

tología.

ripción litológica de cualquier
casos a alguna síntesis de su
ta de inconvenientes, como por
intercalaciones de areniscas en
ue en caso de programar perfo-
por terminado esos trépanos en
ación de trépanos requiere una

uantificación para el geólogo.
ción subjetiva directa que se
n ciertos comportamientos gene-
esperar gradientes de presión
r través de la sísmica se reconoce
ogradante. Por el contrario,
viamente enterradas a grandes
posteriormente, serán casi
n muy abrasivas.

a el soterramiento anterior al
de una cuenca que luego fue
on zonas equivalentes pero no
répanos PDC. El error costó el
aciones de pesca, porque no se
rforar había soportado un adi-
ta hace muy recientemente. La
factor también motivó que se
anos demasiado blandos.

a contribución en este aspecto
s y de las anomalías del gra-
erfiles de pozos, que son tra-
lamente agregar que la litolo-
ro geológico pueden afectar su
o debe prestar toda esa infor-

factores importantes: la con-
vivencia es la base para el
citación, en este caso, de los
más al tanto de la perforación
su información para utilidad
to al perforador, cuanto más
nitaciones de la geología, más
os sectores.

Presión de Poro y Gradiente de Fracturación a partir de Perfiles

Hervé COLIN - CIG Schlumberger SA

Jornadas de Perforación de Pozos Profundos
Vespucio (Salta) 13-17 Agosto 1990

Introduction

Para enfrentar los problemas relacionados con la perforación en zonas difíciles se dispone de varias técnicas relacionadas con el perfilaje en pozo abierto.

- **Detección de zonas de sobrepresión** : A partir del análisis de perfiles se pueden determinar gradientes normales de compactación y ubicar zonas anómalas.
- **Determinación de gradiente de fracturación de la formación** : A partir de la medición de las velocidades compresionales y de corte de la ondas sonicas y de la densidad de la formación se puede estimar el punto de ruptura de las formaciones.
- **Medición de presión** : El monitoreo continuo de la presión de formación con la herramienta RFT permite optimizar el programa de lodo y determinar anomalías de presión.
- **Predicción de zonas anómalas** : El Perfil Sísmico Vertical proporciona datos sísmicos sobre la formación debajo del trepano. La inversión de la traza sísmica obtenida permite obtener un perfil de impedancia acústica, el cual puede mostrar anomalías relacionadas por ejemplos a zonas de sobrepresión.

En este trabajo se presentaran las dos primeras técnicas, en un intento de resumir lo que ya fue publicado por distintos autores. Las técnicas descritas se aplicaran a ejemplos del Noroeste Argentino.

Introduction

la perforación en zonas difíciles se
ilaje en pozo abierto.

rtir del análisis de perfiles se pueden
n y ubicar zonas anómalas.

ón de la formación : A partir de
de corte de la ondas sonicas y de la
unto de ruptura de las formaciones.

o de la presión de formación con la
a de lodo y determinar anomalías de

Sísmico Vertical proporciona datos
o. La inversión de la traza sísmica
cia acústica, el cual puede mostrar
sobrepresión.

s técnicas, en un intento de resumir
as técnicas descritas se aplicaran a

Detección de zonas de sobrepresión

§1.1 Compactación

La compactación es la reducción del volumen de los sedimentos debida a la compresión. La primera parte de esta reducción corresponde a una reducción del volumen poral. Generalmente, la compactación es el resultado de la acción mecánica de la sobrecarga generada por la relación subsidencia/cantidad de sedimentos. Por eso el esfuerzo principal es vertical y dirigido hacia abajo. Sin embargo, un aumento de compresión puede ocurrir debido a fuerzas resultantes de movimientos tectónicos en varias direcciones. Este ultimo tipo de compresión ocurre generalmente después de la compactación.

Segun Fertl (1976), la compactación depende de varios parámetros que son:

- σ : el esfuerzo sobre el sistema.
- ρ : la densidad de la formación.
- Φ : la porosidad de la formación.
- k : la permeabilidad de la formación.
- D : la profundidad
- t : el tiempo desde el comienzo de la subsidencia.
- c : la relación de compresibilidad.
- v : el parámetro de velocidad para los componentes del sistema.
- V : las relaciones de volumen.

El esfuerzo producido por la subsidencia es función de la fuerza por unidad de superficie, y se representa con σ . Su unidad es el *Pascal* (newton/m²) y su dimensión es kg/m/s².

$$\sigma = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Superficie}} \quad (1.1)$$

1.1. Compactación

La fuerza (unidad: *Newton*) generada por los sedimentos es igual al producto de su masa, M , por la aceleración de la gravedad, g . La ecuación (1.1) se transforma en:

$$\sigma = \frac{M \cdot g}{\text{Superficie}} \quad (1.2)$$

La masa de los sedimentos es igual al producto de su densidad promedio (g/cm^3) por su volumen (superficie $\times$ espesor).

$$\sigma = \frac{\rho_b \cdot g \cdot \text{Superficie} \cdot h}{\text{Superficie}} \quad (1.3)$$

o simplificando, obtenemos la *presión de sobrecarga*

$$\sigma = \rho_b \cdot g \cdot h \quad (1.4)$$

donde:

- ▷ σ = la presión de sobrecarga en Pascal.
- ▷ ρ_b = la densidad del sedimento, sólido y agua (g/cm^3).
- ▷ g = aceleración de la gravedad (m/s^2).
- ▷ h = espesor en metros.

Para las formaciones porosas ρ_b se puede definir por:

$$\rho_b = \phi \cdot \rho_w + (1 - \phi) \cdot \rho_{ma} \quad (1.5)$$

donde:

- ▷ ρ_w = densidad promedio del fluido en g/cm^3 .
- ▷ ρ_{ma} = densidad promedio de la matriz en g/cm^3 .
- ▷ ϕ = porosidad promedio de la formación.

La presión de sobrecarga aumenta con la profundidad, y como primera aproximación se puede asumir que es proporcional a la profundidad. Sin embargo no es el caso porque la densidad de la roca aumenta con la profundidad. Asumiendo un incremento uniforme, podemos definir un *gradiente de presión de sobrecarga* que se asume igual a $0.231 kg/cm^2/m$ ($= 1 psi/ft$) para una densidad promedio de roca de $2.31 g/cm^3$. Para formaciones porosas, usando las ecuaciones (1.2) y (1.3), la presión de sobrecarga se puede dividir en dos componentes, la *presión hidrostática* P_p (presión de la columna de fluido) y la *presión litostática* P_s (presión de la columna de sedimentos o presión intergranular):

$$\sigma = P_p + P_s \quad (1.6)$$

N.B. En el caso de rocas no porosas, $P_p = 0$ y $\sigma = P_s$.

La componente hidrostática P_p se llama también la *presión de fluido intersticial*, o *presión de poro*, y es igual a la presión hidrostática (i.e. el producto de la densidad de fluido promedio por la altura de la columna de fluido), si el fluido es pura agua y la compactación es normal.

$$P_p = g \cdot \rho_w \cdot h \quad (1.7)$$

mentos es igual al producto de su masa, acción (1.1) se transforma en:

(1.2)

de su densidad promedio (g/cm^3) por

(1.3)

rga

(1.4)

(g/cm^3).

air por:

ma

(1.5)

n².

ndidad, y como primera aproximación undidad. Sin embargo no es el caso ofundidad. Asumiendo un incremento ón de sobrecarga que se asume igual promedio de roca de $2.31g/cm^3$. Para y (1.3), la presión de sobrecarga se idrostática P_p (presión de la columna la columna de sedimentos o presión

(1.6)

= P_p

sién la presión de fluido intersticial. ó ica (i.e. el producto de la densidad de fluido), si el fluido es pura agua y la

(1.7)

Esta presión puede exceder la presión hidrostática si el fluido intersticial soporta un exceso de presión debido, por ejemplo, a fuerzas tectónicas o compactación (en el caso de una formación sub-compactada). El gradiente de presión hidrostática se define como la relación P_p/h , y es igual a $0.1gr/cm^2/m$. para agua. La relación de la presión de fluido, P_p , y de la presión de sobrecarga, σ , representada por λ , es mínima en un medio hidrostático o en el caso de compactación normal:

$$\lambda = \frac{P_p}{\sigma} \quad (1.8)$$

$$\lambda = 0.1kg/cm^2/m = (0.435psi/pie)$$

En un medio sub-compactado, el fluido soporta una parte de la presión litostática. P_p aumenta mientras P_p disminuye. P_p tiende hacia la presión de sobrecarga σ y λ tiende hacia un valor de $0.231 kg/cm^2/m$.

§1.2 Compactación de las arcillas

Aunque se pueden hacer estudios de compactación de las arenas o de los carbonatos, las arcillas son los minerales que mas se estudian debido a su alta porosidad inicial y a la menor importancia de otros fenomenos diagenéticos.

1.2.1 Principales etapas en la compactación de las arcillas

Como todos los sedimentos, las arcillas expulsan el agua intersticial que contienen durante el proceso de subsidencia. Debido a una permeabilidad significativa, relacionada a una alta porosidad, existe un periodo de tiempo considerable durante el cual las arcillas pueden expulsar agua.

Varios modelos de compactación han sido propuestos que podemos resumir en las etapas siguientes:

- ▶ 1. Expulsión del agua intersticial hasta que los granos entren en contacto. La porosidad en las arcillas cae de 70-85% hasta aproximadamente 45%, una reducción que se alcanza rapidamente en unas decenas de metros.
- ▶ 2. Reorganización de los granos y continuación de la expulsión de fluido. Reducción de la porosidad hasta 25%. Ocorre mas lentamente sobre varios cientos de metros.
- ▶ 3. Deformación mecánica de los granos y expulsión del agua adherida. Los materiales blandos caen en los intersticios entre los granos de minerales mas duros. La porosidad cae de 35 a 10%. Esta reducción es aun mas lenta y ocurre sobre varios miles de metros.
- ▶ 4. Desarrollo de fenomenos diagenéticos mayores producido por la modificación del equilibrio físico y químico debido a la acción combinada de la temperatura y la presión, la concentración del agua y la presencia de otros fluidos e.g. gas y petróleo. Esto incluye: recristalización, cementación y disolución.

1.2.2 Mecanismo de compactación

En una primera etapa consideramos un sistema cerrado del cual el agua no se puede escapar. Cuando se ejerce una presión σ todo el esfuerzo es balanceado por la presión

1.2. Compactación de las arcillas

en el agua, ($P_p = \sigma$), y ningún esfuerzo se ejerce sobre los granos, ($P_s = 0$). El sistema esta sobrecompromido y:

$$\lambda = \frac{P_p}{\sigma} \quad (1.8)$$

$$\lambda = 1$$

En una segunda etapa se deja escapar un poco el agua. La matriz de arcilla absorbe parte del esfuerzo:

$$\sigma = P_p + P_s \quad (1.9)$$

$$\lambda = 1$$

En una tercera etapa se deja escapar suficientemente el agua para que el sistema llegue al equilibrio y no se expulse mas agua. El esfuerzo aplicado se ejerce ahora sobre la matriz de arcilla y el fluido a la presión hidrostática, $\lambda = 0.433$.

Así que si el fluido de los poros puede escapar libremente durante la subsidencia, el volumen de agua (porosidad) disminuye proporcionalmente con la profundidad, la presión litostática P_s es máxima y P_p tiende a ser hidrostática. En estas circunstancias, la compactación se llama normal. Sin embargo, si, para una condición de subsidencia determinada, los fluidos solamente pueden escapar con dificultad las siguientes condiciones se verificarían:

- Ligera reducción en el volumen de agua, entonces pequeña disminución de la porosidad con la profundidad.
- P_s anormalmente baja.
- P_p cerca de la presión de sobrecarga.

La compactación es anormal, la formación es sub-compactada.

1.2.3 La ley de Hubbert & Rubbey

Estos dos autores establecieron que el esfuerzo efectivo que se ejerce sobre arcillas porosas depende del grado de compactación de las arcillas, y, que P_s aumenta proporcionalmente con la compactación. Un índice práctico del grado de compactación es la porosidad, definida como la relación del volumen de poro al volumen total. De esto se puede deducir que, para una arcilla determinada, hay para cada valor de porosidad ϕ un cierto valor máximo del esfuerzo efectivo de compresión P_s que la arcilla puede soportar sin que se produzca mas compactación. Esto se expresa por:

$$\phi_{sh} = \phi_{sho} \cdot e^{-k \cdot P_s} \quad (1.10)$$

con :

$$P_s = \sigma - P_p \quad (1.11)$$

donde :

- ϕ_{sho} = porosidad de la arcilla a profundidad 0.
- ϕ_{sh} = porosidad de la arcilla a la profundidad Z.

- ▷ P_c = presión de compactación aplicada a la matriz sólida a la profundidad Z (*presión Litostática*).
- ▷ k = constante.
- ▷ σ = presión total aplicada sobre un elemento arcilloso poroso a la profundidad Z (*presión de Sobrecarga*).
- ▷ P_f = presión del fluido.

Esta ecuación muestra que la porosidad de la arcilla a una determinada profundidad es una función de la presión del fluido. Si esta presión es anormalmente alta, la porosidad de la arcilla será también anormalmente alta, como en el caso de las arcillas sobrepresurizadas.

En las condiciones hidrostáticas:

$$\sigma = \rho_{bw} \cdot g \cdot Z \quad (1.12)$$

y

$$P_f = \rho_w \cdot g \cdot Z \quad (1.13)$$

donde:

- ▷ ρ_{bw} = densidad promedio de los sedimentos, impregnado con agua de densidad ρ_w en gr/cm^3 .
- ▷ ρ_w = densidad promedio de los fluidos en las formaciones en gr/cm^3 .
- ▷ g = aceleración debido a la gravedad.
- ▷ Z = profundidad de subsidencia en metros.

Substituyendo valores de σ y P_f en la ecuación (10):

$$\phi_{sh} = \phi_{sho} \cdot e^{-cZ} \quad (1.14)$$

con:

$$c = k(\rho_{bw} - \rho_w) \cdot g \quad (1.15)$$

c = factor de compactación, con la dimensión L^{-1} .

La ecuación (1.14) muestra que la porosidad de la arcilla varía exponencialmente con la profundidad de subsidencia. Así, graficando ϕ_{sh} en escala logarítmica en función de la profundidad Z en escala lineal, la ecuación (13) se presenta como una recta caracterizando una compactación normal. Estudios realizados por Hubbert & Rubey, y Masse dieron $\phi_{sho} = 48\%$, $c = 1.42 \cdot 10^{-2}(m^{-1})$ para Hubbert y $c = 1.14 \cdot 10^{-2}(m^{-1})$ para Masse (1971).

1.2.4 Anomalías de compactación

Una *anomalía de compactación* es el estado de un sedimento que no ha podido expulsar su agua intersticial durante la subsidencia. Las anomalías de compactación se encuentran en secuencias que carecen de caminos de escape porosos y permeables para el agua intersticial que tendría que ser expulsada durante la compactación. El agua queda atrapada y absorbe parte de la presión litostática. La presión de fluido aumenta mientras los sedimentos quedan sub-compactados.

El fenómeno de sub-compactación se encuentra en cuencas de sedimentación rápida, pobres en depósitos permeables o ricas en arcillas.

1.2. Compactación de las arcillas

1.2.5 Efecto de la compactación sobre los perfiles

Se ha visto que la compactación influye sobre la porosidad de las arcillas. De los parámetros que dependen de la porosidad y comunmente medidos por perfilaje, se hicieron estudios sobre:

- Densidad.
- Índice de hidrógeno (Neutron).
- Tiempo de tránsito sínico.
- Resistividad.
- Sección transversal de captura.

Cabe mencionar otros parámetros afectados por la compactación que fueron objetos de estudio:

- Contenido de potasio
- Salinidad del agua intersticial
- Gradiente geotermico

Este trabajo se limitara al perfil sínico por las siguientes razones.

- En la zona de estudio no se dispone de los perfiles Densidad o Neutron sobre intervalos de profundidad extensos.
- El perfil de resistividad se ve afectado en la zona por cambios grandes de la salinidad del agua de formación y por lo tanto no responde directamente a la porosidad.

1.2.6 Estudio de la compactación con el perfil sínico

Se trata de establecer, para condiciones normales de compactación, la tendencia de la repuesta del *tiempo de tránsito sínico*. Un cambio con respecto a la tendencia establecida es indicación de anomalía de compactación, lo que indica presencia de presiones anormales.

Partiendo de la ley de *Hubbert & Rubbey* se grafica el tiempo de tránsito sínico Δ_t en escala logaritmica versus la profundidad. Para observar las tendencias es necesario adoptar una escala de profundidad apropiada (1/5000 en nuestro ejemplo). Es de gran ayuda tener en el mismo grafico una curva indicadora de arcillosidad, Gamma-Ray o SP.

La tendencia (*el gradiente*) se construye dibujando una linea pasando por los puntos correspondientes a pura arcilla. Las zonas sobrepresurizadas (o sub-compactadas) son aquellas donde la curva de Δ_t se aparta de la tendencia y tiende a leer valores mas altos.

En la figura (1) se observa un grafico hecho a partir de los datos de un pozo de la zona norte. La curva Δ_t fue muestreada aproximadamente cada 50 metros en zonas de arcilla.

Se pueden distinguir claramente dos zonas sobrepresurizadas A y B. Se nota igualmente la presencia de intervalos sobrecompactados arriba de aquellas zonas (Δ_t inferior a la normal).

En la figura (2) se volcó la misma curva de gradiente normal de compactación sobre el perfil sísmico registrado en otro pozo del mismo campo. Se puede verificar la validez del gradiente y que la zona sobrepresionada A no aparece en el pozo.

Desgraciadamente no se puede generalizar la ley de compactación a otras áreas en la zona norte, debido a cambios de origen tectónico. El estudio de las diferencias entre los gradientes tiene aplicaciones geológicas como la determinación de la máxima profundidad de subsidencia de las formaciones.

1.2.7 Evaluación cuantitativa de presión de poro

La evaluación cuantitativa de presiones se puede obtener en forma directa por medio de formulas empiricas (*Hottman & Johnson, Eaton*) o indirectamente con el concepto de profundidad equivalente.

El método de profundidad equivalente

Consideramos un punto de la zona sobrepresurizada a la profundidad Z . La ecuación (1.6) indica que la presión de sobrecarga es:

$$\sigma_Z = P_p Z + P_{sz} \quad (1.16)$$

El punto mas arriba en la columna que tiene la misma lectura de Δt esta a la profundidad equivalente Z_e . La ecuación (1.6) se escribe:

$$\sigma_{Z_e} = P_p Z_e + P_{sz_e} \quad (1.17)$$

Se asume que a igual porosidad la presión soportada por la matriz de arcilla es igual (base del modelo de *Terzaghi & Peck* que se usa en este método). La formación en las profundidades Z y Z_e tiene el mismo grado de compactación, $P_{sz} = P_{sz_e}$.

En la profundidad Z_e las arcillas son normalmente compactadas y la presión hidrostática P_{pZ_e} se escribe:

$$P_{pZ_e} = \rho_w \cdot \frac{Z_e}{10} \quad (1.18)$$

donde P_p esta en Kg/cm^2 , Z_e esta en metros y ρ_w es la densidad del fluido en g/cm^3 . También tenemos:

$$\sigma_{Z_e} = \rho_{bZ_e} \cdot \frac{Z_e}{10} \quad (1.19)$$

donde ρ_{bZ_e} es la densidad promedio de los sedimentos sobre el intervalo Superficie- Z_e . De la misma manera:

$$\sigma_Z = \rho_{bZ} \cdot \frac{Z}{10} \quad (1.20)$$

Si el tipo de arcilla no varia podemos decir que ρ_{bZ} es igual a ρ_{bZ_e} como primera aproximación. Se puede escribir entonces:

$$\sigma_Z = \rho_{bZ_e} \cdot \frac{Z}{10} \quad (1.21)$$

1.2. Compactación de las arcillas

Remplazando σ_z y P_{eZ} en la ecuación (15), obtenemos:

$$P_{pZ} = \rho_w \cdot \frac{Z_e}{10} - \rho_b \cdot \frac{Z - Z_e}{10} \quad (1.22)$$

o

$$P_{pZ} = \rho_w \cdot \frac{Z}{10} + (\rho_b - \rho_w) \cdot \frac{Z - Z_e}{10} \quad (1.23)$$

Si no se conocen ρ_w y ρ_b se puede usar respectivamente 1.0 g/cm³ y 2.31 g/cm³.

Definiendo ρ_m como la densidad del lodo, en gr/cm³, necesaria para balancear la presión hidrostática a la profundidad Z , tenemos:

$$\rho_m = \frac{10 \cdot P_{pZ}}{Z} \quad (1.24)$$

remplazando por el valor de P_{pZ} de la ecuación (1.22) obtenemos:

$$\rho_m = \rho_w \cdot \frac{Z_e}{Z} + \rho_b \cdot \left(1 - \frac{Z_e}{Z}\right) \quad (1.25)$$

Aplicando este método al pozo de la figura (2) en la zona de máxima sobrepresión (3600.m) encontramos una profundidad equivalente de 1250 metros. Usando $\rho_b = 2.31 \text{ g/cm}^3$ y $\rho_w = 1.00 \text{ g/cm}^3$ calculamos la densidad del lodo necesaria para balancear la hidrostática:

$$\rho_m = 1.85 \text{ g/cm}^3$$

Generalmente esta formación se perfora con un lodo de densidad 1.9 gr/cm³ lo que comprueba la validez del método en este campo.

El programa PORPRS

El programa PORPRS necesita como entrada las curvas estudiadas (Δ_i o R_i o ambas) y la curva de gradiente normal en forma de recta o de curva. Se calcula la presión de poro usando formulas empiricas. Las opciones son:

► 1 - $G_p = 0.465 \cdot \frac{\Delta_i}{\Delta_{i0}}$ - (Drilling Engineer URD).

► 2 - Cartas de Hottman & Johnson.

Se corrió el programa con la opción Hottman & Johnson usando los datos del pozo de la figura (2). El resultado aparece en la figura (3).

El valor calculado de 2.10 gr/cm³ se encuentra en cima del valor real determinado en el pozo, lo que indica que las cartas de Hottman & Johnson non son directamente aplicable en nuestro caso y tendrian que ser recalibradas.

La otra opcion dio un valor aun mas alto de ρ_m .

Determinación de Gradiente de Fracturación

La presencia de zonas de presiones anómalas, implica un buen planeamiento de las operaciones de perforación para minimizar los peligros de descontrol del pozo, de aprisionamiento de la tubería o de pérdidas de perforación. A tal efecto, es imprescindible contar con buenos valores de la presión de poro y del gradiente de fracturación de la formación.

En la primera parte vimos como se puede estimar la presión de poro a partir de los datos del sónico de pozos ya perforados. Ahora, estudiaremos como determinar el gradiente de presión de fractura.

3.2.1 Presión de fracturación

El gradiente de presión de fracturación depende de la presión de poro, de la litología, la edad, la profundidad de las formaciones y de los esfuerzos ambientales soportados por la roca.

Varias ecuaciones fueron propuestas por diversos autores, *Matthews & Kelly* (1967), *Eaton* (1969). Schlumberger implemento en su programa MECHPRO la relación esfuerzo/deformación de *Biot* (1955), de la cual se puede deducir la siguiente ecuación del gradiente de presión de fracturación:

$$G_{fr} = \frac{2\nu}{1-\nu} \cdot \frac{\sigma}{Z} + \alpha \cdot \frac{1-3\nu}{1-\nu} \cdot \frac{P_p}{Z} \quad (2.1)$$

- G_{fr} = Gradiente de fracturación.
- ν = Coeficiente de Poisson.
- σ = Presión de sobrecarga.
- $\alpha = 1 - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_h} =$ Constante de Biot.
- P_p = Presión de poro.
- Z = Profundidad.

2.2. El programa MECHPRO

§2.2 El programa MECHPRO

El programa MECHPRO (Propiedades Mecánicas) fue diseñado en los años 1970 y ha sido continuamente revisado para incorporar las últimas técnicas. Hoy en día el programa proporciona las siguientes informaciones:

- 1. Constantes elásticas dinámicas de la formación.
- 2. Gradiente de presión crítica de rotura de la formación (Opción Roca Blanda), para estudiar los problemas de enarenamiento.
- 3. Gradiente de fracturación de la formación (Opción Roca Dura).

Los datos de entrada son:

- Los tiempos de tránsito compresional y de corte grabados por la herramienta sónica de espaciamiento largo (SLS) o la herramienta sónica digital (SDT). Esta última herramienta tiene la ventaja de proporcionar los datos de Δt_{SA} en tiempo real, posibilitando la computación MECHPRO en el mismo pozo.
- La densidad de la formación (opcional pero recomendado).
- La curva de presión de poro. Se recomienda obtenerla por medición de presiones con la herramienta RFT.

2.2.1 Teoría

Se puede analizar los esfuerzos que actúan en la formación mediante la combinación de los valores de las constantes elásticas dinámicas y de los datos de presión de poro, presión de sobrecarga, peso del lodo y volumen de arcilla.

Si consideramos un elemento de roca ubicado a cierta distancia del pozo, existe un sistema de esfuerzos triaxiales que lo mantiene estacionario. La componente vertical es la presión de sobrecarga. Las componentes horizontales σ_x y σ_y a 90° una de la otra, son iguales si no existe ningún esfuerzo tectónico regional de dirección preferencial. Si el esfuerzo tectónico (T) es conocido los esfuerzos horizontales se pueden escribir de la forma siguiente:

$$\sigma_x = mP_o + \alpha P_p (1 - m) T \quad (2.2)$$

$$\sigma_y = mP_o + \alpha P_p (1 - m) \quad (2.3)$$

$$\sigma_z = P_o \quad (2.4)$$

con:

- P_o = presión de sobrecarga.
- P_p = presión de poro.
- $\alpha = 1 - \frac{C_r}{C_m}$
- C_r, C_m = Compresibilidades de la roca y de la matriz.
- $m = \frac{\nu}{1 - \nu}$
- ν = Coeficiente de Poisson.
- T = Coeficiente debido al esfuerzo tectónico.

La presión de iniciación de la fracturación se define por la relación:

$$P_{fr} = 3\sigma_x - \sigma_y - \alpha P_p + \tau_0 \quad (2.5)$$

donde τ_0 es la resistencia a la tracción de la formación.

El programa MECHPRO, en su opción Roca Dura usa el modelo de *Terzaghi* de esfuerzo efectivo en el cual $\alpha = 1$. Se calcula el parámetro HPGM (Gradiente de presión horizontal mínimo) correspondiente al gradiente de fracturación si no se toman en cuenta la invasión de la formación y la resistencia a la tracción

$$HPGM = 3\sigma_x - \sigma_y - P_p \quad (2.6)$$

Se calcula también el parámetro FGII, gradiente de fracturación tomando en cuenta la invasión pero sin considerar la resistencia a la tracción τ_0 .

2.2.2 Aplicación

Se aplico el método de determinación de presión de fracturación en un pozo de la zona norte, comparando los resultados con el calculo que se hizo a mano utilizando la formula de *Eaton*. La presión de poro necesaria para el calculo se estimo a partir de la presión hidrostática de la columna de lodo durante la perforación.

Los resultados, que aparecen en la figura (4), mostraron diferencias con los calculos hechos en el campo, debido principalmente a una mejor determinación del coeficiente de Poisson. La curva hecha a mano daba valores menores del gradiente de fracturación (se uso un valor de ν igual a 0.2).

Fue necesario ajustar una curva de presión de poro puesto que no se disponia de ningún dato. Se uso $P_p = 0.95 \rho_m Z$ basandose en el dato que la densidad del lodo fue aumentada solamente cuando fue necesario.

Se hubiera podido calibrar mejor los resultados con unas mediciones de presión con la herramienta RFT.

Las dos técnicas presentadas han demostrado el uso de los datos del perfil sónico en la planificación de la perforación de pozos en zonas con formaciones sobrepresurizadas. Un estudio mas amplio integrando los datos de perforación (exponente D, pruebas de fracturación, densidad de arcilla) de varias areas de la zona norte seria necesario para una mejor calibración de las ecuaciones que relacionan el perfil sónico con las presiones estudiadas.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Dto. de Programación de Perforación del Distrito Norte en la persona de Jorge YEPES quien aporó sus conocimientos y su experiencia en la elaboración de este trabajo.

Se agradece igualmente a los geólogos Daniel CRIVARO y Raul CARLE del Distrito Geológico Norte por aclarar los conceptos geológicos relacionados con las sobrepresiones en la zona norte.

Bibliografía

- SERRA, O. (1986) - Fundamentals of Well-log Interpretation Vol.2
- FERTL, W.H. (1976) - Abnormal Formation Pressures. *Developments in Petroleum Science, Elsevier, Amsterdam.*
- Schlumberger (1984) - Well Evaluation Conference - Mexico.
- HUBBERT, C.E., & RUBEN, W.W. (1959). - Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Bull. geol. Soc. Amer.*, 70, 2, p.115-166.
- MASSE, P. (1971). - Relations entre les caracteristiques des couches d'argillites et leur profondeur maximale d'enfouissement. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 272, 11, p.1481-1484.

- HOTTMAN, C.E., & JOHNSON, R.K. (1965). - Estimation of formation pressure from log derived shale properties. *J. Petrol. Technol.*, 17, 6, p. 718-722.
- EATON, B.A. (1972). - The effect of overburden stress on geopressure prediction from well logs. *J. Petrol. Technol.* / 24 / p. 929-930.
- TERZAGHI, K., & PECK, R.B. (1948). - Soil mechanics in engineering practice. 2d ed. *John Willey & Sons, Inc., New York.*
- MATTHEWS, W.R. & KELLY, J. - How to predict formation pressure and fracture gradient from electric and sonic logs. *Oil and Gas Journal*. Feb. 20 1967.
- EATON, B.A. - Fracture gradient prediction and its application in oilfield operation. *J. Pet. Tech.* (Oct. 1969) 1953-1960.
- BIOT, M.A. - Theory of elasticity and consolidation for poroud anisotropic solids. *J. Applied Physics* (Feb. 1955) 26, No 2.