

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LABORATORIO APLICADO A LA FORMACIÓN VACA MUERTA

Agustín Sosa Massaro¹, D. Nicolás Espinoza², Marcelo Frydman³, Pablo E. Benítez⁴, Tristán Speranza¹

1: Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), asosa@itba.edu.ar, tsperanza@irba.edu.ar

2: The University of Texas at Austin (UT), espinoza@austin.utexas.edu

3: Schlumberger Production Management, mfrydman2@slb.com

4: Colorado School of Mines (CSM), pablobenitez@mymail.mines.edu

Palabras clave: **Litología, anisotropía, resistencia a la fractura, propagación, fractura hidráulica**

ABSTRACT

Laboratory Geomechanical Characterization with application to the Vaca Muerta Formation

Geological, petrophysical and geomechanical properties of petroleum source rocks systems vary considerably according to the depositional environment (depth, organic content, thermal maturation, and mineralogical composition, among others). Such variations result in significant property changes regarding the orientation with respect to lamination, and the scale of the analysis. Understanding of anisotropy is essential for an accurate estimation of the stress distribution and hydraulic fracture initiation and propagation; including orientation, branching, and arrest of induced fractures.

This study presents a set of geomechanical tests performed on samples from the Vaca Muerta Formation in order to characterize the rock mechanical properties subjected to hydraulic fracturing. The samples come from well cores and outcrops and cover a wide variety of lithologies within the sedimentary sequence from base to top. The results show a significant variability of unconfined compressive strength, tensile strength, and fracture toughness. The most important controls are the lithology, the orientation with respect to lamination, the rock density, and the presence of natural fractures or heterogeneities. The obtained results suggest that lamination, pre-existing fractures, beef beds intercalations, volcanic ash-beds, and carbonate concretions within the Vaca Muerta Formation, can have a significant impact on hydraulic fracture propagation and geometry.

INTRODUCCIÓN

La Formación Vaca Muerta se encuentra ubicada en la cuenca Neuquina, hacia el sector centro oeste de Argentina. Posee una edad Tithoniano-Valanginiano (Weaver 1931), pudiendo ser hallada en sectores aflorantes hacia el oeste de la cuenca, y en subsuelo, abarcando gran parte de la cuenca. Dentro del yacimiento en estudio, la Formación Vaca Muerta se encuentra en profundidades que rondan entre los 2.300 mts y los 3.200 mts (profundizándose de este a oeste), presentando espesores en aumento de este a oeste, entre los 350 mts y los 550 mts.

Las rocas analizadas (denominadas de tipo “*shale*”), varían en gran medida en su composición

y propiedades de una ubicación a otra. La heterogeneidad vertical y las fracturas naturales generan un gran impacto en la geometría de la propagación de la fractura hidráulica (Suarez-Rivera *et al.* 2011; Tinni *et al.* 2012; Lee *et al.* 2015; Sharma *et al.* 2015; Espinoza *et al.* 2016). Las variaciones en la rigidez de las rocas generan diferencias en los esfuerzos horizontales, las que afectan la propagación vertical y al ancho de la fractura (Adachi *et al.* 2007). Las fracturas generadas por la inyección de fluidos a altas presiones propagan la apertura en dirección perpendicular al esfuerzo principal menor. En ambientes tectónicos (Frydman *et al.* 2016), las capas rígidas acumulan esfuerzos horizontales y tienden a actuar como barreras a la propagación de fracturas. La heterogeneidad en la rigidez también puede causar variaciones en la rotación de los esfuerzos principales, consecuentemente en la propagación de las fracturas hidráulicas, llevándolas desde planos predominantemente verticales a horizontales, y viceversa (Valko y Economides, 1995; Frydman *et al.* 2016). La heterogeneidad en cuanto al contraste de resistencia de las diferentes capas de roca, puede también determinar la reorientación de la propagación de la fractura, la detención y la ramificación. Las fracturas preexistentes (tanto abiertas, cerradas o rellenas), a menudo se comportan como planos de debilidad, facilitando la reorientación y propagación dentro de zonas con menor resistencia a la propagación de la fractura, como pueden serlo las rocas de tipo shale (Warpinski *et al.* 2009; Dahi Taleghani *et al.* 2014; Lee *et al.* 2015).

En la actualidad existe una amplia variedad de ensayos de laboratorio geomecánicos disponibles para aplicaciones en la industria del petróleo. Estos ensayos proporcionan propiedades de las rocas fundamentales para fines de caracterización de esfuerzos alrededor de un pozo, diseño de terminación, y comprensión del comportamiento de un reservorio durante la vida de un yacimiento entre otras aplicaciones. Este trabajo presenta diversos ensayos para comprender y caracterizar la Formación Vaca Muerta. El ensayo de tracción (o Brasileiro) permite conocer la resistencia a la ruptura por tensión de la roca (tensile strength - T_0). El ensayo de tres puntos de tensión o flexión en muestra semi-circular (semi-circular bending - SCB) permite calcular la tenacidad o resistencia a la propagación de la fractura (fracture toughness - K_{Ic}). El ensayo uniaxial, o de compresión simple, permite calcular la resistencia de la roca bajo compresión, sin confinamiento (Unconfined Compressive Strength – UCS o C_0). El ensayo triaxial permite conocer los módulos elásticos (de cizallamiento - G ; de compresibilidad - K ; de Young - E ; y relación de Poisson - ν), y los parámetros de resistencia de la roca (resistencia máxima a la fractura por compresión axial a diversas presiones de confinamiento - *peak strength*); ángulo de fricción - ϕ ; y cohesión - S_0).

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El equipo de laboratorio utilizado para la extracción y preparación de las muestras (plugs), consta de un taladro de columna para la extracción de testigos, una sierra sensitiva, una cortadora y pulidora, y una cortadora de precisión. Todas las muestras estudiadas pertenecen a la Formación

Vaca Muerta, y fueron obtenidas en diversos afloramientos ubicados hacia la zona estructurada y aflorante, hacia el oeste de la cuenca Neuquina (de norte a sur: Yesera del Tromen (YdT), Puerta Curaco (PC), Lago Aquineo (LA), Sierra de la Vaca Muerta (SVM) y Picún Leufú (PL)). Por otra parte, se analizaron muestras extraídas de coronas de tres pozos pertenecientes al Yacimiento El Trapial, hacia la zona noroeste del engolfamiento.

Además del equipamiento de laboratorio utilizado para la extracción y preparación de las muestras, se utilizaron equipos específicos para la generación de ensayos geomecánicos con capacidades diversas en muestras preparadas según requerimientos diferentes. La adquisición y procesamiento de datos se llevó a cabo mediante el uso de software especializado.

Se han analizado un total de 56 rocas, de las cuales 32 son de afloramientos y 24 de pozos. Del total ensayado, ha sido posible analizar en la gran mayoría sus propiedades anisotrópicas, es decir, las variaciones intrínsecas según la dirección analizada, y considerando medios con isotropía transversal a la vertical (ITV), según Thomsen (1986). En muestras extraídas en dirección paralela a la estratificación de la roca (Horizontales = H), se analizaron las propiedades medidas en dirección paralela a la laminación ($H^{\parallel}$) y perpendicular ($H^{\perp}$); en muestras extraídas en dirección perpendicular a la estratificación (Verticales = V), se analizaron sus propiedades medidas en dirección perpendicular a la laminación (V), y sólo sobre algunas muestras analizadas por el laboratorio comercial, fue posible obtener sus propiedades elásticas a 45° respecto a la laminación (Tabla 1).

Este trabajo se enfoca en la realización y análisis de diversos tipos de ensayos geomecánicos, como el ensayo uniaxial o de compresión simple, el ensayo Brasilero, y el ensayo de tres puntos de tensión o flexión en muestra semi-circular. Por su parte, los ensayos triaxiales, son de gran utilidad para el cálculo y calibración del modelo elástico, no serán tratados aquí (para mayor información sobre el cálculo de los mismos, ver Sosa Massaro *et al.* 2017).

ENSAYOS GEOMECÁNICOS		APLICACIÓN	
		CARACTERIZACIÓN GENERAL	MODELO ITV
Triaxial/UCS	V	SI	SI
	H	SI	SI
	45°	SI	SI
Brasilero	V	SI	NO
	$H^{\perp}$	SI	SI
	$H^{\parallel}$	SI	SI
	$H^{45^{\circ}}$	SI	SI
3PT	V	SI	SI
	$H^{\perp}$	SI	NO
	$H^{\parallel}$	SI	SI
	$H^{45^{\circ}}$	SI	SI

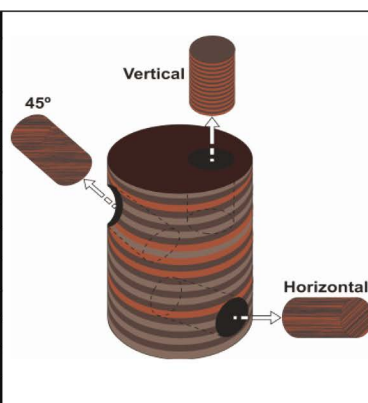


Tabla 1. Tipos de ensayos geomecánicos y su aplicación en este trabajo. La figura ejemplifica la forma en que fueron extraídas las muestras con respecto a la laminación. $H^{\parallel}$ y $H^{\perp}$ representan muestras horizontales (paralela a la estratificación de la roca) con carga paralela y perpendicular a la laminación. Las muestras a 45° fueron analizadas por un laboratorio comercial, y solo en ensayos triaxiales.

Las propiedades obtenidas en cada tipo de ensayo serán utilizadas para generar correlaciones entre las diversas propiedades mecánicas y parámetros como las litologías, densidades, y orientaciones, pudiéndose generar así, ecuaciones que permitirán obtener registros continuos extrapolables a los pozos estudiados.

Para lograr una mejor comprensión de las correlaciones obtenidas, se deberá tener en cuenta previamente que, para el análisis realizado, se han tomado muestras de afloramiento y subsuelo en diversas litofacies dentro de la Formación Vaca Muerta, en diferentes orientaciones con respecto a la estratificación, y en dos diámetros preferenciales. Tales variaciones requieren subclasificar las muestras y separar las mismas según su procedencia, litofacies, orientaciones y diámetros, y en los casos en que se muestren en forma conjunta, tener en consideración dichos aspectos que pueden conllevar diferencias en los resultados.

Ensayo uniaxial o de compresión simple

Este ensayo permite determinar en el laboratorio la resistencia a la compresión uniaxial sin confinamiento de la roca, o su resistencia a la compresión simple. Es un ensayo para la clasificación de la roca por su resistencia. La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es,

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

donde σ_a representa la carga axial o esfuerzo deviatorico, el cual puede ser considerado como el esfuerzo principal (σ_1), σ_c representa la presión de confinamiento, considerada como los esfuerzos medio y mínimo (σ_2 y σ_3 respectivamente), notándose que para este ensayo su valor es cero (0).

El ensayo aplica gradualmente una fuerza axial a un cilindro de roca hasta generar su rotura, pudiéndose obtener la resistencia a la compresión simple sin confinamiento (UCS), el módulo de Young, la relación de Poisson y el módulo de compresibilidad (Fjaer *et al.* 2008; González Vallejo 2002). Si la roca es anisotrópica, el tensor de rigidez elástica dependerá tanto de la dirección de la carga aplicada como de la dirección de medición de la deformación lateral (Fjaer *et al.* 2008). Por lo tanto, se debe especificar la orientación de la simetría de la muestra con respecto a la dirección del esfuerzo aplicado y deformaciones medidas.

Las mediciones de UCS son muy sensibles a la heterogeneidad de la muestra y las grietas inducidas por los procedimientos de extracción de la corona, extracción de testigos y los tratamientos básicos de rutina. Por lo tanto, cabe esperar una gran dispersión de resultados, especialmente en rocas débiles. A modo de alternativa, se suelen realizar ensayos triaxiales a bajas presiones de confinamiento (aproximadamente 100 PSI), donde algunas de las fisuras no asociadas a la naturaleza intrínseca de la roca se mantendrán cerradas (Fjaer *et al.* 2008).

Las muestras de roca para este ensayo deben cumplir ciertas normas tales como, la razón Largo/Ancho de la probeta debe ser 2:1 (ASTM D4543-08), ambas caras de los extremos deben ser paralelas, pulidas y sin grietas, y el ancho de la muestra debe ser >10 veces el tamaño medio del grano (Brown 1981).

Las mediciones obtenidas para tal ensayo, fueron realizadas en cuatro celdas diferentes, cada una con distintas capacidades y limitaciones. Por un lado, se utilizaron dos celdas de tipo uniaxial con diferentes capacidades de carga, ya que algunas muestras se preveían que requerirían mayor compresión hasta llegar a la fractura. Cabe recordar que, con el empleo de estas celdas, la presión de confinamiento será igual a 0 PSI. Las otras dos celdas utilizadas fueron de tipo triaxial (una de diseño propio del Instituto Tecnológico de Buenos Aires, y la otra de tipo comercial). La celda ITBA, posee la limitación de no permitir el ensayo según la recomendación de Fjaer *et al.* 2008 ($P_c=100$ PSI), permitiendo realizar el ensayo a 0 PSI o 435 PSI. Por su parte, la celda comercial permite realizar el ensayo a la presión de confinamiento que el usuario desee, permitiendo realizar el ensayo a 100 PSI según las normas.

Con la intención de poder generar correlaciones entre el UCS y variables tales como el módulo de Young estático y la resistencia a la fractura por tensión, fue necesario comprender la factibilidad de extrapolar ensayos realizados a diferentes presiones de confinamiento (sin confinamiento, 100 PSI y 435 PSI). Para ello, se generaron correlaciones a partir de un valor de presión de confinamiento denominado como “testigo” a $P_c=1800$ PSI, el cual hubiera sido analizado en todas las muestras (Fig. 1). Del análisis de las ecuaciones lineales obtenidas (con origen en “0”), se pudo observar

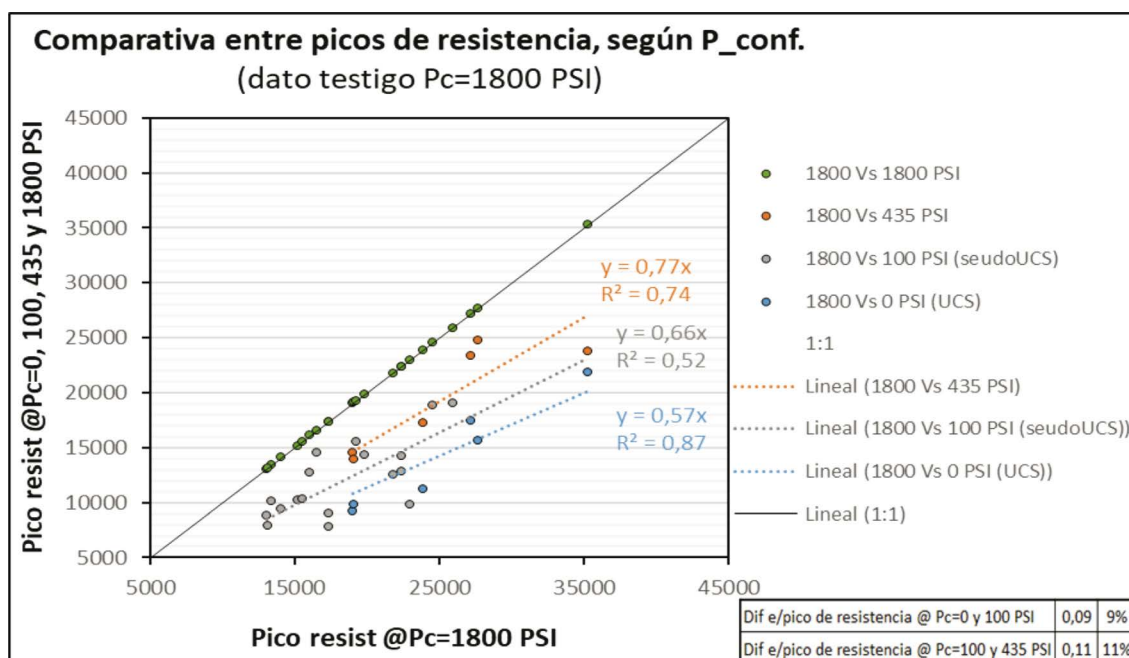


Figura 1. Diagrama comparativo entre ensayos realizados en muestras “gemelas” a diversas presiones de confinamiento, con el fin de hallar las posibles relaciones existentes entre las presiones de confinamiento y los picos máximos de resistencia de la roca, para estimar el UCS.

la existencia de una diferencia de un 9% entre los ensayos realizados a $P_c=0$ PSI y $P_c=100$ PSI, mientras que para los ensayos realizados a $P_c=435$ PSI, la diferencia fue de un 11%.

Los porcentajes calculados, permitieron estimar valores de pseudo-UCS ($P_c=100$ PSI). Los valores calculados en forma directa e indirecta, fueron utilizados posteriormente en correlaciones para hallar las relaciones entre el UCS y la resistencia de la roca a la fractura por tensión, en las direcciones paralela a la laminación de la roca y perpendicular a la laminación de la roca (UCS vs. TS, Fig. 8).

Ensayo de tracción o Brasilero

El ensayo de tracción o Brasilero es un ensayo en el cual se aplica una carga en una sola dirección a una muestra no confinada. Este ensayo es un método indirecto para obtener la resistencia a la ruptura por tensión. La compresión produce la ruptura por tensión desde el centro de la muestra, en forma normal a la dirección de la carga (Jaeger *et al.* 2007). Las ecuaciones del ensayo de tracción indirecta tienen validez para materiales de comportamiento isotrópico, elástico y lineal. La fórmula para calcular la resistencia a la ruptura por tensión (en inglés *Tensile Strength*, TS [PSI]) es la siguiente (ASTM D3967):

$$TS = T_0 = \frac{2P_{max}}{\pi DL} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde P_{max} [PSI] es la carga máxima a la que se fractura la muestra, D [in] es el diámetro de la muestra, y L [in] es el largo de la misma. La muestra presenta forma de disco circular de 1" pulgada y 1,5" pulgadas de diámetro, donde el largo de la muestra equivale a aproximadamente la mitad del diámetro (Fig 2-A). Se aplica una carga axial, ejerciendo una compresión a lo largo de dos ejes diametralmente opuestos de la muestra, a una velocidad constante de 0,0015 in/min, hasta llevar la muestra de roca a su rotura (Fig 2-B).

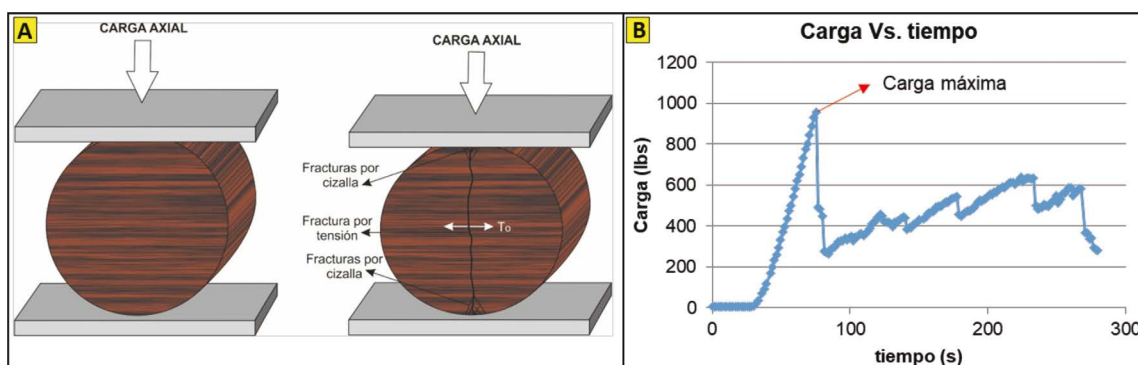


Figura 2. A) Configuración geométrica utilizada para el ensayo Brasilero. La representación muestra el ensayo antes y después de la aplicación de la carga hasta la fractura por tensión. B) Gráfico de carga Vs. Tiempo para una muestra de roca de tipo mudstone lítico.

Diferentes geometrías de muestras deben ser ensayadas para caracterizar la anisotropía de la ruptura por tensión en el ensayo Brasilerio (véase la figura 11-B). Se analizarán muestras de un mismo intervalo o profundidad, aplicando la carga axial sobre los ejes diametralmente opuestos de una muestra extraída en forma vertical con respecto a la laminación de la roca (V), horizontal paralela a la laminación ($H^{\parallel}$) y horizontal perpendicular a la laminación ($H^{\perp}$). La ecuación 1 fue desarrollada para materiales isotrópicos, mientras que una mejor aproximación para materiales con anisotropía de tipo ITV fue desarrollada por Yu *et al.* (2017). En este trabajo, los autores consideran como simplificación la utilización de la ecuación 1 para ambas geometrías horizontales, perpendicular a la laminación ($TS_{H^{\perp}}$) y paralelo a la laminación ($TS_{H^{\parallel}}$). La muestra vertical (TSV), se consideró en este enfoque equivalente a la geometría $TS_{H^{\perp}}$, donde las fracturas creadas se desarrollan perpendiculares a la laminación, lo cual concuerda con los resultados obtenidos (Fig. 3-A y Ecuación 2).

Los ensayos realizados muestran una amplia variedad de resultados, para los cuales se decidió generar una serie de diagramas de dos ejes (*crossplots*) que intentan explicar los valores obtenidos en función del grado de anisotropía (orientación) y litología.

Las figuras 3-A-B-C, muestran las correlaciones realizadas entre las tres direcciones principales de carga con respecto a la laminación ($TS_{H^{\perp}}$ vs. TS_V , $TS_{H^{\parallel}}$ vs. TS_V y $TS_{H^{\perp}}$ vs. $TS_{H^{\parallel}}$), en muestras de subsuelo y afloramiento, en 1" y 1,5" de diámetro. Así mismo, para los tres casos analizados, se generaron correlaciones asumiendo su origen en cero "0", ya que resulta intuitivo que los valores tendientes a cero en un eje, tenderán a cero en el otro. Por otra parte, tal forma de analizar los datos resulta de utilidad para lograr comprender el grado de anisotropía entre las muestras según la dirección analizada, permitiendo obtener correlaciones para generar el cálculo de registros continuos para las propiedades de resistencia a la fractura de los modelos geomecánicos 1D, tal como se verá en la figura 10. Cabe destacar que el coeficiente de determinación (R^2) asume que la función de regresión se encuentra centralizada en la distribución de puntos, por lo que, si toma una variable arbitraria como es el caso de la recta lineal con origen en cero, no necesariamente se cumplirá con la condición de centralización, y en consecuencia el R^2 no será una medición efectiva de la determinación.

Las relaciones obtenidas para $TS_{H^{\perp}}$ vs. TS_V en muestras de afloramiento de 1" y 1,5" (Fig 3-A), presentan claras tendencias dentro de un rango de valores muy similar alrededor de la línea 1:1. Ambas geometrías inducen fracturas perpendiculares a la laminación, lo cual es consistente con la obtención de valores similares para la resistencia a la ruptura por tensión ($TS_V \approx TS_{H^{\perp}}$). De todas maneras, correcciones futuras son requeridas para lograr considerar la distribución de esfuerzos durante el ensayo en geometrías de tipo ITV (Yu *et al.* 2017). La correlación con origen en cero "0" (recta amarilla), que engloba los resultados obtenidos en muestras de 1" y 1,5" de diámetro, muestra una relación de un TS_V 2,5% mayor al $TS_{H^{\perp}}$, según la ecuación lineal:

$$TS_V = 1,025 * TS_{H^{\perp}} \quad \text{Ecuación 2}$$

La relación obtenida para $TS_H^{//}$ vs. TS_V en muestras de afloramiento de 1,5" (Fig. 3-B), presenta una tendencia a ser tomada con precaución, debido a su bajo número de muestreo. Para el caso de 1", sólo se cuenta con una muestra representativa, pero cabe destacar que ésta se encuentra dentro del rango de la tendencia de las muestras de 1,5". La correlación con origen en cero "0" (recta amarilla), que engloba los resultados obtenidos en muestras de 1" y 1,5" de diámetro, muestra una relación de un TS_V 41% mayor al $TS_H^{//}$, según la ecuación lineal:

$$TS_V = 1,41 * TS_H^{//} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para el caso de las relaciones obtenidas entre $TS_H^{\perp}$ vs. $TS_H^{//}$ en muestras de 1" y 1,5", fue posible contar con una gran cantidad de muestras de 1,5" de subsuelo, debiendo destacar que estas mostraron un comportamiento muy diferente al de las muestras de afloramiento, las cuales no mostraron el mismo grado de anisotropía (Fig. 3-C). Es posible observar, que las muestras de afloramiento se dividen en dos grupos, las de 1" de diámetro, con valores de TS más altos y mayor anisotropía que las muestras de 1,5". La correlación con origen en cero "0" (recta amarilla), que engloba los resultados obtenidos en muestras de 1" y 1,5" de diámetro (tanto de afloramiento como de subsuelo), muestra una relación de un $TS_H^{\perp}$ 46% mayor al $TS_H^{//}$, según la ecuación lineal:

$$TS_H^{\perp} = 1,46 * TS_H^{//} \quad \text{Ecuación 4}$$

Cabe destacar que las diferencias observadas en el mayor grado de anisotropía en las muestras de subsuelo son opuestas a lo esperable, dado que las muestras de afloramiento al haber perdido su confinamiento hasta quedar expuestas en superficie, tienden a acrecentar su tendencia a separarse por sus planos de debilidad naturales conformados por la laminación intrínseca de este tipo de rocas (lutitas). Lo observado puede deberse en cierta medida a que las muestras de afloramiento ensayadas eran en su gran mayoría rocas extraídas de bancos más carbonáticos, donde los planos de laminación no son tan evidentes.

Cuando se comparan los valores de resistencia a la fractura por tensión con las litologías analizadas, es posible observar su relación con el grado y tipo de cementación, cantidad, forma y tamaño de partículas, grado de laminación, grado y tipo de fracturamiento natural, grado y tipo de alteración, planos de debilidad por presencia de fósiles, concreciones, *beef*, etc. Para el caso de las muestras extraídas en dirección vertical (es decir, perpendiculares a la laminación de la roca), se observa que a mayor grado de cementación y menor cantidad de partículas (siguiendo la clasificación de Dunham 1962), es mayor la resistencia a la ruptura por tensión (Fig. 3-D).

Las muestras horizontales (paralelas a la laminación de la roca), analizadas con carga perpendicular a la laminación (Fig. 3-E), mostraron un comportamiento similar al de las muestras verticales ($TS_V \approx TS_H^{\perp}$). Para las rocas carbonáticas, a mayor grado de cementación y menor

cantidad de partículas, es mayor la resistencia a la fractura por tensión; mientras que para las rocas detríticas (pelita, pelita calcárea y caliza arcillosa), no se observó un claro control como en las calizas, así como no se distinguió un control por los planos de debilidad generados por la laminación. Por último, la muestra de origen ígneo, extraída de un filón andesítico, presenta un valor alto de TS, sin superar al valor promedio de las pelitas calcáreas ni al mudstone carbonático.

Para el caso de las muestras horizontales analizadas con carga paralela a la laminación de la roca (Fig. 3-F), se observa un comportamiento totalmente opuesto al de las muestras verticales

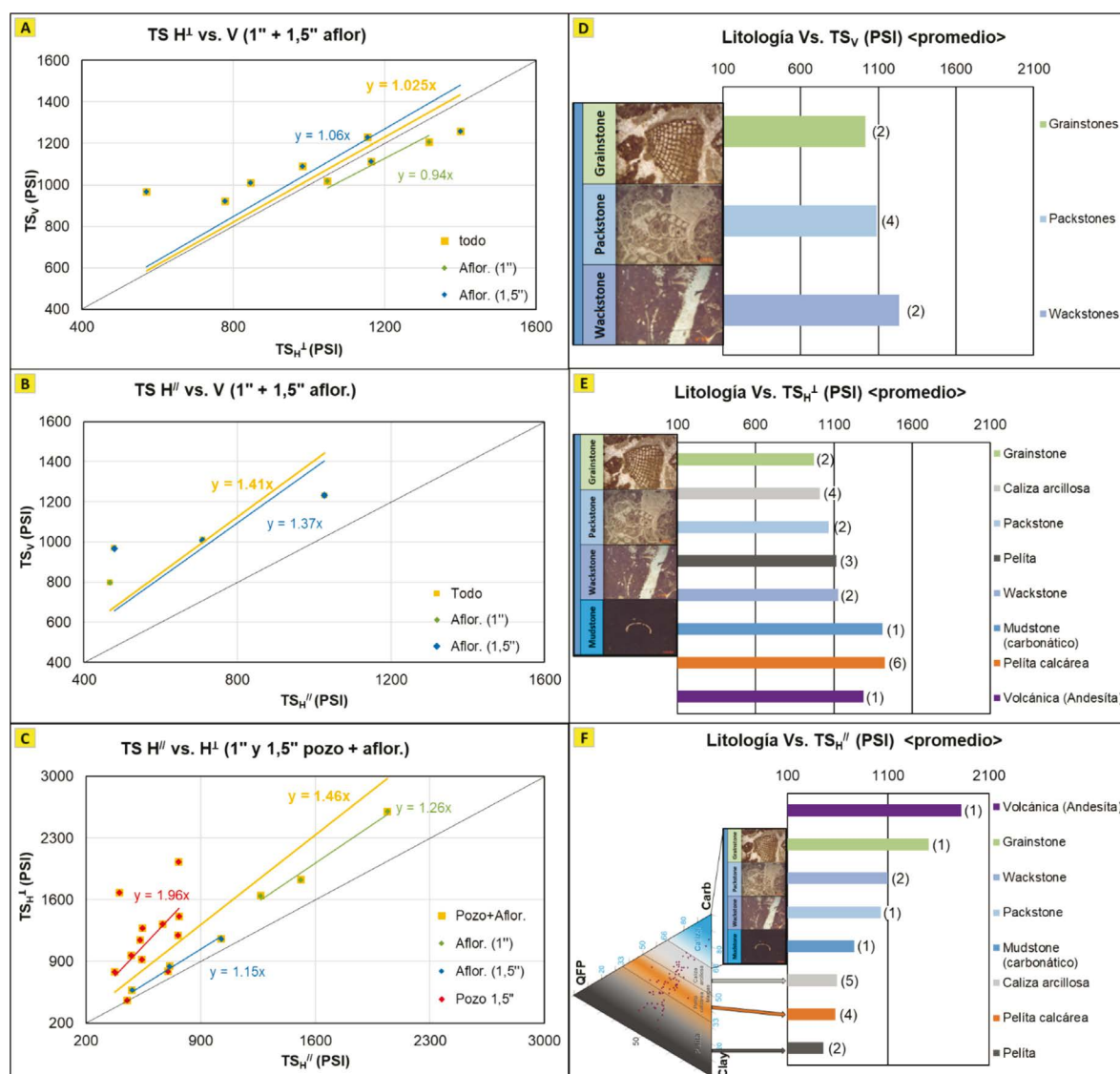


Figura 3. Izquierda: Relaciones de anisotropía en muestras de 1" y 1,5" (en afloramiento y subsuelo). A) Relaciones obtenidas para TS_{H[⊥]} vs. TS_V. B) Relaciones obtenidas para TS_{H[∥]} vs. TS_V. C) Relaciones obtenidas para TS_{H[⊥]} vs. TS_{H[∥]}. Notar el mayor grado de anisotropía en las muestras de subsuelo. Derecha: Relación entre las diversas litologías identificadas y la resistencia a ser fracturadas por tensión (número de muestras identificado entre paréntesis). D) Muestras verticales con carga perpendicular a la laminación. E) Muestras horizontales con carga perpendicular a la laminación. F) Muestras horizontales con carga paralela a la laminación (observar una tendencia opuesta a las muestras verticales y perpendiculares, efecto generado principalmente por el aumento en el grado de la laminación desde los carbonatos hacia las pelitas). El triángulo ternario representa la clasificación modificada de Gamero-Díaz *et al.* (2012) para rocas de tipo mudstone.

y perpendiculares. Aquí se da la situación donde las rocas carbonáticas (según clasificación de Dunham 1962), a mayor grado de cementación y mayor cantidad de partículas, será mayor la resistencia a fracturar por tensión, mientras que las rocas carbonáticas con menor grado de cementación y menor número de partículas, sumado a un mayor grado de laminación (dado por la alternancia de bandas de material más arcilloso y banda de material fino), se fracturarán por tensión con mayor facilidad. Las rocas detríticas presentan un claro control dado por los planos de debilidad generados por la laminación en aumento según el contenido de minerales arcillosos planares, donde las rocas con mayor laminación serán las pelitas, seguidas por las pelitas calcáreas y las calizas arcillosas (siguiendo la clasificación modificada de Gamero-Díaz *et al.* 2012). En esta oportunidad, la muestra de origen ígneo presenta el valor más alto.

Ensayo de tres puntos de tensión (o flexión semicircular)

El ensayo de tres puntos de tensión puede ser realizado en muestras rectangulares o semicilíndricas. Para este estudio se ha optado por la forma semicilíndrica (según Norma ASTM E399). Las muestras son sometidas a una carga controlada mediante una celda de tipo uniaxial, y utilizando un aplique especial para lograr una carga constante en tres puntos diferentes, con el fin de inducir tensiones de tracción como resultado de la flexión de la muestra.

La propagación de la fractura en modo abierto es favorecida por la creación de una muesca de

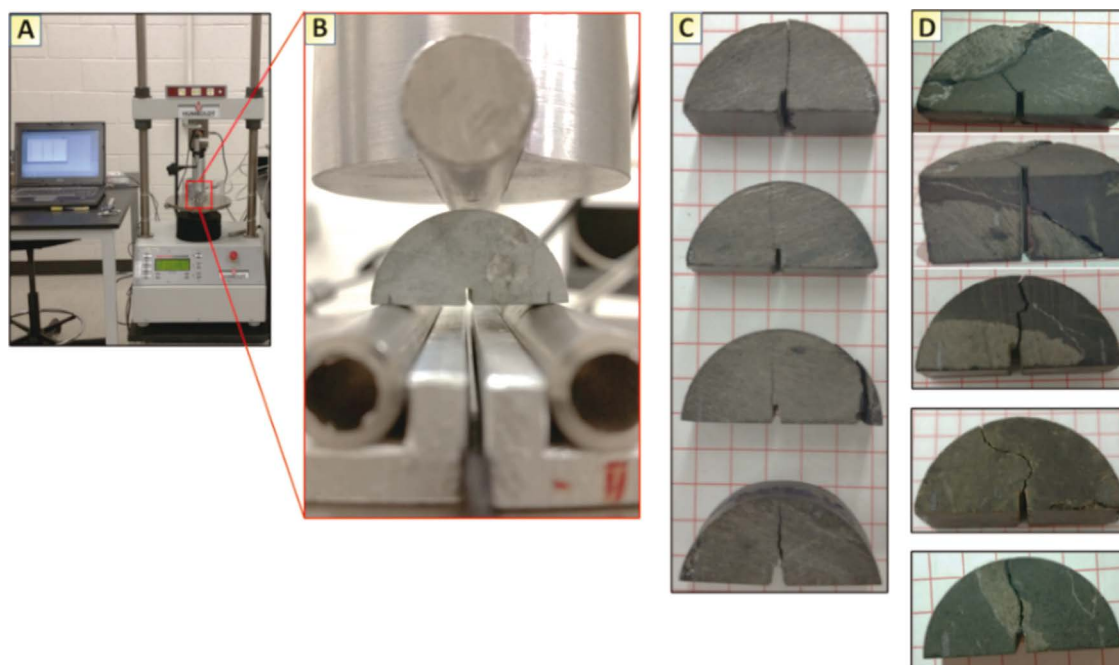


Figura 4. Muestra semicilíndrica de 1" de diámetro por 0,5" de largo. Ensayo según Norma ASTM E399. A) Equipamiento utilizado para el ensayo junto a la PC de monitoreo; B) Detalle de la disposición que deben adoptar los "rollers" (cilindros metálicos) con respecto a la muestra a analizar; C) Conjunto de muestras homogéneas, donde las fracturas propagan en forma recta, sin desvíos aparentes; D) Conjunto de muestras donde las fracturas se desvían debido a la presencia de pequeñas concreciones, fracturas rellenas, láminas de composiciones diferentes, etc.

profundidad “a” (Fig 5-A). La tenacidad a la fractura (en inglés *fracture toughness*, $FT=K_{Ic}$ [PSI*in^{0.5}]) se obtiene cuando el factor de intensidad de tensión alcanza un máximo y la fractura propaga (Fig. 5-B).

Para una muestra semi-cilíndrica de radio r [in], longitud L [in] y profundidad de muesca a [in], y suponiendo elasticidad isotrópica lineal, la resistencia a la propagación de la fractura o su tenacidad es igual a (Basham, 1989):

$$FT = K_{Ic} = \frac{P_{max}(\pi a)^{1/2}}{2rL} Y_I \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Y_I = 5.6 - 22 \left(\frac{a}{r}\right) + 166.9 \left(\frac{a}{r}\right)^2 - 576.2 \left(\frac{a}{r}\right)^3 + 928.8 \left(\frac{a}{r}\right)^4 - 505.9 \left(\frac{a}{r}\right)^5 \quad \text{Ecuación 6}$$

donde P_{max} es la carga máxima aplicada a la muestra, a una velocidad de 0,0015 in/min, Y_I es un coeficiente adimensional, la relación a/r se encuentra entre 0,03 y 0,8 (para este estudio se tomó la relación $a/r=0,2$) y $s/r = 0,8$ (Lee *et al.* 2015). De igual manera que el ensayo Brasilerio, se ha considerado la ecuación 5 como simplificación para considerar la caracterización anisotrópica a la tenacidad de la roca. Se analizaron muestras de un mismo intervalo o profundidad en varias direcciones, aplicando carga axial en forma perpendicular a la laminación ($FT_{H^{\perp}}$) y paralela a la laminación ($FT_{H^{//}}$), en muestras extraídas en dirección horizontal. Además, se analizaron muestras extraídas en forma vertical (FT_V) con respecto a la laminación de la roca. Para este ensayo, las muestras verticales no son consideradas como una limitante a la caracterización de un medio ITV, ya que las simetrías analizadas con respecto a la propiedad calculada, representan los planos paralelos y perpendiculares a la laminación.

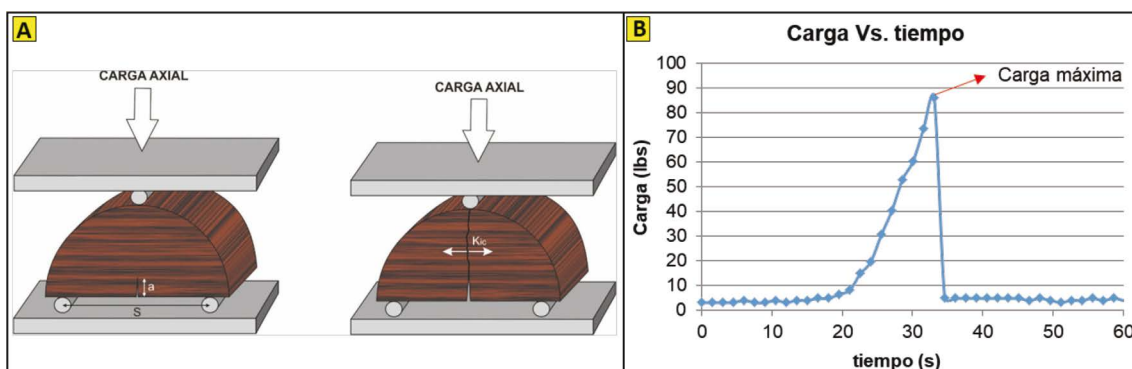


Figura 5. A) Configuración geométrica a partir de una muestra semicircular como la utilizada en este estudio. La representación muestra el ensayo antes y después de la aplicación de la carga hasta la propagación de la fractura por tensión. Los parámetros a y S varían según el radio y la norma utilizada (Lee *et al.* 2015). B) Gráfico de carga Vs. Tiempo para una muestra de roca de tipo mudstone lítico.

Las figuras 6-A-B-C, muestran las correlaciones realizadas entre las tres direcciones principales de carga con respecto a la laminación ($FT_{H^{\perp}}$ vs. FT_V , $FT_{H^{//}}$ vs. FT_V y $FT_{H^{\perp}}$ vs. $FT_{H^{//}}$), en muestras de afloramiento de 1” y 1,5” de diámetro.

Las relaciones obtenidas para FT_V vs. $FT_H^\perp$ (Fig. 6-A), muestran valores de FT en muestras de 1,5" de diámetro mayores a las de 1", pero dentro de una misma tendencia. La correlación con origen en cero "0" (recta negra), que engloba los resultados obtenidos en muestras de 1" y 1,5" de diámetro, muestra una relación de un $FT_H^\perp$ 9% mayor al FT_V , según la ecuación lineal:

$$FT_V = 0,91 * FT_H^\perp \quad \text{Ecuación 7}$$

Cabe recordar que, la relación calculada entre $TS_H^\perp$ y el TS_V fue de un 4% a favor de la dirección vertical, lo cual implica que a pesar de que no se mantiene una relación entre ambas mediciones, para estas direcciones, ambos ensayos muestran valores de anisotropía muy similares entre las direcciones analizadas. El valor promedio obtenido para las muestras verticales fue de 658,7 PSI*in^{0,5}, lo cual se encontraría dentro del rango de lo calculado por Chavez *et al.* (2015), quienes obtuvieron un valor promedio de 614 PSI*in^{0,5}.

Las relaciones obtenidas para FT_V vs. $FT_H^{//}$ (Fig. 6-B), muestran valores dentro de un mismo rango para ambos diámetros de muestras, con un R^2 alto. Para el caso de las muestras de 1", el muestreo analizado es muy bajo, por lo que la relación debe ser tomada con precaución, pero cabe destacar que las únicas dos muestras se encuentran dentro del rango de la tendencia de las muestras de 1,5". La correlación con origen en cero "0" (recta negra), que engloba los resultados obtenidos en muestras de 1" y 1,5" de diámetro, muestra una relación de un FT_V 12% mayor al $FT_H^{//}$ (continuando con la tendencia observada con los ensayos Brasileños), según la ecuación lineal:

$$FT_V = 1,12 * FT_H^{//} \quad \text{Ecuación 8}$$

Para el caso de las relaciones obtenidas entre $FT_H^\perp$ vs. $FT_H^{//}$ (Fig. 6-C), se observa gran dispersión entre las muestras de 1,5", con dos muestras de 1" ubicadas dentro del mismo rango, por lo que se podría generar una tendencia unificada para ambos diámetros, obteniendo una única recta. La correlación con origen en cero "0" (recta negra), muestra una relación de un $FT_H^\perp$ 52% mayor al $FT_H^{//}$ (siendo este un valor alto, pero congruente con las relaciones observadas para las mismas direcciones en el ensayo Brasileiro), según la ecuación lineal:

$$FT_H^\perp = 1,52 * FT_H^{//} \quad \text{Ecuación 9}$$

De igual modo que ocurre con el ensayo Brasileiro, al comparar los valores de resistencia a la propagación de la fractura por tensión con las litologías analizadas, se encuentra cierta relación con el grado y tipo de cementación, cantidad, tipo y tamaño de partículas, grado de laminación, grado y tipo de fracturamiento natural, grado y tipo de alteración, planos de debilidad por presencia de fósiles, concreciones, beef, etc.

Para el caso de las muestras extraídas en dirección vertical (es decir, perpendiculares a la laminación de la roca), se observa que a mayor grado de cementación y menor cantidad de partículas (siguiendo clasificación de Dunham 1962), es mayor la dificultad de propagar la fractura de la roca por tensión (Fig. 6-D).

Las muestras horizontales (paralelas a la laminación de la roca), analizadas con una carga en dirección perpendicular a la laminación (Fig. 6-E), muestran para las rocas carbonáticas un comportamiento similar al de las muestras verticales, donde a mayor grado de cementación y menor cantidad de partículas, es mayor la dificultad que encuentra la fractura a propagar por

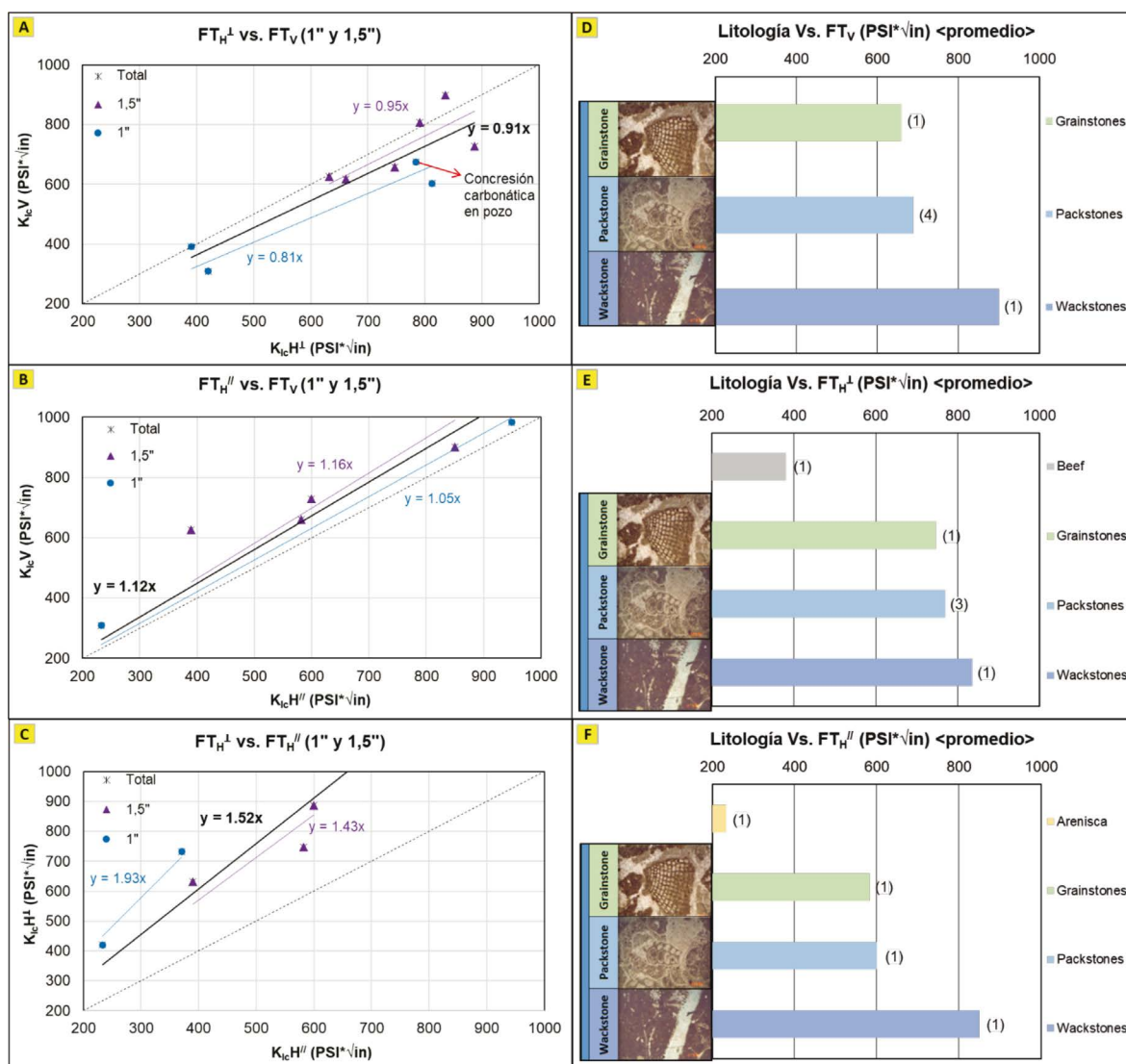


Figura 6. Izquierda: Relaciones obtenidas entre las tres direcciones analizadas para el ensayo de tres puntos de tensión en muestras de afloramiento de 1" y 1,5". A) $FT_{H^{\perp}}$ vs. FT_V . B) $FT_{H^{\parallel}}$ vs. FT_V . C) $FT_{H^{\perp}}$ vs. $FT_{H^{\parallel}}$. Derecha: Relación existente entre las diversas litologías identificadas y la resistencia a la propagación de la fractura por tensión (número de muestras identificado entre paréntesis). A) Muestras extraídas en dirección vertical, con carga perpendicular a la laminación. B) Muestras extraídas en dirección horizontal, con carga perpendicular a la laminación. C) Muestras extraídas en dirección horizontal, con carga paralela a la laminación.

tensión. Aquí se agregó el caso de un *beef* carbonático, mostrando una gran facilidad para propagar su fractura ($<400 \text{ PSI} \cdot \text{in}^{0,5}$), muy posiblemente debido a su fragilidad mineralógica y su capacidad de fracturar siguiendo planos de clivaje y contactos intercristalinos.

Del análisis de las muestras horizontales con carga paralela a la laminación de la roca (Fig. 6-F), se observa que estas no siguen una tendencia opuesta como se observó en el ensayo Brasileiro. Para este caso, se observan valores bajos para los grainstones y packstones ($<600 \text{ PSI} \cdot \text{in}^{0,5}$), mientras que los *wackestones* se mantienen dentro del orden de valores obtenidos para las otras direcciones. La única arenisca analizada, muestra un valor muy bajo, debido posiblemente a un bajo grado de cohesión de la roca, con fracturamiento dúctil, donde la muestra primero fractura en un tramo pequeño, y luego propaga lentamente al avanzar con el desplazamiento del pistón. En este caso no fueron analizadas rocas detríticas, pero sería esperable observar un control dado por los planos de debilidad generados por la laminación en aumento según el contenido de minerales arcillosos (siguiendo la clasificación modificada de Gamero-Díaz *et al.* 2012).

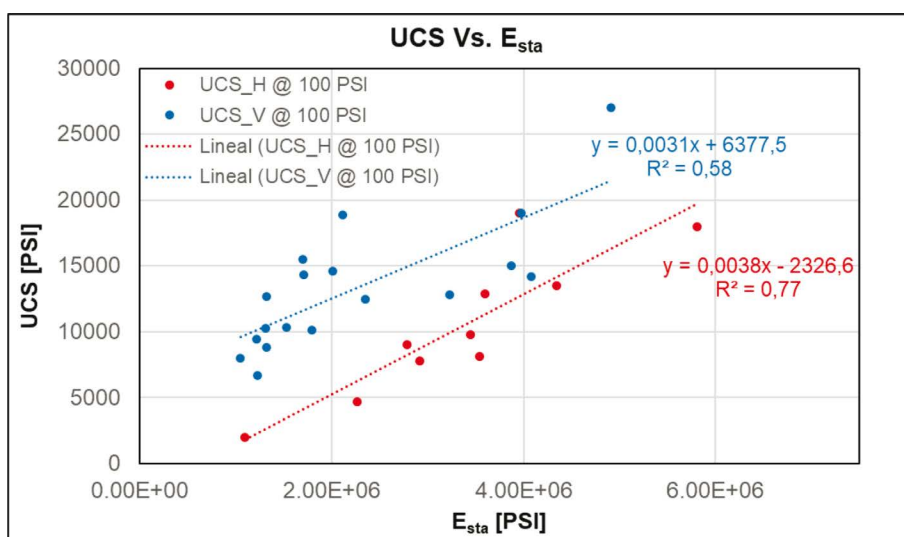


Figura 7. Correlación entre valores de “pseudo” UCS a 100 PSI de confinamiento con los módulos de Young calculados bajo las mismas condiciones, en direcciones vertical (carga perpendicular a la laminación) y horizontal (carga paralela a la laminación).

MODELACIÓN 1D: PARÁMETROS DE RESISTENCIA

Los cálculos relacionados con los parámetros de resistencia, provienen de los análisis de laboratorio realizados tanto en muestras de los tres pozos con coronas, como de afloramiento (según fuera posible o tuviera sentido geológico/geomecánico).

Entre los parámetros de resistencia calculados, se encuentran la resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS), la resistencia a la fractura por tensión (TS ó TSTR), y la tenacidad a la fractura (K_{Ic}).

De igual manera que para las propiedades elásticas, se han calculado las propiedades de resistencia de la roca para el intervalo perteneciente a la Formación Vaca Muerta. Para las propiedades analizadas se observan altos valores en los intervalos más carbonáticos y filones volcánicos, donde las propiedades verticales y horizontales perpendiculares a la laminación, son mayores a las propiedades horizontales paralelas a la laminación. Finalmente, cabe destacar que las curvas calculadas muestran buenas correlaciones con los análisis de laboratorio.

Resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS)

La resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS) para el intervalo de interés de los pozos estudiados, fue obtenida a partir del ploteo de los valores de “seudo” UCS a 100 PSI de confinamiento vertical y horizontal contra los valores del módulo de Young estático, vertical (E_V^{sta}) y horizontal (E_H^{sta}), obtenidos en laboratorio bajo las mismas condiciones (UCS vs. E_{sta} , Fig. 7).

Se obtuvieron relaciones lineales en ambas direcciones. Por un lado, el UCS_V vs. E_V^{sta} , presenta un coeficiente de correlación (R^2) de 0,58 y, por otro lado, el UCS_H vs. E_H^{sta} , presenta un coeficiente de correlación de 0,77. El UCS vertical es mayor al UCS horizontal, lo cual estaría relacionado con la presencia de planos de debilidad generados por la laminación. Se observa que, para módulos de Young altos, el comportamiento de la roca tiende a ser más isotrópico, mientras que, para rocas menos rígidas, la relación entre el UCS_V/UCS_H puede alcanzar valores mayores al 300%. Similares resultados pueden observarse en Suárez-Rivera *et al.* (2011).

Por medio de las ecuaciones 10 y 11, fue posible extrapolar el análisis de laboratorio al modelo geomecánico 1D (Fig. 10), generando un registro continuo para ser aplicado al intervalo de interés dentro del pozo.

$$UCS_V = 0,0031 * E_V^{sta} + 6377.5 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$UCS_H = 0,0038 * E_H^{sta} - 2326.6 \quad \text{Ecuación 11}$$

donde UCS_V y UCS_H representan la resistencia a la compresión si confinamiento en dirección vertical y horizontal respectivamente, en unidades de PSI. Por su parte, E_V^{sta} y E_H^{sta} representan los módulos de Young estáticos vertical y horizontal respectivamente, en unidades de PSI.

Resistencia a la fractura por tensión (TS ó T0)

Para la obtención de curvas continuas para el intervalo de interés dentro del pozo, se correlacionaron los datos de resistencia a la fractura por tensión (TS), con los datos de resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS). A pesar de la gran dispersión de datos observada, tanto

para las muestras horizontales (UCS_H vs. $TS_H^{//}$), como para las muestras verticales (UCS_V vs. $TS_H^{\perp}$), se observan dos tendencias similares (Fig. 8).

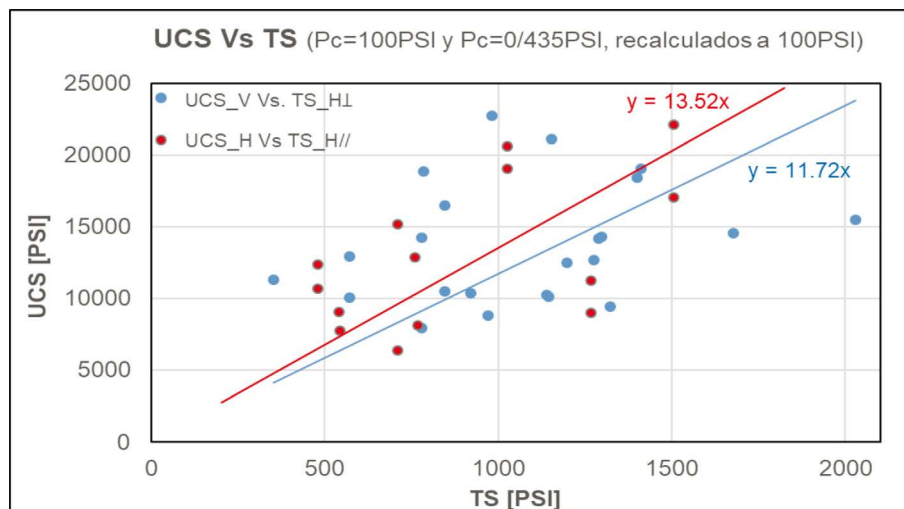


Figura 8. Relaciones encontradas para la resistencia a la fractura por tensión (TS), con los datos de resistencia a la fractura por compresión sin confinamiento (UCS), en muestras horizontales y verticales.

Del análisis de la correlación de las muestras horizontales (recta roja en Fig. 8), se pudo extraer que el $TS_H^{//}$ representa un 7,4% del UCS_H , presentando una regresión lineal con intersección en “0”, según la ecuación:

$$UCS_H = 13,52 * TS_H^{//} \quad \text{Ecuación 12}$$

Por su parte, las muestras verticales (recta azul en Fig. 8), presentan un $TS_H^{\perp}$ equivalente a un 8,53% del valor del UCS_V , presentando una regresión lineal con intersección en “0”, según la ecuación:

$$UCS_V = 11,72 * TS_H^{\perp} \quad \text{Ecuación 13}$$

Se debe notar que tales valores difieren entre sí, según la dirección de medición, además de desviarse de la relación estándar utilizada habitualmente en la industria como simplificación, la cual suele tomarse como un 10%. Tales relaciones fueron aplicadas a los registros de pozo obtenidos en el modelo geomecánico, y las mismas calibran muy bien con sus datos de laboratorio (Fig. 10, pista 11).

Tal como fuera mencionado anteriormente, la extrapolación del TS_V al pozo no tendría validez para un modelo anisotrópico de tipo ITV. Cabe mencionar que, éste no puede ser obtenido mediante su correlación con el UCS, ya que las direcciones de medición son incompatibles entre sí. Para generar una curva continua aplicable al pozo (solo a modo descriptivo), se utilizaron las

dos correlaciones halladas en las figuras 3-A y 3-B ($TS_H^\perp$ vs. TS_V y $TS_H^{//}$ vs. TS_V respectivamente), para obtener una franja de posibles valores para el TSV (identificada con un sombreado rosa en la figura 10 pista 11 y la figura 11 pista 5).

En la figura 10 (pista 11) se puede observar que el $TS_H^\perp$ y el TS_V son mayores al $TS_H^{//}$, lo cual resulta esperable, ya que fracturar la roca por tensión en dirección perpendicular a la laminación, requiere mayor energía que fracturar en forma paralela a los planos de laminación, los cuales tenderán a separarse entre sus planos de debilidad. Es preciso resaltar aquí, que la dirección y magnitud de los esfuerzos principales *in-situ* serán los que gobiernen la tendencia al fracturamiento.

Tenacidad a la fractura por tensión (FT ó K_{Ic})

Las curvas de tenacidad a la fractura por tensión (FT) provienen de la correlación de tales parámetros contra su densidad ($RHOB$ en g/cm^3), para cada dirección medida en laboratorio (Fig. 9), es decir, muestras verticales (FT_V), horizontales paralelas a la laminación ($FT_H^{//}$), y horizontales perpendiculares a la laminación ($FT_H^\perp$). Con el propósito de generar una única correlación para cada dirección e independizarse del tamaño de la muestra y su procedencia, se combinaron las muestras de 1" y 1,5" de diámetro, en un solo gráfico (Fig. 9), obteniendo las siguientes ecuaciones lineales:

$$FT_V = 1.061 * RHOB - 1.995,4 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$FT_H^{//} = 1.387 * RHOB - 2.915 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$FT_H^\perp = 1.033 * RHOB - 1.887 \quad \text{Ecuación 16}$$

Tales correlaciones resultan de sumo interés, ya que muestran claras relaciones entre la densidad y la tenacidad a la fractura en las tres direcciones analizadas, lo que permitió generar correlaciones para ser aplicadas en el modelo geomecánico 1D, dando como resultado registros continuos para la zona de interés (tal como se observa en la figura 10). Otra ventaja es la mayor resolución del registro de densidad cuando se compara con el registro sísmico utilizado para estimar las propiedades elásticas.

Las relaciones entre los valores de FT obtenidos, muestran valores semejantes entre el $FT_H^\perp$ y el FT_V , pero con mayor resistencia a la propagación de la fractura que lo obtenido en sentido horizontal paralelo a la laminación ($FT_H^{//}$), lo cual resulta intuitivo por sus planos de debilidad, pero ha sido caracterizado y llevado a valores numéricos (Fig. 10, pista 12).

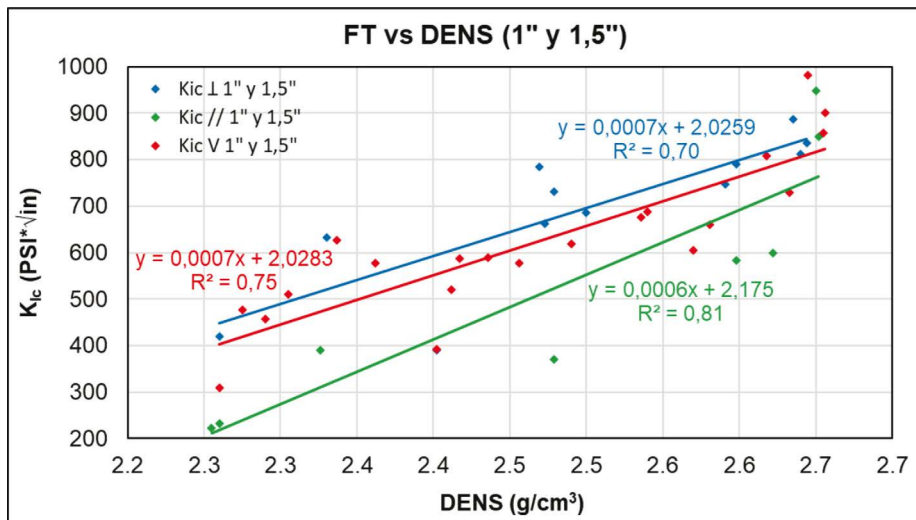


Figura 9. Gráfico de relación entre resistencia a la propagación de la fractura por tensión y densidad de la roca, para las tres direcciones principales de carga con respecto a la laminación (V, H' y H), en muestras 1" y 1,5" de diámetro provenientes del subsuelo y afloramiento. Las relaciones halladas, fueron utilizadas para generar registros continuos para la zona de interés dentro del pozo analizado.

ANÁLISIS DEL GRADIENTE DE FRACTURA

La curva de gradiente de fractura (GF en pista 8 de la figura 11-A) fue calculada utilizando la variación del esfuerzo horizontal mínimo con la profundidad, según la siguiente ecuación:

$$GF = \sigma_{h_min}^{Ani} / (TVD * 3,281) \quad \text{Ecuación 17}$$

donde GF es el gradiente de fractura en PSI/ft, $\sigma_{(h_min)}^{Ani}$ representa el esfuerzo horizontal (anisotrópico) menor en PSI, TVD es la profundidad en mts, y 3,281 es la variable de conversión de mts a ft. Cabe destacar que, para el cálculo del esfuerzo horizontal menor, se utilizó la ecuación poroelástica anisotrópica, según la ecuación número 18 (Thiercelin y Plumb 1994):

$$\sigma_{h_min}^{Ani} = P_p \cdot \alpha_h + \left(\frac{E_h}{E_v} \right) \cdot \left(\frac{\nu_v}{1-\nu_h} \right) \cdot (\sigma_v - P_p \cdot \alpha_v) + \left(\frac{E_h}{1-\nu_h^2} \right) \cdot \varepsilon_h + \left(\frac{\nu_h \cdot E_h}{1-\nu_h^2} \right) \cdot \varepsilon_H \quad \text{Ecuación 18}$$

donde $\sigma_{(h_min)}^{Ani}$ representa el esfuerzo principal horizontal menor (anisotrópico), σ_v representa el esfuerzo vertical, P_p representa la presión poral, α representa el coeficiente de Biot, ν representa el coeficiente de Poisson, E representa el módulo de Young, ε_h y ε_H son las deformaciones tectónicas mínima y máxima respectivamente (siendo estos los principales factores de calibración, con $\varepsilon_H > \varepsilon_h$), y los subíndices h y v representan las direcciones horizontal y vertical respectivamente (Economides 2000). En este trabajo, al tratarse de pozos verticales dentro de un régimen de transición entre transcurrente y normal, se ha utilizado para la calibración y ajuste del esfuerzo horizontal menor la medición de campo realizada durante el ensayo de LOT (*Leak Off Test* o

prueba de goteo) y su medición del ISIP (*Instantaneous Shut in Pressure* o cierre instantáneo con el cese del bombeo). Cabe destacar que el ISIP podría usarse como límite superior para el S_3 , más aún si existe una fractura compleja o si el plano de fractura no es perpendicular a S_3 (Frydman *et al.*

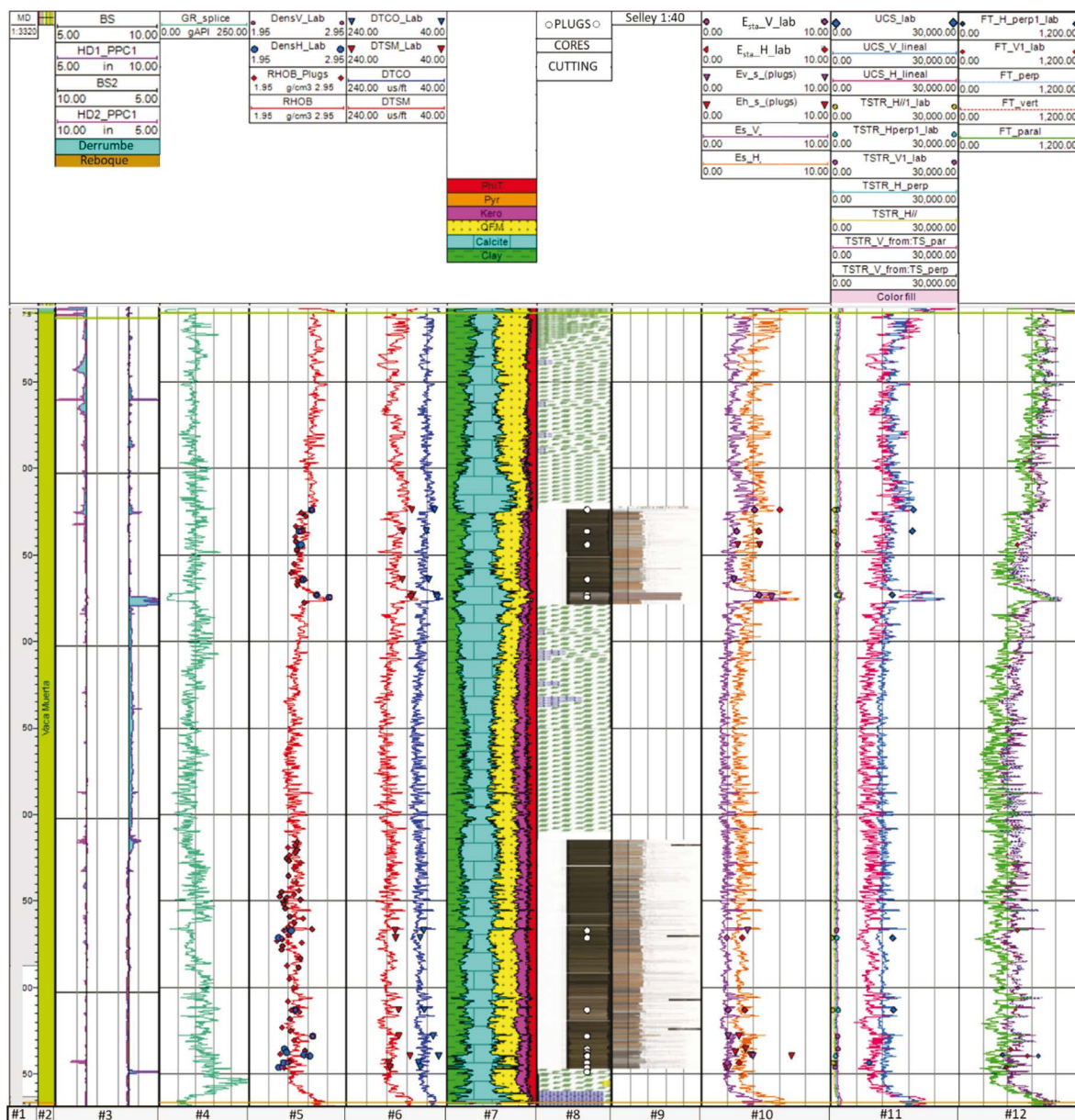


Figura 10. Modelo completo para los parámetros de resistencia. Los puntos sobre las curvas representan las mediciones realizadas en laboratorio para calibración de las diversas curvas medidas en pozo (pistas 5 y 6) y las calculadas en gabinete (pistas 10, 11 y 12). Cabe aclarar que la diferencia entre rombos, círculos y triángulos en las pistas 10 y 11, se debe a que las mediciones fueron realizadas en distintos laboratorios. Pista #1: MD: Measure Depth en metros; #2: Formación Vaca Muerta; #3: CALIPER y BS (Bit Size) en pulgadas; #4: GR: Gamma Ray en gAPI; #5: RHOB: Bulk Density en g/cm3; #6: DTSM: Compressional Slowness y DTSM: Shear Slowness, ambos en us/ft; #7: Petrofísica a partir de herramienta espectroscópica de rayos gamma; #8: CORE y CUTTING: fotografías del intervalo coroneado y control geológico; #9: Perfil Selley: registro de interpretación geológica; #10: Es_H y Es_V: Módulos de Young horizontal y vertical estáticos para el modelo MEAD (de detalle litológico, ver Sosa Massaro *et al.* 2017) en MPa; #11: UCS y TSTR: Unconfined Compressive Strength horizontal y vertical, junto al Tensile Strength horizontal paralelo, perpendicular y vertical, en PSI; y #12: FT: Fracture Toughness horizontal paralelo, perpendicular y vertical, en PSI*in0.5.

2016). Tal medición ha mostrado una muy buena correlación con la curva del esfuerzo horizontal menor " S_h " (pista 7 de la figura 11-A) calculada a partir del modelo elástico anisotrópico de detalle (para mayor información acerca de la obtención de los parámetros elásticos y el cálculo del S_h (ver Sosa Massaro *et al.* 2017 y Sosa Massaro *et al.* 2018).

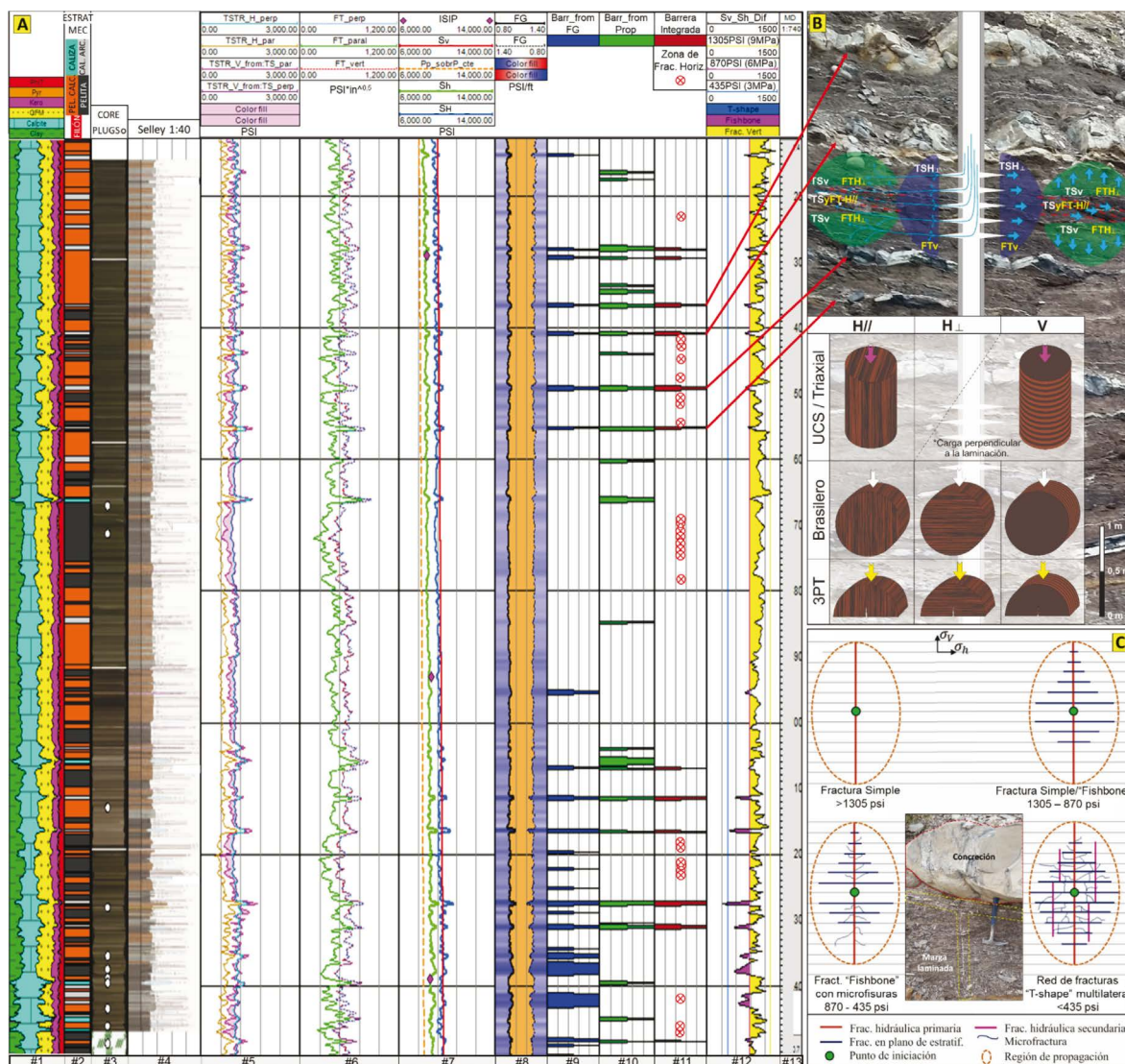


Figura 11. A) Identificación de barreras a la fractura a partir del gradiente de fractura (GF) y propiedades de resistencia mecánica. Pista #1: perfil petrofísico; #2: mecánica estratigráfica; #3: fotografía de coronas; #4: perfil Selley; #5 y #6: Idem pistas #11 y #12 (Fig 10); #7: Sv: Esfuerzo vertical, Pp_SobrP_cte: Presión poral constante; Sh: Esfuerzo horizontal menor anisotrópico (con discriminación litológica y calibrado con el ISIP=Instantaneous Shut in Pressure); SH: Esfuerzo horizontal mayor; #8: FG: Gradiente de fractura anisotrópico; #9: Barr_from_FG: Barrera a la fractura calculada a partir del gradiente de fractura; #10: Barr_from_prop: Barrera a la fractura calculada a partir de las propiedades de resistencia (TS y FT); #11: Barr_integrada y Zona de Frac. Horiz: Barrera a la fractura a partir de la conjunción de las pistas 9/10 y Zona de alta probabilidad de fracturamiento horizontal, respectivamente; #12: Sv_Sh_Dif: Diferencial de esfuerzos (Sv-Sh). B) Esquema de propagación de fracturas hidráulicas, y su relación con algunos los ensayos geomecánicos de laboratorio. La fotografía de afloramiento intenta ejemplificar lo que podría ocurrir en el subsuelo a pesar de tratarse de escalas diferentes. C) Esquemas simplificados de los 4 tipos de fracturas analizados (modificado de Tan *et al.* 2017). La fotografía pertenece a un afloramiento de la Formación Vaca Muerta, donde es posible observar una fractura natural en forma de "T", debido a la bifurcación que sufre al propagar y chocar contra bancos más competentes como carbonatos, filones o concreciones.

Se obtuvo un valor de gradiente para el S_h de 0,96 PSI/ft, el cual puede ser tomado como análogo al GF (pista 8 de la figura 11-A). Para identificar posibles barreras a la fractura a partir del GF se tomó como valor de corte 0,98 PSI/ft, identificando como barrera a cualquier valor que se encuentre por encima de este. De tal manera, se generó la pista 9 de la figura 11-A, pudiéndose observar la relación existente con las pistas 1 a 4 de la figura 11-A, donde las rocas con alto contenido de carbonatos y los filones volcánicos, son detectados como barreras para el crecimiento de fracturas hidráulicas entre rocas con comportamientos mecánicos contrastantes. Es así como en profundidad, se generan planos de debilidad, donde se puede dar la ocurrencia de fracturas en forma de “T” (Figs. 11-B-C).

Por otra parte, utilizando las propiedades de resistencia mecánica a la fractura de la roca, fue posible generar la pista 10 de la figura 11-A, donde a partir de valores de corte ($TS_H^{\wedge} > 1100$ PSI y $FT_V > 650$ PSI*in^{0,5}), se pudieron identificar las posibles barreras a la fractura.

Finalmente, con la intención de establecer con un mayor grado de certeza las posibles barreras, se identificaron los intervalos donde ambos mecanismos de identificación de barreras son coincidentes, generando así, la pista 11 de la figura 11-A.

Es posible también detectar zonas de alta probabilidad de propagación de fracturas hidráulicas horizontales (paralela a la laminación) a partir de la navegación de pozos horizontales. Para ello, se aplicaron valores de corte a las propiedades de $TS_H^{\wedge} < 600$ PSI y $FT_H^{\wedge} < 300$ PSI*in^{0,5} (intervalos representados por cruces rojas en la pista 11 de la figura 11-A). Es notable la relación existente entre tales intervalos y las facies denotadas como pelitas y pelitas calcáreas en la estratigrafía mecánica (pista 2 de la figura 11-A).

La figura 11-B expone una clara idea de la forma en que las direcciones de carga de los principales ensayos realizados pueden ser extrapolados a un reservorio no convencional de tipo shale. Es decir, las propiedades de resistencia de la roca medidas en muestras horizontales, con carga paralela a la laminación, representarían las propiedades de apertura entre planos de laminación de la roca (líneas de guiones en color rojo). Las propiedades medidas en muestras horizontales, con carga perpendicular a la laminación (para $FT_H^{\wedge}$) y muestras verticales (para TS_V), representarían las propiedades de apertura (fractura vertical), cortando los planos de laminación de la roca, con desplazamiento sobre la vertical (polígonos semicirculares verdes). Para el caso de las propiedades medidas en muestras verticales (FT_V y exceptuando UCS y Triaxial), y propiedades medidas en muestras horizontales con carga perpendicular ($TS_H^{\wedge}$), las propiedades representarían la apertura de una fractura vertical, con desplazamiento sobre la horizontal, cortando los planos de laminación de la roca (polígonos semicirculares azules).

Según experimentos realizados por Tan *et al.* (2017) en bloques de roca de 30 cm³ bajo esfuerzos diferenciales (esfuerzo vertical - esfuerzo horizontal menor) de 12, 9, 6 y 3 MPa, sería posible identificar diversos tipos de fracturas vinculados con barreras de fractura (Fig 11-C). Los resultados del experimento revelaron que cuando la diferencia de esfuerzos era mayor a 9 MPa

(1305 PSI), las fracturas hidráulicas pasarían directamente a través de los planos de estratificación y fracturas naturales, formándose una geometría de fractura simple. Para una situación extrema en la que el valor sea superior a 12 MPa (1740 PSI), los planos de estratificación cerca del orificio del punzado no podrían separarse. En esta circunstancia, los parámetros de operación tales como la viscosidad del fluido de fracturación y la velocidad de inyección afectarían mínimamente la geometría de la fractura. Cuando la diferencia de esfuerzos ronde entre los 3 MPa y 6 MPa, las fracturas hidráulicas conectarían planos de estratificación y fracturas naturales, formándose una geometría de fractura compleja. Para la diferencia de esfuerzos de 3 MPa (435 PSI), la geometría de la fractura tendría forma de “H” o forma de “T”. Para la diferencia de esfuerzos de 6 MPa (870 PSI), la geometría de la fractura tendría forma de “X” o forma de espina de pez (*fishbone*). Los resultados muestran que una baja diferencia de esfuerzos (en el orden de los 3 MPa) tendrá un control débil sobre la propagación de la fractura, formándose fracturas secundarias cortas. Sin embargo, además de fracturas ramificadas complejas, generar fracturas de gran longitud será necesario para una operación de fracturamiento exitosa, de lo contrario, el volumen estimulado será pequeño. Por el contrario, una diferencia de esfuerzos en el orden de los 6 MPa induciría una red de fractura de tipo espina de pez compleja, junto con la abertura de alas de fractura verticales extensas, satisfaciendo así la geometría compleja y extensa de la fractura (Tan *et al.* 2017).

Con la intención de generar una analogía entre lo estudiado en los bloques de roca y el pozo, se calculó el diferencial de esfuerzos, obteniéndose la pista 12 de la figura 11 (Sv_Sh_Dif). En la misma, es posible observar cierta relación entre las barreras a la fractura identificadas anteriormente y los picos bajos de la curva Sv_Sh_Dif, donde hacia la base, se dan con mayor frecuencia las fracturas de tipo fishbone hasta T-shape, y hacia arriba, la tendencia general es a formar planos de fractura verticales simples, con intercalaciones menores de fracturas tipo fishbone.

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que es posible obtener relaciones para las propiedades de resistencia en yacimientos no convencionales de tipo shale, donde la heterogeneidad de la roca puede ser analizada mediante modelos anisotrópicos de tipo ITV. Cabe destacar que se han generado simplificaciones donde se utilizaron ecuaciones para los cálculos de resistencia a la fractura por tensión y tenacidad que aplican a materiales elásticos e isotrópicos. Otra limitante resulta de la cantidad de muestras analizadas, siendo en algunas ocasiones un número relativamente bajo para lograr captar tendencias claras. Por tales motivos, se presentan estos resultados como primeras aproximaciones a ser tomadas con recaudos, funcionando más como análisis cualitativos que cuantitativos.

De esta manera, se han podido obtener aproximaciones a la caracterización anisotrópica de las rocas que conforman la secuencia sedimentaria de la Formación Vaca Muerta en muestras de afloramiento y subsuelo. Fue posible cuantificar los grados de anisotropía según las direcciones

analizadas con respecto a los planos de laminación. Para la resistencia a la fractura por tensión se obtuvieron valores de TS_V mayor al $TS_H^\perp$ por un 2,5%, TS_V mayor al $TS_H^{\parallel}$ por un 41% y $TS_H^\perp$ mayor al $TS_H^{\parallel}$ por un 46%. La variación entre direcciones para la tenacidad arrojó valores de $FT_H^\perp$ mayor al FT_V por un 9%, FT_V mayor al $FT_H^{\parallel}$ por un 12% y $FT_H^\perp$ mayor al $FT_H^{\parallel}$ por un 52%. Y para el UCS, se obtuvieron valores dependientes de la rigidez de la roca (módulo de Young), donde a mayor rigidez, el comportamiento de la roca es más isotrópico, mientras que, a menor rigidez, la relación entre el UCS_V/UCS_H puede alcanzar valores mayores al 300%.

Se generaron correlaciones extrapolables a secciones continuas en subsuelo para las propiedades de resistencia, a partir de la utilización de registros continuos medidos en pozo como la densidad, o registros calculados como los módulos de Young vertical y horizontal.

A partir de tales análisis fue posible arribar a una metodología complementaria al cálculo del gradiente de fractura (GF) mediante el cálculo esfuerzo horizontal. Tal metodología consistió en la aplicación de valores de corte para las propiedades de resistencia a la fractura por tensión y tenacidad, considerando valores de $TS_H^\perp > 1100$ PSI y $FT_V > 650$ PSI*in^{0,5}, como barreras a la propagación vertical de la fractura hidráulica. En su contraparte, valores de $TS_H^{\parallel} < 600$ PSI y $FT_H^{\parallel} < 300$ PSI*in^{0,5}, representarían zonas de alta probabilidad de propagación de fracturas hidráulicas horizontales (paralelas a la laminación) en pozos horizontales.

Finalmente, fue posible complementar el análisis predictivo de identificación de barreras al fracturamiento hidráulico a partir de estudios análogos llevados a cabo en bloques de roca en laboratorios especializados, pudiendo identificar zonas de propagación de fallas de diversas geometrías como T-shape, fishbone y fracturas verticales simples.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Chevron por el financiamiento para la creación de un laboratorio de ensayos geomecánicos en el ITBA, por los informes y estudios compartidos, por los testigos de roca cedidos, y por el permiso para publicar este artículo. Al Instituto Tecnológico de Buenos Aires por intermediar y proporcionar la posibilidad del trabajo en conjunto con la Universidad de Texas en Austin (UT). A UT por financiar y proporcionar el equipamiento específico junto con su operador para la asistencia en laboratorio. A Schlumberger por permitir la orientación del trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|--|---|
| <p>Adachi, J., Siebrits, E., Peirce, A. y Desroches, J., 2007. Computer simulation of hydraulic fractures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44 (5), 739-757.</p> | <p>ASTM, 2005. ASTM D3967: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005</p> |
|--|---|

- ASTM, 2000. ASTM E399: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials. Vol. 03.01.
- ASTM, 2008. ASTM D4543: Standard practices for preparing rock cores as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances.
- Basham, K.D., 1989. Nonlinear fracture mechanics using semi-circular specimens and tension softening behavior, PhD dissertation, The Univ. of Wyoming, Laramie, Wyo.
- Brown, E.T., 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, Oxford.
- Chavez, A.A., Otegui, J.L., Sánchez, M., Morris, W. y Bianchi, G.L., 2015. Field and experimental brittleness (toughness) determination of Vaca Muerta Shale. ARMA 15-406.
- Dahi Taleghani, A. y Olson, J. E., 2014. How natural fractures could affect hydraulic fracture geometry, SPE journal, 19 (01), 161-171.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (ed.), Classification of carbonate rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir, p. 108-121.
- Economides, M.J. y Nolte K.G., 2000. Reservoir Stimulation, John Wiley & Sons, Ltd., New York, 2000.
- Espinoza, D., Shovkun, I., Makni, O. y Lenoir, N., 2016. Natural and induced fractures in coal cores imaged through X-ray computed microtomography – Impact on desorption time, International Journal of Coal Geology, 154-155, 165-175, doi: 10.1016/j.coal.2015.12.012.
- Fjaer, E., Holt, R., Horsrud, P., Raaen, A. y Risnes, R., 2008. Petroleum related rock mechanics. 2nd Edition. Page: 41.
- Frydman, M., Pacheco, F., Pastor, J., Canesin, F., Caniggia, J. y Davey, H. 2016. Comprehensive Determination of the Far-field Earth Stresses for Rocks with Anisotropy in Tectonic Environment. SPE Argentina Exploration and Production of Unconventional Resources Symposium held in Buenos Aires, Argentina. SPE-180965-MS.
- Gamero-Díaz, H., Miller, C., y Lewis, R., 2012. Core: a Classification Scheme for Organic Mudstones Based on Bulk Mineralogy. Search and Discovery Article #40951.
- Garrote Villar, E., 2011. Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas. Minor thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori.
- González Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C., 2002. Ingeniería Geológica. 2002 (1ra. Ed); 2004 (2da. Ed); 2009 (3ra. Ed). Prentice Hall Pearson Educación, Madrid, pp 750.
- Lee, H.P., Olson, J.E., Holder, J., Gale, J. F. y Myers, R.D., 2015. The interaction of propagating opening mode fractures with preexisting discontinuities in shale, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120 (1), 169-181, doi:10.1002/2014JB011358.
- Li, D. y Wong, L. N. Y., 2013. The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. Rock Mech Rock Eng, 46: 269-287.
- Sharma, M. y Manchanda, R., 2015. The role of induced un-propped (iu) fractures in unconventional oil and gas wells, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- Sosa Massaro, A., Espinoza, N., Frydman, M., Baredo, S. y Cuervo, S., 2017. Analysing a Suitable Elastic Geomechanical Model for Vaca Muerta Formation. Journal of South American Earth Sciences 79 (2017): 472-488.

- Sosa Massaro, A., Frydman, M., Barredo, S., (2018). Estratigrafía Mecánica de Detalle Aplicada al Modelo Geomecánico Elástico Anisotrópico en La Formación Vaca Muerta. Revista de la Asociación Geológica (RAGA). Edición especial del Congreso Geológico Argentino en Tucumán 2017.
- Suarez-Rivera, R., Deenadayalu, C., Chertov, M., Hartanto, R. N., Gathogo, P. y Kunjir, R., 2011. Improving Horizontal Completions on Heterogeneous Tight-Shales, in Canadian Unconventional Resources Conference, Society of Petroleum Engineers, doi:10.2118/146998-MS.
- Tan Peng, Yan Jin, Ke Han, Bing Hou, Mian Chen, Xiaofeng Guo, Jie Gao, 2017. Analysis of hydraulic fracture initiation and vertical propagation behavior in laminated shale formation. Fuel, Volume 206, Pages 482-493, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.033>.
- Thiercelin, M.J. y Plumb, R.A. 1994. Core-Based Prediction of Lithologic Stress Contrasts in East Texas Formations. SPE Formation Evaluation 251-258.
- Thomsen, L., 1986. Weak Elastic Anisotropy. Geophysics, Vol., 51. N° 10 (October 1986); P. 1954-1966.
- Tinni, A., Fathi, E., Agarwal, R., Sondergeld, C.H., Akkutlu, I.Y. y Rai, C.S., 2012. Shale Permeability Measurements on Plugs and Crushed Samples, in SPE Canadian Unconventional Resources Conference, Society of Petroleum Engineers, doi: 10.2118/162235-MS.
- Valko, P. y Economides, M.J., 1995. Hydraulic fracture mechanics, vol. 318, Wiley Chichester.
- Warpinski, N.R., Mayerhofer, M.J., Vincent, M.C., Cipolla, C.L. y Lonon, E., 2009. Stimulating unconventional reservoirs: maximizing network growth while optimizing fracture conductivity, Journal of Canadian Petroleum Technology, 48 (10), 39-51.
- Weaver, C., 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. Men. Univ., Washington, Vol. 1. Seattle.
- Yu, W., Changhong, L., Yanzhi, Hu. Y Tianqiao, M., 2017. Brazilian Test for Tensile Failure of Anisotropic Shale under Different Strain Rates at Quasi-static Loading. Energies 2017, 10, 1324; doi:10.3390/en10091324.