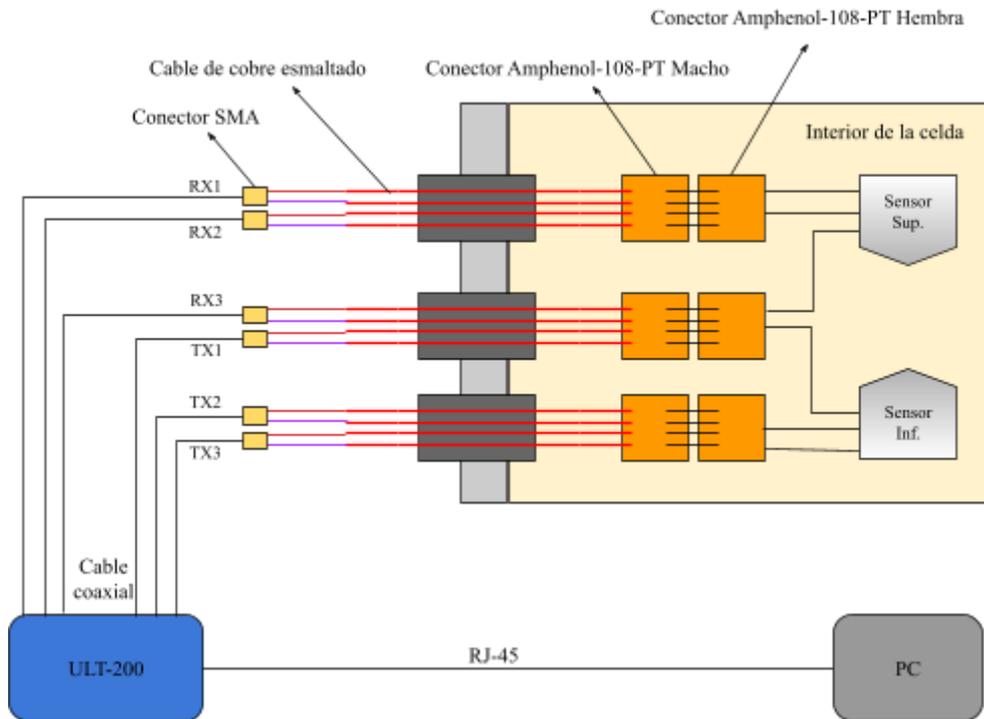


Figura 6.1-6. Esquema de conexiones de circuito de sensores ultrasónicos.

Los sensores ultrasónicos poseen un canal para la conexión de presión poral, que no es utilizado en este proyecto. Por este motivo, se sella con el bulón de cierre propuesto por el fabricante. A su vez, el sensor inferior tiene un orificio adicional sobre la placa piezoeléctrica, conectado con un orificio lateral. Este agujero es usado para colocar el sensor sobre una base instrumentada de GCTS, compatible con los conjuntos de celdas que ellos mismos venden. No se requiere sellar ninguno de los orificios, en concordancia con lo consultado con YTec. Estos canales se encuentran en la **Figuras 6.1-7**. No se deben confundir los canales de presión poral con los orificios de alineación angular.

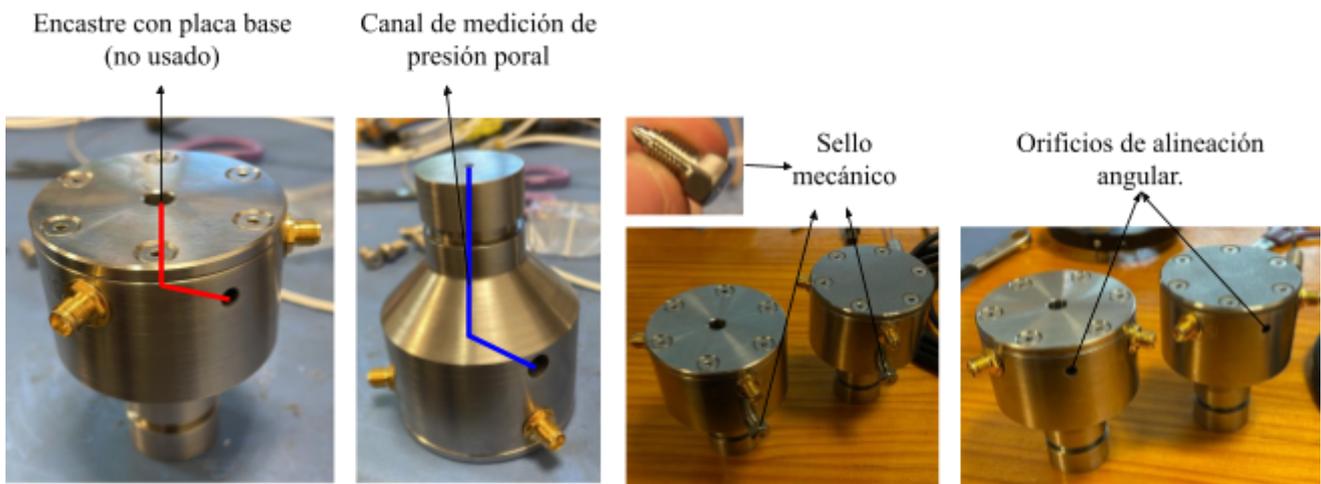


Figura 6.1-7. Canales de presión poral y orificios de alineación.

En cuanto a la resistencia de los sensores a las altas presiones, a falta de información del proveedor se utiliza la experiencia de YTec, quienes realizan las pruebas de ultrasonido a 10.000 – 15.000 psi (69 MPa – 103 MPa) en la probeta (equivalente a presiones de pistón de 20 a 30 bar). Para realizar ensayos a mayor presión, se utilizan los Sujetadores de Probeta en lugar de los sensores.

6.2 *Strain gages* diametrales

Los *strain gages* son instrumentos piezoresistivos utilizados como transductores de deformación. El funcionamiento se basa en el cambio de resistencia del instrumento (**Figura 6.2-1**) en base a la deformación aplicada.



Figura 6.2-1. Esquema constructivo de un strain gage.

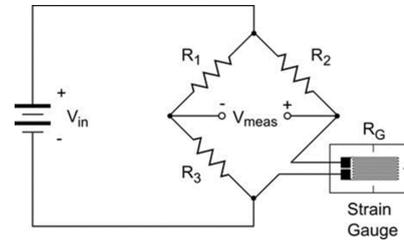


Figura 6.2-2. Circuito de medición.

En caso de tracción, la resistencia aumenta, en caso de compresión, disminuye. Se identifican por el valor de resistencia libre R_0 (sin deformar) y su *Gage Factor* (GF) que relaciona la variación de la resistencia con la deformación, de forma que la resistencia total bajo carga se compute según la siguiente relación:

$$GF = \frac{\Delta R}{R_0 * \epsilon} \rightarrow R_{\text{Bajo carga}} = R_0 + \Delta R = R_0 + GF * R_0 * \epsilon \quad (6.2-1)$$

$$R_{\text{Bajo carga}} = R_0 * (1 + GF * \epsilon) \quad (6.2-2)$$

El valor de GF ronda los 2.5 y los valores de R_0 se encuentran entre 100Ω, 250Ω, 500Ω, según fabricantes y modelos disponibles. Dado que las deformaciones esperadas son del orden de los *microstrains* ($\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \approx 10^{-6} \frac{m}{m}$) la variación de resistencia bajo carga ΔR es del orden de los $m\Omega$. Para ganar resolución, se utiliza un circuito puente de wheatstone de salida en tensión diferencial como muestra la **Figura 6.2-2**.

En el caso particular del proyecto, se quiere medir con los *strain gages* la deformación diametral de la muestra bajo carga axial. Los sensores modelo E2257-2-C160^[13], logran capturar esta deformación utilizando *strain gages* que trabajan a flexión como el de la **Figura 6.2-3**, que se colocan cerca del extremo empotrado de una lamina de sustrato. La lámina se empotra a un anillo soporte, y en su otro extremo, se abulona a un tope de aluminio que hace contacto con la probeta. Un esquema de este conjunto se encuentra en la **Figura 6.2-4** y los sensores usados, en la **Figura 6.2-5**, junto con la membrana de silicona adecuada para los mismos y los sensores ultrasónicos. Se utilizan dos sensores, ambos montados en un anillo compatible con el conjunto de medición interior. Cabe destacar que cada sensor consta de dos brazos y la salida en tensión de los mismos es proporcional a la distancia entre los extremos de cada brazo.

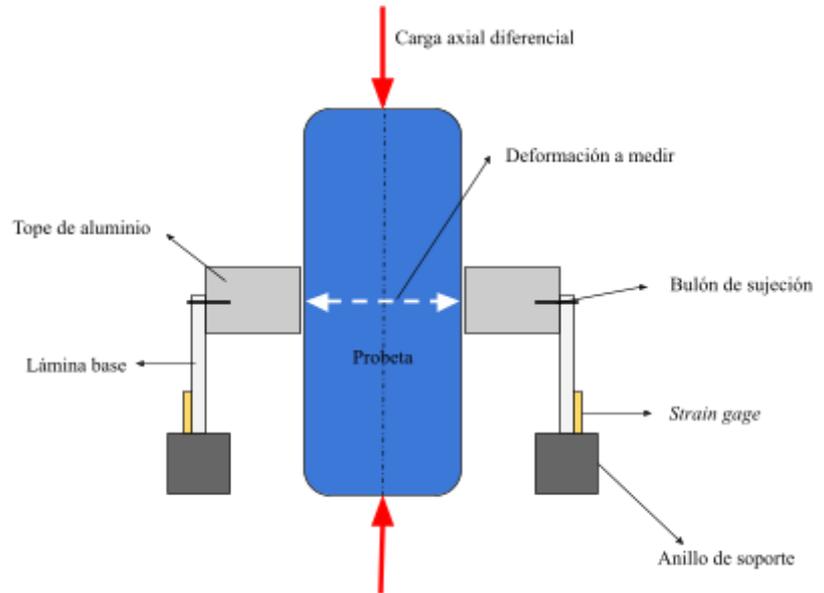
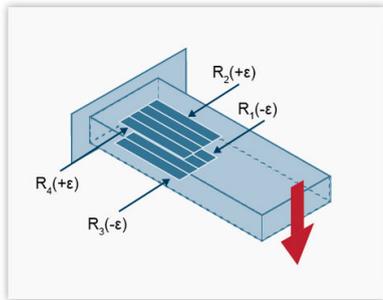


Figura 6.2-3. *Strain gage* trabajando a flexión.

Figura 6.2-4. Esquema de *strain gages* diametrales en uso.

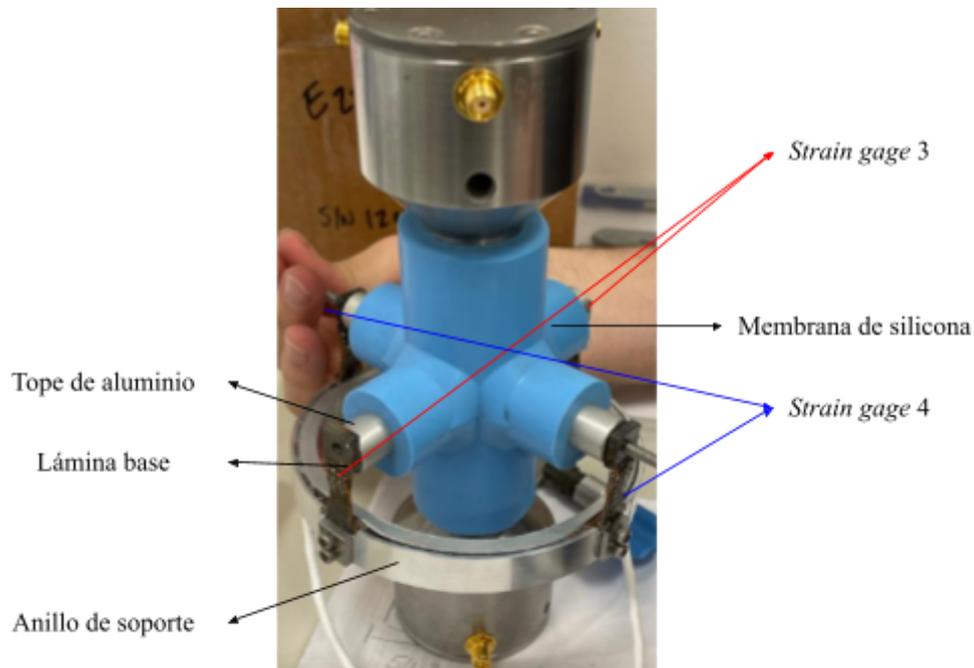


Figura 6.2-5. Sensores utilizados.

Del anillo de soporte salen dos cables, cada uno conteniendo las conexiones necesarias para el funcionamiento de cada sensor: V_{in+} , V_{in-} , V_{sig+} , V_{sig-} , con terminaciones en conectores Amphenol-PT-108. Finalmente, el filtrado, acondicionamiento de la señal y amplificación de la misma se dan a través del SCU, entregando una señal de salida de aproximadamente ± 14 V. El fabricante no provee curvas características para estos sensores, aunque sí provee patrones de calibración. No obstante, se encuentran discrepancias entre supuestos valores que se miden con estos patrones y los valores reales de medición. Por lo tanto, se decide realizar curvas de calibración propias para caracterizar estos sensores. Las conexiones del circuito de *strain gages* se muestran en la **Figura 6.2-6**. El valor resultante de deformación diametral se toma como el promedio de ambas mediciones, los ensayos de caracterización pertinentes a los sensores como así también la curva de calibración de los mismos se detallan más adelante en la [Sección 9.1.5: Sensores de desplazamiento lateral SG](#).

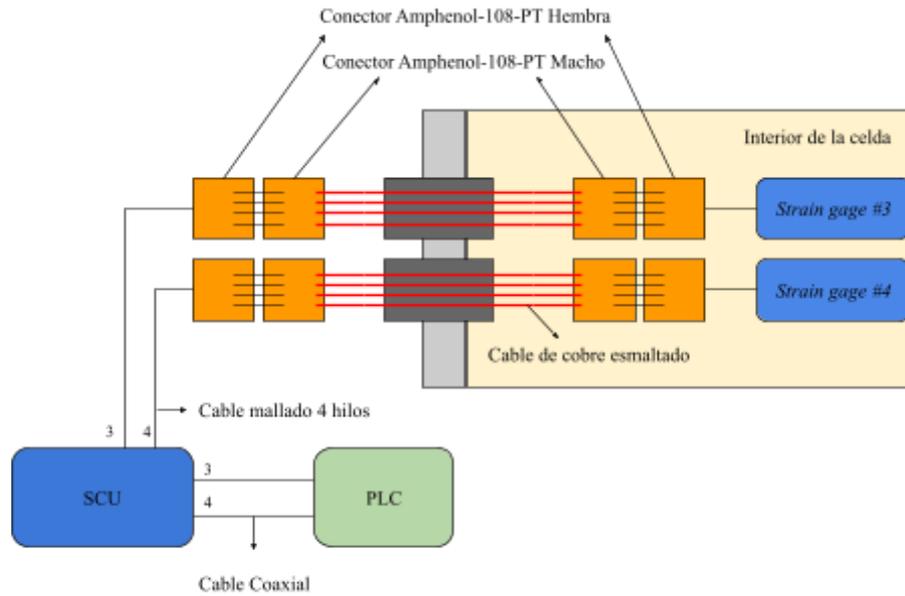


Figura 6.2-6. Diagrama de conexiones de los *strain gages*.

Es importante notar que los sensores en vacío tienen valores de *offset* diferentes. El sensor rotulado #3, sin ningún elemento entre sus puntas entrega una salida de $\sim 1,4$ V mientras que el #4, entrega $\sim 0,12$ V. Cabe destacar la alta sensibilidad al ajuste manual de los bulones de sujeción de los topos de aluminio, se aconseja ajustar manualmente hasta sentir un ajuste sólido, sin sobrecargar. Se aclara también que la convención de signos de los sensores es opuesta, es decir, para el *strain gage* #3, aumentar la distancia entre topos produce un valor positivo de tensión mientras que para el *strain gage* #4, un valor negativo.

6.3 LVDTs internos

Para medir la deformación axial, se utilizan dentro del Conjunto Interior dos LVDTs NewTek NT-M-375-100. Un LVDT es un sensor utilizado para medir desplazamientos lineales. Consiste en un núcleo de metal y tres bobinas: una primaria y dos secundarias. Al aplicar una corriente alterna a la bobina primaria, se genera un campo magnético que atraviesa las bobinas secundarias. Cuando el núcleo se desplaza, cambia la intensidad de flujo magnético y se produce una diferencia de tensión en las bobinas secundarias, proporcional al desplazamiento del núcleo. Un esquema simplificado del funcionamiento y la construcción se encuentra en la **Figura 6.3-1** a continuación, donde V_E es la señal de excitación y V_S la tensión de salida, proporcional a la posición.

Estos sensores, al igual que los *strain gages*, presentan una salida a conector Amphenol-PT-108, donde los bornes A y D son para la señal de alimentación del circuito primario, positivo y negativo respectivamente, mientras que los B y C para el secundario.

Los ensayos de caracterización de estos sensores y sus curvas de calibración, se encuentran en la [Sección 9.1.6: Sensores de desplazamiento LVDTs Internos](#).

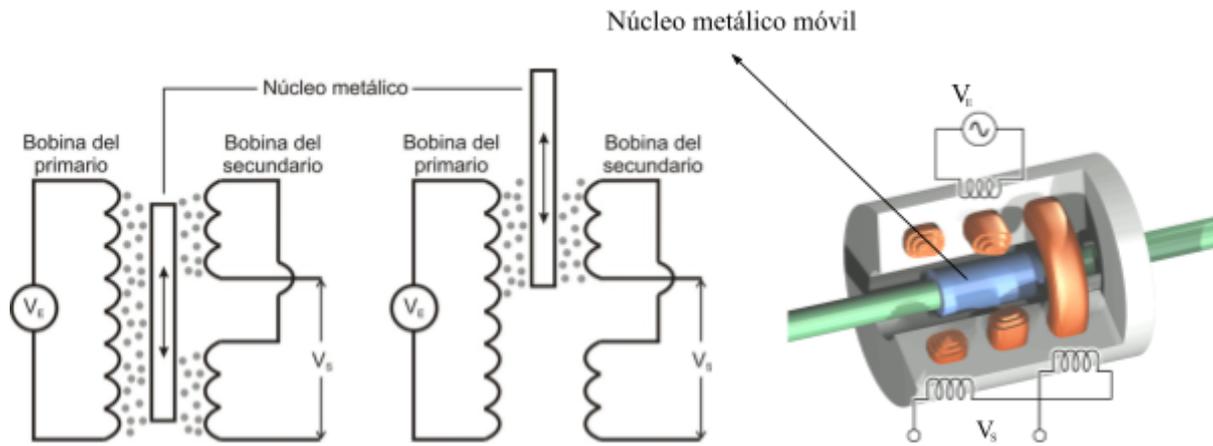


Figura 6.3-1. Esquema constructivo de un LVDT.^[10]

En cuanto a la instalación física de los sensores en el conjunto de medición interior, se muestra en el esquema de la **Figura 6.3-2**, su interacción con la probeta. La **Figura 6.3-3** muestra en cambio, el montaje realizado y la compatibilidad con los sensores abordados en las secciones previas.

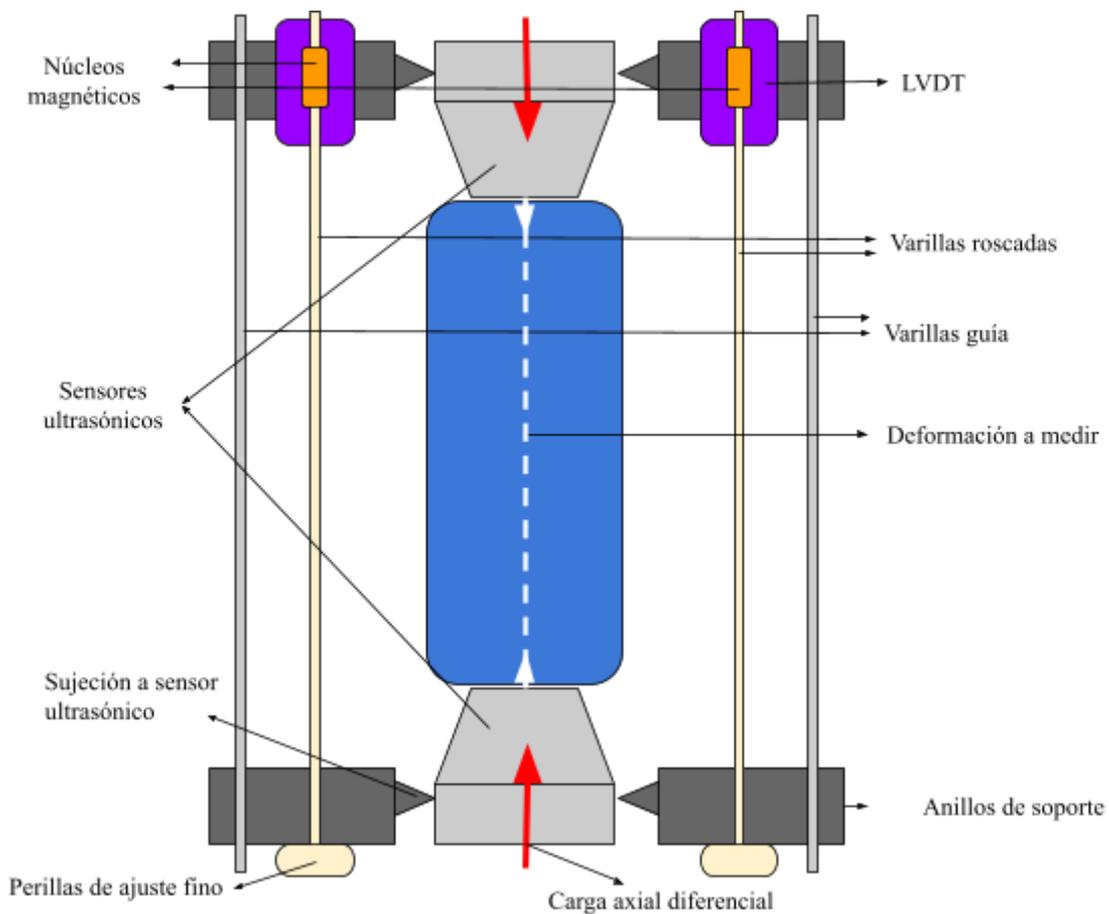


Figura 6.3-2. Esquema de instalación de LVDTs interiores.

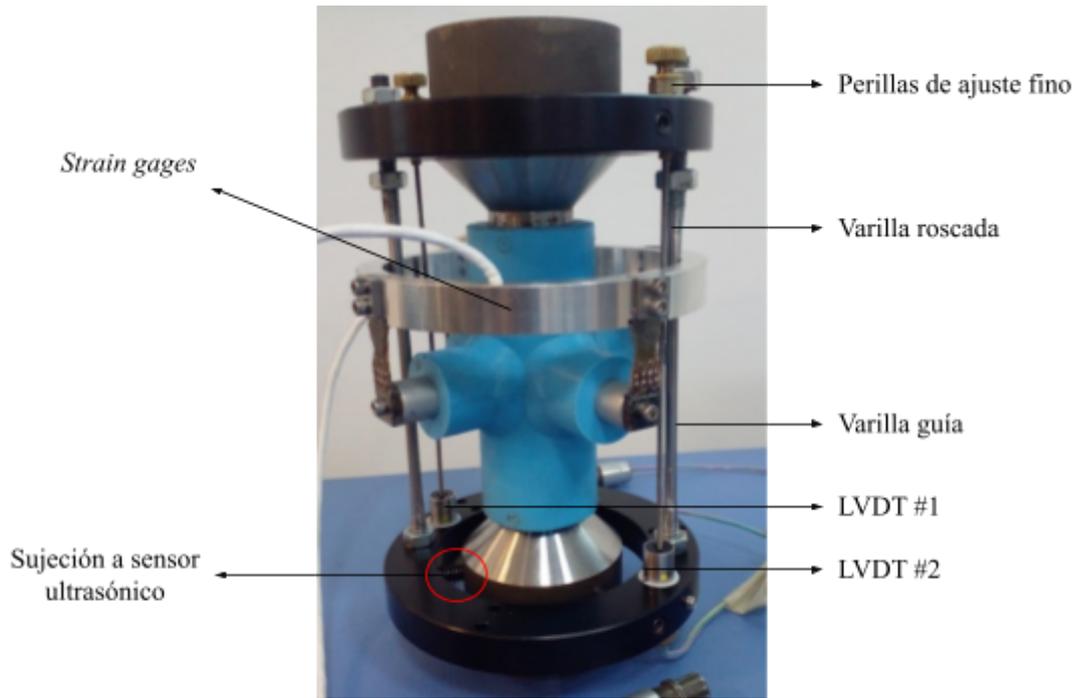


Figura 6.3-3. Montaje de los LVDTs dentro del conjunto.

El sistema de conexiones es análogo al de los *strain gages* y se muestra su esquema en la **Figura 6.3-4** a continuación.

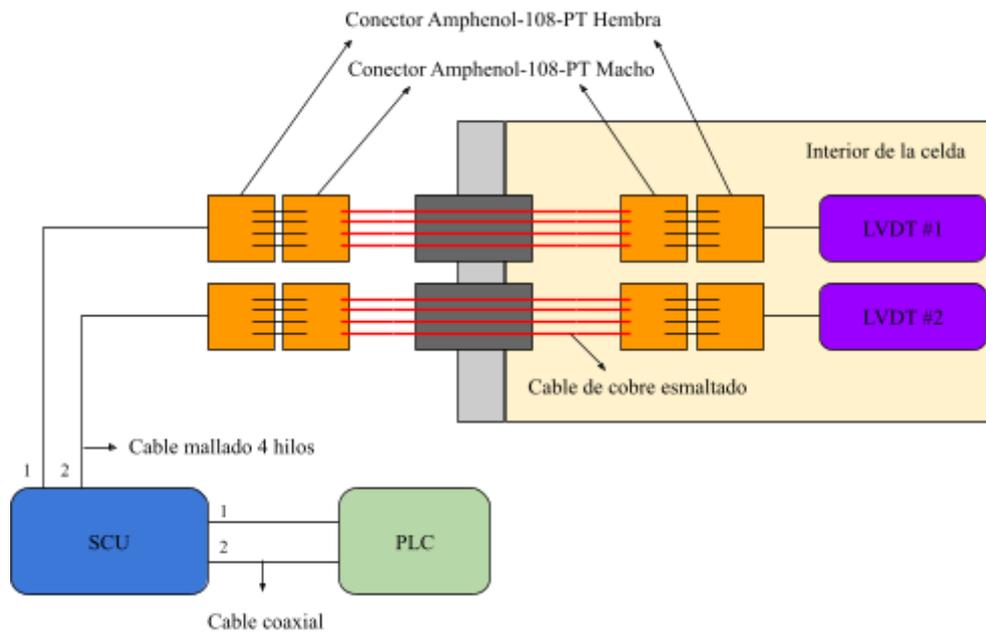


Figura 6.3-4. Diagrama de conexiones de los LVDTs internos.

La señal de salida del sensor es también una señal analógica de amplitud variable, en el caso de los sensores usados en el proyecto, estos se conectan al SCU, que interpreta y acondiciona la señal a un valor de corriente continua de ± 14 V.

A fecha de junio del 2023, estos sensores son los que presentan mayores problemas, al igual que en el laboratorio de YTec. Los principales problemas registrados son:

- Cables cortados en la cercanía del conector.
- El LVDT #1 presentó un defecto de registrar solo la mitad del rango, se presume que las bobinas del secundario por algún movimiento súbito quedaron en cortocircuito. Agitando el LVDT (con su debido cuidado) se desconecta el corto y el sensor vuelve a su funcionamiento normal. Se deja asentado el evento en caso de reincidencia.

6.4 LVDT externo

Para registrar la posición del pistón de esfuerzo axial, se utiliza un LVDT LDI-619-015-A020S, alojado en el cuerpo de sellos dentro de la celda y en contacto con el pistón como muestra la **Figura 6.4-1**. Cabe destacar que la salida máxima hace referencia a que el pistón se encuentra en el fondo de la celda (punto muerto inferior) y la mínima, que el pistón hizo contacto con el cuerpo sellos (punto muerto superior). A diferencia de los sensores del conjunto interior, este LVDT posee incluido en su cuerpo un circuito de acondicionamiento de señal y entrega, sin necesidad de utilizar módulos adicionales, salida en tensión continua de ± 10 V o bien de 4 a 20 mA, salida estandarizada para conexiones con circuitos controlados por PLC.

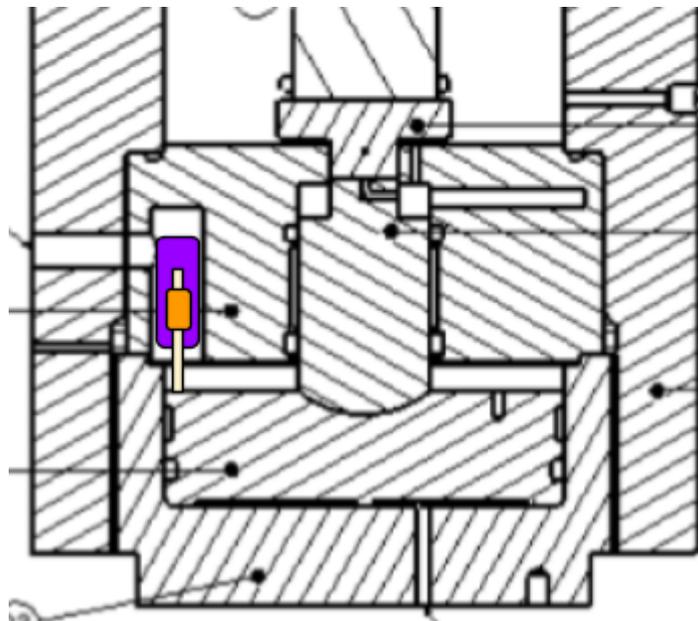


Figura 6.4-1. Ubicación del LVDT externo.

En cuanto a las conexiones de este sensor, se conectan directamente los cables de alimentación de 24 V y señal analógica al tablero del PLC, dejando sin conectar el cable de configuración de rango dinámico (cable blanco).

Los ensayos de caracterización del LVDT externo y sus curvas de calibración, se encuentran en la [Sección 9.1.4: Sensor de desplazamiento LVDT Externo](#).

A fecha de junio de 2023, este sensor responde con señales erráticas y carentes de sentido físico. Es imposible su mantenimiento hasta resolver el enclavamiento de la tapa inferior de la celda como se mencionó en la [Sección 5.5.2: Rosca Inferior](#).

6.4 Sensores de presión

Con el objetivo de controlar la presión en las cámaras de pistón y confinamiento se utilizan los sensores HM20-20/400-H-K35 y HM20-20/630H-K35^[14], respectivamente, reutilizados de las

iteraciones anteriores del proyecto. Su curva característica se detalla en la [Sección 9.1.2: Sensores de presión](#). Estos sensores se conectan a las cañerías de la central hidráulica en las tomas designadas en la **Figura 6.4-1** y su conexión, tanto de alimentación como de señales, es directa al tablero de control, al igual que el LVDT exterior. El sensor de la cámara de pistón mide hasta 400 bar mientras que el de confinamiento, hasta 630 bar de presión máxima.

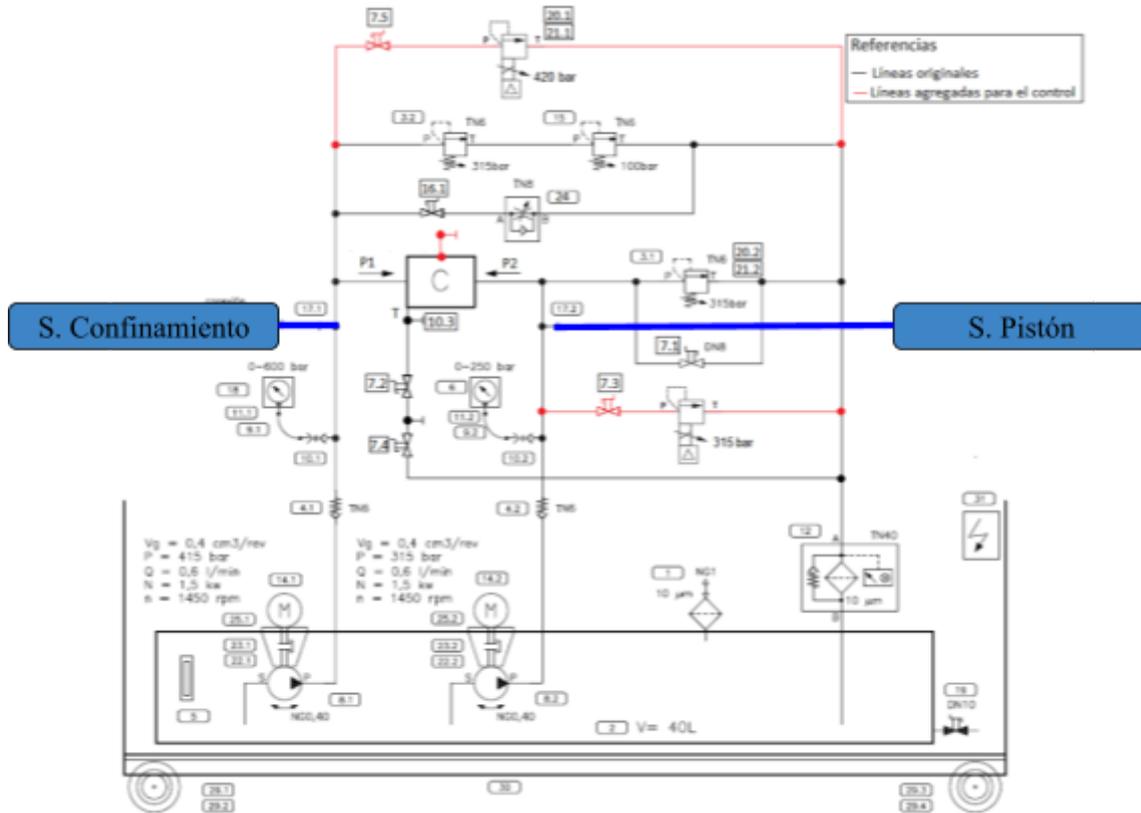


Figura 6.4-1. Ubicación de los sensores de presión.

Estos sensores se utilizan para poder realizar un control automático. Independientemente de ellos, la central hidráulica cuenta con dos manómetros que registran la presión de las cámaras y deben supervisarse con igual importancia en situación de ensayo.

El tablero de control cuenta a su vez con la instalación preparada para agregar un tercer sensor para medir presión poral, que en este proyecto no se integra al sistema.

6.5 Electroválvulas proporcionales

La central hidráulica posee dos bombas de pistones radiales de uso continuo. La presión se regula modificando las electroválvulas REXROTH DBETE-6X/315 y DBETE-6X/420^[15] para las líneas de pistón y confinamiento, que permiten regular a 315 bar y 420 bar máximos respectivamente. Estas válvulas son del tipo proporcionales y su respuesta se encuentra en la [Sección 9.1.1: Electroválvulas](#). El funcionamiento consiste en aumentar la presión de limitación proporcionalmente al recibir una mayor tensión en la señal del actuador, es decir, a mayor tensión, mayor presión. En caso de perder alimentación, falla o desconexión, limitan la presión a presión atmosférica, fallando en modo seguro.

6.6 Integración

En cuanto a la integración general de todos los componentes mencionados anteriormente, se hace a través de un PLC TM241CE24T/U^[16]. Un esquema simplificado (se omiten cables de alimentación, pulsadores y HMI de control), muestra las conexiones de los sensores y actuadores en conjunto en la **Figura 6.6-1**. La celda cuenta con cuatro *feedthroughs*, de ocho cables cada uno, se opta por canalizar por *feedthroughs* separados las señales de los distintos sensores del Conjunto Interior y sensores ultrasónicos para evitar posibles fenómenos de interferencia y ruido electromagnético entre los sensores de deformación y los ultrasónicos dado que no son utilizados en simultáneo. En otras palabras, en caso de no realizar un ensayo ultrasónico, solo se envía una señal los sensores de deformación por cada *feedthrough*; en caso contrario, solo se envían las señales ultrasónicas, minimizando la posibilidad de ruido.

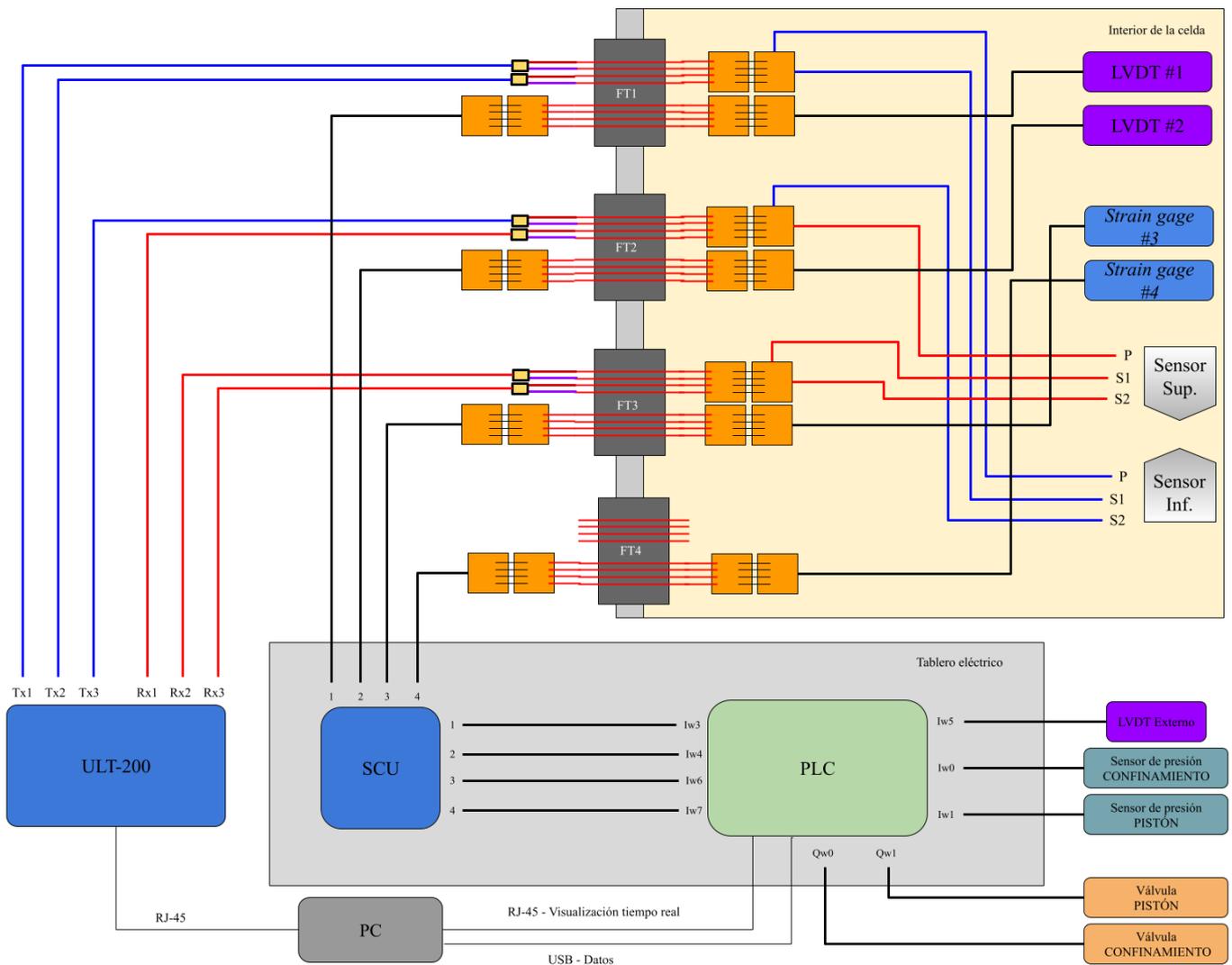


Figura 6.6-1. Conexiones de los sensores y actuadores.

Como se observa en la **Figura 6.6-1**, no deben enviarse las señales de emisor y receptor de un mismo canal ultrasónico a través de un mismo *feedthrough*, de hacerlo, los resultados no son consistentes y presentan más ruido que el aceptable.

En cuanto a las conexiones dentro y fuera de la celda, se construyeron especialmente conectores

para cada caso particular. Dentro de la celda, todas las conexiones que se dan en contacto con aceite son realizadas con pares de conectores Amphenol-PT-108 Machos - Hembras^[17]. Los sensores cuentan con los terminales hembra, los machos se construyen con salida a cable de cobre esmaltado, para soldarse dentro de la celda con los cables de los *feedthroughs* como muestra la **Figura 6.6-2**.

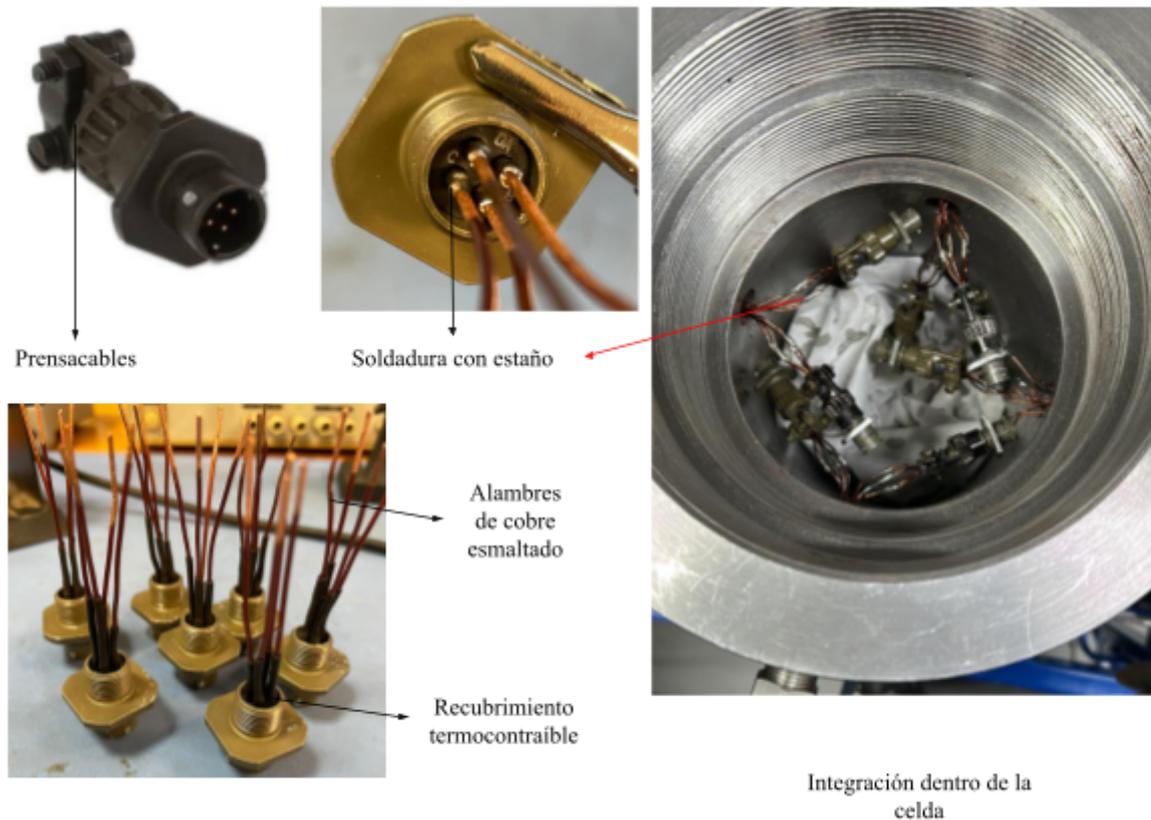


Figura 6.6-2: Conexiones macho dentro de la celda.

Desde el exterior de la celda, para conectar las señales de los sensores de desplazamiento con el SCU, el cual tiene una terminal Amphenol-PT-108 macho para cada sensor, se soldaron de forma análoga los conectores hembra. Para las señales ultrasónicas, en cambio, se construyeron 6 conectores SMA-no inverso-hembra y se soldaron a los cables de los *feedthroughs*. Estas conexiones se muestran en la **Figura 6.6-3**, y en la **Figura 6.6-4** se presenta un dispositivo de cobertura y protección de las mismas, impreso en 3D.

A su vez, se aísla eléctricamente cada unión soldada con barniz apto para bobinado de motores y transformadores; sobre esa capa de barniz, se recubre individualmente cada cable con una manga de fibra de vidrio (conocida también como *Espagueti*). Sobre cada uno de ellos, se aplica una capa de silicona y por sobre conjuntos de cuatro cables se agrega una manga de mayor diámetro y cinta aisladora, como se ve en la **Figura 6.6-5**. Esto se hace con la finalidad de no sólo aislar los cables sino también rigidizarlos con el fin de evitar cortes, indentaciones o rayaduras sobre los mismos. Se evalúa también la posibilidad de recubrir cada cable con una capa de cinta de aluminio o malla metálica para mitigar la interferencia electromagnética de las señales ultrasónicas (señales de 1 MHz). Luego de ensayos de los sensores a través de la celda con y sin aceite en las conexiones, se determina que no es necesaria dicha protección. Estos mecanismos de aislamiento se aplican tanto para las conexiones interiores como exteriores.

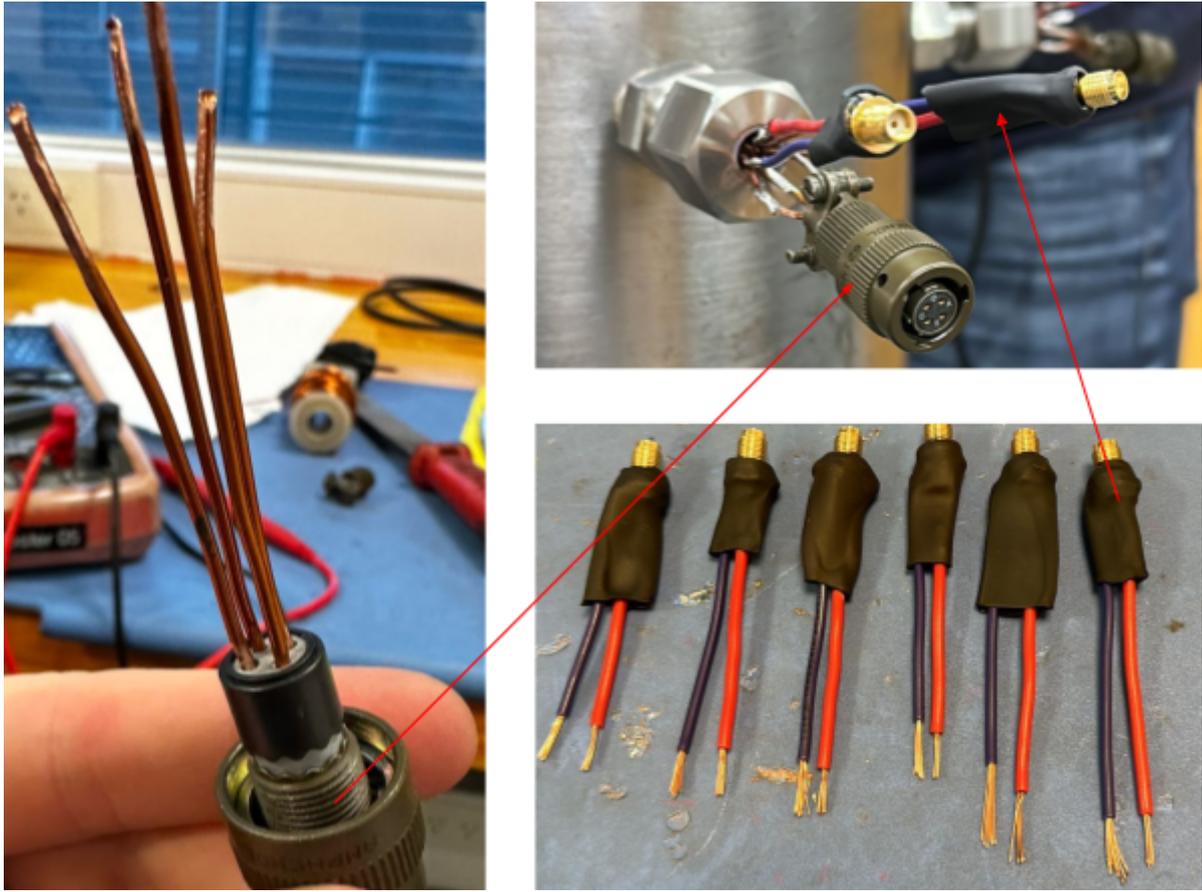


Figura 6.6-3: Conexiones hembra fuera de la celda.



Figura 6.6-4: Cobertura de las conexiones exteriores.



Figura 6.6-5: Aislación de las conexiones.

Se recomienda con énfasis manipular los conectores lo menos posible y de ser inevitable, hacerlo con especial cuidado al momento de doblarlos en ángulo. Durante el proceso de ajuste y sello de los *feedthroughs* es necesario doblar con un bajo radio los cables lo que deja esas zonas con una sensibilidad elevada y posibilidad de ruptura. Así también se recomienda sujetar los cables por sobre los conectores de forma que el propio peso no quede traccionando sobre la soldadura de estaño.

Sobre el Conjunto Interior y su integración con la celda se debe considerar el poco volumen disponible para maniobrar dentro de la celda como muestra la **Figura 6.6-6a**, en la cual cabe destacar que no se incluyen los conectores soldados. De conectar todos los sensores, el espacio se reduce aún más, como indica la **Figura 6.6-6b**.

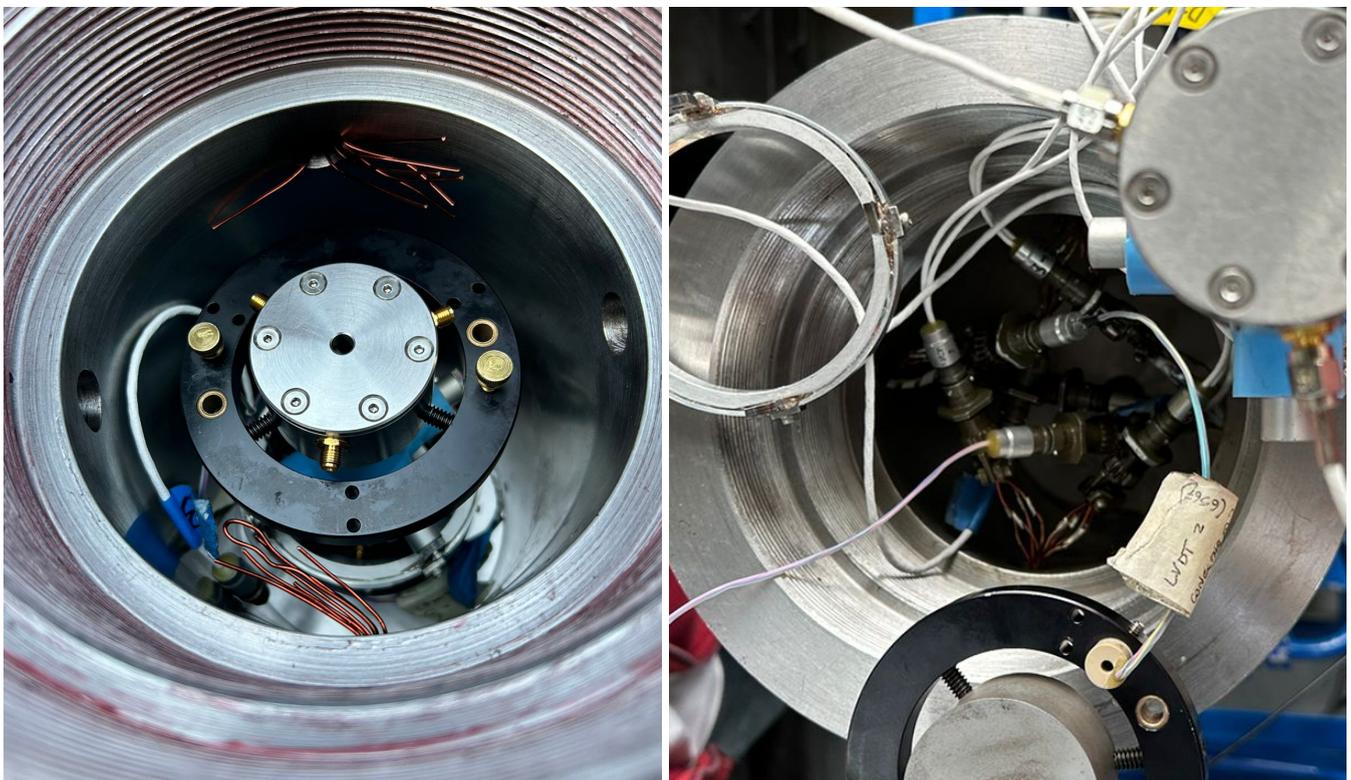


Figura 6.6-6. Montaje en la celda. (a, izq.) Sin conectores (b, der.) Con conectores.

Para garantizar una correcta alineación de los LVDTs, con el fin de asegurar una correcta medición de la deformación axial, se construyen tres alineadores de LVDTs. Estos alineadores se obtienen por medio de corte por hilo de una chapa metálica con ranuras para ubicar el anillo de sujeción. Al colocar las tres piezas complementarias, se generan dos planos paralelos definidos por tres puntos de apoyo cada uno lo que permite alinear con mayor precisión como se muestra en la **Figura 6.6-7**. Dado que los anillos de sujeción se pueden montar tanto sobre los sensores ultrasónicos o señuelos o bien, sobre la membrana de silicona, los alineadores cuentan con tres puntos de agarre a distintas alturas.



Figura 6.6-7. Alineadores de LVDTs en posición.



Figura 6.6-8. Manija superior.

Adicionalmente, para facilitar la ubicación del conjunto de medición interior, se agrega una manija en la parte superior, como indica la **Figura 6.6-8**, que se sujeta sobre las varillas roscadas con tuercas (no colocadas en la **Figura 6.6-8**). Esto permite manipular todo el conjunto con solo una mano, facilitando el movimiento en el reducido espacio interior de la celda. Una vez ubicado el conjunto, retirar la manija auxiliar y colocar el Catcher previo a cerrar las tapas superiores.

7. Control

7.1 PLC

El control de la Celda Triaxial se realiza con un controlador lógico programable, o PLC de la marca Schneider Electric, modelo TM241CE24T/U. Es el mismo que el de la celda anterior, requiere alimentación de 24 V y cuenta con 14 entradas y 10 salidas digitales. Sumado a esto, se cuenta con dos módulos de ampliación de 7 entradas y 4 salidas analógicas, respectivamente: TM3AI8/G^[18] y TM3AQ4/G^[19], y una pantalla táctil de interfaz hombre-máquina HMIS5T^[20]. Los mismos se pueden ver en la **Figura 7.1-1**.



Figura 7.1-1. PLC Schneider Electric M241 utilizado, con sus módulos de I/O analógicos y su HMI.

Las entradas analógicas del PLC son los sensores utilizados en el ensayo: LVDT externo, LVDTs internos 1 y 2, *strain gages* 3 y 4, transductor de presión de pistón y transductor de presión de confinamiento. Por su parte, las salidas analógicas son las electroválvulas de presión de pistón y presión de confinamiento. Según el tipo y rango de salida de cada sensor, el PLC se configura para admitir entradas de ± 10 V, 0 a 10 V o 4 a 20 mA, como se muestra en la **Tabla 7.1-1**. Las mismas se convierten a valores en bits de ± 10.000 , 0 a 10.000 y 4.000 a 20.000, respectivamente. Se incluye también la resolución con la que cuenta el PLC para leer estas entradas, acorde con el ADC y el DAC de 12 bits que tienen los módulos analógicos, y se repite el mismo análisis para los actuadores (electroválvulas) en la **Tabla 7.1-2**. Los rangos de salida de los sensores se obtienen de sus respectivos catálogos; para los LVDT internos, se ajusta la ganancia y el cero en la SCU de forma de llevarlos lo más cerca posible de ± 10 V. Para los *strain gages*, se usa una ganancia un poco mayor para aprovechar un rango menor en mm y con más definición en los ± 10 V del PLC.

Sensor	Rango de salida	Entrada al PLC	Resolución
LVDT externo	4 a 20 mA	4 a 20 mA	3,91 μ A
	0 a 15 mm	0 a 15 mm	3,66 μ m
LVDTs internos	± 10 V	± 10 V	4,88 mV
	$\pm 2,5$ mm	$\pm 2,5$ mm	1,22 μ m ¹
<i>Strain gages</i>	± 14 V	± 10 V	4,88 mV
	$\pm 2,03$ mm	$\pm 1,45$ mm	0,71 μ m ²
Presión de pistón	0,1 a 10 V	0 a 10 V	2,44 mV
	0 a 400 bar	0 a 400 bar ³	0,10 bar
Presión de confinamiento	0,1 a 10 V	0 a 10 V	2,44 mV
	0 a 630 bar	0 a 630 bar ³	0,16 bar

¹ Para largos alrededor de 50,8mm (2"), esto equivale a una definición de 24 μ e.

² Para diámetros alrededor de 100 mm usando los topos de aluminio (ver [Sección 6.2: Strain gages diametrales](#)), esto equivale a una definición apenas mayor a 7 μ e.

³ El rango 0 - 0,1 V es desaprovechado: se alcanzaría esa tensión con presiones inexistentes de -4,04 bar y -6,36 bar, respectivamente.

Tabla 7.1-1. Rangos de salida de los sensores, rangos de entrada al PLC, y definición, en unidades mecánicas y electrónicas.

Actuador	Rango de entrada	Salida del PLC	Resolución
Electroválvula de pistón	0 a 10 V	0 a 10 V	2,44 mV
	0 a 315 bar	0 a 315 bar	0,08 bar
Electroválvula de confinamiento	0 a 10 V	0 a 10 V	2,44 mV
	0 a 420 bar	0 a 420 bar	0,10 bar

Tabla 7.1-2. Rangos de entrada de los actuadores, rangos de salida del PLC, y definición, en unidades mecánicas y electrónicas.

Las entradas digitales del PLC están asociadas a un pulsador verde normalmente abierto, uno rojo normalmente cerrado, y un pulsador autorretentivo de parada de emergencia (normalmente cerrado), mientras que las salidas digitales están asociadas a una luz testigo verde y otra roja.

El controlador se comunica por un cable de Ethernet con la HMI, que permite ingresar y visualizar datos en una pantalla de 5,7". Asimismo, el PLC permite visualizar valores y gráficos en directo en una página html creada a dicho fin, a la que se puede acceder desde una computadora conectada a la misma red del PLC, ingresando su número de IP (10.0.102.13) en un explorador de internet. Por último, el controlador también permite registrar valores con una tasa de medición máxima de 320 ms: se genera un archivo .log, análogo a un .txt, que puede ser guardado en la memoria no volátil del PLC, o bien en una tarjeta SD.

Para la programación del PLC, Schneider Electric cuenta con el entorno EcoStruxure Machine Expert (versión V2.1 a julio del 2023), el mismo permite la programación en Grafset, Ladder, Instruction List, entre otros. La HMI, por su parte, se programa a través de la aplicación Vijeo Designer (versión V6.3).

7.2 Variables a controlar

Durante la realización del ensayo, se deben controlar ciertas variables: las presiones y la velocidad de avance del pistón o velocidad de deformación de la probeta. Para cada una de ellas y en cada etapa del ensayo, se utilizan distintos lazos de control, donde los sensores realimentan a la salida que el PLC le debe dar a los actuadores.

7.2.1 Presión de confinamiento

La presión de confinamiento se controla a través de la electroválvula de presión de confinamiento, que es realimentada con el sensor de presión de confinamiento. Como estrategia de control, se utiliza una realimentación por control PID (Proporcional, Integral, Derivativo), que se suma a una señal de *Feedforward*, como se ve en la **Figura 7.2-1**.

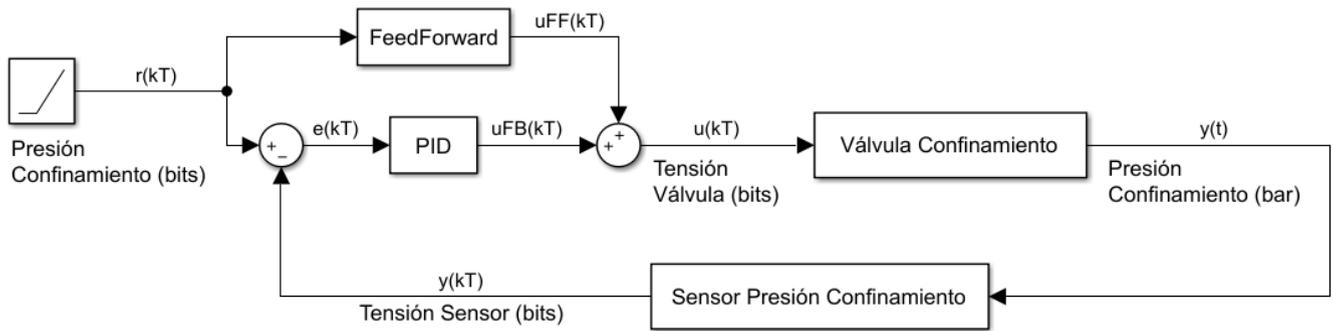


Figura 7.2-1. Lazo de control para la presión de confinamiento.

Para el *Feedforward*, la expresión utilizada es la siguiente:

$$u_{FF} = (P_C - P_{0C}) \cdot m_C + V_{0C}$$

Se requiere pasar de la presión deseada P_C (en bits, según la mide el sensor de presión) a la tensión con la que actuar sobre la electroválvula (en bits, recordando que 0 a 10000 LSB equivalen a 0 a 10 V). Para ello, según se obtiene en los ensayos detallados en *Relación electroválvulas - sensores de presión*, se utiliza la pendiente de la curva válvula (bits) vs sensor (bits):

$$m_C = 1,532453 \frac{LSB}{LSB}$$

Se usan también la presión inicial P_{0C} sensada al comienzo del ensayo para la válvula en 0, y el valor de la zona muerta de la válvula $V_{0C} = 400 \text{ bits}$, o bien 0,4 V. Por prueba y error, se decide cambiar a una zona muerta de $V_{0C} = 175 \text{ bits}$ de válvula.

Con el *Feedback*, se busca corregir el error que queda del *Feedforward*, que únicamente linealiza la relación entre bits de sensor y bits de válvula y puede ser susceptible, por ejemplo, a un error de estado estacionario. Por prueba y error, se elige el uso de las siguientes constantes:

$$K_P = 2 \qquad K_I = 1 \qquad K_D = 0$$

Se trata en definitiva de un control PI. Con este lazo, se puede hacer que la presión de confinamiento siga una rampa de subida, de bajada, o se mantenga constante.

7.2.2 Presión de pistón

El control de la presión de pistón es análogo al de la presión de confinamiento. Se muestra el lazo de control en la **Figura 7.2-2**.

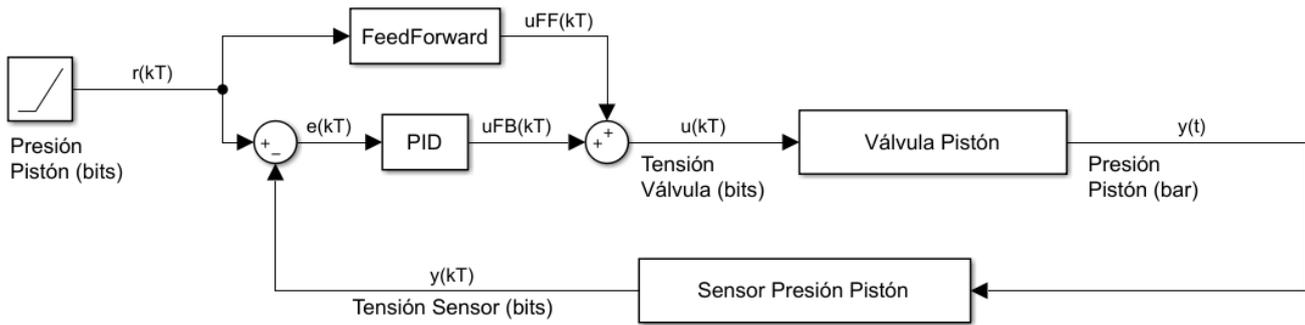


Figura 7.2-2. Lazo de control para la presión de confinamiento.

Por un lado, se tiene una señal de *Feedforward*:

$$u_{FF} = (P_P - P_{0P}) \cdot m_P + V_{0P}$$

Para la misma, se utiliza el valor de la pendiente de la curva válvula pistón (bits) vs sensor de presión de pistón (bits):

$$m_P = 1,302849 \frac{LSB}{LSB}$$

Se requieren también la presión inicial de pistón P_{0P} sensada con la válvula en 0, y la zona muerta de la válvula $V_{0P} = 400 \text{ bits}$, que por prueba y error también es cambiada a $V_{0P} = 175 \text{ bits}$.

Sumado a esto, se utiliza una señal de *Feedback* por control PID, para el que se eligen las siguientes constantes:

$$K_P = 1 \quad K_I = 0,5 \quad K_D = 0,1$$

En este caso, es un control PID propiamente dicho, con el que se puede hacer que la presión de pistón siga una rampa de subida, de bajada, o se mantenga constante, aún ante desplazamientos del pistón y los consecuentes cambios en el volumen de su cámara. Como se verá a continuación, el control de la presión de pistón es especialmente importante dado que con ella se regula su avance.

7.2.3 Avance del pistón previo al contacto

Durante el uso de la celda, resulta importante poder controlar el movimiento del pistón, en particular su avance a velocidad constante. Frente a una presión de confinamiento constante, este avance se logra regulando la presión de pistón. Cuando el pistón aún no ha entrado en contacto con la probeta de roca y el conjunto de medición (LVDTs internos y *strain gages*), el único sensor que da cuenta de su movimiento es el LVDT externo. Por lo tanto, se puede sumar una señal de *Feedforward* de presión de pistón que depende de la presión de confinamiento, con una señal de *Feedback* con control PID realimentada con la posición del pistón según el LVDT externo, para obtener el lazo de control de la **Figura 7.2-3**.

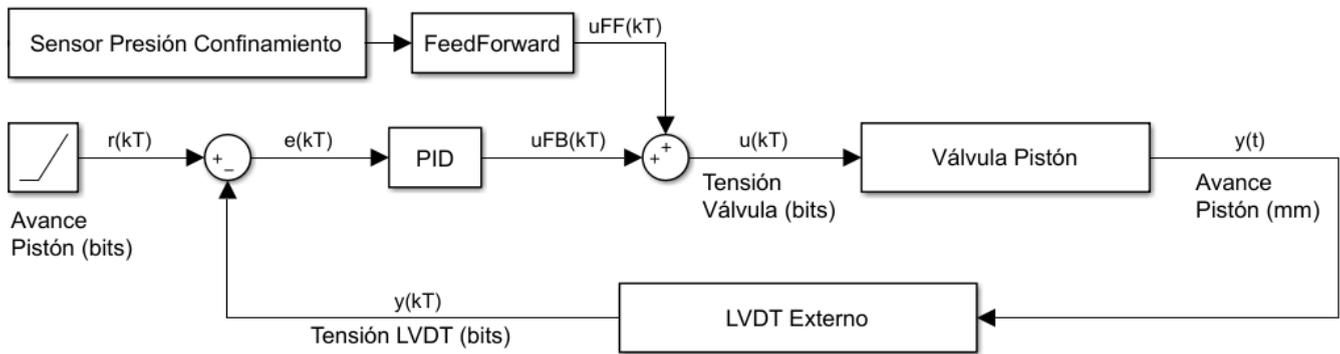


Figura 7-2-3. Lazo de control para la posición y el avance del pistón, previo al contacto con la probeta.

En este caso, la señal de *Feedforward* es la presión de pistón en bits que equilibra a la presión de confinamiento más el peso del pistón y el roce estático (es decir, la presión necesaria para permitirle al pistón comenzar a moverse), según la ecuación deducida en [9.2.1: Determinación de la fricción estática](#):

$$P_P = \frac{1}{A_{PH}} (P_C A_{PM} + F_G \pm F_E)$$

Donde P_P y P_C son las presiones de pistón y de confinamiento, A_{PH} y A_{PM} el área del pistón hidráulico y el área mayor del pistón multiplicador, y F_G y F_E las fuerzas de peso de los pistones y roce estático. El roce estático depende de la presión de confinamiento (en bar) según:

$$F_E = 7.06 P_C + 304.39 N$$

Al llevarla a la forma $P_P \text{ (bits)} = k_1 P_C \text{ (bits)} + k_2$, se puede llegar a que:

- $k_{1+} = 0,1813$ y $k_{2+} = 87,0302$ para el avance, y
- $k_{1-} = 0,1687$ y $k_{2-} = 79,7587$ para el retroceso.

Esta presión de pistón deseada en bits será la entrada al lazo de control de presión de pistón. Por su parte, el PID en el lazo de realimentación utiliza las siguientes constantes, tomadas del proyecto anterior, ya que no se pudieron realizar ensayos con este lazo de control.

$$K_P = 1,5 \quad K_I = 1 \quad K_D = 0,2$$

7.2.4 Avance del pistón luego del contacto

Finalmente, se tiene el control de la posición del pistón luego de que éste entre en contacto con la probeta y el conjunto de medición, y los empiece a comprimir. Para esta situación, se busca tener un control más fino del avance, para que el ensayo pueda realizarse a velocidad de deformación constante. Para ello, nuevamente se utiliza un control a lazo cerrado, esta vez realimentado con el sensado de los LVDTs internos (su promedio). A esto, a modo de *Feedforward*, directamente se le suma la señal enviada a la electroválvula de presión de pistón antes de comenzar la compresión. Así, se obtiene el lazo de control de la **Figura 7.2-4**:

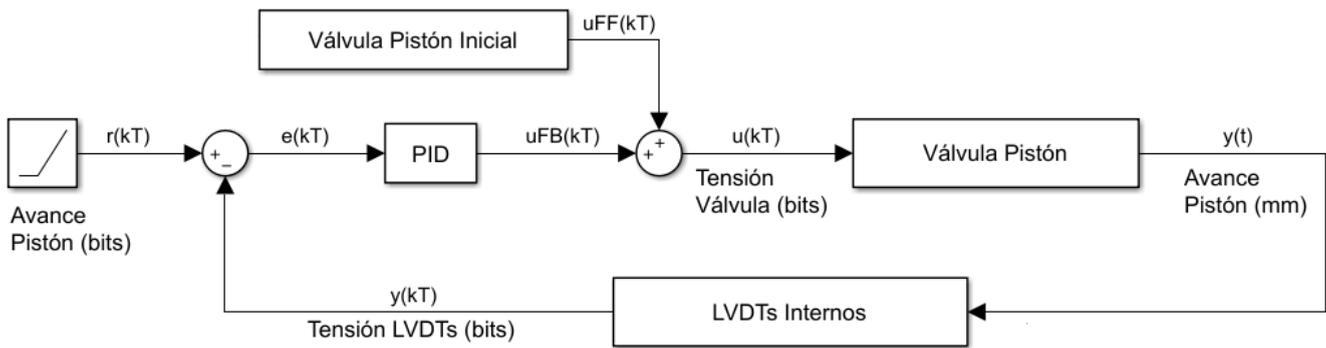


Figura 7.2-4. Lazo de control para el avance del pistón a velocidad de deformación constante, luego del contacto con la probeta.

Nuevamente se toman para el PID las constantes del proyecto anterior al no poder ensayar este lazo:

$$K_p = 1,2 \quad K_I = 0,4 \quad K_D = 0,4$$

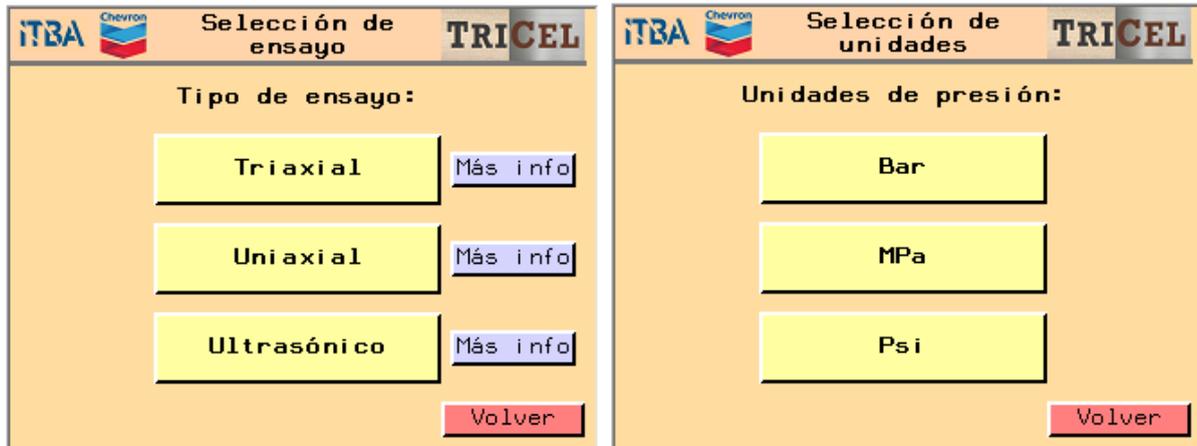
7.3 Flujo del programa

7.3.1 Inicio del ensayo

El flujo del programa del PLC se basa en el de la celda anterior, pero actualizado con los nuevos valores de constantes determinados en los ensayos, y modificado para incluir el ensayo ultrasónico. El programa comienza con una pantalla de inicio en la HMI, luego de lo cual se pide al usuario elegir el tipo de ensayo: Triaxial (*Multi Stage o Single Stage*), Uniaxial, o Ultrasónico, y la unidad de medida de la presión (psi, bar, MPa).

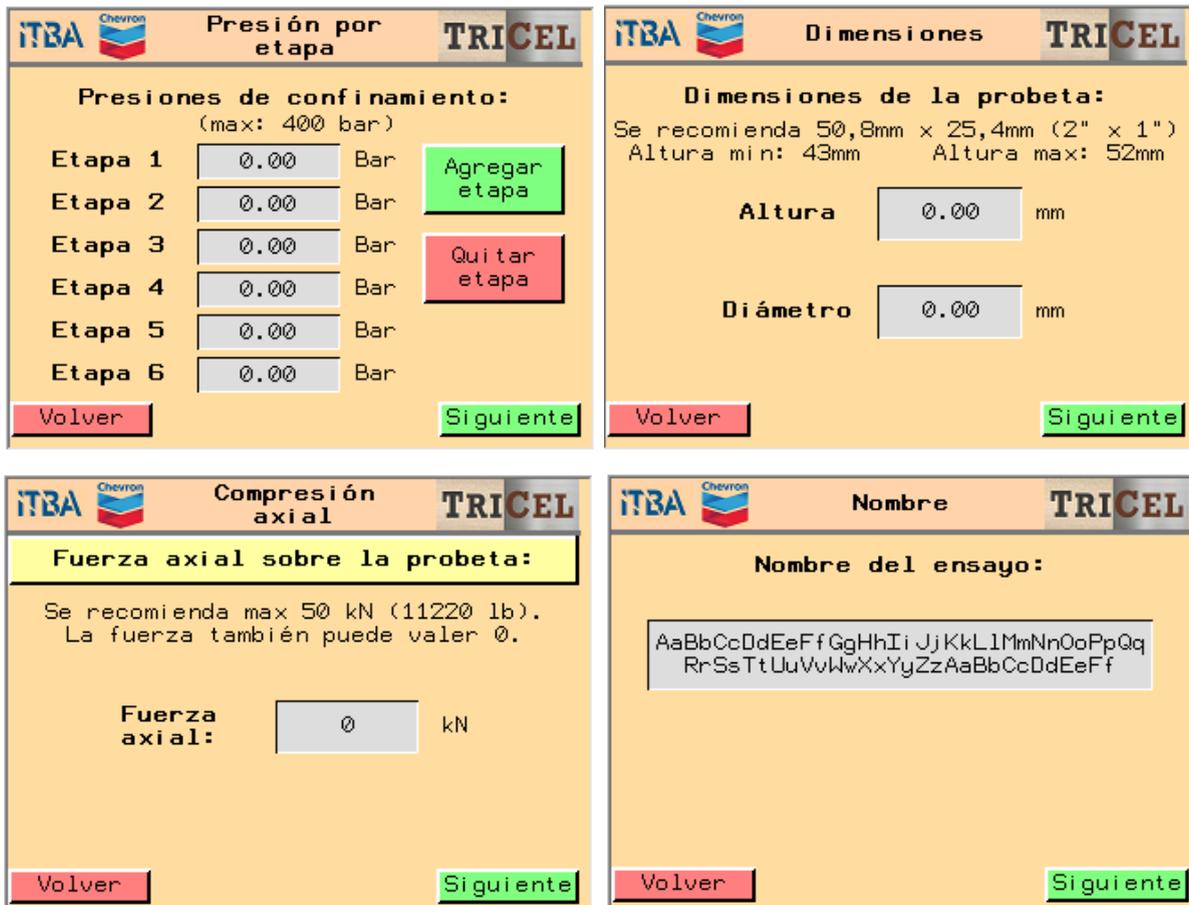


Figura 7.3.1-1. Pantalla de inicio del programa de control de la Celda Triaxial.



Figuras 7.3.1-2. Selección de tipo de ensayo (izq.) y unidades de presión a utilizar (der.).

A continuación, se piden una serie de parámetros. Para ensayo triaxial: cantidad de etapas, presión de confinamiento para cada etapa, largo y diámetro de la probeta. Para ensayo uniaxial: sólo las dimensiones de la probeta. Para ensayo ultrasónico: presión de confinamiento, y carga axial sobre los ultrasónicos y la probeta (en unidades de fuerza, o de presión, para lo que se requiere el diámetro de la probeta). Se ingresa luego el nombre del ensayo. También es posible modificar algunos parámetros avanzados: la tasa de cambio de la presión de confinamiento (en bar/min o unidad afín, sólo ensayos triaxial y ultrasónico), la velocidad de deformación axial (mm/mm/s o $\mu\epsilon/s$, sólo ensayos triaxial y uniaxial), y una carga axial (tensión deviatorica) limite.



The image shows two screenshots of the TRICEL software interface. The left screenshot, titled 'Confirmar parámetros', displays a form for confirming test parameters. Fields include 'Tipo' (Triaxial), 'Unidades' (Bar), 'Presión por etapas' (three input boxes), 'Altura (mm)' (0.00), 'Diámetro (mm)' (0.00), and 'Nombre'. A 'Fuerza axial (kN)' field is highlighted with a blue box and labeled 'solo ultrasonico'. The right screenshot, titled 'Parámetros avanzados', shows advanced settings for 'Tasa de cambio de la presión de confinamiento (bar/min)', 'Velocidad de deformación axial (mm/mm/s)', and 'Tensión deviatorica máxima (bar)'. Both screens have 'Volver', 'Parámetros avanzados', and 'Siguiente' buttons.

Figuras 7.3.1-3 a 7.3.1-8. Entrada de parámetros de ensayo.

Luego de verificar que los parámetros ingresados son los correctos, el usuario es guiado por el programa en los pasos a seguir para poder dar inicio al ensayo. Se deben poner en posición las válvulas indicadas y se debe verificar que las bombas estén encendidas (sólo la de pistón para el ensayo uniaxial) y que alcancen un estado estacionario. Se aguarda a que el programa realice un chequeo general de sensores (presiones estables, pistón en el punto muerto inferior y estable, LVDTs internos y *strain gages* estables y en rango) y tome sus ceros, y el usuario puede dar comienzo al ensayo mediante el pulsador verde del tablero.

The image shows three screenshots of the TRICEL software interface. The first screenshot, 'Iniciar ensayo', lists instructions for the 'Conjunto de medición y tapas' and 'Válvulas'. The second screenshot, 'Iniciar ensayo', shows status for 'Motores' (Encender motor 1... OK!, Encender motor 2... OK!) and 'Sensores' (Chequeo general de sensores... OK!). The third screenshot, 'Iniciar ensayo', features a large green circular button with a left-pointing arrow and the text 'Presione el pulsador verde para dar comienzo al ensayo.' and a 'Cancelar ensayo' button.

Figura 7.3.1-9. Pasos previos a iniciar un ensayo.

7.3.2 Ensayo triaxial

Para el caso de un ensayo triaxial, lo primero que sucede al comenzar el ensayo es que comienza a subir la presión de confinamiento: a la velocidad por defecto del programa, o a la velocidad especificada en los parámetros avanzados. Sigue una rampa y se mantiene en un valor constante gracias al lazo de control de presión de confinamiento. Una vez alcanzado este valor, se sube la presión de pistón hasta un valor tal que venza las fuerzas de la presión de confinamiento, el peso y el roce estático y comience a mover al pistón hidráulico y al pistón multiplicador. Se busca un avance lento hasta hacer contacto con la parte inferior del Pusher, que a su vez está en contacto con un Sujetador de Probeta y éste con la probeta. Esto se regula con el lazo de control de avance previo al contacto, a la vez que la presión de pistón se regula con el lazo de control de presión de pistón.

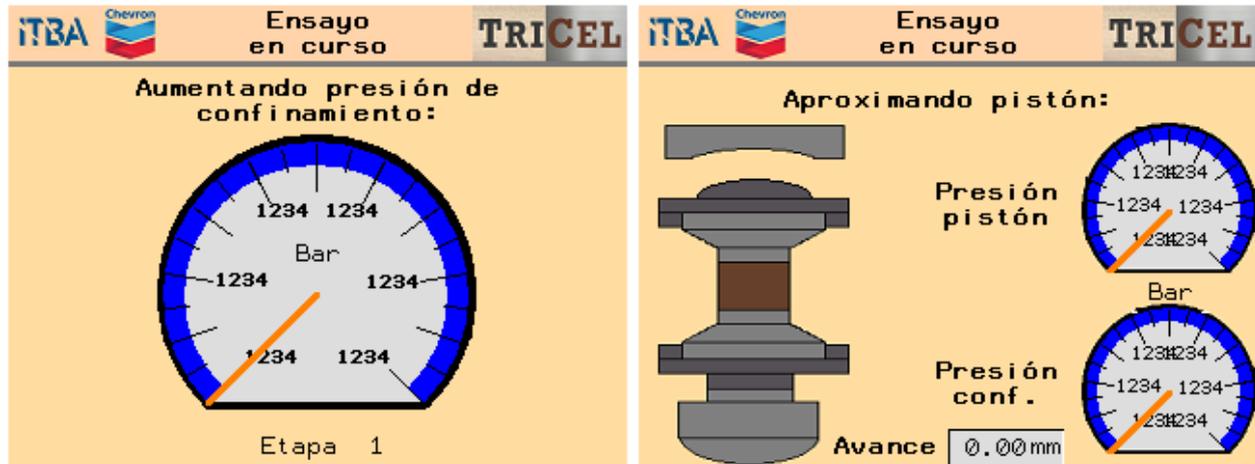


Figura 7.3.2-1. Aumento de presión de confinamiento (izq.) y avance del pistón (der.).

Se determina que hay contacto y que se comenzó a comprimir la probeta cuando los LVDTs internos superan cierto umbral. Llegados a este punto, se pasa al lazo de control de avance luego del contacto, y se continúa avanzando a una velocidad de deformación constante: la velocidad por defecto del programa, o la especificada en los parámetros avanzados.

A medida que se deforma la probeta, se calcula la tensión deviatorica axial de compresión sobre ella y la deformación volumétrica según las ecuaciones de la [Sección 3.2: Medición de parámetros estáticos](#):

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{1}{A_{pr}} (P_P A_{PH} - P_C A_{PM} - F_G - F_C - C_V V)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2 \varepsilon_r$$

Se grafica en tiempo real en la pantalla de la HMI la curva de σ_d vs ε_v , mientras que se grafican en la página de visualización web esa misma curva, la de tensión deviatorica vs deformación axial, la de tensión deviatorica vs deformación radial, y se muestran indicadores de aguja de las presiones, tensiones y fuerza axial. El ensayo (si es de una sola etapa) o la etapa (si es multietapa) terminan al llegar al punto de dilatación positiva (cuando la pendiente de la curva σ_d vs ε_v se vuelve infinita, lo que indica deformación plástica y fractura inminente de la roca), cuya detección queda a cargo del usuario. Al llegar a este punto, el usuario debe presionar el pulsador rojo, lo que frena el avance del pistón. Si se lo definió en los parámetros avanzados, el ensayo también puede terminar al alcanzar la tensión deviatorica límite: lo que ocurra primero.

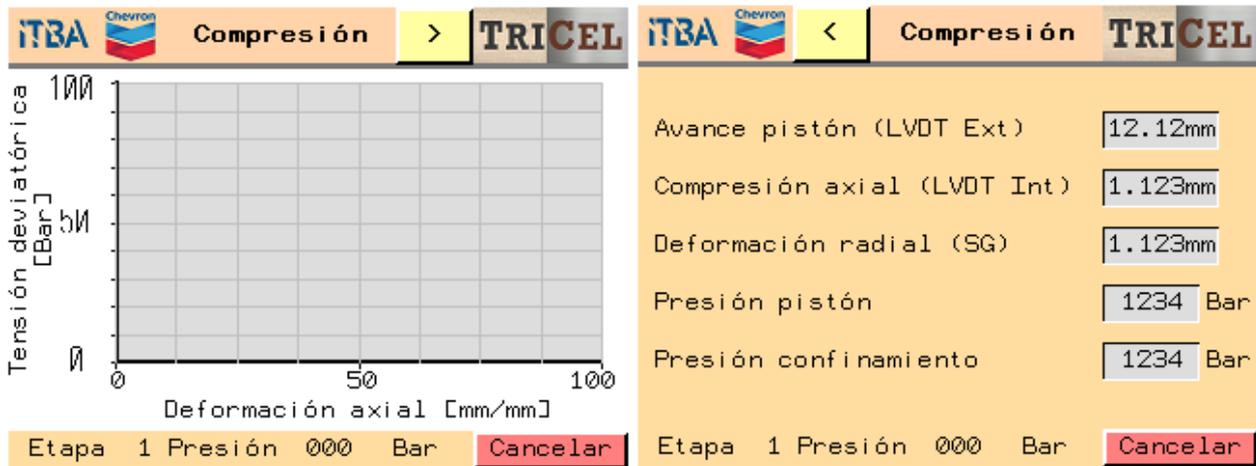


Figura 7.3.2-2. Compresión (y descompresión) de la probeta.

El pistón retrocede siguiendo una rampa con velocidad de deformación constante negativa, según el lazo de control de avance de pistón luego del contacto. Llegado al punto en que inició el contacto, sigue retrocediendo hacia el punto muerto inferior, siguiendo una rampa de avance a velocidad constante, según el lazo de control de avance antes del contacto. Allí, hay dos opciones: si el ensayo es de una sola etapa o si terminó la última etapa, se lleva la presión del pistón al mínimo, luego la de confinamiento siguiendo una rampa de baja de presión, y se le indica al usuario que abra las válvulas correspondientes y apague los motores.



Figura 7.3.2-3. Retroceso del pistón y finalización del ensayo.

Si en cambio faltan etapas, la presión de confinamiento se ajusta a la que fue elegida para la nueva etapa (nuevamente sigue una rampa a cierta velocidad con el lazo de control de presión de confinamiento), y se vuelve a repetir el procedimiento. El pistón avanza hasta hacer contacto con la probeta, sigue avanzando a velocidad de deformación constante, y se detiene y emprende el retroceso cuando llega a la tensión deviatorica límite o cuando el usuario detecta el punto de dilatación positiva.

En todo momento, se mantiene del proyecto anterior la posibilidad de cancelar el ensayo. Se puede interrumpir cualquier etapa del ensayo por medio de un botón en la HMI, lo que lleva a despresurizar primero el pistón y luego el confinamiento, siguiendo una rampa. O se puede interrumpir de forma más agresiva el ensayo con el golpe de puño “Parada de emergencia”, que despresuriza bruscamente pistón y confinamiento abriendo las electroválvulas que las regulan.

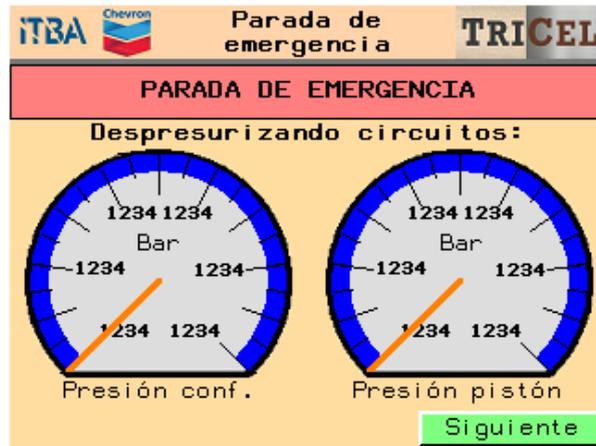


Figura 7.3.2-4. Parada de emergencia.

7.3.3 Ensayo uniaxial

El ensayo uniaxial es una simplificación del ensayo triaxial. Comparte las mismas características y etapas del ensayo triaxial, con la diferencia de que la bomba de presión de confinamiento permanece apagada durante el ensayo, y por lo tanto, no hay aceite en la cámara de confinamiento ni hay rampas de presiones de confinamiento. Es un ensayo de una sola etapa.

Sin embargo, tiene una particularidad al momento de finalizar el ensayo: el pistón que subió por presión de aceite no tiene una presión de confinamiento que lo haga bajar. Para solucionar esto, se incluye una rutina post ensayo en la que se pide al usuario encender la bomba de confinamiento y abrir las válvulas correspondientes, y se eleva la presión de confinamiento por unos instantes. Esto no requiere un control fino de la presión de confinamiento, ya que sólo busca vencer la fricción del pistón y enviarlo al punto muerto inferior para posteriores ensayos. La rutina post ensayo puede ejecutarse luego de abrir la celda, quitar la probeta y su conjunto de medición (con los LVDTs internos y *strain gages*), y volver a cerrar la celda.

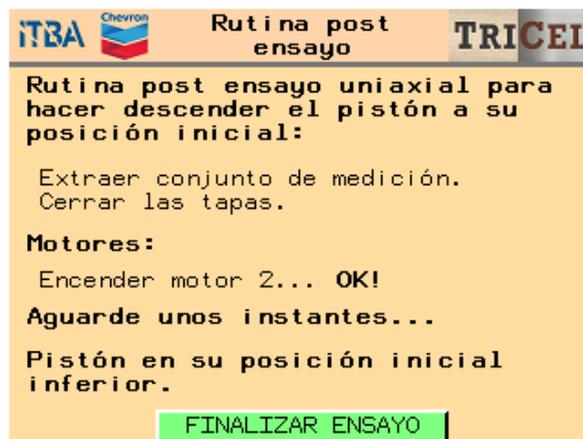


Figura 7.3.3-1. Rutina post ensayo uniaxial, para devolver al pistón a su posición inicial.

7.3.4 Ensayo ultrasónico

Por último, el ensayo ultrasónico busca fijar la presión de confinamiento deseada y generar una pequeña tensión axial de compresión, para poder tomar mediciones ultrasónicas. El procedimiento es similar a los ensayos anteriores: con las válvulas en posición, los motores encendidos y el chequeo

general de sensores, se comienza a elevar la presión de confinamiento, siguiendo una rampa. Cuando se llega al valor deseado, se eleva la presión de pistón para controlar su avance a velocidad constante hasta hacer contacto.

A partir de este punto, no se busca una velocidad de deformación, sino aplicar una carga axial determinada. Según las ecuaciones de la [Sección 3.2: Medición de parámetros estáticos](#) y [Sección 7.3.2: Ensayo triaxial](#), se fija la presión del pistón para obtener la fuerza axial o tensión deviatorica deseada, según el parámetro que haya fijado el usuario:

$$F_{axial} = P_P A_{PH} - P_C (A_{PM} - A_{pr}) - F_G - F_C - C_V V$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{1}{A_{pr}} (P_P A_{PH} - P_C A_{PM} - F_G - F_C - C_V V)$$

Se mantiene esta presión durante la toma de datos con los sensores ultrasónicos, y una vez que el usuario presiona el pulsador rojo, se procede a la descarga. La presión de pistón vuelve al valor que tenía al iniciarse el contacto, y luego retrocede a velocidad constante hasta el punto muerto inferior. Se despresuriza el pistón, el confinamiento, y tras accionar las válvulas correspondientes y apagar los motores, concluye el ensayo.

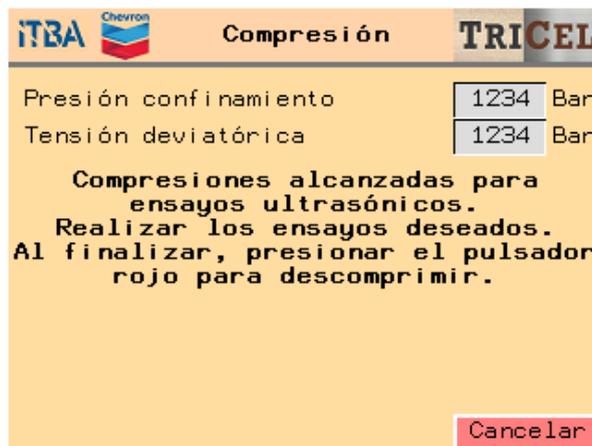


Figura 7.3.4-1. Probeta sometida a presión de confinamiento y fuerza axial seleccionadas. El usuario puede proceder con los ensayos ultrasónicos por fuera del programa de control de la Celda Triaxial.

7.4 Postproceso de datos

El postproceso de los datos adquiridos con el PLC durante el ensayo se realiza mediante un programa en MATLAB originalmente hecho para la celda anterior, modificado y actualizado para esta celda. En particular, se revisa dicho código, se simplifica y se modifican los parámetros de la celda y curvas de calibración que requiere el programa para realizar los cálculos pertinentes. El funcionamiento del programa se mantiene idéntico y permite determinar las propiedades mecánicas estáticas de la probeta (E , ν , G , K y los parámetros de Mohr Coulomb). El procesamiento de la señal ultrasónica se realiza en el momento mediante el programa provisto por el proveedor GCTS: GCTS CATS Ultrasonic.

8. Puesta a punto eléctrica

Sobre la puesta a punto eléctrica, se opta por reacondicionar el tablero ya existente. En este tablero se ubican las conexiones y elementos de control previamente mencionados.

Sobre la alimentación de los componentes, el tablero se conecta desde el exterior a la red

eléctrica monofásica (220 Vrms, 50 Hz). En el interior, se derivan las líneas de alimentación a dos fuentes de corriente continua: una para el circuito de sensores, lógica y periféricos de 24 V con 3 A máximos, y, otra para los actuadores de potencia, es decir, las electroválvulas, de también 24 V pero con 5 A máximos. Previo a cada una de estas fuentes de continua se instalan llaves termomagnéticas por protección.

En cuanto a las conexiones dentro del panel, se instala una sección de borneras DIN delimitadas por separadores que distinguen sobre qué parte del circuito se está operando. Las electroválvulas y el LVDT externo se conectan directo sobre las borneras DIN; los sensores del conjunto de medición interior se conectan desde el exterior con el SCU, el cual, dentro del panel, se conecta con unas borneras BNC que desacoplan las señales de los cables coaxiales en dos cables separados los cuales luego se conectan con las borneras DIN.

El interior del tablero se muestra en la **Figura 8-1** a continuación, mientras que la **Figura 8-2** muestra el exterior y la **Figura 8-3** indica cómo se almacenan los componentes finalizado el uso de la celda. Los esquemas eléctricos completos del tablero se encuentran en el [Anexo B](#).

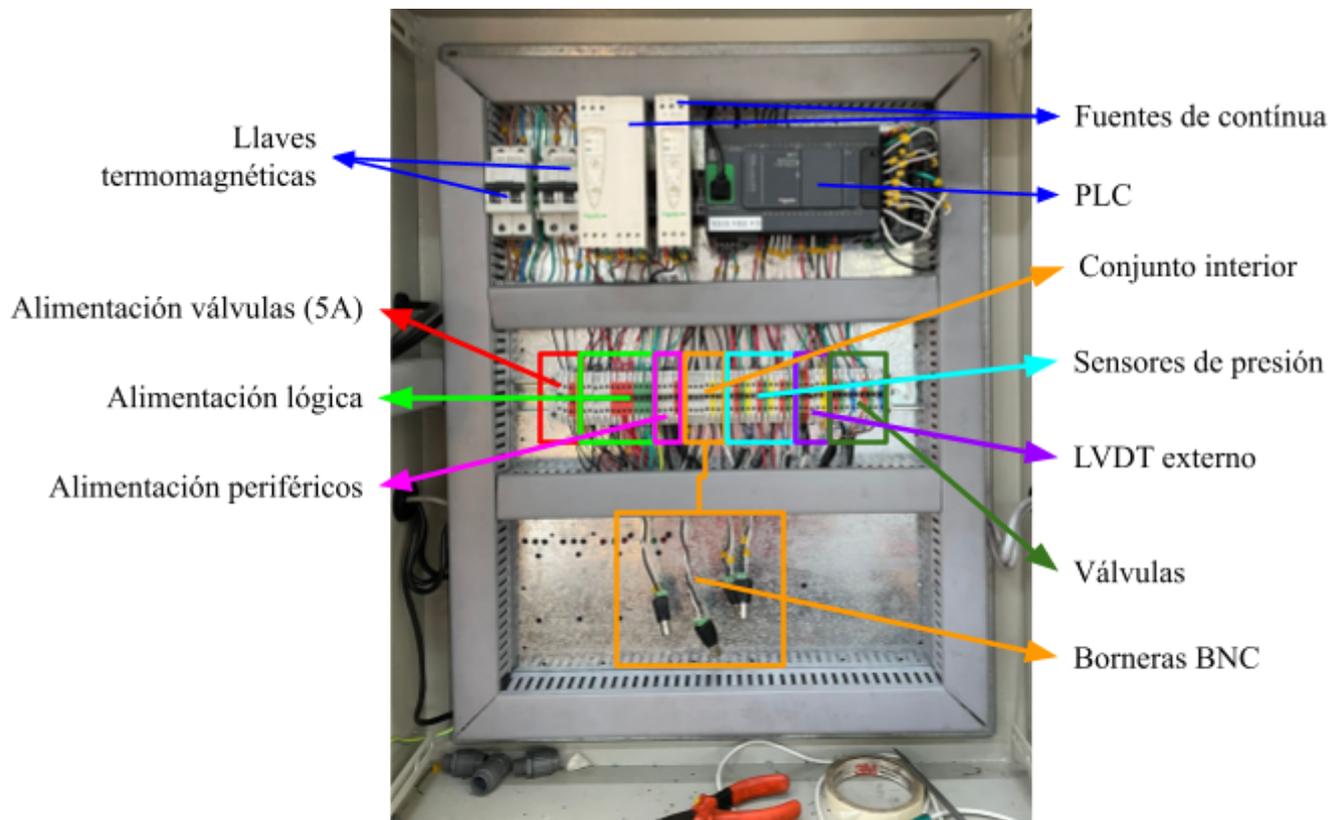


Figura 8-1. Interior del tablero eléctrico.

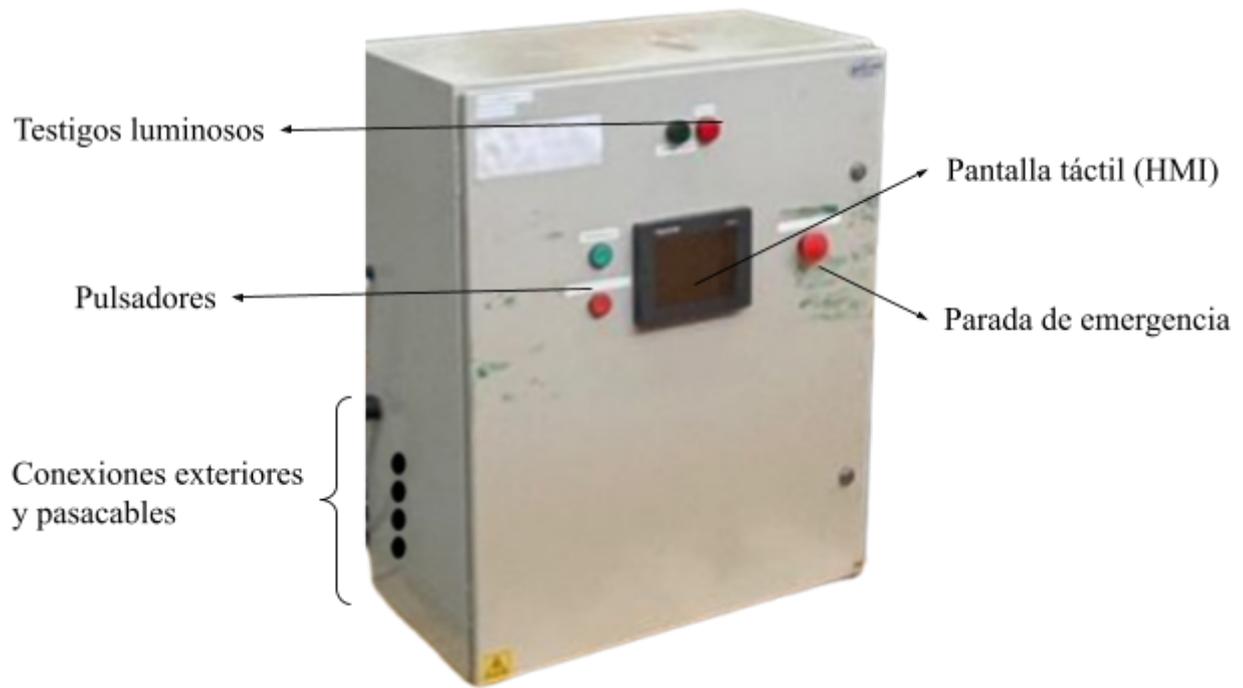


Figura 8-2. Exterior del tablero eléctrico.

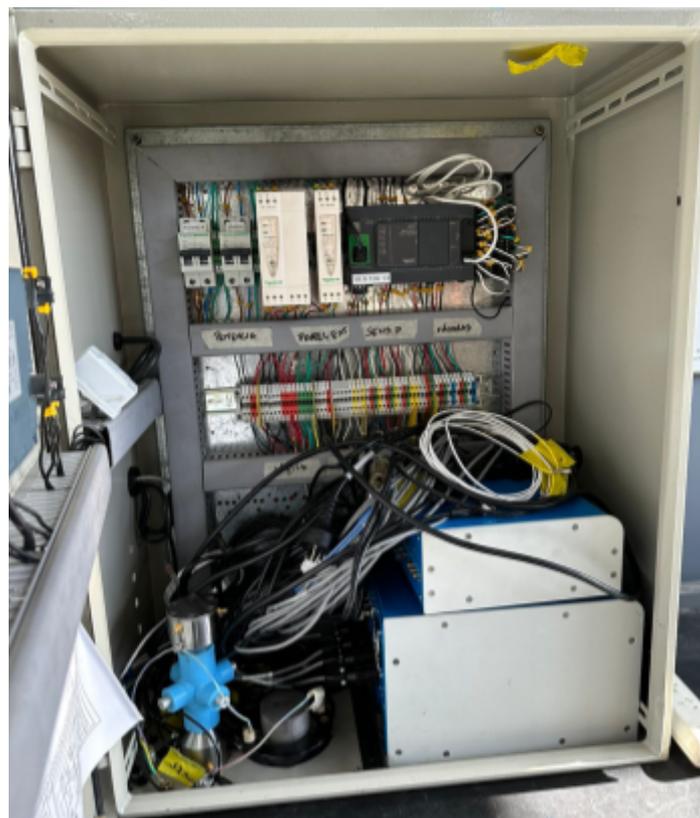


Figura 8-3. Interior del tablero eléctrico finalizado el uso.

Finalmente, se adjunta en la **Tabla 8-1** una lista de entradas y salidas del tablero eléctrico.

Entradas	Salidas
Cable de alimentación de Red 220 V	Cable de electroválvula de confinamiento
4x Cables de Conjunto Interior	Cable de electroválvula de pistón
Cable de conexión de LVDT externo	Conexión ethernet
Cable de sensor de presión de pistón	
Cable de sensor de presión de confinamiento	
Cable de sensor de presión poral (no usado)	

Tabla 8-1. Entradas y salidas del tablero eléctrico.

9. Caracterización de parámetros e instrumentos.

9.1 Sensores y Actuadores: curvas de calibración

Para el funcionamiento completo de la Celda Triaxial, tanto para el sistema de control como la adquisición de datos durante el ensayo, se utilizan una serie de sensores y actuadores.

Reiterando, los actuadores utilizados son las electroválvulas que regulan la presión dentro del circuito de confinamiento y el circuito de presión. Los sensores del circuito de control son dos sensores de presión (uno para cada circuito) y un sensor de desplazamiento tipo LVDT para medir la posición del pistón hidráulico. En cambio, los sensores del sistema de ensayos son LVDTs para desplazamiento axial, un dispositivo basado en *strain gages* para desplazamiento radial y sensores ultrasónicos (transmisor y receptor) para las mediciones ultrasónicas.

Se considera importante realizar ensayos de calibración que permitan determinar sus curvas características y en caso de contar con una calibración del fabricante, comparar los resultados obtenidos.

9.1.1 Electroválvulas

Para el control de presión se utilizan electroválvulas Rexroth del tipo DBETE de hasta 420 y 315 bar para confinamiento y pistón, respectivamente. Las electroválvulas constan de una bobina que al energizarse mueve un vástago magnético y abre la válvula en función de la tensión de alimentación. Debido a esto, existe una histéresis en las bobinas de las electroválvulas y las mediciones subiendo la presión difieren de las mediciones bajando la presión. Además, si la bobina se energiza por tiempo prolongado, su temperatura aumenta, su resistencia aumenta y la corriente que circula es menor para la misma tensión de entrada y la presión medida es menor que con la bobina en frío.

Utilizando una rutina de PLC que permite modificar arbitrariamente la tensión de entrada de las electroválvulas (de 0 V a 10 V), se determina la tensión necesaria para levantar una dada presión en la celda, determinada por el manómetro incluido en la central hidráulica. A continuación se detalla el protocolo utilizado en el ensayo.

1. Aumentar la tensión de la electroválvula hasta que la presión aumente 20 bar (coincidente con las marcas en el manómetro).

2. Registrar dicho valor de tensión y repetir los pasos 1) y 2) en todo el rango de presión (hacia arriba y hacia abajo) de la electroválvula analizada.
3. Apagar bombas y energizar las electroválvulas a 10 V (máx.) por 30 minutos para calentar las mismas.
4. Repetir 1) y 2) con electroválvulas calientes.
5. Repetir 1) a 4) para los circuitos de confinamiento y pistón.
6. Generar gráficos y conclusiones.

A continuación en las **Figuras 9.1.1-1 y 9.1.1-2** se muestran los resultados obtenidos. Como se puede observar, existen desviaciones en la presión si se considera la temperatura y el estado de magnetización de la bobina como era previsto. Esta es una razón por la cual se decide realizar un sistema PID para controlar la presión dentro de la celda. Aún así, estas desviaciones son pequeñas y realizando un ajuste lineal entre todos los casos se obtiene una recta prácticamente coincidente con los valores informados en la hoja de datos (0 bar a 0 V y presión nominal a 10 V).

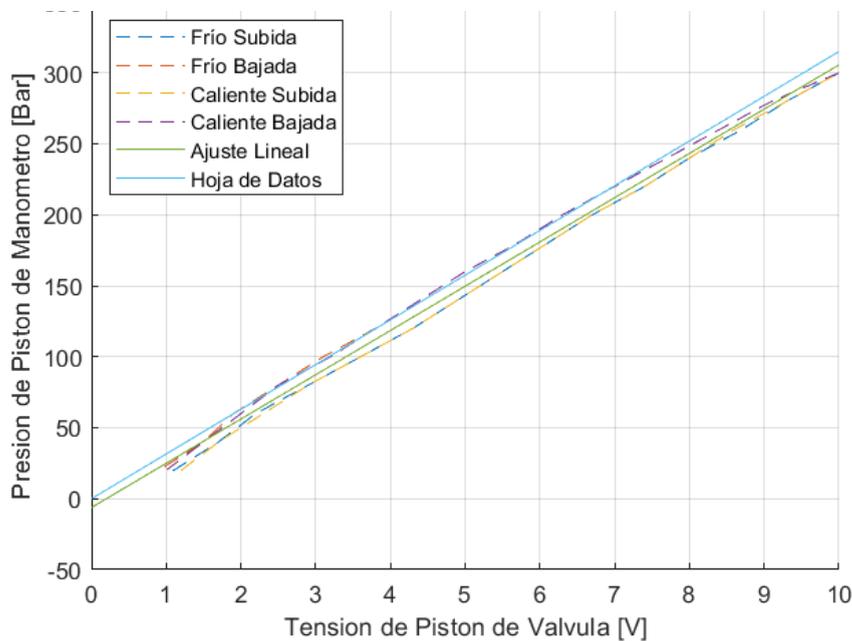


Figura 9.1.1-1. Ensayo de calibración de la electroválvula de pistón.

$$\text{Ajuste Lineal: } P_{P\text{ válvula}} = 31.19 V_{P\text{ válvula}} - 6.22 \text{ bar} \quad r^2 = 0.995$$

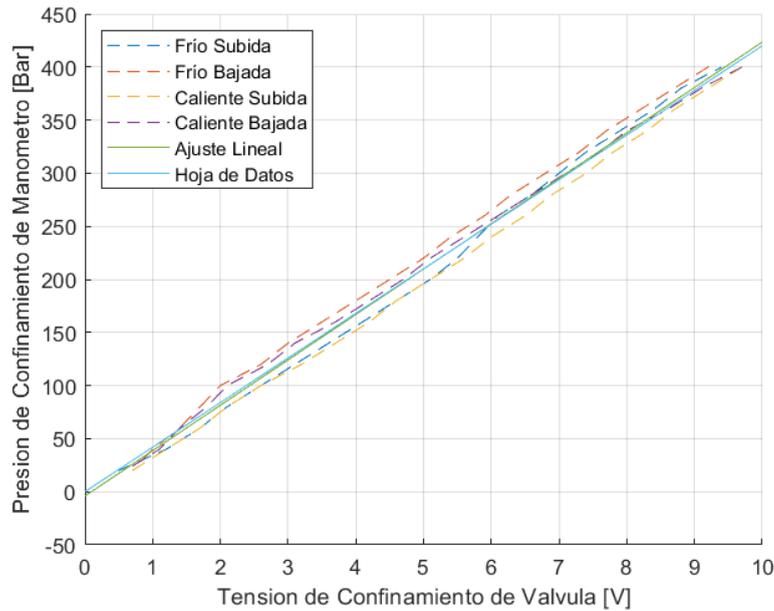


Figura 9.1.1-2. Ensayo de calibración de la electroválvula de confinamiento.

$$\text{Ajuste Lineal: } P_{C\text{ válvula}} = 42.76 V_{C\text{ válvula}} - 4.08 \text{ bar} \quad r^2 = 0.993$$

9.1.2 Sensores de presión

La medición de presión se realiza por sensores HM20 para 630 y 400 bar máximos para confinamiento y pistón respectivamente. De esta manera, las presiones máximas alcanzadas por las electroválvulas caen dentro del rango de medición de los sensores.

Para la obtención de la curva de calibración de los sensores de presión, se procede de manera similar que las electroválvulas, pero esta vez utilizando una rutina de PLC que mantiene la presión medida constante y ajusta la tensión de válvula acorde. Esto se logra mediante un control de realimentación tipo PID de la [Sección 7: Control](#).

El procedimiento del ensayo se detalla a continuación:

1. Aumentar la tensión de sensor buscada hasta que la presión aumente 20 bar (coincidente con las marcas en el manómetro).
2. Registrar dicho valor de tensión y repetir los pasos 1) y 2) en todo el rango del sensor analizado.
3. Generar gráficos y conclusiones.

Observando los gráficos de las **Figuras 9.1.2-1 y 9.1.2-2** se ve una alta coincidencia entre los valores medidos, ajustados a una regresión lineal y los valores informados en la hoja de datos (0,1 V para 0 bar y 10 V para presión máxima).

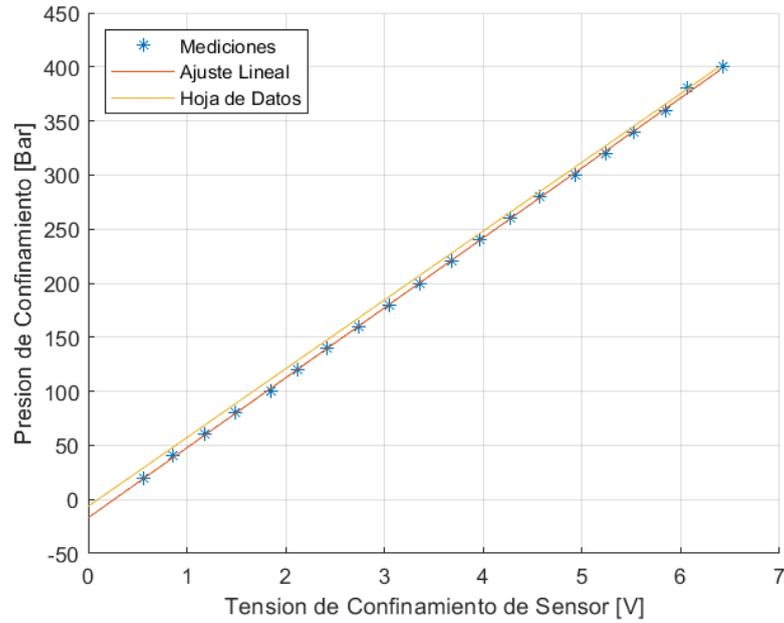


Figura 9.1.2-1. Ensayo de calibración del sensor de presión de confinamiento.

Ajuste Lineal: $P_{C\ sensor} = 64.72 V_{C\ sensor} - 16.9\ bar \quad r^2 = 0.999$

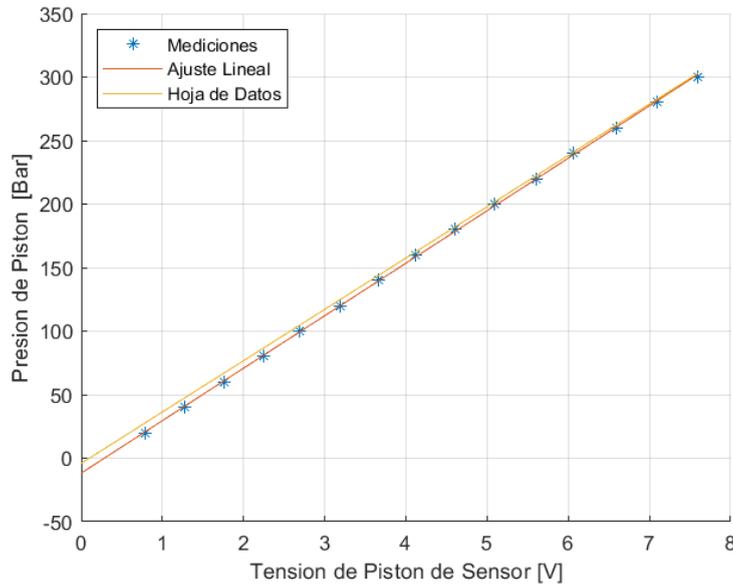


Figura 9.1.2-2. Ensayo de calibración del sensor de presión de pistón.

Ajuste Lineal: $P_{P\ sensor} = 41.31 V_{P\ sensor} - 11.74\ bar \quad r^2 = 0.999$

9.1.3 Relación electroválvulas - sensores de presión

Para el control de la celda, se debe conocer el valor de tensión (o de bits) que se debe aplicar sobre las electroválvulas para obtener cierta salida en tensión (o en bits) de los sensores de presión. Para obtener las curvas de calibración sensor vs electroválvula, se utiliza una rutina de PLC para registrar los

valores de los sensores a medida que se sube la tensión sobre la electroválvula, y luego a medida que se baja. Para evaluar el impacto del calentamiento de la bobina de la electroválvula y de su histéresis, se realiza un ensayo subida-bajada en frío, y luego en caliente. Se realiza el mismo ensayo para el circuito de presión del pistón y luego para el de confinamiento.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Encender el motor del circuito de pistón, asegurarse que el pistón esté en el punto muerto superior, así se mantiene quieto durante el ensayo. Verificar su posición con el LVDT externo.
2. Aumentar la tensión de la electroválvula del pistón de 0 a 2 V en pasos de 0,2 V, luego aumentar de 2 a 10 V en pasos de 0,4 V.
3. Por cada paso, aguardar a que se estabilice la salida del sensor de presión del pistón, y registrar valores en bits (LSB, Bit menos significativo por sus siglas en inglés) de la electroválvula y el sensor, y valor del manómetro del pistón en bar.
4. Disminuir la tensión de la electroválvula de 10 a 2 V en pasos de 0,4 V, y luego de 2 a 0 V en pasos de 0,2 V.
5. Por cada paso, aguardar a que se estabilice la salida del sensor de presión del pistón, y registrar valores en bits (LSB) de la electroválvula y el sensor, y valor del manómetro del pistón en bar.
6. Apagar el motor del circuito de pistón y poner la electroválvula de pistón en 10 V por 30 minutos para calentar la bobina.
7. Bajar electroválvula de pistón a 0 V, encender motor del circuito de pistón y repetir los pasos 2) a 5).
8. Apagar el motor del circuito de pistón y encender el motor del circuito de confinamiento, asegurarse que el pistón esté en el punto muerto inferior, así se mantiene quieto durante el ensayo. Verificar su posición con el LVDT externo.
9. Repetir los pasos 2) a 7) pero con el motor, electroválvula, sensor y manómetro de presión de confinamiento.

Por otro lado, se busca tomar más mediciones en las presiones en las que suceden los transitorios en el control, esto es, en las presiones bajas (por eso la distinción entre pasos de 0,2 V y 0,4 V). A continuación, se muestran los resultados en las **Figuras 9.1.3-1 y 9.1.3-2**.

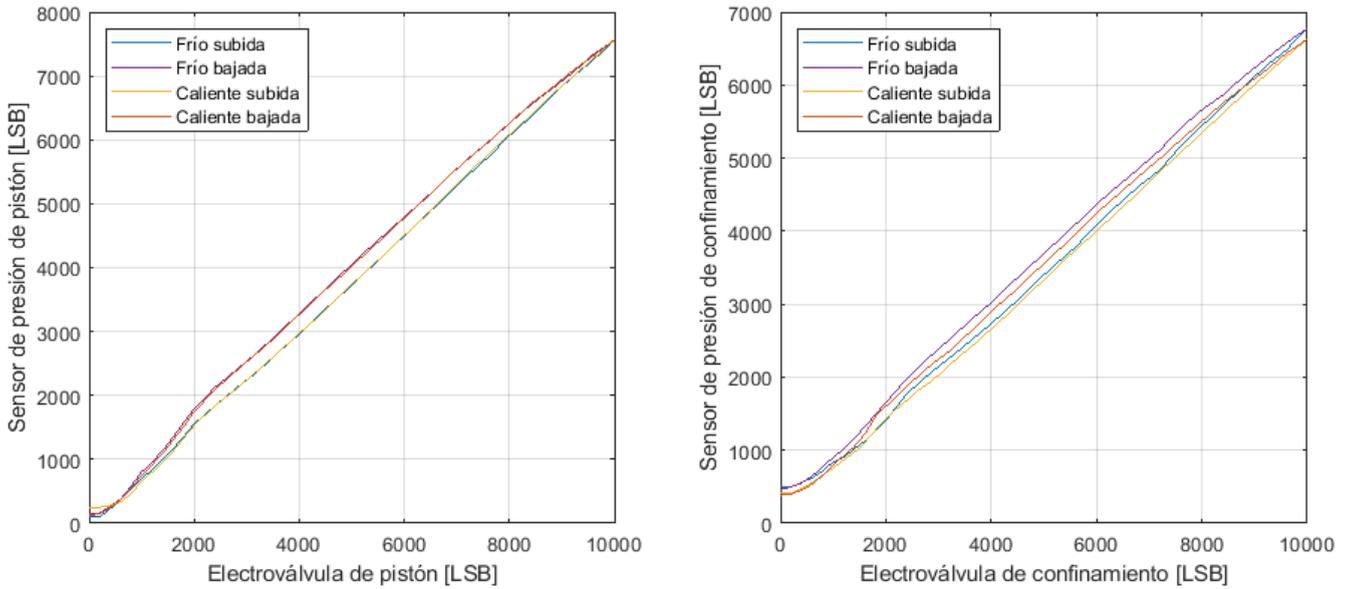
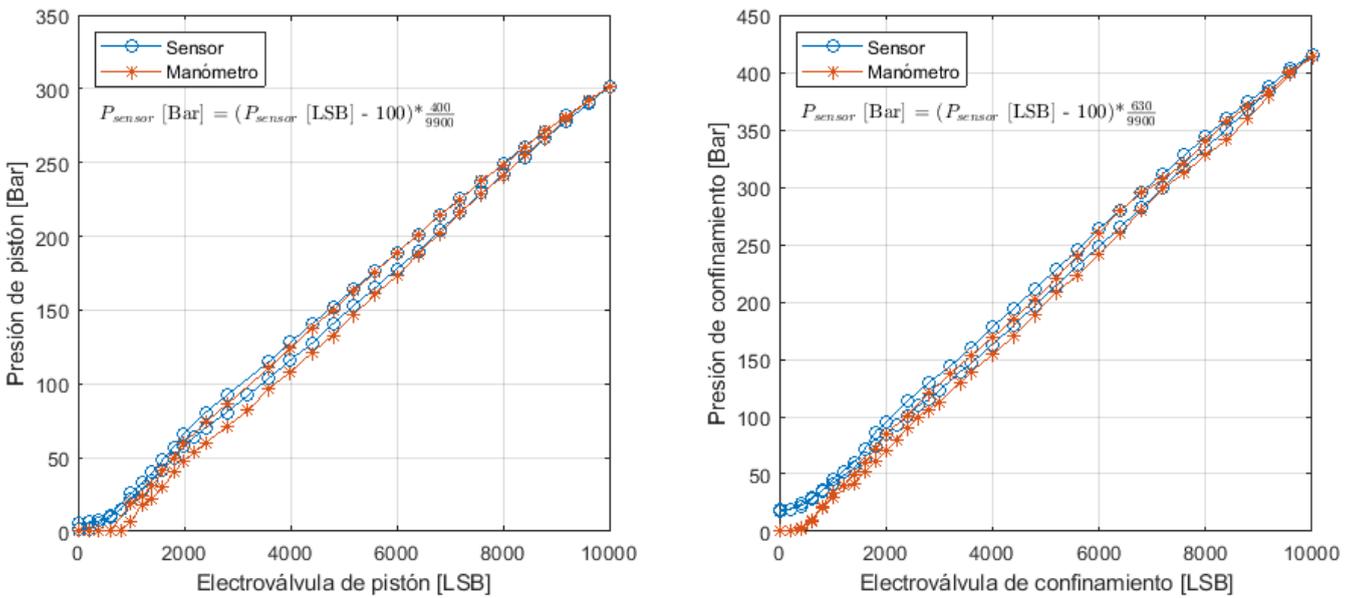
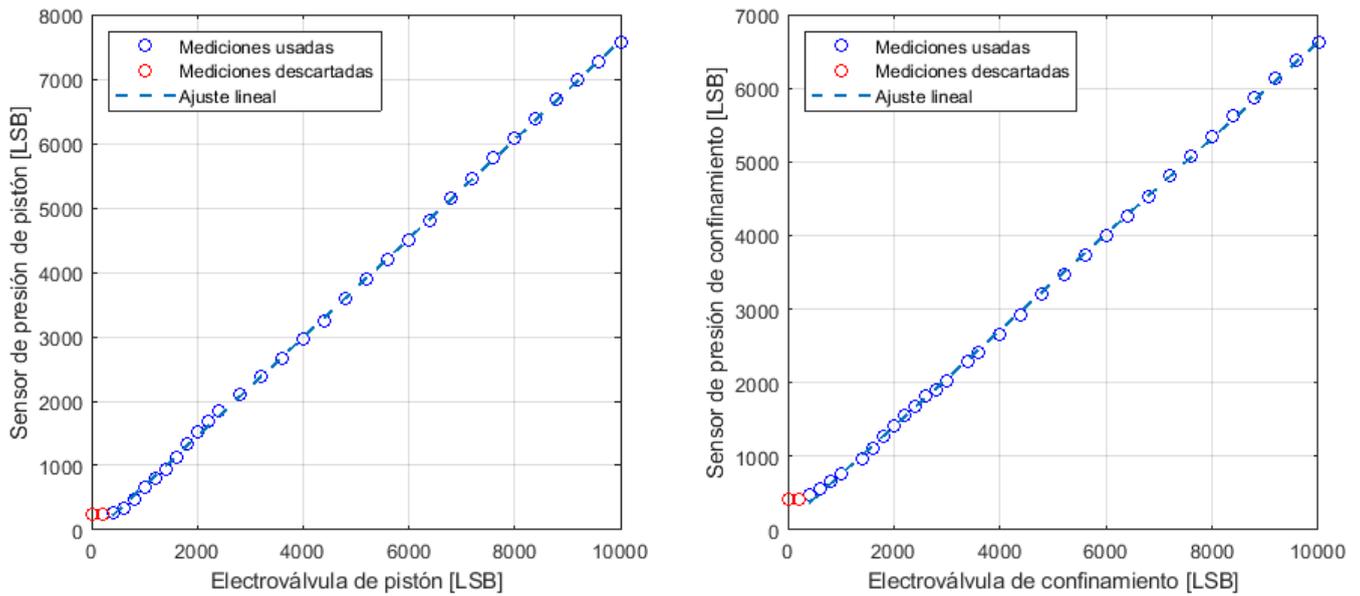


Figura 9.1.3-1 Curvas de sensor de presión vs electroválvula en LSB, para pistón (izq.) y confinamiento (der.), en frío y en caliente, en subida y en bajada.



Figuras 9.1.3-2. Curvas de sensor de presión y manómetro vs electroválvula, para pistón (izq.) y confinamiento (der.). Subida y bajada en caliente.

En la **Figura 9.1.3-1** se vuelve a ver la histéresis de la electroválvula entre subida y bajada; y como en la [Sección 9.1.1: Electroválvulas](#), en el circuito de presión de confinamiento se ve claro el efecto del calentamiento de la válvula. Se nota también de la **Figura 9.1.3-2** que las lecturas del manómetro son algo inferiores a las del sensor. No obstante, las mediciones son lo suficientemente similares para poder utilizar cualquiera de los dos instrumentos como medidor de presión. Para ambos casos (pistón y confinamiento), se decide hacer un ajuste lineal de los bits sobre la electroválvula y los bits sobre el sensor, considerando una zona muerta inicial V_0 en la que el valor de la electroválvula no afecta a la presión y la lectura del sensor P_0 se mantiene constante. Se puede ver el ajuste lineal en las **Figura 9.1.3-3**.



Figuras 9.1.3-3. Ajuste lineal entre bits del sensor y bits de la electroválvula para presión de pistón (izq.) y de confinamiento (der.).

$$\text{Ajuste Lineal: } V_p = 1,302849 \cdot (P_p - 225,4) + 400 \text{ LSB} \quad r^2 = 0,999$$

$$\text{Ajuste Lineal: } V_c = 1,532453 \cdot (P_c - 363,7) + 400 \text{ LSB} \quad r^2 = 0,999$$

9.1.4 Sensor de desplazamiento LVDT externo

Previo a la instalación del nuevo sensor de desplazamiento LVDT dentro de la celda, se realiza un ensayo para obtener la curva de calibración del mismo. Este consiste en medir la corriente de salida para diversas distancias entre el vástago y cuerpo del LVDT. Se toma como punto de referencia 13 mm por delante del frente de la carcasa, que es la posición en la que se encuentra la superficie del Cuerpo Sellos donde se monta el LVDT. La posición del LVDT es tal que cuando el pistón entra en contacto con el Cuerpo Sellos, el LVDT mide 4 mA, que es su fondo de escala. La carrera del pistón es de 10,5 mm, por lo tanto en con el pistón en su punto muerto inferior, el LVDT mide aproximadamente 15 mA. Las distancias se midieron con micrómetro y la corriente se mide por medio de la medición de la tensión (con voltímetro) de una resistencia (498 Ω , medida por el mismo voltímetro). La resistencia se conecta entre la señal y la referencia, de manera que pase toda la corriente de la señal por la resistencia y su tensión sea el producto entre la resistencia y la corriente.

El procedimiento realizado se indica a continuación:

1. Colocar el micrómetro en una medida fija (mediciones cada 1 mm).
2. Medir la tensión sobre la resistencia de prueba.
3. Convertir el valor a un valor de corriente.
4. Graficar y sacar conclusiones.

Como se puede ver en la **Figura 9.1.4-1**, las mediciones realizadas concuerdan con la curva de calibración provista. Además, se puede apreciar las zonas de saturación donde por debajo de 4 mA o por arriba de 20 mA, el sensor mantiene su corriente al mínimo o máximo según corresponda.

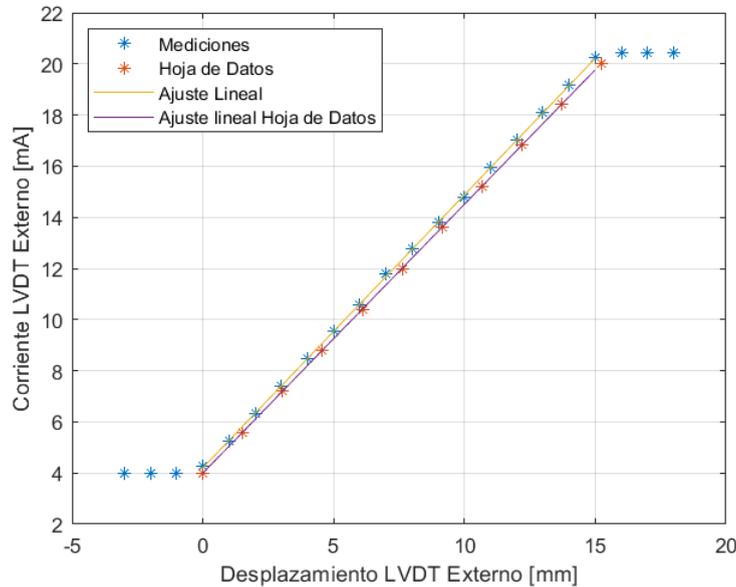


Figura 9.1.4-1. Ensayo de calibración del LVDT externo.

$$\text{Ajuste Lineal: } \Delta L_{LVDT\text{ext}} = 0.937 I_{LVDT\text{ext}} - 3.94 \text{ mm} \quad r^2 = 0.999$$

9.1.5 Sensores de desplazamiento lateral SG

Para la medición de desplazamiento radial se utilizan los sensores basados en *strain gages* de la [Sección 6.2: Strain gages diametrales](#). Los sensores están cableados de tal manera que uno aumenta su tensión al expandirse y el otro disminuye su tensión al expandirse.

Para realizar la curva de calibración, se utiliza un micrómetro de interiores para medir la distancia entre los dos sensores diametralmente opuestos y se mide la tensión de los mismos utilizando el PLC como adquirente de datos. Esto tiene las consecuencias de que el rango de medición es limitado a cuánto se pueda mantener el micrómetro en posición y que los sensores, que en funcionamiento están atornillados a los topes de aluminio, no sientan compresión por dichos tornillos. Por lo tanto, se recomienda que durante los ensayos, a estos tornillos no se les aplique precarga, ya que se ha encontrado durante las pruebas que esto puede afectar significativamente la curva de calibración. Se recuerda que sólo es de interés la pendiente de estas curvas, ya que la ordenada será determinada como el primer valor al inicio de cada ensayo. Se adjuntan los resultados en las **Figuras 9.1.5-1 y 9.1.5-2**.

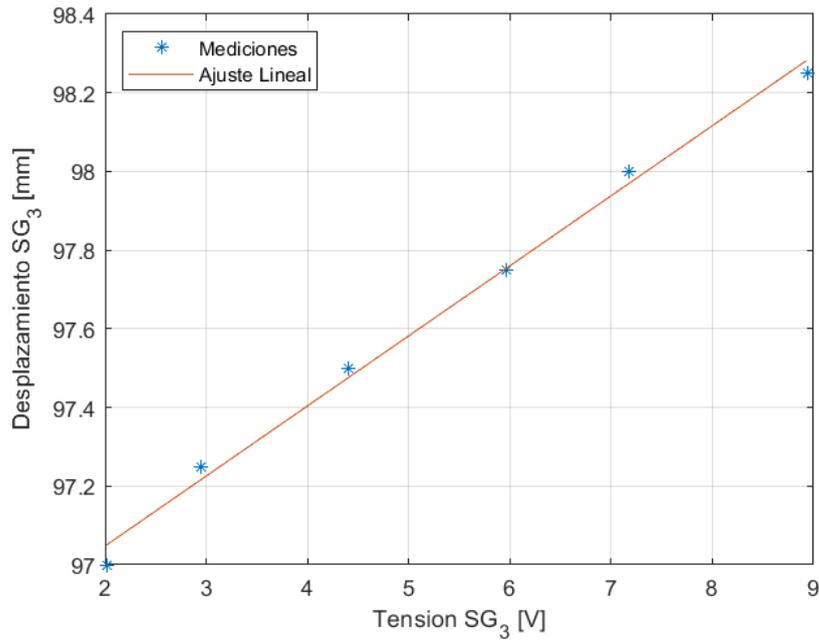


Figura 9.1.5-1. Ensayo de calibración del Strain Gage 3.

Ajuste Lineal: $\Delta D_{SG3} = 0.178 V_{SG4} + 96.69 \text{ mm} \quad r^2 = 0.994$

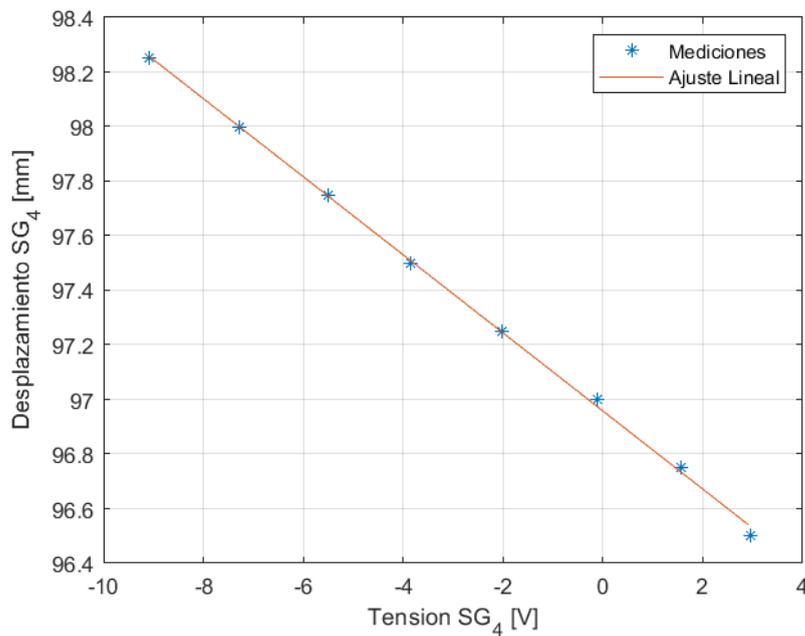


Figura 9.1.5-2. Ensayo de calibración del Strain Gage 4.

Ajuste Lineal: $\Delta D_{SG4} = -0.143 V_{SG4} + 96.96 \text{ mm} \quad r^2 = 0.999$

9.1.6 Sensores de desplazamiento LVDT internos

Los sensores para la medición de la deformación axial son LVDTs, los cuales son montados en anillos sujetos en 3 puntos a los sensores ultrasónicos (o Sujetadores de Probeta). Por un lado, las bobinas son sujetas por prisioneros al anillo inferior y los vástagos son roscados al anillo superior. Con

ayuda de esta rosca, se puede variar la posición del vástago respecto a las bobinas. Debido a la alta sensibilidad de los sensores, mantener el vástago no ajustado permitiendo que gire puede generar ruido en la medición. Es por esto que se utilizan suplementos para mantener el vástago quieto a distintas distancias del sensor durante el ensayo de calibración. La señal de salida pasa por una etapa de acondicionamiento que entrega una tensión proporcional a la posición del vástago relativo a las bobinas. Las mediciones de distancia fueron nuevamente realizadas con micrómetro, entre el tope de la rosca del vástago y la superficie inferior del anillo sujetador superior. En este caso nuevamente, solo es de interés la pendiente de estas curvas, ya que la ordenada será determinada como el primer valor al inicio de cada ensayo. Se adjuntan los resultados en las **Figuras 9.1.6-1 y 9.1.6-2**.

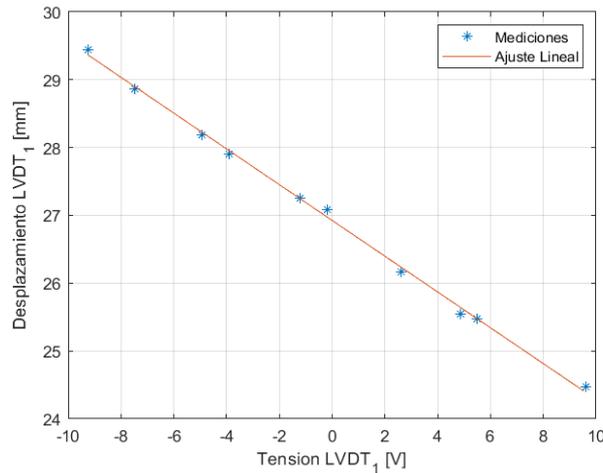


Figura 9.1.6-1. Ensayo de calibración del LVDT 1.

$$\text{Ajuste Lineal: } \Delta L_{LVDT1} = -0.264 V_{LVDT1} + 26.92 \text{ mm} \quad r^2 = 0.998$$

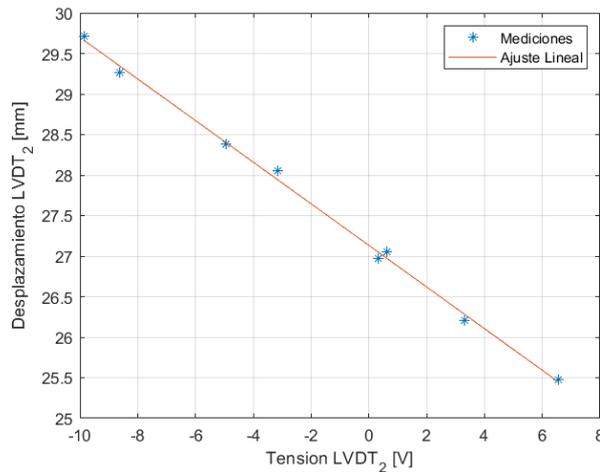


Figura 9.1.6-2. Ensayo de calibración del LVDT 2.

$$\text{Ajuste Lineal: } \Delta L_{LVDT2} = -0.257 V_{LVDT2} + 27.13 \text{ mm} \quad r^2 = 0.997$$

9.2 Ensayos de parámetros de la Celda Triaxial

Como se detalla en la [Sección 3: Marco teórico](#), para determinar la fuerza axial de compresión a las que se somete la probeta durante un ensayo se utiliza la siguiente fórmula basada en el equilibrio de fuerzas en dirección axial:

$$F_{axial} = P_P A_{PH} - P_C A_{PM} - F_G \pm F_C - C_V V \quad (9.2-1)$$

Donde para este caso $A_{pr} = 0$ ya que en estos ensayos que se detallan a continuación no se coloca la columna de carga. Es necesario entonces determinar todos los parámetros en la fórmula. La presión de pistón P_P y la presión de confinamiento P_C se obtienen con los sensores de presión, utilizando las curvas de calibración determinadas anteriormente. La velocidad de pistón V se calcula como la derivada discreta de la medición de posición del pistón, por medio del LVDT externo.

El área del Pistón Hidráulico A_{PH} , el área del Pistón Multiplicador A_{PM} y el peso F_G de ambas piezas se determinan a partir de los modelos de diseño de las mismas, resultando en:

- o $A_{PH} = 17671 \text{ mm}^2$ ($D_{PH} = 150 \text{ mm}$)
- o $A_{PM} = 1963 \text{ mm}^2$ ($D_{PM} = 50 \text{ mm}$)
- o $F_G = 63,832 \text{ N}$

Cabe aclarar que a diferencia de lo estipulado en la [Sección 3: Marco teórico](#), en este ensayo F_G no incluye el peso de los Sujetadores de Probeta ni de todo el conjunto de medición (porque no se colocan). En cualquier caso, se encuentra que el valor de la fuerza peso, en el orden de las decenas de Newtons, es despreciable respecto a las fuerzas realizadas por la presión, en el orden de las decenas de kiloNewtons. Finalmente, para obtener la fricción cinética F_C y el coeficiente de roce viscoso C_V , es necesario realizar un ensayo particular. Para el sistema de control resulta conveniente determinar también la fuerza de fricción estática F_E , la cual también se determina mediante ensayo.

9.2.1 Determinación de la fricción estática

El procedimiento del ensayo realizado 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, registrando este valor de presión.
3. Disminuir la presión del pistón hasta que se quede quieto nuevamente.
4. Disminuir la presión del pistón lentamente hasta notar que el pistón comienza a moverse para abajo, registrando este valor de presión.
5. Repetir los pasos 2) a 5) utilizando distintas presiones de confinamiento.

En este caso, el pistón no se mueve, por lo que $V = 0$ y el roce es estático. Además, al no haber probeta, la fuerza axial neta debe ser nula. Por lo tanto:

$$P_P = \frac{1}{A_{PH}} (P_C A_{PM} + F_G \pm F_E) \quad (9.2-2)$$

Donde la fricción es positiva cuando el pistón se mueve en subida y negativa cuando el pistón se mueve en bajada. Esta recta se grafica para los valores de subida y bajada de pistón. Se nota que si las fricciones en bajada y en subida son idénticas, como debería ser idealmente, la recta promedio entre las dos equivale al caso sin fricción, donde la pendiente y ordenada están determinadas por los parámetros obtenidos anteriormente. Se adjuntan los resultados en las **Figuras 9.1.1-1**.

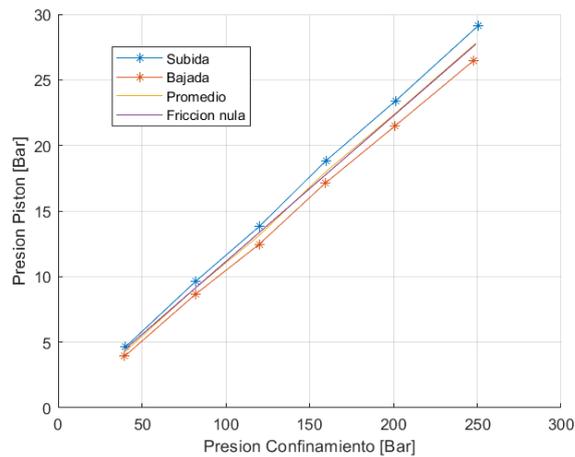
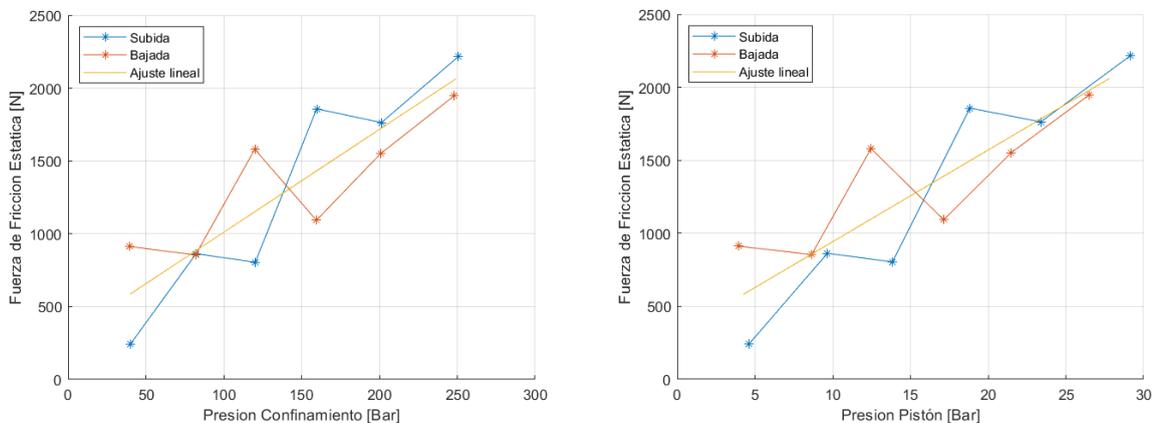


Figura 9.2.1-1. Presión de confinamiento vs presión de pistón en el ensayo de fricción estática.

Ajuste Lineal: $P_P = 0.112 P_C - 0.16 \quad r^2 = 1$

Como se observa, la recta promedio coincide con la recta de fricción nula, como era esperado. Reordenando la ecuación, calculando la fuerza de roce estática y graficando, se encuentra una relación lineal entre esta y la presión de confinamiento (y ya que ambas presiones también presentan una relación lineal, esto implica también una relación lineal con la presión de pistón), como se puede ver a continuación en la **Figuras 9.2.1-2**.



Figuras 9.2.1-2. Fuerza de fricción estática vs presiones de confinamiento (izq.) y pistón (der.).

Ajuste Lineal confinamiento: $F_E = 7.06 P_C + 304.39 N \quad r^2 = 0.994$ (izq.)

Ajuste Lineal pistón: $F_E = 62.79 P_P + 314.77 N \quad r^2 = 0.994$ (der.)

9.2.2 Determinación de la fricción cinética y el coeficiente de roce

El procedimiento de este ensayo es el siguiente:

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, graficarlos y obtener la velocidad constante del pistón para cada caso.

Para este caso, la fuerza axial sigue siendo nula, y reordenando la ecuación (9.2-1) se obtiene:

$$F_{resultante} = F_C + C_V V = P_P A_{PH} - P_C A_{PM} - F_G \quad (9.2-3)$$

La cual puede graficarse respecto a la velocidad para obtener un ajuste lineal y extraer el coeficiente de roce viscoso de la pendiente y la fricción cinética de la ordenada.

Es importante tener en cuenta un detalle adicional. Durante este ensayo, la cámara de presión de pistón cambia su volumen. Debido a la baja velocidad del pistón, se puede despreciar la caída de presión que se genera debido a este efecto. Sin embargo, si se aumenta las presiones lo suficiente como para que el cambio de volumen sea mayor al caudal que puede entregar la bomba, al no haber caudal pasando por la electroválvula, la presión de pistón cae a un valor constante de manera que el cambio de volumen de la cámara de pistón iguale el caudal suministrado por la bomba y la velocidad del pistón se mantiene constante en un valor:

$$V_{max} = \frac{Q_{Bomba}}{A_{PH}} = \frac{0.6 \text{ l/min}}{17671 \text{ mm}^2} = \frac{1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{0.017671 \text{ m}^2} = 5.66 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Es por esto que se decide dividir los datos medidos en dos secciones: aquellos con valores de velocidad menores a este valor y presión variable, los cuales se grafican calculando la fuerza medida, y aquellos con velocidad y presión de pistón constante alrededor del valor máximo, para los cuales se grafica la fuerza calculada por las presiones a las cuales se quería subir el pistón, pero que nunca llegó a este punto. Esto se realiza para mejor visualización de los resultados obtenidos en la **Figura 9.2.2-1**.

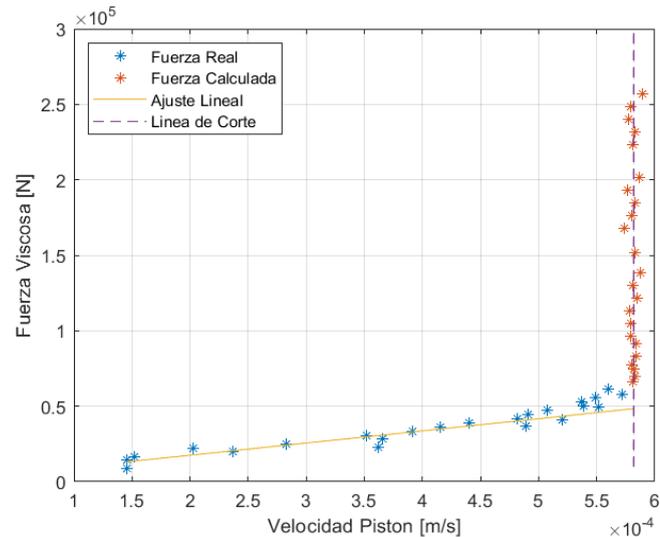


Figura 9.2.2-1. Fuerza resultante vs velocidad en el ensayo de roce viscoso.

$$\text{Ajuste Lineal: } F_R = 8.065 \times 10^7 V + 1433.3 \text{ N} \quad r^2 = 0.999$$

$$C_V = 8.065 \times 10^7 \text{ N s/m}$$

$$F_C = 1433.3 \text{ N}$$

10. Ensayos preliminares

10.1 Ensayos uniaxiales fuera de la celda

Previo a realizar ensayos dentro de la celda, se decide realizar ensayos por fuera para comprobar el funcionamiento de los sensores durante un ensayo de compresión y el funcionamiento del sistema de adquisición de datos, que consiste en el acondicionador de señales provisto por GCTS para los sensores LVDT 1 y 2 y los sensores SG 3 y 4 para medición diametral, y el adquisidor de datos interno del PLC que recolecta las señales de salida del acondicionador.

Se realizaron ensayos de compresión uniaxial con una máquina universal de ensayos INSTRON 3382 en las siguientes 3 probetas:

- Aluminio Patrón (Provisto por GCTS): $D = 25.4 \text{ mm}$, $L = 50.8 \text{ mm}$
- Aluminio Copia (Fabricada en el taller): $D = 25.4 \text{ mm}$, $L = 50.8 \text{ mm}$
- Latón (Fabricada en el taller): $D = 25.4 \text{ mm}$, $L = 44.1 \text{ mm}$

Se somete la probeta a un perfil de fuerza de compresión ascendente de a tramos, siguiendo la curva mostrada en la **Figura 10.1-1**. Esto se realiza para tener múltiples mediciones de un nivel de carga particular. El perfil de fuerza utilizado va de 0 a 50 kN, de a incrementos de 2 kN. Se realizaron 3 ensayos idénticos a cada probeta, para tener un valor más significativo y poder estimar la variabilidad y repetitividad de los ensayos.

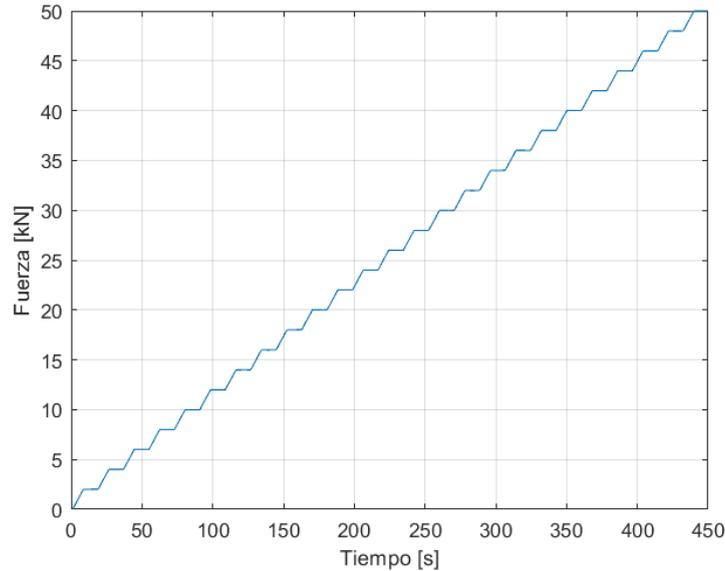


Figura 10.1-1. Perfil temporal de fuerza de compresión utilizado.

Durante el ensayo, se toman mediciones de ambos LVDT, las cuales se promedian para obtener una medición del desplazamiento axial, y de los *strain gages*, los cuales también se promedian para obtener una medición del aumento o reducción de diámetro. Con estos valores y los datos de la fuerza aplicada se pueden graficar las curvas tensión-deformación y determinar el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. Adicionalmente, se puede comparar las mediciones de ambos *strain gages*, que al estar en direcciones perpendiculares dan las deformaciones ortogonales a la línea de carga. Dado que los materiales ensayados (Aluminio y Latón) presentan un alto nivel de isotropía, se espera que la pendiente entre ambas mediciones sea cercana a 1 (es decir, igual deformación radial en ambas direcciones ortogonales).

Se realizaron un total de 9 ensayos, pero debido a un problema técnico de conexionado, uno de los ensayos de latón no registra correctamente los datos y el ensayo fue descartado en la etapa de postproceso. Es importante notar el cuidado con el que debe prepararse el sistema de medición. Se debe asegurar que los sensores estén correctamente colocados, alineados y apretados para evitar introducir variables desconocidas al proceso de medición. También es importante la alineación de la columna de carga con la máquina de ensayos y la firme sujeción de todos los elementos de medición.

Sin embargo, existe una fuente de error conocida que sí se puede compensar en postproceso. Al cargar la columna de carga, los Sujetadores de Probeta también se comprimen y dado que la medición se realiza entre dos puntos de estos mismos, parte de la medición de desplazamiento axial se debe a la deformación de estas piezas y no la probeta. Por elasticidad, esta deformación es una función lineal con la fuerza aplicada:

$$\Delta L_{\text{sujetadores}} = K_c F_{\text{axial}}$$

Como la geometría y material de los sujetadores es conocida, se puede realizar un análisis sencillo de elementos finitos con una fuerza unitaria y determinar la constante de compensación.

La **Figura 10.1-2** muestra los resultados de dicha simulación, obteniéndose un valor de:

$$K_c = 7.14 \times 10^{-7} \text{ mm/N}$$

Donde se multiplica el valor por 2 porque hay 2 sujetadores en la columna de carga, sometidos a la misma fuerza de compresión. Nótese que solo se modela el sujetador hasta el punto de contacto con el anillo que sujeta los LVDT, ya que solo esa porción del desplazamiento es medida por el sensor.

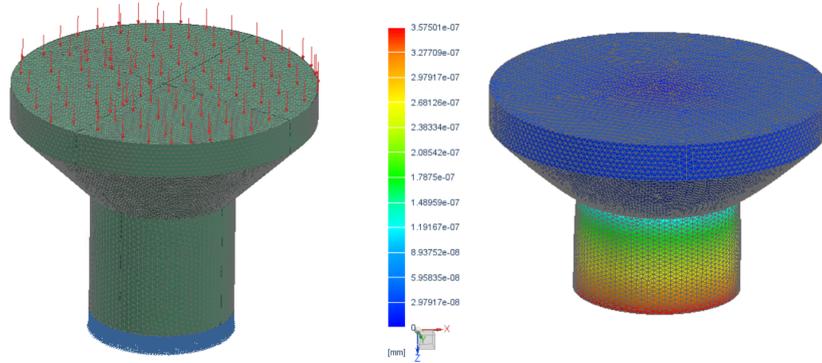


Figura 10.1-2. Setup de la simulación (izq.) y resultados (der.).

La **Tabla 10.1-1** muestra los resultados obtenidos en el resto de los ensayos, calculando el promedio y desviación estándar de cada probeta. Las curvas obtenidas se encuentran en la **Figura 10.1-3**.

Probeta	E [GPa]	\bar{E} [GPa]	u_E [GPa]	ν	$\bar{\nu}$	u_ν	$\varepsilon_z/\varepsilon_y$	$\overline{\varepsilon_z/\varepsilon_y}$	$u_{\varepsilon_z/\varepsilon_y}$
Al Patrón	71.35	71.80	0.51	0.343	0.341	0.002	0.95	0.96	0.01
	71.70			0.340			0.95		
	72.34			0.340			0.97		
Al Copia	66.38	68.19	1.28	0.335	0.337	0.003	1.00	0.99	0.03
	68.58			0.337			0.96		
	68.61			0.340			1.01		
Latón	96.63	100.18	5.02	0.307	0.322	0.021	1.07	1.04	0.05
	103.73			0.336			1.00		

Tabla 10.1-1. Resultados de ensayos uniaxiales fuera de la celda.

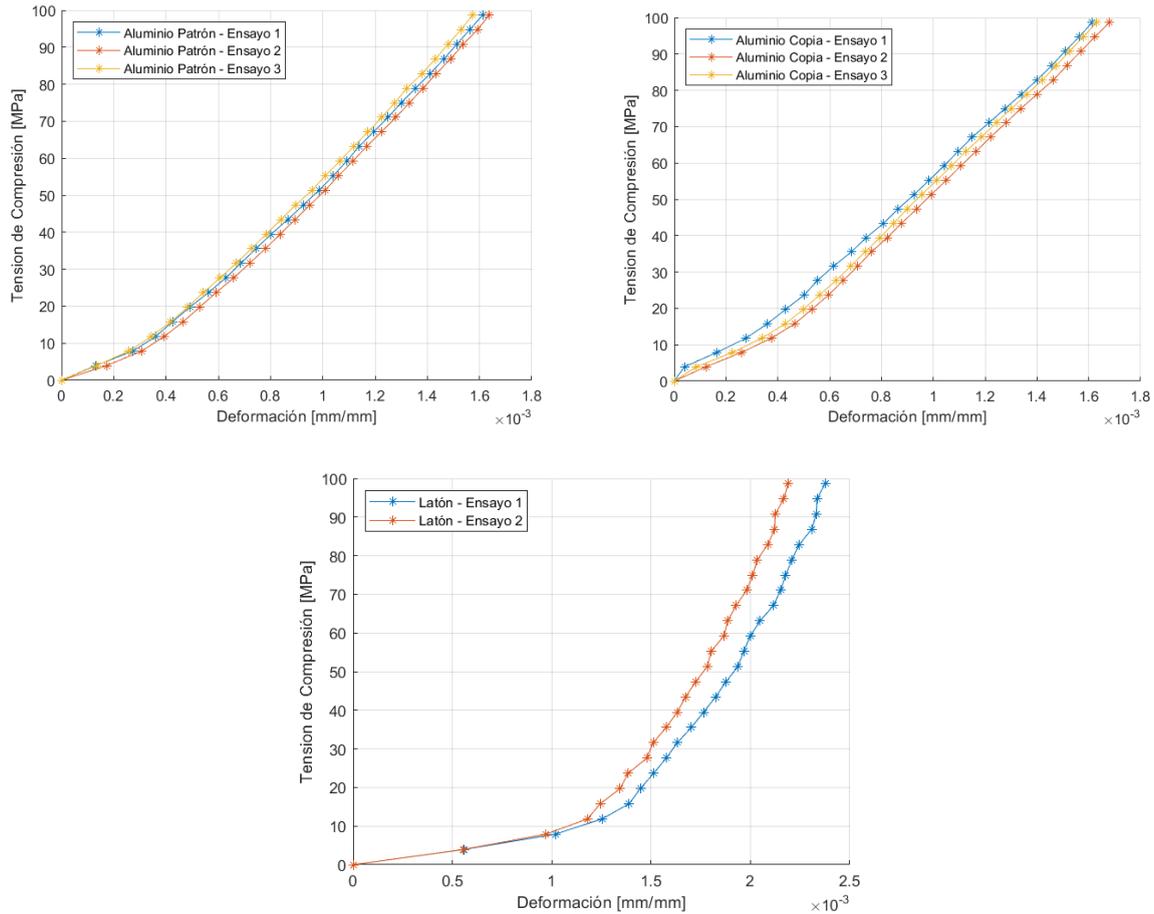


Figura 10.1-3. Curvas tensión - deformación de ensayos uniaxiales fuera de la celda para Aluminio Patrón (izq.), Aluminio Copia (der.) y Latón (abajo).

Analizando los resultados, se puede apreciar que para las probetas de aluminio, las propiedades coinciden entre sí y con el valor aceptado de aproximadamente 69 GPa de módulo de elasticidad y 0.333 de coeficiente de Poisson. Además, la repetitividad de los ensayos, si están hechos correctamente, es alta, presentando una desviación estándar baja en ambos casos.

Para la probeta de latón, los resultados obtenidos concuerdan con los valores aceptados aproximados, pero la variabilidad de los resultados es considerablemente mayor. Esto se puede deber en parte a que al tener módulo de elasticidad más alto, las deformaciones son menores y entra más en juego la sensibilidad de los sensores a pequeños cambios.

En todos los casos, se ve una similitud entre las deformaciones radiales ortogonales, lo cual implica que todos los materiales ensayados presentan un alto nivel de isotropía, lo que es esperable para metales. Sin embargo, las discrepancias sí son apreciables, debido nuevamente a la sensibilidad y cuidado necesario para manipular y preparar los sensores.

En cuanto a las curvas, se nota la alinealidad a bajas tensiones mencionada en la [Sección 3: Marco Teórico](#), debido a que las superficies no están completamente en contacto y deben deformar elásticamente para acomodarse entre sí y formar un contacto completo entre las superficies. También se puede notar que aún cuando los ensayos de una misma probeta se hicieron consecutivos, sin manipuleo de los sensores ni la línea de carga, existen pequeñas variaciones entre las curvas, debido a las

condiciones exactas de cada ensayo, posibles asentamientos de los sensores, y ruido ambiental (temperatura, viento, etc.).

10.2 Ensayos ultrasónicos fuera de la celda

Similar a los ensayos uniaxiales, se decide realizar ensayos por fuera de la celda para corroborar el correcto funcionamiento y entendimiento del sistema ultrasónico. En este caso, se utilizaron 6 probetas, añadiendo dos probetas de roca desconocida provistas por el departamento de Petróleo y una probeta de acero ASTM A105. Las mismas se pueden apreciar en la **Figura 10.2-1**. No se realizaron ensayos uniaxiales de compresión a las probetas de roca ya que se desconocen las propiedades de las mismas y se decide no arriesgar la rotura imprevista de las mismas.

Cabe aclarar los nombres utilizados para las probetas. El aluminio patrón es una probeta provista por GCTS para calibración de los sensores ultrasónicos, mientras que el aluminio copia es una probeta realizada en el taller. Al proveer las probetas de roca, no se dieron ni las propiedades ni los tipos de roca de las mismas, por lo que reciben el nombre de roca patrón y roca M4112 debido a que esto estaba escrito en las mismas.

Los ensayos consisten en la colocación de la probeta entre los transductores, con acoplante entre medio, y la aplicación de una pequeña presión a la columna para asegurar un buen contacto. Para esto se utiliza un bloque de acero de aproximadamente 10 kg, provisto por el CIDIM. Previo a las mediciones ultrasónicas se debe tomar mediciones de la longitud, diámetro y masa de cada probeta. Se utiliza el programa provisto por los proveedores (GCTS) como se detalla en la [Sección 6.1: Sensores ultrasónicos](#).

La **Tabla 10.2-1** muestra los resultados obtenidos. Se adjuntan además las ondas P, S1 y S2 de donde se obtuvieron los resultados en el [Anexo A.1](#)

Probeta	L [mm]	D [mm]	M [gr]	Vp [m/s]	Vs1 [m/s]	Vs2 [m/s]	E [GPa]	ν	G [GPa]	K [GPa]
Al Patron	50.8	25.4	70.03	6361	3220	3183	74.18	0.33	27.88	72.92
Al Copia	50.8	25.4	69.87	6413	3253	3167	74.72	0.33	28.03	74.52
Latón	44.1	25.4	189.55	4336	2023	1971	92.17	0.37	33.75	114.13
Acero	50.8	25.4	197.8	5192	3116	3051	190.42	0.23	77.56	116.48
Roca Patron	51.0	25.7	52.35	2463	1191	1036	6.77	0.38	2.45	9.38
Roca M4112	50.1	25.2	57.24	1130	668	722	2.64	0.20	1.10	1.46

Tabla 10.2-1. Resultados de los ensayos ultrasónicos fuera de la celda.



Figura 10.2-1. Probetas ensayadas (en orden izq. a der.): Aluminio Copia, Aluminio Patrón, Latón, Acero, Roca Patrón, Roca M4112.

Analizando los resultados se encuentra una buena concordancia entre los valores obtenidos en este ensayo y los valores obtenidos en los ensayos uniaxiales. Cabe destacar que las rocas utilizadas son porosas, por lo que sus propiedades mecánicas son bajas. Se espera que las propiedades mecánicas de las probetas de roca varíen al confinarlas con presión. Además, por su alto nivel de porosidad, es importante realizar los ensayos con la cobertura de goma provista, ya que de no ser así, las ondas mecánicas, especialmente las S1 y S2, se disipan fácilmente en el ambiente y la señal obtenida por el receptor es muy baja para analizar.

El criterio de evaluación utilizado para estos ensayos fue: se toma el inicio de la señal si es distinguible, o el primer pico positivo significativo si no se considera que exista un claro inicio de señal.

Es importante aclarar también que la interpretación de los valores y la elección del primer pico está sujeta al operador. Si bien se busca siempre mantener el mismo criterio de evaluación, esta cualidad aumenta indefectiblemente la variabilidad y repetitividad de los resultados. En ciertos casos, como en las rocas, es difícil distinguir picos reales de ruido ambiental, dada la baja amplitud de la señal recibida, aun con las opciones de trabajo más energéticas. En estos casos se hace uso de un filtro a la señal, para poder distinguir más nítidamente la misma. Particularmente se utiliza un filtro Butterworth^[21] de orden 6, en una ventana tipo Blackman^[22], como pasa bajos con frecuencia de corte de 1 MHz, con el que se encuentra el mejor filtrado del ruido sin modificar mucho la señal a medir, entre las opciones disponibles. Confinado dentro de un líquido a presión se espera menor interferencia ambiental y menor disipación (y por ende, una mayor amplitud recibida).

11. Protocolos de ensayos

A continuación se enumeran los pasos a seguir para los distintos tipos de ensayos que se pueden realizar con la Celda Triaxial. Cabe aclarar que estos ensayos no fueron realizados durante este proyecto y por lo tanto estos protocolos son de carácter tentativo y pueden requerir cambios cuando la celda esté completa y en correcto funcionamiento.

- 1) Armar la columna de carga por fuera de la celda:
 - a) Colocar probeta dentro de la camisa de silicona.
 - b) Colocar los sujetadores de probeta por arriba y abajo de la probeta. Si se realiza un ensayo ultrasónico, colocar los transductores ultrasónicos en lugar de los sujetadores.
 - c) Sujetar, sin ajustar, el dispositivo de medición de desplazamiento radial con ayuda de sus bulones.
 - d) Colocar los anillos que sujetan los LVDT en su lugar, ajustando hasta que los prisioneros queden al ras del anillo. Utilizar las varillas roscadas y los alineadores de LVDT para

- asegurar su correcta posición.
- e) De no estar ya en el anillo, colocar los LVDTs en posición y ajustar el prisionero correspondiente.
 - f) Colocar el Pusher por debajo del sujetador de probeta inferior.
 - g) Verificar la integridad y rigidez del conjunto y colocar la manija en las varillas roscadas.
- 2) Conectar los sensores de la columna de carga a sus respectivos conectores dentro de la celda.
 - 3) Bajar cuidadosamente la columna de carga con ayuda de la manija, calzando el Pusher en su lugar.
 - 4) Remover la manija y asegurar que el anillo superior no esté en contacto con ninguna tuerca que pueda restringir su movimiento.
 - 5) Colocar el Catcher por encima del sujetador de probeta superior.
 - 6) Verificar que los cables de conexión queden contenidos en la cámara de confinamiento, para evitar su rotura al colocar las tapas.
 - 7) Colocar el acople torquimetro en la Tapa Superior Externa, con el uso de tres bulones M6x1.
 - 8) Limpiar la rosca y enroscar la Tapa Superior Externa con una llave de fuerza sobre el acople.
 - 9) Colocar el acople torquimetro en la Tapa Superior Interna, con el uso de tres bulones M10x1.5.
 - 10) Limpiar la rosca y enroscar la Tapa Superior Interna con una llave de fuerza sobre el acople.
 - 11) Prender la bomba de confinamiento (M1). Verificar que las llaves de retorno estén cerradas. No debe subir presión en esta instancia. Caso contrario, apagar la bomba y revisar.
 - 12) Prender la bomba de pistón (M2). No debe subir presión en esta instancia. Caso contrario, apagar la bomba y revisar.
 - 13) Energizar PLC. En caso de un ensayo ultrasónico, energizar ULT-200.
 - 14) Seguir instrucciones en la HMI y seleccionar el ensayo a realizar.
 - 15) Seguir instrucciones en la HMI para el ensayo seleccionado.
 - 16) Al terminar el ensayo, apagar ambas bombas.
 - 17) Colocar el acople torquimetro en la Tapa Superior Interna, con el uso de tres bulones M10x1.5.
 - 18) Desenroscar la Tapa Superior Interna con una llave de fuerza sobre el acople. Verificar que no haya presencia de deformación plástica en el asiento esférico.
 - 19) Colocar el acople torquimetro en la Tapa Superior Externa, con el uso de tres bulones M6x1.
 - 20) Desenroscar la Tapa Superior Externa con una llave de fuerza sobre el acople.
 - 21) Colocar la manija, subir la columna de carga y desconectar los sensores.
 - 22) Remover la tarjeta SD del PLC para obtener los datos y cargarlos en el MATLAB de postproceso.

12. Ensayos Ultrasónicos a presión de confinamiento

Debido al enclavamiento del Porta Pistón, no se puede realizar la reparación/recambio del LVDT externo que presenta fallas, y por lo tanto no se puede realizar ensayos que requieran un movimiento del pistón, ya que no se puede controlar su posición.

Sin embargo, sí es posible realizar los ensayos ultrasónicos a presión de confinamiento, ya que estos no requieren el pistón. La presión de confinamiento es suficiente como para comprimir las probetas axialmente, asegurar buen contacto entre las piezas (con acoplante de por medio) y conseguir señales nítidas. Se realizan entonces ensayos en las probetas de Aluminio Patrón y Roca Patrón a varias presiones de confinamiento para evaluar su comportamiento en estados triaxiales. Los sensores en condición de ensayo y su conexión se muestran en la **Figura 12-1**. Los resultados obtenidos se encuentran en la **Tabla 12-1** y las **Figuras 12-2 y 12-3**, mientras que las señales completas se encuentran

en el [Anexo A.2.](#)



Figura 12-1. Disposición de sensores para ensayo ultrasónico con presión de confinamiento.

	p [MPa]	V_p [m/s]	V_{s1} [m/s]	V_{s2} [m/s]	E [GPa]	ν	G [GPa]	K [GPa]
Al Patrón	0	6312	3258	3115	73.39	0.33	27.61	71.55
	10	6334	3258	3136	73.89	0.33	27.81	72.06
	20	6237	3264	3112	73.13	0.32	27.63	68.92
Roca Patrón	0	3380	1156	1021	6.61	0.44	2.29	19.05
	10	3396	1881	1788	16.85	0.29	6.51	13.34
	20	3507	2136	2357	23.01	0.15	9.99	11.02
	30	3537	2183	2371	23.51	0.15	10.26	11.07

Tabla 12-1. Resultados de ensayos ultrasónicos dentro de la celda a presión de confinamiento creciente.

Aluminio

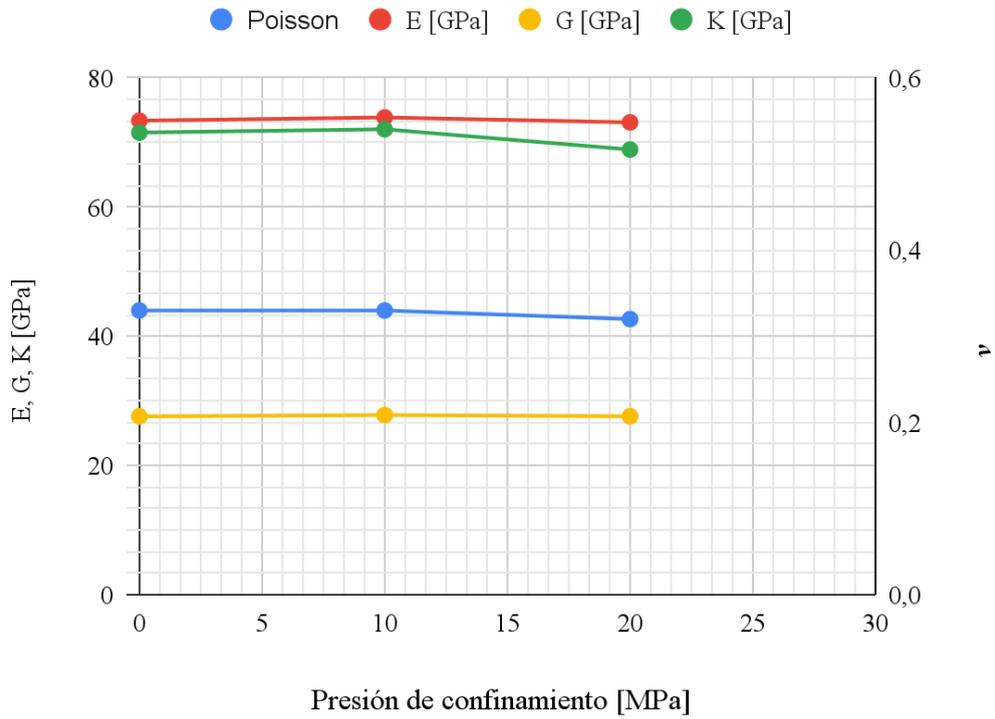


Figura 12-2. Gráficos de propiedades dinámicas para Aluminio.

Roca

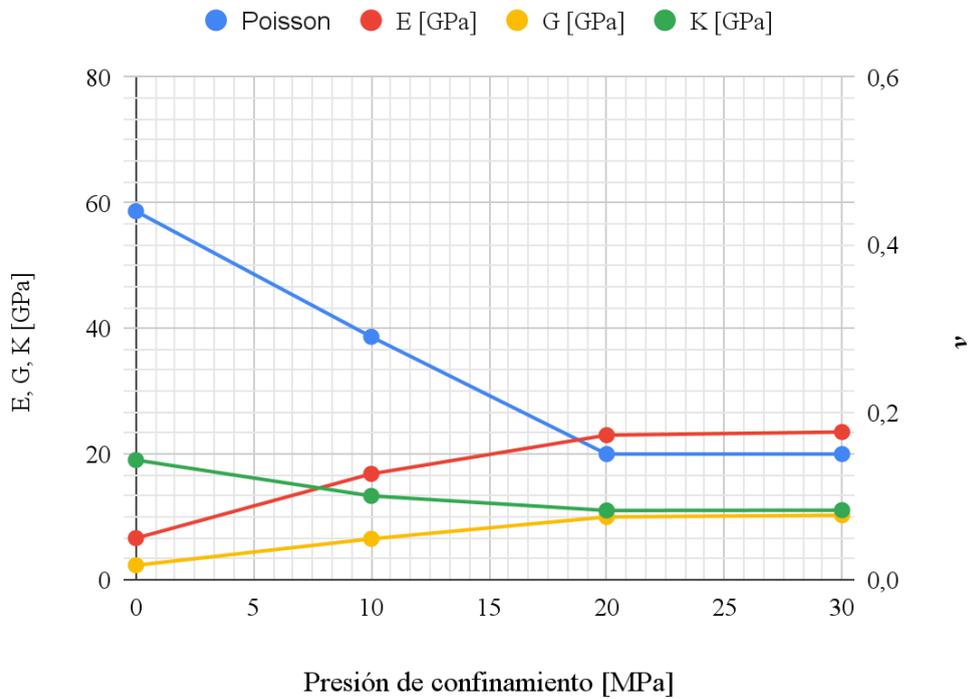


Figura 12-3. Gráficos de propiedades dinámicas para Roca.

Como se puede observar, el aluminio no presenta cambios significativos en cuanto a sus propiedades mecánicas al estar sometido a un estado triaxial. Por el otro lado, la roca presenta grandes cambios en sus propiedades mecánicas dinámicas al someterse a presión hidrostática, con el módulo de elasticidad y corte aumentando con la presión y el coeficiente de Poisson y módulo de compresibilidad disminuyendo. A partir de los 20 MPa las propiedades mecánicas de la roca parecen estabilizarse.

Cabe notar el correcto funcionamiento de los sensores ultrasónicos sumergidos en aceite, validando la correcta aislación de los cables interiores.

13. Pasos futuros

La Celda Triaxial, a fecha de junio de 2023, no se encuentra operativa en su totalidad debido al enclavamiento de la rosca inferior que imposibilita su apertura y el mantenimiento del LVDT Externo. Actualmente solo se pueden realizar ensayos ultrasónicos con presión de confinamiento, no así ensayos triaxiales debido a la necesidad de utilizar dicho sensor para el correcto control de posición y presión. A continuación se enumeran los siguientes pasos para la finalización de la celda:

1. Desarme de la rosca inferior: la aplicación de alto torque para el desenrosque no surte efecto, otras opciones posibles son la aplicación de torque por medio de llave de impacto neumática, el calentamiento (máximo 200°C, evitar a toda costa generar un tratamiento térmico a la celda) o enfriamiento de la misma para generar dilatación/contracción térmica respectivamente, o, en el caso de no lograr abrirla de otra forma, el torneado de la celda y mecanizado completo de un Porta Pistón nuevo.
2. Mecanizado de nuevo del Porta Pistón y Cuerpo Cámara con rosca de potencia, de 9 mm de paso como se analiza en la [Sección 5.3: Rosca inferior de potencia](#).
3. Recambio/reparado de LVDT externo.
4. Pruebas de los ensayos completos para asegurar su correcto funcionamiento.

En caso de que deba mecanizarse el sistema, se deben remover las conexiones dentro de la celda para poder retirar los *feedthroughs*. De no presentar problemas adicionales, estos pasos serían suficientes para dejar en funcionamiento la Celda Triaxial.

Adicionalmente, se presentan unas posibles modificaciones para mejorar la celda actual, pero que no son necesarias para el correcto funcionamiento:

1. Remover la reducción de sección en el Pistón Multiplicador y Pusher: para reutilizar las piezas de la celda anterior, el pistón reduce su sección hasta la sección de la probeta, simplemente para aumentar nuevamente su sección en el Pusher debido a la inclusión de los sensores ultrasónicos. Estas reducciones a su vez concentran tensiones innecesariamente. Rehaciendo estas piezas sin rebaje y mecanizando el Cuerpo Sellos acorde, se pueden eliminar estos concentradores sin pérdida de funcionalidad.
2. Aumento del casquete esférico entre Tapa Superior Interna y Catcher: De la misma manera, el casquete esférico superior de la columna podría aumentarse sin pérdida de funcionalidad y aumentaría el área de contacto. Se recomienda un análisis de elementos finitos previo para decidir su relación costo-beneficio concreto.
3. Colocación de inserto en la Tapa Superior Interna: Colocando un inserto con cavidad esférica de un material de mayor resistencia se podría disminuir la deformación producida en esta tapa y posiblemente eliminar completamente la deformación plástica.
4. Durante la visita a YTec, se propuso una medición en conjunto donde las mismas probetas se

miden en las correspondientes celdas triaxiales y se contrastan los resultados obtenidos. Esto no fue posible durante este proyecto, pero se podría realizar una vez que la celda esté en correcto funcionamiento.

Finalmente, en caso de que eventualmente se proponga una tercera iteración de este proyecto, se sugiere tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Desarrollar una cámara de confinamiento de mayor diámetro: Si bien es desaconsejable desde el punto de vista de resistencia mecánica y optimización de la geometría, la celda actual deja un muy bajo margen de espacio para manipular el Conjunto Interior de sensores. Esto no sólo es impráctico para quien la opere regularmente sino que también pone en riesgo la integridad de las conexiones en el interior de la celda dado que se deben acomodar y reacomodar los conectores en maniobras de preparación y fin de ensayo.
2. Desarrollar un sistema de borneras fijas en el interior de la celda, eliminando el uso de *feedthroughs*. Esta sugerencia nace de la visita a YTec, donde se vio una celda completa de GCTS, la cual integra directamente una bornera fija en la base de su celda. Todos los bornes son del tipo Amphenol-PT-108. Se adjunta en la **Figura 13-1** la solución integral de GCTS.
3. Si se opta por mantener los mismos *feedthroughs*, se recomienda desplazar la ubicación de los mismos hacia la parte inferior de la cámara de confinamiento. Esto permitiría ingresar y retirar los instrumentos sin tener que manipular las conexiones. Además, se sugiere utilizar la menor longitud de cable de cobre esmaltado dentro de la celda con el fin de ocupar menos espacio. Finalmente, probada la correcta aislación eléctrica, se pueden utilizar los conectores Amphenol-PT-108 macho sin los prensacables e incluso mecanizar su carcasa con el mismo fin.
4. Reemplazar los *strain gages* diametrales por un extensómetro circunferencial de cadena como el de la **Figura 13-1**. Este extensómetro también es de GCTS, al no tener el anillo de soporte ni los topes de aluminio no solo elimina el problema de sensibilidad de ajuste a los topes y la necesidad de recalibrar con elevada frecuencia los sensores sino que también simplifica el montaje del Conjunto Interior al no tener que flexionar la varilla roscada de guía de los LVDTs.

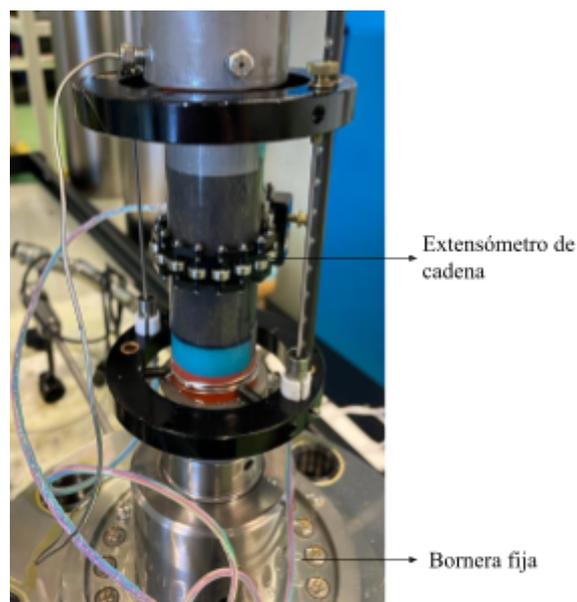


Figura 13-1. Celda integral de GCTS, *gentileza de YTec.*

14. Conclusiones

Alcanzado el plazo de un año de trabajo en la Celda Triaxial, se lograron grandes avances en cuanto a la puesta a punto mecánica, instrumentación y control, e integración de los tres aspectos.

En cuanto al aspecto mecánico, se realizaron las modificaciones propuestas para el correcto armado, traslado, y sellado de la Celda Triaxial y la central hidráulica, garantizando un funcionamiento apropiado y seguro. Adicionalmente se diseñaron y manufacturaron accesorios complementarios para facilitar la manipulación de la celda, la comodidad de trabajo y la puesta a punto de los sensores en cada ensayo. Finalmente, se logró caracterizar los parámetros dinámicos del movimiento del pistón, de manera de tener un cálculo preciso de las tensiones aplicadas durante un ensayo y poder aplicar sistemas de control óptimos.

En cuanto a la instrumentación, se caracterizaron en detalle los nuevos sensores adquiridos y se revalidaron los preexistentes. Se asegura una correcta configuración de los módulos adicionales SCU y ULT-200 para el correcto funcionamiento del sistema. Se diseñaron, construyeron y probaron con éxito en diferentes condiciones ambientales conexiones para comunicar los instrumentos dentro de la celda con el exterior de la misma. Se integraron con éxito los nuevos sensores con el sistema de control y la instalación eléctrica, modificando el tablero preexistente.

Sobre el control, se desarrolló un programa principal que permite realizar los ensayos previstos y también se generaron y adjuntan programas que permitieron la caracterización de sensores y parámetros físicos del sistema. Se pudo integrar el control de la Celda con el programa de post-procesamiento de datos ya utilizado por el laboratorio de petróleo.

En base a la integración de los tres puntos anteriores, se logró ensayar distintos materiales tanto dentro de la celda, como dentro de la misma con y sin presión de confinamiento. Por fuera de la celda, se realizaron ensayos de compresión uniaxial validando la correcta puesta a punto del conjunto de sensores contra resultados de patrones, y, ensayos ultrasónicos con resultados también exitosos. Dentro de la celda, se realizaron ensayos ultrasónicos con y sin confinamiento, obteniendo los resultados de las **Figuras 12-2 y 12-3**, validando la variación de las propiedades mecánicas de la roca contrastada contra respuestas constantes del aluminio.

No se lograron alcanzar todos los resultados propuestos debido a la inesperada falla del LVDT Externo que trajo a la luz el enclavamiento de dos piezas en la parte inferior de la celda. Se estudió este último problema y se encontró un perfil de rosca inadecuado para la carga a la que se somete el sistema. Se propone una solución utilizando un perfil de rosca de potencia dado que, independientemente del funcionamiento de dicho LVDT, se debe poder garantizar la apertura de la Tapa Inferior y desarme de la totalidad de la celda. Por el motivo anterior, si bien se realizaron protocolos y programas de control para los ensayos triaxiales, estos no pudieron ser implementados y son de carácter tentativo.

Finalmente, el equipo no quiere dejar de destacar y agradecer la ayuda y colaboración de los tutores y docentes del departamento de mecánica: Maximiliano Vega en cuanto a los inconvenientes con sensores y diseño de conexiones; Joaquín Infantino, por solucionar problemas de todo tipo dentro del taller y proveer material de buena voluntad; Aníbal Rodríguez, por el asesoramiento en cuanto a ensayos y caracterización de materiales; Ricardo Lauretta por su colaboración en el manejo y ensamblado de sistemas hidráulicos de alta presión; Luciano Santos, por la ayuda con el mantenimiento de la central hidráulica y permanente ayuda en el taller al igual que Victor Lizza y Ezequiel Flores en cuestiones de mecanizado y operación dentro del CIDIM.

15. Referencias y bibliografía

- [1] Blanco, Santiago y Paterlini, Federico, Máquina de Ensayo Triaxial, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Buenos Aires, 2014, disponible en <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/248> (fecha de consulta: 15/8/2022).
- [2] Guardone, Pedro, Instrumentación y Control de una Máquina de Ensayos Triaxiales, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Buenos Aires, 2017, disponible en <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/846> (fecha de consulta: 15/8/2022).
- [3] ASTM D2845-08, Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, ASTM International, West Conshohocken, 2008.
- [4] 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.
- [5] Catolog O-Ring Handbook_ORD5700, Parker, 2022, disponible en: <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/O-Ring-Division-Literature/ORD-5700.pdf> (fecha de consulta: 23/10/2022).
- [6] M. Sadd, Elasticity. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, 2005.
- [7] ASTM E8/E8M-13a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, 2013.
- [8] ASTM A255-10 (Reapproved 2014), Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, ASTM International, West Conshohocken, 2014.
- [9] IAS-IRAM, Acero para Construcciones Mecánicas IRAM 4140.
- [10] Omega. “Transductores de desplazamiento variable”, disponible en: <https://es.omega.com/technical-learning/transductores-de-desplazamiento-variable-lineal.html> (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [11] Series WF feedthroughs, Spectrite, disponible en: <https://spectrite.co.uk/wf.htm> (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [12] Ultrasonic Velocity Test System (ULT-200), GCTS, disponible en: <https://www.gcts.com/wp-content/uploads/2020/11/Ultrasonic-Velocity-Test-Equipment-for-Soils.pdf> (fecha de consulta: 14/8/2023).

- [13] Cantilever Bridge Deformation Device (DEF-CAN), GCTS, disponible en: <https://www.gcts.com/wp-content/uploads/2020/11/Diametral-Deformation-Equipment.pdf> (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [14] Pressure transducer for hydraulic applications Type HM20, Bosch Rexroth, 2022, disponible en: https://www.boschrexroth.com/es/ar/search.html?s=download&q=%22re30272%22&_3_vocabId_4354720=4677637&num=10 (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [15] Proportional pressure relief valve, without/with integrated electronics (OBE) Type DBET and DBETE, Bosch Rexroth, 2013, disponible en: https://store.boschrexroth.com/Hydraulics/Valves/Pressure-valves/pressure-limitation/en/us/en/us/PROPORTIONAL-PRESSURE-RELIEF-VALVE_R901029968 (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [16] TM241CE24T, Schneider Electric, 2019, disponible en: https://product-help.schneider-electric.com/Machine%20Expert/VI.1/es/m241hw/m241hw/TM241CE24T/TM241CE24T.htm#XREF_D_SE_0032569_1 (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [17] PT Series Miniature Cylindrical Connectors, Amphenol, disponible en: <https://www.amphenol-industrial.com/images/catalogs/PT.pdf> (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [18] TM3AI8 Product Datasheet, Schneider Electric, 2019, disponible en: <https://www.se.com/us/en/product/TM3AI8/analog-input-module-modicon-tm3-8-inputs-screw-24v-dc/> (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [19] TM3AQ4 Ficha técnica del producto, Schneider Electric, 2023, disponible en: <https://www.se.com/mx/es/product/TM3AQ4/module-tm3-4-analog-outputs-/> (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [20] HMIS5T Product Datasheet, Schneider Electric, 2023, disponible en: <https://www.se.com/us/en/product/HMIS5T/rear-panel-harmony-sto-stu-module-dark-grey-width-118mm-depth-40-1mm/> (fecha de consulta: 14/8/2023).
- [21] Butterworth, S. (1930). "On the Theory of Filter Amplifiers" (PDF). *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*. 7: 536–541.
- [22] Blackman, R.B.; Tukey, J.W. (1959-01-01). *The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering*. Dover Publications. p. 99. ISBN 9780486605074.
- [23] Maurice A. Biot. General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12 (2), pp.155-164. ff10.1063/1.1712886ff. fhal-01368635f

Anexo A. Señales de ensayos Ultrasónicos

A.1 Ensayos fuera de la celda

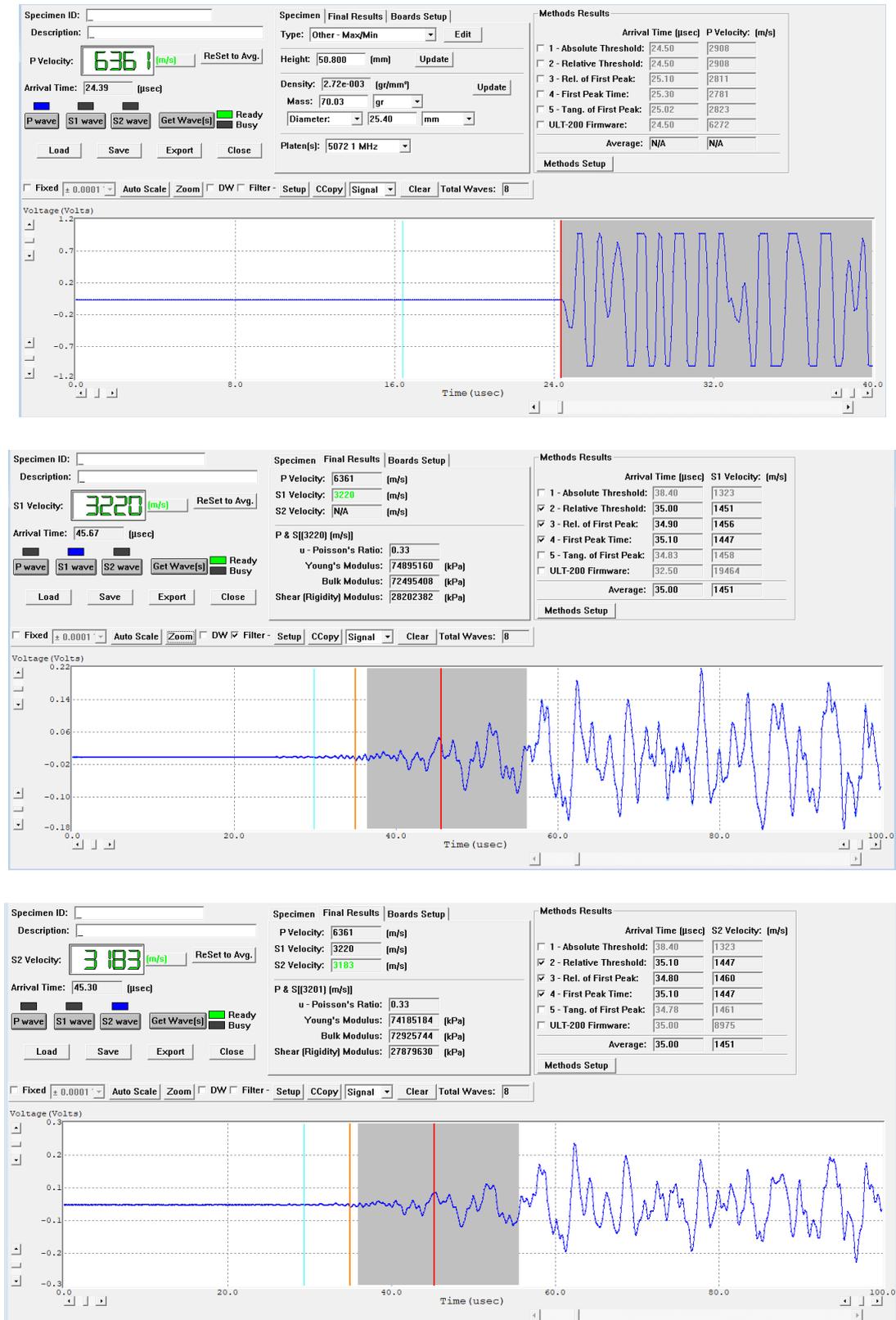


Figura A.1-1. Ensayo ultrasónico para Aluminio Patrón.

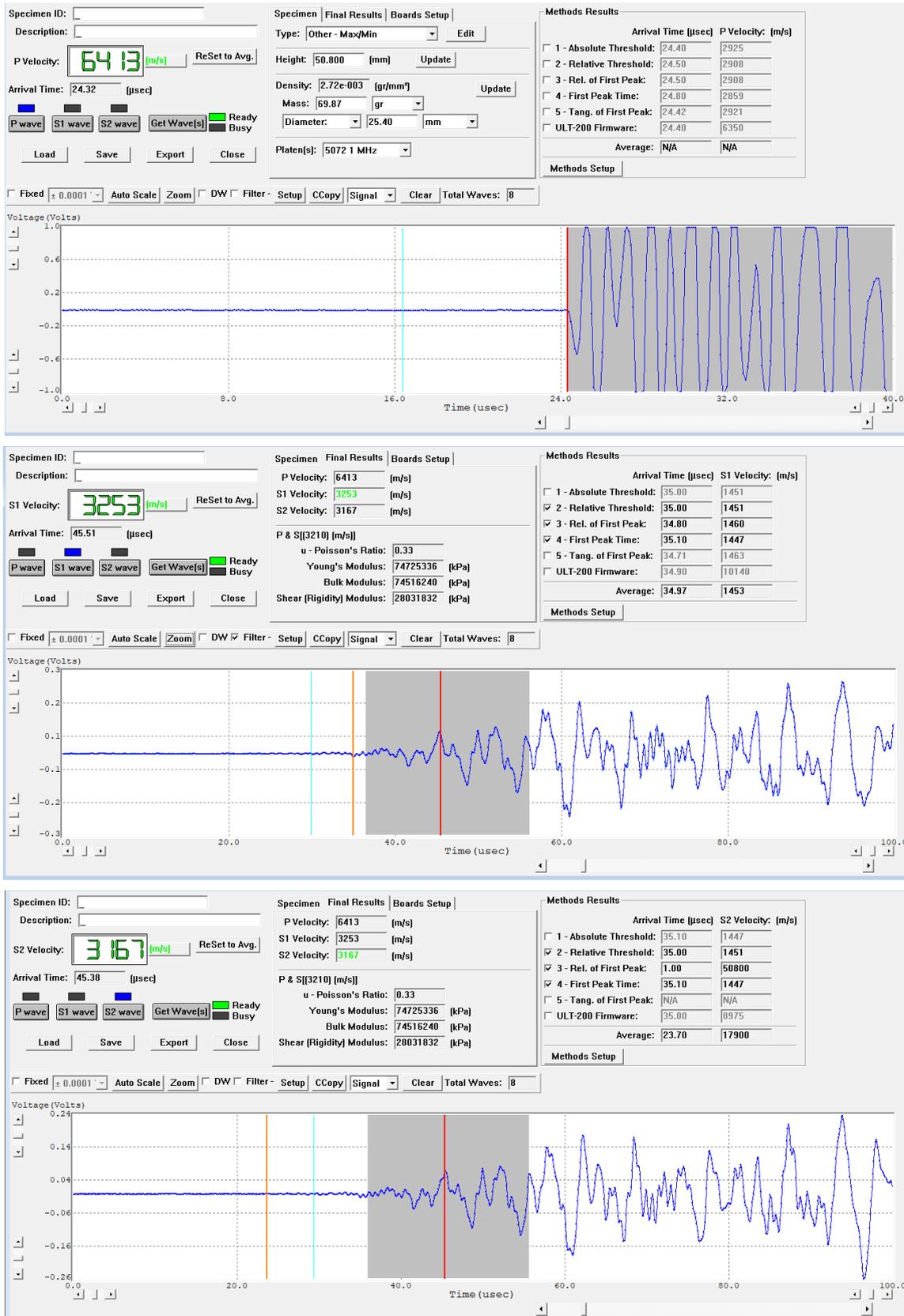


Figura A.1-2. Ensayo ultrasónico para Aluminio Copia.

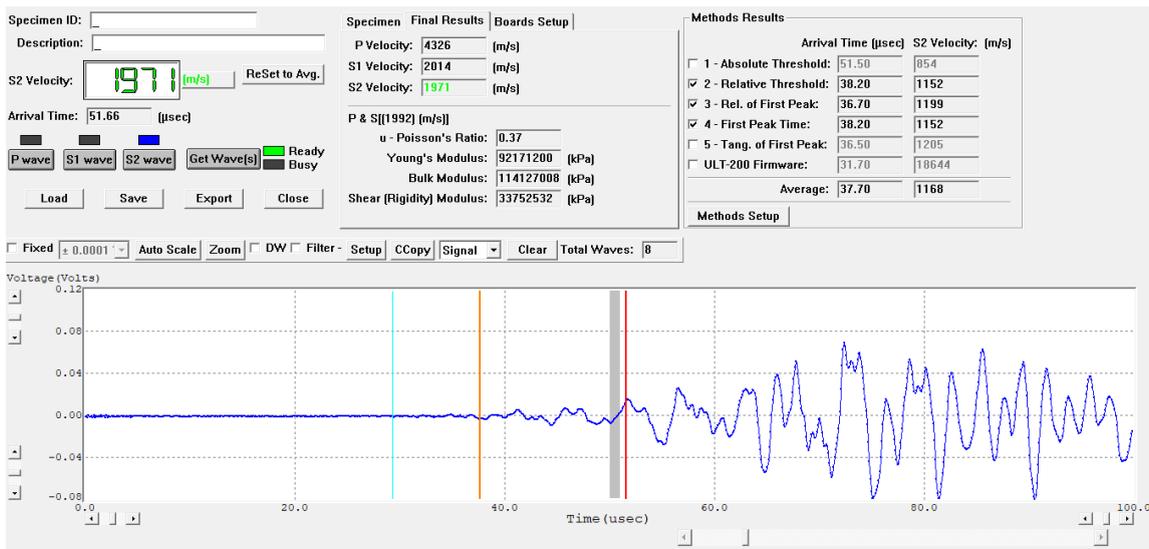
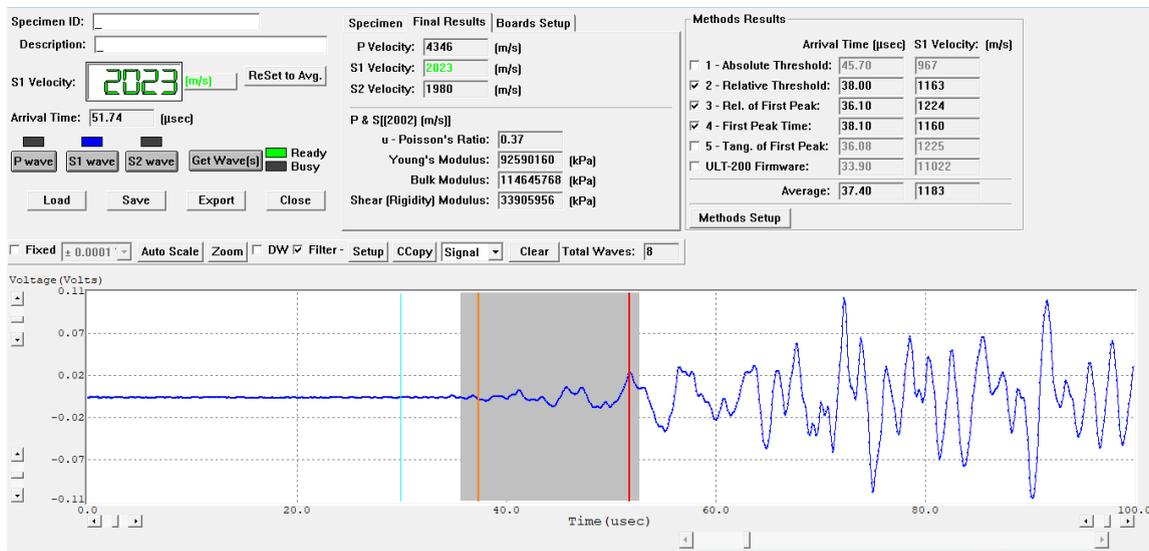
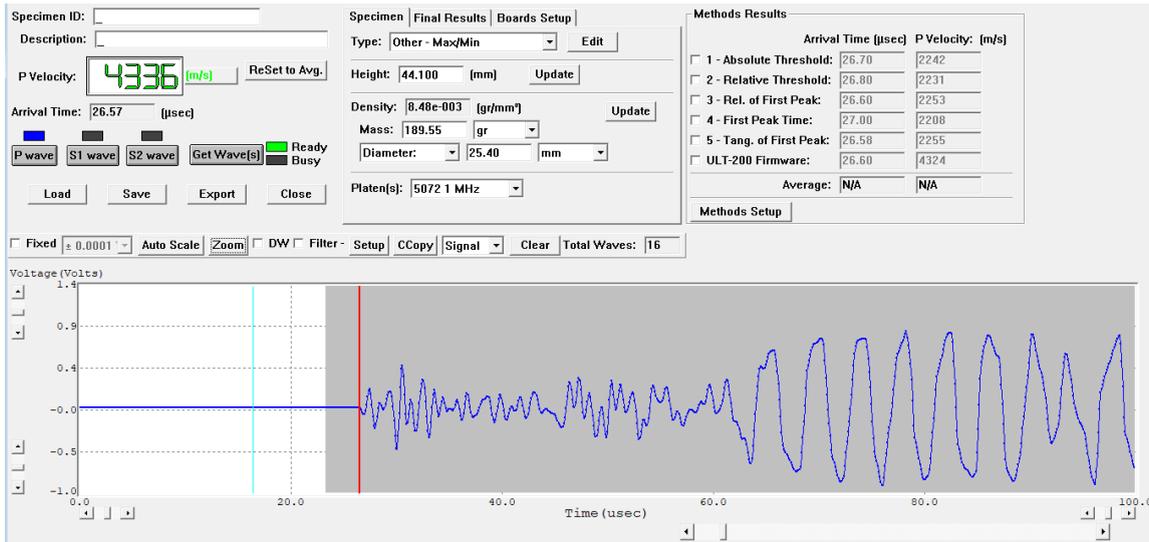


Figura A.1-3. Ensayo ultrasónico para Latón.

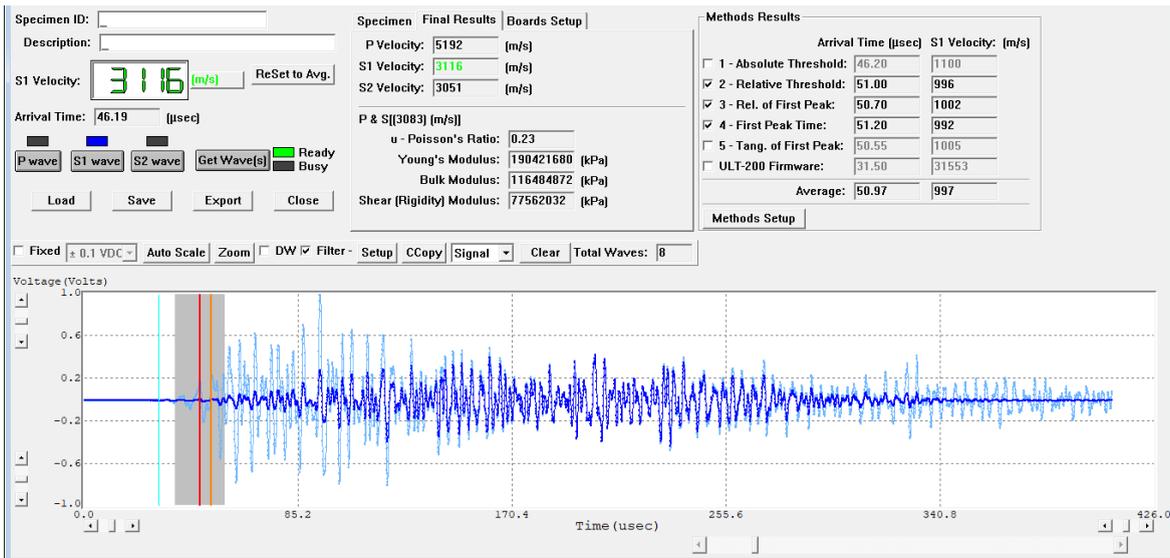
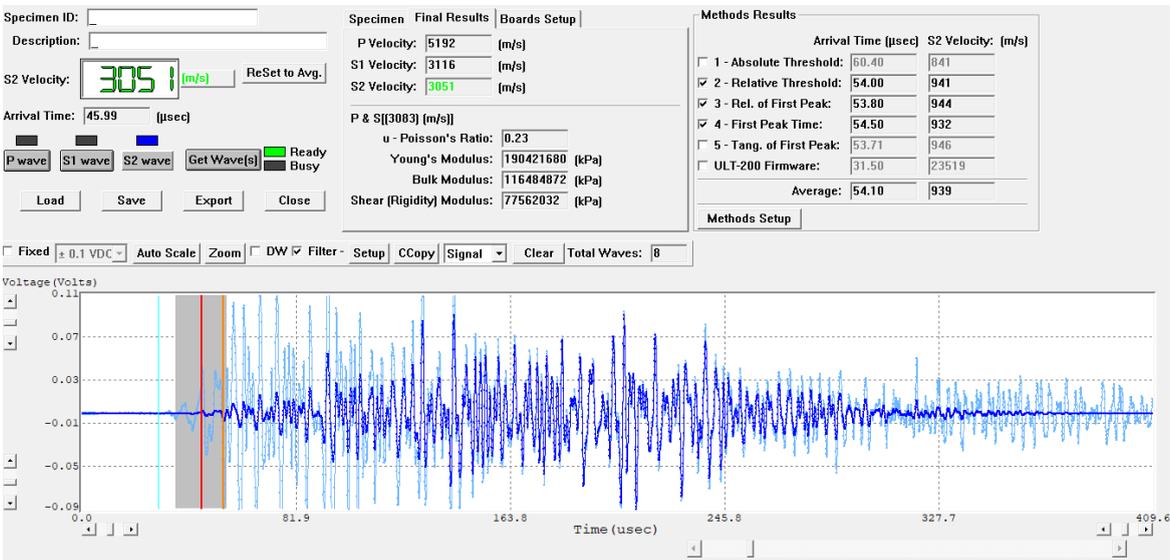
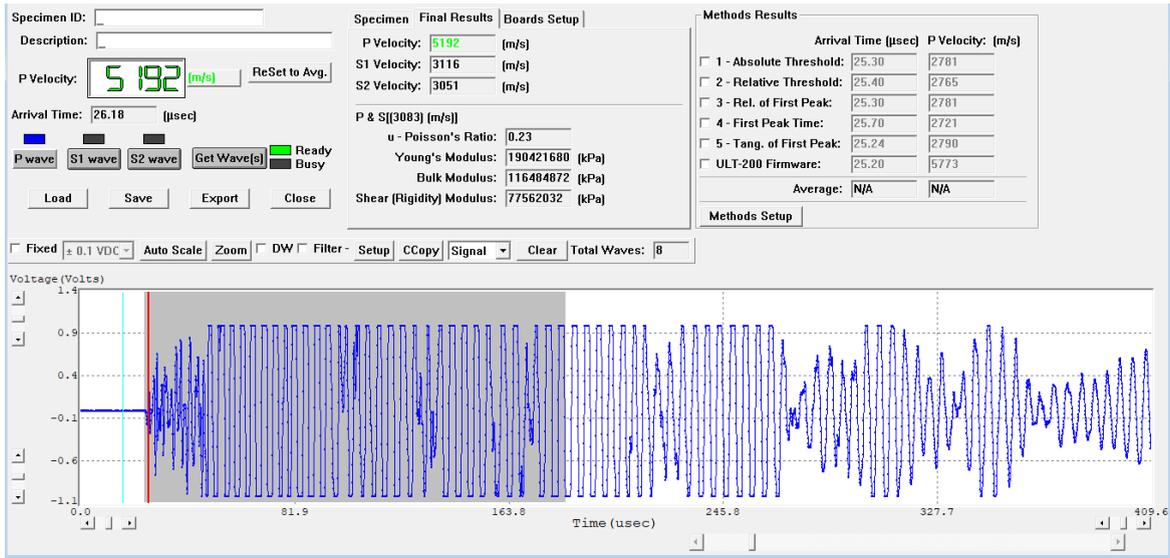


Figura A.1-4. Ensayo ultrasónico para Acero.

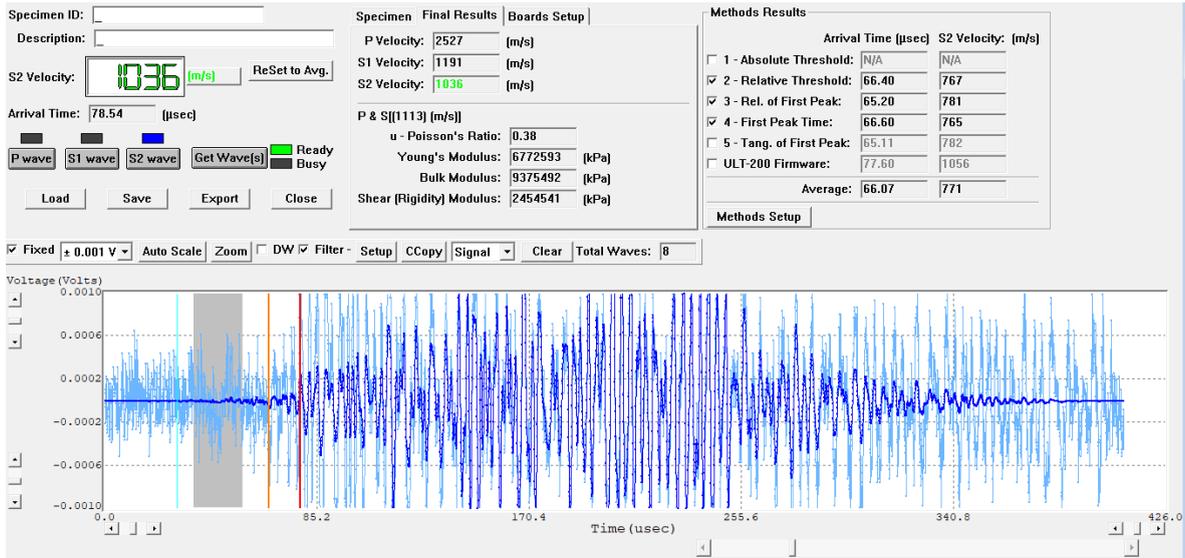
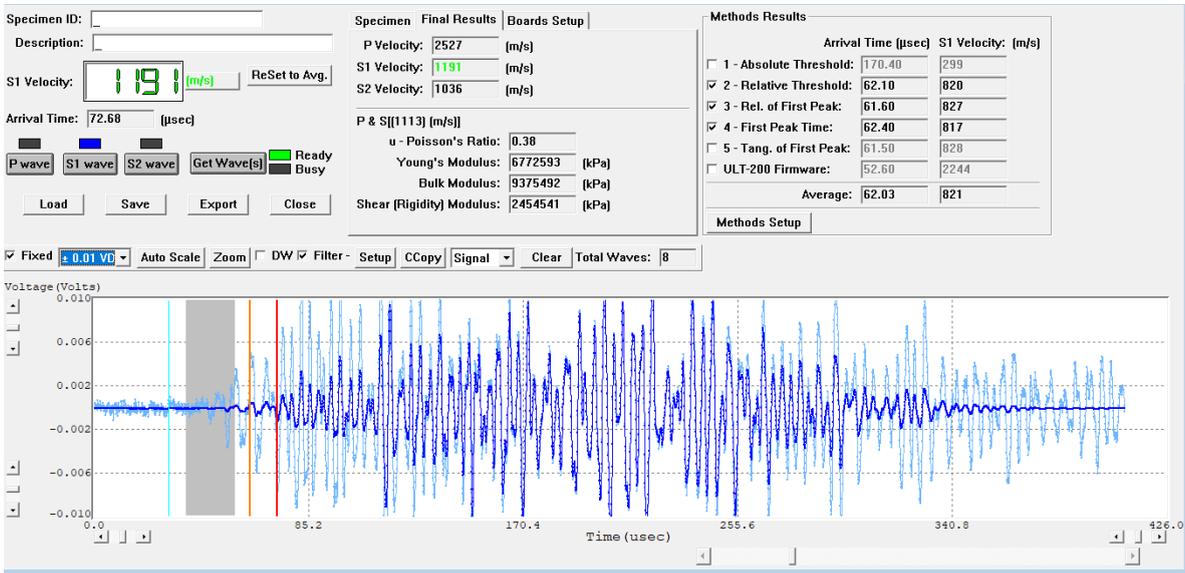
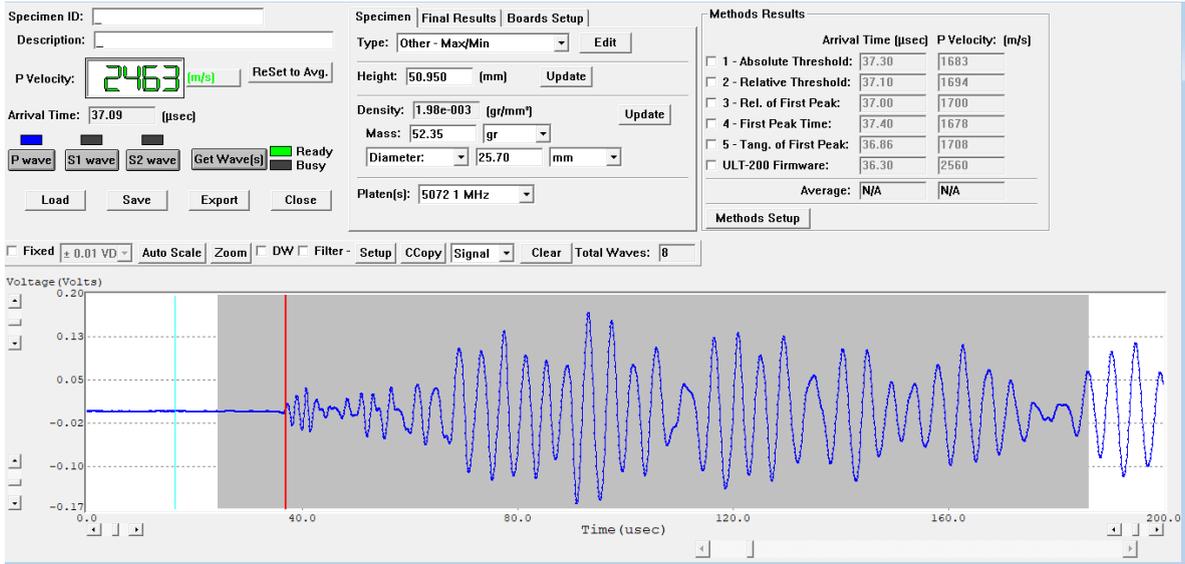


Figura A.1-5. Ensayo ultrasónico para Roca Patrón.

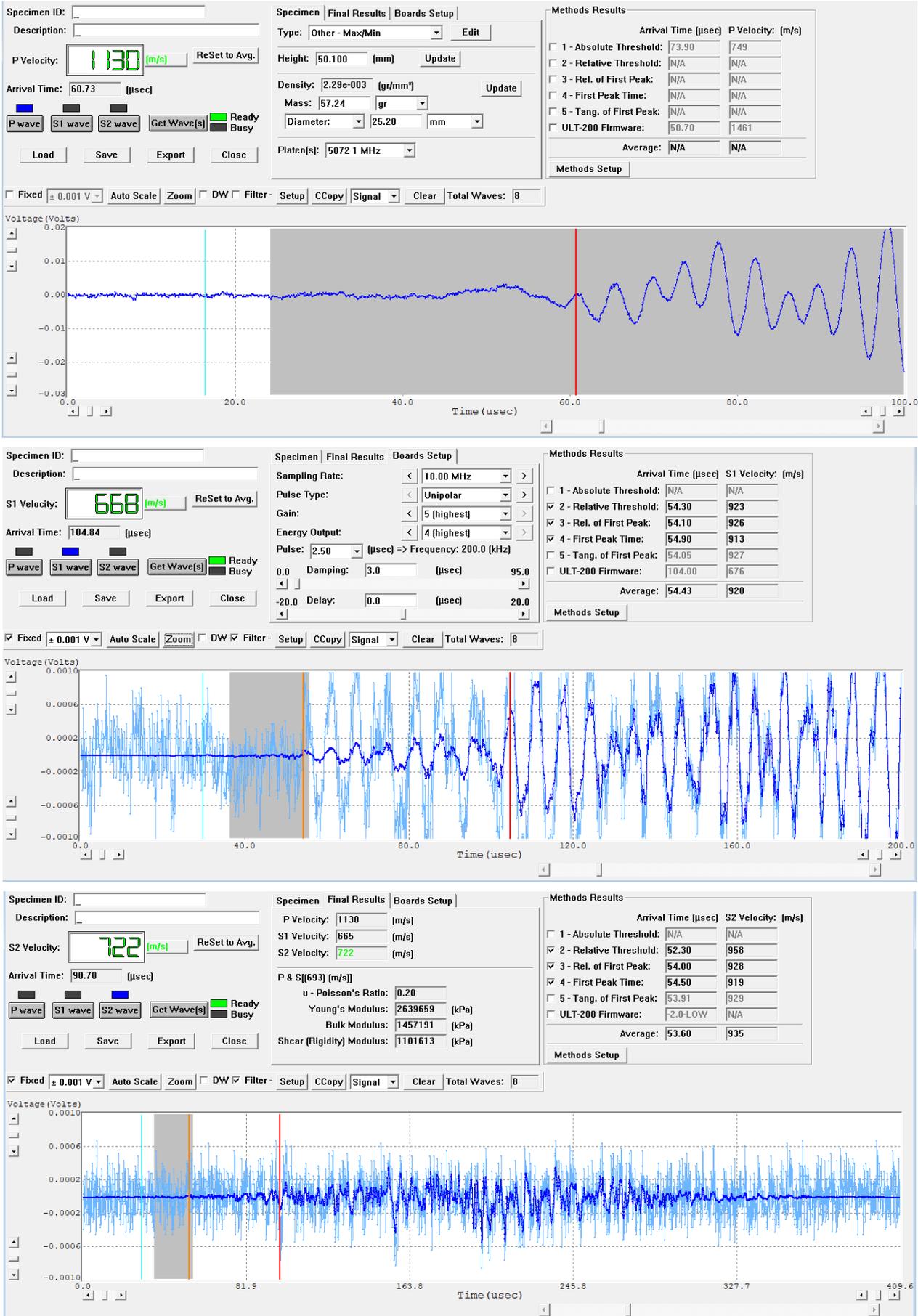


Figura A.1-6. Ensayo ultrasónico para Roca M4112.

A.2 Ensayos dentro de la celda (P, S1, S2, en orden)

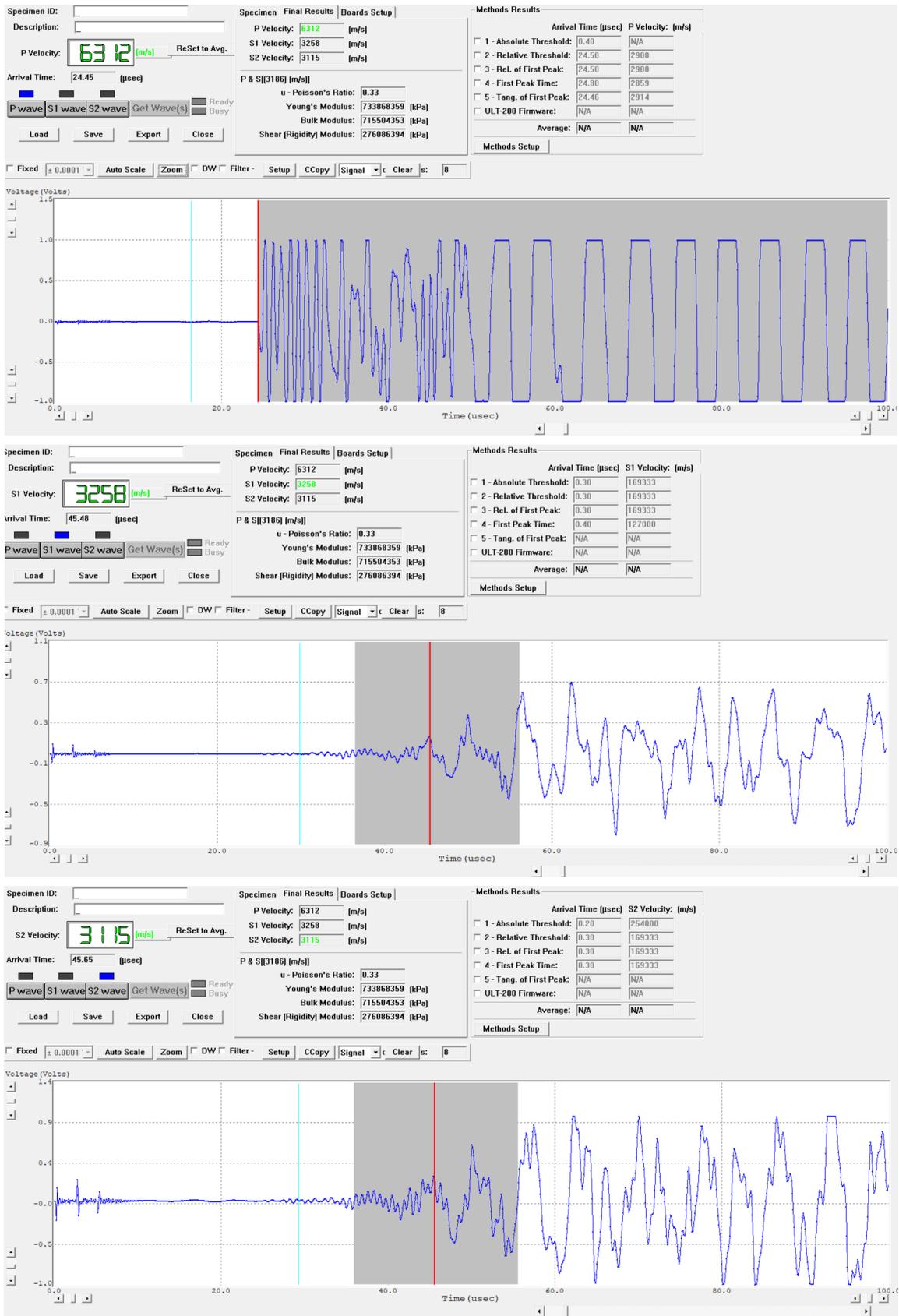


Figura A.2-1. Aluminio Patrón 0 MPa de Confinamiento.

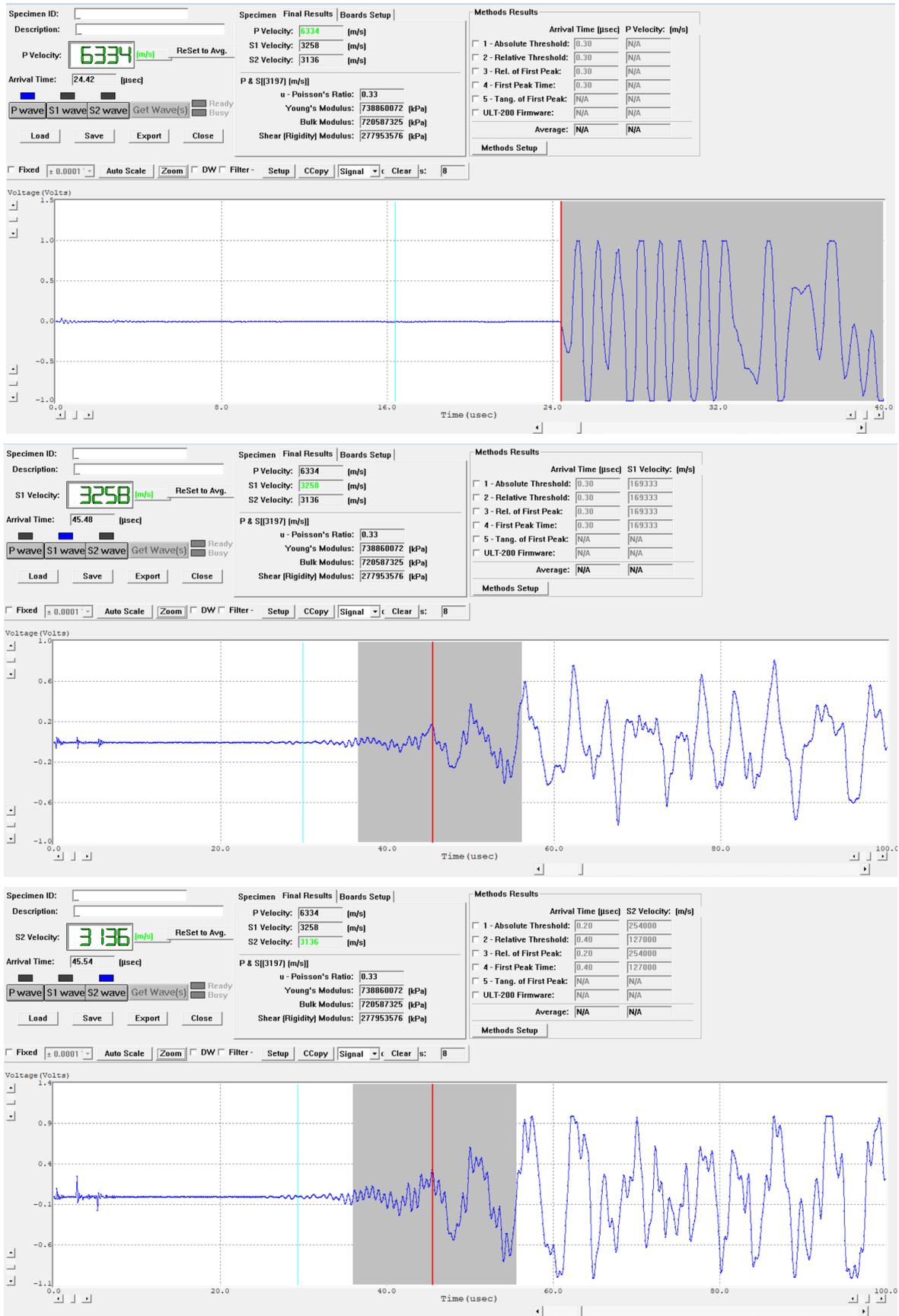


Figura A.2-2. Aluminio Patrón 10 MPa de Confinamiento.

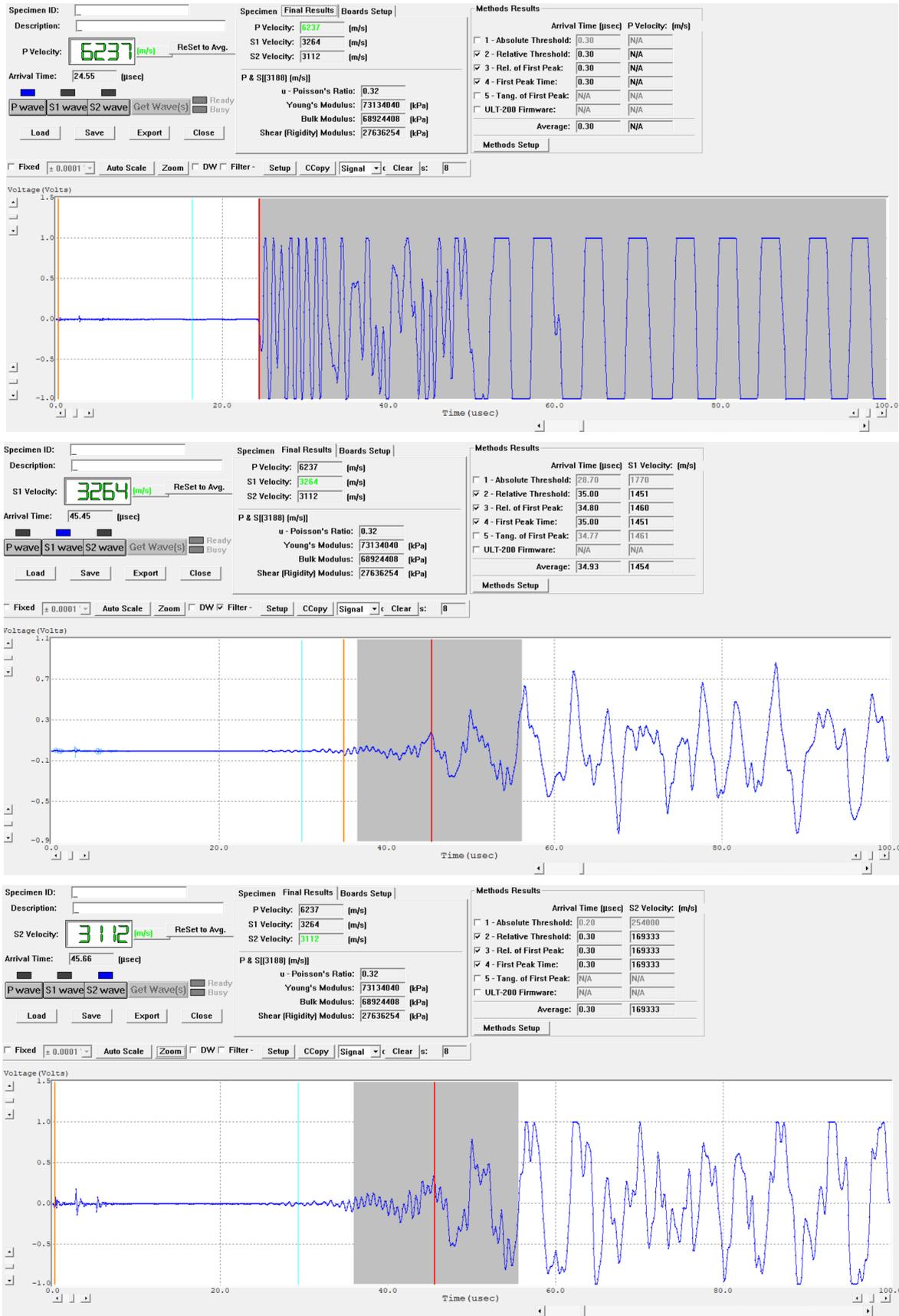


Figura A.2-3. Aluminio Patrón 20 MPa de Confinamiento.

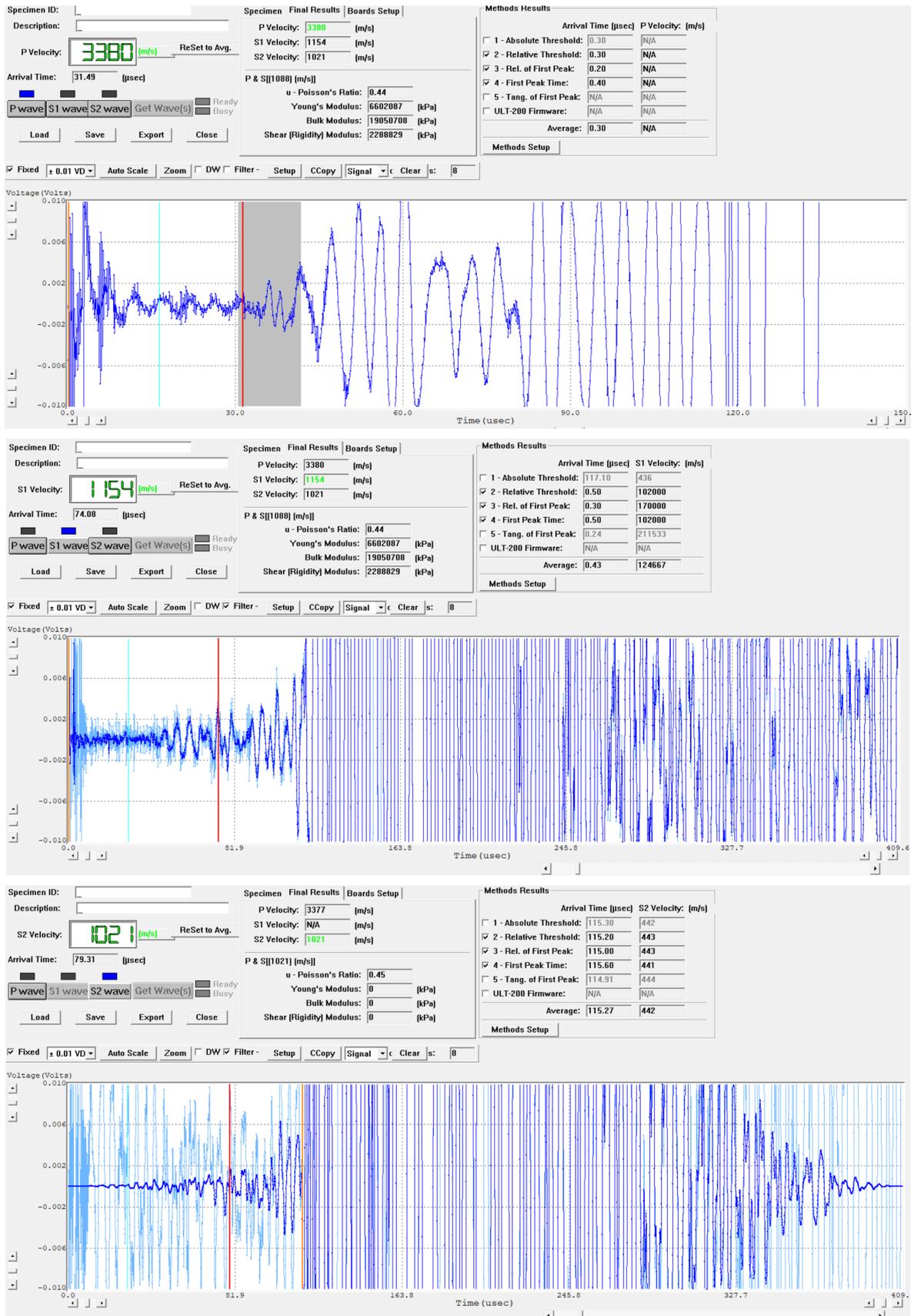


Figura A.2-4. Roca Patrón 0 MPa de Confinamiento.

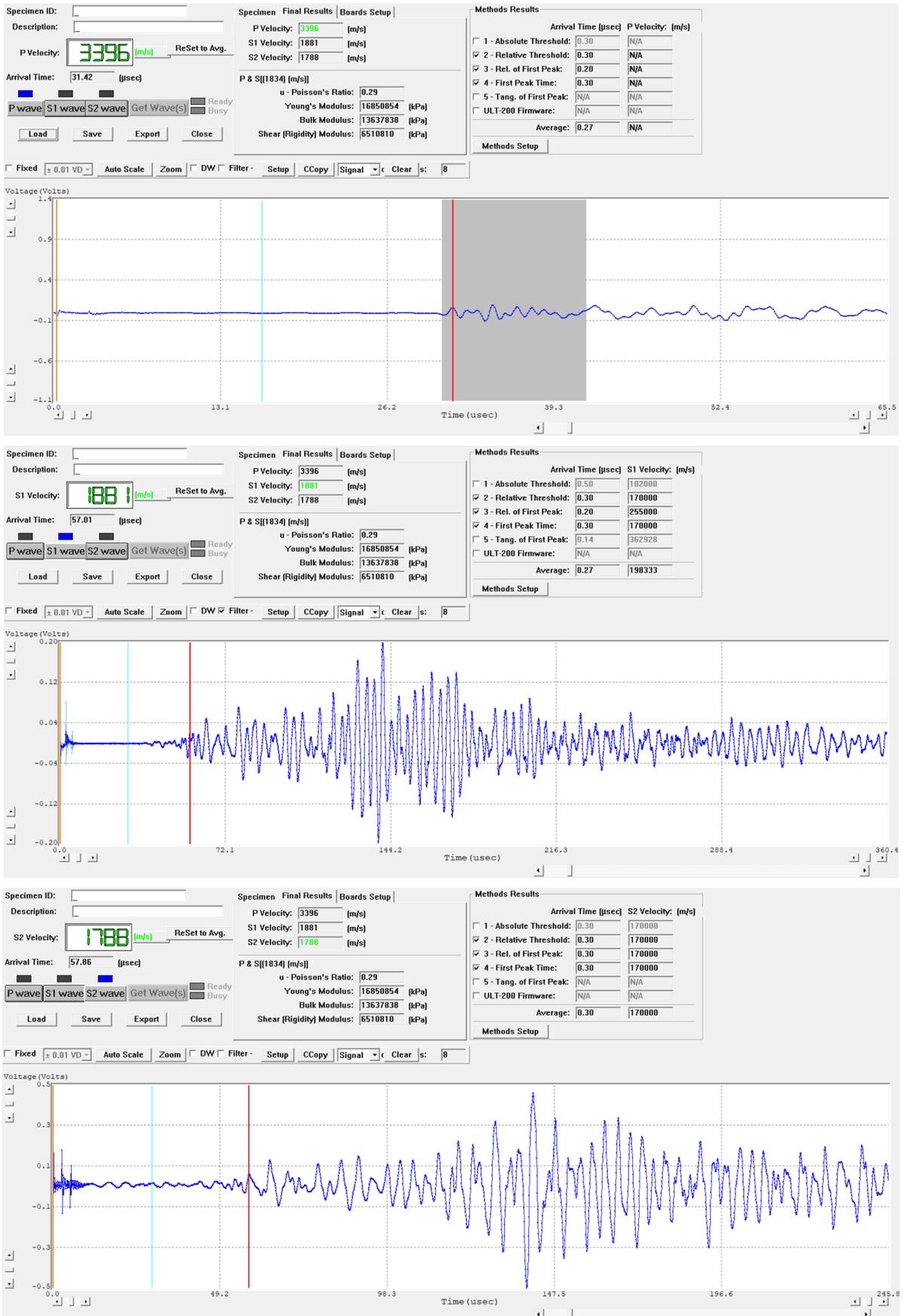


Figura A.2-5. Roca Patrón 10 MPa de Confinamiento.

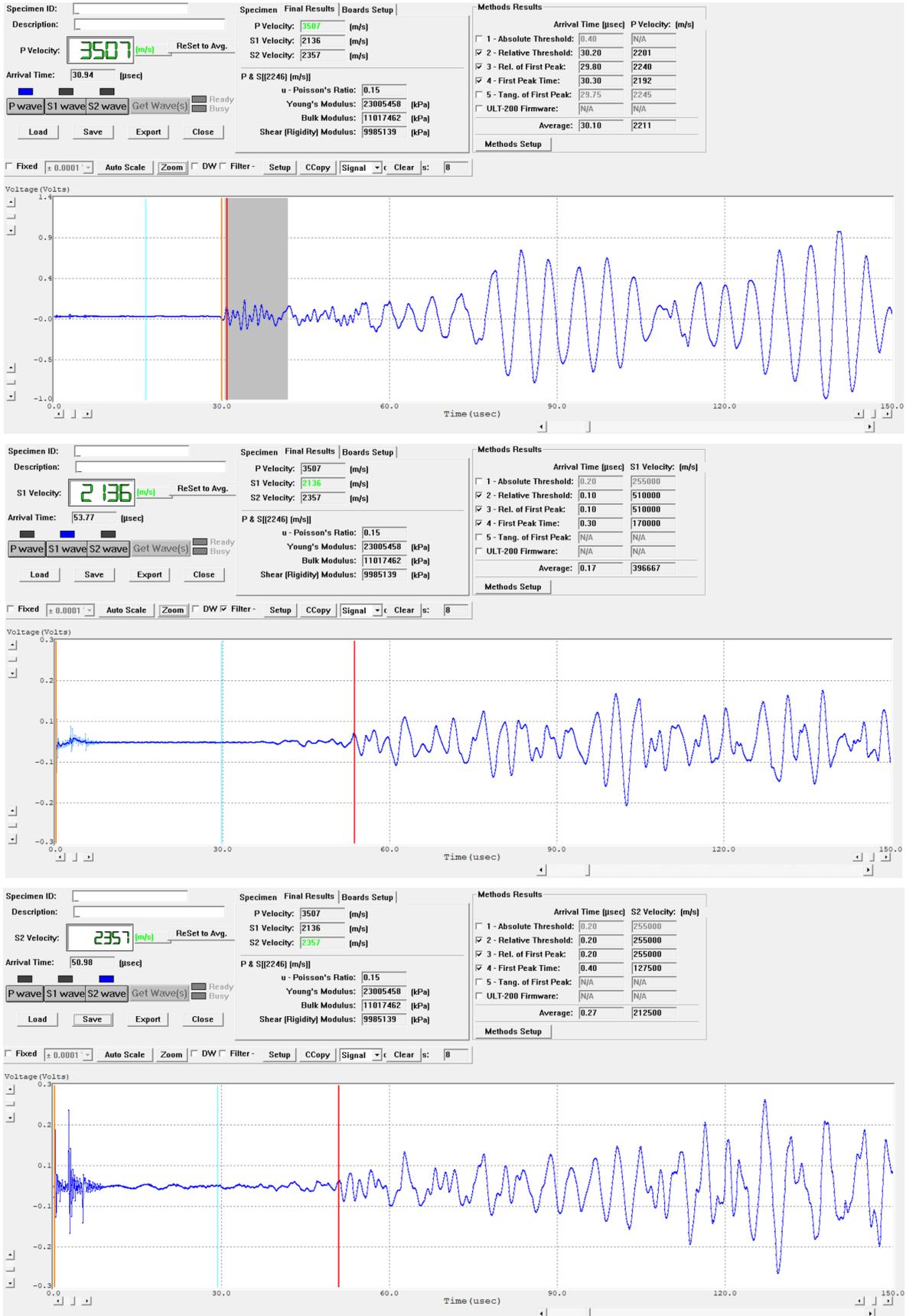


Figura A.2-6. Roca Patrón 20 MPa de Confinamiento.

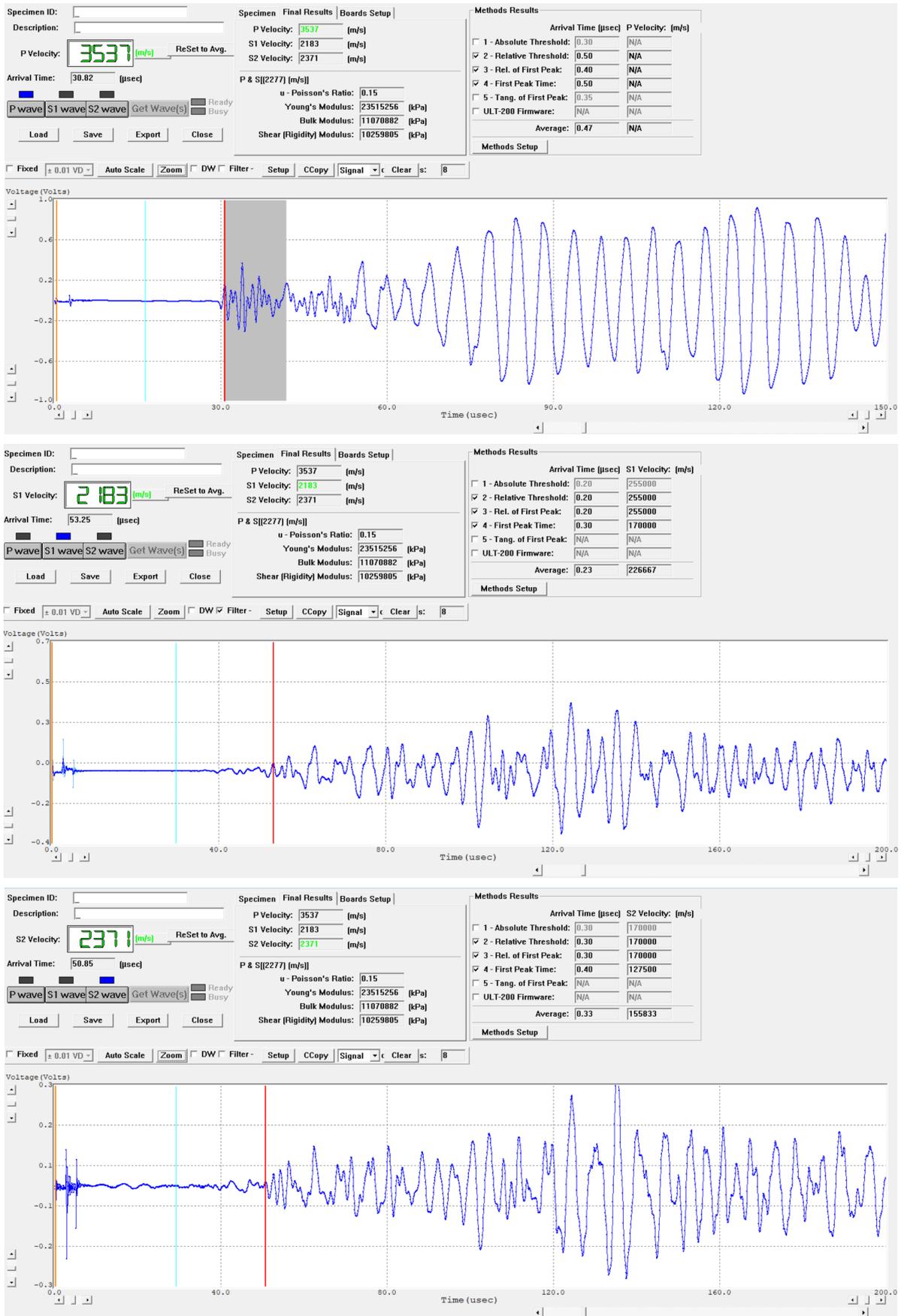


Figura A.2-7. Roca Patrón 30 MPa de Confinamiento.

Anexo B. Planos eléctricos y conexionado

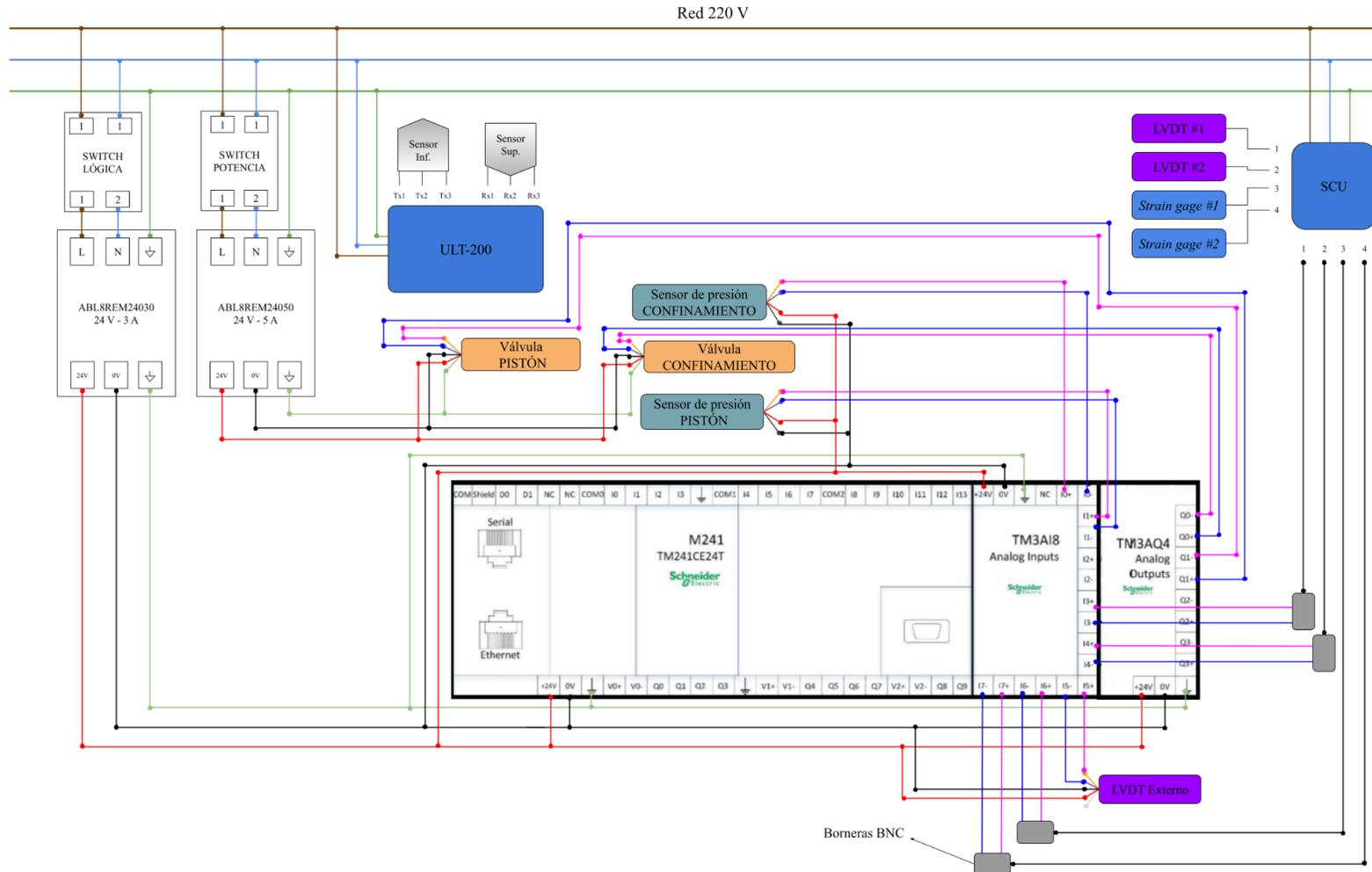


Figura B-1. Conexionado completo de sensores y actuadores.

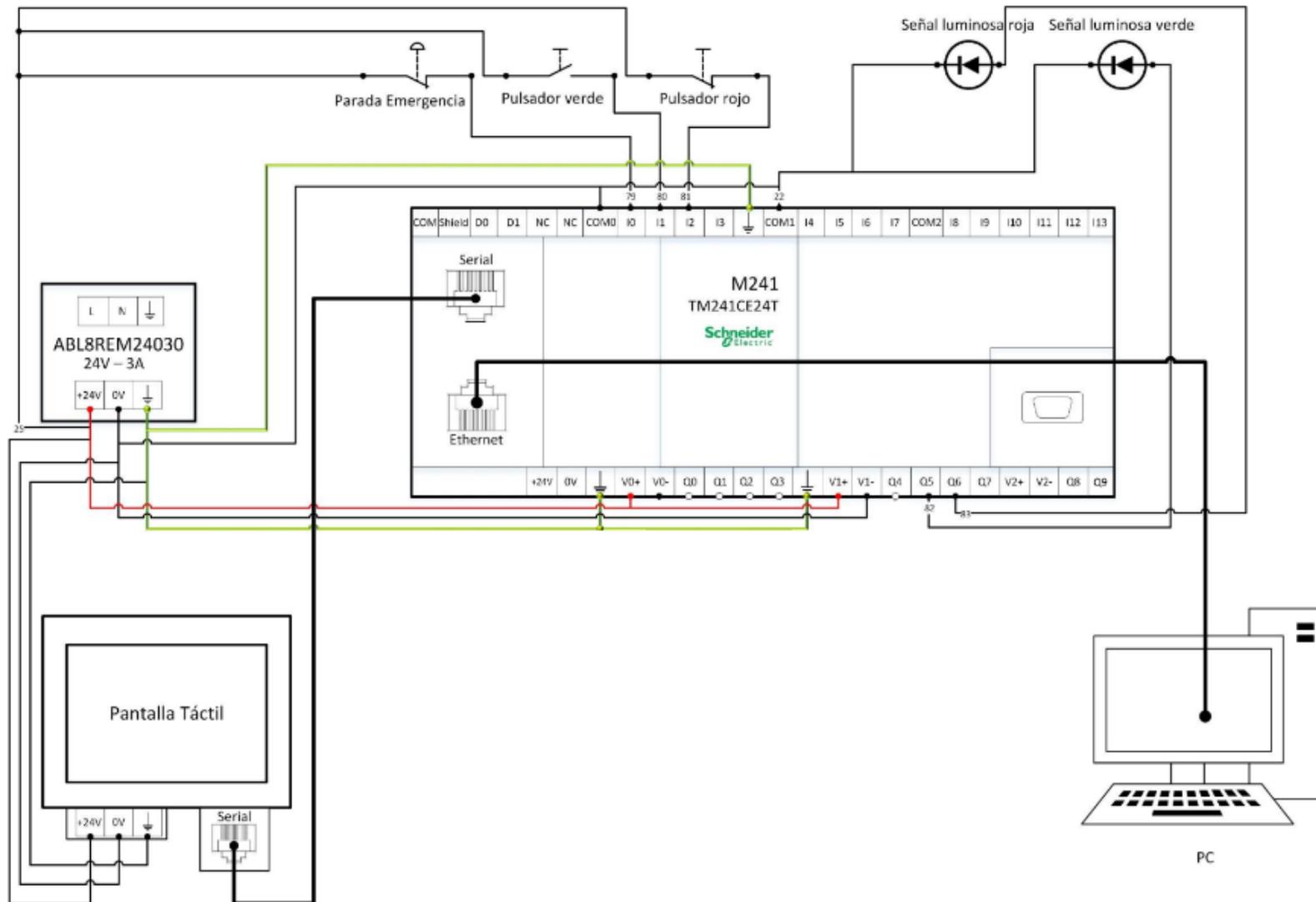


Figura B-2. Conexión completa de periférico.

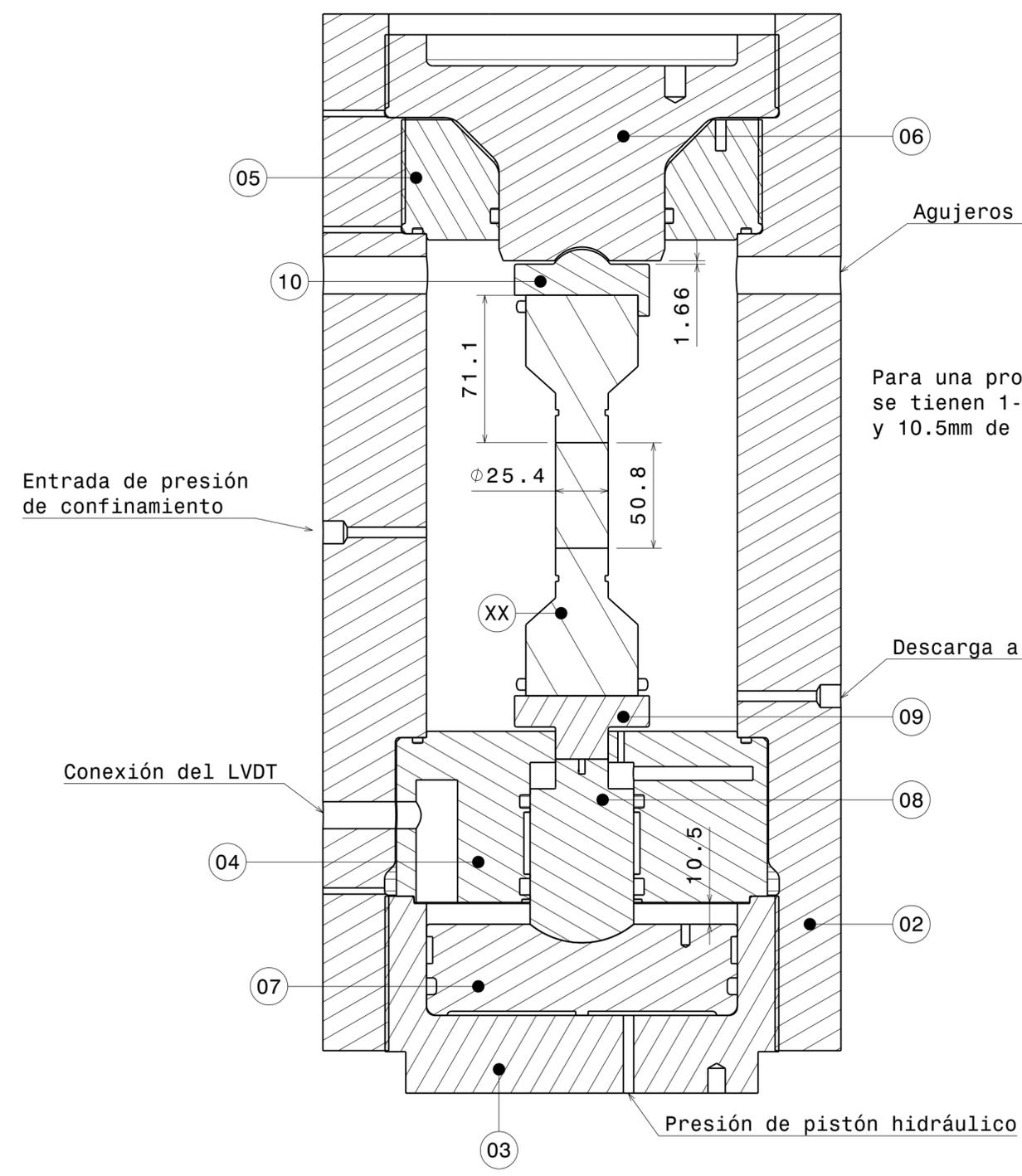
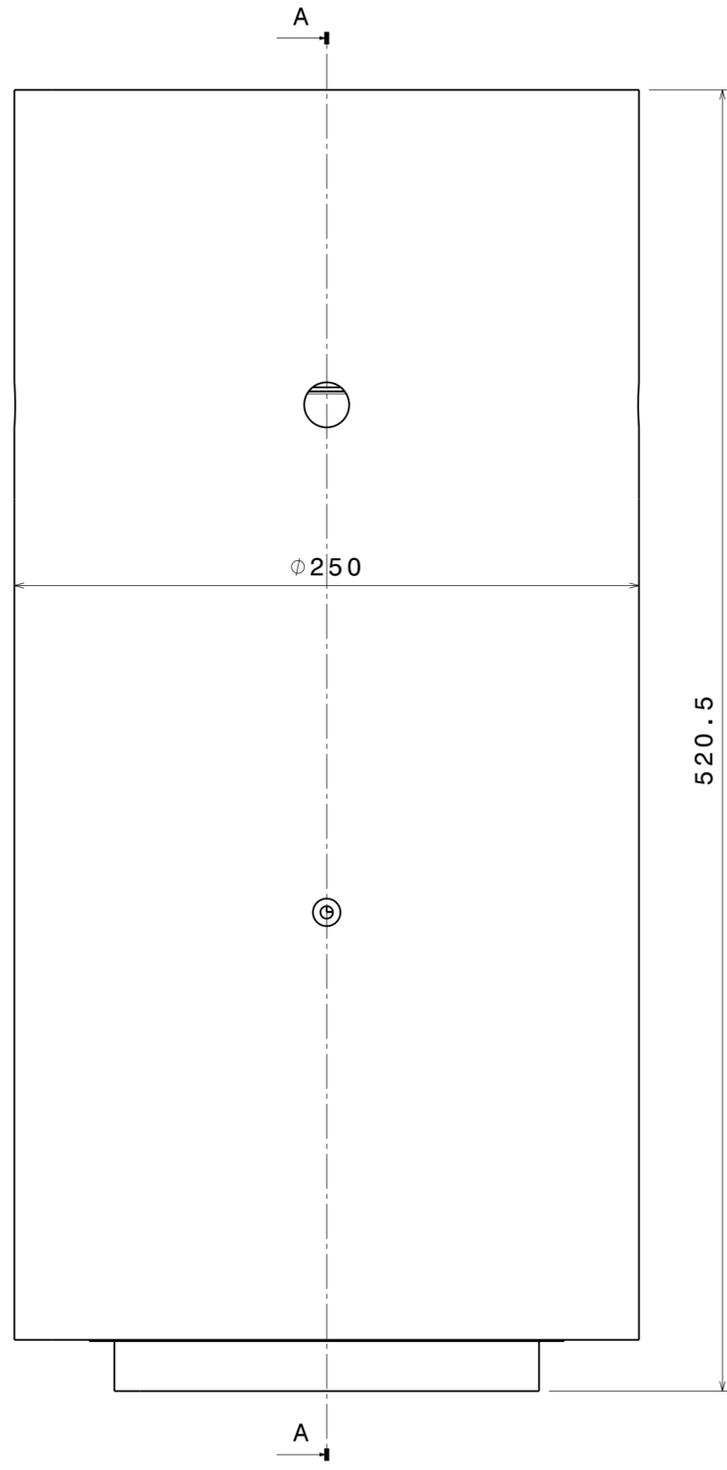
Anexo C. Planos de mecanizado

A continuación se listan los planos de mecanizado tanto de las piezas que conforman la celda como de los accesorios complementarios mecanizados. También se incluyen planos de la solución por rosca de potencia para la unión Porta Pistón - Cuerpo Cámara. La **Tabla C-1** se incluye como referencia para los planos adjuntos.

Nro Plano	Denominación	Cantidad	Material
01	Conjunto Celda	-	-
02	Cuerpo Cámara*	1	AISI 1045
03	Porta Pistón*	1	AISI 1045
04	Cuerpo Sellos*	1	ASTM A105
05	Tapa Superior Externa*	1	AISI 1045
06	Tapa Superior Interna*	1	AISI 1045
07	Pistón Hidraulico ^[1]	1	ASTM A105
08	Piston Multiplicador ^[1]	1	ASTM A105 TyR
09	Pusher	1	ASTM A105 TyR
10	Catcher	1	ASTM A105 TyR
11	Sujetadores Probeta	2	ASTM A105 TyR
12	Alineadores LVDT	3	AISI 1020
13	Acople Torquimetrico	1	ASTM A105
14	Placa de Sujeción	1	AISI 1010
15	Cuerpo Cámara con Rosca de Potencia	1	AISI 1045
16	Porta Pistón con Rosca de Potencia	1	AISI 1045

* Modificación de planos anteriores por M. Gonzalez Segura, acomodando los cambios realizados.

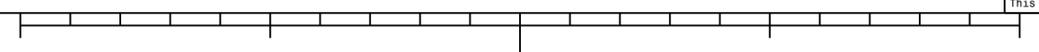
Tabla C-1. Lista de planos de mecanizado.

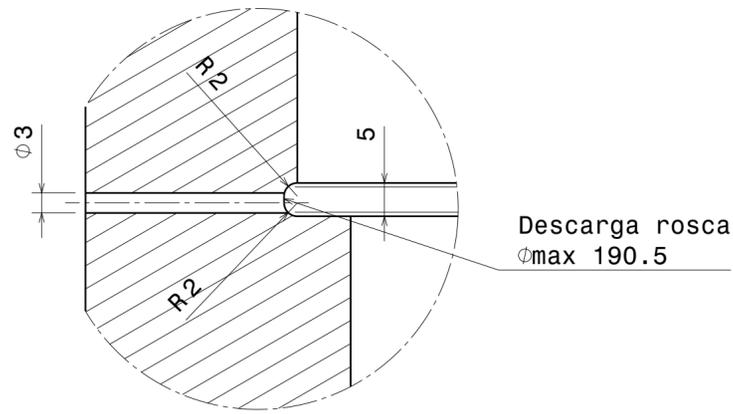


Para una probeta de 2" de largo x 1" de diámetro, se tienen 1-2mm de huelgo entre catcher y tapa sup int, y 10.5mm de carrera del pistón hidráulico.

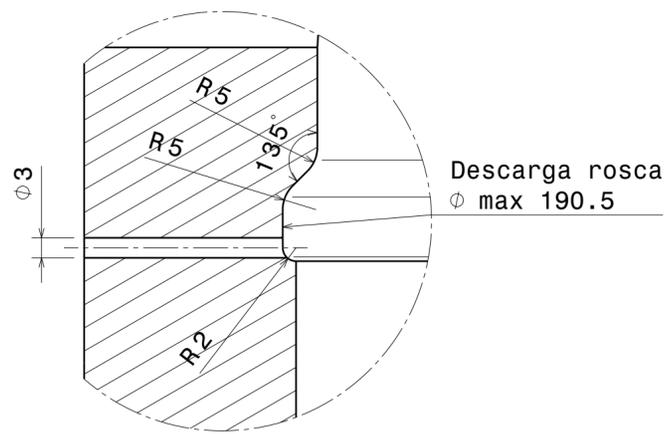
PIEZA	N° PLANO	MATERIAL
Cuerpo cámara	02	AISI 1045
Porta pistón	03	AISI 1045
Cuerpo sellos	04	ASTM A-105
Tapa superior externa	05	AISI 1045
Tapa superior interna	06	AISI 1045
Pistón hidráulico	07	ASTM A-105
Pistón multiplicador	08	ASTM A-105
Pusher	09	ASTM A-105
Catcher	10	ASTM A-105
Test piece	XX	-

DESIGNED BY:	<h1>Conjunto</h1>	I	-
DATE:		H	-
CHECKED BY:		G	-
DATE:		F	-
SIZE	<h2>Celda Triaxial 2.0</h2>	E	-
A2		D	-
SCALE	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER	SHEET
1:2	158	Plano-01	1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			

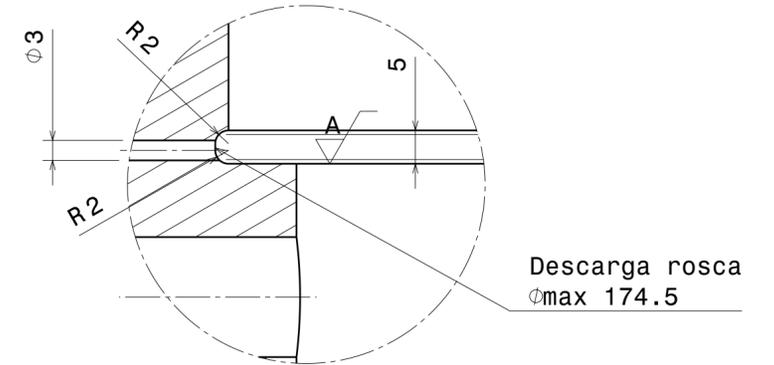




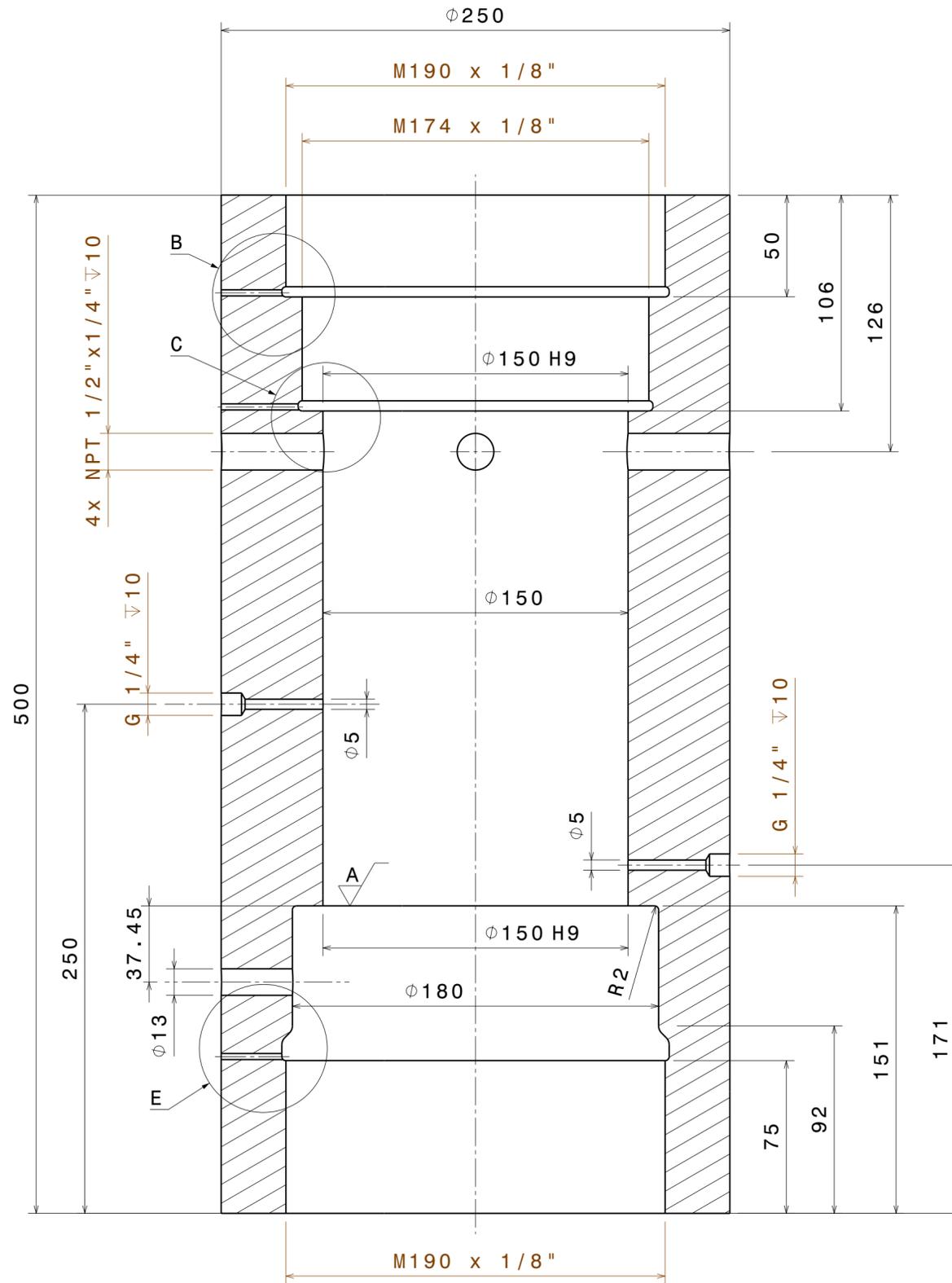
Detail B
Scale: 1.25:1



Detail E
Scale: 1.25:1



Detail C
Scale: 1.25:1

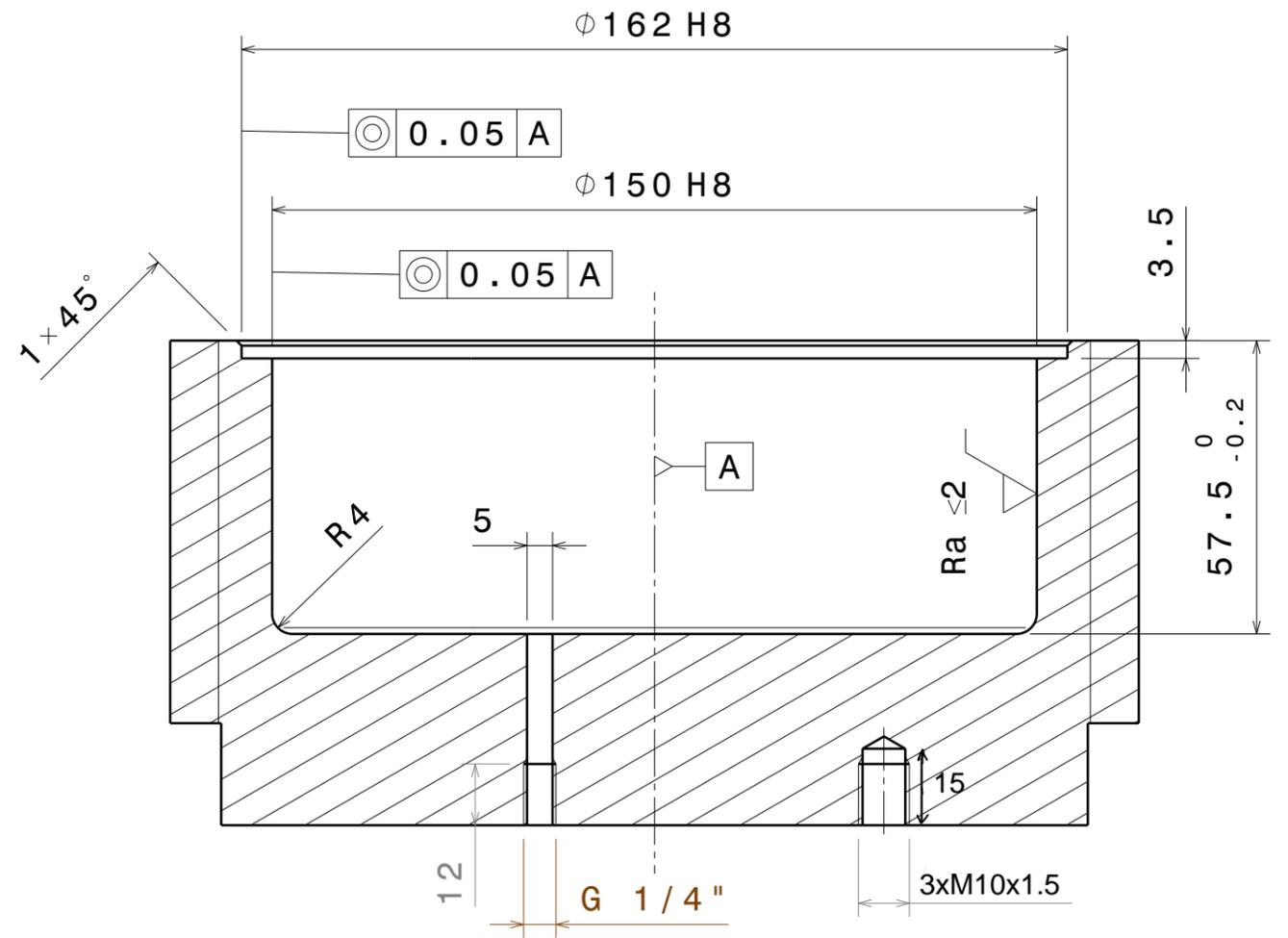
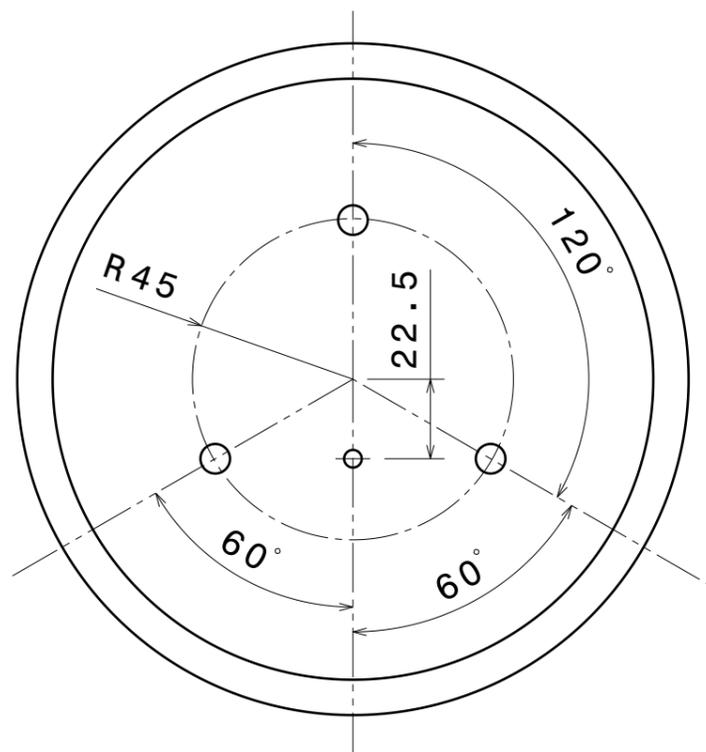
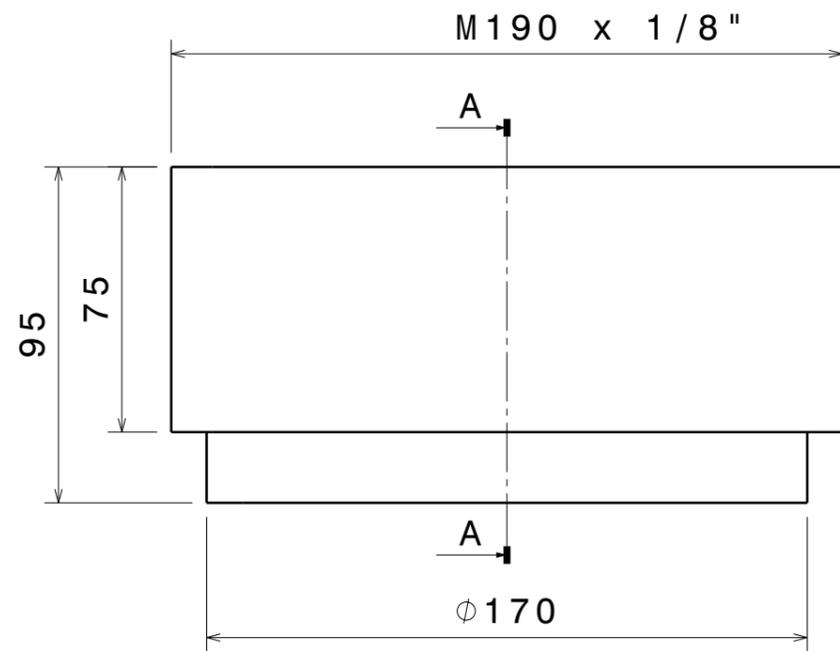


Section view A-A
Scale: 1:2

Requerimientos
rugosidad
A-Ra 1.60 μm Rmax 6.30
B-Ra 3.20 μm Rmax 12.50

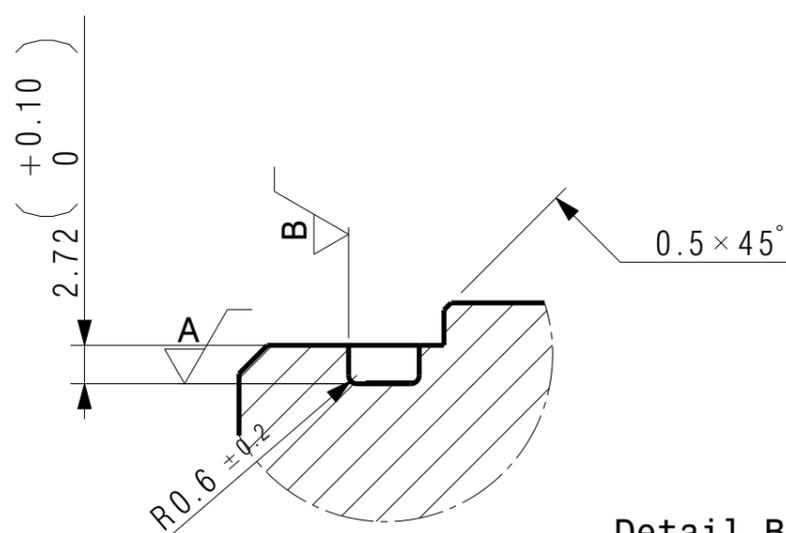
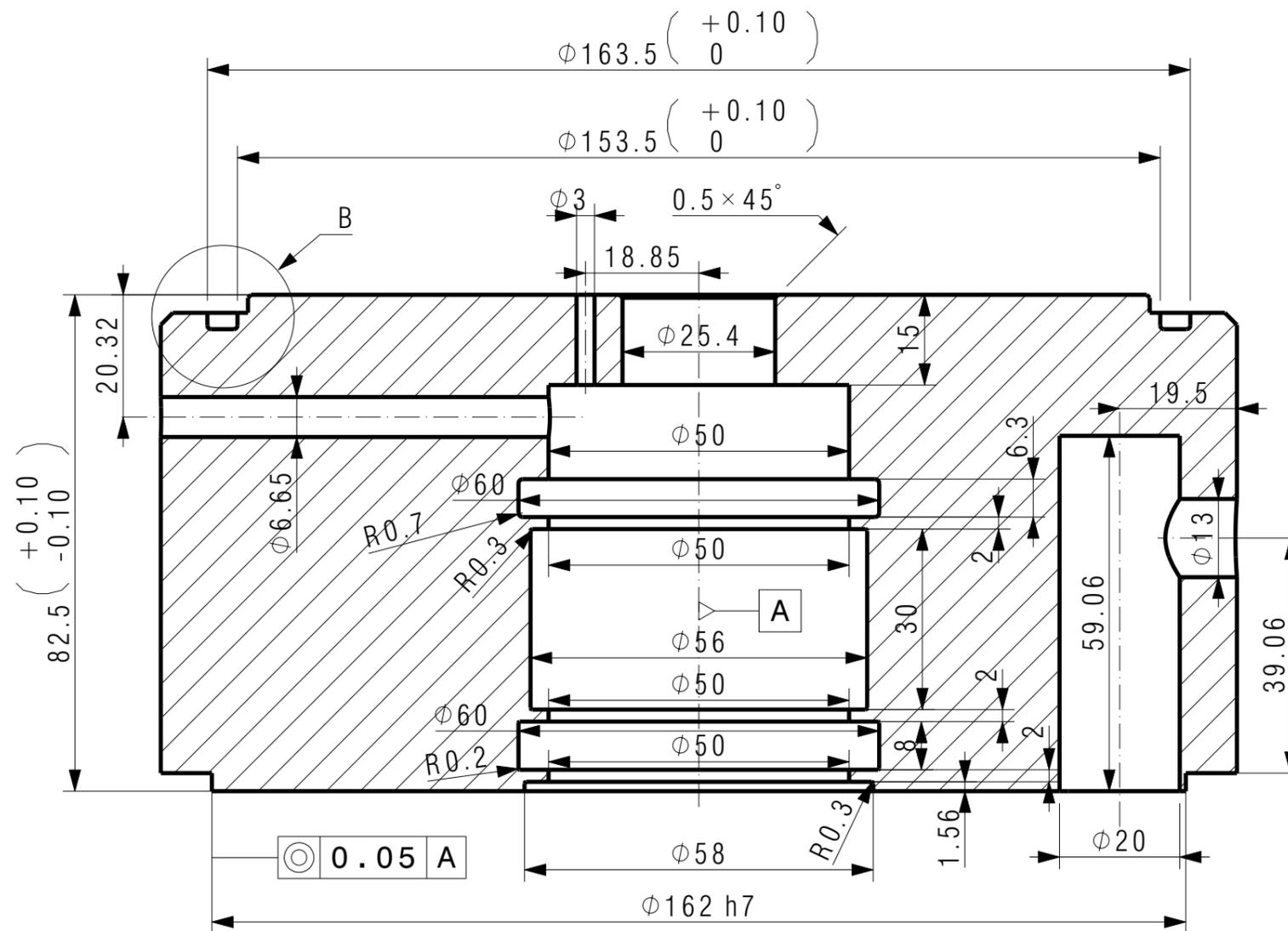
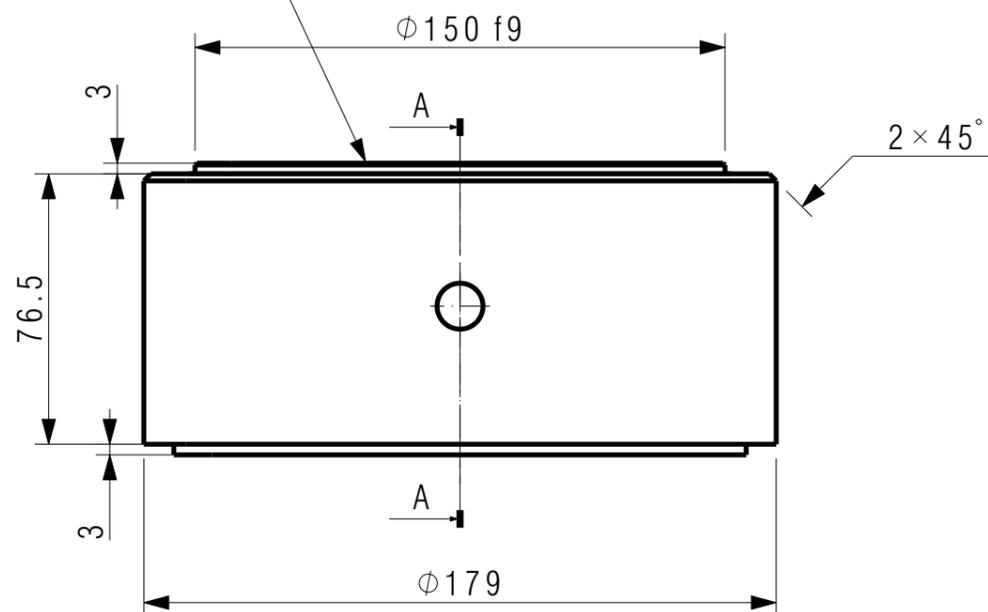
Nota orificios radiales y testigo aceite:
Están representados todos en el
mismo plano por simplicidad
Posición angular a definir

DESIGNED BY: Marcos Olivera		Cuerpo Cámara		I	-
CHECKED BY:				H	-
DATE:		Celda Triaxial 2.0		G	-
DATE:				F	-
SIZE A2		Plano-02		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 106			D	-
DRAWING NUMBER Plano-02		Material: AINI 1045		C	-
SHEET 1/1				B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.					



DESIGNED BY: Marcos Olivera		<h1>Porta Pistón</h1>		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY:		<h2>Celda Triaxial 2.0</h2>		G	-
DATE:				F	-
SIZE A3		Material: AISI 1045		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 12.2			D	-
DRAWING NUMBER Plano-03		SHEET 1/1		C	-
				B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

Superficie referencia
pieza anterior



Detail B
Scale: 2:1

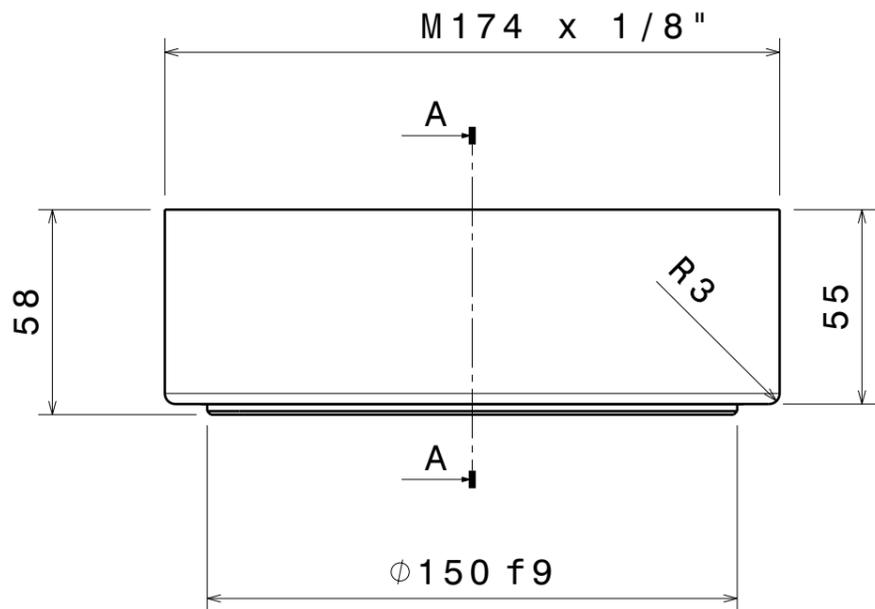
Requerimientos
rugosidad

A-Ra 1.60 μm Rmax 6.30
B-Ra 3.20 μm Rmax 12.50

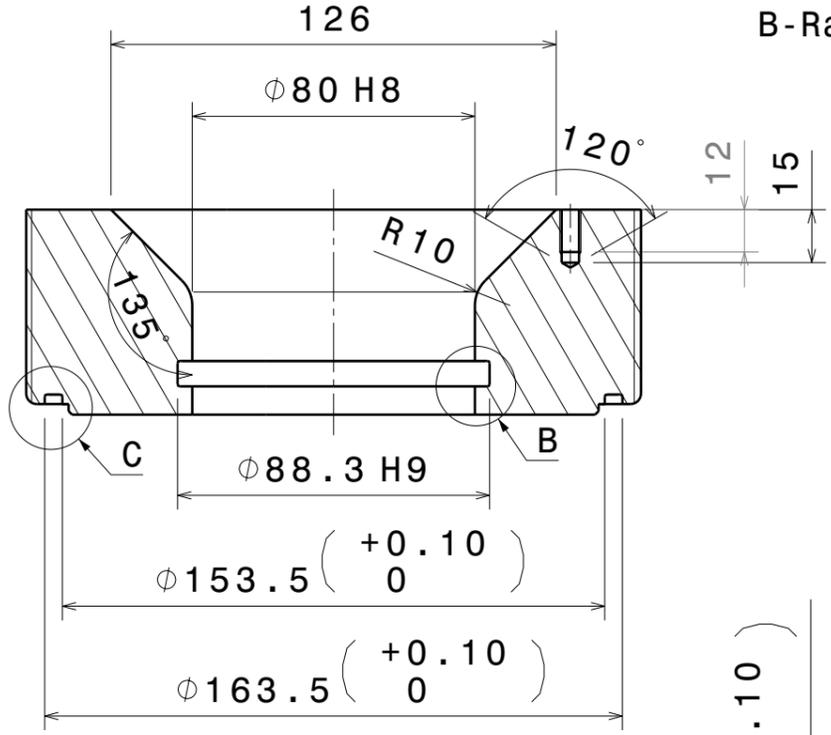
Section view A-A

DESIGNED BY: Juan Martín Mujica Buj		<h1>Cuerpo Sellos</h1>		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY:				G	-
DATE:		F	-		
SIZE A3		<h2>Celda Triaxial 2.0</h2>		E	-
SCALE 1:1				D	-
WEIGHT (kg) 14.5	DRAWING NUMBER Plano-04	Material: ASTM A-105	SHEET 1/1	C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				B	-
				A	-

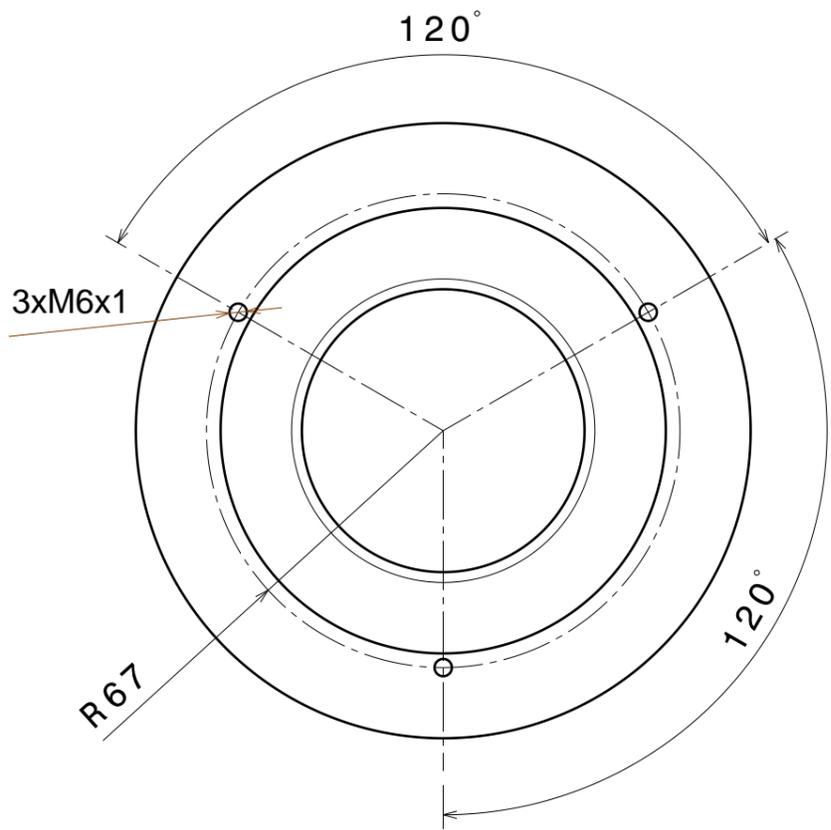
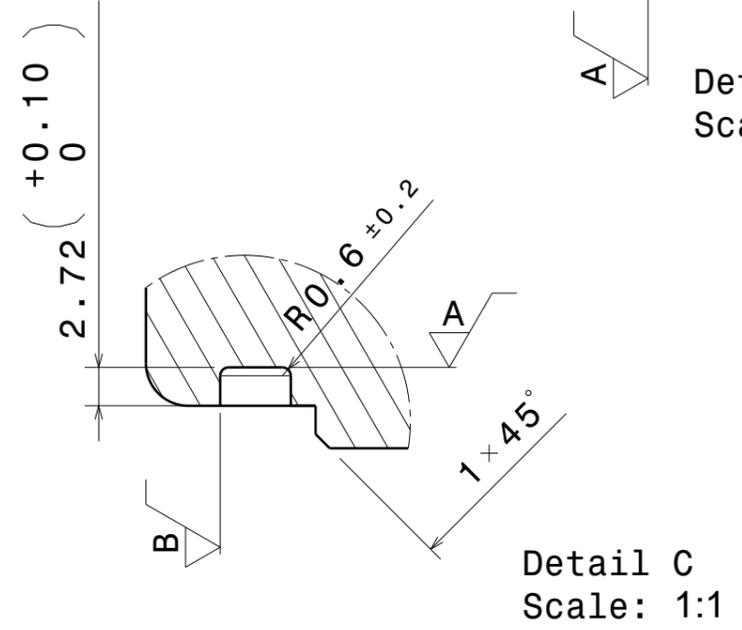
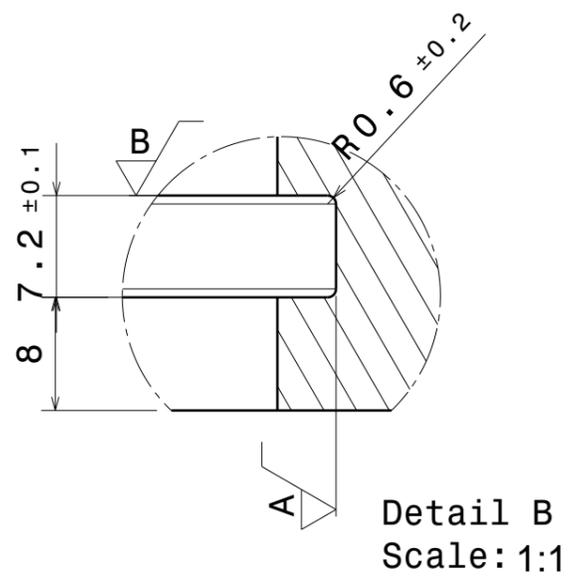
H G F E D C B A



Section view A-A



Requerimientos
 rugosidad
 A-Ra 1.60 μm Rmax 6.30
 B-Ra 3.20 μm Rmax 12.50

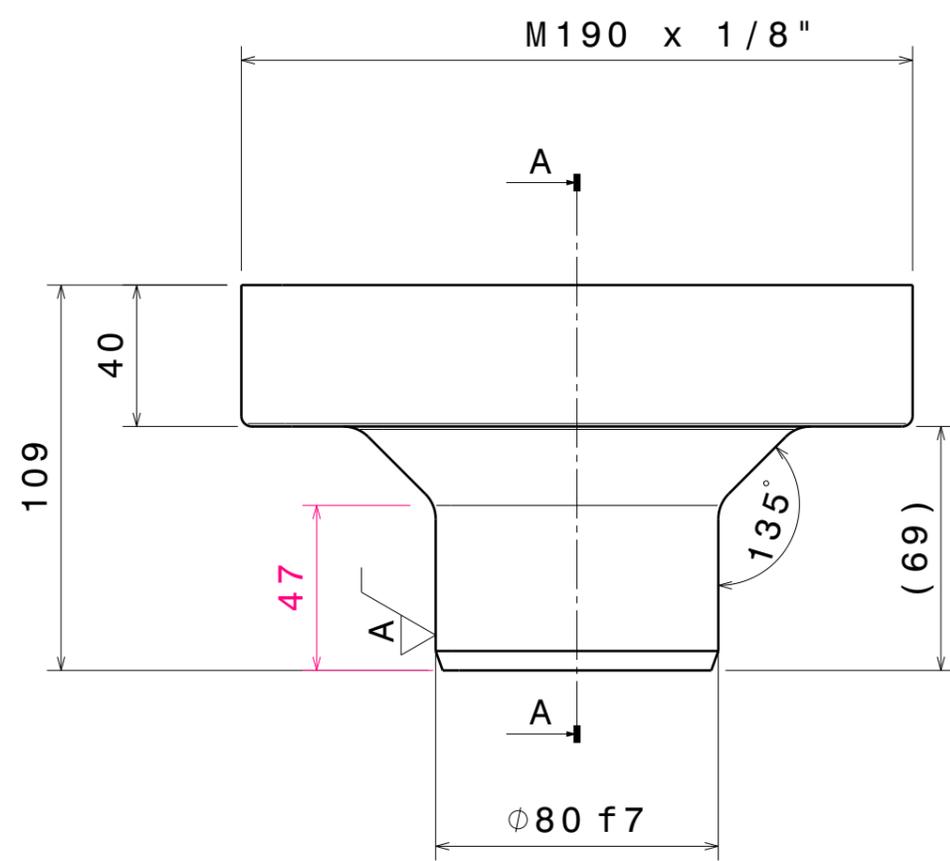


DESIGNED BY: Marcos Olivera		Tapa Superior externa		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY:		Celda Triaxial 2.0		G	-
DATE:				F	-
SIZE A3		Plano-05		E	-
SCALE 1:2				WEIGHT (kg) 7.6	D
DRAWING NUMBER Plano-05		Material: AISI 1045	SHEET 1/1	C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				B	-
				A	-

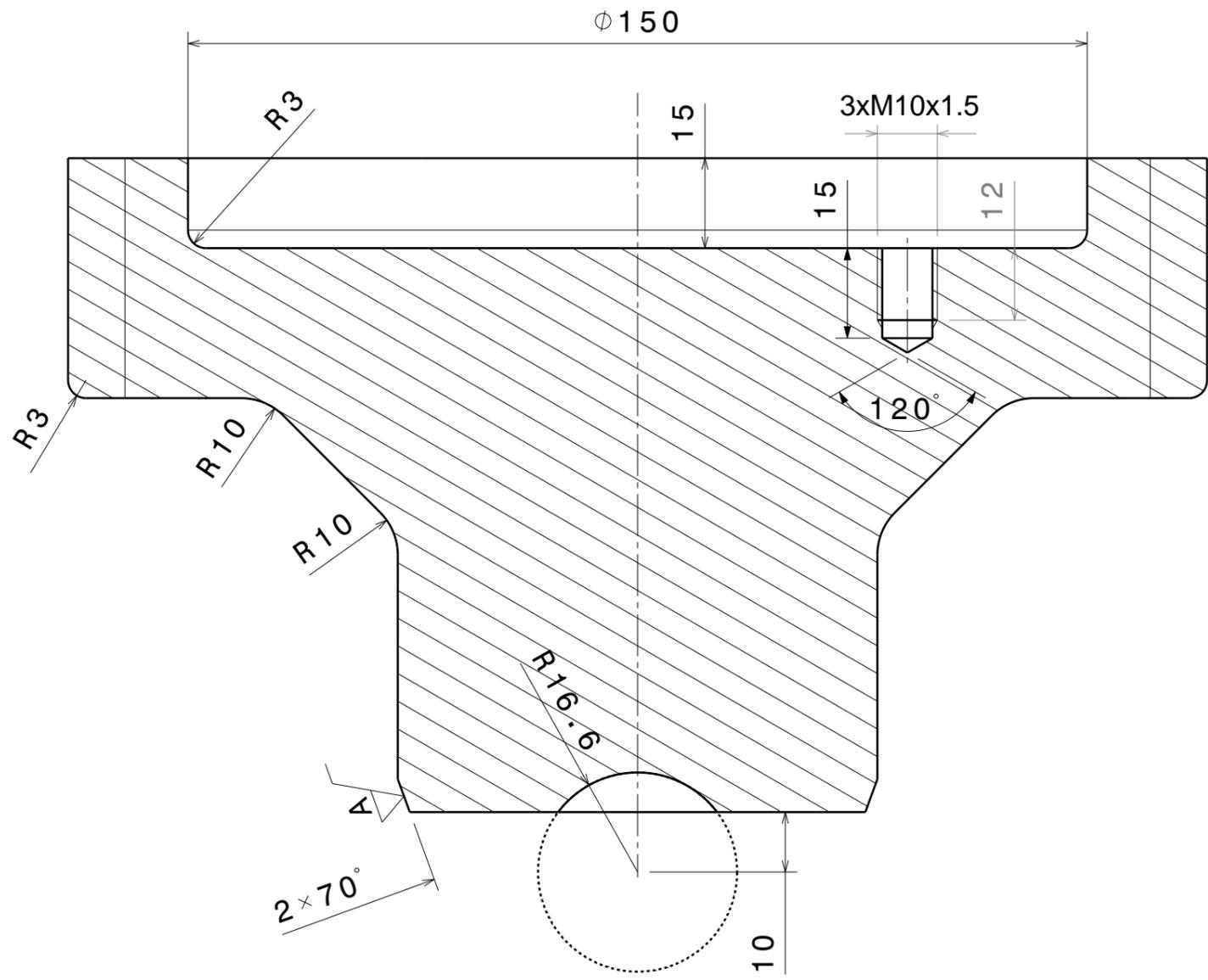
H G F E D C B A

H G F E D C B A

4



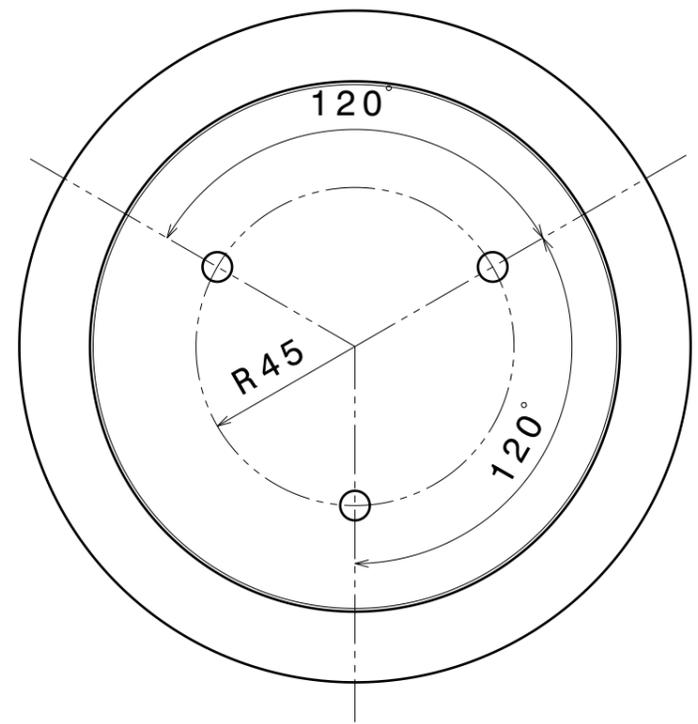
3



4

3

2



2

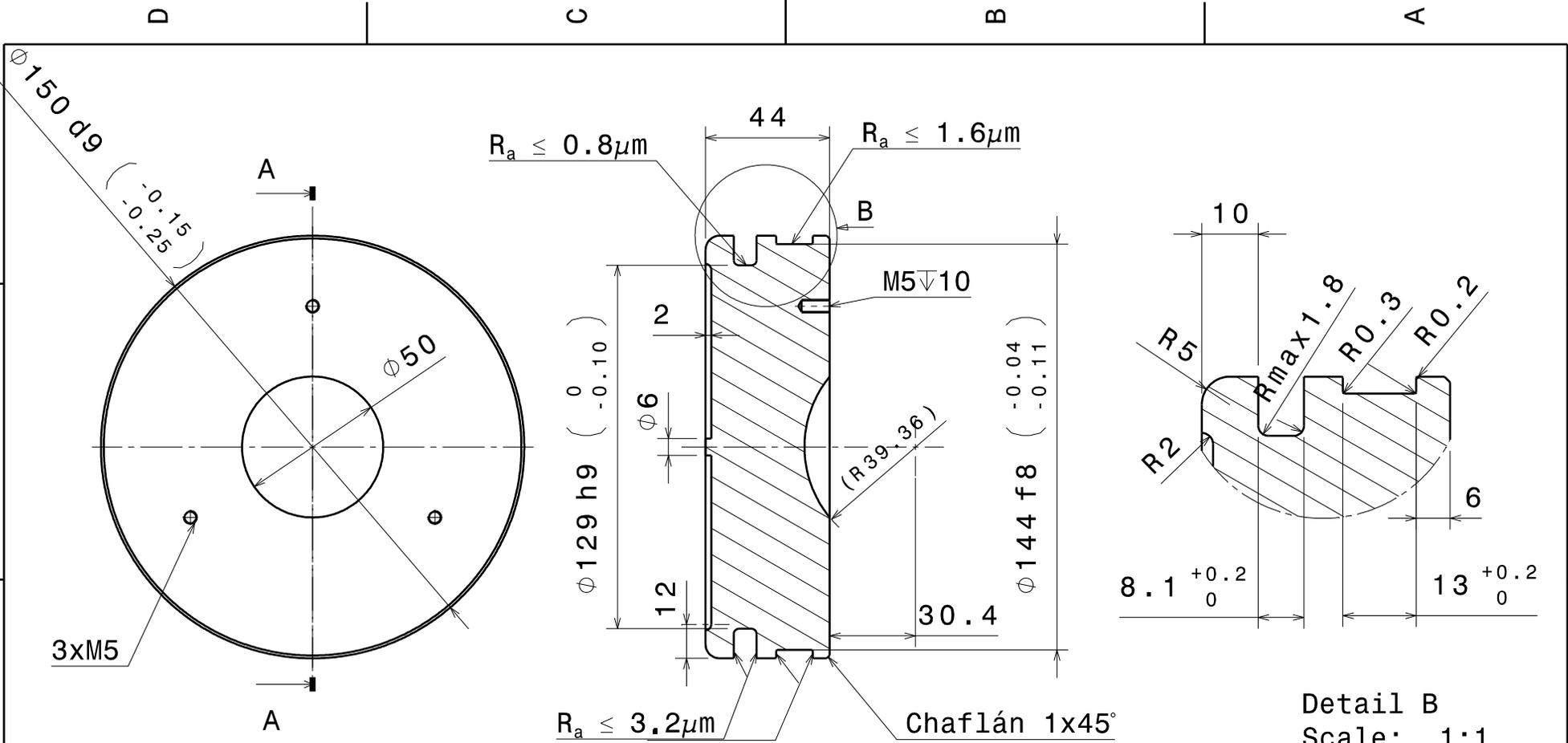
Requerimientos
 rugosidad
 A-Ra 1.60 µm Rmax 6.30
 B-Ra 3.20 µm Rmax 12.50

1

H G F E D C B A

DESIGNED BY: Marcos Olivera		Tapa Superior interna		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY:		Celda Triaxial 2.0		G	-
DATE:				F	-
SIZE A3		Plano-06		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 10.1			D	-
DRAWING NUMBER Plano-06		Material: AISI 1045	SHEET 1/1	C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				B	-
				A	-

1



Detail B
Scale: 1:1

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media		Rev.	Descripción		Fecha	VºBº
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales		SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		Cliente		
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares		Eliminar rebabas y cantos vivos		Rugosidad superficial 3.2[.125]		
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	Aprobaciones		
Dibujó: SBE		Fecha: 5/10/2013		ITBA		
Aprobó: PLY		Proyecto: Triaxiall Cell		Denominación: Pistón Hidráulico		
Esc. 1:2		Plano Nº: Plano-07		Material: A4 ASTM A-105		Peso [kgf]: 5.5

D

C

B

A

4

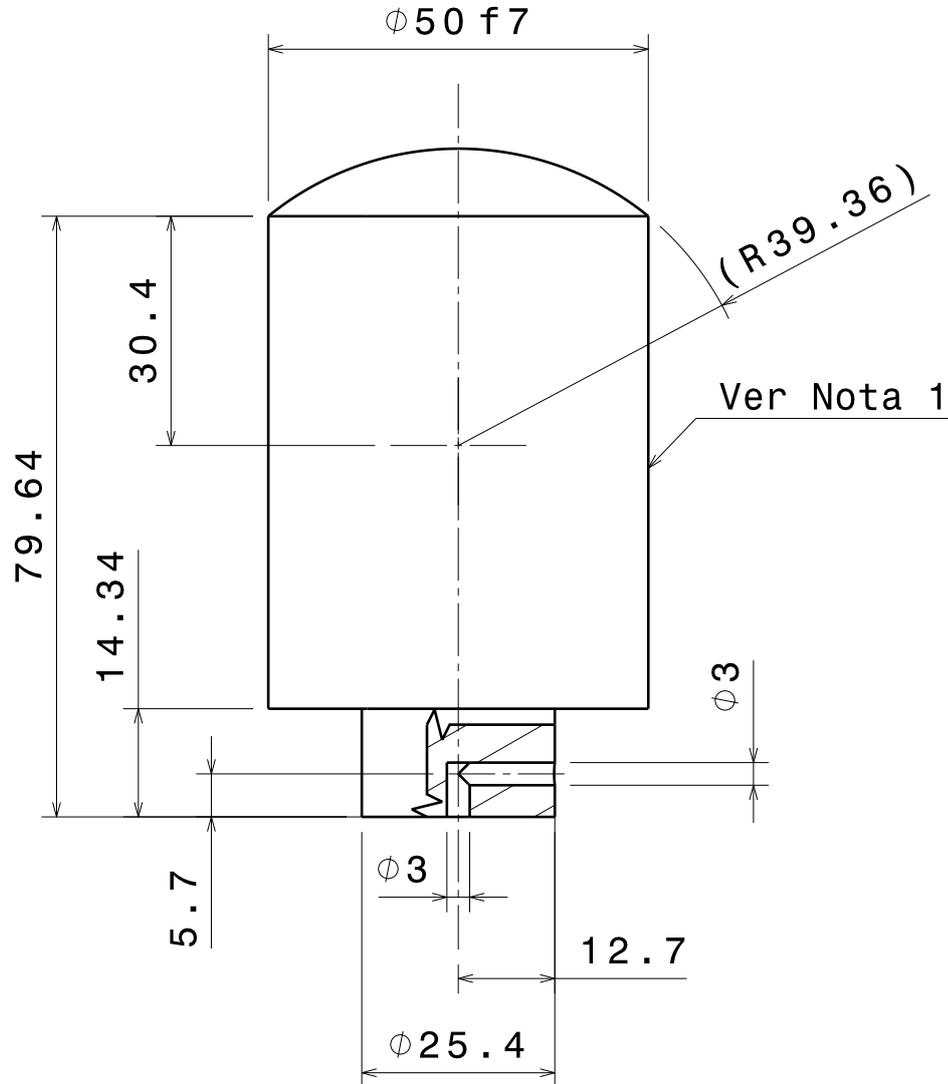
4

3

3

2

2



Nota 1: $0.05\mu\text{m} \leq R_a \leq 0.3\mu\text{m}$
 $0.4\mu\text{m} \leq R_z \leq 0.3\mu\text{m}$
 $0.4\mu\text{m} \leq R_{\text{max}} \leq 2.5\mu\text{m}$
Dureza ≥ 50 HRC

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha VºBº

Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

Cliente

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos
Rugosidad superficial 3.2[.125]
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)



ITBA

Denominación

Pistón Multiplicador

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones

Fecha

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó: SBE

24/09/2013

Aprobó: PLY

A4

Material

ASTM A-105

Peso [kgf]

1.1

Proyecto: Triaxial Cell

Esc. 1:1

Plano N°

Plano-08

D

A

1

H G F E D C B A

4

3

2

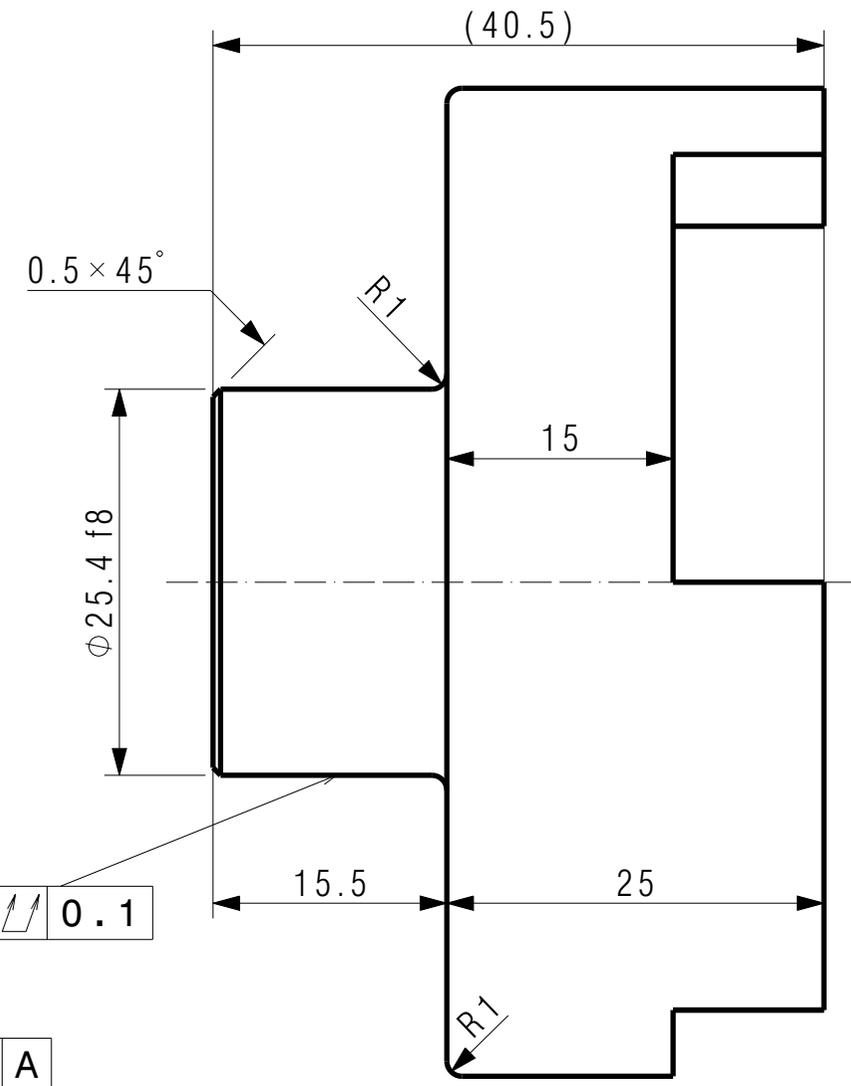
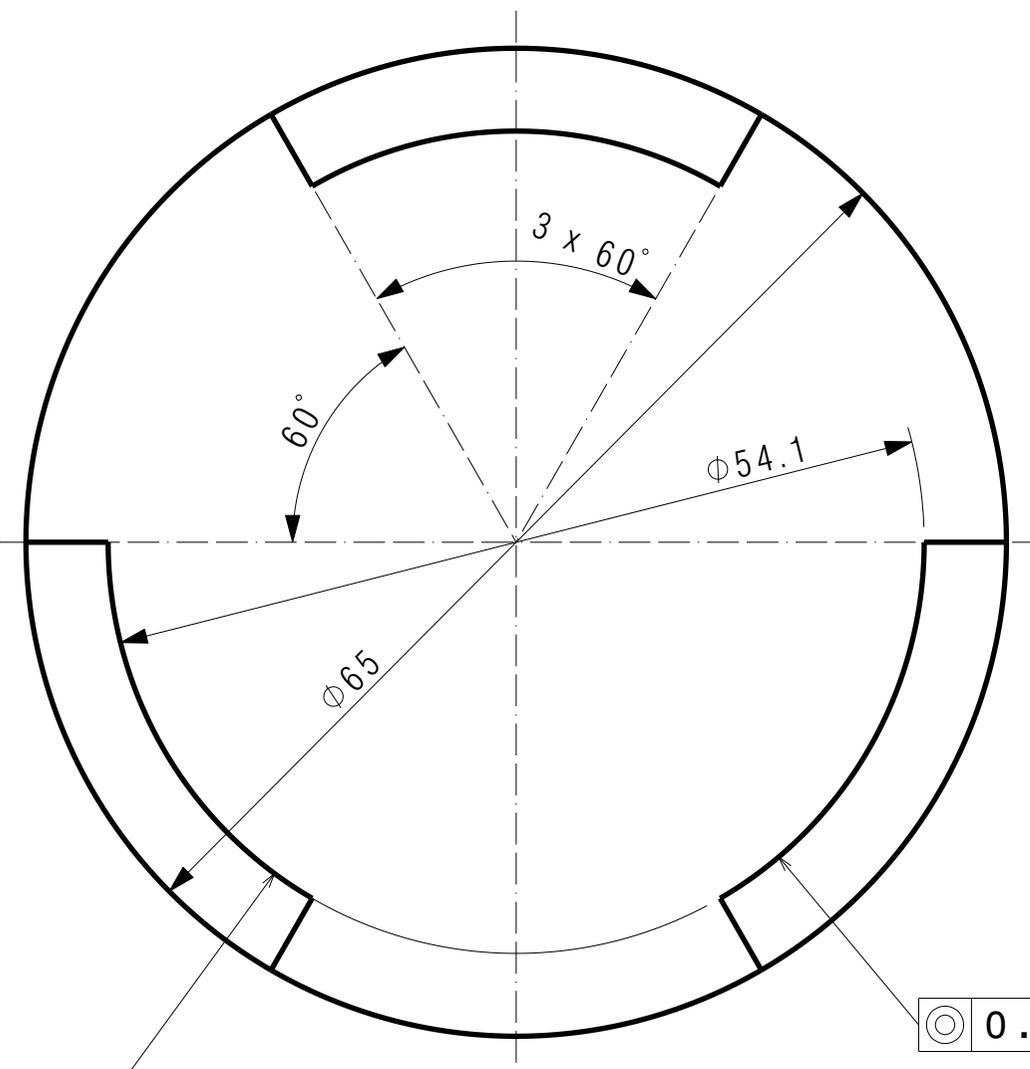
1

4

3

2

1



A

0.1

0.1 A

DESIGNED BY:
Marcos Olivera
DATE:

CHECKED BY:
DATE:

SIZE
A4

SCALE
2:1

WEIGHT (kg)
0.49

DRAWING NUMBER
Plano-09

Material:
ASTM A-105

SHEET
1/1

Pusher

Celda Triaxial 2.0

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

H G B A

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

H G F E D C B A

4

4

3

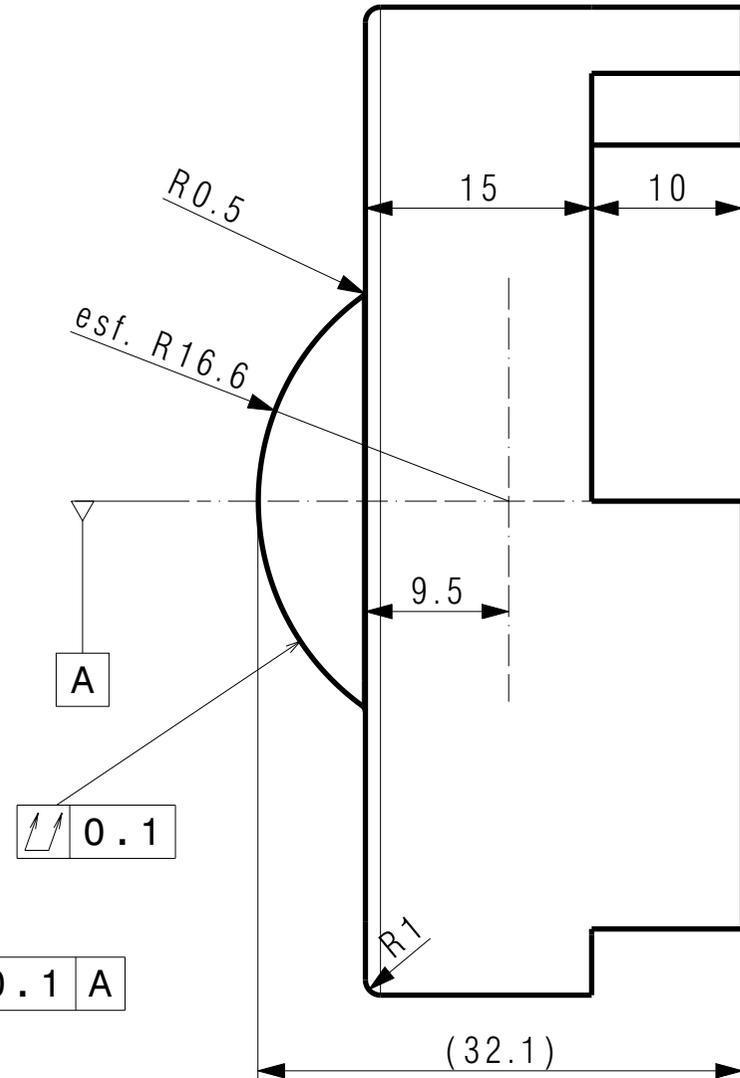
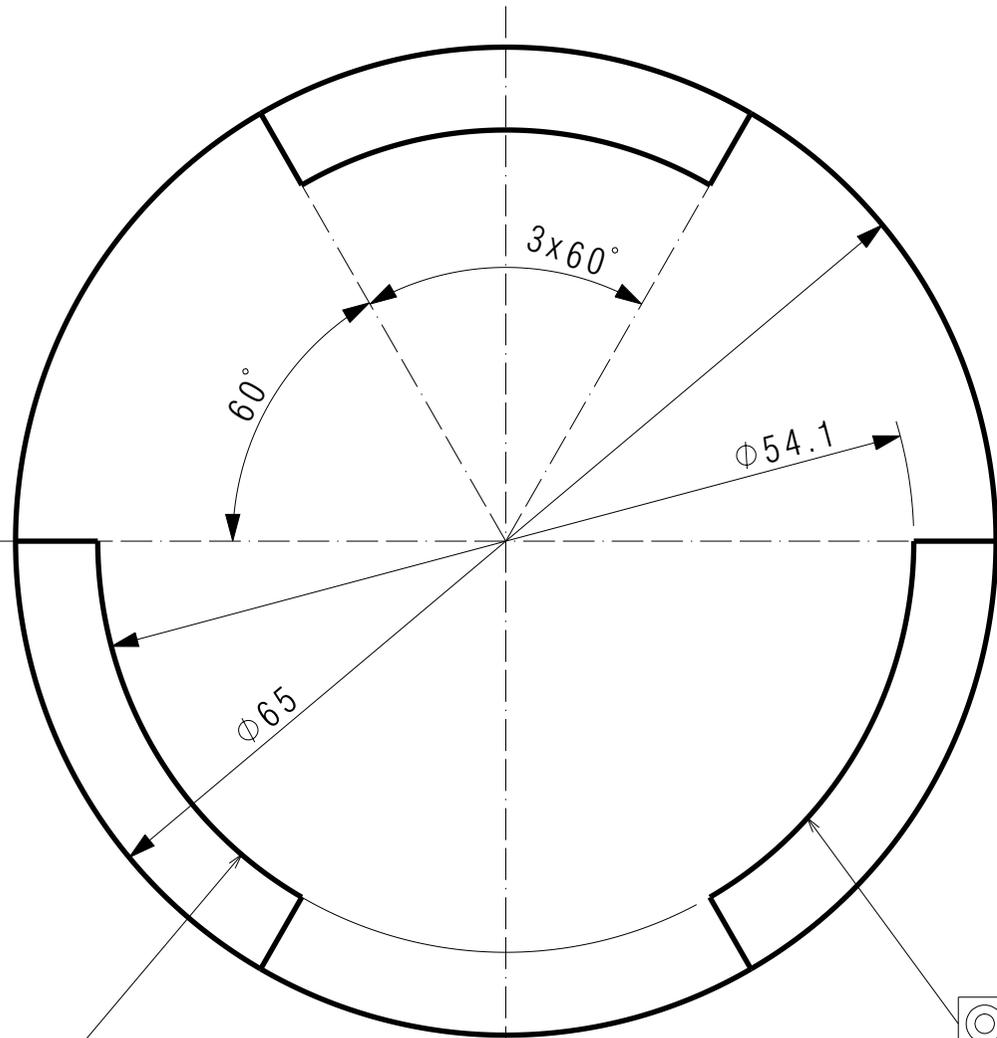
3

2

2

1

1



\sqrt{R} 0.1

\odot 0.1 A

\sqrt{R} 0.1

DESIGNED BY:
Marcos Olivera
DATE:

CHECKED BY:
DATE:

SIZE
A4

SCALE
2:1

WEIGHT (kg)
0.45

DRAWING NUMBER
Plano-10

Material:
ASTM A-105

SHEET
1/1

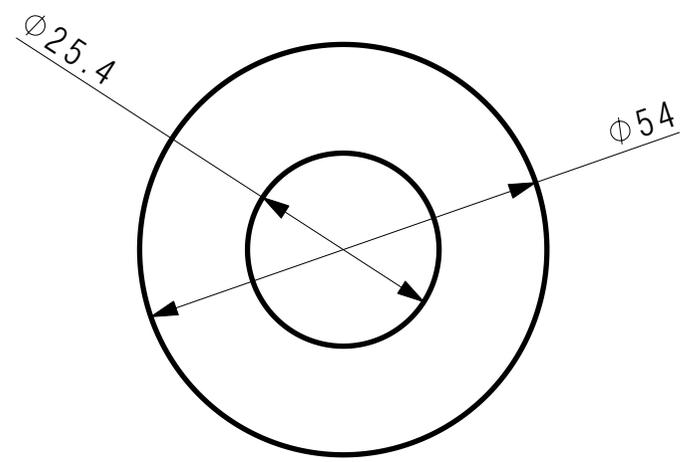
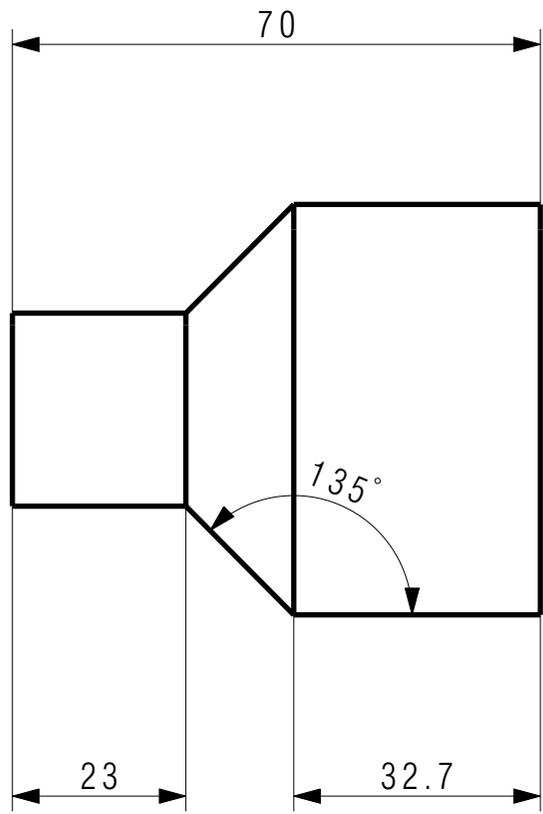
Catcher

Celda Triaxial 2.0

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

H G F E D C B A



DESIGNED BY: Marcos Olivera		Sujetadores de probeta			I	-
DATE:					H	-
CHECKED BY:		Celda Triaxial 2.0			G	-
DATE:					F	-
SIZE A4					E	-
SCALE 1:1	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER Plano-11	MATERIAL: ASTM A105	SHEET 1/1	D	-
					C	-
					B	-
					A	-

H G F E D C B A

4

4

3

3

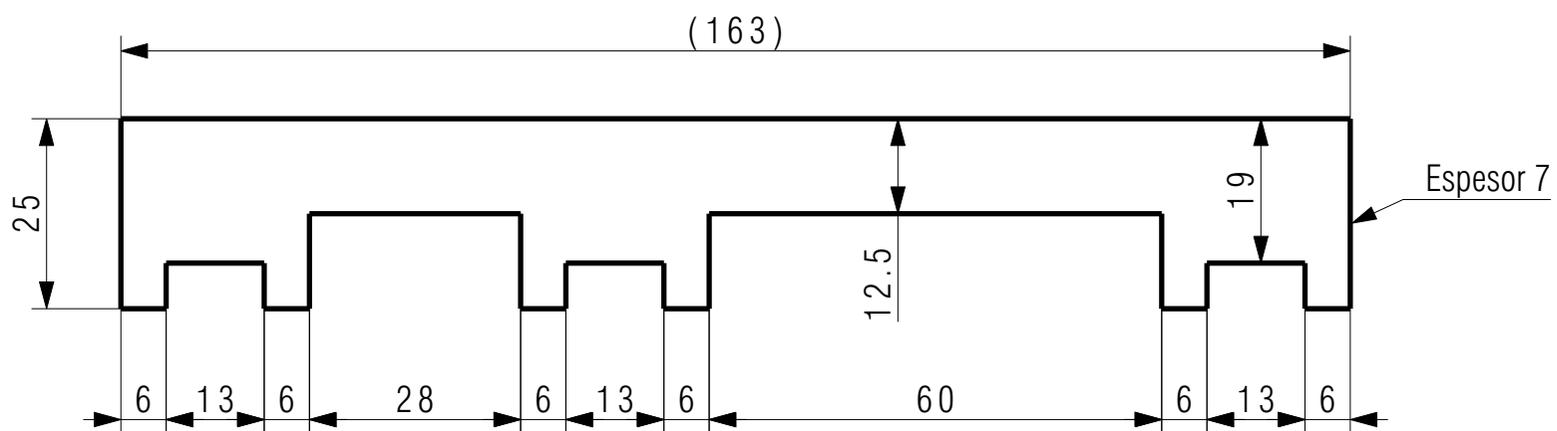
2

2

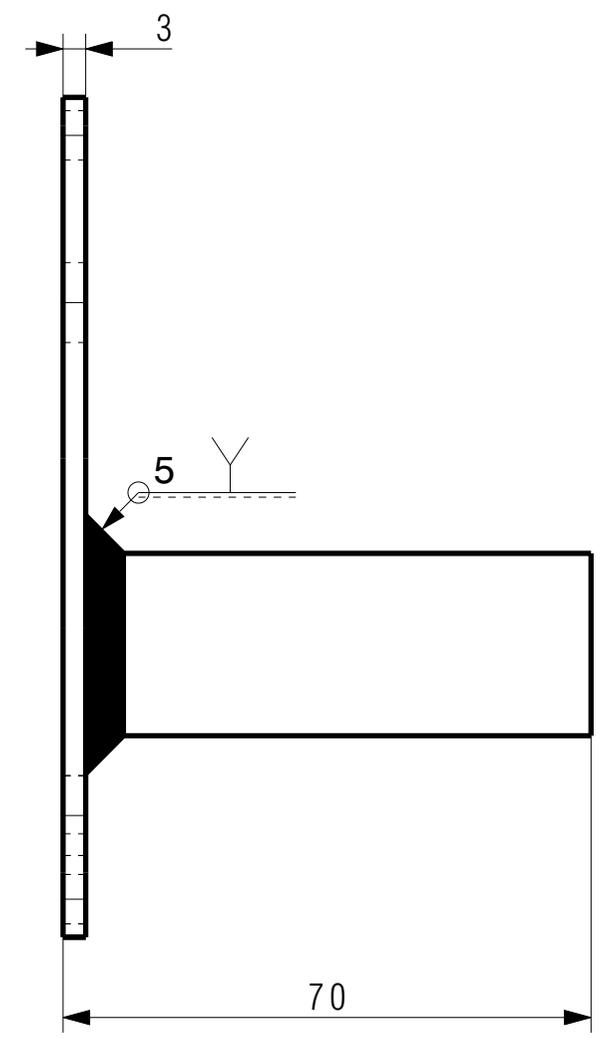
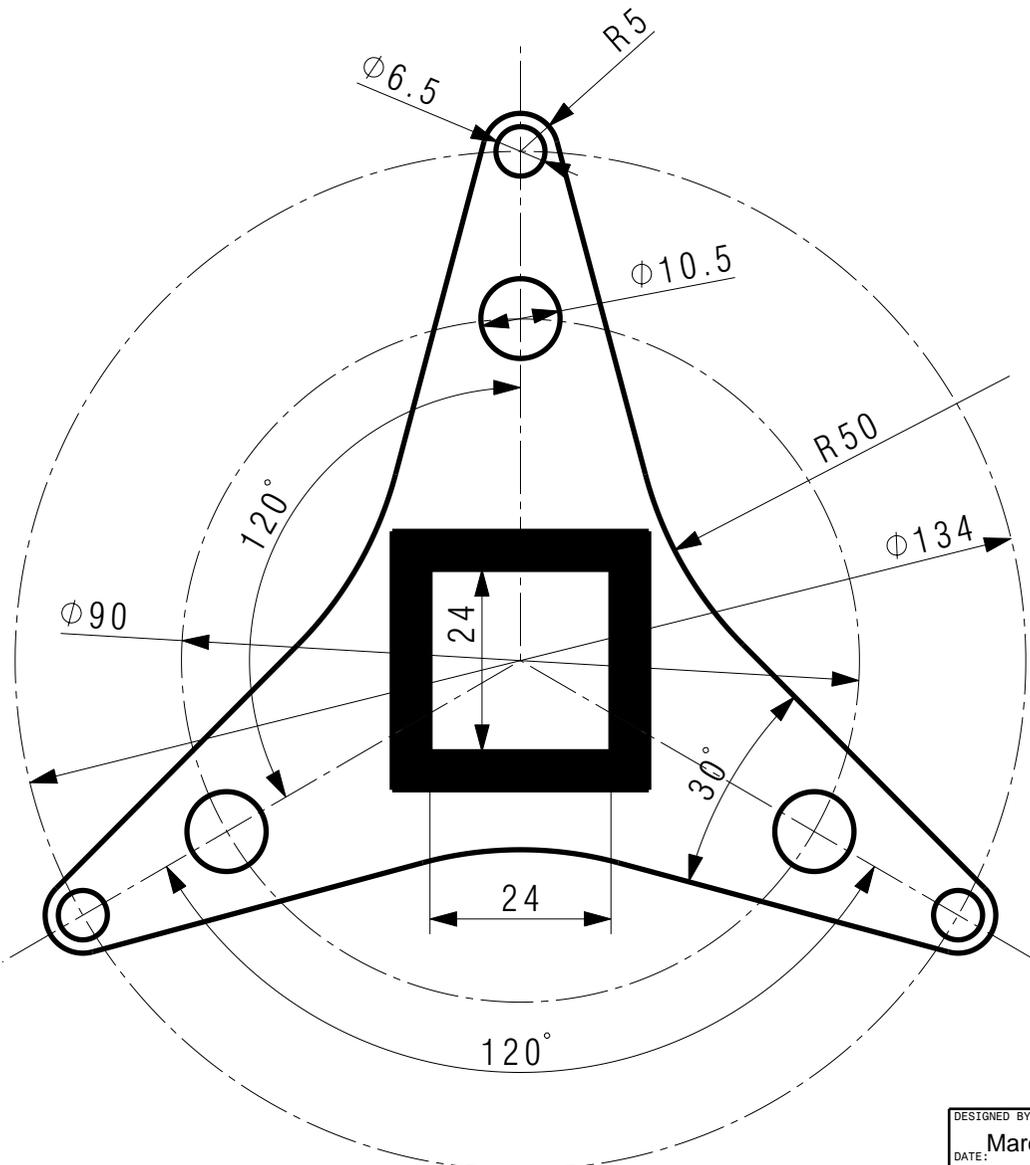
1

1

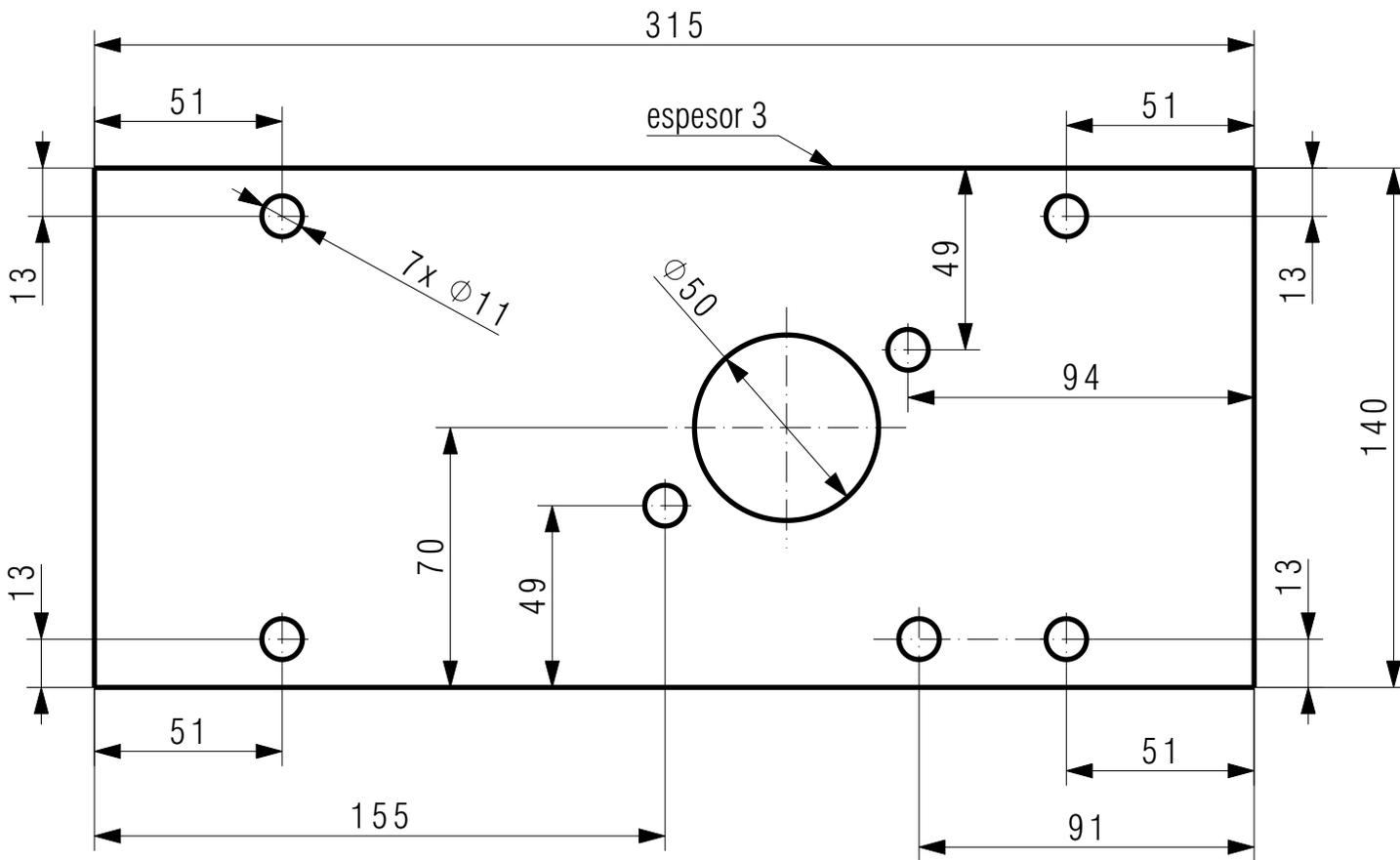
H G B A



DESIGNED BY: Marcos Olivera		Alineadores de LVDT		I	-	
CHECKED BY:				H	-	
DATE:		Celda Triaxial 2.0		G	-	
SIZE A4				F	-	
SCALE 1:1	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER Plano-12	MATERIAL: AISI 1020	SHEET 1/1	E	-
				D	-	
				C	-	
				B	-	
				A	-	

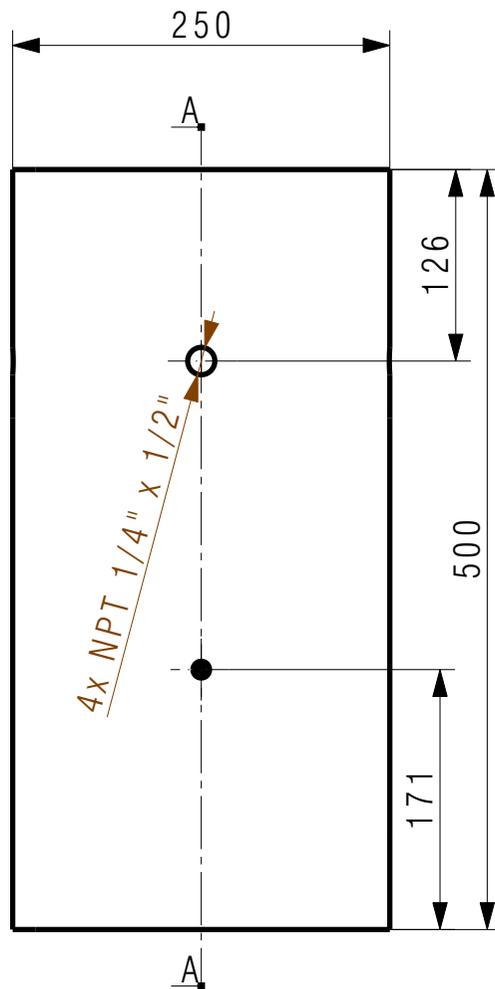
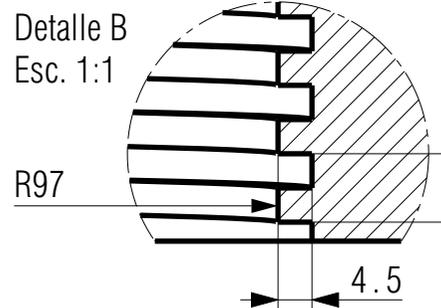
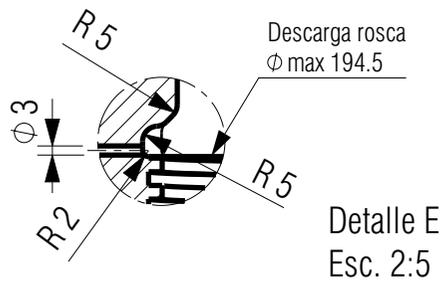
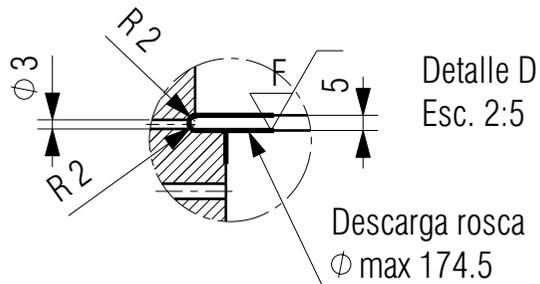
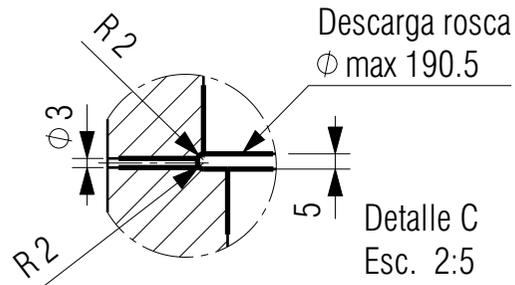


DESIGNED BY: Marcos Olivera		Acople Torquimétrico		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY:		Celda Triaxial 2.0		G	-
DATE:				F	-
SIZE A4		Plano-13		E	-
SCALE 1:1	WEIGHT (kg)			D	-
DRAWING NUMBER		MATERIAL:	SHEET	C	-
		ASTM A105	1/1	B	-
				A	-

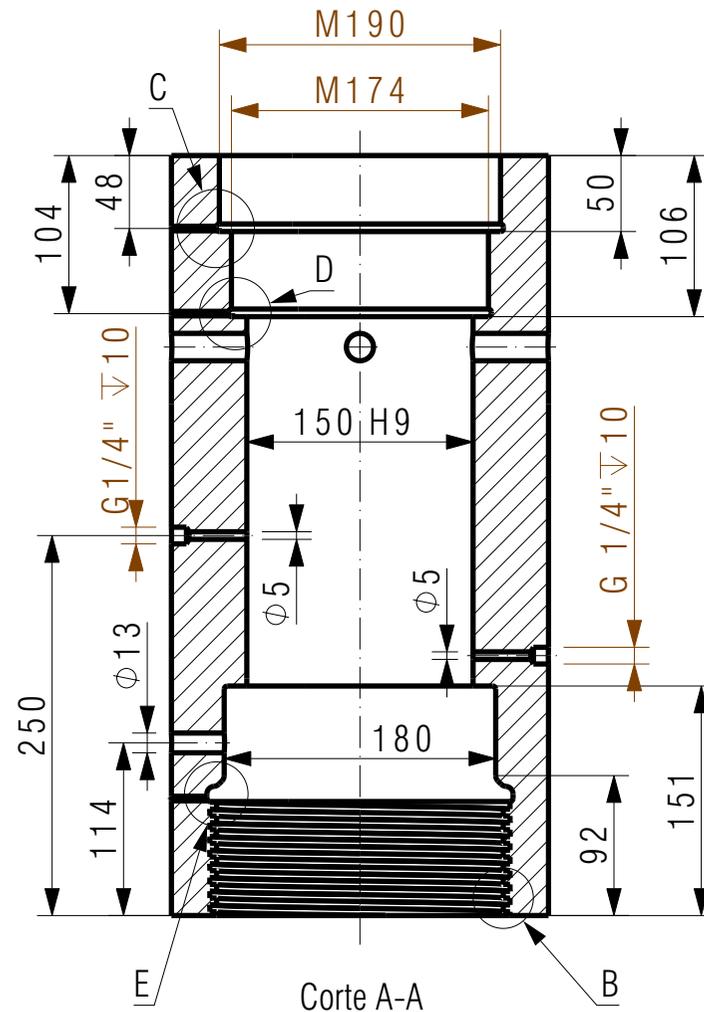


DESIGNED BY: Marcos Olivera		<h1>Placa de Sujeción</h1>		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY:				G	-
DATE:		F	-	E	-
SIZE A4		Celda Triaxial 2.0		D	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER Plano-13	MATERIAL: AISI 1010	C	-
			SHEET 1/1	B	-
				A	-

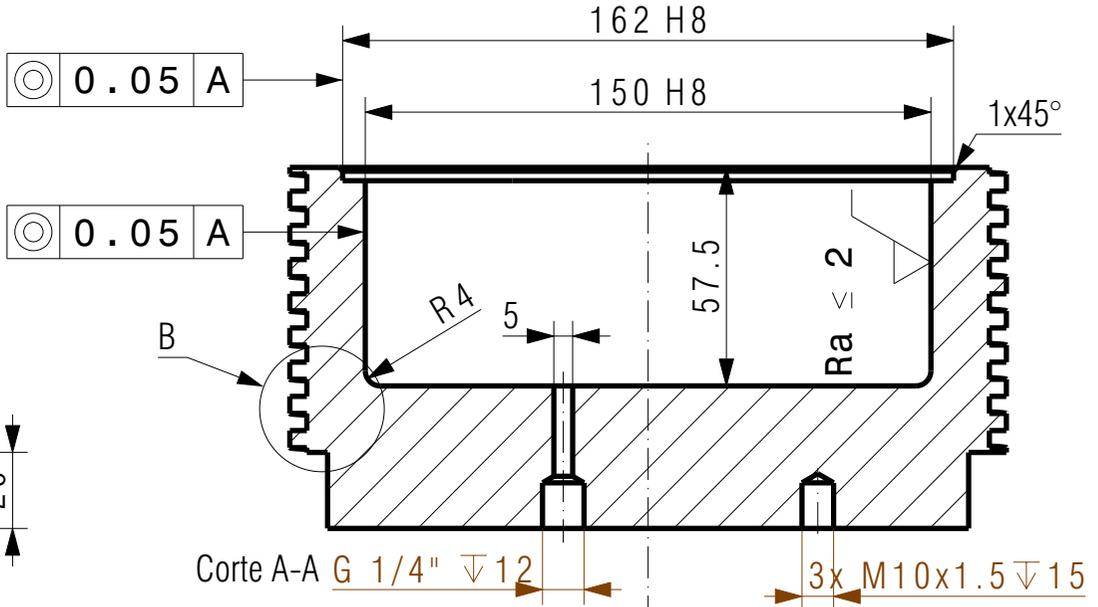
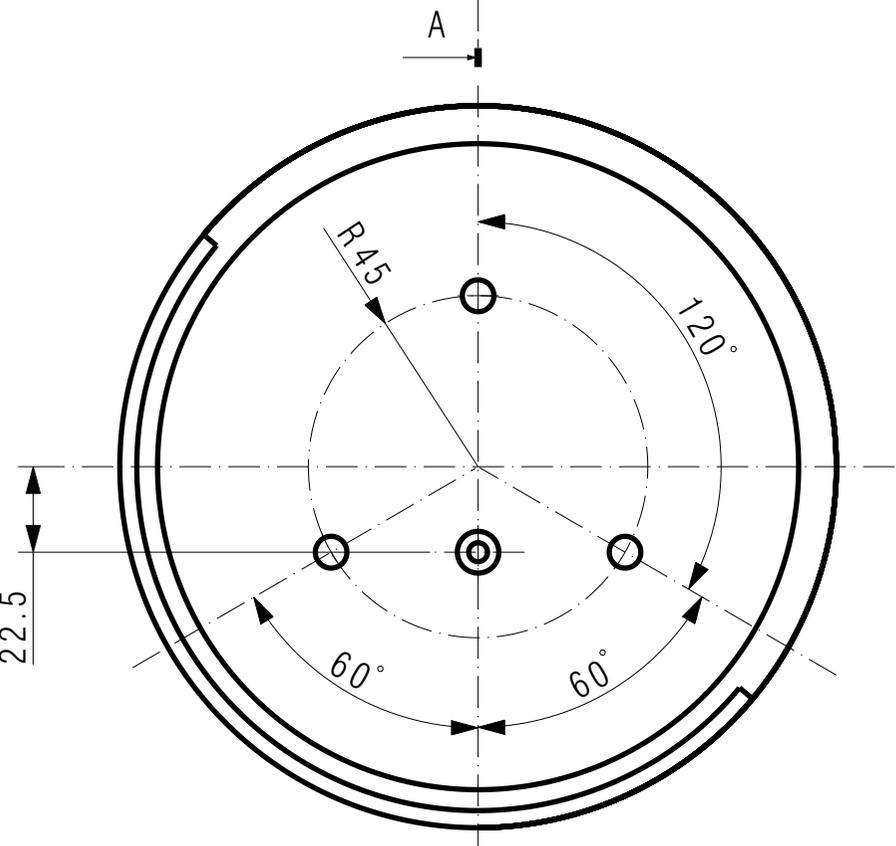
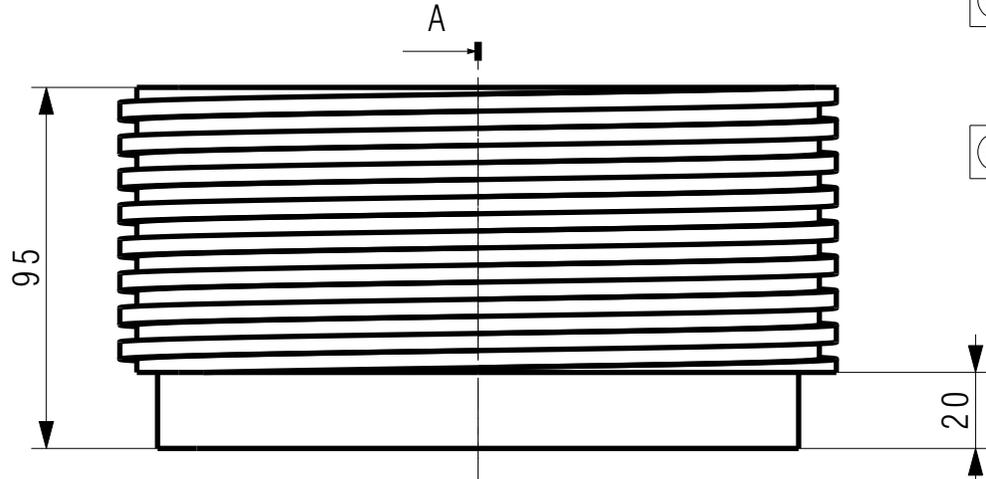




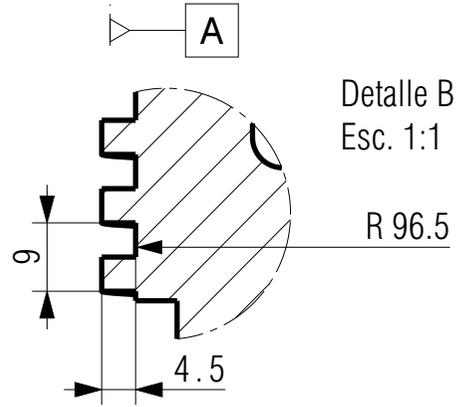
Requerimientos rugosidad
 F-Ra 1.60 μ m Rmax 6.30



DESIGNED BY: Marcos Olivera		Cuerpo Cámara con Rosca de Potencia		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY:		Celda Triaxial 2.0		G	-
DATE:				F	-
SIZE A4		Plano-14		E	-
SCALE 1:5	WEIGHT (kg)			D	-
DRAWING NUMBER		AISI 1045		C	-
MATERIAL:				B	-
SHEET		1/1		A	-
SHEET				A	



Rosca de potencia
 Perfil Cuadrado
 paso 9
 Diametro interior 96.5



DESIGNED BY: Marcos Olivera		Porta Pistón con Rosca de Potencia		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY:		Celda Triaxial 2.0		G	-
DATE:				F	-
SIZE A4		DRAWING NUMBER Plano-15		E	-
SCALE 1:2		WEIGHT (kg)	MATERIAL: AISI 1045	SHEET 1/1	D
				C	-
				B	-
				A	-