

Vaca Muerta, del campo al ensayo mecánico de laboratorio

Foto: gentileza de Gastón Fondevila

Diseño de celda triaxial para obtención de parámetros geomecánicos de calibración

Por **Agustín Sosa Massaro**, **Silvia Barredo**, **Marina Drosina** y **Facundo Bergese** (Departamento de Ingeniería del Petróleo. Instituto Tecnológico de Buenos Aires, ITBA); y **Pablo Leslabay**, **Santiago Blanco** y **Federico Paterlini** (Departamento de Ingeniería Mecánica, ITBA)

El trabajo genera un aporte al estudio de los modelos geomecánicos en yacimientos no convencionales del tipo *shale oil/gas*. Partiendo del estudio regional de la Cuenca Neuquina, con un enfoque centrado en el análisis de las rocas que componen la Formación Vaca Muerta en afloramientos, testigos rotados, laterales y coronas, junto a su implementación en la celda triaxial de diseño registrado por el Instituto Tecnológico de Buenos Aires, se podrán obtener los parámetros necesarios para una gran variedad de análisis relacionados con la terminación de pozos.

Décadas atrás, el estudio de los recursos no convencionales era considerado innecesario y altamente costoso frente a las demandas del mercado. En la actualidad, el aumento del consumo de hidrocarburos y sus derivados, junto con la implementación de nuevas tecnologías, motivó la búsqueda de nuevos objetivos, centrándose gran parte de ellos en los reservorios no convencionales. En nuestro país es objeto de grandes inversiones en el sector energético, ya que Argentina es considerada como la tercera potencia en yacimientos de tipo *shale gas*, luego de Estados Unidos y China, y cuarta potencia en lo que respecta a *shale oil* (EIA, 2013).

Se tratará aquí el estudio de la Formación Vaca Muerta, ampliamente reconocida por ser una de las rocas generadoras más importantes de la Cuenca Neuquina, hoy día analizada, además, como roca reservorio no convencional. Por esto último, se llevará a cabo el análisis de sus propiedades geomecánicas para su debida completación y puesta en producción, ya que se generan importantes perturbaciones al momento de la realización de las distintas maniobras de campo (perforación, punzado, fracturamiento hidráulico, puesta en producción, etcétera). Los estudios geomecánicos serán además de vital importancia para predecir el comportamiento futuro del reservorio en particular y de todo el sistema petrolero.

Una breve introducción al conocimiento geológico de la Cuenca Neuquina con énfasis en las diversas variedades litológicas que componen la formación en estudio será necesario, tratando sus propiedades sedimentológicas y mecánicas como roca de interés petrolero, utilizando la celda triaxial con el objetivo de conocer en detalle el comportamiento bajo los diversos tipos de esfuerzos a los cuales se encuentra sometida en profundidad (carga litostática, esfuerzos tectónicos y presión poral), sumados a los inducidos durante las operaciones de terminación/producción. Para esto último, se detallarán los pasos llevados a cabo y tipos de ensayos implementados para arribar a los parámetros geomecánicos que luego se utilizarán para calibrar los modelos computacionales realizados a partir de información de registros de pozos.

Problemática de investigación y fundamento

Como se mencionara anteriormente, el foco de investigación se centrará en el estudio del comportamiento mecánico de las diversas litofacies que constituyen la Formación Vaca Muerta.

Los estudios geomecánicos requieren un exhaustivo conocimiento petrofísico de las rocas y de los esfuerzos actuales y pasados de una determinada región, conociendo la evolución tectónica de la cuenca y los depocentros de interés.

El tipo de roca a estudiar presenta una muy baja permeabilidad (Legarreta *et al.* 2005), de manera que su puesta en producción resulta muy compleja sin la utilización de técnicas de estimulación. Cabe mencionar que las pelitas, a diferencia de las areniscas, no producen hidrocarburos utilizando como vía principal su sistema poroso, sino que lo hacen mayoritariamente a través de una red de fracturas naturales (figura 1), resultando así que la técnica de estimulación más utilizada para aumentar la interconexión de fracturas naturales con las inducidas sea el fracturamiento hidráulico.

Una detallada caracterización de la presión poral será de vital importancia debido a la gran influencia que esta tendrá en el sistema de esfuerzos reinantes alrededor del pozo. Debido a la baja permeabilidad que presenta este tipo de rocas, se produce una gran sobrepresión, ya sea por la compacta-

ción por la sobrecarga litostática, la transformación de la materia orgánica en kerógeno con liberación de gas, liberación de agua por parte de la estructura cristalina de la arcillas, etcétera (Mukerji *et al.* 2002).

Para entender estos procesos, se aplican los conceptos de la geomecánica, disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas de una formación. Se considera a las rocas como sistemas multifásicos de partículas minerales que crean una estructura porosa donde residen diversos tipos de fluidos y gases. Este sistema de partículas es lo que distingue a los materiales geológicos de los materiales continuos como los metales y fluidos (Vásquez 2000). Las partículas representan una fase sólida conocida como esqueleto mineral; debido a esto, la deformación está controlada por la interacción entre partículas individuales, deformación de partículas y, más importante aún, el movimiento relativo entre partículas. El fluido intersticial puede fluir a través de los poros interactuando con el esqueleto mineral, alterando la magnitud de las fuerzas en el contacto entre partículas e influenciando la resistencia y compresibilidad del material geológico (Vásquez 2000).

De lo mencionado en el párrafo anterior, se desprende que cuando una roca se encuentra sometida a un esfuerzo externo, el mismo se reparte en un esfuerzo intergranular y una presión de poros (Vásquez 2000). En



Figura 1. Afloramiento perteneciente a la Formación Vaca Muerta en el área de la Yesera del Tromen (sección basal "cocina"). Se puede observar la gran heterogeneidad litológica y red de fracturas naturales (cerradas y abiertas) y comportamiento de las mismas contra un banco carbonático "barrera de fracturas".

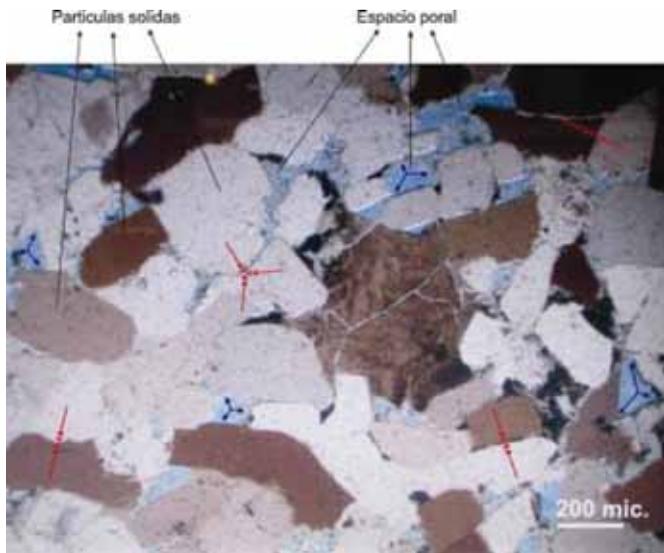


Figura 2. Esfuerzos intergranulares (flechas rojas) y presión de poros para granos en contacto (flechas azules) en una roca de tipo arenisca.

En la figura 2 se observa el caso de una arenisca, en la cual se representa el esfuerzo efectivo según la ecuación:

$$\sigma = \sigma' + \alpha \cdot \mu \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde (σ) es el esfuerzo total, (μ) es la presión de poros y (α) es una constante conocida como Coeficiente de Biot, que mide la cantidad de esfuerzo que absorbe el fluido. El esfuerzo intergranular (σ') es conocido como el esfuerzo efectivo, y es el esfuerzo que controla el comportamiento mecánico de los materiales geológicos. Todos los efectos medibles de un cambio de esfuerzo (compresión, distorsión, resistencia) son debidos solamente a esfuerzos efectivos.

Las aplicaciones de la geomecánica en la industria petrolera se utilizan

desde los comienzos de la década del '70, convirtiéndose en una disciplina novedosa para la ingeniería en petróleo, ya que utiliza los resultados experimentales de campo y de laboratorio conjuntamente con soluciones analíticas para resolver problemas particulares (Vásquez 2000).

Caso de estudio: Formación Vaca Muerta

Durante varios años, esta unidad rocosa ha sido ampliamente estudiada por representar la mayor transgresión marina que sufrió la cuenca, la cual derivó en la formación de la roca madre más importante de la Cuenca Neuquina. En la actualidad, es consi-

derada además una de las rocas reservorios de tipo no convencional más importante del mundo.

Es una de las unidades litoestratigráficas de mayor extensión areal de la Cuenca Neuquina, de un espesor promedio de 240 m, aflorantes desde el sur de la provincia del Neuquén hasta el norte de la provincia de Mendoza. Sus depósitos se caracterizan por una alternancia de intervalos carbonáticos y terrígenos, conformando ciclos de pelitas, margas y calizas con algunas capas de cenizas aisladas (*ash-beds*) de diferentes órdenes y jerarquías (figura 3), controlados por cambios eustáticos y cambios climáticos asociados a variaciones orbitales (Kietzmann *et al.* 2008), depositadas en un ambiente de plataforma distal e interior de cuenca anóxico a localmente euxínico (Stinco y Barredo, 2014). Cabe destacar también la presencia de intercalaciones de *beef* (*bedding-parallel veins of fibrous calcite*), las que dan idea de sobrepresión generada en forma conjunta a la maduración de la materia orgánica dentro de la roca generadora (Rodríguez *et al.* 2009).

La distribución areal en subsuelo de la Formación Vaca Muerta como *play* de tipo *shale oil/gas* rondaría los 30.000 kilómetros cuadrados. El espesor considerado de interés varía desde un mínimo de 30 m hasta más de 500 m en el sector occidental de la cuenca. Dicho aumento de espesor estaría relacionado con el mayor apilamiento de estas secuencias en los puntos de mayor espacio de acomodación (mar profundo).



Figura 3. Detalle de afloramientos de la Formación Vaca Muerta. Arriba: área de la Yesera del Tromen, base de la Fm. Vaca Muerta; abajo: área de Picún Leufú. Se puede observar gran heterogeneidad vertical en afloramiento y heterogeneidad lateral entre áreas.

La sección de interés de la Formación Vaca Muerta puede ser dividida en dos secciones, una basal y una superior. La sección basal se corresponde con el evento transgresivo principal para el Titoniano, con un espesor aproximado de 30 a 40 m y un importante desarrollo a lo largo de toda la cuenca (Veiga y Orchuela 1988). Esta sección se caracteriza por presentar valores anormalmente altos de rayos gama (GR) debido al gran contenido de pelitas ricas en uranio y materia orgánica (% COT). La sección superior corresponde a los cortejos sedimentarios de secuencias progradas muy extensas lateralmente. Tanto los valores de GR como el % COT son menores en comparación con la sección basal y disminuyen hacia el tope de la unidad como consecuencia del aumento de la granulometría que determina un mayor aporte desde el continente. El porcentaje de materia orgánica, sin embargo, sigue estando por encima de los rangos mínimos de riqueza orgánica (Junken *et al.* 2012, en Askenazi *et al.* 2013).

La formación en estudio se encuentra aflorante hacia el área de la faja plegada y corrida y en centro de cuenca en profundidades que oscilan entre los 2.000 m y 4.000 m. De la profundidad dependerá en cierta medida la sobrepresión de un reservorio no convencional. A mayor profundidad y madurez, mayor gradiente de presión. Esto se cumple en la Formación Vaca Muerta, la cual presenta gradientes de presión que van desde 0,50 psi/ft, en zonas de borde de cuenca, a 1,1 psi/ft, en el centro de la cuenca (Askenazi *et al.* 2013). El indicio de sobrepresión dará idea también de una alta capacidad de almacenaje de hidrocarburos, facilidad para la estimulación hidráulica (debido a la reducción del esfuerzo efectivo) y facilidad para la recuperación de los fluidos.

Al existir tal alto grado de heterogeneidad vertical y horizontal a escalas muy variables (Stinco y Barredo, 2014), encontrándose intercalaciones arenosas y calcáreas además de cambios de espesores a distancias variables, se considera conveniente llevar a cabo un estudio de caracterización de la roca en áreas donde los afloramientos resulten ser lo más representativos de esta formación. Será conveniente además analizar áreas aisladas entre sí, para estudiar los distintos compor-

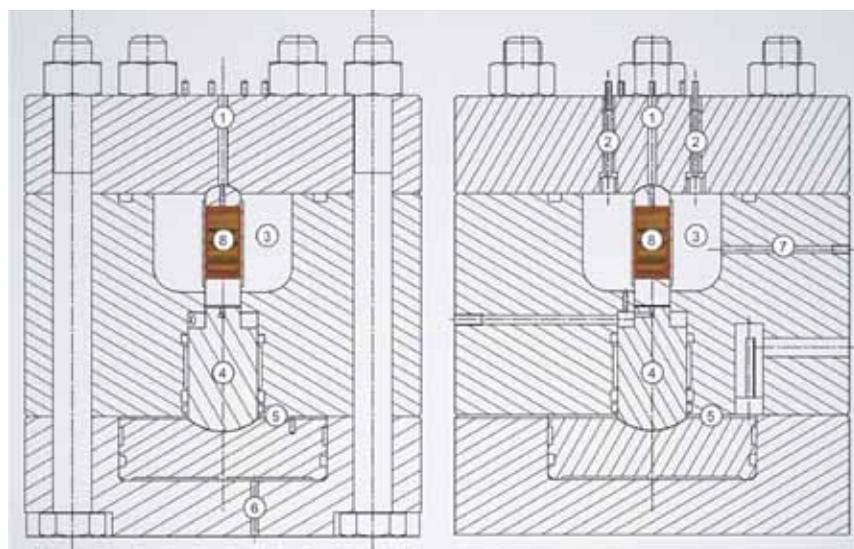


Figura 4. Cortes longitudinales a 90° mostrando el diseño para la construcción de la Celda Triaxial. Diseño a cargo del Departamento de Ingeniería Mecánica del ITBA (Blanco y Paterlini 2014, bajo la dirección del Dr. Ing. Pablo Leslabay).

Principales partes constitutivas: 1) Conducto para inyección de Presión Poral, 2) Conectores eléctricos para sensores (x8), 3) Cámara de aceite a alta presión, 4) Pistón axial responsable del esfuerzo deviatorico, 5) Carrera máxima del pistón: 2 mm, 6) Conducto inyector de aceite para Presión de Pistón Axial, 7) Conducto inyector de aceite para Presión de Confinamiento, 8) Testigo de roca de 2" de largo x 1" de diámetro (con posibilidad de usar testigos de menor diámetro y largo).

tamientos de los esfuerzos regionales, teniendo en cuenta las secciones aflorantes y las de subsuelo, caracterizando su litología, geoquímica, petrofísica y geomecánica.

Por otra parte, el estudio de la mineralogía, permitirá determinar la fragilidad o ductilidad de la roca, sobre todo el contenido de cuarzo, carbonato y arcillas determinarán de manera significativa los parámetros elásticos, los cuales se vincularán luego a los parámetros de resistencia de la roca (UCS, esfuerzo de tensión y ángulo de fricción), los que finalmente nos darán los indicios sobre la eficiencia para estimular la roca mediante el fracturamiento hidráulico.

Las pelitas con alto porcentaje de cuarzo y carbonato, tienden a ser más frágiles y fracturables, dando como resultado un gran número de fracturas inducidas de pequeña escala al ser estimuladas. En cambio, las pelitas con alto contenido arcilloso tienden a comportarse de manera dúctil frente a la estimulación hidráulica. Como valor de corte se puede utilizar un porcentaje de arcilla menor al 40% para que la roca sea considerada fracturable (King, 2010).

Ensayos geomecánicos de laboratorio

En la actualidad, existe una amplia variedad de ensayos geomecánicos de laboratorio disponibles para aplicaciones a la industria del petróleo. Entre los ensayos más comunes, se destacan los ensayos uniaxiales y triaxiales con y sin medición de deformación, ensayos triaxiales simples y múltiples, ensayo de colapso de cilindro hueco, ensayo de esfuerzo a la tensión (o brasiler), ultrasónico, entre otros.

Estos proporcionan propiedades de las rocas fundamentales para fines de caracterización de esfuerzos alrededor de un pozo, diseños de terminación, así como información sobre cómo las formaciones rocosas podrían comportarse de acuerdo con sistemas de esfuerzos complejos dentro del reservorio durante la vida de un campo.

Armado de Celda Triaxial para ensayos en Formación Vaca Muerta

Con la finalidad de arribar a un estudio geomecánico completo y calibrado para la Formación Vaca Muerta, se está desarrollando en conjunto con el Departamento de Ingeniería Mecánica del ITBA una celda triaxial (figuras 4 y 5), capaz de realizar ensayos uniaxiales,

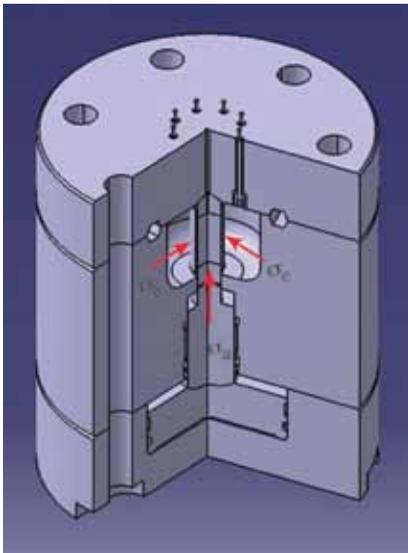


Figura 5. Dibujo isométrico derivado de la figura 4, mostrando además, direcciones y tipos de esfuerzos ejercidos, los que conservan analogía con los esfuerzos mostrados en la figura 10, según: $s_1=s_a$ y $s_2=s_3=s_c$. (Blanco y Paterlini 2014).

triaxiales simples y triaxiales múltiples, todos con la posibilidad de medición de deformación e inyección de fluidos para simulación de presión poral (Blanco y Paterlini 2014).

La utilización de dicha celda permitirá calcular los parámetros mecánicos necesarios para la correcta caracterización de las pelitas, limolitas, areniscas, margas y carbonatos que conforman las facies de la formación en estudio. Su utilización será de relativa simpleza y su funcionamiento queda demostrado según la figura 6.

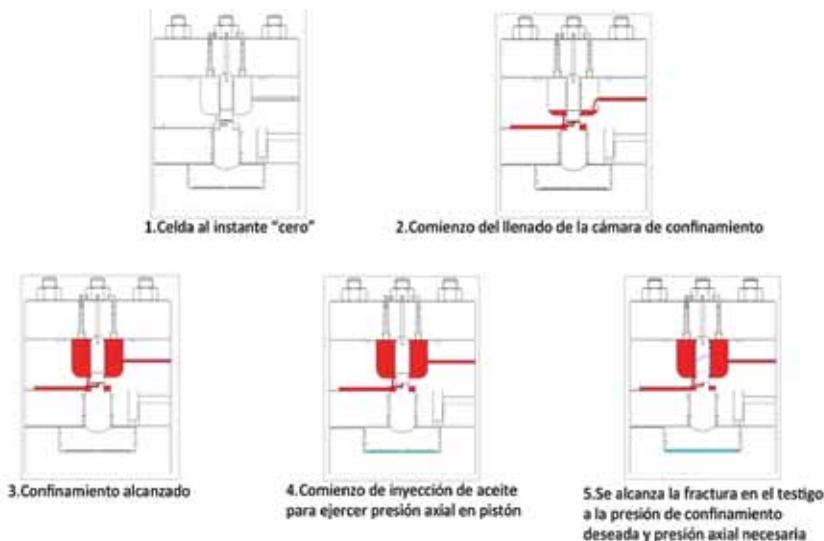


Figura 6. Secuencia ideal de las distintas etapas del funcionamiento de la celda triaxial bajo presión de confinamiento y presión axial hasta alcanzar la rotura del testigo de roca.

Los parámetros obtenidos serán de gran valor para la calibración de los modelos geomecánicos realizados en las zonas relevadas dentro de la Cuenca Neuquina.

Los parámetros que se podrán obtener serán los módulos elásticos de Young (ϵ), Poisson (ν), y en forma indirecta se podrán calcular el módulo de compresibilidad (K) y el módulo de corte (G). Se obtendrán además los parámetros de resistencia de la roca (rigidez a la compresión sin confinamiento - UCS, resistencia a la tensión, ángulo de fricción interna y cohesión), mediante el uso de la envolvente de Mohr-Coulomb (figura 7 - Ecuación 2).

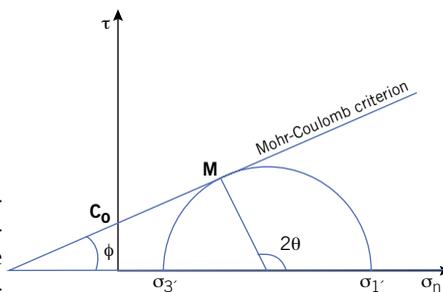


Figura 7. Representación gráfica del estado de esfuerzo en Criterio de falla de Mohr-Coulomb; donde: M: punto de falla de la roca, τ : esfuerzo a la cizalla, C_o : cohesión, ϕ : ángulo de fricción interna, σ_n : esfuerzo normal, P_p : presión poral, θ : ángulo del plano de falla y σ_1 , σ_3 : esfuerzo máximo y mínimo respectivamente (Economides 2000).

$$\tau = C_o + \tan(\phi) \cdot (\sigma_n - P_p) \quad \text{Eq. (2)}$$

Al tratarse de un medio anisotró-

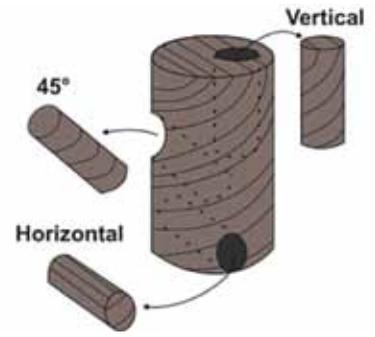


Figura 8. Orientación de testigos de roca extraídos a partir de coroneo en pozo para su posterior análisis en celda triaxial.

pico y heterogéneo, se observa que las propiedades de las rocas varían en distintas direcciones; por dicho motivo, se desprende la necesidad de analizar muestras orientadas en dirección vertical, horizontal y a 45° (figura 8).

Las rocas de la Formación Vaca Muerta presentan variaciones en sus propiedades en sus diferentes ejes, debido a variaciones litológicas en la vertical, ocurrencia de fracturas naturales verticales a subhorizontales y combinación entre laminación y fracturamiento. Para su estudio, se analizan tres modelos de anisotropía, denominados VTI (*Vertical Transverse Isotropy*), HTI (*Horizontal Transverse Isotropy*) y ortorrómbico (Ortotrópico), respectivamente (figura 9), siendo el modelo más utilizado el VTI por simplicidad. También existe anisotropía debida a la diferencia de esfuerzos en la horizontal y vertical (Ruger 1996).

Los parámetros obtenidos podrán ser usados luego para calibrar los modelos geomecánicos en diversas zonas, logrando así también, calcular mediante la ecuación poro-elástica (ecuación 3 a y b) los esfuerzos horizontales máximos y mínimos en ambientes tectónicos anisotrópicos y materiales anisotrópicos. Cabe mencionar que el esfuerzo vertical será calculado a partir de perfil eléctrico de densidad y la presión poral se obtendrá a partir de correlaciones y será calibrada con datos de pozo.

$$\sigma_h = \alpha_h \cdot P_p + (E_h/E_v) \cdot (\nu_v/1 - \nu_h) \cdot (\sigma_v - \alpha_v \cdot P_p) + (E_h)/(1 - \nu_h^2) \cdot (\epsilon_h + \nu_h \cdot \epsilon_H) \quad \text{Eq. (3a)}$$

$$\sigma_H = \alpha_h \cdot P_p + (E_h/E_v) \cdot (\nu_v/1 - \nu_h) \cdot (\sigma_v - \alpha_v \cdot P_p) + (E_h)/(1 - \nu_h^2) \cdot (\epsilon_H + \nu_h \cdot \epsilon_h) \quad \text{Eq. (3b)}$$

Donde ϵ_h y ϵ_H son las deformaciones tectónicas mínima y máxima

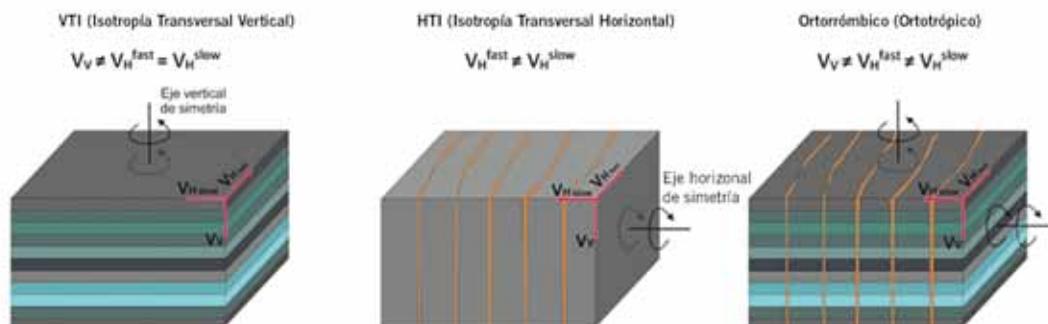


Figura 9. Modelos de anisotropía aplicables a rocas de tipo lutitas como las encontradas en la Formación Vaca Muerta. De izquierda a derecha, modelo VTI, para rocas laminadas, modelo HTI, para rocas naturalmente fracturadas verticalmente y Ortorrómbico, para combinaciones de fracturas naturales y laminación. Referencias: V_V : Velocidad Vertical, V_H^{fast} : Velocidad Horizontal Rápida y V_H^{slow} : Velocidad Horizontal Lenta.

sobre la horizontal, con $\epsilon_H > \epsilon_h$, siendo estos los factores principales de calibración; σ_h , σ_H y σ_v son los esfuerzos principales horizontales mínimo, máximo y vertical; a será la Constante de Biot; P_p la presión poral; E_h y E_v los módulos de Young en la horizontal y vertical; y ν_h y ν_v serán los módulos de Poisson en la horizontal y vertical (Economides 2000).

Uno de los principales objetivos consta en arribar a correlaciones propias para ser aplicadas en la Cuenca Neuquina, particularmente a la Formación Vaca Muerta, por su actual importancia como uno de los yacimientos no convencionales más importantes del mundo, lo que permitirá elaborar modelos más realistas al no depender de análogos cuyas características geológicas son muy diferentes a las descritas en Cuenca Neuquina.

Los parámetros elásticos estáticos obtenidos en laboratorio*, servirán luego para corregir/calibrar los parámetros estáticos obtenidos a partir del análisis de registros acústicos de perfilaje de pozo. Cabe destacar que los parámetros estáticos de registro de pozo son calculados a partir de los dinámicos mediante correlaciones empíricas (como las de Morales-Marcinew, Eiza-Kazi, Deere-Miller, entre otros), basados principalmente en datos petrofísicos. Esto se hace debido a que para los cálculos del criterio de falla de la roca, se necesitan valores estáticos, los que en general son menores a los dinámicos. Los primeros se ensayan en muestras de volumen muy reducidas, con menores deformaciones, deformaciones reversibles, deslizamiento en la fractura, relación de módulo dinámico/estático muy altas, etcétera (Economides 2000).

Especificaciones técnicas para el armado de la Celda Triaxial

- Testigo de roca (*plug*):
 - Razón Largo/Ancho de la probeta debe ser 2:1 (lo más cercano posible)
 - Los extremos deben ser paralelos y pulidos, sin grietas
 - Ancho de muestra debe ser >10 veces el tamaño medio del grano
- Dimensiones admisibles:
 - Diámetro: 1" (25.4 mm) o 3/4" (19.05 mm)
 - Largo: 2" (50.8 mm) o 1.6" (40.64 mm) o 1.2" (30.48 mm)
- Litologías principales:
 - Pelitas
 - Areniscas
 - Carbonatos
- Parámetros de Confinamiento (cámara de confinamiento):
 - Presión Máxima de fluido de Confinamiento: 69 MPa / 690 Bar / 10.000 PSI
 - Caudal Máximo de Inyección a P. Max. Conf.: 0.4 l/min
- Parámetros axiales (Pistón Hidráulico):
 - Fuerza de compresión máxima: 370kN
 - Presión Axial Máxima sobre el testigo: 573 MPa / 5730 Bar / 83.000 PSI
 - Carrera Máxima del Pistón: 2 mm
 - Presión Máxima de fluido del Pistón: 31.5 MPa / 315 Bar / 4.500 PSI

Como ya fuera mencionado anteriormente, la celda triaxial en cuestión permitirá realizar los ensayos que se describen a continuación, variando

la intensidad de los esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 , en forma análoga al esquema bidimensional, donde se muestran dos direcciones de esfuerzos externos al objeto, perpendiculares entre sí y paralelos a la cara, y hacia el interior se observan los esfuerzos normales y cizallantes derivados (figura 10).

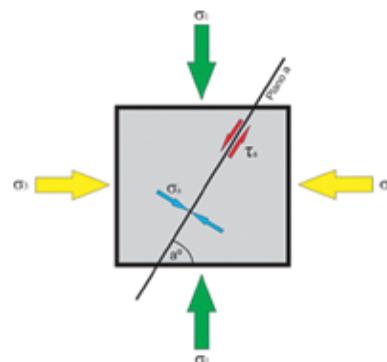


Figura 10. Esquema en dos dimensiones mostrando dos direcciones de esfuerzos externos al objeto, perpendiculares entre sí. De estos se derivarán un esfuerzo normal al plano "a" (σ_a) y cizallante al plano "a" (τ_a), a un determinado ángulo "a".

Ensayo uniaxial o de compresión simple

Este ensayo permite determinar en el laboratorio la resistencia uniaxial no confinada de la roca, o resistencia a la compresión simple, σ_c . Es un ensayo para la clasificación de la roca por su resistencia. La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es:

$$\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

El ensayo trata de la aplicación gradual de una fuerza axial a un cilindro de roca, hasta que se produce su rotura; los datos obtenidos serán los

módulos elásticos de Young (ϵ), Poisson (ν) y rigidez de la roca a partir de la medida del UCS (rigidez a la compresión sin confinamiento).

Procedimiento

Antes del inicio de los análisis mecánicos, se deben tener en cuenta los protocolos de conservación de las muestras y su correcta identificación a partir de un profundo conocimiento de la roca desde su litología, fábrica, estructuras y propiedades petrofísicas. Luego, se deberán tomar las dimensiones de las muestras para validar si satisfacen las condiciones admisibles del ensayo; se recubre la muestra con una membrana, cuyo fin será el de evitar que al momento de fallar la roca no contamine el fluido hidráulico del dispositivo. Se sitúa el testigo de tal forma que el pistón de la máquina quede paralelo a las caras transversales de la muestra. Se mide la presión a la cual está siendo sometida la muestra mediante un sistema electrónico conectado directamente a la prensa hidráulica, la presión debe ser medida a cada instante ya que, al momento de fallar, la aguja que indica el valor de la carga vuelve al punto de partida. Una segunda persona será la encargada de ir aumentando paulatinamente la presión en la prensa hidráulica y una vez alcanzada la falla del testigo, se retira y se analizan las condiciones y modo de ruptura.

Ensayo de compresión triaxial

Este ensayo representa las condiciones de las rocas *in situ*, es decir, sometidas a esfuerzos confinantes mediante la aplicación de presión hidráulica uniforme alrededor del testigo de roca. Permite determinar la envolvente de Mohr o línea de resistencia del material rocoso ensayado, a partir de la cual se obtendrán los valores de sus parámetros de resistencia, cohesión (χ) y ángulo de fricción (ϕ); además, se obtendrán los módulos de Young (ϵ) y Poisson (ν) a presión de confinamiento y el pico de resistencia de la roca. La relación entre los esfuerzos aplicados a la probeta es:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$$

Procedimiento

Antes del inicio de los análisis mecánicos, se deben tener en cuenta

los protocolos de conservación de las muestras y su correcta identificación a partir de un profundo conocimiento de la roca desde su litología, fábrica, estructuras y propiedades petrofísicas. Luego, se deberán tomar las dimensiones de las muestras para validar si satisfacen las condiciones admisibles del ensayo; se recubre la muestra con una membrana impermeable, cuyo fin será el de evitar que el líquido usado para generar la presión de confinamiento penetre en el testigo. Se sitúa el testigo dentro de una cámara que será la encargada de mantener la muestra a una presión de confinamiento determinada; esta se encuentra conectada con la prensa hidráulica manipulada por un operario del laboratorio cuyo único fin es inyectar líquido hidráulico a la cámara y de esta forma fijar la presión de confinamiento. Un segundo operario se encargará de medir la presión a la cual está siendo sometida la muestra, mediante un manómetro conectado directamente a la prensa hidráulica; la presión debe ser medida a cada instante ya que, al momento de fallar, la aguja que indica el valor de la carga vuelve al punto de partida. La presión en la prensa hidráulica deberá incrementar en forma paulatina mientras que una tercera persona regula la presión confinante manteniéndola constante durante todo el ensayo. Esta presión puede ser cualquiera; sin embargo, se recomienda un aumento de forma progresiva dependiendo de la respuesta de la roca durante los ensayos. Una vez que falle el testigo se retira y se analizan las condiciones y modo de ruptura.

Existen dos variantes dentro del ensayo triaxial; estas son los ensayos de una sola etapa y de múltiples etapas de fractura, ambos con medidas de deformación. El primero consiste en la medición del pico de esfuerzo de rigidez (UCS) utilizando el criterio de Mohr-Coulomb, obteniendo además ángulo de fricción y cohesión. Se realizan varios tests en muestras similares a igual profundidad, variando las presiones de confinamiento. El ensayo múltiple resulta ser el test más completo, donde se aplican esfuerzos axiales a diferentes presiones de confinamiento sin llegar a fracturar la muestra (no ocurre el pico de resistencia/rigidez). Se repite el procedimiento un mínimo de 3 veces, sien-

do el ideal 5, aprovechando mejor la corona y reduciendo la incertidumbre debida a la alta heterogeneidad.

A modo de resumen de algunas de las propiedades descriptas, se muestra la tabla 1, la cual cuenta con información de diversos tipos de rocas relevados entre la zona oriental de los Estados Unidos y Gran Bretaña, mostrando los correspondientes valores según sus propiedades mecánicas.

Conclusiones

Varias son las empresas operadoras y de servicios que al día de hoy realizan estudios geomecánicos en el área de la Cuenca Neuquina, pero en su mayoría, se basan en modelos y correlaciones utilizados en países pioneros en la temática, conllevando en la práctica a generar grandes incertezas en los resultados, llegando a producir consecuencias negativas en varias operaciones.

Para contribuir al conocimiento, aportar soluciones y optimizar procedimientos, se propuso estudiar los aspectos mecánicos de las rocas que componen la Cuenca Neuquina en general, con mayor detalle en la Formación Vaca Muerta. Dichos estudios impactarán en lo que respecta a la forma en que se completarán los pozos verticales y horizontales, en la forma en que se desarrollarán las fracturas hidráulicas para la estimulación del reservorio, para los problemas de arenamiento, colapso de cañería, etcétera.

Para lo mencionado anteriormente, se diseñó en forma interdisciplinaria la celda triaxial presentada en este trabajo. Con ella, se obtendrán los parámetros mecánicos en muestras de afloramiento y en coronas extraídas de pozos; dichos parámetros serán utilizados luego para ajustar las observaciones y cálculos realizados a partir de la información obtenida de los pozos de estudio.

Algunos de los parámetros de mayor importancia que se obtendrán serán los módulos elásticos de Young (ϵ), Poisson (ν), y a partir de estos, en forma indirecta se podrán calcular los módulos de compresibilidad (K) y de corte (G). Asimismo, se obtendrán los parámetros de resistencia de la roca (UCS, Resistencia a la Tensión, Ángulo de Fricción Interna y Cohesión).

Roca	Densidad seca (t/m ³)	Porosidad (%)	UCS medio MPa	UCS saturado MPa	Young GPa	Resistencia a la tracción MPa	Resistencia a la cizalla* MPa	Ángulo de fricción ϕ
Granito	2,7	1	200		75	15	35	55
Basalto	2,9	2	250		90	15	40	50
Gauwaca	2,6	3	180	160	60	15	30	45
Arenisca (Cb)	2,2	12	70	50	30	5	15	45
Arenisca (Tr)	1,9	25	20	10	4	1	4	40
Caliza (Cb)	2,6	3	100	90	60	10	30	35
Caliza (Jr)	2,3	15	25	15	15	2	5	35
Limolita (Cb)	2,3	10	40	20	10	1		30
Lutita (Cb)	2,3	15	20	5	2	0,5		25
Carbón	1,4	10	30		10	2		
Yeso	2,2	5	25		20	1		30
Sal	2,1	5	12		5			
Mármol	2,6	1	100		60	10	32	35
Gneiss	2,7	1	150		45	10	30	30
Esquisto	2,7	3	60		20	2		25
Pizarra	2,7	1	90		30	10		25

Tabla 1. Ejemplo de parámetros asociados a la resistencia de rocas en el área oriental de Estados Unidos y Gran Bretaña. Cb: Carbonífero, Tr: Triásico, Jr: Jurásico y (*): Resistencia a la cizalla sin confinamiento (Modificado de Walthman 1994).

Otra aplicación de gran utilidad para la industria será la utilización de dichos parámetros geomecánicos para poblar mapas estructurales junto a secciones estructurales en áreas aflorantes y en centro de cuenca (mediante información sísmica y pozos). El resultado final de los estudios preliminares realizados, más información recopilada de diversas áreas de la cuenca, permitirá arribar a un modelo computacional aproximado del comportamiento mecánico de la cuenca, pudiendo luego extrapolar la información necesaria a diversos yacimientos, reduciendo así la incertidumbre en las actividades llevadas a cabo en los yacimientos productivos, especialmente los catalogados como no convencionales. ■

Referencias

- Askenazi, A., P. Biscayart, M. Cánova, S. Montenegro, S. y M. Moreno, 2013. *Analogía entre la Formación Vaca Muerta y Shale Gas/Oil Plays de EE.UU.*, YPF S.A. Copyright 2013, Society of Petroleum Engineers.
- Blanco, S. y F. Paterlini, 2014. *Máquina de Ensayo Triaxial*. Tesis Final de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA) – Tesis Final inédita.
- Economides, M.J. y K. G. Nolte, 2000. *Reservoir Stimulation*, John Wiley & Sons, Ltd., New York, 2000.
- Kietzmann, D.A., R. M. Palma y G. S. Bressan, 2008. "Facies y microfacies de la rampa tithoniana-berriasiense de la Cuenca Neuquina (Formación Vaca Muerta) en la sección del arroyo Loncoche – Malargüe, provincia de Mendoza". Revista de la Asociación Geológica Argentina 63(4), págs. 969-713.
- King, G, 2010. *Thirty years of gas shale fracturing: what have we learned?* SPE 133456 Annual Technical Conference and Exhibition, Florencia, Italia.
- Legarreta, L., Villar, H. J., Laffitte, G. A., Cruz, C. E., y Vergani, G., 2005. Balance de masa enfocado a la evaluación del potencial exploratorio de los distritos productivos y de las zonas no productivas. VI Congreso de Exploración y Explotación de Hidrocarburos, Mar del Plata. Argentina.
- Mukerji, T., N. Dutta, M. Prasad, J. y Dvorkin, 2002. *Seismic Detection and Estimation of Overpressures, Part 1: the Rock Physics Basis*, CSEG Recorder Septiembre, 2002.
- Rodríguez, N., P. R. Cobbold, H. Lothet, y G. Ruffet, 2009. *Widespread bedding-parallel veins of fibrous calcite ("beef") in a mature source rock (Vaca Muerta Fm, Neuquén Basin, Argentina): evidence for overpressure and horizontal compression*. Journal of the Geological Society, London, 166 (4), 695-709, doi 10.1144/0016-76492008-111.
- Rüger, A., 1996. *Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media*, Doctoral Thesis, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Stinco, L. y S. Barredo, 2014. *Vaca Muerta Formation: an Example of Shale Heterogeneities Controlling Hydrocarbon's Accumulations*. CID 1922563. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). American Association of Petroleum Geologists. Denver, Estados Unidos.
- Energy Information Administration, 2013. Country Analysis note. United States. <http://www.eia.gov/countries/country-data.cfm?fips=AR>
- Vásquez, A., 2000. Introducción a la Geomecánica Petrolera. Capítulo 12. Información Geomecánica de datos de campo. <http://es.scribd.com/doc/68014977/curgeo12-Info-GeomecCampo-1>.
- Veiga, R., y I. Orchuela, 1988. Técnicas de perfilaje para identificar niveles generadores de hidrocarburos en la Formación Vaca Muerta. Boletín de Informaciones Petroleras, Tercera Época, 13, págs. 76-94.

* Mediante el uso de sensores acústicos se podrían realizar mediciones dinámicas de laboratorio, pero no serán implementadas en la celda triaxial tratada aquí.