

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR DENSIDAD DE MICROFRACTURAS EN ROCAS, A PARTIR DE PARÁMETROS ANISÓTROPOS. UNA APROXIMACIÓN EN NÚCLEOS SINTÉTICOS

Jenny Rueda¹, Hernan Madero¹, Zully Calderón¹,
Néstor Saavedra², Germán Ojeda², Alberto Ortiz², Carlos Piedrahita²

RESUMEN

La anisotropía es una propiedad de las rocas la cual es generada por diversos factores. Comprender cuáles son estos factores requiere un análisis extenso. Para contribuir en dicho análisis, en esta investigación se estudió la densidad de microfracturas planteando que éstas son generadoras de anisotropía en las rocas. Para evaluar el impacto de las microfracturas en la anisotropía, en este trabajo, se desarrolló una metodología experimental de laboratorio, en la cual se utilizaron modelos sintéticos de rocas con microfracturas simuladas, variando la densidad de microfracturas (inclusiones); y se construyó un dispositivo para realizar mediciones de ondas de ultrasonido. La anisotropía se obtuvo a partir de las mediciones ultrasónicas, estableciendo cómo influye la densidad espacial de las microfracturas en las velocidades de las ondas longitudinales o de compresión P y de corte o cizalla S. A partir de los resultados obtenidos, se estableció una relación cuantitativa entre la densidad de microfracturas y la anisotropía de las ondas S cuando se propagan a través de un medio fracturado de composición sintética, aportando evidencia de laboratorio con respecto a (1) el papel de las microfracturas como generadoras de anisotropía; (2) la relación directa entre la anisotropía de la onda S desde una densidad de microfracturas de 0% al 4.96% y para valores mayores del 4.96% la anisotropía presenta una disminución; y (3) la variación relativa de la anisotropía de las ondas P y ondas S.

Palabras claves: Anisotropía, densidad de microfracturas, parámetros anisótropos, simulación de microfracturas, ondas ultrasonido.

METHODOLOGY TO DETERMINE DENSITY OF MICROFRACTURE ON ROCKS FROM ANISOTROPICS PARAMETERS: AN APPROXIMATION IN SYNTHETICS CORES

ABSTRACT

The anisotropy is a property of the rocks which is generated by diverse factors. To understand which are those factors, is required an extensive analysis. To contribute in the analysis mentioned before, this investigation studied the microfractures density planning that the microfractures anisotropy generators in the rocks. To evaluate the impact of the microfractures in the anisotropy, this work develops an experimental laboratory methodology, in which synthetic models of rocks were used. This models were elaborated with simulated microfractures (inclusions), varying their density. The anisotropy was obtained thanks to ultrasound measurements (an ultrasound device measurement was build up), finding how influences the space density of the microfractures in the speeds of the longitudinal waves or compression (P) and shears (S). As of the obtained results was establish a quantitative relationship between the microfractures density and the anisotropy from ultrasonic waves (S) when they spread through a fractured layer of synthetic composition, contributing with laboratory evidence due to the fact that (1) the microfractures role as anisotropy generators; (2) the direct relationship between the anisotropy from wave S and the density of microfractures from 0% to 4.96% and for values bigger than 4.96% the anisotropy will decrease; and (3) the relative variation of the anisotropy of the waves P and waves S.

KeyWords: Anisotropy, microfracture density, anisotropic parameters, simulation of microfracture, ultrasound waves

¹ Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Bucaramanga, Santander, Colombia. e-mail: jennypaolarueda@yahoo.com; hernandariomadero@yahoo.com

² Ecopetrol S.A – Instituto Colombiano Del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia

INTRODUCCIÓN

Una de las necesidades que se presenta en la industria del petróleo es la de reconocer la orientación y densidad de las microfrazas en los yacimientos, ya que, a partir del conocimiento de este parámetro se aporta evidencia para la identificación de trenes de permeabilidad, zonas de acumulación de hidrocarburos, así como volúmenes porosos, además de evaluarse el riesgo de exploración y optimizar el tratamiento para la extracción de hidrocarburos.

Varios autores han considerado que las microfrazas son generadoras de anisotropía en las rocas; basados en esta hipótesis, en esta investigación se buscó determinar la densidad de microfrazas. El objetivo planteado, evidenció la necesidad de desarrollar una metodología propia que permitiera manipular las condiciones de los experimentos y obtener información a partir de parámetros controlados. Esta metodología consistió en determinar la anisotropía producida por microfrazas en núcleos sintéticos en los cuales se manipularon la forma y densidad de microfrazas. Dicha anisotropía se identificó a partir de la medición de ondas ultrasónicas producidas en el laboratorio, con las cuales se estableció cómo influye la densidad espacial de las microfrazas en las velocidades de las ondas longitudinales o de compresión P y de corte o cizalla S. A partir de lo anterior fue posible establecer una relación cuantitativa entre la densidad de microfrazas y la anisotropía que estas producen en un medio sintético similar a las rocas.

ISOTROPÍA VS ANISOTROPÍA

Los materiales son “isótrpos” cuando sus propiedades físicas se mantienen constantes a través de ellos sin cambiar su magnitud, independientemente del ángulo u orientación en el cual se estén midiendo. Como se observa en la Figura 1a, los ejes x, y, y z representan las propiedades del cubo, de manera que si se tiene una

cantidad de esferas dentro del cubo estas van a tener la misma forma y no varían las propiedades del material. Los modelos isótrpos son comúnmente usados para la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas. Esta suposición de isotropía se asume para un fácil entendimiento y para disminuir la complejidad en los cálculos. Sin embargo, la mayoría de elementos que componen la corteza terrestre no presentan estas propiedades, sino que por el contrario son “anisótrpos”. A diferencia de los materiales isótrpos, en materiales anisótrpos las propiedades físicas varían de acuerdo con la orientación en la cual se realizan las medidas. Como se observa en la Figura 1b, las esferas tienden a alinearse en cierta dirección, de manera que, si por ejemplo, se estuviera midiendo su permeabilidad, el flujo tendría una dirección preferencialmente horizontal.

Factores que generan anisotropía en las rocas

Entre los factores que generan anisotropía en las rocas se encuentra la estratificación, las fracturas, el contenido de arcilla por su estructura laminar, y la foliación en una roca metamórfica, donde los minerales se orientan en una dirección preferencial. Esta investigación se enfocó en el estudio de la anisotropía que pueden producir las microfrazas.

¿Porqué trabajar con microfrazas?

La importancia de determinar la densidad de microfrazas en las rocas está dada por varios factores. Cuando se realiza el modelado de yacimientos naturalmente fracturados se buscan datos que ayuden a representar las condiciones originales a las que se encuentran las rocas en el yacimiento, el conocimiento de la densidad de microfrazas disminuye la incertidumbre en los yacimientos, por lo que estos datos afectan directamente la representatividad que los modelos tienen sobre la realidad, esto implica que las proyecciones económicas sean adecuadas y no se presenten pérdidas

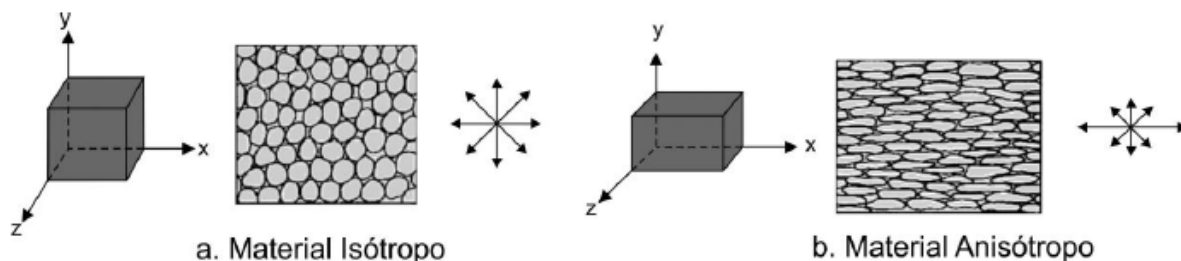


FIGURA 1. Representación gráfica de los materiales isótrpos (a) y anisótrpos (b). En el primer caso (a), las propiedades físicas del medio son las mismas independientemente de la dirección. Para el segundo caso (b), las propiedades físicas del medio cambian de acuerdo con la dirección analizada.

¿Por qué se requiere una nueva metodología para determinar la densidad de microfracturas?

Actualmente los datos de densidad de microfracturas en las rocas, se estiman a partir de análisis petrográficos. En este análisis se utiliza una metodología la cual consiste en, realizar una sección o lámina delgada de la roca. La elaboración de láminas o secciones delgadas se deben aplicar en rocas compactas con un mínimo de tres cortes, uno para cada plano con el fin de tener un control tridimensional durante el análisis (INEGI, 2000). Luego de realizada la sección delgada, en un papel transparente colocado sobre las secciones delgadas se trazan manualmente las microfracturas que se observan con claridad y se mide la longitud de cada una de ellas (Figura 2) (Samaniego *et al.*, 2003). Con los datos de longitudes, se calculan la densidad de microfracturas (D) Ecuación 1:

Siendo A el área de la imagen y Li la longitud de cada microfractura.

$$D = \left(\frac{1}{A} \right) * \sum \left[\left(\frac{Li}{2} \right) * 2 \right] \quad (1)$$



$A=16.83 \text{ m}^2$
 $D=1.27$



$A=0.62 \text{ m}^2$
 $D=1.3$



$A=0.017 \text{ m}^2$
 $D=1.27$

FIGURA 2. Ejemplo de trazas de fracturas. Las trazas se miden manualmente y se calculan los parámetros indicados. A = área de la imagen; D = densidad de las microfracturas. Tomado de Samaniego *et al.*, (2003).

Ventajas de la metodología convencional

- Con el análisis de sección delgada de las rocas además de determinar la densidad de microfracturas, se observan e identifican el contenido mineralógico, arreglo, tamaño, forma de los componentes, condiciones de formación, clasificación y otras características que varían según el tipo de roca.

Desventajas de la metodología convencional

- En la elaboración de secciones delgadas se deben realizar mínimo tres cortes uno para cada plano con el fin de tener un control tridimensional durante el análisis.
- Si se realiza solo un corte el dato es areal
- El tiempo en el que se obtiene el dato de densidad de microfracturas no es inmediato, la elaboración y análisis de la sección requiere un tiempo aproximado de días.
- Los costos de la elaboración son elevados, en promedio una sección delgada tiene un precio de aproximadamente 35 dólares y el análisis 125 dólares.

De acuerdo a las desventajas que presenta la herramienta actual en la determinación de la densidad de microfracturas en las rocas, se planteó emplear una nueva herramienta, que optimizara estas desventajas. Para esto se propuso analizar la anisotropía estudiada desde la propagación de ondas ultrasónicas en un medio fracturado de composición sintética.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE MICROFRACTURAS A PARTIR DE LA ANISOTROPÍA (IDENTIFICADA DESDE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS)

Ondas en medios elásticos

El comportamiento de la propagación de las velocidades ultrasónicas en medios porosos es un tema de interés por su importancia en la industria del petróleo. Una onda ultrasónica se puede definir como la propagación de una perturbación en un medio elástico. Cuando una roca es sometida a cualquier tipo de esfuerzo esta sufre una deformación temporal. Dado que las rocas se comportan elásticamente, los estudios de propagación de ondas en medios rocosos han demostrado que el esfuerzo aplicado sobre ellas causa una perturbación (deformación), la cual se propaga a lo largo de toda la roca comportándose como una onda con cierta velocidad. Basados en este comportamiento elástico de las ondas en las rocas, se han realizado investigaciones en el área de la geomecánica,

que han permitido establecer relaciones entre el comportamiento elástico de las rocas y las velocidades sónicas del medio poroso. Las ondas que se propagan en medios elásticos, son principalmente de dos tipos: ondas P (primarias) y ondas S (secundarias). Las ondas P También llamadas compresivas, son ondas que se propagan por compresión y tensión. El movimiento de las partículas de roca por las ondas P consiste en una alternancia de contracciones y distensiones, es decir, se acercan y alejan entre sí moviéndose en la dirección de propagación de la onda. Las ondas S llamadas de cizalla ó transversales, se propagan por movimientos perpendiculares a su dirección de propagación.

Para caracterizar la anisotropía desde la velocidad de propagación de estas ondas, es necesario entender el comportamiento del material que se está estudiando, en este caso las rocas, las cuales tienen de acuerdo a su constitución un tipo de simetría específico.

Simetría en medios elásticos

De acuerdo al tipo de simetría que puede tener un sólido (las rocas), existe un número de constantes elásticas necesarias para describir su comportamiento elástico. Entre menos complejo sea el tipo de simetría, menos constantes se necesitan para caracterizar. En total hay seis tipos de simetría en los medios elásticos.

TABLA 1. Tipos de simetría en medios elásticos.

Simetría en medios elásticos		
Tipo de Simetría	Constantes elásticas independientes	Ejemplos de casos geofísicos que contienen este tipo de simetría
Cúbica	3	Muy pocos casos geofísicos, ejemplo, cristal de Halita
Hexagonal	5	Esquistos, secuencias de capas delgadas, o bien sistema de fracturas paralelas y verticales
Ortorrómica	9	Esquistos, secuencias de capas delgadas horizontales afectadas por un sistema de fracturas paralelas y verticales
Monoclínica	13	Material afectado por dos familias no ortogonales de fracturas paralelas.
Triclínica	21	Medios con múltiples sistemas de fracturas

Esta investigación se enfocó en la simetría hexagonal, la cual muestra como casos geofísicos sistemas de fracturas verticales y paralelas.

Isotropía hexagonal o transversal

Este tipo de simetría también es llamado anisotropía azimutal (Thomsen, 2002) y es el tipo más simple de simetría real porque tiene un solo eje de simetría de rotación (aquí 2 de los 3 ejes son equivalentes entre sí, y diferentes del tercero). En el caso más común, el eje de simetría es vertical (Figura 3), así que puede ser llamado isotropía transversal vertical ó “VTI”. La isotropía a la que se hace referencia está limitada al plano horizontal (Transversal).

La isotropía transversal vertical (VTI), proporciona una descripción adecuada de la propagación de onda en un medio de capas delgadas con interfases horizontales (rocas estratificadas) y formaciones de esquistos estratificados.

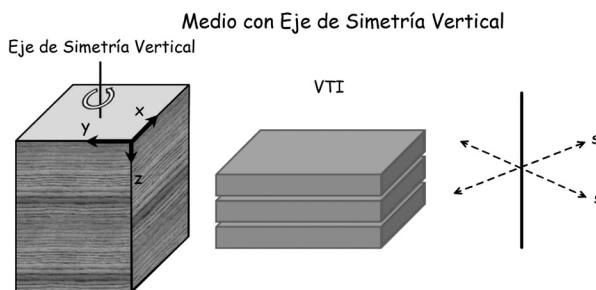


FIGURA 3. Representación de un medio con isotropía transversal con eje de simetría vertical, esquema de medios estratificados. Modificado de Rex Brian *et al.*, (2003).

El otro tipo de isotropía transversal es el que tiene un eje de simetría horizontal, (Figura 4), o HTI, aquí el plano isotrópico es el vertical (Thomsen, 2002), un ejemplo de esta es donde las rocas tienen fracturas verticales alineadas.

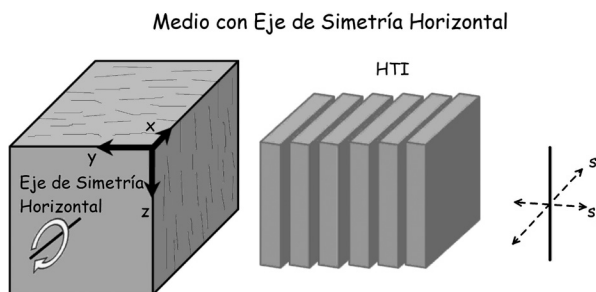


FIGURA 4. Representación de los medios de interés para reservorios fracturados. HTI, Medio con eje de simetría horizontal. Modificado de Rex Brian *et al.*, (2003).

Como se observa en la Figura 5, el modelo de simetría consta de un plano de eje de simetría (el plano x_1, x_3) y un plano isótropo. En medios HTI las propiedades elásticas son las mismas en cualquier dirección perpendicular al eje (eje de simetría), pero son diferentes paralelas al eje. Además la velocidad es más baja cuando se mide paralela al eje de simetría y más alta cuando se mide perpendicular al eje de simetría (Rueger, 1996).

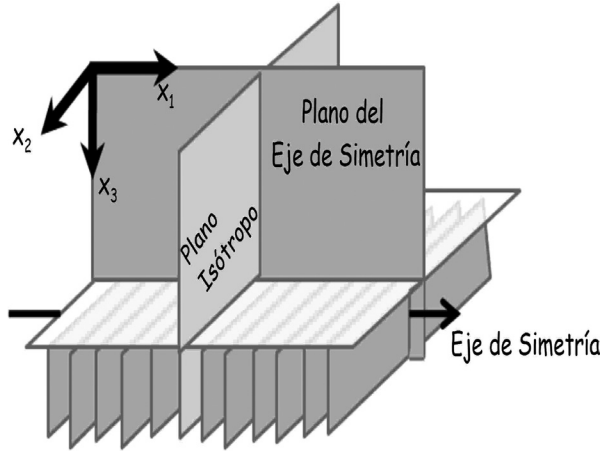


FIGURA 5. Medio transversalmente isótropo con eje de simetría horizontal HTI, se presenta un plano isótropo y un plano del eje de simetría, las propiedades medidas paralelas al eje de simetría son bajas comparadas con las medidas perpendiculares a dicho eje. Tomado de Rueger, (1996).

El medio de interés, de acuerdo al objetivo planteado es el medio transversalmente isótropo con eje de simetría horizontal o HTI. En este caso la onda S se polariza en dos ondas: una onda horizontal (Figura 5, plano X_1) la cual es relativamente lenta debido a que viaja en forma perpendicular a las fracturas, y una onda vertical (Figura 5, plano X_2), la cual es relativamente rápida, debido a que viaja paralelamente a las fracturas.

Determinación cuantitativa de la anisotropía en medios transversalmente isótropos HTI

Este tipo de simetría está caracterizada por cinco constantes elásticas independientes (Tabla 1), Ecuación 2, (Thomsen 2002;).

$$C_{HTI} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & c_{13} & & & \\ c_{13} & c_{33} & (c_{33} - 2c_{44}) & & & \\ c_{13} & (c_{33} - 2c_{44}) & c_{33} & & & \\ & & & c_{44} & & \\ & & & & c_{55} & \\ & & & & & c_{55} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Estas constantes elásticas (Ecuaciones 3 a 8) se determinan a partir de la densidad de la roca (ρ) y las velocidades de propagación de las ondas medidas en diferentes direcciones (Figura 6).

$$C_{11} = \rho V^2_{P1} \quad (3)$$

$$c_{66} = \rho V^2_{s1a} \quad (4)$$

$$C_{33} = \rho V^2_{P2} \quad (5)$$

$$C_{44} = \rho V^2_{s1b} \quad (6)$$

$$c_{66} = \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \quad (7)$$

$$C_{13} = -C_{44} + \sqrt{4\rho^2 V^4_{P3} - 2\rho V^2_{P3}(C_{11} + C_{33} + 2C_{44}) + (C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44})} \quad (8)$$

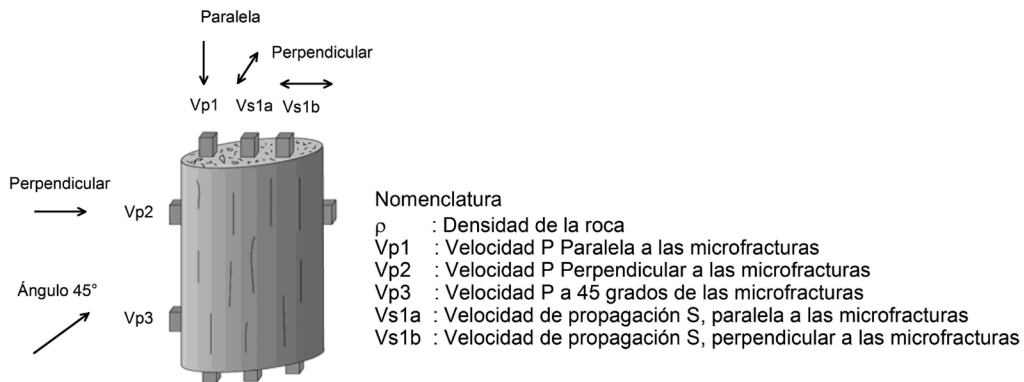


FIGURA 6. Configuración para la medición de la propagación de ondas para determinar anisotropía en modelos HTI.

El cálculo de estas constantes permite caracterizar el medio estudiado, y medir el grado de anisotropía de las rocas a partir de los parámetros anisótropos, como se muestra en las ecuaciones 9, 10 y 11 desarrolladas por Thomsen.

$$\varepsilon = \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{c_{66} - c_{44}}{2c_{44}} \quad (10)$$

$$\delta = \frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{33} - c_{44})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{44})} \quad (11)$$

- ε : Anisotropía del material obtenida desde la onda P (Dependencia de la velocidad de la onda P respecto a la dirección de propagación).
 γ : Anisotropía del material obtenida desde la onda S (Dependencia de la velocidad de la onda S respecto a la dirección de propagación).
 δ : Relación de la anisotropía determinada desde la onda P y S.

A partir del anterior análisis se identifica el grado de anisotropía producida por microfracturas en el material estudiado, para poder identificar si hay una relación entre dicha anisotropía y la densidad de microfracturas en el medio, se debe tener conocimiento de este parámetro.

Modelos de fracturas

Existen diferentes teorías con las cuales se describe el efecto de las fracturas sobre la propagación de ondas. Estas teorías se encuentran divididas principalmente en dos tipos: el primero es conocido como teoría de grietas (planteada principalmente por Hudson, 1980) el cual considera la distribución de grietas pequeñas, desconectadas, paralelas y subparalelas, las cuales tienen forma de monedas; mientras que el segundo tipo se conoce como teoría de fracturas (planteado por Schoenberg, 1983) el cual trata las fracturas como un sistema de planos paralelos infinitos. En este trabajo se utilizó la teoría propuesta por Hudson (1980), por ser la que mejor se ajusta a la descripción de los modelos físicos. Además, por permitir la representación de la estructura de un yacimiento (Pachano *et al.*, 2005).

Modelo De Grietas En Forma Elipsoidal (Penny Shaped) Teoría De Hudson, 1980.

Suposiciones:

1. Las grietas son elipsoides con una pequeña relación de aspecto.
2. No existe interconexión entre las grietas (Figura 7).
3. Para leer la anisotropía producida por

las microfracturas el espaciamiento y las dimensiones de las microfracturas deben ser mucho más pequeñas que la longitud de onda (Thomsen, 2002). Debido a que las longitudes de onda con las que se trabaja en laboratorio son menores a 2 centímetros de longitud, en esta investigación se estudiaron fracturas menores a 2 cm de longitud y de aperturas menores a 1mm. En este estudio, a las fracturas que cumplen estos requisitos de longitud y apertura se les denominan “microfracturas”.

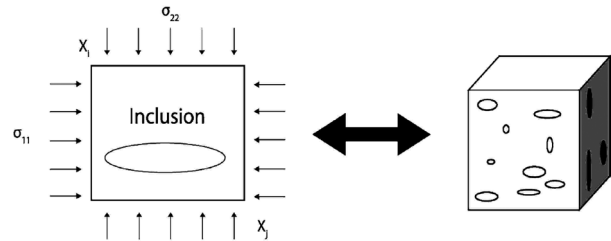


FIGURA 7. Representación en forma gráfica de las suposiciones de la teoría de Hudson Tomado de Pachano *et al.*, (2005).

Hudson (1981) determinó la densidad de microfracturas (grietas, inclusiones) como se muestra en la Ecuación (12).

$$\varepsilon = \frac{nr^3}{v} \quad (12)$$

- ε : Densidad de microfracturas (inclusiones)
 n : Número de inclusiones
 r : Radio de la inclusión
 v : Volumen del cilindro o matriz donde se encuentran dichas inclusiones.

A partir de la ecuación 12, se estimará la densidad de microfracturas sobre los núcleos sintéticos, lo cual permite manipular los parámetros que incluye dicha ecuación, posteriormente a estos núcleos sintéticos se les medirá los parámetros anisótropos para establecer si hay alguna relación entre estos factores, la densidad de microfracturas y la anisotropía del material.

Procedimiento preliminar para desarrollar la metodología propuesta

A diferencia de la metodología convencional en la cual la densidad de microfracturas se determina a partir de análisis petrográficos, donde el tiempo y costos de obtención son elevados y además de no realizarse un análisis en tres planos se obtiene un análisis areal; en este trabajo se propone una metodología que permite determinar la densidad de microfracturas, aproximadamente en dos hora y con un costo mínimo, inferior comparado con el de la metodología

convencional. Además la densidad de microfracturas se estima en un volumen de roca.

Para entender el efecto de las microfracturas en la anisotropía del material desde las ondas ultrasónicas, este trabajo desarrolló una metodología experimental de laboratorio. De acuerdo con el objetivo planteado, el cual es desarrollar una metodología para determinar la densidad de microfracturas a partir de parámetros anisótropos, fue necesario obtener una relación entre dichos parámetros y la densidad de microfracturas. Para evaluar el impacto de las microfracturas en la anisotropía se elaboraron núcleos sintéticos de roca para poder manipular en ellos los parámetros de microfracturas. A estos modelos sintéticos se les hizo inclusiones simulando microfracturas las cuales tuvieron densidad variable en cada modelo. Además, cada modelo cumplió con las condiciones del modelo HTI (modelo transversalmente isótropo), donde la matriz de roca debe ser isótropa y homogénea y la anisotropía solo es entonces causada por microfracturas paralelas y verticales.

Se fabricaron 35 núcleos sintéticos en el Laboratorio de Tecnología Operacional (TOP) del Instituto Colombiano del Petróleo. Estos se elaboraron a partir de una mezcla de arena fina más resina epóxica, cuyas medidas se adecuaron al tamaño de un núcleo de perforación (3.8 cm de diámetro y 7 cm de longitud), apropiado para realizar experimentos en laboratorio, con un volumen aproximado de 64 cm³. Las microfracturas son simuladas con pequeñas láminas de aluminio de forma circular de 6mm de diámetro y 0.07 mm de espesor, estas se iban ubicando de forma paralela y vertical, una con respecto a otra, a medida que se construían los núcleos. De estos núcleos, 30 se elaboraron variando el número de inclusiones. El primer núcleo sintético se fabrica sin inclusiones, al siguiente núcleo se le incrustan 5 inclusiones, y así sucesivamente se van aumentando las inclusiones de cinco en cinco, hasta llegar a 130 inclusiones, lo que corresponde al 5.38% de densidad de microfracturas según Hudson, 1981; a partir de 130 inclusiones se insertaron de 20 en 20 hasta llegar a 250 microfracturas equivalentes a 10.55% en la densidad de microfracturas (según Hudson, 1981). Los 5 núcleos restantes se utilizaron para realizar la verificación de resultados.

METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta consiste en:

1. Medir los tiempos de propagación de las ondas P y S
2. Determinar la velocidad de propagación de las ondas P y S
3. A partir de la velocidad de propagación de las ondas

P y S, hallar las constantes elásticas que caracterizan el medio HTI (Ecuaciones 3 a la 8).

4. Desde las constantes elásticas, calcular los parámetros anisótropos (Ecuaciones 9 a la 11).

5. Hallar la relación entre la anisotropía del material obtenida desde los parámetros anisótropos ϵ , γ , δ y la densidad de microfracturas obtenida desde Hudson 1981 (ecuación 12).

Obtención de ondas acústicas. La generación de las ondas ultrasónicas se basa, en que una unidad de pulso envía una señal eléctrica al transductor, el cual mediante un cristal piezoeléctrico interno genera una onda de tensión de baja energía y alta frecuencia. A su vez los transductores o palpadores deben ser acoplados a la superficie del material mediante medios acoplantes para transmitir el máximo de energía posible, en este caso se empleó inicialmente epóxico de Plata. La onda viaja entonces a través de la roca, siendo captada por el transductor receptor, que puede situarse en varias posiciones en función del método empleado (Figura 6) el cual, a su vez, convierte la energía de la onda en energía eléctrica. El tiempo de la transmisión puede visualizarse en el osciloscopio, mediante un display de lectura, en microsegundos, a partir del cual se calcula, conocida la distancia entre emisor y receptor, la velocidad de propagación de la onda y, posteriormente, estimar los parámetros anisótropos.

Estas mediciones se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo.

Montaje de cristales piezoeléctricos en rocas

En experimentos realizados previamente sobre rocas para medir los tiempos de propagación de las ondas se fijaron directamente los piezoeléctricos a la roca con epóxico de Plata.

La configuración utilizada para el desarrollo de la metodología propuesta se muestra en la Figura 6, como se observa en esta Figura, para llevar a cabo las medidas de los parámetros anisótropos, se necesitan, dos pares de cristales S y un par P dispuestos sobre las caras planas del cilindro, y tres cristales P ubicados en las paredes del cilindro de manera que un par queda enfrente horizontalmente y otro a 45°. Los cristales PZT se cortaron antes de realizar el montaje en el laboratorio, ya que estos se adquirieron en el mercado con dimensiones más grandes de las requeridas. La forma de los cristales es inicialmente circular con un diámetro de 2cm y un área de 3.14 cm². Después de realizar el corte, el área de cada cristal fue de aproximadamente 25

mm², obteniendo entonces 10 cristales a partir del cristal inicial. La frecuencia de oscilación de los cristales está directamente relacionada con el área de estos, la cual fue de aproximadamente 80 a 100 KHz para los cristales S y de 50 a 60 KHz para cristales P después del corte.

De acuerdo con lo anterior, con un cristal S, uno P y un sobre de epóxico de plata (3g), es posible realizar solo dos montajes experimentales. Tanto el costo de los cristales como el epóxico de plata es elevado, con el fin de reducir estos costos se trabajó en la implementación de un dispositivo para el ahorro de cristales, ya que el promedio de pruebas que se realizaron implicó un número elevado de cristales y epóxico de plata lo cual pudo haber limitado la aplicación de la metodología. Este dispositivo se describe a continuación.

Dispositivo para ahorro de cristales

Como se mencionó anteriormente, se diseñó un dispositivo para optimizar el uso de los cristales. Basados en el funcionamiento de los piezoeléctricos se

dispuso de una placa de acero sobre la cual se ubicaron los cristales adhiriéndolos con epóxico de plata. Esta placa se adaptó de tal manera que su acople a la roca sea el mejor, ya que de esto depende que la calidad de la onda sea óptima. Debido a que el montaje de los cristales sobre la roca tiene las disposiciones observadas en la Figura 6, se tomaron dos pares de placas para realizar las medidas longitudinales (Figura 8), es decir a lo largo del núcleo, ubicando las platinas sobre las partes planas del cilindro.

En la Figura 8a se observan las placas para realizar medidas longitudinales, en cada platina se observan 3 cristales, 1 P y 2 S polarizados a 90° entre ellos. En la Figura 8b se observa una estructura Metálica externa la cual se hizo para fijar las placas, esta es denominada soporte para núcleos. En la Figura 8c se observan las placas para realizar medidas diametrales. Estas placas tienen una forma tal que en su parte interna son paralelas a la curvatura del cilindro (Figura 8c).

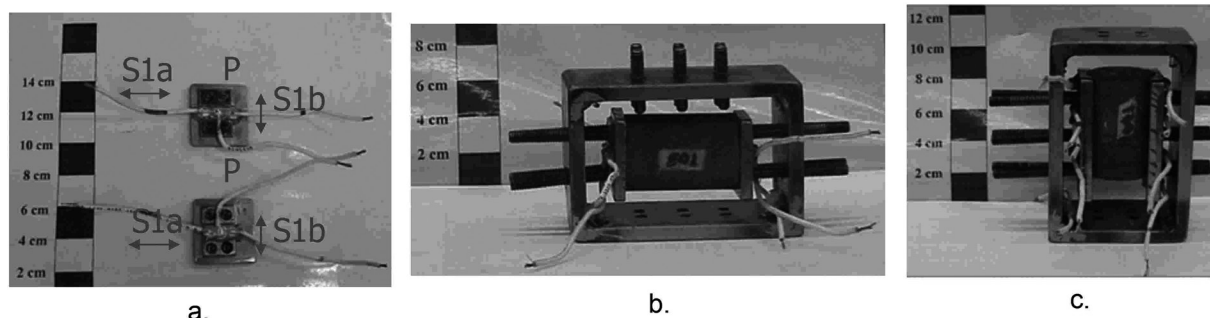


FIGURA 8. Dispositivo para ahorro de cristales. (a) Placas para medidas longitudinales. (b) Soporte para plugs con el respectivo montaje para las mediciones longitudinales. (c) Soporte para plugs con el respectivo montaje para las mediciones diametrales.

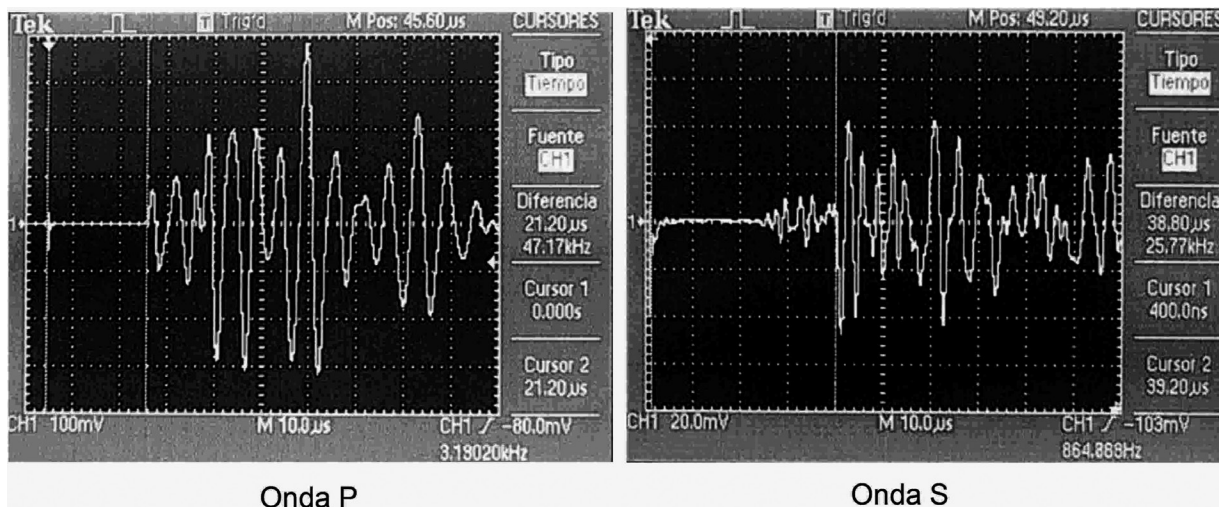


FIGURA 9. Fotografía de la señal recibida en el osciloscopio de una onda P y una onda S, mediciones realizadas empleando el dispositivo para el ahorro de cristales.

Este mecanismo consta de una estructura metálica la cual soporta el núcleo y las platinas y se utiliza para presionar las platinas contra el núcleo con ayuda de tornillos para conseguir un mejor acople. Además, para mejorar aun más el acople se aplicó grasa de baja viscosidad o de vacío a las placas y a la roca (Figuras 8b y 8c). La señal que se logró con este dispositivo fue óptima, es decir, la amplitud de la señal ocupó más del 60% de la pantalla del osciloscopio y la señal de ruido fue mínima, con lo cual se pudo identificar el arribo de la onda sin mayor dificultad (Figura 9).

Para validar las mediciones de la propagación de ondas y determinar si la señal obtenida era la correcta, se usó como patrón el aluminio, ya que la velocidad de la onda P y S son conocidas (Tabla 2). En el laboratorio las medidas experimentales obtenidas para el tiempo de propagación de la onda P y S fueron de 6 μ s y 13,5 μ s respectivamente; los datos reportados se estiman en 5.9 μ s y 12.5 μ s respectivamente. Con lo anterior se muestra que el montaje es aceptable para medir los parámetros anisótropos, ya que se observa el retraso normal de la onda S con respecto a la onda P (Tabla 2).

TABLA 2. Comparación de los datos de velocidades reportados en el Aluminio comparados con los obtenidos en el dispositivo ahorrador de cristales.

	Datos Reportados Carbó Rafael et al, 2000	Datos de Laboratorio
Diámetro (m)	0.038	0.038
Tiempo Longitudinal (s)	5,92E-6	6.00E-6
Velocidad Longitudinal (m/s)	6420.00	6333.33
Tiempo Transversal (s)	12.5 E-6	13.5E-6
Velocidad Transversal (m/s)	3040	2814

Después de verificar que la señal obtenida era la adecuada se procedió a realizar la medición de la propagación de las ondas P y S en los núcleos sintéticos. Con el fin de obtener repetitividad en los resultados se realizaron alrededor de cinco mediciones en cada posición de las microfracturas con respecto al cristal para cada núcleo.

RESULTADOS

Una vez se obtuvo a partir del dispositivo que contenía los cristales piezoeléctricos la señal correcta de las

ondas, se procedió a realizar las medidas de los tiempos de propagación de las ondas en los núcleos sintéticos con microfracturas simuladas; a partir del tiempo de propagación se estimaron las velocidades P y S, para posteriormente calcular los parámetros anisótropos (Ecuaciones 9, 10 y 11), desde las constantes elásticas (Ecuaciones 3, 4, 5, 6, 7, y 8). Conociendo el número de inclusiones en cada núcleo sintético, el radio de las inclusiones así como el volumen del núcleo, fue posible establecer la densidad de microfracturas desde Hudson 1981, Ecuación 12. Teniendo tanto los parámetros anisótropos, así como la densidad de microfracturas (Ver anexo) se plantea examinar dichos datos y analizar si existe alguna relación entre estos.

En las Figuras 10 a 13 se muestran estas relaciones gráficamente, así como la desviación estándar de los datos, en las gráficas la desviación estándar se presenta como barras verticales.

El comportamiento de la onda S (Figura 10) muestra una tendencia lineal clara, se observa una relación directamente proporcional entre la densidad de microfracturas y la anisotropía caracterizada desde la onda S. Este comportamiento se mantiene hasta un porcentaje de densidad de microfracturas del 4.96%, y en los valores de mayor porcentaje de densidad de microfracturas esta relación cambia, disminuyendo considerablemente la anisotropía desde 0,4 hasta 0,15.

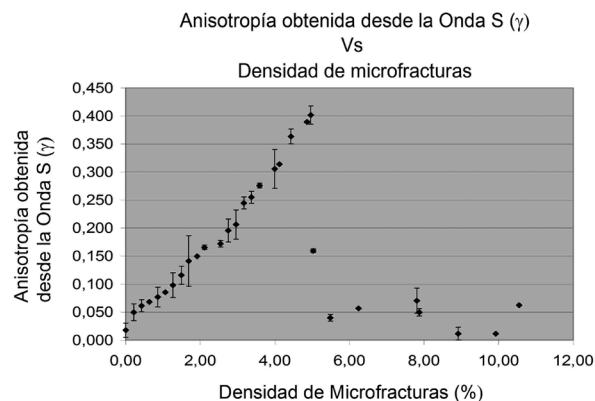


FIGURA 10. Relación de la Anisotropía caracterizada desde la onda S promediada Vs la densidad de microfracturas.

Por el contrario, en las gráficas obtenidas de las relaciones entre los parámetros anisótropos ϵ (Figura 11) y δ (Figura 12) con la densidad de microfracturas, no se observan tendencias que permitan confirmar el comportamiento esperado de aumento en la anisotropía a medida que se aumenta el porcentaje de densidad de microfracturas. En la Figura 11 se observa una tendencia

de aumento en los intervalos de 0,0 y 5% de densidad de microfrazas, pero a diferencia de la Figura 10 esta muestra fluctuaciones elevadas en la desviación estándar; como es el caso en el punto 8% de densidad de microfrazas los valores que se obtuvo estaban en un rango de 0,2 y 0,98 en la Anisotropía obtenida desde la Onda P, menores fluctuaciones se presentan en los intervalos de 3 a 5 % y de 8 a 10 % en la densidad de microfrazas. El mismo comportamiento se presenta en la Figura 12, con los datos en los intervalos 4-5 % y 9-10 % en densidad de microfrazas.

Las fluctuaciones que se observan con los parámetros ε y δ , indican que no hay repetitividad en los datos, dando incertidumbre a los resultados. Por lo tanto, no es adecuado apoyarse en las relaciones de estos parámetros para la determinación de la densidad de microfrazas.

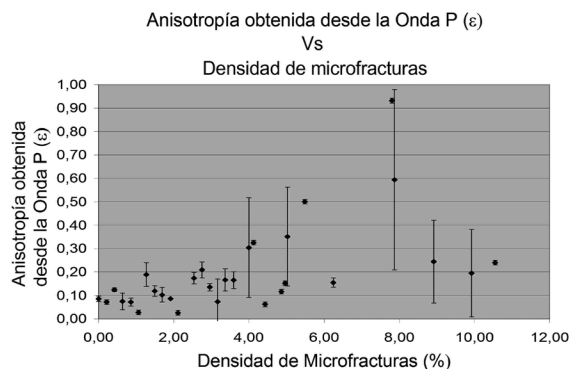


FIGURA 11. Relación de la Anisotropía obtenida desde la onda P promediada Vs la densidad de microfrazas.

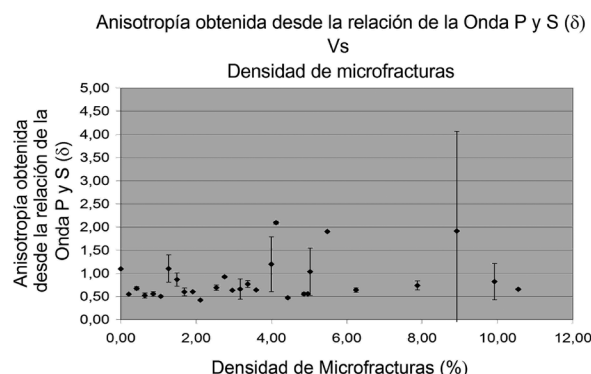


FIGURA 12. Variación de la relación de ondas P y S (δ) Vs la densidad de microfrazas.

A partir del análisis realizado a la relación entre la anisotropía caracterizada desde la onda S y la densidad de microfrazas (Figura 10), en donde se observa una tendencia directamente proporcional entre la Anisotropía desde la Onda S y la densidad de microfrazas,

aumentando linealmente la anisotropía a medida que aumenta la densidad de microfrazas hasta el 4,96%, se realizó una regresión lineal obteniendo la ecuación de la recta (Figura 13).

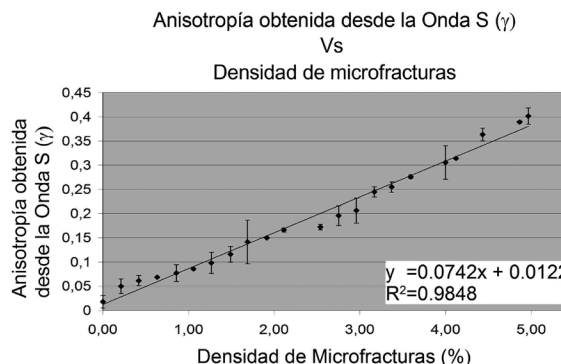


FIGURA 13. Relación de la Anisotropía obtenida desde la onda S promediada Vs la densidad de microfrazas, se muestra la relación lineal entre estos parámetros.

$$Y=0,0742X + 0,0122$$

Y: Anisotropía caracterizada desde la Onda S (γ)

X: Densidad de microfrazas (%)

Con esta ecuación se determinará la densidad de microfrazas a partir de parámetros anisótropos en los núcleos reales, es decir, de acuerdo a la metodología propuesta, una vez se realicen las mediciones de las ondas P y S, se hallen las velocidades, las constantes de rigidez y la anisotropía desde la onda S se determinará la densidad de microfrazas.

Assad' *et al.*, (1992), realizaron un experimento similar llegando hasta un porcentaje de densidad de microfrazas del 10%, observando también una tendencia de aumento de anisotropía de la onda S hasta una densidad de microfrazamiento del 7%, y por encima de este valor una disminución de la anisotropía, ellos sugirieron que cuando se supera un valor crítico de densidad de fracturas (inclusiones) estas se interconectan entre sí, de manera que las dimensiones de las inclusiones dejan de ser menores que la longitud de onda, rompiéndose así las condiciones de anisotropía en función de la escala.

De acuerdo a los resultados obtenidos, además se puede sugerir, que el comportamiento observado puede ser el reflejo de que el medio fracturado alcanza un valor crítico de densidad de microfrazas (inclusiones), como consecuencia este se hace espacialmente más homogéneo y su comportamiento tiende a ser menos anisótropo.

Aplicabilidad de la curva obtenida de la anisotropía del material desde la onda S vs la densidad de microfracturas

Según Crampin (1994), las rocas se pueden clasificar según su grado de fracturamiento (Figura 14). La escala de Crampin (1994) varía entre un valor mínimo de fracturamiento de 1.5% ($e=0.015$) y un máximo de 42% ($e=0.042$).

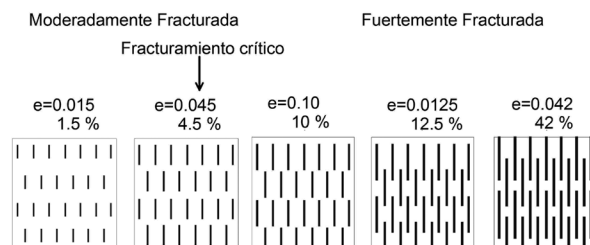


FIGURA 14. Esquema de la clasificación del grado de fracturamiento de las rocas, según Crampin, (1994).

Crampin (1994) además sugirió que hay un valor de densidad de fracturas que corresponde al “fracturamiento crítico” de la roca. Como se observa en la Figura 15 el fracturamiento crítico se alcanza en 4.5%.

“De acuerdo con la clasificación que planteó Crampin (1994) para el fracturamiento de las rocas, la curva obtenida en esta investigación de la relación entre la anisotropía desde la onda S (γ) y la densidad de microfracturas (Figura 13) tiene aplicabilidad en rocas cuyo grado de fracturamiento sea inferior al fracturamiento crítico, es decir, en un rango de rocas intactas a moderadamente fracturadas”.

Esta metodología está en proceso de validación con núcleos reales.

CONCLUSIONES

La relación obtenida entre la anisotropía caracterizada desde la onda S y la densidad de microfracturas demuestra que la anisotropía está relacionada directamente con la densidad de microfracturas paralelas, verticales, y que es posible determinar una relación entre estas dos. El comportamiento observado muestra que a medida que aumenta la densidad de microfracturas (inclusiones), aumenta la anisotropía de la onda S, con una tendencia lineal. Este comportamiento se presentó hasta el porcentaje de densidad de microfracturas del 4.96%, en valores superiores, la anisotropía disminuye, esto puede ser el reflejo de que el medio fracturado alcanza un valor crítico de densidad de microfracturas (inclusiones),

como consecuencia este se hace espacialmente más homogéneo y su comportamiento tiende a ser menos anisótropo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las relaciones de la anisotropía de los núcleos sintéticos desde las onda P (ϵ) y la relación entre la onda P y S (δ) con la densidad de microfracturas, se descarta el uso de estos parámetros de anisotropía para emplearlos en la determinación de la densidad de microfracturas, por sus fluctuaciones en la desviación estándar, ya que no presentaron repetitividad en los datos.

NOMENCLATURA

A: Área de la imagen para determinar densidad de microfracturas, método convencional

Li: Longitud de cada microfractura

D: Densidad de microfracturas

e : Densidad de microfracturas (inclusiones)

n : Número de inclusiones

r : Radio de la inclusión

ρ : Densidad de la roca

v : Volumen del cilindro o matriz donde se encuentran dichas inclusiones.

V_{p1} : Velocidad P Paralela a las microfracturas

V_{p2} : Velocidad P Perpendicular a las microfracturas

V_{p3} : Velocidad P a 45 grados de las microfracturas

V_{s1a} : Velocidad de propagación S, paralela a las microfracturas

V_{s1b} : Velocidad de propagación S, perpendicular a las microfracturas

t_{s1a} : Tiempo de propagación S, paralela a las microfracturas

t_{s1b} : Tiempo de propagación S, perpendicular a las microfracturas

$c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{33}, c_{44}, c_{66}$: Constantes elásticas independientes

ϵ : Anisotropía de la onda P

γ : Anisotropía de la onda S

δ : Relación de la anisotropía de la onda P y S

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestro agradecimiento a: ECOPETROL S.A. – ICP y a la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, por patrocinar el desarrollo de esta investigación. Al Grupo de Investigación Estabilidad de Pozo, A Hernando Altamar, Karen Pachano, Herlin Gonzalez por sus aportes y asesoría en el entendimiento de la anisotropía. Al personal del laboratorio de Mecánica de Rocas ICP, Jenny Carvajal, Carime Valera, Jorge Galvis,

Tecnología Operacional ICP, Laboratorio de Rocas UIS, Laboratorio De Química UIS, por la colaboración técnica en el desarrollo de los experimentos.

REFERENCIAS

Ass'ad J. M., Robert H. T., y John A. M. 1992. A Physical Model Study of Microcracks-induced anisotropy, *Geophysics*, 57, (12) 1562-1570.

Carbó, R. 2000. Difusión de ondas acústicas por una esfera hueca con pared de muy poco espesor inmersa en agua y llena de aire; *Revista de Acústica*, 37 (3, 4).

Crampin S. 1994. The Fracture Criticality of Crustal Rocks, *Geophys. J. Int.* 118, 428-438.

Crampin S. 1998. Shear-Wave Splitting in a Critical Crust: The Next Step, University of Edinburgh, Department of Geology and Geophysics, Grant Institute, West Mains Road, *Revue de l'institut Français Du Pétrole*, 53, (5).

Hudson, J. A. 1980. "Overall properties of a cracked solid", *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, 88, 371-384.

Hudson, J.A. 1981. Wave speeds and attenuation of elastic-waves in material containing cracks, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 64, 133-150.

INEGI, 2000. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática, La Información Petrográfica y Paleontológica en la Cartografía Geológica del INEGI, Guía Normativo-Metodológica, México.

Pachano K. H., Altamar. M., Piedrahita C., Salinas T., Calderón Z. 2005. Propagación de Ondas en Medios Efectivos - Mediciones en Modelos a Escala, Asociación Colombiana De Ingenieros De Petróleos (ACIPET).

Rex B., Goodway B., Martin C., Gordon U. 2003. The Impact of Azimuthal Anisotropy on Seismic AVO and Petrophysical Response in a Fractured Wabamun Gas Reservoir.

Rueger A. 1996. Reflexion Coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropy media: Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines.

Samaniego A. F., Álvarez S., Tolzon G. 2003. Estimación de densidades, distribuciones de longitud y longitud total de fracturas; un caso de estudio en la Falla de Los Planes, La Paz, B.C.S. *Boletín de la sociedad geológica mexicana* tomo LVI, (1), pp. 1-9

Schoenberg, M. y Gilbert, K.E. 1983. Elastic waves in periodically layered media. Technical Programme and Abstracts of Papers, 45th Meeting of the European Association of Exploration Geophysicists (Oslo): 58-58.

Thomsen L. 2002. Entendimiento de la Anisotropía Sísmica en Exploración y Explotación, *Boletín AMGE*, 41 (4).

Trabajo recibido: Marzo 24 de 2010
Trabajo aceptado: Junio 11 de 2010

ANEXO. Datos promediados de los núcleos sintéticos con láminas de Aluminio como inclusiones.

Número de Microfract. Inclusiones	Densidad de Microfract.(%).	Long. (m)	Diam. (m)	Densidad (Kg/m ³)	tS1b (ms)	tS1a (ms)	VS1b (m/s)	VS1a (m/s)	C33 (Pa)	C11 (Pa)	C66 (Pa)	C44 (Pa)	C12 (Pa)	C13 (Pa)	e	d	g
0	0,00	0,0561	0,0381	1664,42	37,00 ±0,73	36,40 ±0,78	1515,36	1541,82	10457,4E+6	12245,7E+6	3958,1E+6	3823,2E+6	4329,5E+6	10173,7E+6	0,086	1,095	0,018 ±0,013
5	0,21	0,0558	0,0381	1713,85	36,00 ±0,83	34,40 ±0,42	1549,12	1623,83	11671,2E+6	13340,8E+6	4519,5E+6	4114,4E+6	4301,7E+6	8275,4E+6	0,072	0,547	0,050 ±0,015
10	0,42	0,0563	0,0381	1817,81	36,50 ±0,23	34,50 ±0,19	1542,51	1634,29	11424,1E+6	14264,9E+6	4855,3E+6	4325,3E+6	4554,3E+6	8320,8E+6	0,124	0,676	0,061 ±0,011
15	0,63	0,0560	0,0381	1642,57	35,50 ±0,28	33,30 ±0,28	1577,51	1681,74	9802,5E+6	11250,9E+6	4645,8E+6	4087,7E+6	1959,3E+6	5440,7E+6	0,075	0,521	0,068 ±0,001
20	0,86	0,0552	0,0381	1780,46	37,70 ±0,20	35,10 ±0,69	1464,22	1573,05	12704,8E+6	14518,5E+6	4406,9E+6	3817,3E+6	5704,7E+6	10473,8E+6	0,072	0,556	0,077 ±0,017
25	1,06	0,0559	0,0381	1683,16	36,90 ±0,10	34,10 ±0,10	1514,91	1639,30	12465,8E+6	13148,9E+6	4523,2E+6	3862,8E+6	4102,6E+6	9608,0E+6	0,027	0,501	0,085 ±0,001
30	1,27	0,0561	0,0381	1818,35	38,00 ±0,70	34,70 ±0,10	1478,65	1616,71	10472,7E+6	14379,4E+6	4752,7E+6	3976,7E+6	4874,0E+6	9743,0E+6	0,189	1,102	0,098 ±0,022
35	1,49	0,0556	0,0381	1670,62	40,40 ±0,46	36,40 ±0,12	1374,98	1525,81	8949,8E+6	11065,3E+6	3889,4E+6	3158,7E+6	3286,5E+6	7914,7E+6	0,119	0,866	0,116 ±0,016
40	1,69	0,0561	0,0381	1692,97	39,00 ±0,83	34,40 ±0,61	1440,38	1629,87	10651,6E+6	12807,6E+6	4498,2E+6	3513,5E+6	3811,2E+6	8366,4E+6	0,102	0,598	0,141 ±0,045
45	1,91	0,0557	0,0381	1702,90	39,10 ±0,10	34,30 ±0,10	1424,30	1623,62	9656,0E+6	11319,7E+6	4489,1E+6	3454,5E+6	2341,6E+6	7064,5E+6	0,086	0,603	0,150 ±0,001
Número de Microfract.	Densidad de Microfract.	Long. (m)	Diam. (m)	Densidad (Kg/m ³)	tS1b (ms)	tS1a (ms)	VS1b (m/s)	VS1a (m/s)	C33 (Pa)	C11 (Pa)	C66 (Pa)	C44 (Pa)	C12 (Pa)	C13 (Pa)	e	d	g

60	2,54	0,0560	0,0381	1848,55	37,10 ±0,10	32,00 ±0,14	1509,16	1749,70	10754,2E+6	14487,5E+6	5659,3E+6	4210,2E+6	3168,8E+6	76,12E+8	0,174	0,691	0,172 ±0,006
65	2,75	0,0559	0,0381	1661,87	38,40 ±0,50	32,50 ±0,17	1457,48	1718,84	8547,3E+6	12126,8E+6	4910,0E+6	3530,8E+6	2306,8E+6	6679,4E+6	0,209	0,922	0,196 ±0,021
70	2,96	0,0560	0,0381	1735,77	38,50 ±0,60	32,40 ±0,53	1455,16	1729,05	10353,6E+6	13153,6E+6	5190,3E+6	3676,4E+6	2773,0E+6	7822,4E+6	0,135	0,634	0,206 ±0,026
75	3,17	0,0561	0,0381	1672,42	40,20 ±0,19	32,90 ±0,21	1396,29	1704,01	10087,1E+6	11372,6E+6	4856,3E+6	3260,6E+6	1660,0E+6	8279,6E+6	0,073	0,659	0,245 ±0,011
80	3,37	0,0562	0,0381	1679,47	40,60 ±0,41	33,00 ±0,20	1385,80	1702,77	8559,9E+6	11365,4E+6	4869,7E+6	3225,6E+6	1626,0E+6	6672,4E+6	0,166	0,767	0,255 ±0,011
85	3,59	0,0560	0,0381	1734,99	40,60 ±0,46	3,26 ±0,46	1381,30	1720,70	8796,7E+6	11674,3E+6	5137,6E+6	3310,6E+6	1399,0E+6	6271,2E+6	0,165	0,640	0,276 ±0,004
95	4,00	0,0563	0,0381	1717,78	38,90 ±0,43	30,70 ±0,89	1445,70	1834,75	9760,6E+6	14764,8E+6	5786,2E+6	3590,6E+6	3192,4E+6	8935,6E+6	0,304	1,196	0,305 ±0,035
100	4,12	0,0575	0,0381	1669,68	40,70 ±0,10	31,90 ±0,10	1411,79	1801,25	7158,9E+6	11815,6E+6	5417,3E+6	3327,9E+6	0981,0E+6	8052,6E+6	0,325	2,094	0,314 ±0,001
105	4,43	0,0561	0,0381	1660,14	40,20 ±0,21	30,60 ±0,12	1397,05	1835,68	11621,7E+6	13066,7E+6	5594,2E+6	3240,5E+6	1878,2E+6	9489,9E+6	0,062	0,471	0,363 ±0,013
115	4,86	0,0560	0,0381	1803,58	40,80 ±0,21	30,60 ±0,12	1373,68	1832,08	11952,6E+6	14723,1E+6	6053,8E+6	3403,4E+6	2615,5E+6	10226,3E+6	0,116	0,551	0,389 ±0,002
120	4,96	0,0573	0,0381	1686,83	46,20 ±0,21	34,40 ±0,23	1238,29	1662,68	10598,3E+6	13821,7E+6	4663,4E+6	2586,5E+6	4494,9E+6	10007,3E+6	0,152	0,556	0,402 ±0,016
Número de Microfract.	Densidad de Microfract.	Long. (m)	Diam. (m)	Densidad (Kg/m3)	tS1b (ms)	tS1a (ms)	VS1b (m/s)	VS1a (m/s)	C33 (Pa)	C11 (Pa)	C66 (Pa)	C44 (Pa)	C12 (Pa)	C13 (Pa)	e	d	g
125	5,03	0,0589	0,0381	1668,01	39,70 ±0,21	34,60 ±0,12	1483,40	1703,68	8199,8E+6	13370,7E+6	4841,5E+6	3670,5E+6	3687,8E+6	5610,8E+6	0,351	1,034	0,160 ±0,004

130	5,48	0,0561	0,0381	1832,22	37,00 ±0,21	35,60 ±0,23	1515,67	1575,25	7214,8E+6	14431,4E+6	4546,6E+6	4209,1E+6	5338,1E+6	5356,4E+6	0,500	1,901	0,040 ±0,006
150	6,25	0,0569	0,0381	1660,01	38,30 ±0,21	36,30 ±0,12	1484,86	1566,67	10253,7E+6	13422,0E+6	4074,4E+6	3660,0E+6	5273,2E+6	7729,9E+6	0,155	0,639	0,057 ±0,001
170	7,81	0,0516	0,0381	1854,91	33,60 ±0,21	31,50 ±0,69	1533,65	1638,00	5563,2E+6	15931,7E+6	4978,4E+6	4363,0E+6	5974,8E+6	6307,1E+6	0,932	8,426	0,070 ±0,023
190	7,87	0,0572	0,0381	1687,49	37,50 ±0,21	35,80 ±0,23	1524,38	1598,18	7167,7E+6	14162,6E+6	4310,3E+6	3921,6E+6	5542,0E+6	2568,1E+6	0,594	0,738	0,050 ±0,007
210	8,92	0,0558	0,0381	1702,98	35,80 ±0,21	35,40 ±0,50	1556,66	1574,44	10431,0E+6	14991,7E+6	4222,0E+6	4126,7E+6	6547,7E+6	10301,7E+6	0,245	1,911	0,012 ±0,012
230	9,92	0,0549	0,0381	1711,75	35,50 ±0,21	35,10 ±0,10	1546,48	1564,10	10484,6E+6	14030,8E+6	4187,6E+6	4093,8E+6	5655,5E+6	7800,2E+6	0,195	0,821	0,011 ±0,001
250	10,55	0,0561	0,0381	1677,32	35,10 ±0,10	33,10 ±0,10	1598,29	1694,86	10538,5E+6	15592,2E+6	4818,2E+6	4284,8E+6	5955,7E+6	6926,1E+6	0,240	0,657	0,062 ±0,001