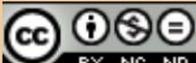


YACIMIENTOS TIPO SHALE

PROYECTO DE CURSO DE EXTENSIÓN
MODALIDAD A DISTANCIA
CARRERA DE PETRÓLEO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

4ta. Edición - 2020



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

3

_ GEOMECÁNICA APLICADA A YACIMIENTOS TIPO SHALE

PROFESOR RESPONSABLE GGO HERNÁN LANZA CASTELLI

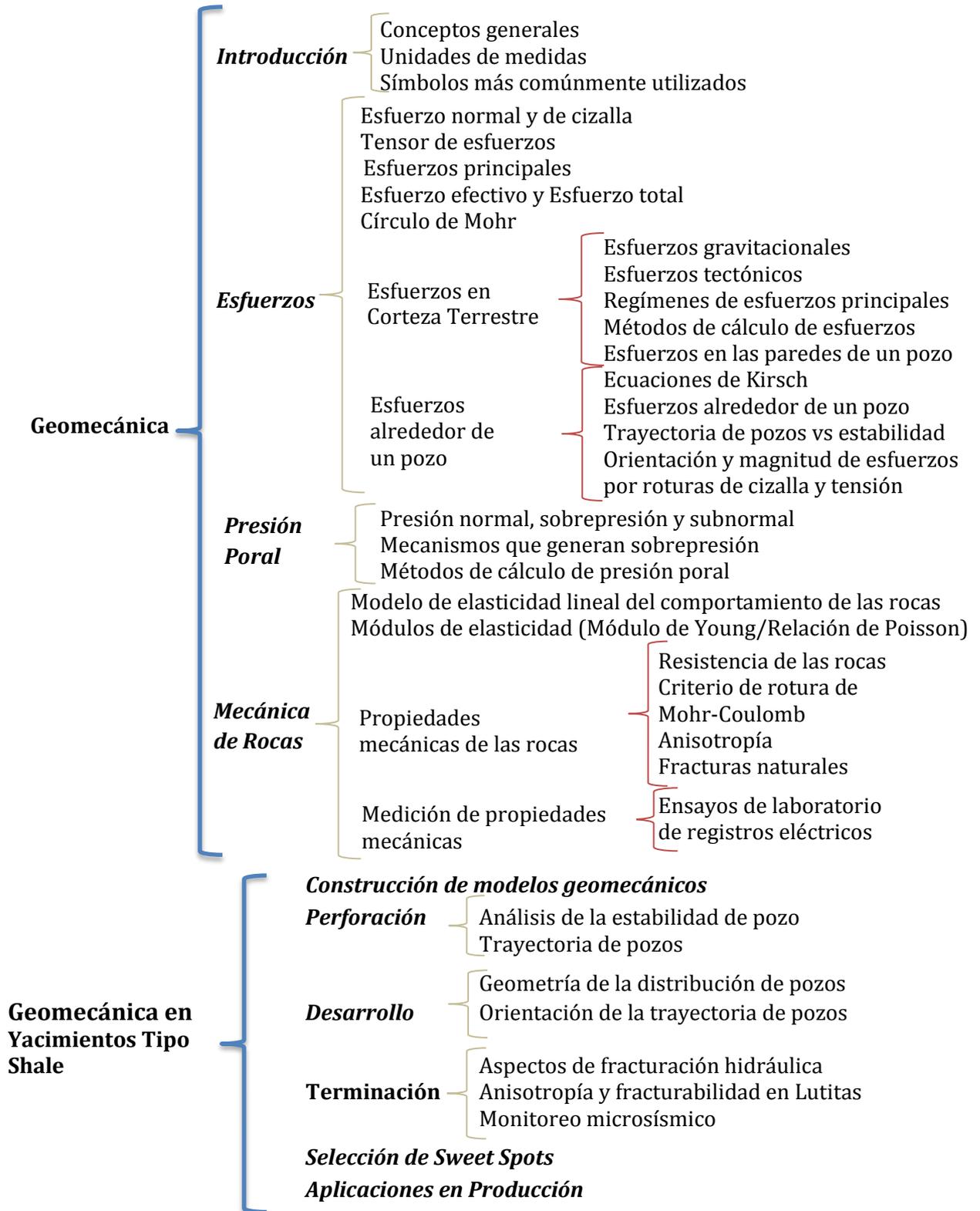


INTRODUCCIÓN

La geomecánica es la disciplina que estudia la respuesta de las rocas a modificaciones en esfuerzos, presión y otros parámetros ambientales. Estos cambios ocurren de forma natural por procesos geodinámicos (tectónica global, erosión, soterramiento, entre otros), y de una manera inducida durante la construcción de obras de ingeniería, tales como túneles, diques, fundaciones, perforaciones, etc.

Durante este módulo, se explicarán los fundamentos básicos de la geomecánica, el impacto que tiene y cómo se la utiliza en la caracterización y optimización de las distintas etapas del desarrollo de Yacimientos Tipo Shale.

ESQUEMA GENERAL / UBICACIÓN TEMÁTICA



DESARROLLO

I. INTRODUCCIÓN

CONCEPTOS GENERALES

La Geomecánica es la disciplina que integra la Mecánica de Rocas, la Geología, la Geofísica y la Petrofísica, para cuantificar las respuestas de las rocas a cambios en: Esfuerzos, presentes en la corteza terrestre; Presión de los Fluidos, que estas rocas contienen, y las Propiedades Mecánicas de las mismas.

Esfuerzos + Presión Poral + Propiedades Mecánicas Rocas
= Modelo Geomecánico Numérico

La Geomecánica es la base de todo buen diseño de perforación de un pozo y de fracturación hidráulica.

En Yacimientos No Convencionales del Tipo Shale, es imprescindible conocer las características geomecánicas no solamente de todos los niveles a perforar, sino especialmente las de la roca generadora/reservorio. De esta forma, se podrá diseñar y realizar con eficiencia tanto la perforación de un pozo, como las fracturas hidráulicas (indispensables para el desarrollo de estos yacimientos).

UNIDADES DE MEDIDA

- Tanto Esfuerzo como Presión son magnitudes que relacionan la fuerza aplicada a una superficie.

$$\text{Esfuerzo / Presión} = F/A \text{ (fuerza/área)}$$

- El **Esfuerzo** se utiliza en cuerpos rígidos **anisotrópicos**, como las rocas, porque actúa de manera diferente en distintas direcciones.

- La **Presión** se usa en materiales **isotrópicos**, como los fluidos, ya que ésta se distribuye de forma homogénea en todas las direcciones.
- La unidad de medida de esfuerzo y presión en el Sistema Internacional es el Pascal (Pa) = N/m² (fuerza de 1 Newton sobre 1 m²)

Pa/m o **MPa/km** (común en la literatura: **psi/ft**)

O en unidades de **densidad**, para relacionar los valores con la densidad del lodo: **g/cm³**, o **g/l** (gramos por litro), o **lpg** (libras por galón, **ppg** en inglés)

Densidad 1.0 g/cm³ (g/cm ³)	=	Gradiente de Presión 0.433 lb.plg².pie (psi/ft)	=	Densidad del Lodo 8.33 lb/gal (lpg ó ppg)
---	---	---	---	--

Factores de Conversión:

Masa: 1 libra = 0.4536 kg
 Longitud: 1 pie = 0.3048 m
 Presión: **1 psi = 6.895 kPa**

SÍMBOLOS MÁS COMÚNMENTE UTILIZADOS

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Esfuerzo principal máximo, intermedio y mínimo

$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$: Esfuerzos efectivos, los que actúan sobre la fase sólida de la roca
 (p.ej. $\sigma_1 - p_o = \sigma'_1$)

S_v, S_{HMAX}, S_{hmin} : Esfuerzos totales ($\sigma'_1 + p_o$)

$\sigma_v, \sigma_{HMAX}, \sigma_{hmin}$: Esfuerzo vertical, horizontal mayor y menor

σ_r, σ_θ : Esfuerzo radial y tangencial en un pozo

τ : Esfuerzo de cizalla

p_o, p_p : Presión poral

$p(r)$: Presión en la dirección radial

MW, p_w : Peso del lodo (Mud Weight), presión en el pozo

E, ν : Módulo de Young, Coeficiente de Poisson



PREGUNTA

¿En qué se utiliza la Geomecánica en general y por qué es imprescindible en el desarrollo de los Yacimientos Tipo Shale?



RESUMEN

Los elementos primordiales de los que se vale la Geomecánica son: Esfuerzos, Presión de Poros y Mecánica de Rocas. De tal manera, tener una base conceptual sólida sobre los mismos es una condición sine qua non para entender el porqué de su utilización en los Yacimientos Tipo Shale. Además, su esencia física nos exige que sepamos cuáles son las unidades en que se miden. También, es muy importante haber conocido los símbolos que se utilizan y que a su vez son de manejo habitual en la industria del petróleo y en la bibliografía en general.

II. ESFUERZOS

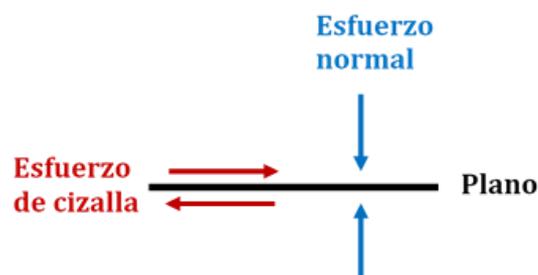
Las rocas en el subsuelo están sujetas a esfuerzos, los cuales influyen fuertemente en todas las etapas del desarrollo de un yacimiento petrolero.

Definición: Esfuerzo es la fuerza por unidad de área transmitida a través de un material. Los esfuerzos consisten de un par de fuerzas iguales y opuestas, actuando sobre el área de una superficie, en una orientación determinada.

$$\text{Esfuerzo (Stress)} = F/A \text{ (fuerza/área)}$$

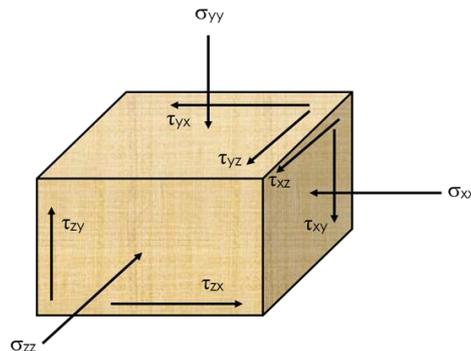
ESFUERZO NORMAL Y DE CIZALLA

Cuando la fuerza actúa perpendicularmente a la superficie hablamos de **Esfuerzo Normal**, si lo hace en forma paralela a la superficie se denomina **Esfuerzo de Cizalla o de Corte**.



TENSOR DE ESFUERZOS

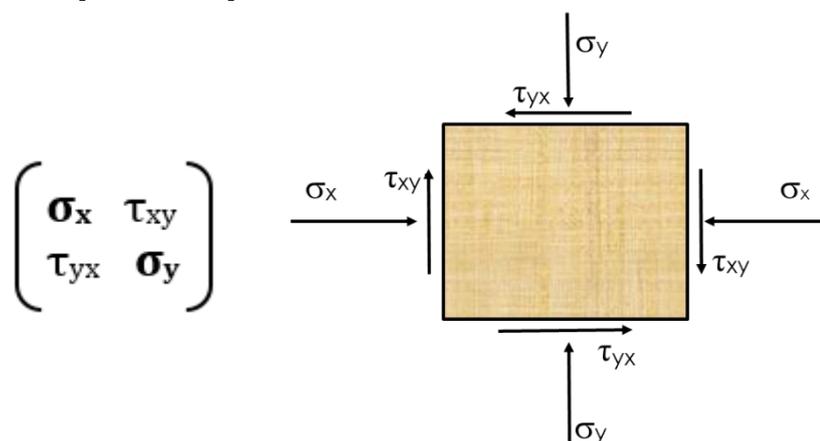
Las rocas en el subsuelo están sujetas a esfuerzos que se distribuyen como una función continuamente variable. Cada elemento infinitesimal de un macizo rocoso se puede modelar como un cubo en un sistema ortogonal de coordenadas x, y, z. En situación de equilibrio, en caras opuestas del cubo, cada esfuerzo posee un esfuerzo contrario y de igual magnitud, por lo que para realizar cálculos se pueden usar solo los esfuerzos que actúan en 3 caras.



Los **esfuerzos normales** (σ), perpendiculares a las caras del cubo, tienden a comprimirlo (esfuerzo a la compresión), o a tirar de él (esfuerzo a la tracción). Los **esfuerzos de cizalla** (τ) actúan paralelos a las caras de los cubos y tienden a deformarlo de manera romboidal. Estas componentes normales y de cizalla del esfuerzo conforman los términos de un **Tensor de Esfuerzos** de segundo orden, por lo que se requiere de nueve valores para describirlo en tres dimensiones. Se puede expresar como la matriz:

$$\begin{pmatrix}
 \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\
 \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\
 \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz}
 \end{pmatrix}$$

Esfuerzos en dos dimensiones (cuerpo bidimensional): tensor de esfuerzos de cuatro componentes, representado por una matriz simétrica:



ESFUERZOS PRINCIPALES

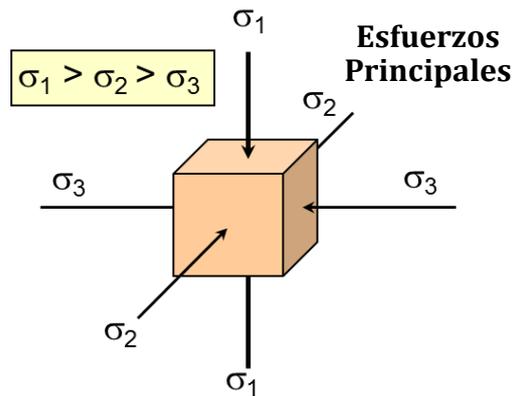
El Tensor de Esfuerzos puede rotarse para llevarlo a un sistema de direcciones principales, de tal manera que los esfuerzos de corte sean nulos.

Aquellos planos que no están sujetos a esfuerzos de corte son Planos Principales ($\tau = 0$). En este caso, los esfuerzos normales a dichos planos se denominan Esfuerzos Principales, que son perpendiculares entre sí, normales a Planos Principales y a superficies libres.

El estado de esfuerzos queda así definido como:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}$$

Esfuerzos de cizalla $\tau = 0$



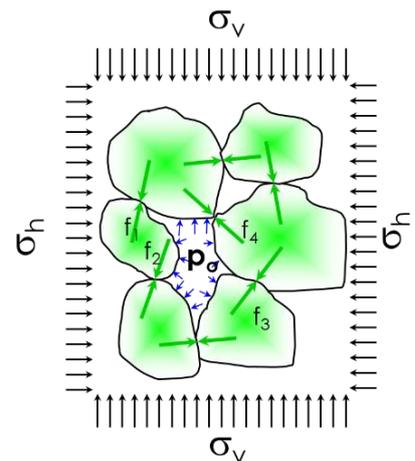
ESFUERZO EFECTIVO Y ESFUERZO TOTAL

- **Esfuerzo Efectivo** (σ'): es la fuerza por área soportada por los componentes sólidos de las rocas.
- **Esfuerzo Total** (σ o S): es la suma del Esfuerzo Efectivo más la Presión Poral.
- **Presión Poral** (p_0): fuerza que ejercen los fluidos en los poros de las rocas.

El esfuerzo vertical total (σ_v), a una cierta profundidad, es la suma de los esfuerzos transmitidos por el contacto de los granos (σ'_v) + la presión poral a dicha profundidad

$$\sigma_v \text{ (o } S) = \sigma'_v + p$$

Esto se conoce como la "Ley del Esfuerzo Efectivo" o "Ley de Terzaghi".





PARA DESTACAR

Los esfuerzos controlan procesos de fracturación, de colapso de revestimientos, de estabilidad de pozos, de producción de yacimientos naturalmente fracturados, de producción de arena, etc. El estado de esfuerzos debe ser determinado rutinariamente en proyectos petroleros. Los esfuerzos se usan para interpretar el comportamiento de los reservorios, en exploración, en predicciones de presión poral, etc.

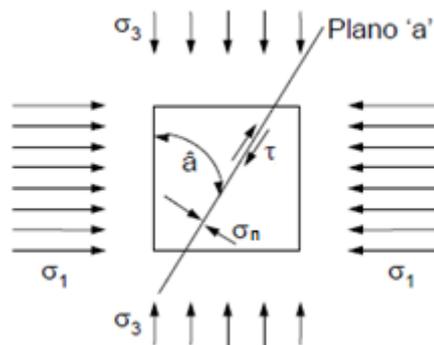


PREGUNTA

¿Por qué es importante conocer la magnitud y orientación de los esfuerzos in situ?

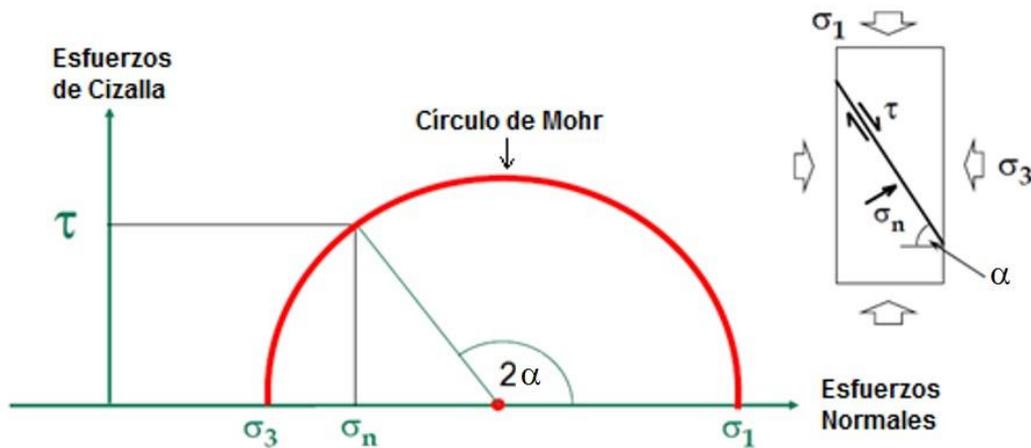
CÍRCULO DE MOHR

El **Círculo de Mohr** es un **método gráfico bidimensional** para **calcular** las magnitudes de los esfuerzos **normales** y de **cizalla**, que actúan sobre **planos específicos**, ubicados a **distintos ángulos** respecto del **esfuerzo principal máximo**.

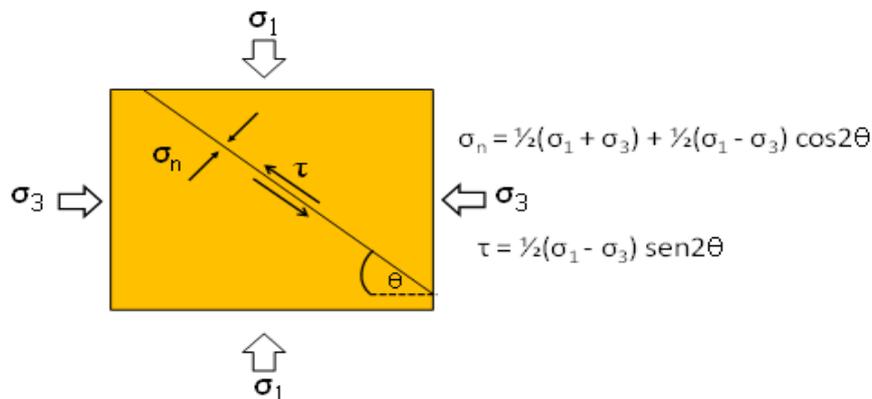


En el **Círculo de Mohr**, los esfuerzos normales se representan en el eje horizontal y el esfuerzo de cizalla en el eje vertical. Un ángulo α en la realidad aparece como un ángulo 2α en el Círculo de Mohr y los planos en diferentes ángulos (medidos con respecto al plano en el que actúa σ_1) serán sometidos a diferentes esfuerzos normales σ_n (en el rango entre σ_3 y σ_1), y a diferentes esfuerzos de cizalla τ (en el rango de 0 a $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, con τ máximo actuando a 45° de σ_1 a σ_3).

Ya que σ_1 es el único esfuerzo que actúa en su plano, y que σ_3 es el único esfuerzo que actúa sobre el suyo (es decir que no hay esfuerzos tangenciales que actúen en estos planos), los mismos se conocen como **esfuerzos principales**. Como σ_1 es mayor que cualquiera de los esfuerzos normales actuando sobre el cuerpo, éste se conoce como **esfuerzo principal mayor** o **máximo**. Del mismo modo, como σ_3 tiene el menor valor, se denomina **esfuerzo principal menor** o **mínimo**. Para una situación en 3 dimensiones, habrá un tercer esfuerzo principal o **esfuerzo principal intermedio** σ_2 .



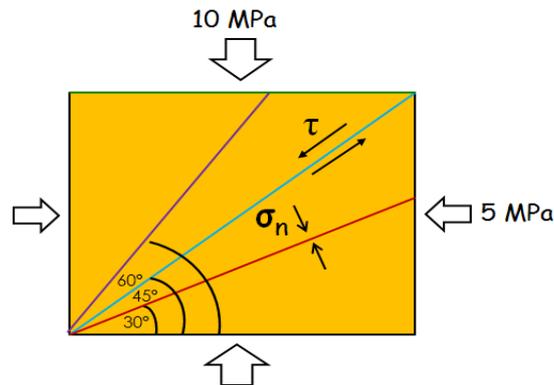
Cálculo de esfuerzos normales y de cizalla



ACTIVIDAD 8

Variación del esfuerzo normal y de cizalla usando el Círculo de Mohr:

Un cubo está sometido a un esfuerzo de 10 MPa en las caras superiores e inferiores y a 5 MPa en las caras izquierda y derecha. ¿Cuánto es el esfuerzo normal y de cizalla en la cara superior y en planos a 30°, 45° y 60° de la horizontal?



RESUMEN

A partir de los esfuerzos es que podemos dimensionar las fuerzas que actúan sobre las rocas en el subsuelo. Esfuerzos “normales y de cizalla”, el “tensor” de esfuerzos, esfuerzos “principales” y esfuerzo “total y efectivo”, son conceptos de los que nos vamos a servir continuamente en el desarrollo de este módulo. En este capítulo, se identificó cada uno de estos términos referidos a esfuerzos y, por último, se introdujo el método gráfico mediante el cual nos valemos para realizar ciertos cálculos sobre esfuerzos, el Círculo de Mohr.

ESFUERZOS EN LA CORTEZA TERRESTRE

En la corteza terrestre, los esfuerzos están principalmente generados por carga gravitacional y por efecto de la **Tectónica de Placas**.

Estos esfuerzos pueden estar modificados localmente por vulcanismos, sismos, diapirismo salino, etc.

Actividades como la producción e inyección de fluidos ocasionan cambios en los esfuerzos locales.

Esfuerzos inducidos por gravedad

Las fuerzas gravitacionales comprenden las cargas topográficas, las cargas debidas a contrastes laterales de densidad y al equilibrio de flotación entre la litosfera y la astenosfera o **isostasia**. Si aumenta la masa de la litosfera, ésta tiende a hundirse en el manto. Si disminuye, tiende a ascender.

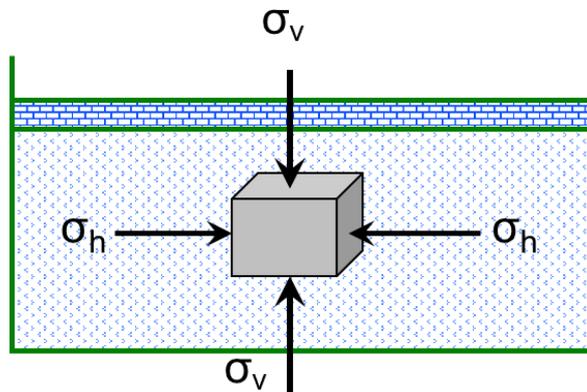
Isostasia

La litosfera, la capa rígida superficial de la Tierra, descansa sobre el resto del manto que, aunque sólido, presenta un comportamiento plástico.

El grosor de la litosfera no es uniforme. Las zonas elevadas se corresponden, por debajo, con unas "raíces" que se hunden en la astenosfera.



Esfuerzo vertical y horizontal:



σ_v Esfuerzo Vertical Litostático

σ_h Esfuerzos Horizontales

Esfuerzos Tectónicos

Los esfuerzos tectónicos predominan:

- Cerca de los márgenes de placas tectónicas activas, ya que el movimiento entre las mismas tiene influencia directa sobre la magnitud y orientación de los esfuerzos.
- Alrededor de las cadenas montañosas.

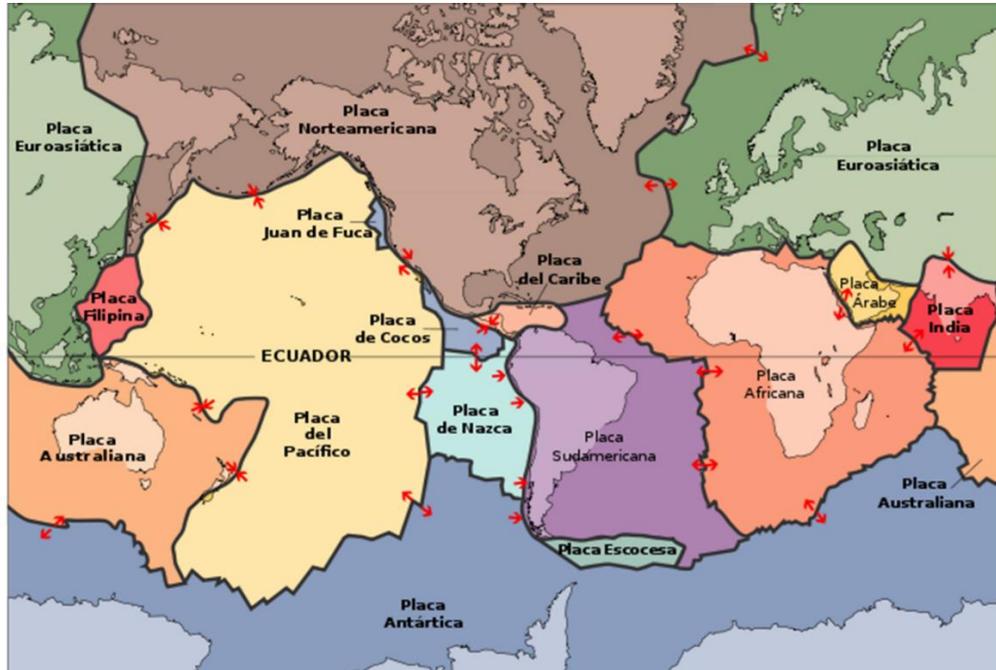
En zonas alejadas de los márgenes de placas y de las montañas, hay otros factores más importantes que los esfuerzos tectónicos.

Tectónica de Placas:

La teoría de la deriva continental fue propuesta por Alfred Wegener en 1912, quien fue el primero en elaborar una explicación coherente sobre el desplazamiento de los continentes.

La Tectónica de Placas explica la estructura y la dinámica de la superficie terrestre. Establece que la litosfera (la porción superior más fría y rígida de la Tierra) está

fragmentada en una serie de grandes placas y otras menores, o microplacas, que se desplazan sobre la astenosfera.



Placas tectónicas, bordes y direcciones de movimiento



PREGUNTA

¿Cuáles son los procesos más importantes de generación de Esfuerzos en la corteza terrestre?

Regímenes de Esfuerzos Principales

En 1951, Anderson desarrolló un esquema de clasificación para describir las magnitudes relativas de los esfuerzos principales en la corteza terrestre. La misma se basa en que el esfuerzo vertical puede ser tanto el de mayor magnitud como el intermedio, o el menor. Esto se refleja en los diferentes tipos de fallas: normales, inversas y de rumbo.

Régimen Extensional, fallas Normales

$$\sigma_1 = \sigma_v > \sigma_2 = \sigma_H > \sigma_3 = \sigma_h$$

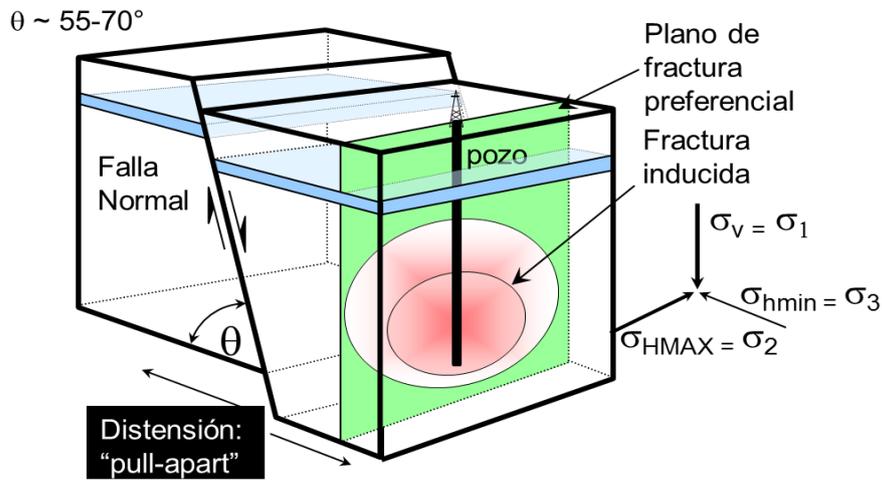
Régimen Transcurrente, fallas de Rumbo

$$\sigma_1 = \sigma_H > \sigma_2 = \sigma_v > \sigma_3 = \sigma_h$$

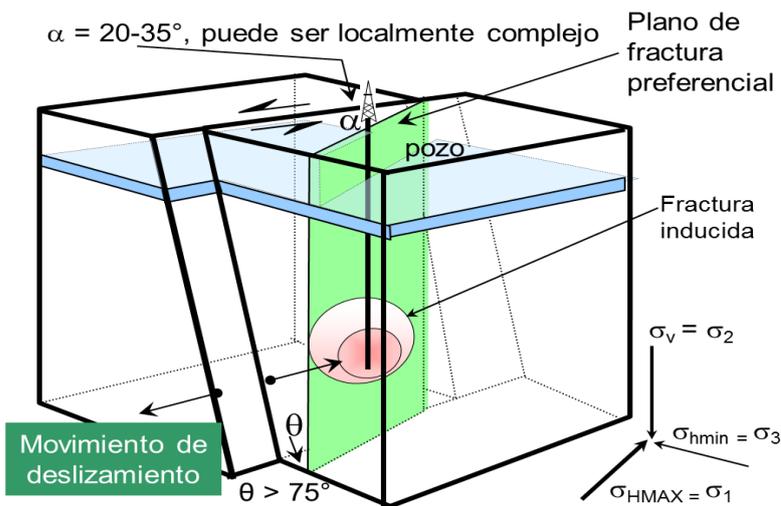
Régimen Compresivo, fallas Inversas

$$\sigma_1 = \sigma_H > \sigma_2 = \sigma_h > \sigma_3 = \sigma_v$$

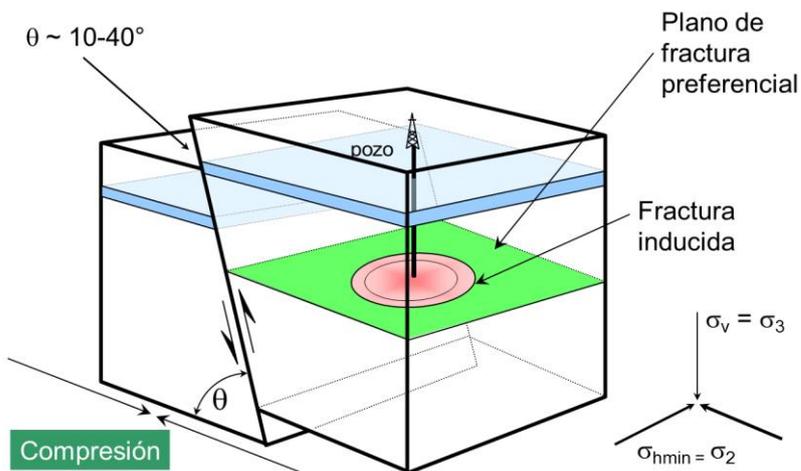
RÉGIMEN EXTENSIONAL: FALLAS NORMALES



RÉGIMEN TRANSCURRENTE: FALLAS DE RUMBO



RÉGIMEN COMPRESIVO: FALLAS INVERSAS



Basándonos en la inferencia geológica y haciendo uso de los Regímenes de Esfuerzos de Anderson, se puede deducir la “relación de magnitud” entre los esfuerzos principales en un área. En un pozo exploratorio, esto nos va a ayudar en la elaboración de un programa de perforación preliminar.

En general, los pozos verticales serán progresivamente menos estables y, por lo tanto, necesitarán una mayor densidad del lodo, a medida que el régimen va cambiando de extensivo a transcurrente y a compresivo.



PREGUNTA

¿Cuáles son los regímenes de esfuerzos principales y sus magnitudes relativas, para qué podemos utilizarlos y qué influencia ejercen en la perforación de un pozo?

Métodos de Cálculo de Esfuerzos

Métodos directos

La magnitud del **esfuerzo vertical** σ_v se puede obtener usando los datos de registros eléctricos de densidad, que se pueden calibrar con datos de densidad en coronas.

El valor del **esfuerzo horizontal mínimo** σ_{hmin} se obtiene de Fracturas Hidráulicas, o de Pruebas de Estanqueidad de Pozo (Leak Off Tests).

Métodos indirectos (estimativos)

La magnitud del **esfuerzo vertical** σ_v se puede calcular utilizando fórmulas empíricas: ecuación de Gardner (del registro sísmico), o el modelo de Miller.

La magnitud del **esfuerzo horizontal máximo** (σ_{hMAX}) se puede estimar por medio del Polígono de Esfuerzos.

Mediante las imágenes de pozo, que son registros eléctricos con cable (“breakouts”, fracturas inducidas).

Estimación geológica (Regímenes de Esfuerzos Principales)

Métodos por correlación de bases de datos

Determinación del Esfuerzo Vertical

La magnitud del esfuerzo vertical σ_v a cierta profundidad z es aproximadamente igual al promedio de las densidades de las rocas desde la superficie hasta dicha profundidad ($\bar{\rho}$), por la aceleración de la gravedad (g).

$$\sigma_v = \bar{\rho} z g$$

Ecuación de Gardner:

$$\rho = c (10^6 / \Delta t)^e$$

c y e : parámetros de ajuste.

Modelo de Miller

$$\rho = \rho_{matriz}(1 - \phi) + \rho_w \phi$$

$$\phi = \phi_a + \phi_b e^{k(\text{prof})^{1/n}}$$

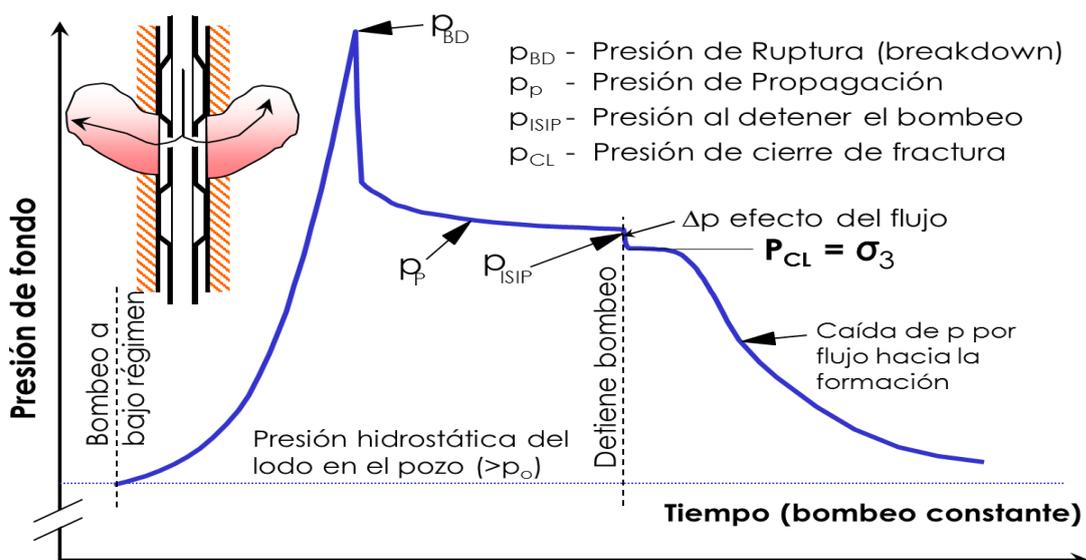
Determinación Directa del Esfuerzo Horizontal Mínimo

La magnitud de σ_3 (o σ_{hmin}) se puede obtener de:

- **Fracturas Hidráulicas**

La fracturación hidráulica consiste en el bombeo de un fluido viscoso a un intervalo aislado del pozo, con caudales y presiones suficientes como para fracturar la roca.

Ciclo básico de Fractura Hidráulica



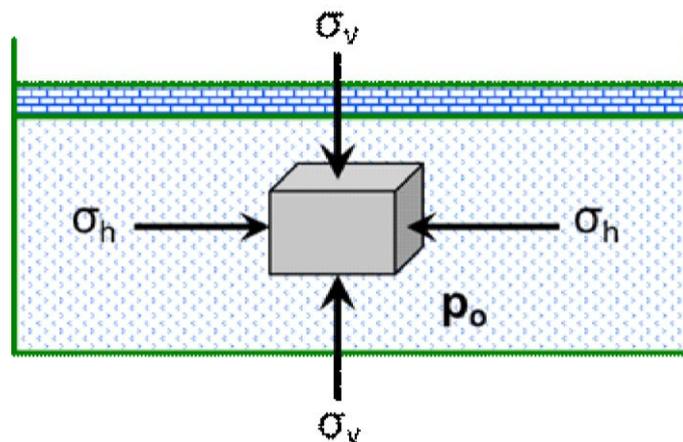
- **Pruebas de Estanqueidad de Pozo** (Leak-Off Test, LOT, XLOT) para σ_3 (σ_{hmin})

El Leak-Off Test (LOT) es una prueba de resistencia a la fractura de las rocas ubicadas por debajo del zapato de una cañería, indicándonos básicamente la Máxima Densidad de Lodo con la que se puede perforar una nueva sección de pozo. Este método es una práctica común en la mayoría de los pozos exploratorios y de desarrollo.

Los datos de FH y de XLOT se obtienen del comportamiento de la curva de presión.

Determinación Teórica del Esfuerzo Horizontal Mínimo

Los esfuerzos horizontales se generan por la tendencia de los sedimentos a deformarse lateralmente debido al peso de los sedimentos suprayacentes (cuencas no tectónicas).



- σ_v Esfuerzo Vertical Litostático
- σ_h Esfuerzos Horizontales
- p_o Presión Poral

En una **cuenca no tectónica**, y asumiendo que las rocas se comportan **elásticamente**, el menor valor de σ_h será:

$$\sigma'_h = \sigma'_v \cdot [\nu / (1 - \nu)], \text{ usando esfuerzos efectivos}$$

En donde ν = Coeficiente de Poisson (constante elástica)

Expresando los esfuerzos efectivos como esfuerzos totales:

$$[\sigma_h - p_o] = [\sigma_v - p_o] \cdot [\nu / (1 - \nu)]$$

Esta fórmula es aplicable en:

- Sedimentos no consolidados blandos
- Sedimentos relativamente jóvenes
- Áreas sin tectónica compresiva

**¡IMPORTANTE!**

Esta fórmula provee un **límite inferior** estimativo de σ'_h

**ACTIVIDAD 9**

Cálculo teórico del esfuerzo horizontal mínimo (σ_h) en una cuenca no tectónica, a partir del esfuerzo vertical y el Coeficiente de Poisson (Unidades: m y MPa).

Ejercicio:

Cálculo del esfuerzo horizontal total mínimo para arcilla y arena (expresar en unidades de presión, MPa):

Datos:

Profundidad (Z) = 1830 m

Gradiente hidrostático (p_o) = 1.04 g/cm³

Densidad litostática promedio = 2.25 g/cm³

Poisson de arcilla $\nu = 0.42$

Poisson de arena $\nu = 0.19$

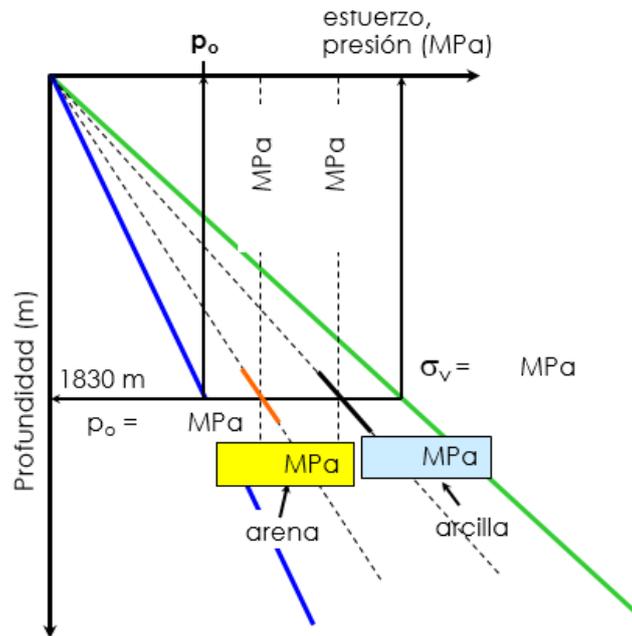
Asumiendo que $\sigma'_h = \sigma'_v * [\nu / (1 - \nu)]$

Esfuerzo Vertical Total (σ_v) = Z * Densidad Litostática Promedio * Conversión (0.00981 MPa/m)

Presión Poral (p_o) = Z * Gradiente Hidrostático * Conversión (0.00981 MPa/m)

Esfuerzo Horizontal Efectivo (σ'_h) = Esfuerzo Vertical Efectivo * **$[\nu / (1 - \nu)]$**

Esfuerzo Horizontal Total (σ_h) = Esfuerzo Horizontal Efectivo + Presión Poral



Cálculo de σ_3 por “Ballooning”

Se denomina “ballooning” al comportamiento particular de un pozo al ser perforado. Si la presión hidrostática (sin circulación), que ejerce la densidad del lodo, es levemente menor que el gradiente de presión de fractura de alguna de las formaciones expuestas en un pozo, al circular, y debido al efecto de las pérdidas de carga, la presión del lodo aumenta hasta un valor denominado Densidad de Circulación Equivalente (DCE). Si el DCE supera la magnitud de σ_3 (~ gradiente de fractura), se puede generar la apertura de fisuras, detectándose una pérdida de lodo hacia la formación. Al detener el bombeo, se vuelve a la presión hidrostática, las fisuras se cierran, expulsando el fluido que las mantenían abiertas, registrándose un incremento de volumen de lodo en superficie. De esta manera, se infiere que el valor de σ_3 corresponderá a una magnitud cercana al DCE.

Polígono de Esfuerzos

La **magnitud del esfuerzo horizontal máximo es la componente del tensor de esfuerzos más difícil de determinar**, ya que no se puede medir directamente, por lo que hay que inferir su magnitud a partir de modelos matemáticos.

El Polígono de Esfuerzos de Moos y Zoback (1990) define el lugar geométrico de todas las posibles combinaciones de magnitudes del esfuerzo horizontal máximo y mínimo, que pueden darse en la naturaleza a una cierta profundidad, sujeto a un régimen de esfuerzos según la clasificación de Anderson,

Régimen Normal:

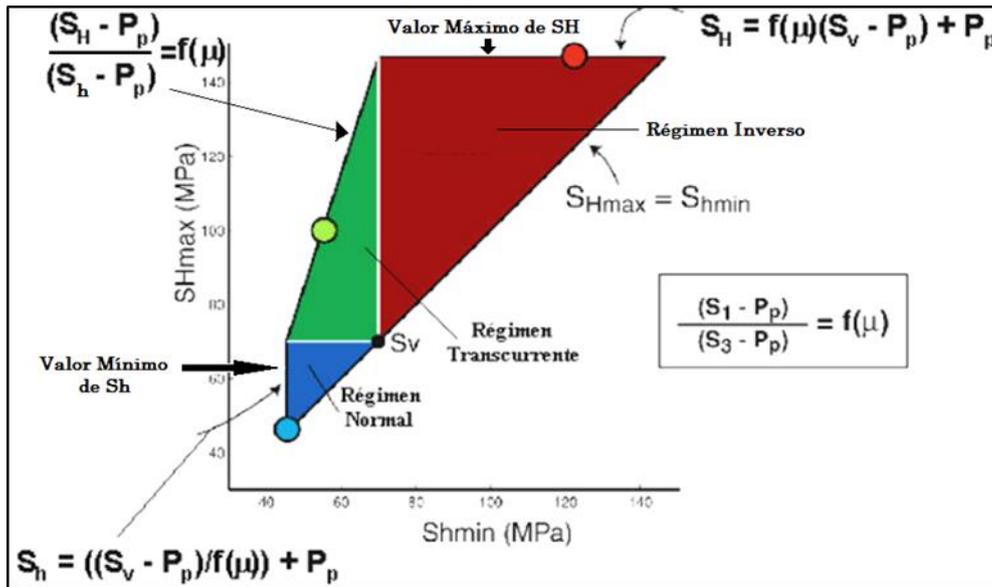
$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{(S_H - P_p)}{(S_V - P_p)} = \{[(\mu^2 + 1)^{0.5}] + \mu\}^2$$

$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{(S_H - P_p)}{(S_h - P_p)} = \{[(\mu^2 + 1)^{0.5}] + \mu\}^2$$

Régimen Inverso:

Régimen Transcurrente:
$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{(S_v - P_p)}{(S_h - P_p)} = \{[(\mu^2 + 1)^{0.5}] + \mu\}^2$$

En donde la rotura de la roca está definida por la envolvente de Mohr-Coulomb o el coeficiente de fricción (μ) y una presión de poros conocida (P_p).



Polígono de Esfuerzos



PREGUNTA

¿Qué métodos se pueden utilizar para calcular la magnitud de los Esfuerzos in situ?



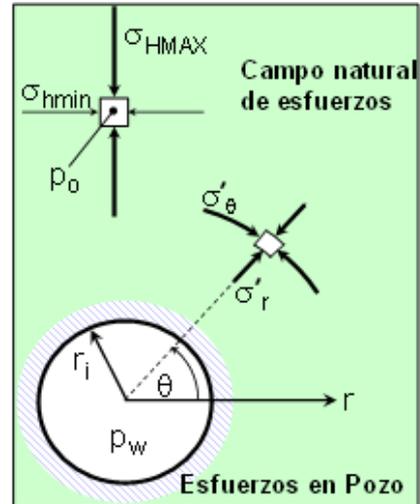
RESUMEN

En este capítulo, hemos visto que en la corteza terrestre los esfuerzos están originados principalmente por gravedad (carga litostática) y por efecto del movimiento e interacción entre las placas tectónicas. Se esbozó el concepto de la Teoría de la Deriva Continental que explica cómo se ha ido modificando la superficie de la Tierra con el tiempo y por qué se presenta en la actualidad tal como es.

También vimos los tipos de Regímenes de Esfuerzos Principales de Anderson que, por ejemplo, nos ayudan a predecir la relación de magnitud del campo de esfuerzos, a partir del tipo de falla presente. Además, se describieron métodos para el cálculo de la magnitud de los esfuerzos in situ.

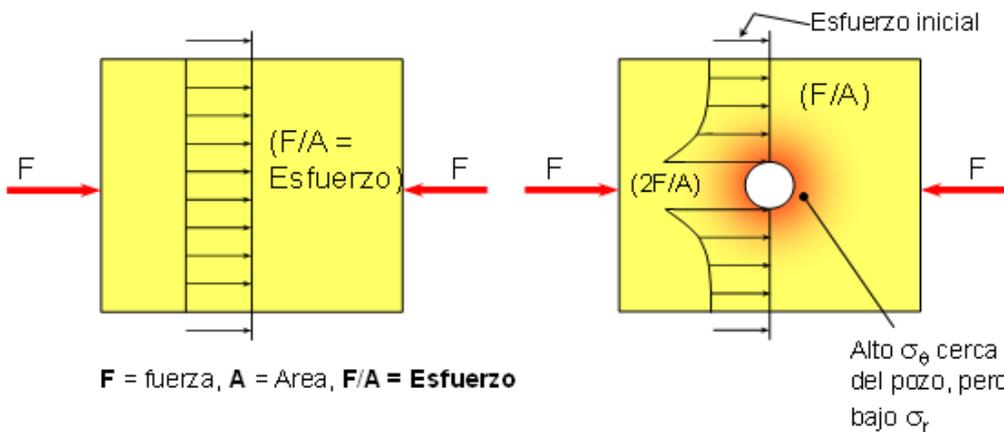
ESFUERZOS ALREDEDOR DE UN POZO

Al realizarse una perforación, el campo natural de esfuerzos in-situ se redistribuye en las paredes del pozo, generando **esfuerzos tangenciales (σ_θ)** sobre las mismas. La densidad del lodo origina a su vez un **esfuerzo radial (σ_r)**.



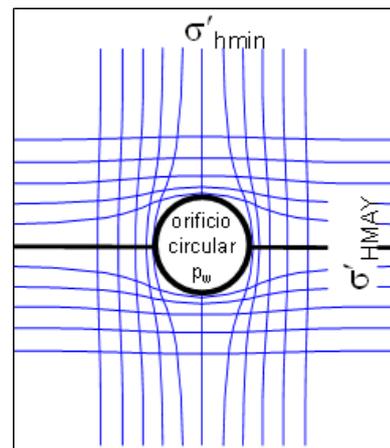
Esfuerzos en las Paredes de un Pozo

Al hacer un orificio en un plano sometido a esfuerzos, se induce una concentración de esfuerzos alrededor de dicho orificio



Redistribución de Esfuerzos:

- El esfuerzo perdido genera una concentración o "arco de esfuerzos" alrededor del pozo, para redistribuir los esfuerzos originales
- Como la presión del lodo en el pozo es menor que los esfuerzos totales, el exceso de esfuerzo debe ser resistido por las rocas cerca del pozo.



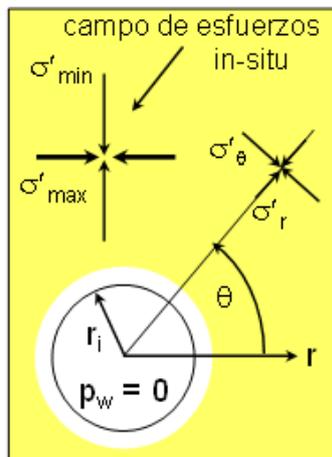
Ecuaciones de "Kirsch" - Estado de esfuerzos alrededor de un orificio:

$$\sigma'_r = \frac{(\sigma'_{\max} + \sigma'_{\min})}{2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) + \frac{(\sigma'_{\max} - \sigma'_{\min})}{2} \left(1 - \frac{4r_i^2}{r^2} + \frac{3r_i^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma'_\theta = \frac{(\sigma'_{\max} + \sigma'_{\min})}{2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma'_{\max} - \sigma'_{\min})}{2} \left(1 + \frac{3r_i^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{(\sigma'_{\max} - \sigma'_{\min})}{2} \left(1 + \frac{2r_i^2}{r^2} - \frac{3r_i^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

Siempre $r > r_i$ y θ es tomado en sentido anti horario desde σ_{\max}



Esfuerzos en las paredes del pozo (@ $r = r_i$):

- Esfuerzo **tangencial máximo** en la pared del pozo:
 $\sigma_{\theta\max} = 3 \cdot \sigma_{\max} - \sigma_{\min} - p_o$ (esfuerzo total)
 $\sigma'_{\theta\max} = 3 \cdot \sigma'_{\max} - \sigma'_{\min}$ (esfuerzo efectivo)
- Esfuerzo **tangencial mínimo** en la pared del pozo:
 $\sigma_{\theta\min} = 3 \cdot \sigma_{\min} - \sigma_{\max} - p_o$ (esfuerzo total)
 $\sigma'_{\theta\min} = 3 \cdot \sigma'_{\min} - \sigma'_{\max}$ (esfuerzo efectivo)

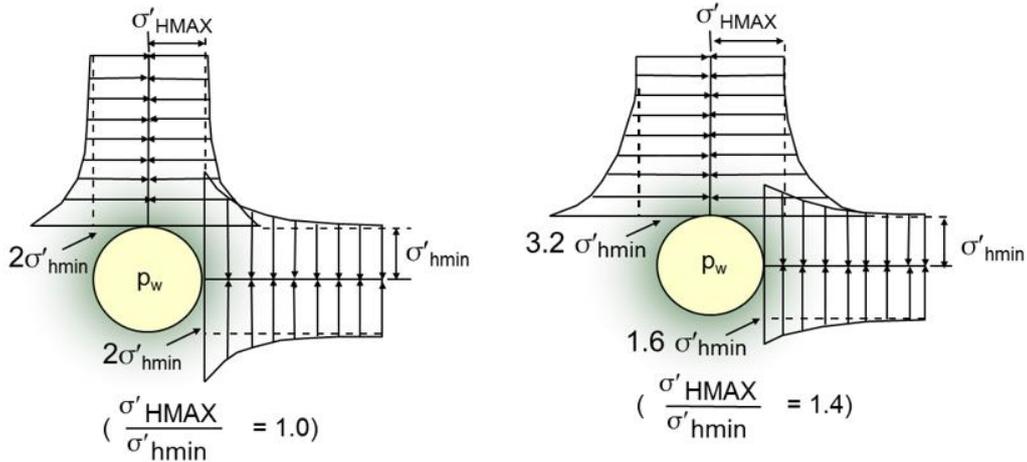
Esfuerzos en un pozo (para $\sigma_{h\min} = \acute{o} \neq \sigma_{H\max}$):

- Gráficos del esfuerzo tangencial efectivo σ'_θ

Se calcula con las ecuaciones de Kirsch en las direcciones de los esfuerzos principales.

$$\sigma'_{\theta}]_{\max} = 3 \cdot \sigma'_{H\max} - \sigma'_{h\min}$$

$$\sigma'_{\theta}]_{\min} = 3 \cdot \sigma'_{h\min} - \sigma'_{H\max}$$

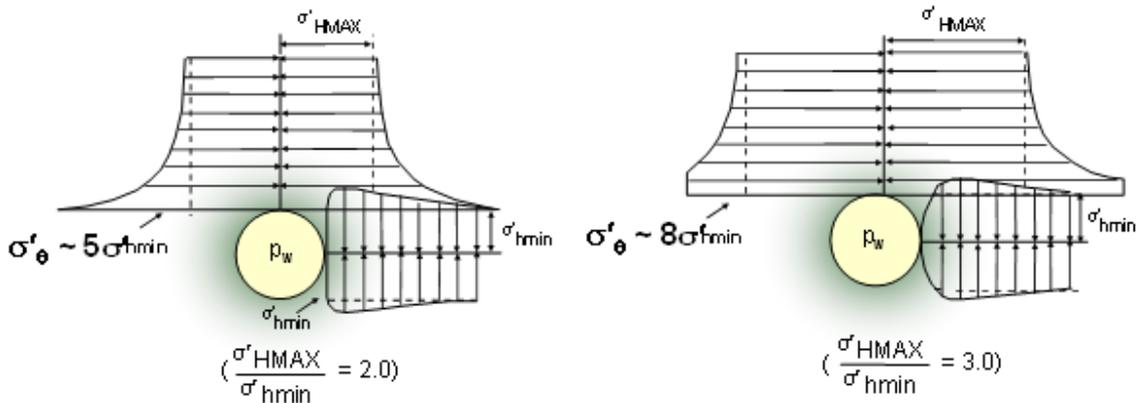


La situación se torna peligrosa cuando existe una **diferencia acentuada de magnitud entre los esfuerzos que actúan sobre las paredes de un pozo**. Esto genera altos valores de σ'_{θ} en la dirección de σ_{hmin} y bajos valores de σ'_{θ} en la dirección de σ_{HMAX} .

Esfuerzos in situ σ'_{hmin} , σ'_{HMAX} , SON: $\sigma_{hmin} - p_o$, $\sigma_{HMAX} - p_o$
 Asumiendo la presión en el pozo p_w igual que p_o

Casos de Alta Anisotropía ($\sigma_{HMAX} \gg \sigma_{hmin}$):

Zonas con esfuerzos tectónicos (fajas plegadas, cerca de límites entre placas tectónicas, etc.).



Cuando la anisotropía es grande, la pared del pozo en la dirección de σ_{HMAX} está en tensión, por lo que se pueden inducir fracturas, mientras que en la dirección de σ_{hmin} está en compresión generando derrumbes debido a la rotura por cizalla de las rocas en las paredes del pozo (se asume que la presión del lodo p_w en el pozo es igual a la presión poral p_o).



¡PARA DESTACAR!

Un pozo genera esfuerzos tangenciales grandes y esfuerzos radiales pequeños.

A mayor $\sigma_{HMAX} / \sigma_{hmin}$, mayor σ'_{θ} en la dirección de σ_{hmin} , y menor σ'_{θ} en la dirección de σ_{HMAX}

Si ambos **esfuerzos horizontales son iguales** y el peso del lodo es igual a la presión poral:

En la pared del pozo:

$$\sigma'_{\theta} = 2\sigma'_h \quad \text{y} \quad \sigma'_r = 0$$

- Si la anisotropía $\sigma_{HMAX} - \sigma_{hmin}$ es grande, σ'_{θ} aumenta y σ'_r no varía mucho.
- Estos esfuerzos de cizalla son lo que generan derrumbes por rotura de las rocas.
- σ_{θ} es el esfuerzo tangencial paralelo a la pared del pozo
- La magnitud de σ_{θ} está afectada por:
 - los esfuerzos in situ,
 - el peso del lodo (MW) y la eficiencia del revoque del lodo,
 - temperatura y comportamiento de la roca.
 - valores **Altos de σ_{θ}** implican inestabilidad,
 - valores **Bajos de σ_{θ}** pueden inducir fracturas.

Trayectoria de Pozos vs Estabilidad

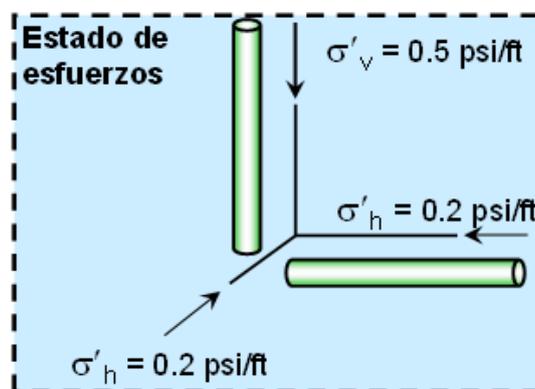
La trayectoria de los pozos, en relación con el régimen y orientación del campo de esfuerzos principales, nos va a indicar el grado de inestabilidad potencial de las rocas en las paredes del orificio.

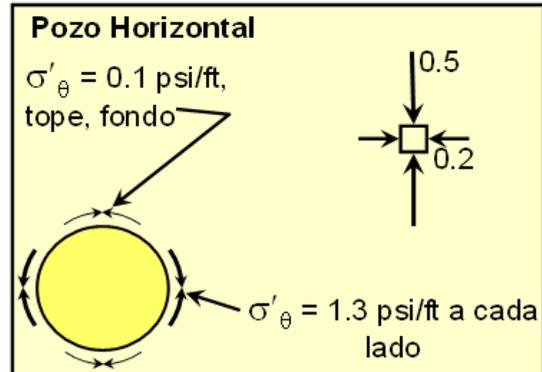
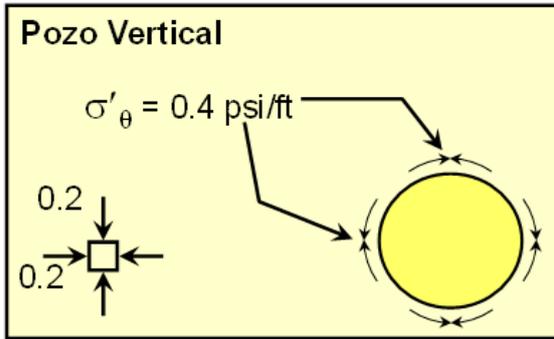
Sistemas no-tectónicos ($\sigma_{hmin} \sim \sigma_{HMAX}$): los pozos verticales están sujetos a esfuerzos de cizalla menores ($\sigma'_{\theta} = 2\sigma'_h$). Son generalmente más estables que los horizontales.

Ejemplo numérico:

Si $\sigma_v = 0.9$ psi/ft, $\sigma_h = 0.6$ psi/ft, $p_o = 0.4$ psi/ft (o sea que $\sigma_v = \sigma_1$, $\sigma_h = \sigma_2$ y σ_3)

$$\sigma'_v (\sigma_v - p_o) = 0.5 \text{ psi/ft} \quad \text{y} \quad \sigma'_h (\sigma_h - p_o) = 0.2 \text{ psi/ft}$$





En un pozo **vertical**, los esfuerzos tangenciales (σ'_θ) serán iguales en los 360° de la circunferencia del orificio y, en este caso, con un valor de 0.4 psi/ft ($2 \cdot 0.2$).

$$\sigma'_\theta = 2\sigma'_h$$

En un pozo **horizontal**, los esfuerzos tangenciales variarán entre 1.3 psi/ft a cada lado del orificio ($\sigma'_{\theta\text{max}} = 3\sigma'_v - \sigma'_h$), hasta 0.1 psi/ft en el tope y fondo ($\sigma'_{\theta\text{min}} = 3\sigma'_h - \sigma'_v$).

$$\sigma'_{\theta\text{max}} = 3 \cdot \sigma'_{\text{HMAX}} - \sigma'_{\text{hmin}}$$

$$\sigma'_{\theta\text{min}} = 3 \cdot \sigma'_{\text{hmin}} - \sigma'_{\text{HMAX}}$$

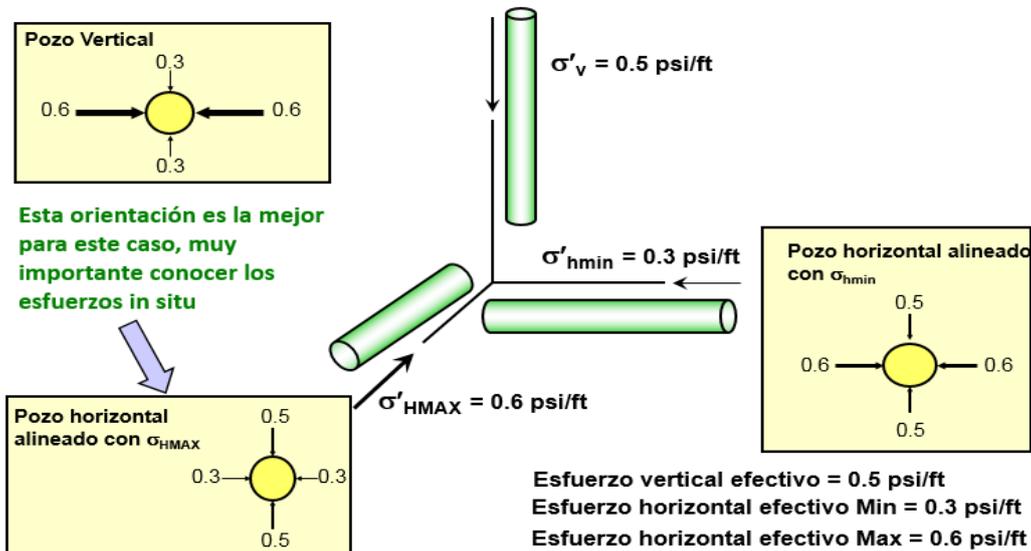
Sistemas con esfuerzos tectónicos ($\sigma_{\text{hmin}} \neq \sigma_{\text{HMAX}}$): En una cuenca con tectonismo, es esencial *cuantificar la magnitud de los esfuerzos* para decidir la mejor trayectoria.

Ejemplo numérico:

Si $\sigma_v = 0.9 \text{ psi/ft}$, $\sigma_{\text{HMAX}} = 1.0 \text{ psi/ft}$, $\sigma_{\text{hmin}} = 0.7 \text{ psi/ft}$, y $p_o = 0.4 \text{ psi/ft}$
(o sea que: $\sigma_{\text{HMAX}} = \sigma_1$, $\sigma_v = \sigma_2$ y $\sigma_{\text{hmin}} = \sigma_3$)

Esfuerzos Efectivos:

$\sigma'_v (\sigma_v - p_o) = 0.5 \text{ psi/ft}$, $\sigma'_{\text{HMAX}} (\sigma_{\text{HMAX}} - p_o) = 0.6 \text{ psi/ft}$, $\sigma'_{\text{hmin}} (\sigma_{\text{hmin}} - p_o) = 0.3 \text{ psi/ft}$



Estabilidad de pozo con diferentes trayectorias. Profundidad de investigación: 1500 m

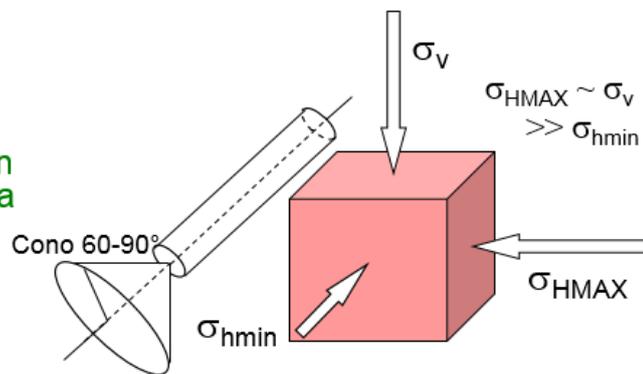
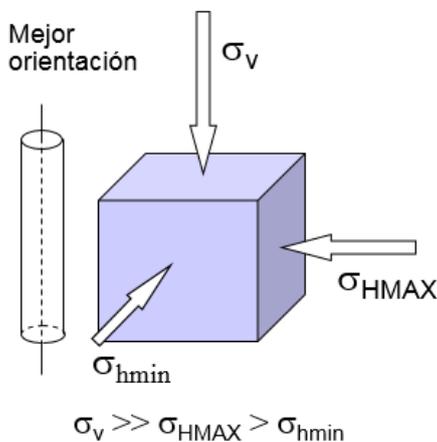
No.	Configuración del pozo	Esfuerzo Tangencial Máximo ($\sigma_{\theta MAX}$)		Esfuerzo Tangencial Mínimo ($\sigma_{\theta min}$)	
		Gradiente (psi/pie)	Magnitud (psi)	Gradiente (psi/pie)	Magnitud (psi)
1	Vertical / Paralelo a σ_v	1.5	7382	0.3	1476
2	Horizontal / Paralelo a σ_{HMAX}	1.2	5905	0.4	1968
3	Horizontal / Paralelo a σ_{hmin}	1.3	6396	0.9	4428

Con estos valores de los esfuerzos in situ, la orientación más estable respecto de la rotura por cizalla, es un pozo con una trayectoria paralela al **esfuerzo horizontal máximo**, mientras que un pozo **vertical** es el más inestable (tanto en relación a la rotura por cizalla como a la posibilidad de fractura por tensión).

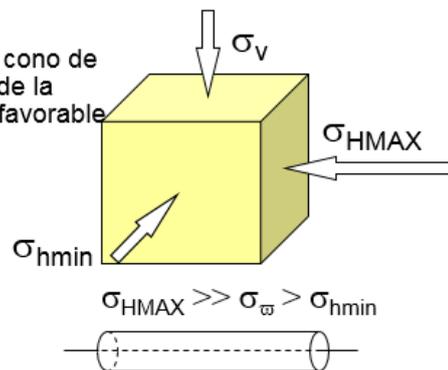
Otro factor fundamental a tener en cuenta es el análisis de Mecánica de Rocas, para conocer la resistencia a la rotura por cizalla (derrumbes) y la resistencia a la tensión (fracturas inducidas).

También hay que evaluar la presencia de fracturas naturales, si las rocas poseen fisilidad (lutitas), etc.

En general, la mejor orientación es aquella en la que es menor la diferencia entre los esfuerzos perpendiculares al eje



Perforar en un cono de 60° ($\pm 30^\circ$) desde la dirección más favorable





PREGUNTA

¿Qué sucede con los esfuerzos in situ en las paredes de una perforación y cuál es la trayectoria del pozo más estable en relación con la orientación de estos esfuerzos?

Orientación y Magnitud de Esfuerzos por Roturas de Cizalla y Tensión

Orientación de los Esfuerzos

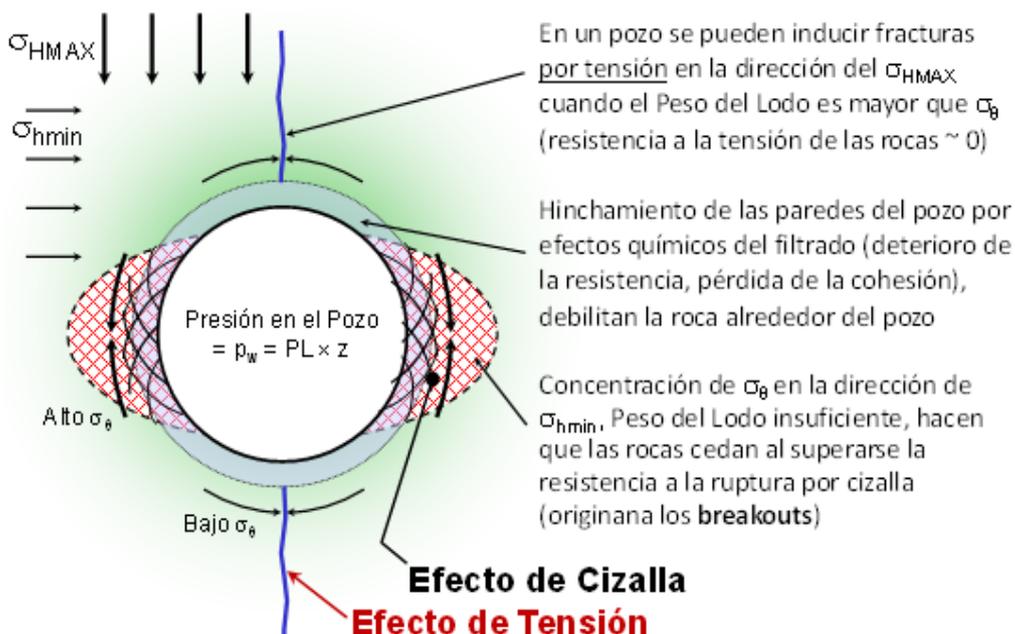
Cuando un pozo se perfora en un medio elástico, homogéneo e isótropo, los esfuerzos alrededor del pozo se reorganizan.

En el caso de un pozo vertical, alineado al eje principal de esfuerzos, el esfuerzo tangencial máximo ocurre en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo, mientras que el esfuerzo tangencial mínimo se localiza en la orientación del esfuerzo horizontal máximo.

Cuando el esfuerzo tangencial excede la resistencia a la compresión de la roca (UCS), la parte del pozo en compresión se deforma por cizalla y se generan derrumbes. Esto sucede en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo (a 90° del esfuerzo horizontal máximo).

Si el esfuerzo tangencial pasa al dominio de **tensión** y excede la resistencia a la tensión de la roca, se pueden inducir fracturas, las que se orientan paralelas a la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Tanto los derrumbes, como las fracturas inducidas, generados por anisotropía de esfuerzos en las paredes de un pozo, proporcionan información sobre la orientación y la magnitud de los esfuerzos.

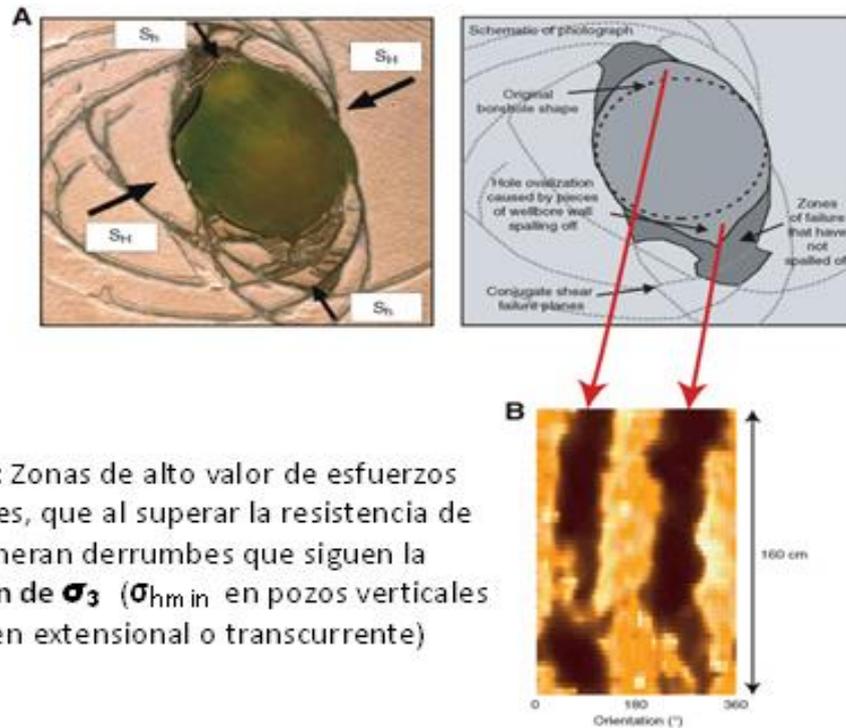
En la siguiente figura se pueden observar esquemáticamente dichos efectos.



Identificación de la Orientación de Esfuerzos por Registros de Imágenes

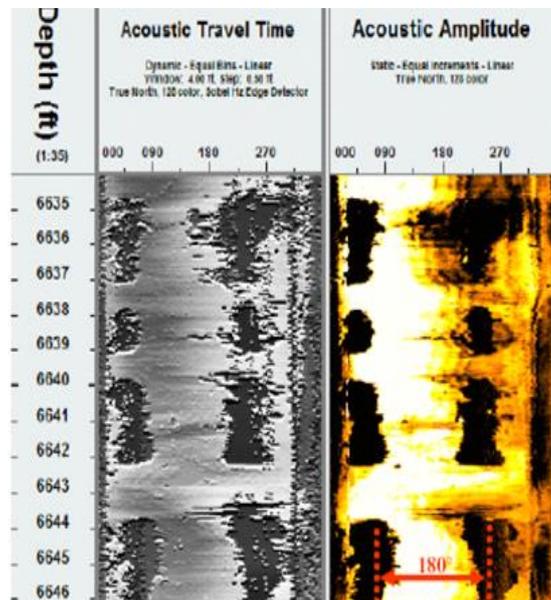
Los registros de imágenes, resistivos o sónicos, proveen excelente información sobre la orientación y la magnitud de los esfuerzos.

Las concentraciones de los esfuerzos tangenciales en las paredes del pozo están orientadas según los esfuerzos in situ. Esto puede generar derrumbes o fracturas verticales inducidas. Ambos efectos pueden ser observados en los registros de imágenes de un pozo.

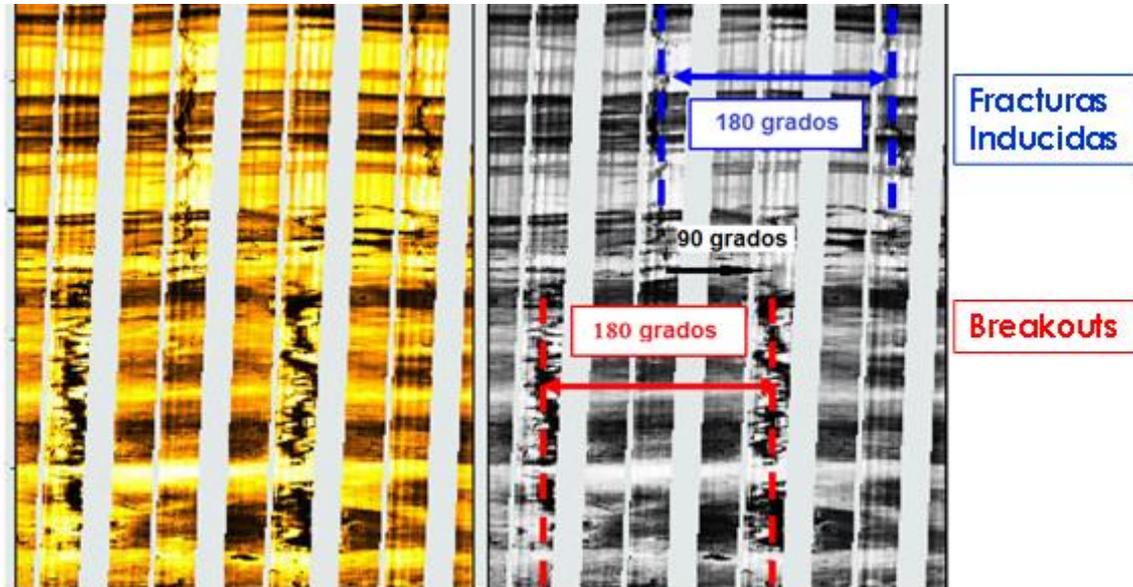


Breakouts: Zonas de alto valor de esfuerzos tangenciales, que al superar la resistencia de la roca, generan derrumbes que siguen la orientación de σ_3 (σ_{hm} in pozos verticales con régimen extensional o transcurrente)

La identificación de breakouts está basada en la presencia de segmentos paralelos oscuros, los que ocurren a 180° entre sí.

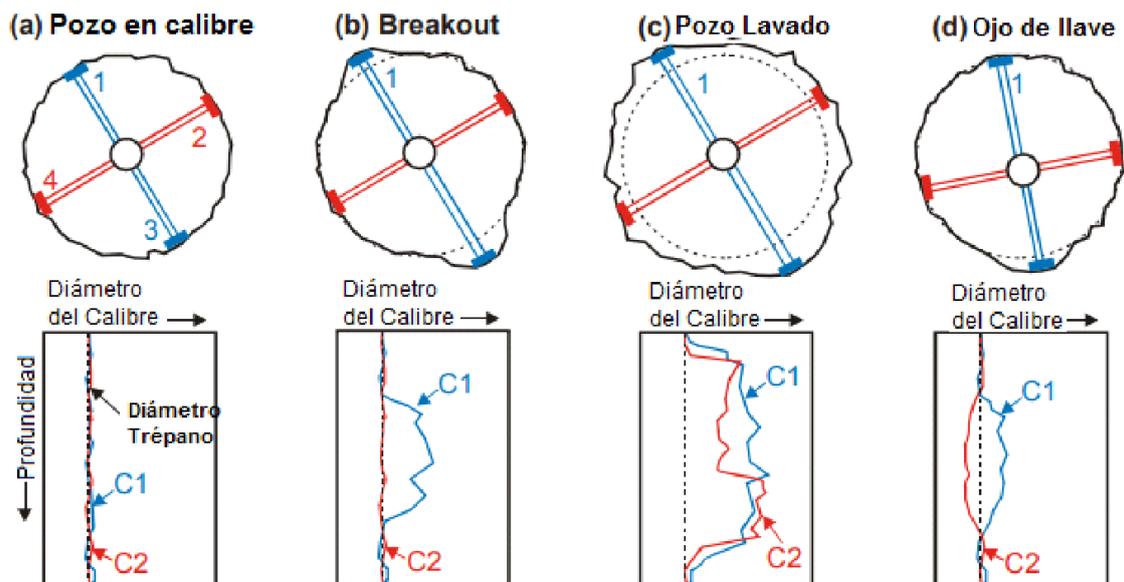


Las fracturas inducidas ocurren como finos lineamientos oscuros, paralelos y verticales, a 180° entre sí y a 90° de los breakouts. Siguen la orientación de σ_{HMAX} .



Orientación de Esfuerzos por Calibres

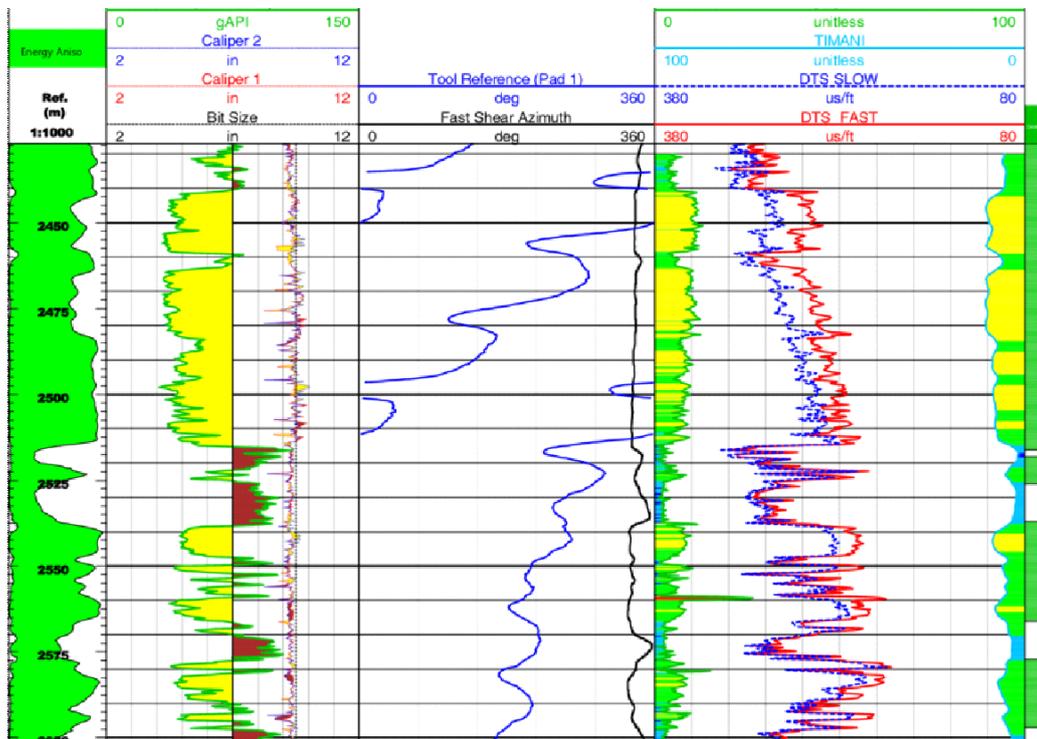
Los registros de calibre de 4 o 6 brazos orientados también sirven para determinar la orientación de los esfuerzos, a partir de la ovalización de los pozos debido a breakouts.



Orientación de Esfuerzos por Registro de Anisotropía Acústica

También se utilizan los registros sínicos dipolares (dipolos cruzados), para determinar las orientaciones de los esfuerzos. Esto es posible usando fuentes y receptores orientados con los que se pueden detectar la presencia de concentración de esfuerzos cerca del pozo y su diferencia con los esfuerzos de campo lejano o anisotropía (debido a las ondas acústicas de corte (S) lentas y las ondas acústicas de corte (S) rápidas).

Ejemplo de un perfil con las curvas DTS lenta y rápida. Se puede apreciar que la diferencia entre ambas se puede ver con claridad en los cuerpos de arena.



Magnitud de SH y Sh mediante breakouts y el Polígono de Esfuerzos

Según las ecuaciones de Kirsch, las expresiones simplificadas de la mayor y menor magnitud de concentración del Esfuerzo Efectivo Tangencial en un pozo son:

$$\sigma'_{\theta\text{MAX}} = 3\sigma_H - \sigma_h - 2p_p - (p_m - p_p)$$

$$\sigma'_{\theta\text{min}} = 3\sigma_h - \sigma_H - 2p_p - (p_m - p_p)$$

En donde p_m (presión del lodo) = p_p (presión poral)

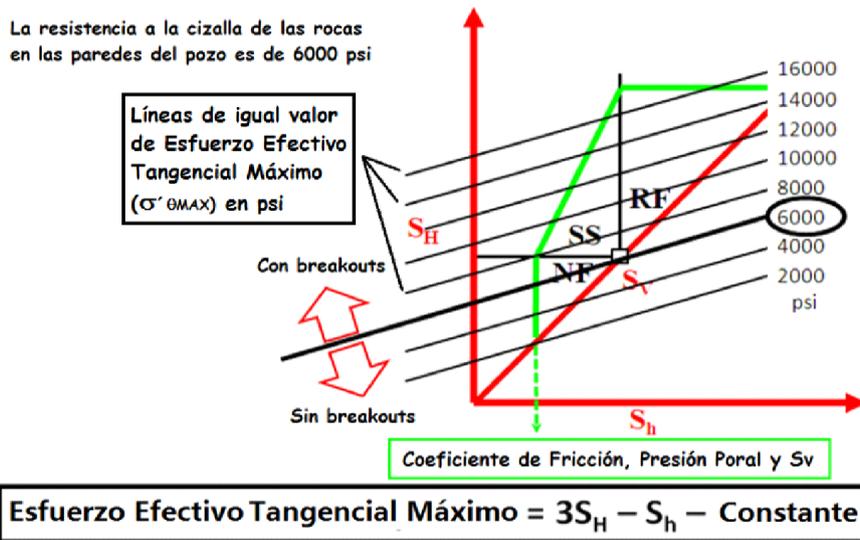
Si p_p y p_m son constantes, las relaciones se reducen a:

$$\sigma'_{\theta\text{MAX}} = 3\sigma_H - \sigma_h - \text{Constante}$$

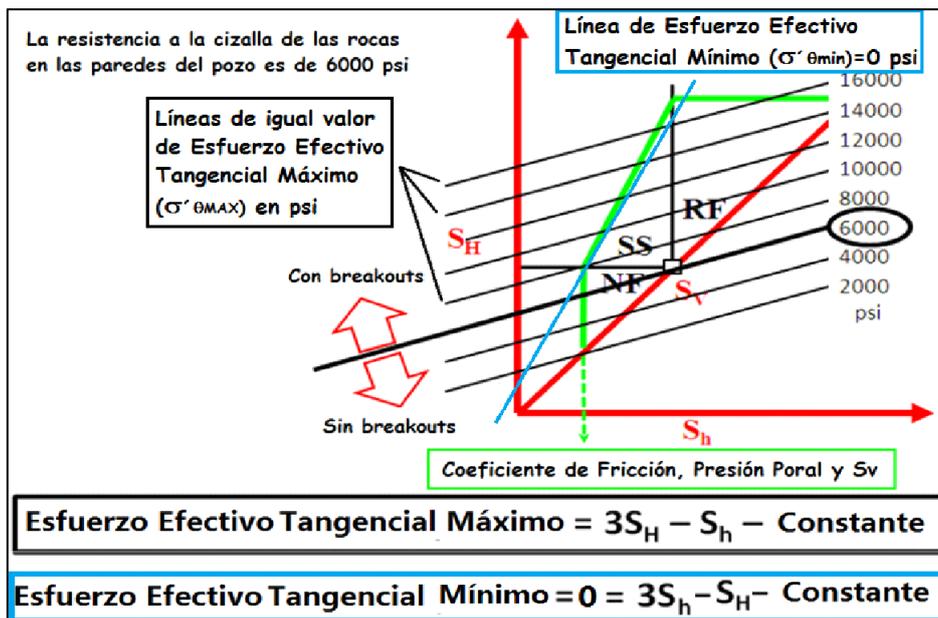
$$\sigma'_{\theta\text{min}} = 3\sigma_h - \sigma_H - \text{Constante}$$

A partir de estas dos últimas ecuaciones es posible determinar el valor del $\sigma'_{\theta MAX}$ para cada pareja S_H-S_h en el Polígono de Esfuerzos. Para esto se generan líneas de esfuerzos de igual valor de $\sigma'_{\theta MAX}$ sobre el Polígono de Esfuerzos (figura siguiente). Cuando el $\sigma'_{\theta MAX}$ excede la **resistencia a la cizalla** de las rocas en las paredes del pozo, se producen **breakouts**, los que pueden ser observados en registros de imágenes (o de calibre).

Ejemplo: si la resistencia de la roca es de 6000 psi, la presencia de breakouts podrá ocurrir sólo en las parejas S_H-S_h por encima de la línea de 6000 psi y no así por debajo de la misma.



De manera similar, si se observan fracturas inducidas en las imágenes, es porque $\sigma'_{\theta min}$ ha superado la resistencia a la tensión de las rocas. Como la resistencia a la tensión de las rocas es prácticamente nula, se incluye la línea de valor “cero” en el gráfico anterior. Sólo los estados de esfuerzos que estén a la izquierda de dicha línea podrán contener fracturas inducidas, no así los que estén a la derecha de la misma (Figura siguiente).



Cálculo de SH y por el Ancho de Breakouts

Barton y Zoback (1988) asumen que el ancho de un breakout, formado por una combinación determinada de SHmax y Shmin, estará definido por todos los puntos de las paredes de un pozo en los que el esfuerzo efectivo tangencial alcance o exceda el umbral del criterio de rotura de Rankine C_o^R (=UCS). Con este criterio, la rotura ocurre cuando el esfuerzo efectivo principal máximo σ'_1 excede el umbral de resistencia C_o :

$$\sigma'_1 \geq C_o^R$$

Derivaron una ecuación para computar SHmax de la mitad del breakout θ_b , una estimación independiente del Shmin y una componente térmica $S_\theta^{\Delta T}$ del esfuerzo tangencial:

$$SH_{max} = \frac{C_o^R + P_p + P_w - S_\theta^{\Delta T} - Sh_{min}(1 - 2\cos(2\theta_b))}{1 + 2\cos(2\theta_b)}$$

Se puede derivar otra expresión usando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, en donde la resistencia es una función del esfuerzo efectivo principal mínimo σ'_3 :

$$SH_{max} = \frac{C_o + P_p + P_w - S_\theta^{\Delta T} - P_p q + P_w q - Sh_{min}(1 - 2\cos(2\theta_b))}{1 + 2\cos(2\theta_b)}$$

En donde "q" es el coeficiente de fricción y $C_o = UCS$.

Si $P_w = P_p$, entonces $\sigma'_3 = 0$, y la resistencia en las paredes del pozo es constante e igual a C_o , con los resultados idénticos a los que se obtienen con el criterio de rotura de Rankine.

Ambos criterios tienen limitaciones y no deberían ser usadas cuando los breakouts superan un ángulo de 100° .



ACTIVIDAD 10

Usando las fórmulas de los valores máximo y mínimo de los esfuerzos tangenciales en las paredes de un pozo (de las Ecuaciones de Kirsch):
PARTE 1. Seleccionar la tabla en la que se encuentran los valores correctos para las diferentes trayectorias de un pozo. **PARTE 2.** Determinar cuál es la trayectoria más estable. **PARTE 3.** ¿A qué régimen de esfuerzos principales de Anderson corresponde dicho ejemplo?



RESUMEN

Al realizar una perforación en la corteza terrestre, ocurre una concentración de esfuerzos en las paredes del orificio, con un esfuerzo tangencial y otro radial, definidos por las ecuaciones de Kirsch. Esta alteración del campo de esfuerzo local debe ser soportada por las rocas alrededor del pozo, que dependiendo de su resistencia a la compresión y a la tensión, pueden tender a romperse por cizalla (formando derrumbes, breakouts, en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo), o a fracturarse (fracturas inducidas en la dirección del esfuerzo horizontal máximo). Mientras mayor sea la diferencia entre las magnitudes de los esfuerzos horizontales, mayor será la inestabilidad para perforar pozos verticales (esto ocurre en zonas tectónicamente activas, por ejemplo cerca de las cadenas montañosas). Los breakouts y las fracturas inducidas pueden ser observadas, por ejemplo, en los registros de imágenes, de los que podremos inferir la orientación y, en ocasiones la magnitud, de los esfuerzos que los generaron.

III. PRESIÓN PORAL

La Presión Poral (p_o) es la presión que soportan los fluidos en la porosidad de las rocas.

A diferencia de los esfuerzos que actúan sobre la matriz en distintas direcciones, la presión en un fluido es igual en todas las direcciones.

El Esfuerzo Efectivo es la suma de las fuerzas grano contra grano (σ').

El Esfuerzo Total (σ o S) es el Esfuerzo Efectivo (σ') + la Presión Poral (p_o).

PRESIÓN DE POROS NORMAL, SOBREPRESIÓN Y PRESIÓN SUBNORMAL

Presión Normal: cuando la presión de los fluidos en los poros es aproximadamente igual a la Presión Hidrostática de una columna de agua dulce:

p. ej. a **1000 ft = 433 psi**, o a **1000 m = 9810 kPa**

Densidad agua dulce: 1 g/cc, 9.81 kPa/m, 0.433 psi/ft

Presión Anormal:

Se denomina **Sobrepresión** cuando la presión poral es mayor que la Presión Normal:

p. ej. a **1000 ft = 500 psi**, o a **1000 m = 13000 kPa**

Se denomina **Presión Subnormal** cuando la presión poral es menor que la Presión Normal:

p. ej. a **1000 ft = 350 psi**, o a **1000 m = 9100 kPa**

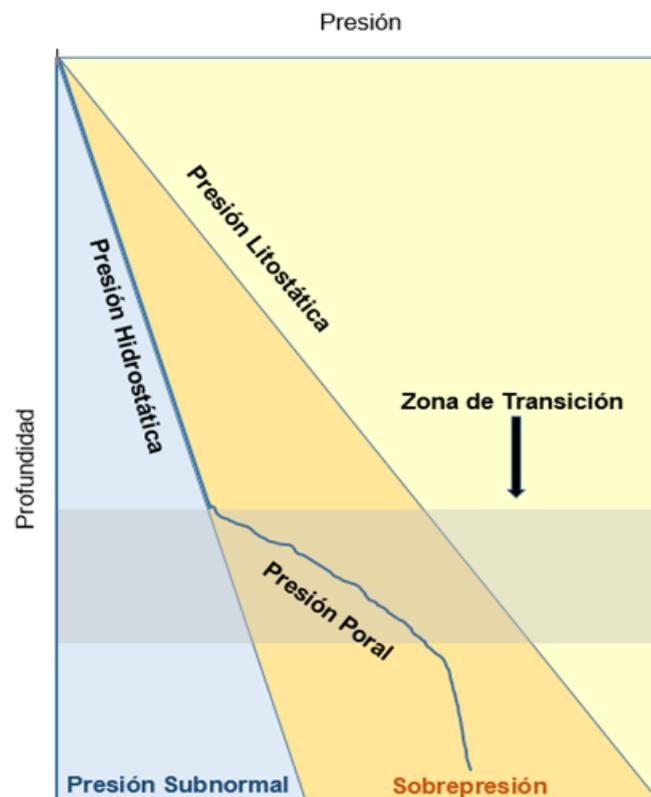


Gráfico de Presión vs Profundidad

Mecanismos que Generan Sobrepresión

1 - Relacionados con Esfuerzos

- Sub-compactación de depósitos arcillosos (abundante aporte de sedimentos, deltas)
- Esfuerzos tectónicos

2 - Por aumento del volumen en los fluidos

- Generación de hidrocarburos
- Transformación de petróleo en gas (cracking)
- Efectos termales (expansión del H₂O)
- Liberación de agua por cambios en minerales: Arcillas (Esmectita + Illita + H₂O + SiO₂). Deshidratación de Yeso (anhidrita + H₂O)

3 - Por movimientos de fluidos y flotabilidad

- Altos topográficos (efecto artesiano)
- Flotabilidad debido a contraste en la densidad
- Ósmosis (agua dulce a agua salada en zonas aisladas)
- Inversión de ósmosis (agua salada con alta presión a agua dulce)

Mecanismos que generan Presión Subnormal

Las presiones subnormales pueden ocasionar variados problemas, como las pérdidas de lodo al perforar zonas con ese estado de presión, o la imposibilidad de utilizar lodos convencionales, casos en que se perfora con lodos aireados o espuma.

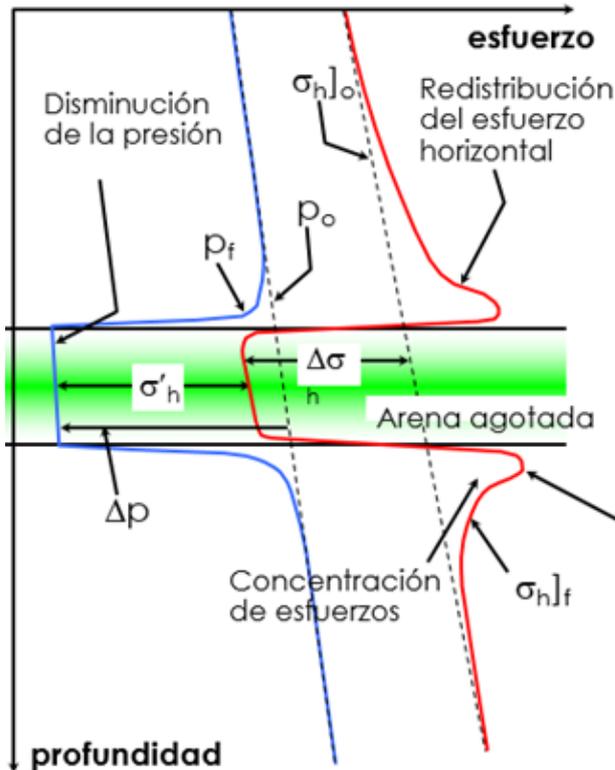
Las condiciones de presión subnormal ocurren frecuentemente cuando la cota de superficie de un pozo es mucho más elevada que la capa freática del subsuelo o el nivel del mar. Esto se observa cuando se perforan pozos en serranías o en zonas montañosas, y también puede ocurrir en regiones áridas donde es posible que la capa freática tenga más de 300 m de profundidad.

Las presiones anormalmente bajas también se observan con frecuencia en los yacimientos agotados.

Los reservorios agotados tienen dos efectos principales:

- la disminución del esfuerzo total horizontal σ_h ,
- el aumento de los esfuerzos efectivos σ'_h y σ'_v .

Esto genera un descenso del gradiente de fractura en la zona agotada, junto con un aumento en los esfuerzos confinantes, que genera a su vez una mayor dureza en las rocas.



Una presión menor genera un aumento de σ'_v , σ'_h y una disminución de σ_h .

El aumento en σ' hace que la roca sea más dura y difícil de perforar

El σ_h "perdido" en el reservorio debe ser redistribuido arriba y debajo del reservorio

MÉTODOS DE CÁLCULO DE PRESIÓN DE POROS

- Método por Profundidad Equivalente
- Método por Cociente
- Método de Eaton
- Método de Resistividad o Sónico con LTCN (Línea de Tendencia de Compactación Normal), dependiente de la profundidad.
- Método de Bower

Método por Profundidad Equivalente

Este método asume que hay un intervalo con presión poral normal en donde los sedimentos están normalmente compactados. Sobre la curva de un perfil (p. ej. sónico), se puede definir una línea de tendencia normal de compactación (LTCN), que coincida con los datos sobre el intervalo normalmente compactado. Ya que los valores registrados de la propiedad física son una función única del esfuerzo efectivo, la presión poral en donde el valor medido no cae en la LTCN puede ser obtenido de:

$$p_z = p_a * (S_z - S_a)$$

En donde p_z , p_a y S_z , S_a , son la presión poral y el esfuerzo total en las profundidades z y a .

Este método asume que el esfuerzo efectivo es una función lineal de la profundidad.

Método por Cociente

Puede ser utilizado con curvas de densidad, resistividad, sónico o el exponente de perforación dx_c . La presión poral (p_p) se calcula como el producto de la presión normal (p_{hid}), por el cociente entre el valor del parámetro normal y el valor medido X_n/X_{log} (o a la inversa, X_{log}/X_n , dependiendo del parámetro usado), a la misma profundidad:

$$p_p = p_{hid} * dx_{cn} / dx_{clog}$$

La calibración de este método requiere conocer el valor de la presión normal del parámetro físico medido, estimado mediante una línea de tendencia normal (LTN). A diferencia del método de profundidad equivalente, este método no usa el esfuerzo efectivo. Esto puede llevar a valores irreales de presión poral mayores que la sobrecarga.

Método de Eaton (1972, 1975)

Está basado en el conocimiento del gradiente litostático (o de sobrecarga, del término en inglés *overburden*), al que relaciona directamente con la presión de poros. Eaton realizó gran cantidad de estudios sobre bases de datos en Texas y Luisiana y determinó fórmulas en las que varió el **exponente** dependiendo del parámetro utilizado:

Sónico	$P_o = S - \left[(S - P_n) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_o} \right)^{3.0} \right]$
Resistividad	$P_o = S - \left[(S - P_n) \left(\frac{R_o}{R_n} \right)^{1.2} \right]$
D Exponente	$P_o = S - \left[(S - P_n) \left(\frac{Dxc_o}{Dxc_n} \right)^{1.2} \right]$

Fórmula general: $P_o = S - [(S - P_n) * (Param_n / Param_o)^{exp}]$, para datos sónicos, y

$P_o = S - [(S - P_n) * (Param_o / Param_n)^{exp}]$, para resistividad y DXC

En donde

P_o = Presión de poros observada (o calculada)

S = Gradiente litostático, típicamente σ_v

P_n = Presión de poros normal (hidrostática)

Param_o = Valor del parámetro leído

Param_n = Valor del parámetro para presión de poros normal

El método de Eaton es particularmente aplicable en cuencas sedimentarias jóvenes, y requiere un buen conocimiento del gradiente litostático local.

Método de Resistividad o Sónico con LTCN (Línea de Tendencia de Compactación Normal), dependiente de la profundidad.

En la ecuación original de Eaton, es difícil determinar la resistividad, o el valor del tiempo de tránsito, en condiciones de presión de poros normal. Otra aproximación es asumir que el valor normal de cada parámetro es una constante, que es una función de la profundidad, y, por lo tanto, de la Línea de Tendencia de Compactación Normal. Se desarrollaron las siguientes ecuaciones para la determinación de estas LTCN (Zhang, 2011):

$$R_n = R_o^{(bZ)}$$

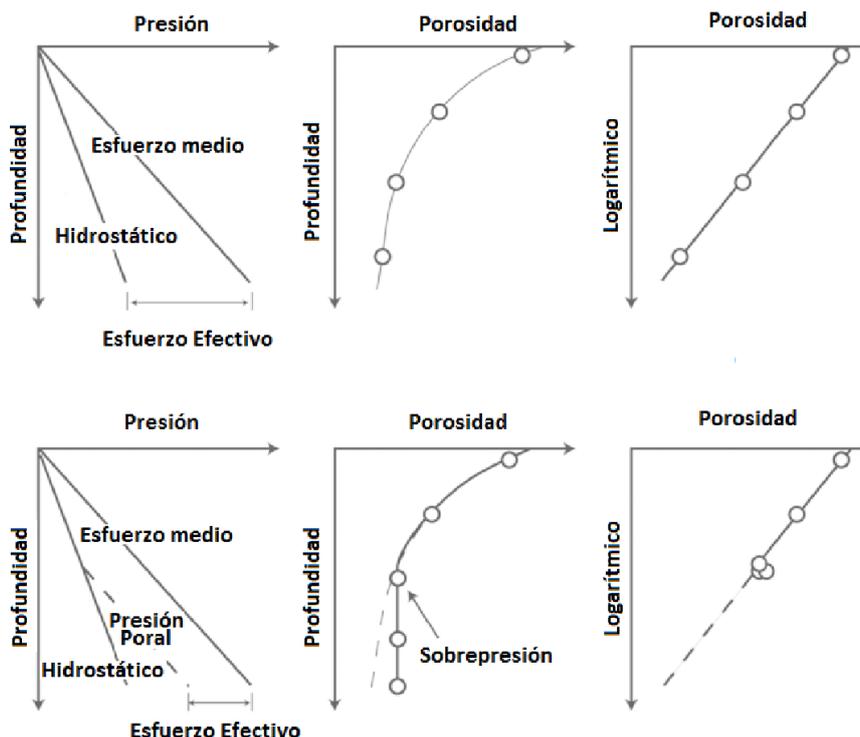
R_n : resistividad de la compactación normal, R_o : valor de resistividad registrada, b : constante y Z : Profundidad

$$DT_n = DT_m + (DT_{ml} - DT_m)^{(-cZ)}$$

DT_n : DTC de la compactación normal, DT_m : DTC de la matriz de lutitas ($\sim 65 \mu\text{seg/pie}$), DT_{ml} : DTC del lodo ($\sim 200 \mu\text{seg/pie}$), c : constante y Z : Profundidad

Métodos de Esfuerzo Efectivo

Son los métodos a los que comúnmente se refieren como los que tratan el problema correctamente. En el ejemplo siguiente, el conjunto superior de gráficos muestra los datos registrados sobre una sección normalmente compactada. El esfuerzo efectivo aumenta y la porosidad disminuye con la profundidad. El conjunto inferior de gráficos muestra el efecto de un aumento en la presión de poros por debajo de una cierta profundidad, como se representa por la línea discontinua que diverge de la línea hidrostática en el gráfico inferior izquierda. En este caso, la presión de poros en la zona de sobrepresión aumenta al mismo ritmo que el esfuerzo medio, de manera que el esfuerzo efectivo es constante. El gráfico logarítmico σ vs. Φ sigue la tendencia de compactación solamente hasta que alcanza la profundidad de sobrepresión, después de lo cual no hay cambios en la porosidad o el esfuerzo efectivo.



Método de Bower (1995)

Al igual que el método de Eaton, este se basa en una relación matemática logarítmica. Para el cálculo de la presión poral, este método usa la velocidad sónica y parámetros determinados empíricamente para estimar el esfuerzo efectivo vertical, el que luego es sustraído del esfuerzo litostático (esfuerzo total vertical). De esta forma, se puede predecir tanto la presión poral originada por sub-compactación, como por otros mecanismos.

El modelo de Bower es un modelo de curva matemática adaptada. Los parámetros son ajustados para que los valores medidos de un sónico encajen de la mejor manera a los datos de perforación (influjos, derrumbes). Una vez que se establece la tendencia normal de compactación, se puede calcular la presión de poros para datos de perfiles o sísmicos.

La fórmula para obtener el gradiente de presión de poros, a partir de un perfil sónico es:

$$PP = OBG - \{[1/(10^6 DTsh) - 1/(10^6 DTml)] / a\}^{(1/b)}$$

PP = gradiente de presión de poros normal

OBG = gradiente litostático (o de sobrecarga)

a = constante empírica

b = constante empírica

DTsh = DTC de la matriz de la lutita en $\mu\text{seg}/\text{pie}$

DTml = DTC del lodo ($\sim 200 \mu\text{seg}/\text{pie}$)

Valores por defecto de las constantes empíricas: $a = 14.2$ y $b = 0.724$ y $PP = 0.45 \text{ psi}/\text{pie}$.



PREGUNTA

¿A qué denominamos Presión Poral y qué influencia tiene en los Esfuerzos Totales?



ACTIVIDAD 11

Presión de poros. Magnitud. Mecanismos que generan presiones anormales, su origen. Métodos de Cálculo.



RESUMEN

La presión de los fluidos que están contenidos en la porosidad más los esfuerzos efectivos que actúan sobre las partes sólidas de las rocas conforman los esfuerzos totales que afectan a las formaciones en profundidad. La presión poral puede ser normal (presión hidrostática de una columna de agua dulce), sub normal (menor que la presión normal), o sobrepresionada (considerablemente mayor que la presión normal). Es importante conocer cuáles son los mecanismos que generan presiones diferentes a la normal, para, por ejemplo, poder anticiparse a problemas durante una perforación. Existen varios métodos para el cálculo de las presiones porales, que son utilizados antes, durante y con posterioridad a una perforación, siendo la mayoría métodos indirectos.

IV. MECÁNICA DE ROCAS

La Mecánica de Rocas aplica la Mecánica Newtoniana (estática y dinámica) al estudio de las rocas en el terreno. En especial, se ocupa de cómo se comportan las rocas en respuesta a las perturbaciones y alteraciones producidas por cambios en los esfuerzos, movimiento de fluidos, variaciones de temperatura, erosión, soterramiento y otros fenómenos.

MODELO DE ELASTICIDAD LINEAL DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS

- Asumimos que la aproximación más simple y práctica para el cálculo de esfuerzos en las rocas es el modelo de **Elasticidad Lineal**.
- Para un sólido elástico homogéneo isótropo tridimensional, la ecuación constitutiva es conocida como la ley de Hooke:

El esfuerzo (σ) sobre un cuerpo es directamente proporcional a la deformación (ϵ), por lo que la relación esfuerzo / deformación es lineal.

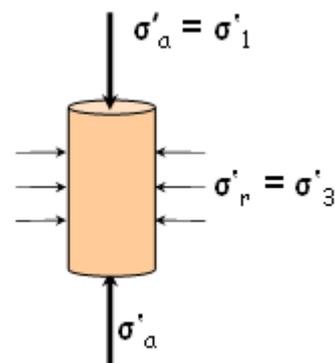
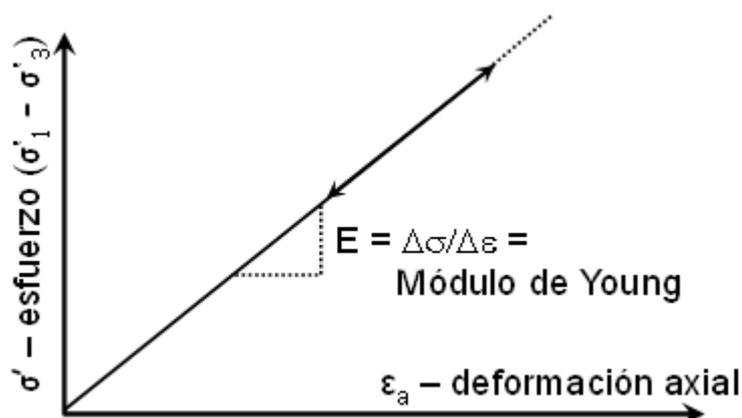
$$\sigma = C\epsilon$$

Siendo **C** la constante elástica intrínseca de cada sólido. Una constante elástica es cada uno de los parámetros físicamente medibles que caracterizan el comportamiento de un sólido deformable y que involucra una medida relacionada con la tensión o módulo elástico, y una medida relacionada con la deformación o coeficiente elástico.

Módulos elásticos: Módulo de Young (E), Módulo de Cizalla (G), Módulo Volumétrico (K).

Coefficientes elásticos: coeficiente de Poisson (ν), primer y segundo coeficiente de Lamé (λ y μ).

Gráfico de esfuerzo-deformación



MÓDULOS DE ELASTICIDAD

El módulo de Young (E) es cuánto se deforma un material ante un cambio en un esfuerzo efectivo. Es una medida de la rigidez de la roca. A mayor valor de E, mayor es la rigidez de la roca.

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$

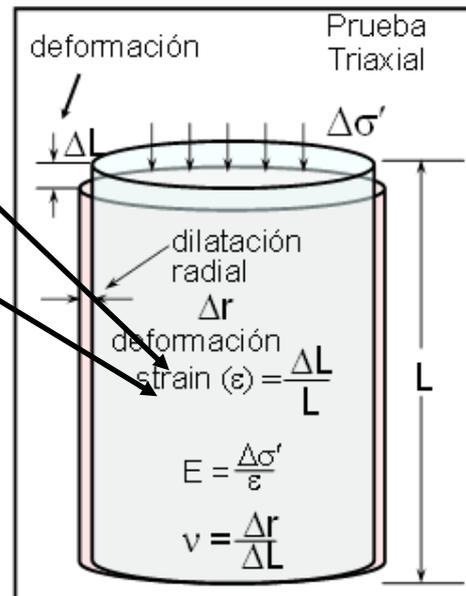
E = Esfuerzo (Pa) / Deformación (adimensional)

Coefficiente de Poisson (ν) es cuánto se expande un material lateralmente cuando es comprimido.

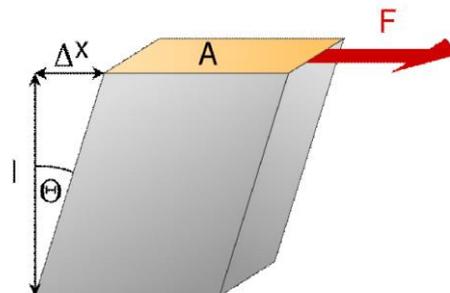
$$\nu = \Delta r / \Delta L \text{ (adimensional)}$$

Si $\nu = 0.0$, sin expansión (ej.: esponja)

Si $\nu = 0.5$, expansión completa, el cambio de volumen es cero (ej.: agua)



El **módulo de cizalla**, o **módulo de elasticidad transversal** (*segunda constante de Lamé*), es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico (lineal e isótropo) cuando se aplican esfuerzos cortantes. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de cizalla es una constante con el mismo valor para todas las direcciones del espacio.



El módulo de cizalla puede medirse de varias maneras, conceptualmente la forma más sencilla es considerar un cubo y someterlo a una fuerza cortante, para pequeñas deformaciones se puede calcular la razón entre la tensión y la deformación angular:

$$G := \frac{\tau_m}{\theta} \approx \frac{F/A}{\Delta x/l} = \frac{Fl}{\Delta x A}$$

τ_m : Esfuerzo o Tensión de cizalla

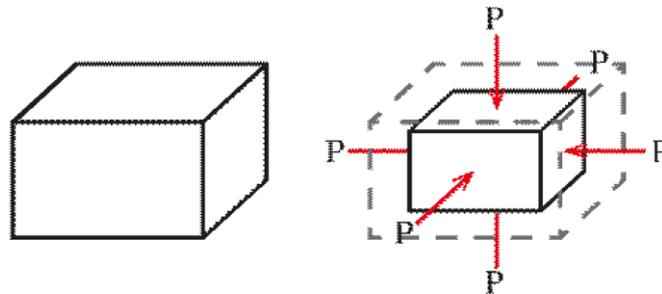
θ : Deformación angular

El **módulo de compresibilidad K** de un material mide su resistencia a la compresión uniforme, indicando el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de un volumen dado.

$$K = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} = -V \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

Donde p es la presión, V es el volumen, Δp y ΔV denotan los cambios de la presión y de volumen. El módulo de compresibilidad tiene dimensiones de presión, por lo que se expresa en pascales (Pa) en el Sistema Internacional de Unidades.

La inversa del módulo de compresibilidad indica la “compresibilidad” de un material y se denomina coeficiente de compresibilidad.



En elasticidad lineal, el **primer coeficiente de Lamé** λ es una constante elástica que en conjunto con el **segundo coeficiente de Lamé** μ caracterizan por completo el comportamiento elástico lineal de un sólido isótropo en pequeñas deformaciones.

$$\lambda = K - (2/3) \mu$$

$$\mu = \tau / \gamma = G \text{ (módulo de cizalla)}$$

Donde

K = Módulo de compresibilidad

τ = Esfuerzo de cizalla

γ = Deformación de cizalla

Constantes de elasticidad típicas de algunas rocas:

Tipo de Roca	Módulo de Young (10 ⁶ psi)	Coefficiente de Poisson
Caliza	5 - 13	0.30 - 0.35
Arenisca poco Consolidada	0.2 - 1.3	0.25 - 0.35
Arenisca Consolidada	1 - 8	0.15 - 0.30
Limolita	4 - 8	0.20 - 0.30
Arcilita	1 - 5	0.25 - 0.45
Carbón	0.10 - 1.0	0.35 - 0.45

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

Resistencia de las Rocas

Es la resistencia de las rocas a la rotura por:

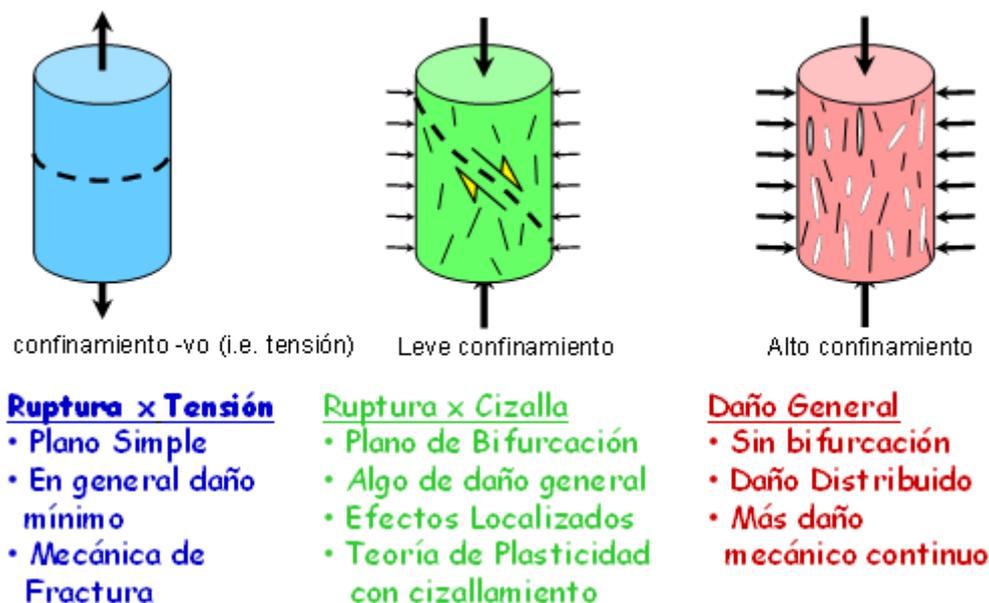
- Esfuerzo Normal Compresivo (rotura por compresión), **UCS** o resistencia a la compresión **no confinada**.
- Esfuerzo de Corte o Cizalla (rotura por cizalla)
- Esfuerzo de Tensión (rotura por tensión)
- Torsión (rotura por torsión).

La resistencia de las rocas depende de los esfuerzos efectivos (σ'), por lo que debemos conocer la presión de poros (p_o)

Resistencia a la compresión no confinada o UCS (Unconfined Compressive Strength)

Es el esfuerzo de compresión axial máximo que puede soportar una muestra de material cilíndrica y recta, bajo condiciones no confinadas; el esfuerzo lateral de confinamiento es cero. Los valores más precisos de UCS se obtienen de ensayos uniaxiales en laboratorio sobre núcleos extraídos de los pozos. Estos valores se utilizan para correlacionar y calibrar las propiedades conseguidas mediante registros petrofísicos, Junto con el UCS, el ángulo de fricción interna es otro parámetro necesario para calcular la resistencia de las rocas.

Modos de Rotura con diferente confinamiento



Criterio de Rotura

Una de las formas para definir el comportamiento de una roca en rotura es mediante el estado de esfuerzos, en donde se toma como resistencia de la roca al máximo esfuerzo que ésta puede soportar dentro del dominio elástico.

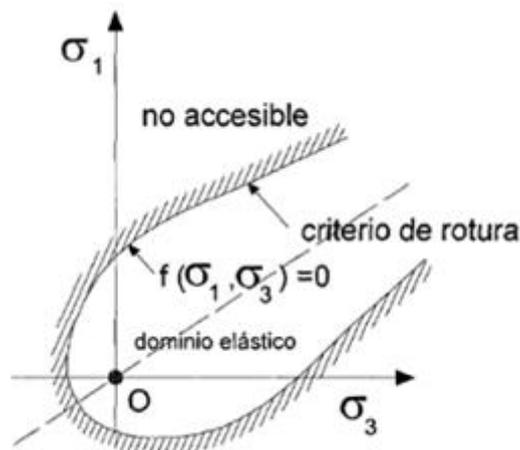
Utilizando esfuerzos principales, σ_1 , σ_2 , σ_3 , en materiales isótropos, se define como Criterio de Rotura a la superficie f que delimita en el espacio el dominio elástico.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$$

Como la tensión intermedia (σ_2) se suele ignorar, el criterio de rotura se define bidimensionalmente en función de la tensión mayor (σ_1) y la tensión menor (σ_3), como:

$$f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$$

f es la superficie que limita el dominio elástico del material, en el espacio bidimensional de esfuerzos principales, y la ecuación que describe esta superficie es el criterio de rotura.



Criterio de rotura en términos bidimensionales. Modificada según Melentijevic, 2005

Los puntos representados por fuera del dominio elástico ($f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$) están en situación de rotura, por el contrario, los puntos dentro del dominio elástico están en estado elástico. Dependiendo de cómo se defina la ecuación de la superficie de ruptura (f) se obtienen distintos criterios de rotura.

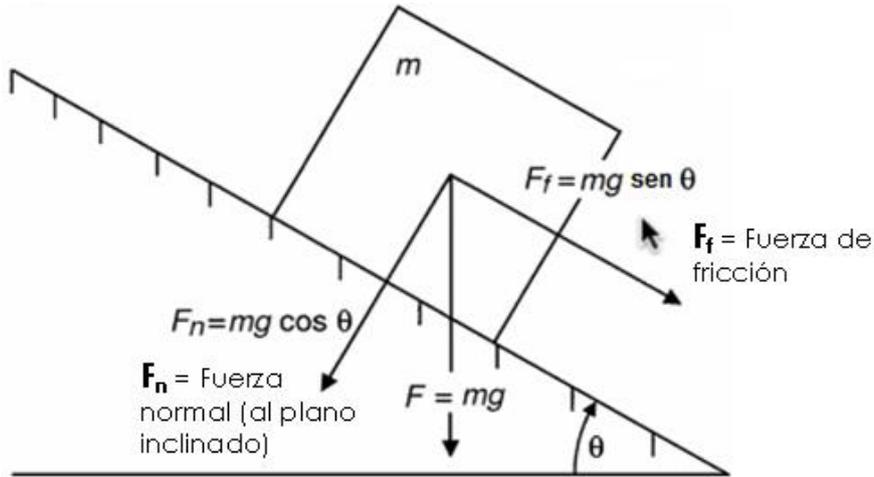
Fricción en las Rocas

Para comprender mejor el Criterio de Rotura de Mohr-Coulomb, explicaremos brevemente el concepto de Fricción en las Rocas:

Para que ocurra un deslizamiento o rotura de las rocas (por ej. en planos de falla o zonas de cizalla) se debe superar la resistencia a la fricción de las mismas. La relación básica para la fricción estática es:

$$\tau_{fs} = f_s \sigma_n \text{ (ley de Amonton)}$$

En donde τ_{fs} es el esfuerzo de fricción estático requerido para el deslizamiento y f_s es el coeficiente de fricción estática.



Esfuerzo normal $\sigma_n = F \cos \theta / A$

Esfuerzo de cizalla $\tau_{fs} = F \sin \theta / A$

Problema simple:

Un valor típico del coeficiente de fricción en las rocas es $f_s = 0.85$

Asumiendo este valor, ¿a qué ángulo θ el bloque de la figura anterior comenzará a deslizarse?

$$\tau_{fs} = f_s \sigma_n$$

$$F \sin \theta / A = f_s F \cos \theta / A$$

$$F \sin \theta / A = f_s F \cos \theta / A$$

$$\tan \theta = f_s$$

$$\theta = \tan^{-1}(f_s) = \sim 40^\circ$$

Criterio de Rotura de Coulomb:

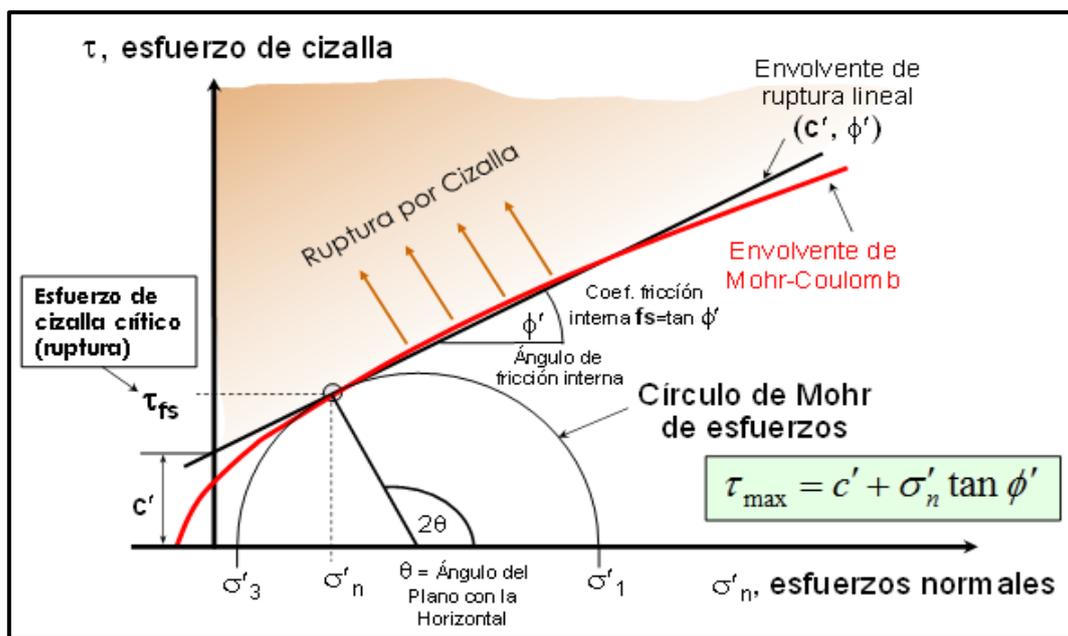
La ley de Amonton no tiene en cuenta la cohesión de las rocas. Coulomb modificó esta fórmula incluyendo la cohesión C:

$$\tau_{fs} = C + f_s \sigma_n$$

Esto se conoce como Criterio de Rotura de Coulomb.

Mediante el Círculo de Mohr podemos calcular las magnitudes de los esfuerzos normales y de cizalla en un plano específico y también relacionarlo con un criterio de rotura, como el de Coulomb (u otro).

Integrando el Criterio de Rotura de Coulomb con el método gráfico del Círculo de Mohr, se puede saber cuándo va a ocurrir la deformación y rotura por cizalla de una roca en planos predeterminados y calcular el coeficiente de fricción interna f_s y la cohesión c' . Esto se denomina Criterio de Rotura de Mohr-Coulomb.



Influencia de la Presión de Poros en la Rotura de las Rocas:

La presión de fluidos reduce la habilidad de la roca de soportar los efectos del esfuerzo diferencial (es decir, altas presiones de fluidos reducen la resistencia de la roca).



PREGUNTAS

¿Cuál es la definición de Criterio de Ruptura, Criterio de Ruptura de Coulomb y Criterio de Ruptura de Mohr-Coulomb?

¿Cómo influye la Presión de Poros en las resistencias de las rocas?

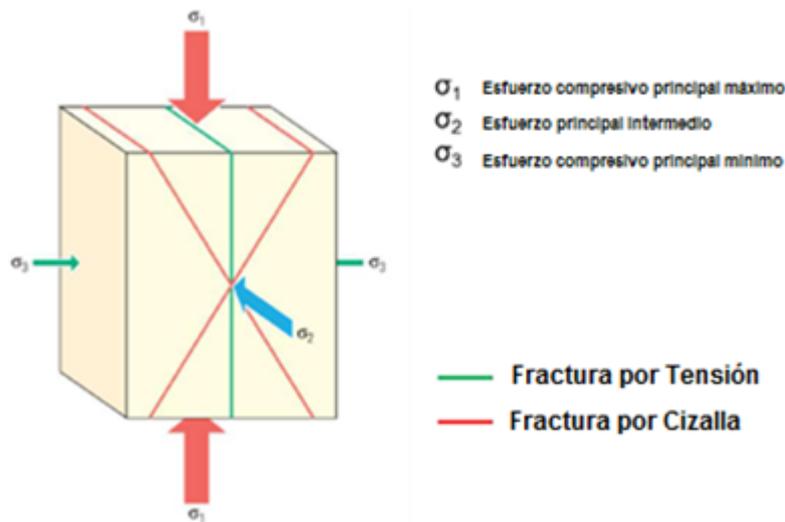
Anisotropía

La *anisotropía* es la propiedad de la materia según la cual sus características físicas varían en diferentes direcciones. Las areniscas y calizas en general presentan una baja anisotropía. Las arcillas exhiben una anisotropía significativa provocada por una red de planos de debilidad (fisilidad y estratificación), que puede modificar la orientación de las fracturas.

Además, las propiedades **elásticas** de las lutitas están relacionadas con la cantidad de materiales blandos contenidos en las mismas (arcillas y materia orgánica). Las lutitas consisten de una matriz muy fina y porosa de arcilla, mecánicamente débil, con incrustaciones de granos tamaño limo y arena mecánicamente resistentes, cuyas proporciones controlan las propiedades mecánicas del volumen de roca.

Fracturas Naturales y Resistencia de la Roca

En muchas ocasiones, los esfuerzos que actúan sobre las rocas en un reservorio pueden superar el límite de resistencia de rotura de las mismas, ya sea por compresión o por tensión. El plano en que ocurre la rotura será una fractura por cizalla o por tensión, dependiendo del esfuerzo que genere la rotura.



El análisis de fracturas está generalmente relacionado con su geometría (longitud, apertura, azimut), su distribución relativa y otras características. Es muy importante conocer la presencia o no de fracturas naturales, su orientación y distribución para entender y anticipar problemas en la producción. En los yacimientos tipo Shale, la clave está en cómo estas fracturas reaccionarán con la estimulación hidráulica.

Las fracturas naturales que están bajo esfuerzos críticos son las que están activas en relación con el campo de esfuerzos actual y son las que más probablemente contribuirán con la permeabilidad de un reservorio.

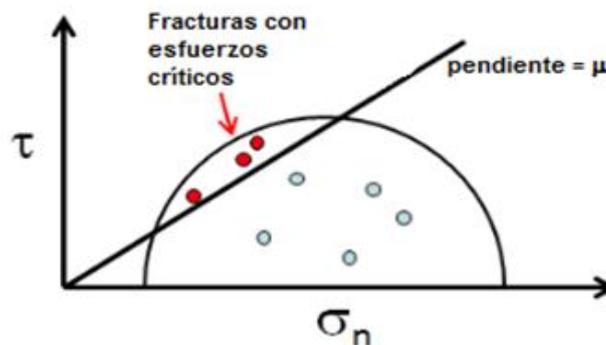
Fracturas Naturales y Fallas

La mayoría de las fracturas naturales que existen, a profundidades significativas, son del tipo de cizalla.

La orientación de un plano de debilidad respecto de los esfuerzos in situ determinará la magnitud del esfuerzo normal y de cizalla al que está sometido.

Deslizamiento de Fracturas y Fallas

Si conocemos la orientación y la magnitud de los esfuerzos in situ, podemos calcular los esfuerzos normales y de cizalla que actúan sobre un plano de fractura o de falla. Mediante el Círculo de Mohr conseguimos graficar los valores de los planos identificando aquellos que estén en estado crítico, como en la figura siguiente:



Envolvente de rotura por deslizamiento en fracturas naturales preexistentes

Los límites del semicírculo son los esfuerzos mínimo y máximo actuales. Ya que la cohesión de una fractura se asume como 0, es más fácil ocasionar un deslizamiento sobre un plano de debilidad preexistente que en una roca intacta. La pendiente de la envolvente de rotura μ es el coeficiente de fricción de deslizamiento, que describe el esfuerzo de cizalla de una fractura bajo un esfuerzo normal distinto de cero. Para la mayoría de las rocas μ varía entre 0.6 y 1.

MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

A las propiedades mecánicas de las rocas medidas mediante ensayos sobre muestras en laboratorio, se las denominan ***propiedades mecánicas estáticas***.

Ensayos de Laboratorio

- **Medidas Simples** ($\sigma_3 = 0$ y Ensayos de “índices”)
 - Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS), $\sigma'_3 = 0$
 - Resistencia a la Tensión (tensión pura, poco usado)
 - Prueba de Tensión Indirecta (Brazilian test)
 - Scratch Test, punto de carga
- **Medidas Directas con Confinamiento** ($\sigma'_3 \neq 0$)
 - Resistencia Compresiva: Máquina de Ensayo Triaxial

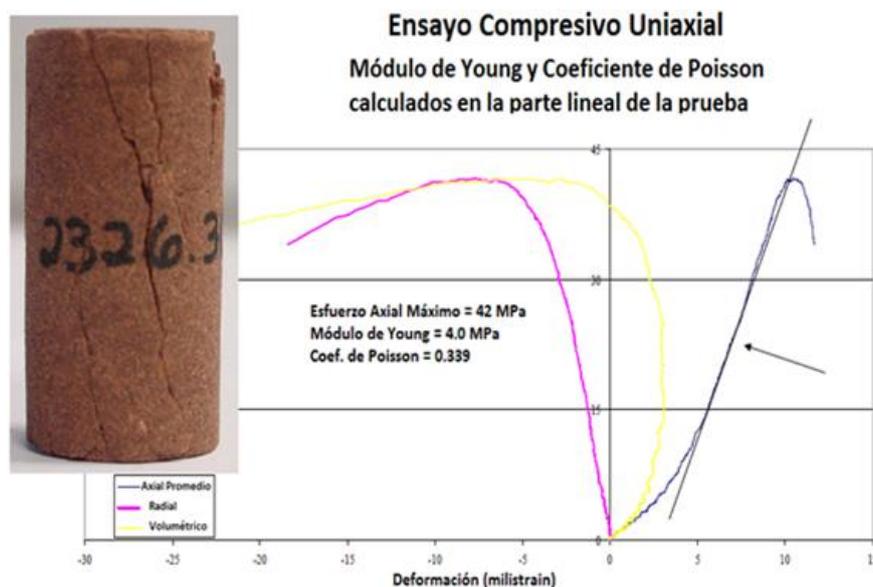
Ensayos más Comunes

- Ensayos Uniaxiales y Triaxiales para Módulos Estáticos de Young, Poisson (E_s, ν_s) y UCS
- Prueba de Velocidad Sónica para los Módulos Dinámicos de Young y Poisson (E_D, ν_D)

- Velocidad de propagación de Ondas Ultrasónicas (para Resistencia Anisótropa)
- “Thick wall cylinder”, para producción de arena
- Análisis de resistencia de Fracturas
- Esfuerzo de tensión de Brasil para análisis de estabilidad de pozo

Ensayo Uniaxial

Este ensayo se realiza comprimiendo a la muestra en un eje, sin confinamiento lateral, hasta la rotura. Se miden y se grafican los valores de presión, determinándose la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), el módulo de elasticidad de Young, el coeficiente de Poisson, el coeficiente de fricción interna y la cohesión.

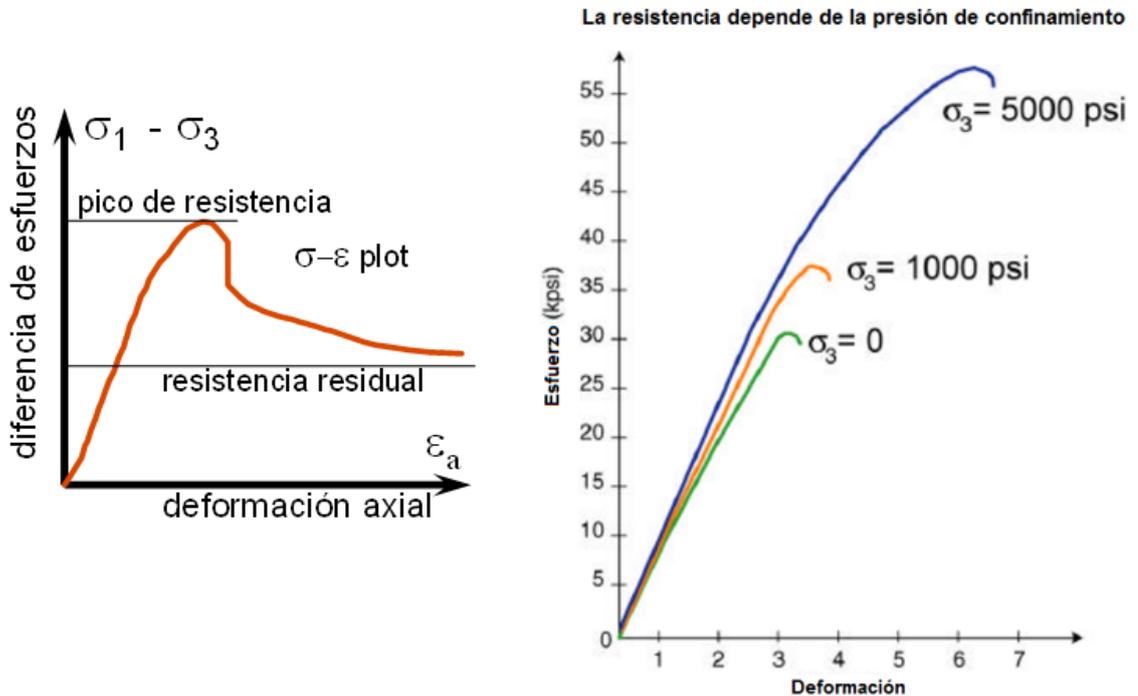


Ensayo Triaxial

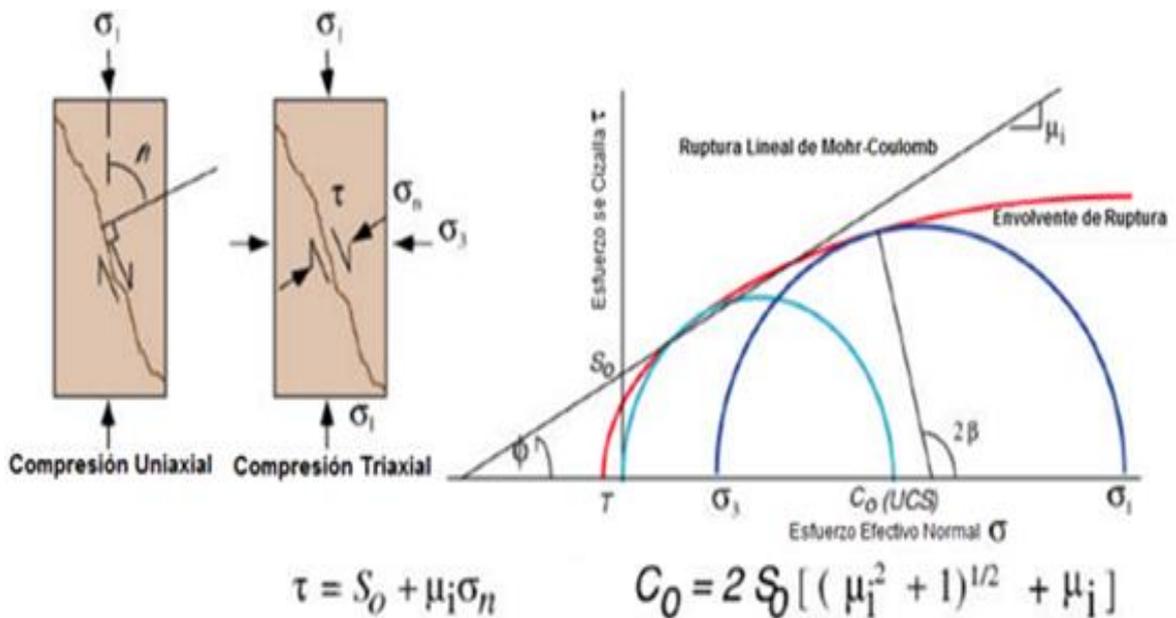
En este tipo de ensayo se comprime la muestra verticalmente y se la confina lateral o radialmente con un cierto valor, hasta la rotura.

Es una práctica común realizar una serie de ensayos triaxiales con diferentes σ_2 , determinando los picos de resistencia en un gráfico de esfuerzo / deformación.

La resistencia a la cizalla depende del ángulo de fricción interna y de la cohesión de la roca.

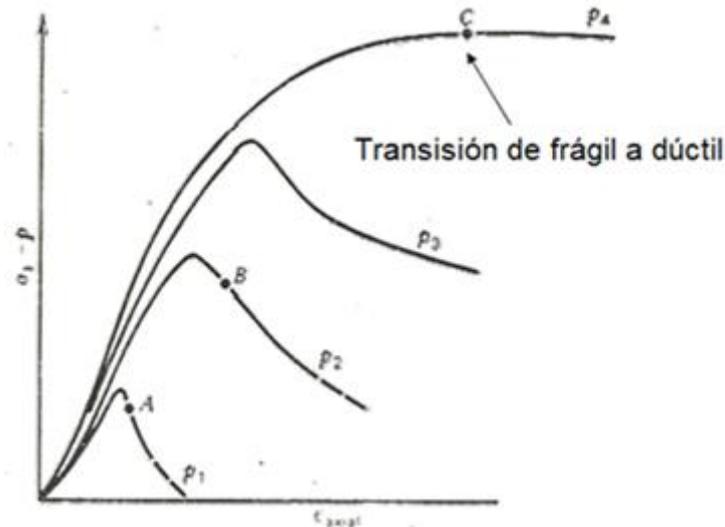


Los resultados de esta serie de ensayos, o de un ensayo uniaxial y otro triaxial, pueden ser representados mediante distintos criterios de rotura. La figura siguiente muestra un gráfico con el criterio de Mohr-Coulomb y la Envolvente de Rotura:



Los criterios de rotura están interpretados en términos de esfuerzos y, si bien algunos se desarrollaron considerando una rotura de tipo frágil, en la práctica se utilizan suponiendo un comportamiento de tipo elastoplástico, lo que significa que la roca se rompe en forma dúctil y que las componentes de cohesión y fricción de su resistencia se movilizan simultáneamente hasta alcanzar la condición de rotura definida por su **pico de resistencia**.

La forma de rotura en compresión triaxial de una probeta de roca puede variar de frágil a dúctil dependiendo de la presión de confinamiento

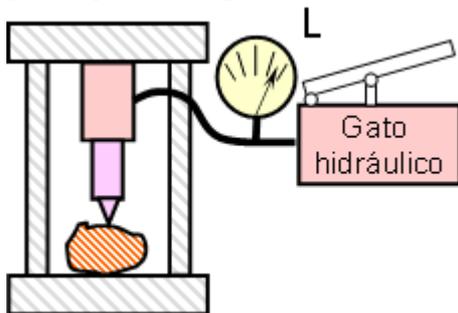


Efecto de la presión de confinamiento y la transición frágil a dúctil

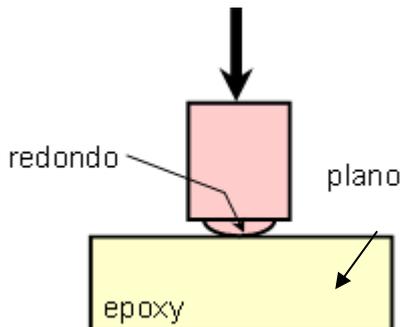
Pruebas de Índices (Index Tests)

Son pruebas de resistencia indicativas. Se usan cartas de correlación para la resistencia.

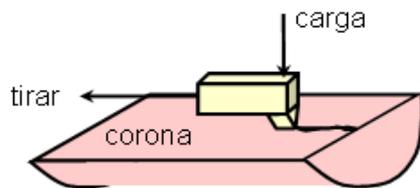
- **Punto de carga en discos de corona, o ensayo de Franklin** (puede ser usado para evaluar la anisotropía de una roca, realizando dos ensayos de rotura, uno perpendicular y otro paralelo a planos de discontinuidades)



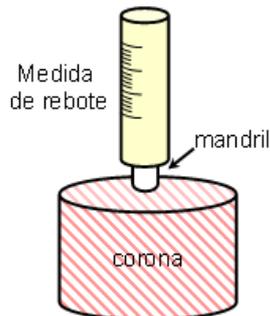
- **Prueba de dureza Brinnell o de penetración**



- Prueba de rayado (scratch) en trozo de corona



- Martillo de Schmidt o Esclerómetro o rebote de barra de acero



Propiedades Mecánicas de las Rocas Obtenidas por Registros Eléctricos

Los registros eléctricos con cable (Wireline Logs), nos permiten adquirir información petrofísica de las rocas expuestas por una perforación. Varias de las características que miden estas herramientas sirven para determinar distintas propiedades mecánicas, a las que se denomina **propiedades mecánicas dinámicas**. En el siguiente cuadro, se muestran los tipos de sondas y los principales parámetros que de ellas se obtienen.

TIPO DE REGISTRO	PARÁMETROS DERIVADOS
Sónicos Sónico Dipolar Sonic Scanner	Módulos de Elasticidad (Young, Poisson). Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS). Anisotropía, Orientación de Esfuerzos. Datos Radiales. Cálculo de la Presión Poral
Imágenes - Resistivos y Sónicos	<i>Breakouts</i> / Fracturas Inducidas -> Azimut de Esfuerzos. Fracturas Naturales. Estratificación.
Rayos Gama	Litología.
Calibres de 2-3 ejes orientados	<i>Breakouts</i> -> Azimut de Esfuerzos Trayectoria del Pozo
Densidad	Esfuerzo Vertical Litostático Módulo de Elasticidad de Cizalla (G) / Módulo de Young Módulo de Compresibilidad (K)
Resistividad	Cálculo de la Presión Poral
Medidas de Presión (RFT, MDT)	Presión Poral - Tipos de Fluidos
Sísmica de Pozo (Borehole Seismic)	Predicción de la Presión Poral Correlación

Módulos Elásticos Dinámicos

$$E = \frac{\rho v_s^2 (3v_c^2 - 4v_s^2)}{(v_c^2 - v_s^2)} = \text{Módulo de Young}$$

$$\nu = \frac{v_c^2 - 2v_s^2}{2(v_c^2 - v_s^2)} = \text{Coeficiente de Poisson}$$

$$\mu = \rho v_s^2 = \text{Módulo de Cizalla}$$

$$K = \rho \left(v_c^2 - \frac{4}{3} v_s^2 \right) = \text{Módulo de Compresibilidad}$$

En donde

ρ = Densidad

v_c = Velocidad compresional

v_s = Velocidad de cizalla (Shear)

Comparación entre Módulos de Elasticidad Estáticos y Dinámicos

- Las mediciones dinámicas acústicas son de pequeña amplitud y frecuencia limitada.
- La aproximación más real es usar una calibración de datos sobre coronas y registros.
- El Módulo de Young Dinámico es normalmente mayor que el Estático.



ACTIVIDAD 12

Mecánica de Rocas, Modelo de Elasticidad. Constantes Elásticas. Propiedades Mecánicas de las Rocas. Resistencia. Criterios de Rotura. Anisotropía. Métodos para medir las propiedades de las rocas.



RESUMEN

En este capítulo, se describió brevemente la Mecánica de Rocas, la que nos permite definir el comportamiento de las mismas en respuesta a las alteraciones producidas por cambios en los esfuerzos, movimiento de fluidos, etc. Se asume que la aproximación más práctica para el cálculo de esfuerzos en las rocas es el modelo de Elasticidad Lineal, en donde son importantes las constantes de elasticidad (p. ej. Módulo de Young y Coeficiente de Poisson), inherentes a los diversos tipos litológicos. Vimos las propiedades mecánicas de las rocas, tales como la resistencia a diferentes tipos de roturas, y conceptos como la Anisotropía de las características físicas y las Fracturas Naturales y Fallas.

Por último nos referimos a las formas de medición de estas propiedades mecánicas, las que se realizan por medio de ensayos sobre muestras en laboratorio (estáticas), o por medio de registros eléctricos (dinámicas).

V. GEOMECAÁNICA EN YACIMIENTOS TIPO SHALE

A escala de pozo, la geomecánica es esencial para caracterizar la estabilidad de las rocas al ser atravesadas, predecir la estabilidad de los punzados y diseñar los programas de estimulación por fracturas hidráulicas.

A escala de yacimiento, la geomecánica ayuda a modelar el movimiento de los fluidos y a predecir cómo la remoción o inyección de fluidos produce cambios en la permeabilidad, la presión y los esfuerzos locales en las rocas, que pueden generar diversos efectos en el rendimiento de los reservorios.

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS GEOMECAÁNICOS NUMÉRICOS

Un Modelo Geomecánico Numérico (MGN), consiste en la recolección de los datos necesarios para efectuar predicciones cuantitativas y cualitativas del subsuelo. Estos datos incluyen los esfuerzos in-situ, la presión poral, las propiedades mecánicas y la resistencia a la rotura de las rocas, e información no numérica, como la presencia de fracturas naturales. Un MGN puede ser simple o complejo, unidimensional (1D), bidimensional (2D), tridimensional (3D) y en cuatro dimensiones o 4D – las tres dimensiones espaciales más el tiempo.

Construcción de un Modelo Geomecánico:

Consiste en la caracterización de los siguientes atributos:

- El esfuerzo vertical o litostático (σ_v, s_v).
- La magnitud y orientación del esfuerzo horizontal mínimo ($\sigma_{hmin}, Shmin$).
- La magnitud y orientación del esfuerzo horizontal máximo ($\sigma_{hmax}, Shmax$).
- La presión de poros (p_o).
- Las propiedades mecánicas (elásticas y de resistencia a la cizalla), de las rocas.

Construcción de un Modelo Geomecánico 3D:

Sobre la base de modelos geológicos estructurales, de la historia de los esfuerzos en el área y de modelos geomecánicos 1D, se puede construir una malla tridimensional a fin de estudiar la variabilidad espacial del modelo geomecánico. La ventaja de construir este modelo tridimensional es que permite extrapolar la información de los pozos y superponerla sobre las propiedades que se calculen a partir de un volumen sísmico. Otra ventaja es que este modelo 3D combina los marcadores de formaciones geológicas en los diferentes pozos, de acuerdo a su posición dentro de las estructuras geológicas. Esto permite una comparación de la información de registros de pozo a pozo.

APLICACIONES DE LA GEOMECAÁNICA EN PERFORACIÓN

En las operaciones de perforación el uso de la geomecánica es fundamental para el análisis de estabilidad, lo cual estará ligado al diseño del pozo (puntos de entubamiento, densidades del lodo), y para definir los riesgos en distintas trayectorias.

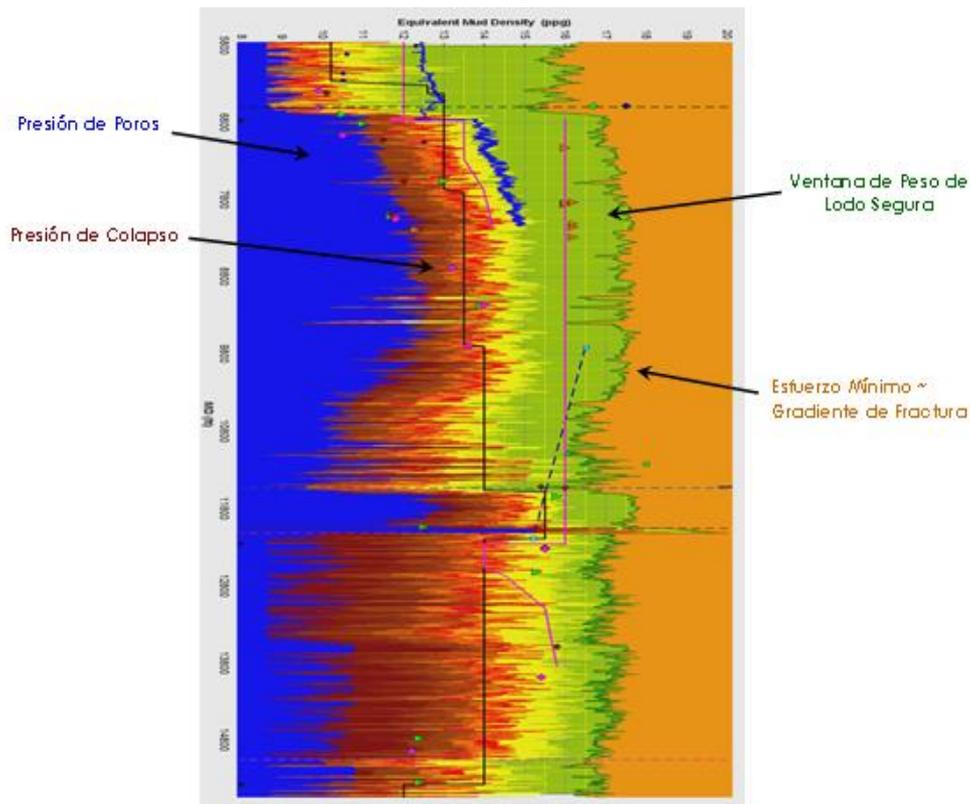
Análisis de la Estabilidad de Pozo

Los objetivos principales de un pozo son los de llegar en tiempo y forma al reservorio, evaluarlo por completo y ponerlo en producción.

- Debemos conocer los esfuerzos alrededor del pozo
- Además debemos tener una idea razonable de las **Propiedades Mecánicas de las Rocas** a perforar (fundamentalmente la **Resistencia a la Cizalla**).
- Con estos dos parámetros podremos comparar el "**esfuerzo máximo de cizalla generado en las paredes del pozo**" con la "**resistencia a la cizalla de las rocas**", determinando así lo que llamamos **Presión de Colapso**.
- Necesitamos también saber si la roca ha sido debilitada por la química del lodo.

Otra forma de estabilidad se basa en la relación entre la **Presión Poral** y la Densidad del Lodo, ya que si se produce un desequilibrio entre ambos, pueden ocurrir influjos de fluidos hacia el pozo (agua, petróleo, gas), o pérdidas de lodo hacia las formaciones.

Al aplicar el MGN, buscaremos una Ventana de Lodo Segura durante la perforación. El siguiente es un gráfico que nos ayuda a visualizar dicha ventana:



O sea que el peso del lodo a utilizar debe caer dentro de los valores en verde para:

- a. Que no haya influjos de fluidos (Presión Poral, zona azul)
- b. Evitar derrumbes (Presión de Colapso, zona marrón-amarilla)
- c. Impedir la creación de fracturas inducidas y la correspondiente pérdida de lodo hacia las formaciones (Presión de Fractura, zona naranja).

Diseño de las Secciones de un pozo

Las variaciones en las presiones de poro, de colapso y de fractura, durante el avance de la perforación, serán generalmente los parámetros a tener en cuenta para definir la profundidad de entubación de cada sección de un pozo.

Cuando se cierre la ventana segura del lodo (p.ej. debido a un aumento en la presión de poros), habrá que bajar un revestimiento para cubrir las zonas con menor presión.

Control de Estabilidad del Pozo en Tiempo Real

Durante las operaciones de perforación, es muy importante monitorear el comportamiento de parámetros que indican inestabilidad, tales como el atascamiento de las herramientas en el pozo, o el influjo de fluidos de formación.

Algunos Parámetros de Control:

- Análisis de Derrumbes (anisotropía de esfuerzos, presión poral, zonas fracturadas)
- Picos en los Valores de Torque (indican potenciales problemas de limpieza del pozo)
- Variaciones de la Presión de Bomba (ingreso de fluidos de Fm de diferente densidad)
- Variaciones en los Niveles de Pileta (influjos o pérdidas de lodo)
- Incremento en los Valores del Registro de Gas Combustible (aumento de presión poral)
- Detección de Gases Peligrosos (H₂S, CO₂)

Análisis de Derrumbes:

Derrumbe ANGULAR: Morfología irregular. Originan “breakouts” en registros de imágenes.

Mecanismo de rotura: Indican derrumbe por “**compresión**” de la roca (anisotropía de esfuerzos tangenciales).

Acción Correctiva: Dependiendo de la cantidad: Aumentar Densidad del Lodo.

Derrumbe en ASTILLAS / ESCAMAS: Morfología: elongada / escamosa / astillosa

Mecanismo de rotura: Sugieren colapso por **tensión** (sobrepresión)

Acción Correctiva: Aumentar Densidad del Lodo / DCE

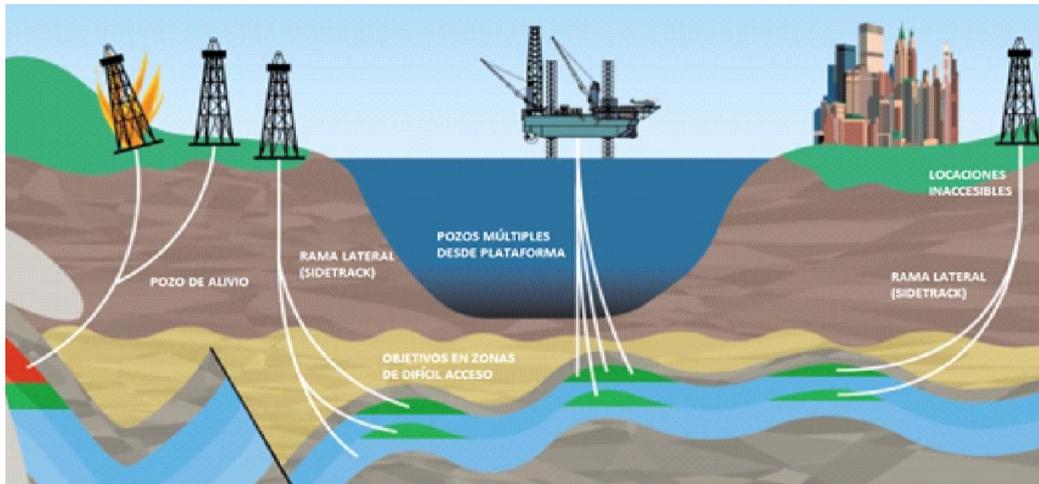
Derrumbe TABULAR / en BLOQUES: Morfología tabular (tamaño grande). Superficies planas paralelas frecuentes.

Mecanismo de rotura: Planos de debilidad pre-existent (fracturas / fisilidad / estratificación).

Acciones Correctivas: Minimizar cambios en la Densidad de Lodo y DCE

Trayectoria de Pozos

En muchos casos, para alcanzar los objetivos geológicos del programa de perforación, o por otras razones, los pozos deben seguir trayectorias especiales. Por lo tanto, la orientación del sondeo respecto de los esfuerzos in-situ, de los buzamientos de las capas a atravesar, de zonas de falla, etc., van a determinar cuál será la trayectoria más conveniente.



En zonas tales como el mar o la selva, comúnmente se utiliza la menor cantidad de locaciones para desarrollar un yacimiento, desde donde partirán una serie de pozos en distintas direcciones. Cada uno de estos pozos necesitará un tratamiento geomecánico distinto de acuerdo con la trayectoria proyectada.

En los **Yacimientos del Tipo Shale**, la zona productiva normalmente se perfora en forma horizontal a través del reservorio, pudiéndose realizar ramas en distintas direcciones desde una plataforma. Por lo tanto, es imprescindible tener lo más ajustado posible el Modelo Geomecánico.

APLICACIONES DE LA GEOMECÁNICA EN DESARROLLO

Geometría de la Distribución de Pozos

Debido a la baja permeabilidad de los reservorios en los **Yacimiento Tipo Shale**, el desarrollo de estos campos requiere de la perforación de una considerable cantidad de pozos.

La distribución y orientación areal de los pozos va a estar dictada básicamente por factores geomecánicos, ya que los esfuerzos locales van a determinar en qué dirección preferencial se extenderán las fracturas hidráulicas en un pozo, que no deben interferir con las fracturas de pozos vecinos, para conseguir un drenaje eficiente del yacimiento. La anisotropía que presentan las lutitas, también va a influir en esas direcciones preferenciales.

Espaciamiento Entre Pozos

La distancia de separación entre los pozos es una de las más importantes decisiones a tener en cuenta en el desarrollo de este tipo de yacimientos, ya que éstos deben estar ubicados lo más cercano posible entre sí como para permitir el drenaje de la mayor cantidad de HC, pero también deben estar a una distancia suficiente como para minimizar la **interferencia entre las fracturas hidráulicas**.

Dentro de los rasgos geomecánicos, a tener en cuenta, están la orientación y magnitud de los esfuerzos locales que junto con las características mecánicas de la roca van a definir las

direcciones preferenciales y la geometría (longitud y altura) de las fracturas hidráulicas a realizar.

En rocas que tienen una permeabilidad matricial baja, como sucede en los Yacimientos Tipo Shale, será mejor elegir un espaciamiento lo más cercano posible, lo cual va a estar directamente ligado al programa de fracturas hidráulicas de Terminación.

Orientación de la Trayectoria de Pozos

La creación de fracturas transversales en pozos horizontales incrementa el contacto con el reservorio. Estas fracturas son aquellas cuya dirección es perpendicular a la trayectoria del pozo. Las fracturas longitudinales, paralelas al pozo, resultan de trayectorias perforadas en la dirección del esfuerzo horizontal máximo.

APLICACIONES DE LA GEOMECÁNICA EN TERMINACIÓN

La estimulación de Yacimientos No Convencionales realizada por medio de la fracturación hidráulica requiere de la geomecánica como herramienta de predicción del comportamiento de los esfuerzos, la presión de poros y de la mecánica de rocas.

Aspectos sobre Fracturación Hidráulica

La Fracturación o Estimulación Hidráulica (fracking) es una técnica imprescindible para la extracción de gas y petróleo en los **Yacimientos Tipo Shale**.

El propósito de crear estas fracturas es aumentar la cantidad de exposición del reservorio de baja permeabilidad y proveer un camino permeable a través del cual los fluidos del reservorio puedan moverse hacia el pozo.

La FH consiste en el bombeo de un fluido viscoso (una mezcla de gel de polímero y un agente de sostén), en un intervalo aislado del pozo, con caudales y presiones suficientes como para fracturar la roca. Se intenta generar así una fractura por tensión, mientras que el agente de sostén cumple la función de mantener abierta la fractura, que se va a cerrar una vez que se deje de bombear.

Factores que afectan la Orientación y Forma de Fracturas Hidráulicas

- Campo de esfuerzos in-situ
- Concentración de esfuerzos alrededor del pozo
- Contraste entre los esfuerzos de la zona a fracturar y las capas superiores e inferiores
- Propiedades mecánicas de las rocas - Anisotropía de las Lutitas - Fracturabilidad
- Presión de poros
- Profundidad (magnitud de esfuerzos y presión)
- Presencia de fracturas naturales (dirección preferencial de propagación)
- Orientación de los punzados

Campo de esfuerzos in situ: es un factor preponderante en la dirección en que se va a propagar una fractura y si ésta va a ser vertical, inclinada u horizontal.

Concentración de esfuerzos alrededor del pozo: en las paredes y en las cercanías de una perforación se genera un estado de esfuerzos diferente al del campo local, por lo tanto, en un pozo abierto (sin revestimiento), las fracturas se iniciarán y propagarán de acuerdo con los esfuerzos alrededor del orificio, mientras que al alejarse del mismo pueden reorientarse.

Magnitud y contraste de esfuerzos: la magnitud y el contraste de los esfuerzos entre la roca reservorio y la roca sello determinan la energía necesaria para lograr la fractura.

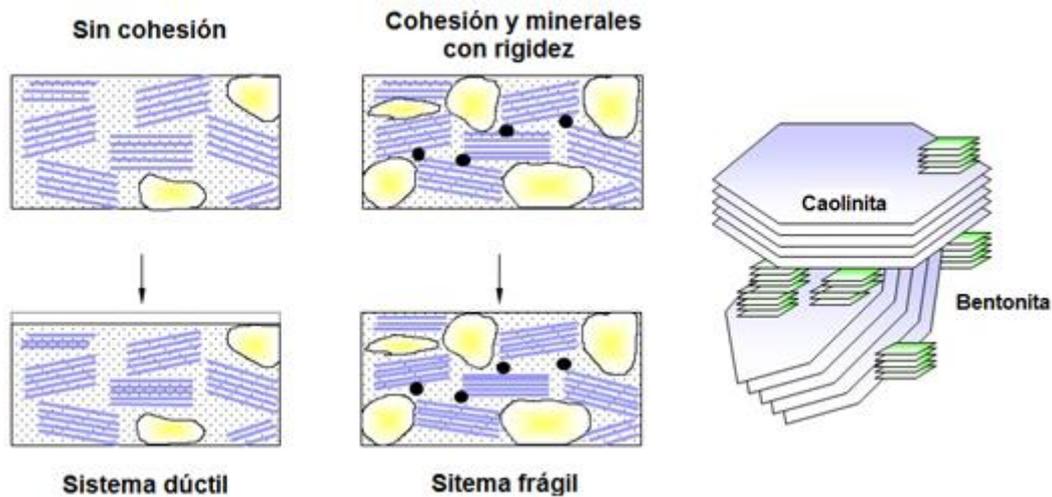
Propiedades Mecánicas de las Rocas: el Módulo de Young (E) y el Coeficiente de Poisson (ν) son propiedades de resistencia elástica, que indican la manera como la roca se deformará ante los esfuerzos aplicados, repercutiendo así en la geometría de la fractura.

Anisotropía en Lutitas

En areniscas y calizas, que en general presentan una baja anisotropía, la dirección de propagación de las fracturas inducidas es paralela al σ_{HMAX} .

Las lutitas exhiben una anisotropía significativa.

Anisotropía Mecánica: las propiedades *elásticas* de las lutitas están relacionadas con la cantidad de materiales blandos contenidos en las mismas (arcillas y materia orgánica). Las lutitas consisten de una matriz muy fina y porosa de arcilla, mecánicamente débil, con incrustaciones de granos tamaño limo y arena, mecánicamente resistentes, cuyas proporciones controlan las propiedades mecánicas del volumen de roca.

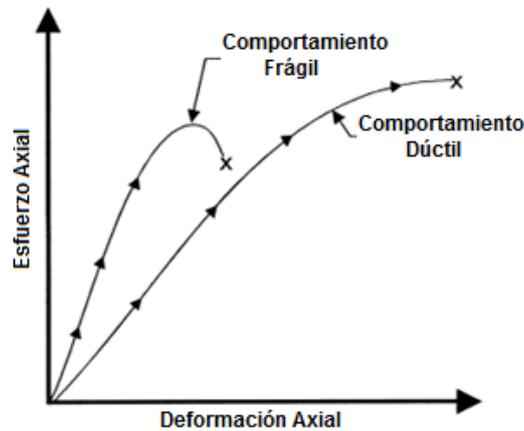


Anisotropía de la fábrica: en las lutitas, la anisotropía de la fábrica está provocada por una red de planos de debilidad (fisilidad y estratificación), que pueden cambiar la orientación de las fracturas, ya que éstas tienden a propagarse por los planos de debilidad.

Fracturabilidad en Lutitas

La fracturabilidad de una roca normalmente se describe en términos de fragilidad vs ductilidad. En el caso de las lutitas, estos términos están relacionados con la presencia de *minerales duros* y con la *presión interna* de la lutita.

Las formaciones de lutitas ricas en sílice son candidatas óptimas para la fractura hidráulica (por ej. el nivel productivo de Vaca Muerta)



Cuanto mayor sea la presión interna, con más facilidad se producirán las fracturas, ya que la formación estará más cerca de su presión de rotura.

Nota: La Formación Vaca Muerta se encuentra altamente sobrepresurizada, presentando gradientes de presión entre 0.67 psi/ft hasta 0.97 psi/ft. Este dato es particularmente importante especialmente para la producción de gas y condensado donde la presión de la formación juega un papel importante en la producción.

Presencia de Fracturas Naturales

Otro aspecto clave en el desarrollo de Yacimientos Tipo Shale es la existencia de **fracturas naturales** y de planos de debilidad que pueden dar lugar a geometrías de fractura complejas durante la estimulación.

En general, el impacto de la presencia de fracturas naturales o fisuras y una gran anisotropía en la roca originan:

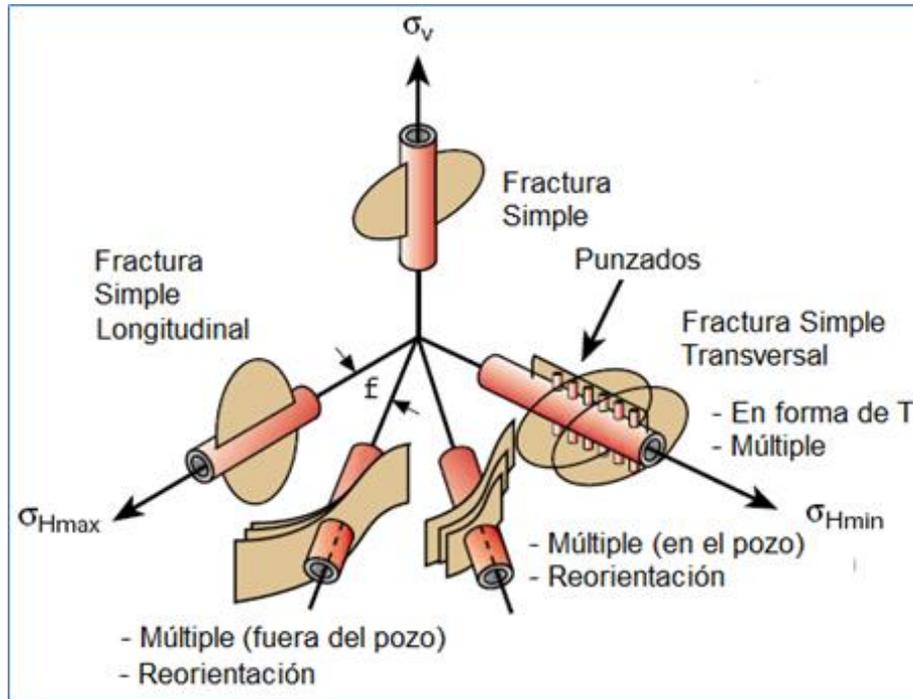
- Propagación de fracturas en orientaciones variables.
- Un esfuerzo horizontal diferencial muy bajo por anisotropía.
- Amplia red de fracturas secundarias (nube de fracturas).

Sin embargo, las fracturas naturales también pueden colaborar con un mejor drenaje del reservorio.

Propagación de Fracturas Hidráulicas

La experiencia de campo, incluyendo el monitoreo microsísmico, sugiere que en la mayoría de los casos no se crean fracturas simples de dos alas durante la FH, sino redes de fracturas inducidas complejas, en ocasiones interactuando con planos de debilidad preexistentes, tanto en roturas Modo I (de apertura), como en Modo II (de cizalla).

Algunos de estos conceptos se ilustran en la siguiente figura:



Esfuerzos locales y propagación de fracturas inducidas

Modelado de Fracturas Hidráulicas

Es muy importante el diseño previo de las fracturas, lo que se realiza mediante simuladores (softwares), a partir de modelos matemáticos. Una vez definida la geometría de la fractura deseada se vuelca toda la información en el simulador: *propiedades petrofísicas y mecánicas de las rocas, magnitud y orientación del campo de esfuerzos, trayectoria del pozo respecto de esos esfuerzos, factor de daño, características de los fluidos del reservorio, parámetros de bombeo a utilizar y propiedades del fluido de fracturación y de los agentes de sostén.*

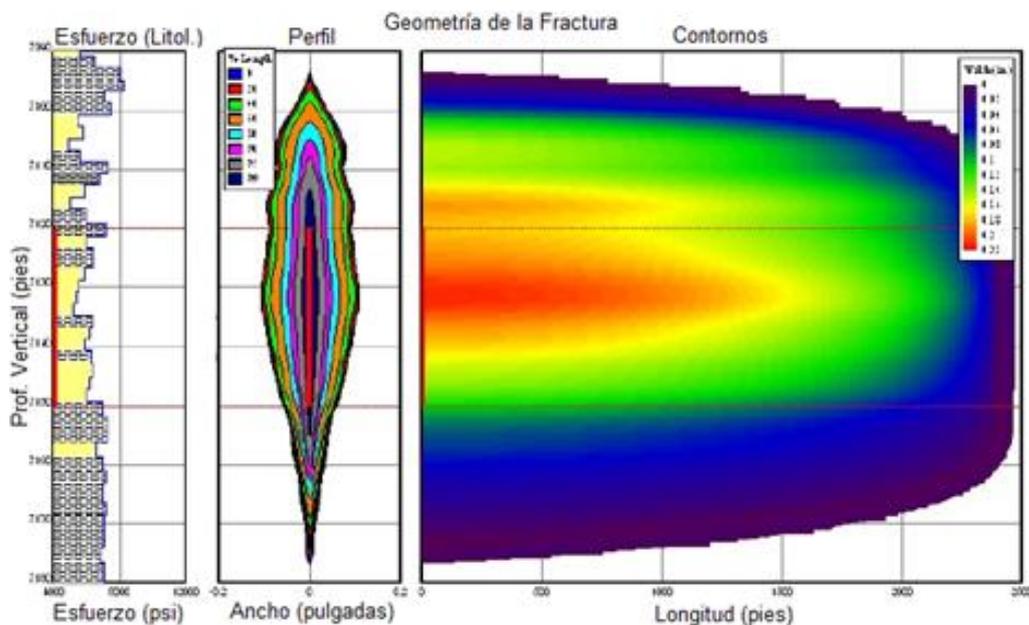
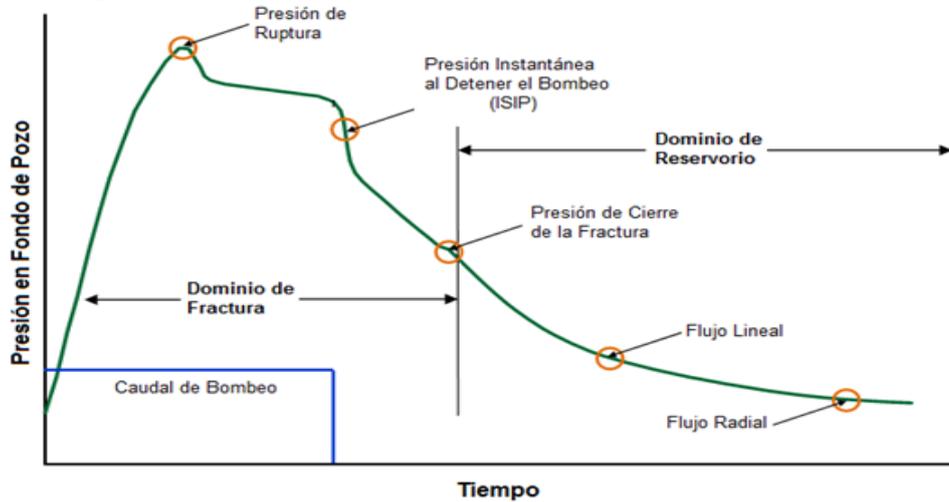


Gráfico de la geometría de una Fractura Hidráulica generado por un simulador

Antes de proceder con la operación definitiva de fracturación, se realiza una prueba corta de fractura (llamada Minifrac) para cotejar los datos reales con los del simulador. La siguiente figura muestra un gráfico de un Minifrac:



Monitoreo Microsísmico

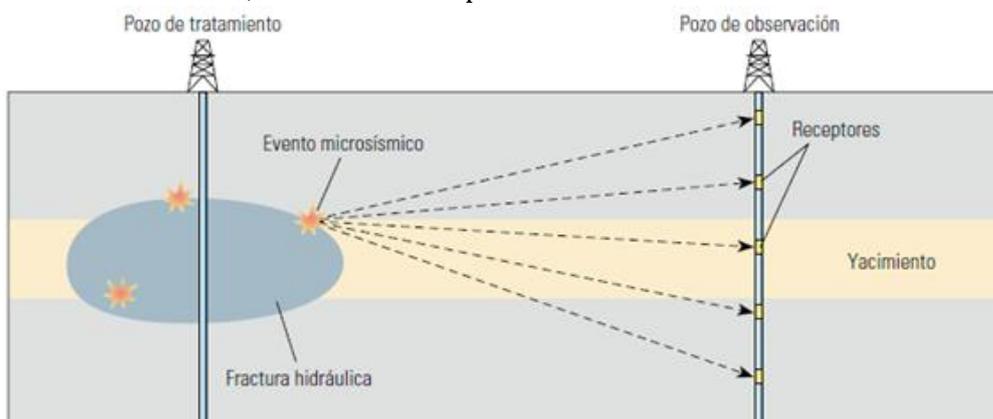
La microsísmica surgió de la sismología de terremotos y se concentra en micro-temblores (es decir, con una magnitud menor a cero, ML 0). Estos micro-temblores pueden ser detectados por equipos sensibles como geófonos y acelerómetros.

El monitoreo microsísmico básico busca responder tres preguntas fundamentales:

- ¿Cuándo ocurrió el evento microsísmico?
- ¿Dónde ocurrió el evento microsísmico?
- ¿Qué tan grande fue el evento microsísmico?

El mapeo microsísmico tradicional determina la ubicación y magnitud del evento. Cuando la microsismicidad es observada a través del tiempo, se pueden empezar a ver patrones de sismicidad relacionados con actividades de fracturación y de producción.

Para registrar las ondas generadas por la fracturación hidráulica en un pozo de tratamiento, se colocan geófonos de componentes múltiples en un pozo de observación, los que miden los tiempos de arribo de las ondas compresionales o primarias (P) y de las ondas de cizalla o secundarias (S). Además, se puede determinar el ángulo azimutal del movimiento de las partículas de las ondas P, formado con respecto al evento.



Pozo de tratamiento y pozo de observación microsísmica

Elección de la Zona Objetivo, Sweet Spot

Se describe al **sweet spot** como aquella zona que presenta una óptima calidad de yacimiento y de fracturación hidráulica:

Yacimiento: Espesor, Porosidad, Permeabilidad, COT, Saturación

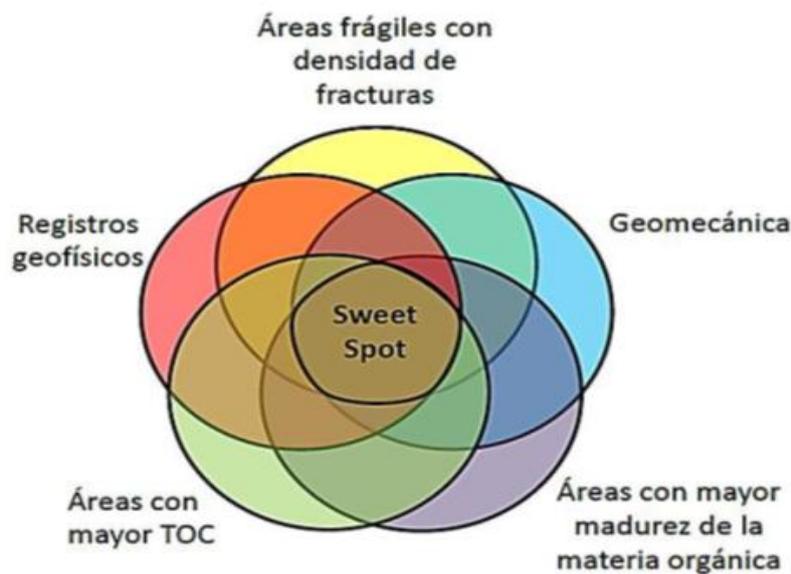
Fracturación Hidráulica: Fragilidad, Condiciones de Esfuerzos Favorables, Presión de Yacimiento, Fracturas Naturales

Hay condiciones geomecánicas que son favorables para lograr la máxima productividad mediante operaciones de estimulación. Identificar los *sweet spots* geomecánicos dentro de los *sweet spots* de la calidad del reservorio es, por lo tanto, esencial para la mejor ubicación de los pozos y las fracturas hidráulicas.

Una vez perforado el pozo es fundamental integrar la información los datos geofísicos, análisis de laboratorio y los registros de pozo, con la finalidad de identificar rocas con riqueza orgánica y rocas susceptibles de ser fracturadas.

Los análisis de laboratorio se emplean para la definición de:

COT, Madurez, Porosidades, Gas libre y gas adsorbido, Propiedades mecánicas y físicas de la roca.



Factores clave en la determinación del sweet spots (IMP, 2013)

Basándose en los resultados del análisis geomecánico de *sweet spots*, se conseguirá una decisión óptima del desarrollo, a partir de la geomecánica y de su integración con la producción.

APLICACIONES DE LA GEOMECÁNICA EN PRODUCCIÓN

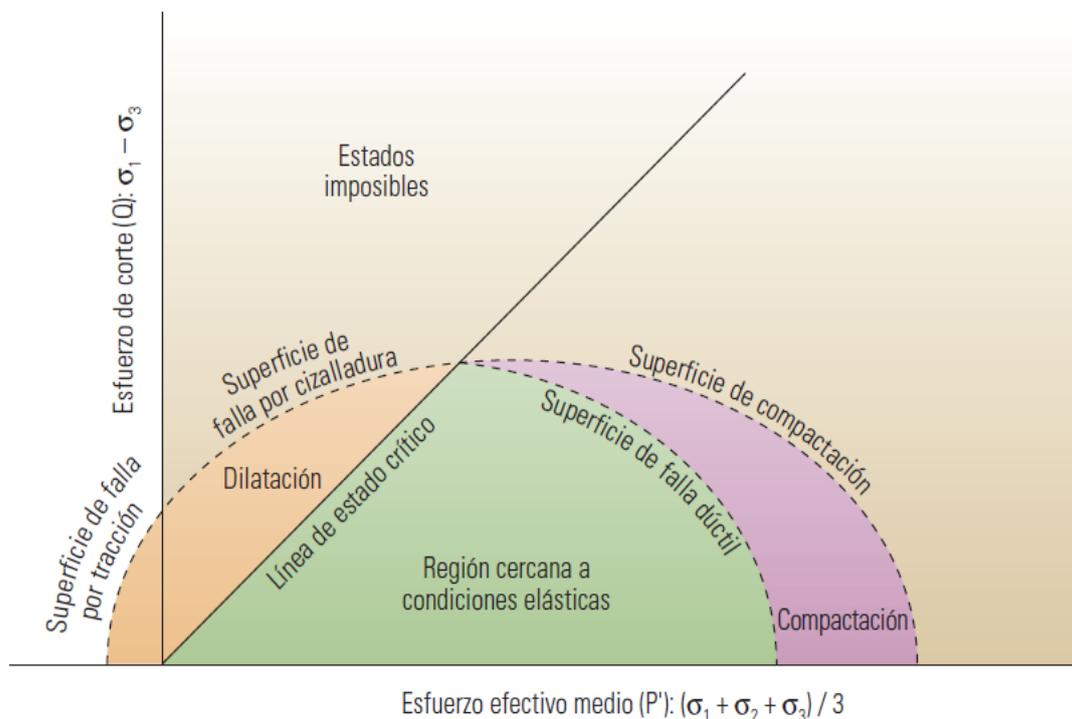
Los esfuerzos y la presión actúan sobre todo pozo y yacimiento. Los procesos de perforación, estimulación, producción e inyección modifican estos esfuerzos y presiones, a veces en detrimento del reservorio. Mediante técnicas de medición, modelado y monitoreo geomecánicos, se pueden anticipar los efectos de los esfuerzos y la presión a medida que éstos cambian a lo largo de la vida productiva de un campo petrolero.

La **cizalladura de una tubería de revestimiento**, la **compactación del yacimiento**, la **subsistencia en superficie** y la **reactivación de fallas** generando la **pérdida de sello del yacimiento** son manifestaciones de cambios en los esfuerzos ejercidos sobre una formación.

En todo yacimiento el modo de deformación y rotura está impuesto por la relación existente entre los cambios producidos en el esfuerzo máximo y en el esfuerzo mínimo, la que se denomina trayectoria de los esfuerzos (K), y es convencionalmente, la relación entre el cambio producido en el esfuerzo horizontal mínimo efectivo y en el esfuerzo vertical efectivo, durante la caída de presión del fluido por la producción y respecto:

$$K = \Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1$$

Esto también puede expresarse en términos de cambios del esfuerzo de corte (Q) y cambios del esfuerzo medio ($P' = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$), como se muestra en el siguiente diagrama P' - Q .



Una situación de esfuerzos relativamente bajos implica que la roca fallará por esfuerzo de corte, generando un plano de cizalla. La resistencia a la cizalladura se incrementa al incrementarse el esfuerzo de confinamiento lateral que actúa sobre la roca. Donde se observan situaciones de mayores esfuerzos, la roca experimenta un proceso de compactación o reducción de la porosidad.

El esfuerzo y la presión de poro están intrínsecamente ligados. Bajo presión, los fluidos alojados en los poros a menudo absorben parte del esfuerzo impuesto sobre una formación. Por eso, la presión de poro es una componente importante del esfuerzo neto aplicado a un cuerpo de roca.

Pronóstico de producción

La predicción del comportamiento productivo de estos reservorios no convencionales es mucho más compleja que la de los reservorios tradicionales. Usualmente se utilizan familias de curvas para predecir el comportamiento, pero no siempre funcionan. Su optimización se basa en el proceso de “prueba y error”, por lo que requieren grandes inversiones –en tiempo y dinero– para conseguir el know-how necesario.

Los pronósticos extendidos en el tiempo son altamente cuestionables, porque no hay dos yacimientos iguales, aunque estén en la misma área. Así, los modelos actualmente en desarrollo para estos reservorios no convencionales consideran varios factores, entre ellos se cuentan:

- Las propiedades geofísicas y geomecánicas de la roca.
- Las propiedades del reservorio artificial inducido luego de la estimulación.
- La interpretación microsísmica registrada.



RESUMEN

En este capítulo, se desarrolló el concepto de Modelo Geomecánico Numérico y de cómo se utiliza en las diferentes etapas del desarrollo de un yacimiento.

CONCLUSIÓN A MODO DE CIERRE

En este módulo, hemos hecho un recorrido por las tres herramientas fundamentales que nos ofrece y en las que se apoya la Geomecánica, comenzando por Esfuerzos, siguiendo por Presión Poral, para terminar con Mecánica de Rocas.

Vimos métodos mediante los que se pueden cuantificar estos parámetros, algo que nos permite caracterizar el estado en que se encuentran las rocas en el subsuelo, para intentar reconocer cómo van a reaccionar a las alteraciones que se generan en las distintas etapas de desarrollo de un yacimiento, en particular aquellos del Tipo Shale.

Espero que este curso, no solamente les haya servido como base para comprender estos lineamientos, sino también que les haya despertado cierta inquietud por continuar indagando, ya que, obviamente, es un tema mucho más extenso de lo que se ha presentado.

Por otra parte, continuaremos en contacto, especialmente a partir de las dudas que les surjan y las preguntas correspondientes, las que espero responder de la manera más didáctica y clara posible.

Un grato saludo a todos los participantes y mucha dedicación y suerte en la evaluación final.

BIBLIOGRAFÍA

Bishop, K. (2015). Mechanical Stratigraphy of the Vaca Muerta Formation. Mines Theses & Dissertations Colorado School of Mines.

Blanco Ybáñez y Vivas Hohl. (2012). Nociones de ingeniería aplicada a reservorios No Convencionales. Petrotecnia. Recuperado de http://www.petrotecnia.com.ar/5_2012/Nociones.pdf

Canoba, C. y Fraga, H. (2004). Propiedades elásticas de las rocas (Traducción). Universidad Nacional de Rosario. Recuperado de https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Elasticidad_de_rocas.pdf

Erling Fjar R. M.; Holt A. M.; Raaen, R.; Risnes, P. (2008). Petroleum Related Rock Mechanics. 2nd Edition, Vol. 53. Elsevier Science

Fernández, A. y Alvarellós, J. (2011). Modelos Geomecánicos 3D y su creciente aplicación en la industria petrolera. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 12(1) 151.

Gholami, R. Moradzadeh, A. Rasouli, V. Hanachi, J. (2014). Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 6, (1), 13-25.

Grandi, S.; Rao, R., & Toksoz, M. (2002). Geomechanical Modeling of In-Situ Stresses Around a Borehole. Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory

Jaeger, J. C.; Cook, N. G. W., y Zimmerman, R.W. (2007). Fundamentals of Rock Mechanics. 4th Edition. Ed. Blackwell Publishing. Recuperado de <https://bayanbox.ir/view/6304025301215555268/John-Jaeger-N.-G.-Cook-Robert-Zimmerman-Fundam-BookFi.org.pdf>

Les Bennett y al. (2006). La fuente para la caracterización de fracturas hidráulicas. Oilfield Review, 17, (4). Schlumberger. Recuperado de https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish06/spr06/p46_61.pdf

Le Calvez y al. (2016). Fracturamiento Hidráulico: Valoraciones a partir del monitoreo microsísmico. Oilfield Review, 28, (2). Schlumberger. Recuperado de https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish16/may16/02-microseismic.pdf

Moos, D. (2012). The Importance of Stress and Fractures in Hydrofracturing and Stimulation Performance: A Geomechanics Overview. Search and Discovery Article

Santos de Alencar, A. T. (2014). Resistencia Anisótropa de las Rocas. Trabajo Fin de Master. Director Dr. Olalla Marañón. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid

Shahkarami, A.; Wang, G.; Belyadi, H. Horizontal Well Spacing and Hydraulic Fracturing Design Optimization: A Case Study on Utica-Point Pleasant Shale Play. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). DOI 10.15530-urtec2016-2459851

Sosa Massaro, A.; Barredo, S.; Drosina, M.; Bergese, F.; Leslabay, P.; Blanco, S. y Paterlini, F. (2014) Vaca Muerta, del campo al ensayo mecánico de laboratorio. Petrotecnia. Instituto Tecnológico de Buenos Aires.

Wu, B., Addis, M. A., Last, N.C. (1998). Stresses Estimation in Faulted Regions: The Effect of Residual Friction. SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, 8-10 July, Trondheim, Norway



ARTICULADO POR:

DIRECCIÓN DE MODALIDADES
Y TECNOLOGÍAS EDUCATIVAS

COORDINADORAS
ELENA CALIGULI
EVANNA FUENMAYOR

SECRETARÍA DE INVESTIGACIONES
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

CONSEJO FACULTARIO
DE INGENIERÍA