

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DEL CAMPO DE ESFUERZOS *IN-SITU* .

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Marcano M., Alexander R.
para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DEL CAMPO DE ESFUERZOS *IN-SITU* .

TUTOR ACADEMICO: Prof. Manuel Martínez

TUTOR INDUSTRIAL: Dra. Marisela Sánchez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Marcano M., Alexander R.
para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

© Marcano Marcano Alexander, 2001
Hecho el Depósito de Ley.
Depósito Legal lft4872001620142

Marcano M., Alexander

ESTUDIO DEL CAMPO DE ESFUERZOS *IN-SITU*

Tutor Académico: Prof. Manuel Martínez. Tutor Industrial: Dra. Marisela Sánchez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2001, 148 p.

Palabras Claves: *Breakout*, Registro de imágenes, Microfracturamiento, Campo de esfuerzos *in-situ*, Estabilidad de hoyo, Mohr-Coulomb.

El conocimiento del campo de esfuerzos *in-situ* en una región es de gran importancia para el estudio de la estabilidad de pozos petroleros tanto durante la fase de perforación como durante la producción del mismo. Las magnitudes de las componentes principales de esfuerzos *in-situ* se describen en términos de un esfuerzo vertical (sobrecarga), calculada mediante la integración de registros de densidad, y dos esfuerzos horizontales $S_{Hmáx}$ y $S_{hmín}$, el máximo y mínimo respectivamente.

La magnitud del esfuerzo principal menor puede ser medida mediante pruebas de fracturamiento hidráulico en pozos (minifrac). Sin embargo, no hay manera de medir directamente la magnitud de $S_{Hmáx}$, por lo que se utiliza la evidencia de diferentes tipos de fallas observadas en pozos para hacer una estimación de ésta.

En este trabajo se implementa una metodología, desarrollada como un programa en lenguaje FORTRAN, para la determinación del esfuerzo horizontal mayor a través de la observación, en un registro de imágenes, de *breakouts* (falla por concentración de esfuerzos compresivos) y fracturas inducidas, partiendo de la consideración de un comportamiento elástico-lineal de la roca y asumiendo que la pared del hoyo es completamente impermeable. Además, el modelo que se presenta considera anisotropía de los esfuerzos horizontales y es válido para hoyos con cualquier ángulo de inclinación y azimut.

Se determina la magnitud de $S_{Hmáx}$ que genera un ancho o ángulo de *breakout* que reproduce lo observado mediante el registro de imágenes.

Caracas, Octubre de 2001

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Marcano Alexander, titulado:

“Estudio del Campo de Esfuerzos *in-situ*”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Jorge Cruz
Jurado

Prof. Pedro Cadenas
Jurado

Prof. Manuel Martínez
Tutor Académico

Dra. Marisela Sánchez
Tutor Industrial

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi compañero en todo momento y por haberme dado las fuerzas y la paciencia para culminar con éxito ésta carrera. Por guiarme siempre y por darme ánimo para seguir adelante en mis actividades.

A la memoria de mis abuelos Ana, José, María y Presente, para que desde el cielo me sigan guiando y acompañando por este camino que apenas comienza. Siempre los tengo presentes.

A mis padres por brindarme su amor, confianza y apoyo, por darme el buen ejemplo de siempre seguir adelante por el camino correcto y por estar a mi lado en todo momento. Este triunfo les pertenece.

A mis hermanos, Wilmer y Ronald, por todo el apoyo que me han dado, espero que pronto sean ustedes los que alcancen esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad Central de Venezuela por haberme brindado la oportunidad de cursar esta carrera y a PDVSA-Intevep por la oportunidad de realizar el trabajo especial de grado en sus instalaciones.

A Marisela Sánchez, por todo el apoyo, respaldo y orientación que me ha brindado. Por ser además de una gran tutora, una gran persona.

A Yelitza Sorrentino, por todos los conocimientos transmitidos, por su confianza, colaboración, apoyo incondicional y su aporte de gran valor en el desarrollo de éste trabajo.

Al profesor Manuel Martínez, por su aporte y asesoramiento académico en la elaboración de éste trabajo.

A Maria Alejandra Jiménez (Majandra), por todo su respaldo, colaboración y por ser siempre tan atenta durante mi permanencia en Intevep.

A mis grandes amigos Walter D'Amico, Angélica Rodríguez, Joan Martínez, Wilfredo Montenegro, Brigith D'Amico, Gabriela Meneses, Marielisa Fernández, Francisco Clemente, Carlos Álvarez y Daniel Salazar por su amistad, confianza, comprensión y apoyo incondicional. Gracias a todos mis compañeros de estudio.

A Julio González, Juan Carlos Clarembaux, Paco Vieira, Juan Carlos Chávez, Manuel Freitas, José Barrera, Pedro Acuña, Jackeline Rodríguez, Katuska Borjas, Delsio De Santana, Raúl Bermúdez, Carmen Ferrebus, Erna Sánchez, Marcel Geraud, Fernando Rovira, Fernando Pinto, Maurizio Arnone, Andrés Collaguazo, Gustavo Suárez, María Rodríguez y Beatriz Santiago, por brindarme su apoyo.

Al personal del CIT, especialmente a la Sra. Julieta, Luis, Sr. Mario y Yoleida por su colaboración.

A la Sra. Dora, a la familia D'Amico Castro y a Amparito por su apoyo y por la confianza que me han brindado.

A mis padres por estar siempre a mi lado, por su apoyo y por darme la oportunidad de estudiar. Un millón de gracias.

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS.	xii
INDICE DE FIGURAS.	xiii
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.	xvi
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO I. MARCO METODOLÓGICO.	5
1.1.- Título de la investigación.	5
1.2.- Planteamiento del problema.	5
1.2.1.- Objetivo general	6
1.2.2.- Objetivos específicos.	6
1.3.- Justificación e importancia.	7
1.4.- Tipo de investigación.	8
1.5.- Instrumentos de recolección de datos.	8
1.6.- Validez y confiabilidad del programa.	9
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	10
2.1.- Fundamentos de Perforación.	10
2.1.1.- Fluidos de Perforación.	12
2.2.- Fundamentos de Mecánica de Rocas.	14
2.2.1.- Propiedades Físicas y Mecánicas de la Formación.	15
2.2.2.- Ensayos Geomecánicos de Laboratorio.	19
2.2.3.- Información Geomecánica a partir de Datos de Campo.	21
2.3.- Estabilidad de Hoyo.	28
2.3.1.- Estabilidad Geomecánica.	31
2.3.2.- Estabilidad Química.	35
2.4.- Estado de los Esfuerzos <i>in-situ</i> .	35

2.4.1.- Esfuerzos principales.	39
2.5.- Esfuerzos Efectivos.	41
2.6.- Régimen de Esfuerzos.	41
2.6.1.- Régimen Normal.	42
2.6.2.- Régimen Transcurrente.	43
2.6.3.- Régimen Inverso.	44
2.6.4.- Resistencia Friccional en la Corteza Terrestre.	45
2.6.5.- Polígono de Esfuerzos.	47
2.7.- Criterios de Falla.	48
2.7.1.- Criterio de Falla de Mohr-Coulomb.	49
2.7.2.- Tipos de Falla de la Roca.	51
2.8.- Derrumbes y Ovalizaciones o <i>Breakouts</i> .	53
2.8.1.- Definición.	53
2.9.- Ovalización o <i>Breakout</i> .	54
2.9.1.- Inicio de los <i>Breakouts</i> .	55
2.9.2.- Observación de Campo de <i>Breakouts</i> .	56
2.9.3.- Clasificación de <i>Breakouts</i> .	57
2.10.- Estimación del esfuerzo horizontal máximo a partir de <i>breakouts</i> y fracturas inducidas durante la perforación	57
CAPITULO III. ESFUERZOS INDUCIDOS ALREDEDOR DE UNA PERFORACIÓN DE CUALQUIER INCLINACIÓN EN UN MEDIO ELÁSTICO LINEAL.	59
3.1.- Modelo Constitutivo.	59
3.2.- Esfuerzos en la Pared del Hoyo.	60
3.2.1.- Transformación de Coordenadas.	61
CAPITULO IV. DESARROLLO DEL ALGORITMO.	68
4.1.- Algoritmo.	68
4.1.1.- Entradas.	68

4.1.2.- Procedimiento de Cálculo.	69
4.1.3.- Salidas.	69
4.2.- Estructuración del Algoritmo.	70
4.2.1.- Entrada de datos.	71
4.2.2.- Transformación del sistema de coordenadas.	72
4.2.3.- Cálculo de los esfuerzos en coordenadas cilíndricas.	73
4.2.4.- Cálculo de los esfuerzos principales.	73
4.2.5.- Comparación del estado de esfuerzos con el criterio de falla de Mohr-Coulomb.	73
4.2.6.- Comparación/Iteración de $S_{Hmáx}$.	74
4.2.7.- Resultado.	74
4.3.- Diagrama de Flujo.	74
CAPITULO V. MARCO GEOLÓGICO.	76
5.1.- Área Norte de Monagas.	76
5.2.- Estructura Regional.	77
5.2.1.- La Falla de Urica.	78
5.2.2.- Corrimiento de Piritál.	79
5.3.- Estratigrafía.	80
5.4.- Geología Local.	81
5.5.- Formación Carapita.	82
5.6.- Formación Naricual.	82
CAPITULO VI. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.	83
6.1.- Caso I: Pozo SBC-90.	85
6.1.1.- Determinación de los parámetros de entrada.	86
6.2.- Caso II: Pozo PIC-25.	99
6.2.1.- <i>Breakouts</i> en lutitas.	106
6.2.2.- <i>Breakouts</i> en Arenas.	108
6.2.3.- Fracturas Inducidas en Arenas.	110

CONCLUSIONES.	115
RECOMENDACIONES.	117
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	118
GLOSARIO.	123
APÉNDICE A. ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES.	127
APÉNDICE B. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE ESTABILIDAD DE HOYO PARA EL POZO ALTO ÁNGULO DE SANTA BÁRBARA.	136
ANEXOS.	143

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Ventajas y desventajas de la perforación convencional.	11
Tabla 2.2.- Relación entre los esfuerzos principales para los diferentes regímenes de esfuerzos.	42
Tabla 6.1.- Pozos con información de registros de imágenes y/o minifrac.	84
Tabla 6.2.- Información del <i>breakout</i> del pozo SBC-90.	86
Tabla 6.3.- Valores típicos de las constantes de la Ec. 6.2.	88
Tabla 6.4.- Valores de UCS obtenidos de ensayos de laboratorio.	89
Tabla 6.5.- Datos correspondientes al <i>breakout</i> interpretado en el pozo SBC-90.	93
Tabla 6.6.- Comparación de valores de $S_{Hmáx}$ obtenidos por ambos métodos (solución explícita y solución analítica).	98
Tabla 6.7.- Magnitud del esfuerzo horizontal mínimo de los pozos cercanos al PIC-25.	99
Tabla 6.8.- Información de los <i>breakouts</i> observados en el registro de imágenes del pozo PIC-25.	101
Tabla 6.9.- Información de los <i>breakouts</i> del pozo PIC-25, considerados para la determinación del esfuerzo horizontal máximo.	103
Tabla 6.10.- Valores de $S_{Hmáx}$ obtenidos por ecuación explícita y por la Solución analítica.	113
Tabla 6.11.- Valores de $S_{Hmáx}$ obtenidos de los análisis realizados en el pozo PIC-25.	114

INDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1.- Corte transversal de un hoyo para mostrar el descenso y ascenso del fluido de perforación.	13
Fig. 2.2.- Relación esfuerzo-deformación.	17
Fig. 2.3.- Principio del ensayo de compresión sin confinar.	20
Fig. 2.4.- Principio del ensayo de compresión triaxial.	21
Fig. 2.5.- Curva obtenida de un ensayo <i>leak-off</i> .	25
Fig. 2.6.- Registro de imágenes.	27
Fig. 2.7.- Enfoque integrado para estabilidad de lutitas.	29
Fig. 2.8.- Vista transversal y vista anular de los esfuerzos que actúan en el hoyo.	32
Fig. 2.9.- Magnitud de los esfuerzos efectivos axial y tangencial en la pared del hoyo.	34
Fig. 2.10.- Estado de esfuerzos <i>in-situ</i> , antes y después de la perforación.	36
Fig. 2.11.- Estado de esfuerzos <i>in-situ</i> .	37
Fig. 2.12.- Esfuerzos principales y planos principales.	40
Fig. 2.13.- Falla normal.	42
Fig. 2.14.- Orientación y relación de los esfuerzos en una falla normal.	43
Fig. 2.15.- Falla transcurrente.	43
Fig. 2.16.- Orientación y relación de los esfuerzos en una falla de deslizamiento.	44
Fig. 2.17.- Falla inversa.	44
Fig. 2.18.- Orientación y relación de los esfuerzos en una falla inversa.	45
Fig. 2.19.- Diagrama de Mohr que muestra las fallas para $0,6 < \mu < 1,0$.	46
Fig. 2.20.- Polígono de esfuerzos.	48
Fig. 2.21.- Mecanismos de falla y su localización con respecto a la envolvente de falla de Mohr-Coulomb.	51

Fig. 2.22.-Representación del <i>breakout</i> con respecto a la orientación de los esfuerzos máximo y mínimo.	54
Fig. 2.23.-Observación del crecimiento del <i>breakout</i> .	55
Fig. 2.24.- Interpretación de un <i>breakout</i> utilizando el registro calíper.	56
Fig. 2.25.- Forma de determinar θ_b para utilizar la relación explícita que determina la magnitud de $S_{Hmáx}$ utilizando <i>breakouts</i> observados en pozos verticales.	58
Fig. 3.1.- Sistema de coordenadas cartesianas.	62
Fig. 3.2.- Representación gráfica del círculo de Mohr y la envolvente de falla en el espacio τ - σ .	66
Fig. 3.3.- Representación de la envolvente de falla en el espacio de los Esfuerzos principales σ_1 - σ_3 .	67
Fig. 4.1.- Transformación del sistema de coordenadas.	72
Fig. 4.2.- Diagrama de flujo del programa.	75
Fig. 5.1.- Ubicación geográfica del campo Bosque.	76
Fig. 5.2.- Mapa estructural de la formación Naricual.	79
Fig. 5.3.- Sección estructural incluyendo el pozo PIC-25.	81
Fig. 6.1.- Mapa estructural de los campos Santa Bárbara y Bosque.	83
Fig. 6.2.- Registro de densidad para un intervalo de la profundidad del pozo SBC-90 y valores de sobrecarga calculados con el PREDICT.	92
Fig. 6.3.- Sección del registro de imágenes del SBC-90.	94
Fig. 6.4.- Curva de esfuerzo horizontal mínimo a partir del valor obtenido con el ensayo minifrac.	95
Fig. 6.5.- Polígono de esfuerzos para el caso del pozo SBC-90 ($\phi = 35^\circ$)	96
Fig. 6.6.- Polígono de esfuerzos para el caso del pozo SBC-90 ($\phi = 40^\circ$)	97
Fig. 6.7.- Frecuencia de repetición de ancho y orientación de los <i>breakouts</i> .	102
Fig. 6.8.- Sección del registro de imágenes del pozo PIC-25.	104

Fig. 6.9.- Registro de densidad para un intervalo de la profundidad del pozo PIC-25 y valores de sobrecarga calculados con el PREDICT.	105
Fig. 6.10.- Polígono de esfuerzos para el caso # 1 de <i>breakouts</i> en lutitas del PIC-25.	106
Fig. 6.11.- Polígono de esfuerzos para el caso # 2 de <i>breakouts</i> en lutitas del PIC-25.	107
Fig. 6.12.- Polígono de esfuerzos para el caso # 1 de <i>breakouts</i> en arenas del PIC-25.	108
Fig. 6.13.- Polígono de esfuerzos para el caso # 2 de <i>breakouts</i> en arenas del PIC-25.	109
Fig. 6.14.-Zona de fracturas inducidas del PIC-25.	110
Fig. 6.15.-Polígono de esfuerzos a partir del análisis de fracturas inducidas en el pozo PIC-25.	112

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS**Latinas:**

a	Diferencia de azimut entre el pozo y la orientación del esfuerzo horizontal máximo.
C _o	Resistencia a la compresión no confinada
D _s	Profundidad de sedimento.
DTC	Registro Delta-T compresional (registro sínico).
DTS	Registro Delta-T de corte (registro sínico).
E	Módulo de Young.
g	Constante de gravedad.
GR	Registro Gamma Ray.
i	Ángulo de inclinación del pozo.
I _{ij}	Cosenos directores entre los ejes “i” y “j”.
LOT	Ensayo “ <i>Leak off Tests</i> ”.
MD	Profundidad real.
MW	Peso de lodo (<i>Mud Weight</i>).
PIC	Pozo del campo Bosque o Pirital.
P _p	Presión de poro.
P _w	Presión del pozo, ejercida por el fluido de perforación.
r	Radio referente al hoyo donde se desea realizar el cálculo de esfuerzos.
R	Radio del hoyo.
RI	Régimen Inverso.
RN	Régimen Normal.
RT	Régimen Transcurrente.
SBC	Pozo del campo Santa Bárbara.
S _h	Esfuerzo horizontal mínimo <i>in-situ</i> .
S _H	Esfuerzo horizontal máximo <i>in-situ</i> .
S _o	Resistencia por cohesión.
S _v	Esfuerzo vertical <i>in-situ</i> o sobrecarga.

T_0	Resistencia a la tensión de la roca.
TVD	Profundidad vertical (<i>True Vertical Depth</i>).
UCS	Resistencia a la compresión no confinada de la roca (<i>Unconfined Compressive Strength</i>).
V_p	Velocidad de onda compresional del registro sísmico.
V_s	Velocidad de onda de corte del registro sísmico.
ν	Coefficiente de Poisson.
WBO	Ancho del <i>breakout</i> (<i>Width Breakout</i>).

Griegas:

\dot{a}	Deformación a lo largo del eje “i”.
α	Coefficiente de Biot.
α'	Ángulo de la envolvente de falla (en el espacio $\sigma_1 - \sigma_3$).
β	Orientación del plano de falla.
ϕ	Ángulo de fricción interna (envolvente en el espacio $\tau - \sigma$).
φ	Porosidad.
μ	Coefficiente de fricción interna.
θ	Ángulo medido a lo largo de la periferia del hoyo.
ρ_b	Densidad total.
σ_{ij}	Esfuerzo normal al plano “i” orientado en dirección “j”.
σ_r	Componente radial del campo de esfuerzo en coordenadas cilíndricas en la pared del pozo.
σ_z	Componente axial del campo de esfuerzo en coordenadas cilíndricas en la pared del pozo.
σ_θ	Componente tangencial del campo de esfuerzo en coordenadas cilíndricas en la pared del pozo.
\acute{o}	Esfuerzo efectivo.
τ_{ij}	Esfuerzo cortante en el plano “i” orientado en dirección “j”.
$\tau_{\theta z}$	Esfuerzo cortante en la pared del pozo.

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de la estabilidad del hoyo es de vital importancia durante la perforación y producción de pozos de petróleo. Durante la etapa de perforación se puede controlar la inclinación y dirección del hoyo estableciendo una ventana operacional para el peso óptimo de lodo (presión de colapso o falla compresiva y presión de fracturamiento) y seleccionando los fluidos de perforación más adecuados para la perforación de formaciones problemáticas como lutitas. Por su parte, durante la etapa de producción pueden ser prevenidos problemas como el colapso del hoyo y el influjo de partículas sólidas debido a la excesiva tasa de producción estableciendo el diferencial de presión máxima (*drawdown*) que evite el arenamiento.

Para mantener la estabilidad del hoyo se requiere de un balance entre factores medibles como son los esfuerzos *in-situ*, la resistencia de la roca y la presión de poros, y factores controlables como la presión del fluido de perforación en el hoyo, la composición química del lodo y la trayectoria del pozo.

La necesidad de establecer parámetros como peso de lodo y trayectoria es una consecuencia directa de reconocer las limitaciones de resistencia mecánica de las rocas que constituyen una formación y los efectos que tienen sobre la estabilidad del hoyo tanto los esfuerzos locales a los cuales se encuentra sometida la roca como los esfuerzos inducidos durante la fase de perforación y producción. Además de esto, con la determinación de estos parámetros se persigue la minimización de los eventos que generalmente conducen de manera directa al incremento del tiempo y costos de perforación de un pozo e indirectamente a pérdidas generadas por la producción de petróleo diferida. Entre los eventos que pueden ocurrir como consecuencia de los problemas de inestabilidad de hoyo se pueden nombrar: pega de tuberías, pérdida de sargas de perforación y ensamblaje de fondo, pérdidas de circulación producto de fracturas hidráulicas inducidas, colapso del hoyo, etc.

La inestabilidad del hoyo puede conducir a la reducción o al ensanchamiento del mismo. La reducción del diámetro ocurre cuando la roca es sometida a deformaciones radiales, mientras que el ensanchamiento del hoyo es debido a considerables fallas compresivas en la pared del hoyo produciendo ovalizaciones o *breakouts* y consecuentes fallas en la cementación de pozos y disminución en la calidad de los registros o en casos extremos la pérdida de integridad del pozo.

De acuerdo a todo lo mencionado anteriormente, el conocimiento del campo de esfuerzos de una región es de suma importancia tanto para estudios de estabilidad de hoyo en pozos verticales, inclinados y horizontales, como para otras aplicaciones como el cañoneo orientado, las operaciones de fracturamiento hidráulico, compactación y subsidencia, arenamiento de pozos, perforabilidad de las rocas, interpretación de la geología estructural de la zona, entre otros.

El campo de esfuerzos *in-situ* en la corteza terrestre se caracteriza mediante sus componentes principales, considerando que en general se alinean vertical y horizontalmente. Las magnitudes de las componentes principales de esfuerzos *in-situ* se describen en términos de un esfuerzo vertical (sobrecarga) y dos esfuerzos principales horizontales $S_{Hmáx}$ y $S_{Hmín}$, el máximo y mínimo esfuerzo horizontal *in-situ*, respectivamente.

La magnitud del esfuerzo principal menor puede ser medida mediante pruebas de fracturamiento hidráulico en pozos (minifrac o pruebas de “*leak-off*” extendidas). La sobrecarga es calculada mediante la integración de registros de densidad. Sin embargo, no hay manera de medir directamente la magnitud de $S_{Hmáx}$, por lo que se utiliza la evidencia de diferentes tipos de fallas observadas en pozos para estimar $S_{Hmáx}$.

En general, las fallas en los pozos pueden ocurrir como resultado de concentración de esfuerzos compresivos o de tracción alrededor del hoyo. El tipo de falla compresiva localizada en dirección del esfuerzo principal menor es denominada “*breakout*” u ovalización inducida por los esfuerzos. Las fallas por tracción

(fracturas) se forman en la dirección del máximo esfuerzo horizontal *in-situ* (en la dirección donde los esfuerzos inducidos son menos compresivos).

En este estudio se implementa una metodología para la determinación del esfuerzo horizontal mayor, a través de la observación de *breakouts* y fracturas inducidas partiendo de la consideración de un comportamiento elástico-lineal de la roca y asumiendo que la pared del hoyo es completamente impermeable. Además, el modelo que se presenta considera anisotropía de los esfuerzos horizontales y es válido para hoyos con cualquier ángulo de inclinación y azimut.

La herramienta principal para el análisis es el registro de imágenes en el cual se pueden observar las características de los *breakouts* formados en la pared del hoyo, considerando la profundidad a la que se localiza y su ancho medido en grados alrededor de la periferia de la pared. Para determinar la magnitud de $S_{Hmáx}$, se calculan teóricamente los esfuerzos inducidos alrededor del hoyo utilizando las soluciones de Kirsch y deformación plana generalizada se compara con el criterio de falla de Mohr-Coulomb (conociendo la resistencia de la roca) determinándose las zonas falladas alrededor del hoyo. Se determina la magnitud de $S_{Hmáx}$ que genera un ancho o ángulo de *breakout* que reproduce lo observado en campo mediante el registro de imágenes.

Adicionalmente se utiliza la teoría de polígono de esfuerzos basada en la resistencia friccional de las fallas [GMI, 2001] para acotar la relación entre $S_{Hmáx}$, $S_{Hmín}$ y S_v .

Se utilizaron conceptos desarrollados por Anderson (1951) que establecen la relación entre los esfuerzos principales *in-situ* definida para tres tipos de regímenes de falla: régimen normal, régimen transcurrente y régimen inverso.

En las cuencas sedimentarias se encuentran sistemas complejos de fallas geológicas y el entendimiento de estos procesos a la luz de estos simples conceptos no es siempre sencillo. Sin embargo, se ha probado a través de la experiencia que es

posible acotar las magnitudes de los esfuerzos *in-situ* utilizando el modelo de Anderson, la resistencia friccional de las fallas geológicas y la observación de ruptura en los pozos.

La información que se recopiló para el desarrollo de este estudio pertenece a los campos de Santa Bárbara y Bosque en el norte de Monagas, los cuales se encuentran localizados dentro de un marco tectónico compresional bastante complejo.

Es importante resaltar que un análisis del tipo que se plantea en este trabajo requiere de información de resistencia de la roca, sobre lo cual existe incertidumbre debido a que se dispone de un número limitado de propiedades mecánicas que describen el comportamiento de la roca, específicamente de las lutitas, debido a las dificultades que tiene la toma de núcleos de este tipo de rocas para sus posteriores ensayos de laboratorio. Debido a esto, en los dos casos que se describen, se plantea una solución en función de los parámetros de resistencia de la roca obtenidos a través de correlaciones para acotar la magnitud del esfuerzo horizontal máximo.

CAPÍTULO I

MARCO METODOLÓGICO.

1.1 TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN.

Estudio del campo de esfuerzos *in-situ* utilizando fallas observadas en pozos petroleros.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En un estudio de estabilidad de hoyos se persigue analizar y comparar los esfuerzos alrededor del hoyo con la resistencia de la roca. Los esfuerzos inducidos alrededor del hoyo están controlados fundamentalmente por la magnitud de las diferentes componentes del campo de esfuerzos *in-situ*, por la orientación del pozo, por las propiedades de la roca, por la presión del fluido del yacimiento, por el peso de lodo, por la temperatura y por las condiciones estructurales del campo.

Los esfuerzos *in-situ* (magnitud y orientación) son parámetros fundamentales en el análisis de estabilidad de hoyo. Existen diferentes fuentes de información para estudiar la magnitud de las componentes del campo de esfuerzos *in-situ*, entre las cuales son utilizadas el registro de densidad para la estimación de la sobrecarga y la prueba de minifrac para la estimación de la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo. Sin embargo la magnitud del esfuerzo horizontal máximo es incierta ya que no puede ser directamente medida, sino inferida a partir de la observación de fallas o rotura alrededor del hoyo.

En el presente trabajo especial de grado se implementó una metodología para calcular el esfuerzo horizontal máximo. Este análisis se realiza mediante la determinación teórica de la zona de la pared que ha fallado, a partir de un modelo elástico lineal y del criterio de falla de Mohr-Coulomb. La determinación de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo se realizará por medio de la observación de *breakouts* y fracturas inducidas en el registro de imágenes de varios pozos, y la

comparación del ancho de esta falla observada con la falla determinada por la solución analítica (se considera que el *breakout* es la manifestación de un modo de falla compresiva localizada en la pared del hoyo).

En el registro de imágenes puede observarse tanto la profundidad del pozo a la que se encuentra el *breakout*, como el ancho de esta falla y su orientación, la cual corresponde con la orientación del esfuerzo horizontal mínimo *in-situ*.

La solución que se plantea es utilizar el modelo elástico lineal que rige el comportamiento de la roca y realizar iteraciones de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo hasta obtener un valor que complete el estado de esfuerzos que produzca una falla del mismo ancho que la observada en el perfil de imágenes. El valor obtenido será una estimación de la magnitud de este esfuerzo.

1.2.1 Objetivo General:

Estudiar la magnitud del campo de esfuerzos *in-situ* en los campos Santa Bárbara y Bosque en el oriente de Venezuela, utilizando el análisis de *breakouts* observados en el registro de imágenes de un pozo de cada uno de los campos del área.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Revisar carpetas de pozos que posean información de registros de imágenes.
- Escoger, preferiblemente, pozos que tengan simultáneamente registro de imágenes, ensayo de microfracturamiento y registro sísmico.
- Estimar propiedades mecánicas de la roca a partir de correlaciones y datos de laboratorio disponibles.
- Utilizar el concepto de ancho de *breakout* como la zona de la pared del hoyo fallada, y comparar con el ancho del *breakout* observado en el registro de imágenes.

- Desarrollar un programa para calcular esfuerzos alrededor de un hoyo de cualquier grado de inclinación y orientación, respecto a los esfuerzos *in-situ*, utilizando las soluciones de estado de deformación plana generalizada para un hoyo en un medio elástico lineal.
- Realizar un retro-análisis partiendo de las fallas observadas en el registro de imágenes del hoyo para estimar la magnitud del esfuerzo horizontal máximo *in-situ*. Determinar el esfuerzo horizontal máximo que satisface la zona de falla observada en el perfil de imágenes, mediante la programación de la solución analítica mencionada anteriormente.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.

De acuerdo a estudios anteriores, los problemas de estabilidad de hoyo son responsables de un 10 a un 20% extra del costo de la perforación. Los problemas de estabilidad pueden conducir a consecutivos desvíos del pozo o “*side-tracks*”, a la pérdida total del mismo por atascamiento de tubería o la pérdida de otras herramientas.

Inicialmente en la industria petrolera, la mayoría de los problemas de inestabilidad de hoyo se habían atribuido a problemas de naturaleza físico-química asociados a lutitas. Sin embargo, los conceptos de geomecánica han demostrado que los aspectos mecánicos (estado de esfuerzos y resistencia de la roca) son igualmente importantes. Debido a esto la mecánica de rocas ha sido introducida en la industria petrolera como una herramienta que puede explicar y predecir la inestabilidad en el hoyo. Además, es conocido de experiencias de campo (Horsrud, 1998), que una de las causas a la cual se atribuyen algunos de los problemas de estabilidad de hoyo es el inadecuado peso y/o composición del fluido de perforación.

La aplicación de los criterios que permiten determinar una ventana operacional óptima del peso del fluido de perforación requiere el conocimiento completo del campo de esfuerzos *in-situ* a los que está sometida la formación que va a ser

perforada. De igual forma, el conocimiento del campo de esfuerzos *in-situ* es importante para la aplicación del diseño de la trayectoria de pozos y de técnicas de estimulación de la producción como el fracturamiento hidráulico, y además para el análisis de problemas como producción de arenas y otros.

1.4 TIPO DE INVESTIGACIÓN.

Desde el punto de vista del propósito que orienta la investigación, ésta es una investigación teórica con aplicación de tecnologías y conocimientos en el área de la geomecánica. La estrategia metodológica en la cual se basa, se centra en fuentes documentales, apoyo del personal de PDVSA-Intevep y algunos programas con los cuales se hacen estimaciones de algunos parámetros necesarios para el análisis o bien comparaciones de los resultados obtenidos.

1.5 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Para el cumplimiento de los objetivos, además de utilizar diferentes fuentes documentales, se cuenta con el apoyo del personal de PDVSA-Intevep especializado en el área de Geomecánica.

La principal herramienta para el análisis propuesto en este trabajo es el registro de imágenes. Es por esta razón que los pozos a los que se les aplique este estudio, además de disponer de este registro, deberá tener también ensayos microfrac, reportes diarios de operaciones, registro de densidad, registro sísmico y además se debe tener conocimiento de las propiedades mecánicas de la formación en la profundidad a la que se encuentra el *breakout*, las cuales deben ser medidas en laboratorio.

Para la estimación del gradiente de sobrecarga con respecto a la profundidad, y la estimación de la presión de poros se utiliza el programa PREDICT disponible por PDVSA-Intevep (Knowledge System, Manual).

En el caso de no tener disponible datos de propiedades mecánicas necesarios para el análisis, se pueden utilizar correlaciones núcleo-perfil elaboradas en base a

mediciones dinámicas correspondientes a herramientas corridas en el hoyo y a mediciones de laboratorio realizadas en muestras de núcleos. Esto puede realizarse siempre y cuando se disponga tanto de los datos estáticos como los dinámicos por lo menos de pozos cercanos y para la misma formación.

Para la determinación de la envolvente de falla del criterio de Mohr-Coulomb se utilizarán en algunos casos valores de resistencia de la roca y otras propiedades mecánicas que ya han sido obtenidas de ensayos de laboratorio realizados en PDVSA-Intevep.

1.6 VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DEL PROGRAMA.

El programa realizado en base al modelo seleccionado es probado o validado comparando los resultados obtenidos con los arrojados por otros programas comerciales, disponibles en PDVSA-Intevep, los cuales están fundamentados en el mismo modelo aunque puede que no realicen el mismo cálculo. Dichos programas son el BSTAB1.1 (Maurer Engineering, 1996), el PBORE-3D, y otros.

La confiabilidad de los resultados obtenidos es importante para el conocimiento o la estimación de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo en el área de pozos cercanos a los que sean parte del estudio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

2.1 FUNDAMENTOS DE PERFORACIÓN.

Un pozo es una secuencia de hoyos que van disminuyendo de diámetro según más profundo esté ubicado. Estos hoyos son hechos con la ayuda de una mecha, en busca de yacimientos de hidrocarburos, a través de diferentes mecanismos de remoción de rocas, dependiendo del tipo de mecha que se esté utilizando.

Una vez abierto el hoyo se coloca una tubería de revestimiento o revestidores que proveen el soporte permanente de las paredes del hoyo y forman un camino libre para la tubería de perforación y otros equipos de fondo.

Una vez colocados los revestidores, el hoyo debe ser cementado. La cementación de un pozo es el proceso mediante el cual se aísla el revestimiento de las formaciones del hoyo recién perforado utilizando una capa de cemento. Para ello, el cemento se coloca en el espacio anular formado entre las paredes de la tubería de revestimiento y el hoyo, dejando fluir el cemento cuando aún esté en fase líquida (lechada de cemento). La lechada fluye a través del interior de la tubería de revestimiento, para luego llegar al fondo del hoyo y comenzar a salir por el espacio anular. En ese momento, se detiene el bombeo y se espera a que el cemento se fragüe.

Cuando el pozo es cementado es necesario restablecer la comunicación de la formación hacia el hoyo. Esto normalmente se realiza usando técnicas de cañoneo. Existen diversas herramientas de perforación capaces de llevar a cabo este proceso, la más comúnmente usada es el cañoneo con balas, donde se penetra la tubería de perforación y el cemento hasta llegar a la formación productora.

Una vez conectado el hoyo con el yacimiento, es necesario crear un diferencial de presión dentro del hoyo que permita que el crudo fluya hacia éste. Esto se logra

haciendo que la presión de fondo fluyente dentro del hoyo sea menor a la presión de la formación.

El tipo de perforación utilizado convencionalmente es el rotatorio. La mecha se conecta a la sarta de perforación (conjunto de tubos ensamblados por juntas conectoras) y este conjunto se engrana a la mesa rotatoria que transmite la rotación. El hoyo se hace con el movimiento rotatorio de la mecha.

La perforación rotatoria permite bombear un fluido de perforación a través de la sarta de perforación. Este fluido sale a través de la mecha hacia afuera nuevamente. Como resultado de la circulación de lodo, la roca removida sale con el lodo y no hay que parar la perforación para sacar los ripios.

En la perforación convencional, la presión del fluido de perforación es mayor a la presión de la formación.

En la tabla 2.1 se encuentran enumeradas las principales ventajas y desventajas de la perforación convencional.

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de la perforación convencional.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil control de fluidos en superficie. • Menos problemas de estabilidad de hoyo que con la perforación bajo balance. • Es la tecnología de perforación más conocida hasta el momento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto daño a la producción. • Los fluidos no perjudiciales que utilizan son muy costosos. • Baja tasa de penetración.

Otro método de perforación es el llamado bajo balance, la cual es una operación diseñada de manera que la presión del fluido de perforación es intencionalmente

mantenida por debajo de los valores de la presión de poro del yacimiento. En consecuencia los fluidos de la formación penetran al pozo. Este tipo de perforación tiene algunas ventajas en comparación con la perforación convencional, como son el incremento de la tasa de penetración, eliminación de la pérdida de circulación y de la pega diferencial, disminución de los daños a la formación, y otras. Por otra parte, una de las principales desventajas del método de perforación bajo balance son los problemas de estabilidad de hoyo.

2.1.1 Fluidos de Perforación.

El término fluido de perforación comprende todas aquellas formulaciones de fluidos o componentes líquidos que se emplean en las fases de perforación de un pozo. Entre otras funciones, se encarga de trasladar hasta la superficie los ripios o roca removida de las formaciones atravesadas por la mecha y provee un soporte para las paredes del hoyo.

El fluido de perforación se introduce por la parte interna de la tubería de perforación hasta ponerse en contacto con la roca a perforar y luego retornar por el espacio anular que se va formando entre la tubería y la pared del pozo.

La circulación del lodo o fluido de perforación es un proceso cíclico por lo que el acondicionamiento permanente de éste es una de las tareas más importantes durante el proceso de perforación.

Cuando el componente principal del fluido es líquido, se utiliza el término "lodo" para definir una suspensión de aditivos químicos (sólidos y líquidos) en el líquido.

En la figura 2.1 se muestra un corte transversal de un hoyo, donde se puede observar el proceso de circulación del fluido de perforación.

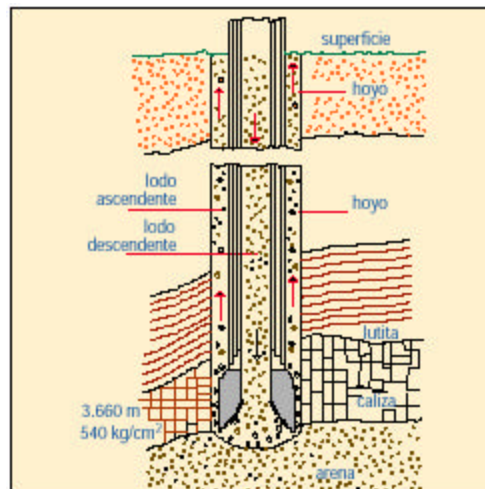


Fig. 2.1: Corte transversal de un hoyo para mostrar el descenso y ascenso del fluido de perforación (Pozo Ilustrado, 1998).

2.1.1.1 Funciones del Fluido de Perforación.

Todo fluido de perforación debe cumplir ciertas funciones básicas durante la construcción de un pozo y debe diseñarse de manera tal que se mantenga estable ante la presencia de diferentes materiales contaminantes (sólidos perforados altamente reactivos, gases ácidos, entre otros) y bajo las condiciones de presión y temperatura esperadas en el pozo.

Entre las principales funciones del fluido de perforación se encuentran:

- a) Facilitar la remoción de partículas rocosas y transportar los recortes de perforación generados por la mecha y los derrumbes de las paredes del hoyo hasta la superficie, dejando limpia la nueva superficie por perforar.
- b) Controlar las presiones encontradas en las formaciones atravesadas.
- c) Proteger las paredes del pozo formando una delgada capa impermeable (Revoque) para impedir el paso de fluidos a la roca y minimizar la perturbación de la presión de poro original de la formación.

- d) Soportar, preservar y proteger el hoyo abierto hasta que el revestidor sea bajado y cementado.
- e) Enfriar y lubricar la mecha y la sarta de perforación.
- f) Mantener en suspensión los ripios en el espacio anular, cuando se detiene la circulación.
- g) Controlar flujos formacionales de agua, gas y petróleo.

2.2 FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE ROCAS.

La geomecánica es la disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas de la formación. Está basada en los conceptos y teorías de mecánica de rocas y mecánica de suelos que relacionan el comportamiento de la formación bajo los cambios de esfuerzos, producto de las operaciones petroleras de perforación, completación y producción de pozos.

Por esta razón, la geomecánica siempre trata problemas donde se relacionan los esfuerzos con la resistencia de la formación. De esta manera, todas las operaciones de pozos que afecten y causen daño a la formación se deben tomar en cuenta en el análisis de cualquier problema de estabilidad de hoyos, arenamiento, fracturamiento, etc.

Los materiales geológicos están compuestos por un sistema multifásico de partículas minerales que crean una estructura porosa donde residen fluidos tales como agua, hidrocarburos y aire. Este sistema de partículas es lo que distingue a los materiales geológicos de los materiales continuos, como los metales y fluidos.

Siendo los materiales geológicos una composición de partículas sólidas y poros llenos de fluidos que pueden desplazarse, al estar sometido un elemento de este material a un esfuerzo externo, este se reparte en un esfuerzo intergranular y una presión de poros. Aquí se hace presente una constante conocida como coeficiente de

Biot, que mide la cantidad de esfuerzo que toma el fluido contenido en los poros. El esfuerzo intergranular es también conocido como esfuerzo efectivo, y es el que controla el comportamiento mecánico de los materiales geológicos.

Por otra parte las rocas o materiales geológicos no poseen una relación esfuerzo-deformación única y lineal, sino diferentes comportamientos a diferentes presiones confinantes o de confinamiento.

2.2.1 Propiedades Físicas y Mecánicas de la Formación.

2.2.1.1 Propiedades Físicas:

El conocimiento de las propiedades físicas de las rocas, en especial de las lutitas, es de suma importancia para desarrollar relaciones constitutivas realistas que permitan hacer diagnósticos apropiados para resolver o reducir los problemas asociados durante la perforación (Steiger, 1992; Gazaniol, 1995).

a) Permeabilidad: Esta propiedad puede definirse como la capacidad o facilidad que tiene el fluido para moverse dentro de la roca a través de sus poros interconectados y/o red de fracturas, cuando se encuentra sometida a un gradiente de presión. Por lo tanto, depende tanto de la cantidad de poros como de las conexiones que existan entre ellos.

El incremento de permeabilidad puede también hacer a la roca ligeramente más fácil de perforar, es decir, si la permeabilidad es muy baja las tasas de penetración tienden a ser bajas. Una baja permeabilidad de la roca responde a cambios en la presión absoluta del hoyo mientras que una alta permeabilidad responde a cambios en la presión diferencial entre el pozo y la formación. Las zonas de alta permeabilidad pueden tener una alta propensión a la pérdida de fluido de perforación.

b) Porosidad: Es la relación entre el volumen de espacio vacío (volumen poroso) y el volumen total de la roca. A medida que incrementa la porosidad, el porcentaje de volumen de fluido incrementa mientras que el volumen del esqueleto de la roca

disminuye, resultando en un debilitamiento de la roca. La porosidad se puede dividir en dos tipos: una porosidad absoluta y una porosidad efectiva. La porosidad absoluta es la que considera el volumen total de poros, estén o no interconectados. Por otra parte, la porosidad efectiva sólo considera los poros que están interconectados.

c) Presión de Poro: La presión de poro de la formación es la presión ofrecida por los fluidos contenidos en los poros de la roca. La presión de poro de la formación es el parámetro que determina si un pozo está siendo perforado con técnicas de perforación convencional o con técnicas de bajo balance.

d) Presión Normal de la Formación: Es igual a la presión hidrostática de una columna de agua en la profundidad vertical de interés. El gradiente normal de formación promedio es 0,465 lpc/pie.

2.2.1.2 Propiedades Mecánicas:

Los núcleos de rocas que son removidos de condiciones *in-situ* se someten por lo general a ensayos de compresión con equipos especiales. Para simular las condiciones del subsuelo, las muestras son sometidas a un esfuerzo de confinamiento. Mediante la realización de estos ensayos se pueden determinar parámetros de resistencia y otras propiedades de la roca.

a) Propiedades Elásticas de la Roca: La teoría de elasticidad lineal permite establecer relaciones lineales entre la aplicación de esfuerzos y las deformaciones resultantes. La deformación es la respuesta de la roca cuando ésta es sometida a un esfuerzo, reflejándose en un cambio en su configuración original.

De acuerdo a la teoría de elasticidad lineal, la roca se deforma mientras es sometida a un esfuerzo, pero retorna a su forma original cuando el esfuerzo cesa. Bajo esta condición, la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado (ley de Hooke). Por otra parte, cuando se aplica un esfuerzo a la roca superior al límite elástico, la misma experimentará una deformación plástica. Bajo esta condición, la

roca retornará parcialmente a su forma original una vez que ese esfuerzo haya cesado, es decir, le ocurre una deformación permanente. Si se continúa aplicando el esfuerzo, la roca fallará (resistencia última). Estas dos etapas de deformación se pueden observar en la figura 2.2.

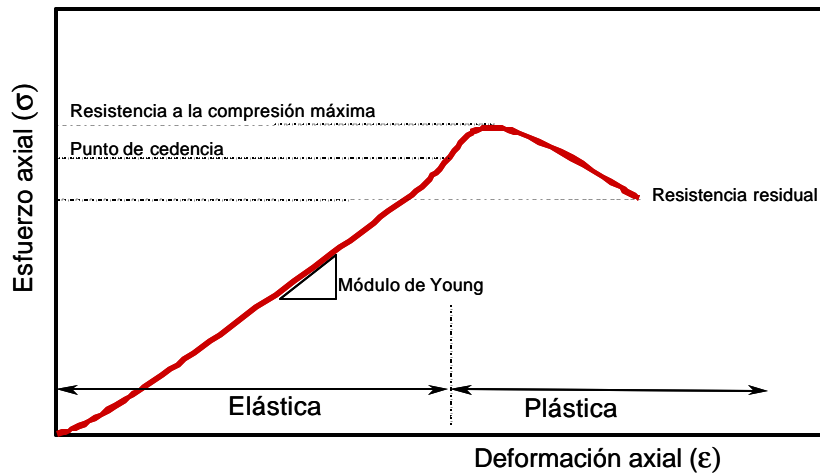


Fig. 2.2: Relación esfuerzo-deformación. (AMOCO, 1996)

En determinados rangos de esfuerzos las rocas se comportan de manera elástica, por lo que éste modelo es aplicable bajo ciertas condiciones. Dentro del grupo de propiedades elásticas básicas se encuentran:

MÓDULO DE YOUNG (E): Es la relación existente entre el esfuerzo axial (σ_x) y la deformación axial (ϵ_x) a lo largo del mismo eje, cuando se le aplica una fuerza sobre la superficie de los extremos a una muestra cilíndrica de roca. Si la muestra se comporta linealmente, existe una relación lineal entre σ_x y ϵ_x , la cual se expresa tomando en cuenta la Ley de Hooke, como se observa en la ecuación:

$$\sigma_x = E * \epsilon_x \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

RELACIÓN DE POISSON (ν): El diámetro de la muestra incrementa al aplicar un esfuerzo σ_x , es un incremento en el diámetro de la muestra, por lo que se produce una elongación lateral (ϵ_y) en la muestra. La relación de Poisson es una medida de la extensión lateral (ϵ_y) con respecto a la contracción longitudinal (ϵ_x). Esto es:

$$\nu = - \epsilon_y / \epsilon_x \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

b) **Anisotropía de la Roca:** Usualmente, se asume que las rocas son isotrópicas, es decir, que sus propiedades son independientes de la dirección en que sean medidas. Sin embargo, hay rocas que claramente muestran un comportamiento anisotrópico, como por ejemplo las lutitas. Estas son rocas sedimentarias de estructura laminar, cuyas laminaciones se les denomina planos de buzamiento, planos de sedimentación y en algunos casos, planos de estratificación. Estos planos de buzamiento son conjuntos regulares visibles de tamaño de grano u orientación que resultan de los procesos de deposición (Chenevert, 1965).

Si la respuesta elástica de un material es dependiente de la dirección para una configuración de esfuerzos dada, entonces el material es anisotrópico. Los módulos elásticos para un material anisotrópico son diferentes para diferentes direcciones en el material. Una cantidad de trabajos experimentales y teóricos se han hecho en el campo del comportamiento anisotrópico de las rocas.

c) **Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS):** Es la resistencia a la compresión ofrecida por el material cuando éste no está sometido a una presión de confinamiento. La resistencia a la compresión no confinada es determinada aplicando un ensayo de compresión uniaxial a una muestra de roca.

d) **Cohesión:** La cohesión se refiere a la fuerza que mantiene unidos los granos de la formación productora e impiden el flujo libre. La roca adquiere su cohesión a través de procesos diagenéticos como son los mecanismos de compactación, cementación, recristalización y solución. Las rocas que han sufrido poco grado de compactación y que no poseen mucho material cementante son fácilmente disgregadas y se conocen como friables, este tipo de formaciones se encuentran por lo general en formaciones someras no sometidas a un intenso tectonismo. Otro factor que contribuye a la cohesión de la roca es la fuerza capilar que se produce entre los granos de la roca y el fluido humectante.

e) **Ángulo de fricción Interna:** Este parámetro define la fricción intergranular de la roca. El ángulo de fricción viene dado por la relación entre las resistencias al corte y compresivas del material. Esto es determinado a través de ensayos triaxiales que se realizan con núcleos de una misma profundidad, a varias presiones de confinamiento.

2.2.2 Ensayos Geomecánicos de Laboratorio.

Durante la vida de un pozo, los esfuerzos totales y las presiones de poro van cambiando y, por lo tanto, la resistencia de la formación también está cambiando continuamente. Basado en esto, es necesario conocer la deformación de la roca cuando ésta es sometida a los esfuerzos, aún cuando no se haya excedido la resistencia mecánica de la roca y haya ocurrido la falla.

Las propiedades mecánicas de la roca se determinan mediante la realización de ensayos geomecánicos, siendo los de mayor interés aquellos que miden resistencia, los que miden direcciones de esfuerzos o deformaciones y los que miden comportamiento esfuerzo-deformación. Estas pruebas o ensayos geomecánicos pueden clasificarse en: estáticos, dinámicos y dependientes del tiempo. Las pruebas estáticas se emplean para medir la deformación y fallas de muestras de rocas bajo condiciones variables de cargas uniaxiales, biaxiales y triaxiales. Los resultados proveen valores de resistencia y propiedades elásticas. Son conocidas como pruebas estáticas porque la tasa de aplicación de la carga, a la muestra, es relativamente lenta.

Por otra parte, las pruebas dinámicas se caracterizan por realizarse a altas tasas de aplicación de carga y son llevadas a cabo tanto en laboratorio como en campo, mientras que las pruebas dependientes del tiempo se realizan aplicando cargas uniaxiales y triaxiales a muestras de roca, y la deformación y falla se miden en función del tiempo.

Existen otras pruebas especiales, además de los ensayos de compresión triaxial y compresión uniaxial, que realizadas en núcleos orientados permiten determinar la magnitud y dirección de los esfuerzos principales en campo.

a) Ensayo de Compresión sin Confinar: En este ensayo se comprime una muestra de roca sin confinamiento lateral (UCS) hasta alcanzar su resistencia máxima. En la figura 2.3 se muestra el principio de este ensayo.

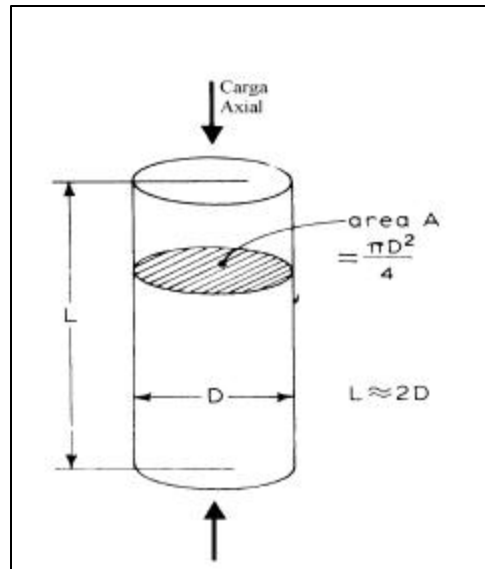


Fig. 2.3: Principio del Ensayo de Compresión sin Confinar

Esta prueba es usada, entre otras cosas, para la determinación del comportamiento esfuerzo - deformación, el Módulo de Young y la relación de Poisson de la roca.

b) Ensayo de Compresión Triaxial: Éste es el tipo de ensayo más común en la geomecánica. El principio es comprimir una muestra de roca cilíndrica bajo una presión de confinamiento constante, como se observa en la figura 2.4.

Generalmente, mediante este ensayo de compresión triaxial se determina, para una misma presión de confinamiento, la resistencia máxima, el comportamiento esfuerzo-deformación, el módulo de Young y la relación de Poisson del material. Este tipo de ensayo se realiza a diferentes presiones de confinamiento para generar la envolvente de falla. Por lo general, la envolvente de falla utilizada es la de Mohr-Coulomb.

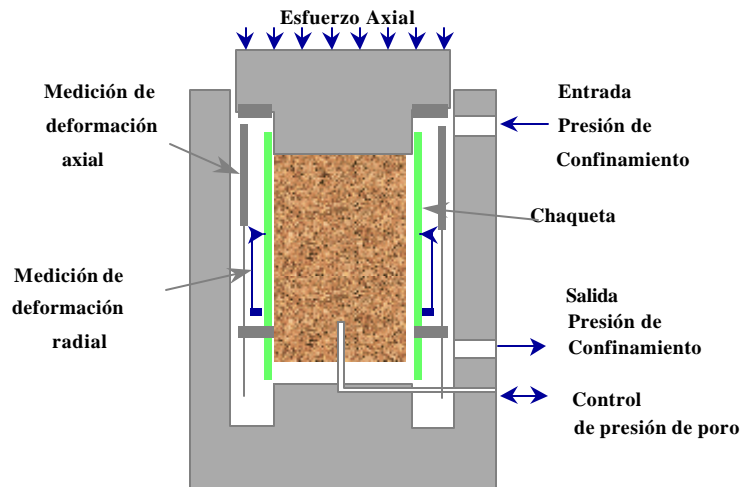


Fig. 2.4: Principio del Ensayo de Compresión Triaxial (cortesía de Baker).

Resulta entonces necesario obtener núcleos geológicos de la zona de interés para poder realizar cualquier ensayo geomecánico de laboratorio. Estos núcleos tienen que ser tomados con técnicas que minimicen la perturbación del mismo, especialmente en formaciones no consolidadas, debido a que los materiales geológicos son muy sensibles a las operaciones de muestreo y por lo tanto las propiedades mecánicas medidas en el laboratorio pueden no ser representativas del comportamiento en el sitio. Además de esto, el núcleo debe ser orientado para poder procesar aquellos ensayos de laboratorio que involucren la determinación de direcciones de esfuerzos principales.

Con los ensayos geomecánicos de laboratorio se podrán medir propiedades de las rocas de la formación tales como: Módulo de Young, Relación de Poisson, Resistencia a la Tracción, Resistencia a la Compresión, Permeabilidad y Comportamiento Esfuerzo-Deformación. Todos estos parámetros pueden ser determinados bajo diferentes condiciones de esfuerzo y presiones de fluido.

2.2.3 Información Geomecánica a partir de Datos de Campo.

Por ser el conocimiento de las propiedades mecánicas de las formaciones muy importante en conexión con los problemas de estabilidad de hoyo, se disponen de

métodos para la medición y determinación de ellas. Además de los ensayos geomecánicos de laboratorio descritos anteriormente, existen otros métodos a partir de los cuales se pueden estimar las propiedades mecánicas, los cuales se basan en ensayos y datos de campo, y pueden ser agrupados en dos categorías: herramientas de perfilaje y métodos de campo.

Entre los métodos y la información de campo de la cual se puede disponer para el conocimiento de las propiedades mecánicas, se tienen:

2.2.3.1 Registros Acústicos:

Los perfiles acústicos miden velocidades de propagación de ondas, compresionales y de corte (V_p , V_s), y pueden ser utilizados para la estimación de parámetros elásticos.

El uso de las herramientas acústicas puede entonces determinar las propiedades dinámicas de la formación, las cuales pueden ser comparadas con las propiedades dinámicas y estáticas (resistencia) de laboratorio para elaborar correlaciones predictivas.

2.2.3.2 Registros de Densidad:

El registro de densidad utiliza rayos gamma activos los cuales emplean la dispersión de Compton de estos rayos para la medición de la densidad de los electrones de la formación. Una vez efectuadas las correcciones por variaciones litológicas, la densidad electrónica se convierte en densidad de masa.

La densidad es útil tanto para calcular los parámetros o módulos elásticos, a partir de los perfiles acústicos, como para obtener un estimado del esfuerzo vertical o sobrecarga. La sobrecarga es obtenida a partir de la integración del registro de densidad sobre la profundidad vertical del pozo, al menos en áreas de baja actividad tectónica en las cuales el esfuerzo vertical es también considerado como un esfuerzo principal.

Además de lo mencionado anteriormente, la determinación de la sobrecarga a partir del registro de densidad ayuda a realizar un estimado de la presión de poro. Sin embargo, debido al uso que se le da a este registro, es necesario que éste sea tomado o corrido desde la superficie hasta el fondo del pozo para ser aprovechado completamente.

2.2.3.3 Registros de Rayos Gamma:

La herramienta de espectrometría de rayos gamma es utilizada para la determinación de la saturación de agua, porosidad y litología. Esta herramienta registra y analiza el espectro de rayos gamma inducidos por la interacción de neutrones con la formación.

El registro de rayos gamma permite establecer las diferentes litologías y efectuar la separación y clasificación de las formaciones, generalmente en unidades geomecánicas. En las formaciones sedimentarias, el registro normalmente refleja el contenido de arcilla de las formaciones, porque los elementos radiactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas.

2.2.3.4 Registros de Presión de Poros:

Se obtienen mediante el uso de una herramienta petrofísica conocida como probador múltiple de formación, el cual es un sistema diseñado para medir la presión de la formación a diferentes profundidades dentro de un hueco abierto. Estas mediciones de presión también tienen aplicaciones para realizar un rápido estimado cualitativo de permeabilidad de formación y capacidad de tomar muestras de fluido de la formación.

El probador de formación tiene gran importancia en la geomecánica ya que el principio de esfuerzos efectivos, que son los encargados de controlar el comportamiento mecánico de la roca, toma en cuenta la presión de poro.

La presión de poro es un parámetro muy importante para evaluar la estabilidad del hoyo, ya que determina el esfuerzo efectivo al cual está sometida la masa rocosa.

2.2.3.5 Prueba Microfrac:

El ensayo de microfractura o *leak-off* es el método utilizado para la determinación de la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo. El conocimiento de la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo resulta indispensable en un estudio geomecánico para definir el estado de esfuerzos, y es determinado del análisis de la caída de presión después del cierre de la fractura, definiendo entonces este esfuerzo como la presión requerida para mantener abierta una fractura.

Estos ensayos se efectúan en una sección o intervalo aislado de la formación en el cual se incrementa la presión del fluido en la columna del pozo hasta lograr su fracturamiento. Inicialmente, se obtiene un incremento lineal de presión hasta un punto determinado en el cual posteriormente se observa una desviación y un máximo pico, el cual corresponde a la presión necesaria para superar el esfuerzo tangencial y la resistencia a la tracción de la roca.

Una vez obtenido este pico se observa un decaimiento de la presión, la cual se atribuye a la energía necesaria para propagar la fractura, la cual requiere menos fuerza que la necesaria para la creación de una fractura. En su etapa final cesa el bombeo y se cierra el pozo, observándose una caída de presión debido a las pérdidas por fricción. El valor al cual cae la presión inmediatamente después de cesar el bombeo, denominada la presión instantánea de cierre, se interpreta como una estimación del esfuerzo mínimo horizontal.

En términos generales, si una vez iniciada la fractura se detiene el bombeo de fluido se está efectuando un ensayo *leak-off*. Si el bombeo se mantiene por cierto período para permitir la propagación de la misma, se está efectuando un ensayo *leak-off extendido*, e inclusive si se efectúan varios ciclos de bombeo de fluidos, se estarán realizando ensayos de microfracturas. Durante esta prueba se debe efectuar un

registro continuo de factores como presión de fondo, presión de superficie, volumen de fluido y tiempo de bombeo.

Entre las fuentes de error de este ensayo se encuentran la filtración de fluido a la formación, la concentración de esfuerzos, el estimado de la presión de poro, las pérdidas de presión por fricción en la tubería y la resistencia mecánica de la roca. En la figura 2.5 se observa la curva obtenida de un ensayo *leak-off*.

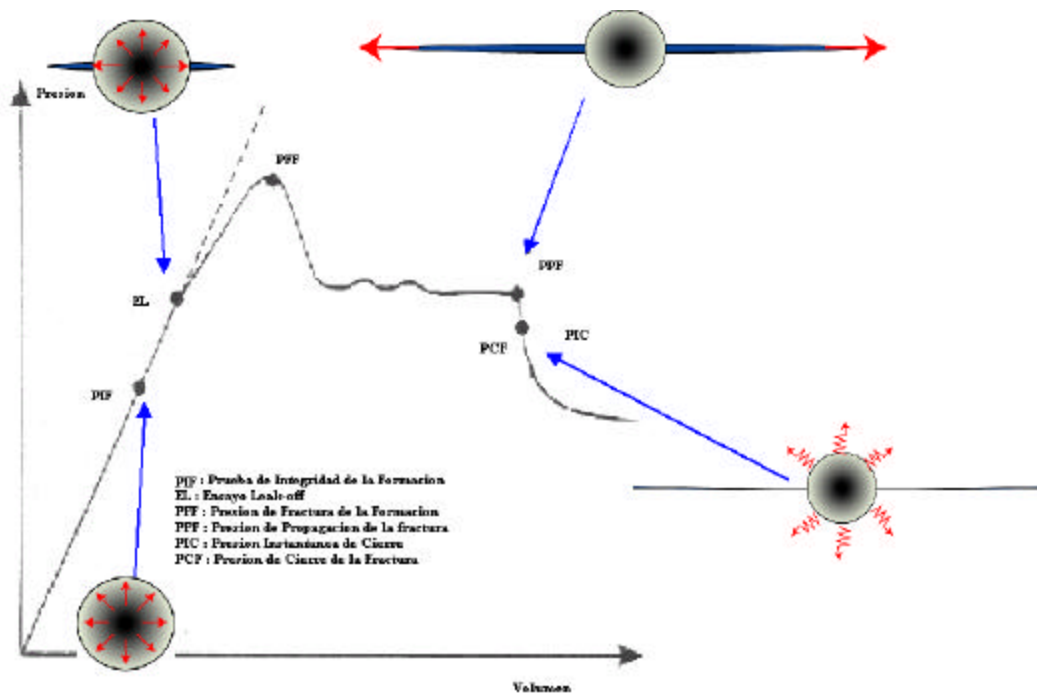


Fig. 2.5: Curva obtenida de un ensayo *leak-off* (GMI, 2001).

2.2.3.6 Pruebas Minifrac:

A diferencia del ensayo microfrac, el cual se utiliza principalmente para determinar la magnitud del esfuerzo horizontal menor, el propósito principal del ensayo minifrac es obtener parámetros sobre los fluidos de fracturamiento para optimizar el diseño de una fractura hidráulica.

El ensayo minifrac es realizado antes de un tratamiento de fractura hidráulica, y los parámetros que puede calcular son los siguientes:

- a) Presión de cierre de la fractura y su tiempo de cierre asociado.
- b) Eficiencia del fluido de fracturamiento.
- c) Magnitud y tasa de cambio de la presión de inyección en función de la tasa de bombeo y el fluido inyectado.

El minifrac trabaja a las mismas altas tasas que el fracturamiento hidráulico principal (barriles por minuto), sin embargo no se utiliza agente de sostén que mantenga la fractura abierta. También se utiliza el mismo fluido de fracturamiento para poder calibrar los parámetros mencionados anteriormente.

2.2.3.7 Caliper de 4–6 brazos:

Con éste se puede determinar la orientación del campo de esfuerzos. Corrido desde la superficie permite determinar los posibles cambios de orientación en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo.

2.2.3.8 Registro de Imágenes:

Además del uso de los perfiles y ensayos de campo mencionados anteriormente, también se deben emplear herramientas petrofísicas que midan calidad y deformación del hoyo para distinguir dirección de óvalos y "breakouts". Esto es generalmente hecho con registros de imágenes ultrasónicas, ya que son bastante exactas para detectar rugosidades, fracturas inducidas y "breakouts" (figura 2.6), lo cual puede ser utilizado para determinar la dirección de los esfuerzos.

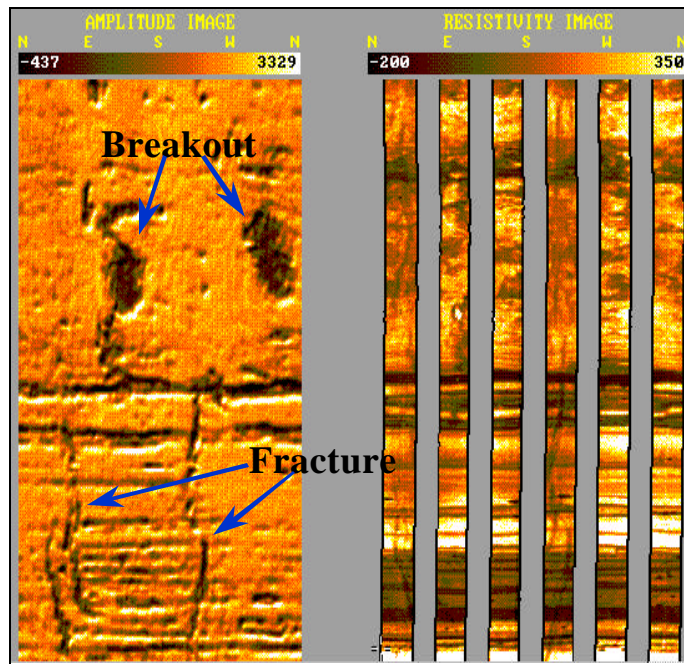


Fig. 2.6: Registro de Imágenes. (cortesía de Baker)

La herramienta ultrasónica de imágenes del pozo permite la observación continua de las variaciones laterales y verticales de las formaciones con un detalle que permite estudios tanto estructurales como estratigráficos. Este perfil provee imágenes acústicas de las paredes del pozo con una cobertura de 360 grados en pozos perforados con lodos tanto resistivos como conductivos. El registro de imágenes trabaja con frecuencias de 250 o 500 kHz con la finalidad de obtener tiempo de tránsito y amplitud. Las frecuencias altas se utilizan para obtener una mejor resolución y las frecuencias bajas se utilizan para obtener lecturas en lodos muy dispersos. La velocidad de perfilaje puede variar entre 800 y 2100 pies/h, tomando en cuenta que mientras menor sea la velocidad de perfilaje mejor será la resolución de la imagen.

Dentro de las principales aplicaciones que tiene el registro de imágenes se encuentran las siguientes:

-
- a) Análisis Estructural: determinación de los planos de buzamiento inclusive bajo condiciones severas de desviación. Confirmación visual del buzamiento estructural y determinación de anomalías.
 - b) Evaluación de fracturas: discriminación entre fracturas naturales e inducidas y determinación de sus parámetros direccionales (rumbo y buzamiento). Estimación de porosidad y apertura.
 - c) Caracterización de Yacimientos: estimación de barreras de permeabilidad, identificación de texturas y análisis de capas finas.
 - d) Análisis de Esfuerzos: estimación de las direcciones de esfuerzos horizontales máximos y mínimos. Cálculo de ovalizaciones.

El objetivo de la interpretación de imágenes de pozos es la caracterización de las propiedades de la formación, con la finalidad de asistir al geólogo/ingeniero en la evaluación integral del yacimiento (o intervalo de interés) detectando la presencia de posibles barreras de permeabilidad, ayudando al cálculo de los porcentajes de arena total, como entrada en la planificación de la completación del pozo y futuros trabajos de fracturamiento hidráulico.

Como fundamento en la interpretación de imágenes de pozo cabe mencionar que las señales ultrasónicas registradas son codificadas con colores y transformadas tomando como criterio que los eventos de alta velocidad se codifican con colores claros y los eventos de baja velocidad se codifican con colores oscuros. De manera tal que las arenas y calizas, por ser rocas duras, son de alta velocidad y se presentarán de color claro, mientras que las lutitas, carbones y dolomitas, por ser rocas de baja velocidad, se presentarán de color oscuro.

2.3 ESTABILIDAD DE HOYO.

Las formaciones en toda su litología exhiben inestabilidad de tres maneras básicas, una relacionada a la fisicoquímica, otra a la geomecánica y otra a las

prácticas operacionales. En la figura 2.7 se muestra un enfoque integrado para estabilidad de hoyo, específicamente de lutitas.

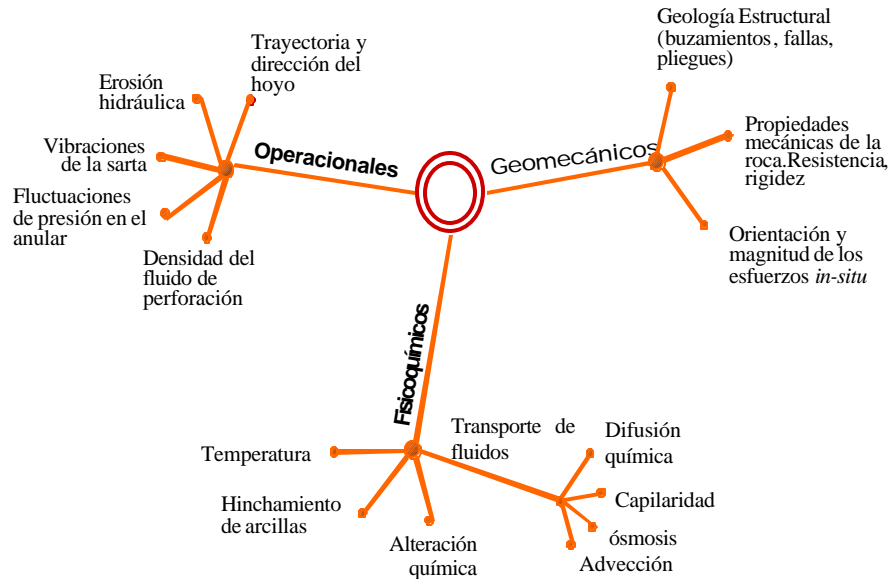


Fig. 2.7: Enfoque integrado para estabilidad de lutitas. (Sánchez et al., 1999)

El estudio de estabilidad de hoyo tiene como finalidad encontrar un rango de valores de densidad del fluido de perforación con un límite superior que permita llevar a cabo las operaciones sin tener problemas de fractura, y con un límite inferior que impida problemas de colapso del hoyo.

En la mayoría de los casos la consecuencia más común de la inestabilidad del hoyo es el derrumbamiento o colapso del mismo. Debido a esto, cuando se está perforando en regiones desconocidas que tienen problemas de derrumbamiento es importante hacer una evaluación para saber si la causa de este problema es debido al campo de esfuerzos, sensibilidad química, efectos operacionales o combinaciones de estos.

Si el problema de inestabilidad es generado por causas químicas, entonces debe elegirse un fluido de perforación que no reaccione ni con las rocas ni con los fluidos que están presentes en la formación, y que al mismo tiempo ejerza la suficiente presión hidrostática como para soportar las paredes del hoyo.

La perforación del hoyo induce esfuerzos adicionales en la roca circundante (los cuales dependen de la rigidez de la roca, los esfuerzos *in-situ*, la presión de poro y la geometría del hoyo). Estos esfuerzos adicionales pueden causar fallas en la roca por compresión, tracción o corte a lo largo de fracturas preexistentes.

Bajo todas estas condiciones la roca alrededor del hoyo puede hacerse inestable, comenzando la deformación, fractura y derrumbe o formación de cavernas dentro del hoyo o dispersión en el fluido de perforación, induciendo todo esto a un daño mecánico a la formación.

Las causas más generales que provocan problemas de inestabilidad del hoyo son:

- a) Incorrecta selección de la trayectoria del pozo.
- b) Selección inadecuada de la densidad o peso del fluido de perforación.
- c) Selección inadecuada del tipo de fluido de perforación.
- d) Problemas o deficiencias en las prácticas operacionales de perforación.

Los problemas resultantes de la inestabilidad del hoyo tienen un gran efecto en la eficiencia de la perforación, debido a derrumbes o disminución del diámetro del hoyo que está siendo perforado. Tales problemas incluyen:

- a) Pega de la tubería de perforación como consecuencia del colapso del hoyo debido a excesivos esfuerzos en la roca.
- b) Dificultad en las operaciones de limpieza del hoyo debido a los derrumbes de la formación, lo cual incrementa los costos principalmente del lodo de perforación.
- c) Pérdida de circulación del fluido de perforación provocada por la presencia de fracturas en la formación (drenaje hacia la formación).
- d) Fallas de la sarta de perforación.

- e) Presencia de “*Breakouts*”.
- f) Dificultad para correr registros y bajar los revestidores, aumentándose con esto último los costos de cementación. Además se obtienen registros de no muy buena calidad debido a los derrumbes de las paredes del pozo.
- g) Alto torque y severo “*Stick-Slip*” (atascamiento de la sarta de perforación).
- h) Pérdida de toda una porción del intervalo de productividad debido al colapso de la formación.
- i) Drenaje de fluidos formacionales hacia el pozo (método de perforación bajo balance).

2.3.1 Estabilidad Geomecánica.

La estabilidad del hoyo desde el punto de vista geomecánico depende de una combinación de factores como la geometría del hoyo (azimut e inclinación), la presión de poro de la formación, la magnitud y dirección de los esfuerzos a los que se encuentra sometida la formación, las propiedades mecánicas de la roca y la densidad del fluido de perforación.

La inestabilidad mecánica es producto de los esfuerzos inducidos durante el proceso de perforación, los cuales son debidos a:

- a) El proceso de perforación, el cual altera el estado de esfuerzos que originalmente tiene la formación que va a ser perforada.
- b) La presión hidrostática ejercida por el fluido de perforación, al igual que su tiempo de exposición y su interacción con la formación.
- c) Los cambios de temperatura.

La remoción de la roca durante el proceso de perforación afecta el estado de esfuerzos alrededor del hoyo. Las componentes del campo de esfuerzos, inducidos en las cercanías del hoyo, en coordenadas cilíndricas (figura 2.8) son:

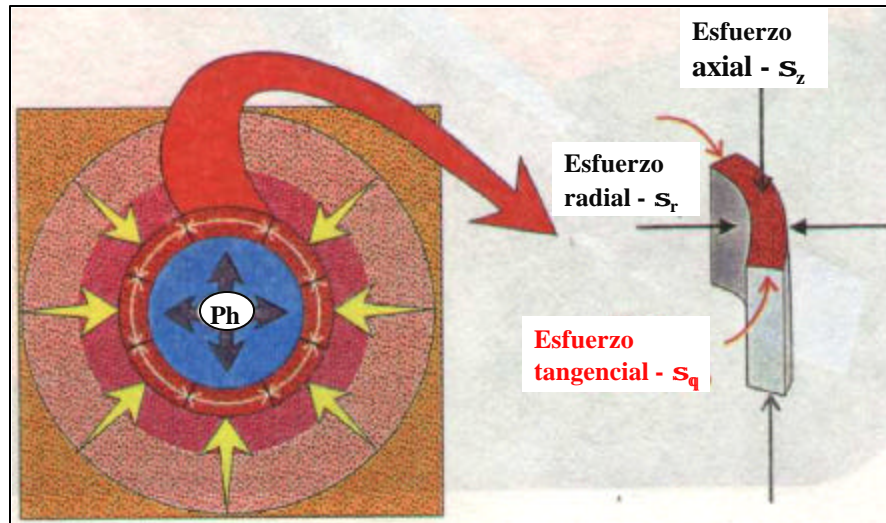


Fig. 2.8: Vista transversal y vista anular de los esfuerzos que actúan en el hoyo. (AMOCO, 1996)

ESFUERZO TANGENCIAL (σ_{θ}): este esfuerzo actúa alrededor de la circunferencia del pozo. Depende de la presión en el hoyo, de la magnitud y orientación de los esfuerzos *in-situ*, de la presión de poros y de la dirección e inclinación del hoyo.

Para un hoyo vertical con esfuerzos horizontales iguales, el esfuerzo tangencial es dependiente del peso de lodo y de la magnitud de los esfuerzos horizontales y es igualmente distribuido alrededor del hoyo. Un hoyo desviado o una condición de anisotropía de los esfuerzos horizontales crean una desigual distribución del esfuerzo tangencial alrededor del hoyo debido a las condiciones de borde anisotrópicas. El esfuerzo tangencial es máximo en el lado del hoyo perpendicular al esfuerzo horizontal máximo.

ESFUERZO AXIAL (σ_z): este esfuerzo está orientado a lo largo de la trayectoria del pozo. Éste depende de la magnitud y orientación de los esfuerzos *in-situ*, de la presión de poros y de la dirección e inclinación del hoyo. El esfuerzo axial no se ve afectado directamente por la densidad del fluido de perforación. En un hoyo vertical con esfuerzos horizontales iguales el esfuerzo axial es igual al esfuerzo vertical, mientras que en un pozo desviado el esfuerzo axial depende de la sobrecarga y de los esfuerzos horizontales.

ESFUERZO RADIAL (σ_r): en pozos verticales, este esfuerzo actúa a lo largo del radio del hoyo y es la diferencia entre la presión en el hoyo y la presión de poro. Esta diferencia de presiones actúa perpendicular a la pared del hoyo.

Los esfuerzos tangenciales, radiales y axiales describen el estado de esfuerzos de la roca en la zona de las paredes del pozo. Normalmente estos esfuerzos son compresivos y originan esfuerzos de corte en la roca, sin embargo pueden llegar a ser esfuerzos de tracción dependiendo del peso del fluido de perforación, de los esfuerzos *in-situ* y de la trayectoria del hoyo. Para garantizar la estabilidad mecánica de la roca estos esfuerzos deben ser lo más similares posibles (AMOCO, 1996).

En la figura 2.9 se observa el comportamiento de la magnitud de los esfuerzos efectivos axial y tangencial alrededor de la pared del hoyo, con respecto a la dirección del esfuerzo horizontal máximo.

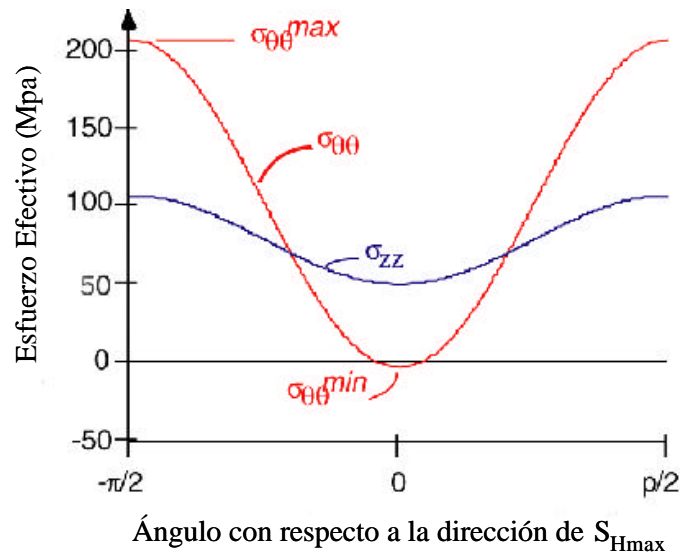


Fig. 2.9: Magnitud de los esfuerzos efectivos axial y tangencial en la pared del hoyo. (GMI, 2001)

A continuación se nombran algunos parámetros de perforación que afectan directamente los esfuerzos descritos y que pueden ser controlados para lograr la estabilidad mecánica del hoyo:

- a) Densidad de Lodo (MW) y Densidad Equivalente de Circulación (ECD). El efecto de la densidad de lodo es directo en los esfuerzos tangencial y radial en la pared del hoyo. La magnitud del esfuerzo tangencial es inversamente proporcional a la densidad de lodo y la del esfuerzo radial es directamente proporcional a la densidad de lodo. El resultado en la estabilidad del hoyo es dependiente de la magnitud con que se incremente o disminuya la densidad del lodo.
- b) Revoque y filtrado del hoyo. El revoque juega un papel importante en la estabilización de formaciones permeables. Un revoque ideal aísla los fluidos del hoyo de los fluidos de poro próximos al hoyo. Esto es importante para la estabilidad del hoyo y ayuda a prevenir la pega diferencial en el pozo. El revoque y el tiempo que éste toma para formarse son controlados por la composición química del lodo y la permeabilidad de la formación.

c) Trayectoria del pozo (Inclinación y azimut). Esto tiene gran impacto en la estabilidad del hoyo, ya que influyen en la distribución de los esfuerzos tangencial y radial.

d) Prácticas operacionales de perforación y limpieza del hoyo.

Por otra parte los parámetros de perforación que no son controlables durante el proceso son:

1. Resistencia de la roca.
2. Formaciones más propensas a problemas de inestabilidad, como las lutitas.
3. Condiciones desfavorables de esfuerzos *in-situ* y estructurales de la estratigrafía, como por ejemplo fallas y altos buzamientos.

2.3.2 Estabilidad Química.

La estabilidad química está fundamentada en el control de la interacción entre el fluido de perforación y la roca. Usualmente, esto es mucho más problemático cuando se perforan formaciones lutíticas. Las lutitas son rocas sedimentarias de granos finos con una permeabilidad muy baja y compuesta principalmente de arcillas minerales. Un factor que distingue las lutitas de otras rocas es su sensibilidad al agua contenida en los fluidos de perforación. Mientras la lutita es perforada, una secuencia de eventos se hacen presentes y pueden ser responsables del debilitamiento y eventualmente falla de la lutita. Varios parámetros contribuyen con la estabilidad química de las lutitas, como lo son: la ósmosis, efectos capilares, difusión de presión, advección e hinchamiento- hidratación.

2.4 ESTADO DE LOS ESFUERZOS IN-SITU.

Antes de la perforación, las rocas en el subsuelo se encuentran originalmente en un estado de esfuerzos en equilibrio. Estos esfuerzos naturales son conocidos como estado de esfuerzos *in-situ*. Si por alguna razón las fuerzas cambian o se distorsiona el

equilibrio, tendrá lugar una corrección natural en el yacimiento para restaurar la estabilidad.

A medida que se perfora un pozo se altera el equilibrio de los esfuerzos que prevalecen en el yacimiento. Para compensar este equilibrio se utiliza la presión hidrostática proporcionada por el fluido de perforación (figura 2.10), con la cual se trata de equilibrar los esfuerzos ejercidos del yacimiento hacia el pozo. Dado que la presión del lodo es uniforme en todas las direcciones, no es posible balancear completamente los esfuerzos y en consecuencia, la roca alrededor del pozo se distorsiona y puede fallar si la redistribución de los esfuerzos excede la resistencia de la roca.

Alternativamente, la formación puede fallar por los esfuerzos de tensión y compresión. Los esfuerzos de tensión dan lugar a un mecanismo de falla que ocurre cuando la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo toma valores muy altos, originando esfuerzos sobre la pared del pozo que pueden exceder la resistencia a la tracción de la roca. Esto provoca fracturas en la roca a lo largo de un plano perpendicular a la dirección del esfuerzo horizontal mínimo *in-situ*, lo cual podría acompañarse con pérdidas de circulación.

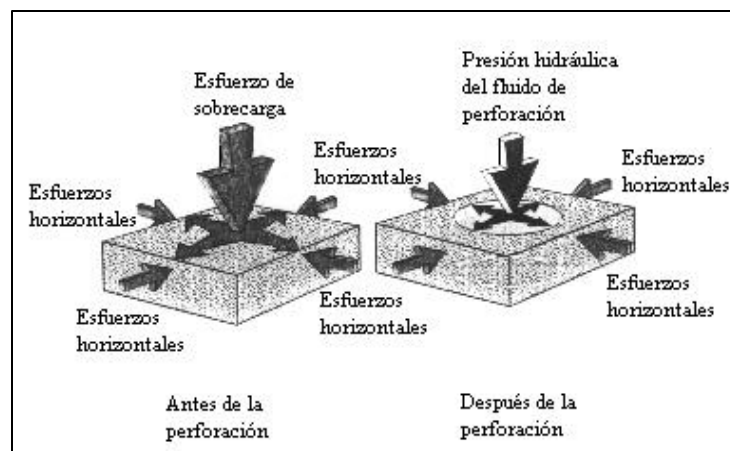


Fig. 2.10: Estado de esfuerzos *in-situ*, antes y después de la perforación. (AMOCO, 1996)

Las fallas causadas por el esfuerzo de compresión comúnmente se predicen con el modelo de Mohr-Coulomb, en el cual los esfuerzos principales máximos y mínimos en la pared del pozo controlan el mecanismo de rotura, y donde se asume que el esfuerzo principal intermedio no tiene efecto. Las fallas por compresión pueden atribuirse a lodos muy livianos y pueden originar ensanchamiento del hoyo y derrumbes de la formación, además los ripios o recortes de la formación pueden acumularse en el pozo y originar atascamiento de la tubería de perforación y en algunos casos hasta el colapso del pozo.

Junto con las características de resistencia mecánica de la formación, el conocimiento del campo de esfuerzos permite establecer el peso adecuado del fluido para la perforación de pozos. En el caso de pozos direccionales, el conocimiento de estos esfuerzos permite definir la trayectoria de mayor estabilidad para minimizar la falla de la masa rocosa.

Las componentes del campo de esfuerzos *in-situ* son: el esfuerzo horizontal máximo, el esfuerzo horizontal mínimo y el esfuerzo vertical o de sobrecarga (figura 2.11).

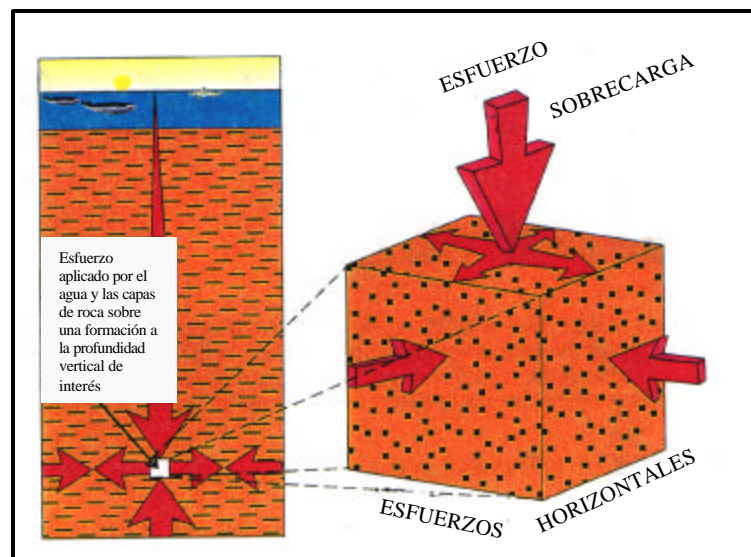


Fig. 2.11: Estado de Esfuerzos *In-Situ*. (AMOCO, 1996)

Los esfuerzos *in-situ* son normalmente de compresión debido al peso de la sobrecarga, razón por la cual en mecánica de rocas los esfuerzos de compresión están definidos como positivos.

A continuación se presenta una breve descripción de las componentes de esfuerzos *in-situ*:

a) Esfuerzo de Sobrecarga: El esfuerzo de sobrecarga es la presión ejercida sobre una formación a una profundidad dada, debido al peso total de la roca y de los fluidos por encima de esta profundidad. La mayoría de las formaciones son formadas de una historia geológica de sedimentación / compactación. Las formaciones pueden variar significativamente de la superficie de la tierra a una profundidad de interés. Por ejemplo, la lutitas poco profundas serán más porosas y menos densas que las lutitas a grandes profundidades.

Típicamente, se estima para la sobrecarga un valor entre 0,9 a 1,1 psi/pie, pero para profundidades pequeñas el valor es mucho menor y en profundidades más grandes es un poco mayor. El registro de densidad puede ser usado para determinar el peso de la sobrecarga.

Si la densidad total del suelo varía en forma continua con la profundidad, el esfuerzo vertical puede calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$S_v = \int \rho_b dz \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

Donde: ρ_b : densidad total de la formación.

z : profundidad.

S_v : magnitud del esfuerzo litoestático o de sobrecarga.

Si la masa rocosa está estratificada y la densidad total de cada estrato es diferente, el esfuerzo vertical puede calcularse como la suma de la sobrecarga calculada con la ecuación anterior para cada uno de los estratos.

b) Esfuerzos Horizontales: Cuando la perforación se realiza cerca de estructuras geológicas o en áreas tectónicas, los esfuerzos horizontales difieren y son descritos como una componente de esfuerzo horizontal mínimo (S_h) y una componente de esfuerzo horizontal máximo (S_H).

El esfuerzo horizontal mínimo normalmente es determinado por medio de ensayos "*Leak-off extendido*" o minifrac, tal como fue descrito anteriormente.

En el caso de la determinación de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo, esto resulta poco preciso hacerlo a partir de mediciones de campo. Por esta razón, este valor puede ser estimado usando observaciones de falla en el pozo y con la ayuda de modelos de comportamiento de la roca. Para esto, es necesario el conocimiento de las propiedades mecánicas de la roca, de la sobrecarga, del esfuerzo horizontal mínimo, de la presión de poro, y de información de la geometría del hoyo

Adicionalmente a la magnitud de los esfuerzos *in-situ*, el análisis de estabilidad requiere conocer la orientación del campo de esfuerzos, lo cual es posible determinando la dirección en que se encuentra orientado uno de los esfuerzos horizontales.

2.4.1 Esfuerzos Principales.

En un ensayo de compresión, una muestra de roca es sometida a fuerzas compresivas actuando en tres direcciones con ángulos rectos entre las mismas: una en la dirección longitudinal y las otras en direcciones laterales. Los tres planos perpendiculares sobre los cuales estos esfuerzos actúan son conocidos como los planos principales, y los tres esfuerzos son conocidos como los esfuerzos principales.

En la figura 2.12 se puede observar la representación de los planos y esfuerzos principales.

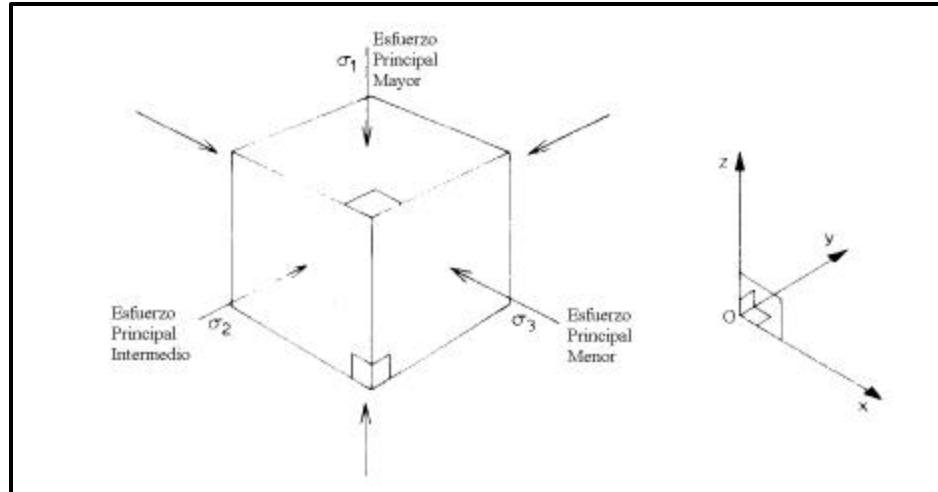


Fig. 2.12: Esfuerzos Principales y Planos Principales.

En orden descendente de magnitud, los esfuerzos principales se enumeran de la siguiente manera:

- c) Esfuerzo Principal Mayor (σ_1)
- d) Esfuerzo Principal Intermedio (σ_2)
- e) Esfuerzo Principal Menor (σ_3)

En muchos casos el esfuerzo principal mayor actúa en dirección vertical y los esfuerzos principales intermedio y menor actúan horizontalmente a un ángulo recto entre ambos. Muchos problemas de mecánica de rocas son considerados en dos dimensiones y sólo los esfuerzos principales mayor y menor (σ_1 y σ_3) son usados. En el caso especial de simetría axial como en la compresión de muestras cilíndricas, σ_2 y σ_3 son iguales.

2.5 ESFUERZOS EFECTIVOS.

En la década de los años 20, Terzaghi identificó el efecto de la presión de fluido en el medio poroso. Condujo experimentos con pares de muestras similares, utilizando alta presión de poro en una de ellas y ninguna presión de poro en la otra y definió el concepto de esfuerzos efectivos como:

$$\sigma' = S - P_p \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

donde σ' es el esfuerzo efectivo, S son los esfuerzos totales y P_p es la presión de poro. Una ley de esfuerzos efectivos muy exacta es:

$$\sigma' = S - \alpha P_p \quad [\text{Ec. 2.5}]$$

donde α es el coeficiente de Biot ($0 < \alpha < 1$), el cual depende de la compresibilidad de la roca. Los esfuerzos *in-situ* S_v y $S_{\text{hmín}}$ resultantes del peso de la sobrecarga y medidos mediante un microfrac no dependen de la presión de poro, sin embargo, al considerar problemas tales como esfuerzos alrededor del hoyo es necesario considerar esfuerzos efectivos ya que es conocido de ensayos de laboratorio, en teoría y en la práctica que la resistencia de la roca es controlada por los esfuerzos efectivos.

2.6 REGIMEN DE ESFUERZOS.

Originalmente el geólogo británico E.M. Anderson (1951) propuso regímenes de esfuerzos asociados a fallas geológicas observadas en la corteza terrestre. Dependiendo de las magnitudes relativas de los esfuerzos principales *in-situ*, se pueden definir tres regímenes: régimen de esfuerzo extensional o normal, de deslizamiento o transcurrente e inverso.

Si se define la convención de que el esfuerzo principal mayor se denomina S_1 , el intermedio S_2 y el menor S_3 entonces las relaciones entre los mismos se describen en la tabla 2.2 para los diferentes regímenes.

Tabla 2.2.- Relación entre los esfuerzos principales para los diferentes regímenes de esfuerzos

Régimen	S_1	S_2	S_3
Normal	S_V	$S_{Hmáx}$	$S_{hmín}$
Transcurrente	$S_{Hmáx}$	S_V	$S_{hmín}$
Inverso	$S_{Hmáx}$	$S_{hmín}$	S_V

La importancia de conocer el régimen de esfuerzos es que esto permite acotar la magnitud de los esfuerzos *in-situ*, conjuntamente con la observación de modos de falla en los pozos.

2.6.1 Régimen Normal:

Se presenta cuando la magnitud del esfuerzo vertical (S_V) es mayor que los dos esfuerzos horizontales ($S_{Hmáx}$ y $S_{hmín}$), es decir, $S_V > S_{Hmáx} > S_{hmín}$. Generalmente las fallas normales buzan paralelas a la dirección del esfuerzo horizontal menor.

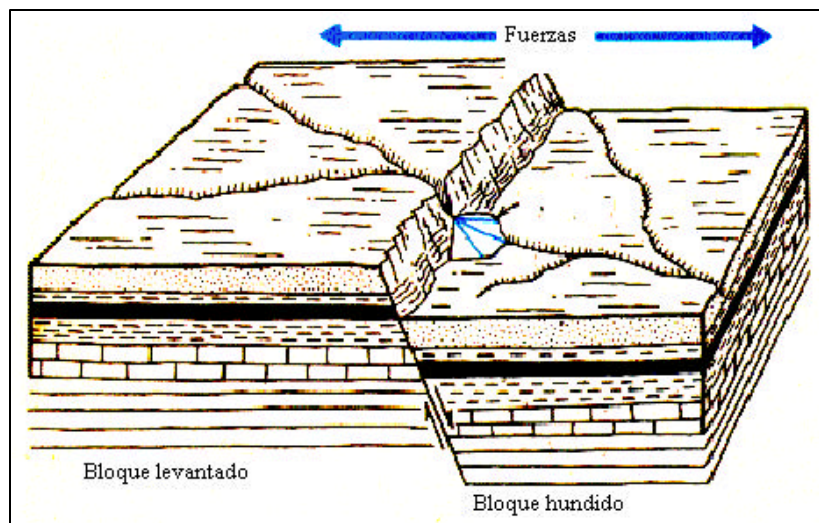


Fig. 2.13: Falla Normal.

La relación entre los esfuerzos principales en este caso se puede observar en la Figura 2.14.

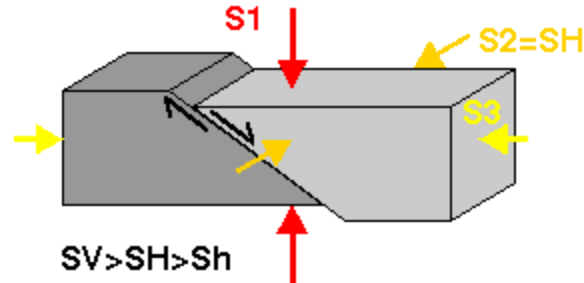


Fig. 2.14: Orientación y Relación de los Esfuerzos en una Falla Normal (Página Web: World Stress Map)

2.6.2 Régimen Transcurrente:

Ocurre cuando el esfuerzo vertical es el esfuerzo intermedio, $S_{Hmáx} > S_v > S_{hmín}$. Bajo esta condición de esfuerzos, pueden ocurrir fallas transcurrentes. Estas fallas son usualmente sub-verticales y su dirección puede mostrar un ángulo con respecto a la dirección del esfuerzo horizontal mayor.

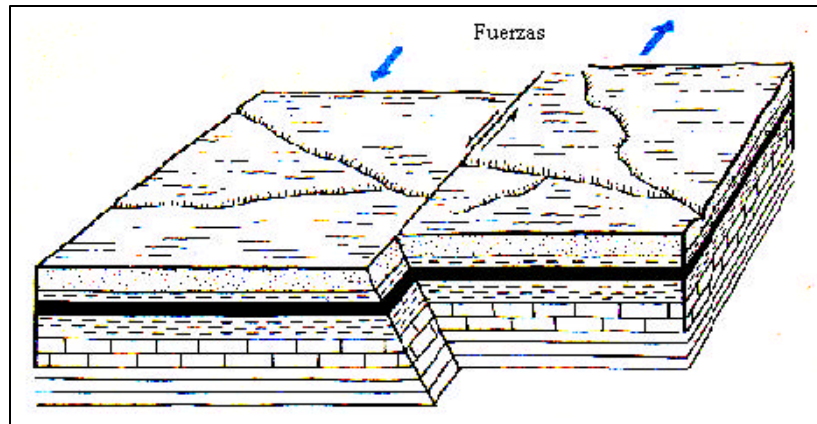


Fig. 2.15: Falla Transcurrente

La distribución de la magnitud y orientación de los esfuerzos para este tipo de falla se observan en la Figura 2.16.

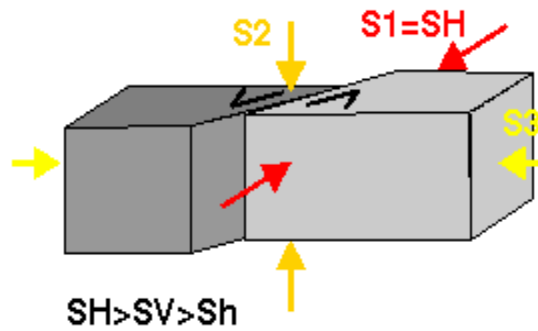


Fig. 2.16: Orientación y Relación de los Esfuerzos en una Falla de Deslizamiento (Página Web: World Stress Map)

2.6.3 Régimen Inverso:

Ocurre cuando el esfuerzo vertical es el menor de los tres esfuerzos, $S_{Hmáx} > S_{hmín} > S_v$. Las fallas inversas, en la cual un bloque se desliza sobre otro, pueden ocurrir bajo este régimen de esfuerzos.

Estas fallas usualmente buzan paralelas a la dirección del esfuerzo horizontal mayor.

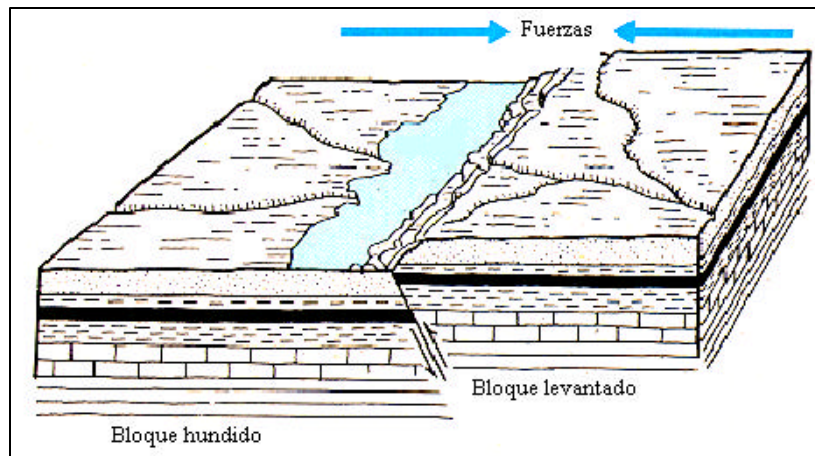


Fig. 2.17: Falla Inversa

La distribución de la magnitud y orientación de los esfuerzos para el caso de fallas inversas se puede observar en la Figura 2.18.

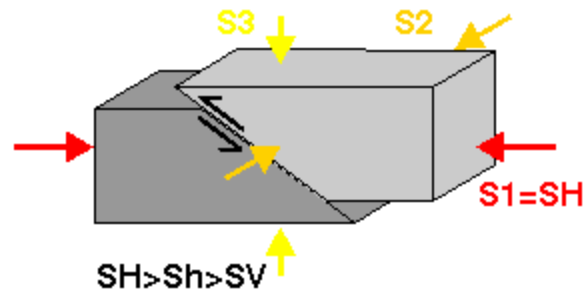


Fig. 2.18: Orientación y Relación de los Esfuerzos en una Falla Inversa (Página Web: World Stress Map).

2.6.4 Resistencia Friccional en la Corteza Terrestre:

Numerosas mediciones de esfuerzos *in-situ* han demostrado que en la corteza terrestre existe equilibrio friccional en las estructuras geológicas en localizaciones alrededor del mundo (Zoback y Healy, 1984, 1992; Brudy et al., 1997).

Las rocas en la corteza terrestre presentan fallas, fracturas y discontinuidades en muchas escalas y orientaciones y las magnitudes de los esfuerzos están limitadas por la resistencia friccional de estas discontinuidades planares. Es decir, particularmente las diferencias entre el máximo y mínimo esfuerzo efectivo *in-situ*, están limitadas por esta resistencia friccional, tal que los procesos geológicos que originan estos esfuerzos no pueden producir desigualdades mayores entre los esfuerzos sin antes generar deslizamiento sobre la discontinuidad y subsecuente relajación de los esfuerzos *in-situ*.

Para ilustrar este concepto consideremos un conjunto de fracturas y fallas distribuidas de manera aleatoria y sometidas a un campo de esfuerzos $\sigma_{Hmáx}$ y $\sigma_{hmín}$. Consideremos un análisis con círculos de Mohr y un criterio de falla de Mohr-Coulomb, tal como se observa en la figura (fig. 2.19).

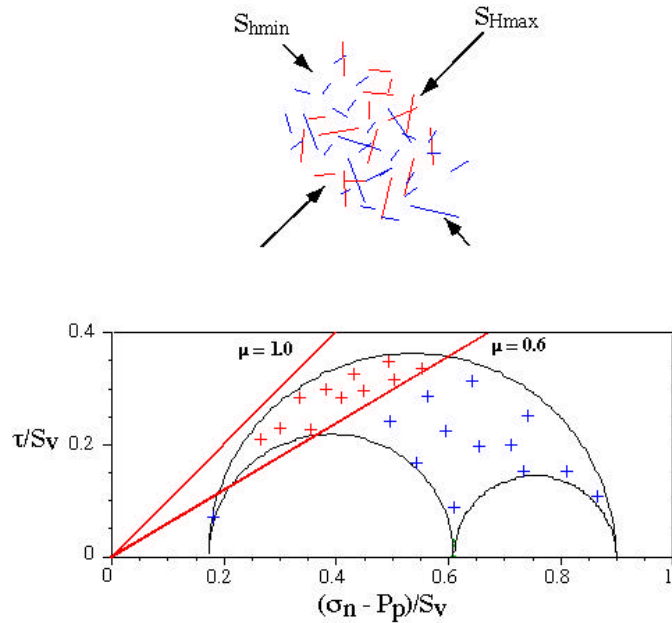


Fig. 2.19: Diagrama de Mohr que muestra las fallas para $0,6 < \mu < 1,0$. (GMI, 2001)

En este caso, la diferencia entre $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ ($S_{Hm\acute{a}x} - P_p$) y $\sigma_{hm\acute{i}n}$ ($S_{hm\acute{i}n} - P_p$) está limitada por la resistencia friccionante de estas fallas preexistentes. Es decir, mientras $S_{Hm\acute{a}x}$ se incrementa con respecto a $S_{hm\acute{i}n}$, las fallas orientadas comienzan a deslizarse rápidamente al excederse esta resistencia friccionante y $S_{Hm\acute{a}x}$ no puede seguir incrementándose. En términos del círculo de Mohr (fig. 2.19) las fallas que deslizan son aquellas en las que la relación de esfuerzo cortante y normal efectivos iguala la resistencia a la fricción (μ).

Se conoce además que para la mayoría de las rocas μ est entre 0,6 y 1,0 (Byerlee, 1978) y es entonces posible calcular valores límites de esfuerzos efectivos, ya que en este diagrama para un valor dado de $\sigma_{hm\acute{i}n}$ hay un valor máximo de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ establecido por la resistencia friccional de las fallas preexistentes (el círculo de Mohr no puede exceder la máxima resistencia friccional).

Jaeger y Cook (1979) y Zoback y Healy (1984) definieron los valores límites de S_1 y S_3 correspondientes a la figura 2.19 como:

$$\frac{\mathbf{S}_1}{\mathbf{S}_3} = \frac{S_1 - P_p}{S_3 - P_p} = \left[\sqrt{\mathbf{m}^2 + 1} + \mathbf{m} \right]^2 \quad [\text{Ec. 2.6}]$$

Entonces los esfuerzos pueden variar desde la condición geostática o litostática (ausencia de tectonismo) hasta los límites definidos por la ecuación 2.6.

Esta expresión es usada para establecer límites en condiciones de diversos regímenes de esfuerzos y luego se utilizan mediciones específicas para acotar más precisamente los esfuerzos.

Para los diferentes regímenes de esfuerzos la ecuación 2.6 se expresa como:

$$\begin{aligned} \text{Falla Inversa} & \quad \frac{S_{H\text{máx}} - P_p}{S_v - P_p} = \left[\sqrt{\mathbf{m}^2 + 1} + \mathbf{m} \right]^2 \\ \text{Falla Normal} & \quad \frac{S_v - P_p}{S_{h\text{mín}} - P_p} = \left[\sqrt{\mathbf{m}^2 + 1} + \mathbf{m} \right]^2 \\ \text{Falla Transcurr ente} & \quad \frac{S_{H\text{máx}} - P_p}{S_{h\text{mín}} - P_p} = \left[\sqrt{\mathbf{m}^2 + 1} + \mathbf{m} \right]^2 \end{aligned} \quad [\text{Ec. 2.7}]$$

2.6.5 Polígono de Esfuerzos:

La utilización de las expresiones [ec. 2.7] en un espacio $S_{H\text{máx}}$ vs $S_{h\text{mín}}$, considerando que $S_{H\text{máx}} \geq S_{h\text{mín}}$ nos permite construir un polígono de esfuerzos admisible dependiendo del régimen de esfuerzos tal como se presenta en la fig. 2.20.

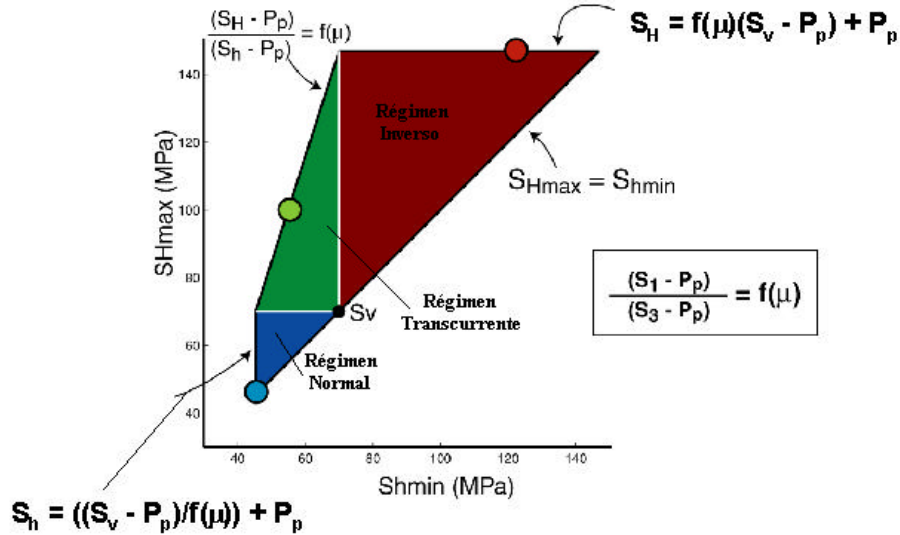


Fig. 2.20: Polígono de Esfuerzos (GMI, 2001)

donde:

$$f(\mu) = [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu]^2 \quad [\text{Ec. 2.8}]$$

En el gráfico mostrado en la figura anterior tanto S_v como S_{hmin} son conocidos. Para un régimen normal $S_{hmin} = [(S_v - P_p)/f(\mu) + P_p]$, lo cual es una línea recta vertical acotada hasta que $S_{Hmax} \leq S_v$ condición que hace pasar a un régimen transcurrente.

En régimen transcurrente se cumple que $S_{Hmax} = [f(\mu)[S_{hmin} - P_p] + P_p]$, lo cual es una línea con pendiente $f(\mu)$.

Para el régimen inverso $S_{Hmax} = [f(\mu)[S_v - P_p] + P_p]$, lo cual es una línea recta horizontal tal como se ilustra en la figura 2.20.

2.7 CRITERIOS DE FALLAS.

Para predecir la falla de la roca han sido desarrollados diversos criterios experimentales, teóricos y empíricos. Generalmente, los criterios de fallas son utilizados para generar la envolvente de falla, usualmente separando los estados de

esfuerzos estables e inestables y tomando en algunos casos una envolvente de falla lineal.

2.7.1 Criterio de Falla de Mohr-Coulomb.

La teoría de fallas se remonta a 1760, cuando el físico francés Charles Austin de Coulomb determinó que el esfuerzo de corte máximo ocurre en los planos a 45° con respecto a la carga compresional. Sin embargo, observó que las fracturas tendían a orientarse en ángulos menores. Concluyó entonces que esto se debía a la fricción interna impuesta por los esfuerzos perpendiculares al plano de la fractura, lo que a la vez aumentaba la resistencia cohesiva de los materiales. De esta forma desarrolló la ecuación que relaciona el esfuerzo de corte con el esfuerzo normal al punto de falla (ecuación 2.9).

$$\tau = S_o + \sigma' \tan(\phi) \quad [\text{Ec. 2.9}]$$

donde:

τ : esfuerzo cortante.

S_o : resistencia a la cohesión.

σ' : esfuerzo normal efectivo.

ϕ : ángulo de fricción interna.

Tanto S_o como ϕ son coeficientes para construir la envolvente lineal del material y deben ser determinados experimentalmente.

Alrededor del año 1900, el ingeniero alemán Otto Mohr generalizó el criterio de Coulomb y estableció las bases para los análisis actuales de las roturas de las rocas. Expresó la falla simplemente como el esfuerzo de corte como función del esfuerzo axial, en la cual la función depende del tipo de roca y posiblemente no es lineal. Mohr exploró la naturaleza de dicha función comprimiendo muestras de roca sometidas a

esfuerzos variables, con el esfuerzo principal máximo siendo siempre mayor que los otros dos esfuerzos principales.

Mohr observó que la función de las fallas podía describirse como la envolvente a todos los círculos que podían trazarse utilizando como diámetro a los esfuerzos máximos y mínimos en el punto de falla, conocidos como círculos de Mohr. Esta teoría aplicada al fallamiento de las rocas asume un campo de esfuerzos bidimensional, donde los esfuerzos principales actúan en un plano horizontal, uno de estos esfuerzos actúan en la dirección radial y el otro tangencialmente. La técnica asume que los esfuerzos verticales son despreciables y que la roca se comporta elásticamente al ser sometida a los esfuerzos.

Como criterio de falla se puede adoptar el criterio de Mohr-Coulomb el cual posee la ventaja de ser lineal. Generalmente, el uso de este criterio constituye una aproximación conservadora en cuanto al peso de lodo requerido para prevenir la falla por colapso del hoyo.

El criterio de Mohr-Coulomb constituye el más simple de los criterios que separa las regiones de falla (inestabilidad) y de estabilidad de un material sometido a esfuerzos de corte.

Otros criterios de falla son: el criterio de Drucker-Prager, que toma en cuenta el promedio de los esfuerzos efectivos en corte y en compresión, ofrece estimados de una naturaleza menos conservadora lo cual, en principio, se traduce en un menor requerimiento del peso de lodo aunque puede sobrestimar la resistencia mecánica de la roca; y el criterio de Hoek-Brown, que es más aplicado a yacimientos naturalmente fracturados.

2.7.2 Tipos de Falla de la Roca.

Para un material elástico, la relación entre los esfuerzos de corte y los esfuerzos principales puede ser descrita en un círculo graficado en coordenadas cartesianas, los esfuerzos normales en el eje de las abscisas y los esfuerzos de corte en el eje de las ordenadas. La forma de utilizar este círculo, llamado círculo de Mohr, para determinar el tipo de falla en la formación, se reduce a definir la envolvente de ruptura a partir de la cual el material falla, tomando como parámetro la presión de sobrecarga, la presión de poros y el diferencial de presión entre la formación y el pozo. De esta forma los tipos de fallas en las formaciones productoras pueden resumirse en cuatro: Cohesión, Tensión, Colapso de poros y Corte o Cizallamiento. Estos mecanismos de fallas son descritos a continuación y están resumidos en la figura 2.21.

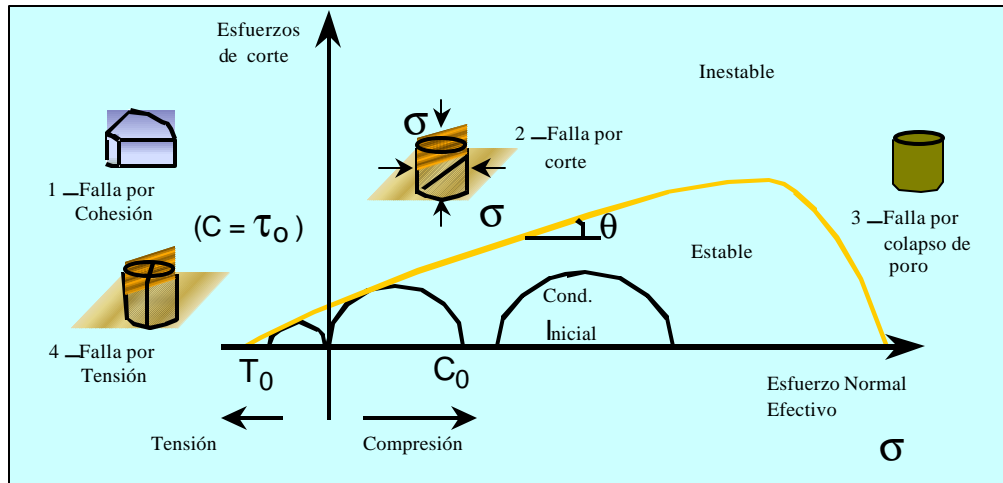


Fig. 2.21: Mecanismos de Falla y su localización con respecto a la envolvente de falla de Mohr-Coulomb. (Abass, 1998)

2.7.2.1 Tensión:

Las fallas por tensión ocurren cuando la envolvente intercepta al eje de las ordenadas en un valor de esfuerzo de corte igual a cero y los esfuerzos pasan a ser negativos (esfuerzos de tracción negativos y esfuerzos de compresión positivos). La

distribución de esfuerzos alrededor del hoyo puede llegar a ser negativa en diversos puntos de la pared dependiendo de los esfuerzos *in-situ* y el peso de lodo. Un incremento del peso de lodo puede llegar a inducir tracción y producir una fractura hidráulica. Además, cuando la tasa de producción es muy alta crea un diferencial de presión alrededor del pozo que induce esfuerzos de tracción y produce la falla por tracción de la formación.

2.7.2.2 Corte o Cizallamiento (Fallas compresivas):

Las fallas de corte ocurren cuando la combinación de esfuerzos intercepta la envolvente de ruptura. La resistencia al corte de materiales porosos es variable y aumenta linealmente con los esfuerzos compresionales.

Existen 4 formas de falla compresivas que pueden ocurrir en el hoyo:

- *Breakout* ($\sigma_{\theta} > \sigma_z > \sigma_r$)
- Falla Tórica ($\sigma_z > \sigma_{\theta} > \sigma_r$)
- Falla corte helicoidal ($\sigma_z > \sigma_r > \sigma_{\theta}$)
- Falla de corte elongada ($\sigma_r > \sigma_z > \sigma_{\theta}$ ó $\sigma_r > \sigma_{\theta} > \sigma_z$)

El *breakout* y la falla tórica ocurren en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo (en el caso de un pozo vertical) cuando el peso del lodo es más bajo que el peso de lodo crítico. Las fallas de corte helicoidal y elongadas ocurren (en dirección ortogonal) cuando el peso del lodo es excesivo.

Aunque las fallas *breakout* y tórica se pueden prevenir por incremento del peso del lodo, se debe cuidar el uso de un peso excesivo ya que puede inducir fallas por corte helicoidal o elongadas, las cuales preceden a una fractura hidráulica (Tan, 1998).

2.7.2.3 Colapso de Poros:

La presión de sobrecarga a la cual está sometida la formación es soportada por los granos, que constituyen el esqueleto del sistema, así como también por los fluidos contenidos dentro del espacio poroso, de tal manera que el esfuerzo al cual está sometido el esqueleto mineral es una fracción del esfuerzo total aplicado, el cual se denomina esfuerzo efectivo. El esfuerzo efectivo al que está sometido el material aumentará a medida que se reduce la presión de poros y puede llegar a producir la rotura del esqueleto mineral colapsando los poros.

2.7.2.4 Efectos de Erosión:

Los efectos de erosión son equivalentes a un tipo de falla que ocurre cuando el esfuerzo normal es igual a cero, en el gráfico de Mohr es el punto de intersección de la envolvente de ruptura con el eje de las abscisas (resistencia a la cohesión). Este tipo de falla puede causar migración de finos y arenamiento.

2.8 DERRUMBES Y OVALIZACIONES O *BREAKOUTS*.

2.8.1 Definición.

Las ovalizaciones del hoyo pueden definirse como un marcado alargamiento alrededor del diámetro nominal del hoyo. Estas pueden ocurrir en un solo diámetro manteniéndose el otro constante, o en ambos diámetros a la vez.

La ovalización o “*breakout*” es un alargamiento alrededor del diámetro nominal del hoyo (*bit-size*) en una sola dirección, y es originado por esfuerzos compresivos.

El segundo tipo de alargamiento es llamado derrumbe o “*washout*” y puede ocurrir en ambos diámetros a la vez en diferentes valores, y puede existir similitud entre ambas curvas definidas por los “*calipers*”. Este alargamiento es atribuido al deterioro mecánico causado por la tubería de perforación, fluidos de perforación y otras causas. En diferencia con los “*breakouts*” que son orientados en el pozo, los

derrumbes no exhiben generalmente una orientación consistente salvo influencia de la desviación del hoyo.

2.9 OVALIZACIÓN O “BREAKOUT”:

El “*breakout*” es un derrumbe localizado y orientado que ocurre en una cierta longitud del hoyo. Esto se ve reflejado como una ampliación o aumento del diámetro nominal del hoyo. El *breakout* se forma en lados diametralmente opuestos del hoyo, y su dirección coincide con la orientación del esfuerzo horizontal mínimo, como se observa en la figura 2.22.

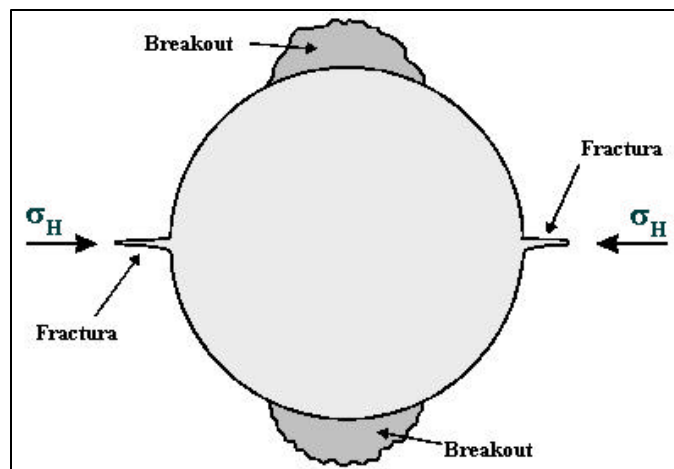


Fig. 2.22: Representación del *Breakout* con respecto a la orientación de los esfuerzos máximo y mínimo.

El “*breakout*” es un fenómeno que se manifiesta durante la perforación de un pozo en una formación sometida a una anisotropía de los esfuerzos horizontales. Es el resultado de los desmoronamientos provocados por las tensiones cizallantes o de corte, inducidas por la redistribución local de los esfuerzos durante la fase de perforación.

El análisis de la formación de los “*breakouts*” por Gough y Bell (1981) predijo que éstos son regiones susceptibles al daño en la pared del pozo, los cuales son centrados en el azimut del esfuerzo horizontal mínimo, donde la concentración de

esfuerzos compresivos es máxima. De esta forma, los “*breakouts*” serán el resultado de una falla de corte compresiva localizada.

2.9.1 Inicio de los Breakouts:

Bell y Gough desarrollaron una teoría sobre la formación de los “*breakouts*”, que sostiene que éstos podrían ser formados por fallas de corte en las paredes del pozo en las regiones de mayor concentración de esfuerzos de compresión. En un pozo vertical, esto implica que el “*breakout*” podría iniciarse a lo largo de un azimut paralelo al esfuerzo horizontal mínimo.

El análisis realizado por Bell y Gough considera la formación del “*breakout*” solo en un hoyo inicialmente cilíndrico y plantea el problema general del tamaño inicial del “*breakout*” en términos de la fuerza cohesiva de la roca, el coeficiente de fricción y la magnitud del principal esfuerzo horizontal. Una posible explicación de la profundidad y la apariencia irregular de los “*breakouts*”, es que estos continúan creciendo después de su formación inicial. Se ha postulado, sin embargo, que el ancho del *breakout* se mantiene relativamente en el proceso de falla como puede ser observado en la figura 2.23.

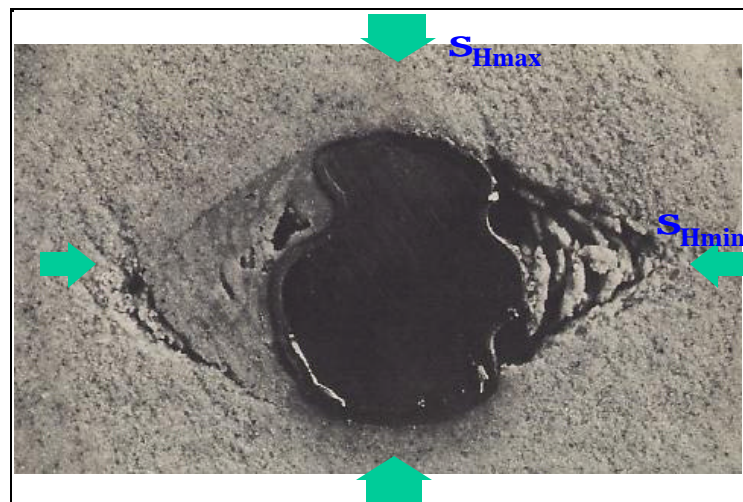


Fig. 2.23: Observación del crecimiento del *breakout*. (cortesía de Baker)

2.9.2 Observación de campo de "Breakouts":

Las primeras fuentes de información acerca de los "breakouts" en los pozos, son los registros del *caliper* de cuatro brazos, en los cuales la ovalización no siempre puede ser probada porque estas herramientas producen solo dos diámetros ortogonales del hoyo como función de la profundidad, y esta información no es siempre del todo aprovechable para determinar la apariencia de los "breakouts".

Para vencer las limitaciones de los *caliper* de cuatro brazos, se utiliza la información de la apariencia de los "breakouts" en varios tipos de rocas vistas con el registro de imágenes, el cual ya fue descrito.

En la figura 2.24 se observa la interpretación de un *breakout* utilizando el registro caliper.

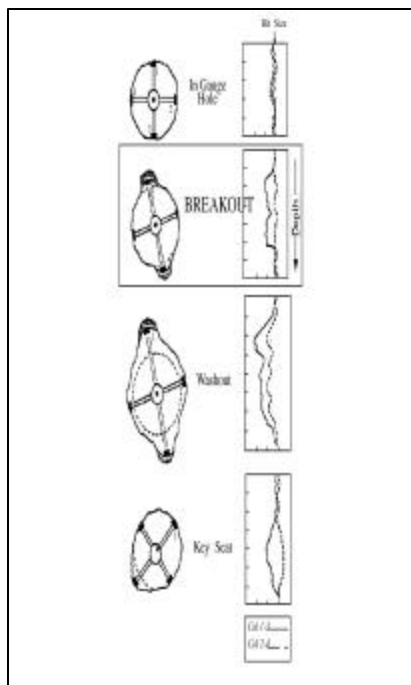


Fig. 2.24.- Interpretación de un *breakout* utilizando el registro caliper.

2.9.3 Clasificación de *Breakouts*:

En los análisis de clasificación de *breakouts* convencionales se utilizan los criterios de calidad del Mapa Mundial de Esfuerzos (World Stress Map), conforme a Zoback (1992), donde los resultados se categorizan según las calidades A, B, C, D, E, en función del estándar de desviación, del azimut y de la profundidad acumulada de *breakouts*, conforme se especifica a continuación:

- Calidad A: Diez o más zonas de *breakout* y/o una longitud acumulada mayor a 300 metros, con una desviación estándar menor o igual a 12°.
- Calidad B: Por lo menos seis zonas de *breakout* y/o una longitud acumulada mayor a 100 metros, con una desviación estándar menor o igual a 20°.
- Calidad C: Por lo menos cuatro zonas de *breakout* y/o una longitud acumulada mayor a 30 metros, con una desviación estándar menor a 25°.
- Calidad D: Menos de cuatro zonas de *breakout* o una longitud acumulada menor a 30 metros, con una desviación estándar mayor o igual a 25°.
- Calidad E: Pozos en los cuales no son detectados *breakouts* o con una desviación estándar mayor a 40°.

2.10 ESTIMACIÓN DEL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO A PARTIR DE *BREAKOUTS* Y FRACTURAS INDUCIDAS DURANTE LA PERFORACIÓN.

Conociendo el ancho de los *breakouts*, medido como un ángulo alrededor de la periferia del hoyo es posible encontrar la siguiente relación explícita para un pozo vertical:

$$S_{Hm\acute{a}x} = \frac{(C_{eff} + 2P_p + \Delta P + \mathbf{s}^{\Delta T}) - S_{hm\acute{i}n}(1 + 2\cos 2\mathbf{q}_b)}{1 - 2\cos 2\mathbf{q}_b} \quad [\text{Ec. 2.10}]$$

donde:

ΔP : Diferencia entre la presión del hoyo (peso de lodo) y la presión de poro (P_p).

σ^{AT} : Esfuerzo debido a los efectos de la temperatura.

θ_b : Ángulo medido desde el azimut del esfuerzo horizontal máximo hasta donde se inicie el *breakout* (observar figura 2.25).

Sin embargo, cuando tenemos un pozo inclinado no es posible encontrar una solución analítica simple y hay que desarrollar un programa que calcule los esfuerzos inducidos alrededor de la perforación considerando un criterio de falla, tal como el desarrollado en este trabajo. Los casos analizados son pozos de 10° y 25° de inclinación y tanto la orientación de $S_{Hm\acute{a}x}$ como la magnitud deben considerar esta inclinación de los pozos.

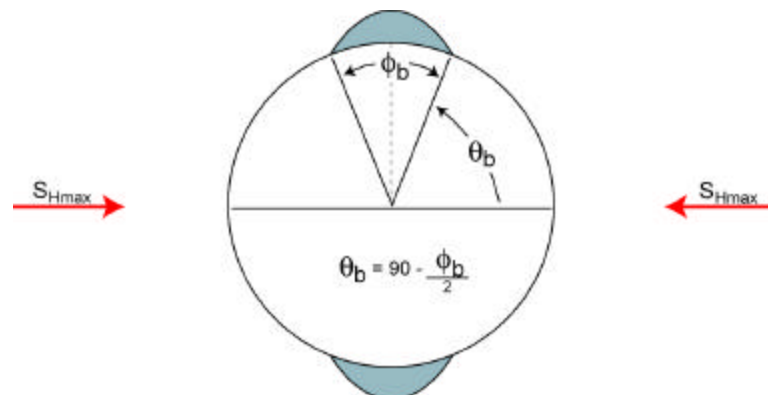


Fig. 2.25: Forma de determinar θ_b para utilizar la relación explícita que determina la magnitud de $S_{Hm\acute{a}x}$ utilizando *breakouts* observados en pozos verticales (GMI, 2001).

CAPÍTULO III

ESFUERZOS INDUCIDOS ALREDEDOR DE UNA PERFORACIÓN DE CUALQUIER INCLINACIÓN EN UN MEDIO ELÁSTICO LINEAL.

En los capítulos anteriores ya se mencionó que las formaciones en el subsuelo están sometidas a esfuerzos debidos a la sobrecarga y a los esfuerzos tectónicos. Cuando el hoyo es perforado la roca que es removida es remplazada por la presión del fluido de perforación, el cual normalmente no ejerce la misma función que la roca removida, alterándose de esta forma el estado de esfuerzos de la formación alrededor del hoyo. Es decir, ocurre una concentración de esfuerzos en la roca alrededor del hoyo.

Los esfuerzos inducidos en la roca que se encuentra rodeando al hoyo son una función de la orientación del hoyo relativa a la orientación y magnitud de los esfuerzos *in-situ*.

Para realizar el análisis de esfuerzos alrededor del hoyo, resulta necesario como primer paso elegir el modelo constitutivo que regirá el comportamiento de la roca.

3.1 MODELO CONSTITUTIVO.

El modelo constitutivo del material geológico es seleccionado para la simulación geomecánica que se desea realizar en las formaciones de interés y siguiendo además un criterio de falla, en este caso el criterio de Mohr-Coulomb.

Para determinar el modelo constitutivo de la roca que va a ser utilizado, se deben determinar propiedades en el laboratorio y considerar a la formación como elástica o poroelástica, lineal o no lineal, si existe comportamiento elasto-plástico o viscoso, si la roca es permeable o impermeable y si se considera isotropía o anisotropía del material.

Una aproximación muy utilizada es considerar la roca como elástica, describiéndola con parámetros elásticos (módulo de Young y relación de Poisson). En el caso de utilizar este modelo sencillo es necesario tomar en consideración sus limitaciones y calibrar los resultados con la información de perforación obtenida en el campo.

El modelo constitutivo elástico – lineal es el utilizado en este estudio por considerarse apropiado para rocas que experimentan poca deformación plástica antes de la falla, es decir rocas frágiles. El modelo implementado es además una solución general en deformación plana que puede ser aplicada tanto para hoyos verticales como desviados y horizontales, tomando como consideraciones que el material es isotrópico, que la roca es impermeable y que los esfuerzos horizontales son anisotrópicos.

3.2 ESFUERZOS EN LA PARED DEL HOYO.

Los factores que intervienen tanto en la magnitud como en la dirección de los esfuerzos en la pared del hoyo, y a la vez las consideraciones que deben ser planteadas para realizar el análisis geomecánico son las siguientes:

- a) Presión de poro y campo de esfuerzos *in-situ*.
- b) Inclinación del hoyo y el azimut de éste con referencia al campo de esfuerzos *in-situ*, específicamente con respecto al esfuerzo horizontal máximo.
- c) Condiciones de borde en la pared del hoyo.
- d) Comportamiento constitutivo de la roca.

Las suposiciones que son hechas son las siguientes:

- a) Los esfuerzos *in-situ* son: uno vertical y dos horizontales.

- b) La pared del hoyo es impermeable, no hay comunicación de presión a través de esta frontera.
- c) La roca es isotrópica y obedece a un comportamiento elástico lineal.
- d) Los esfuerzos horizontales son anisotrópicos.

Por otra parte se asume que los esfuerzos en la formación virgen antes de ser perforada son: σ_v el esfuerzo vertical, σ_H el esfuerzo horizontal máximo y σ_h el esfuerzo horizontal mínimo.

3.2.1 Transformación de Coordenadas:

La solución presentada, es una solución de deformación plana generalizada (Jaeger y Cook, 1979) en la cual se toman en cuenta tanto un hoyo vertical como un hoyo desviado, se asume un sistema de coordenadas (x', y', z') el cual está orientado de manera tal que el eje x' es paralelo a σ_h , el eje y' es paralelo a σ_H y el eje z' es paralelo a σ_v . Estos esfuerzos conforman el campo de esfuerzo en la formación virgen y son luego transformados a un sistema de coordenadas (x, y, z) donde z es paralelo al eje o dirección del hoyo, el eje y es horizontal y el eje x es paralelo a la dirección radial más baja del hoyo. En la figura 3.1 se observa la representación de ambos sistemas de coordenadas.

La transformación del sistema de coordenadas (x', y', z') al sistema (x, y, z) es obtenida en dos operaciones: una primera rotación (ángulo a) alrededor del eje z' y una segunda rotación (ángulo i) alrededor del eje y . El ángulo a representa la diferencia de azimut entre la orientación del pozo y la orientación del esfuerzo horizontal máximo *in-situ*, mientras que el ángulo i representa la inclinación del hoyo. Por otra parte el ángulo q es el medido a lo largo de la periferia del hoyo en sentido contrario a las agujas del reloj a partir de la dirección radial más baja del hoyo, es decir, a partir de la orientación del eje x .

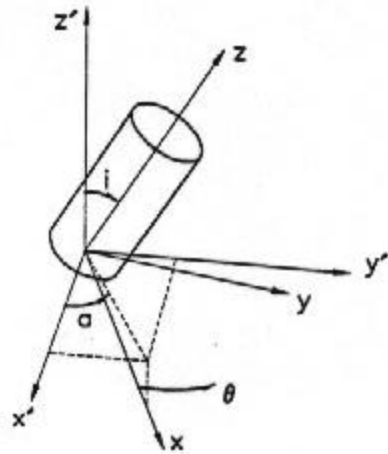


Fig. 3.1: Sistemas de Coordenadas Cartesianas (Gjonnes et al., 1998).

Esta transformación del sistema de coordenadas puede ser descrita matemáticamente por los cosenos directores, expresados de la siguiente manera:

$$\begin{array}{lll}
 I_{xx'} = \text{Cos } a \cdot \text{Cos } i & I_{yx'} = -\text{Sen } a & I_{zx'} = \text{Cos } a \cdot \text{Sen } i \\
 I_{xy'} = \text{Sen } a \cdot \text{Cos } i & I_{yy'} = \text{Cos } a & I_{zy'} = \text{Sen } a \cdot \text{Sen } i \quad [\text{Ec. 3.1}] \\
 I_{xz'} = -\text{Sen } i & I_{yz'} = 0 & I_{zz'} = \text{Cos } i
 \end{array}$$

donde:

$I_{xx'}, I_{xy'}, I_{xz'}$, corresponden a los cosenos de los ángulos entre el eje x y los ejes x' , y' , z' , respectivamente.

$I_{yx'}, I_{yy'}, I_{yz'}$, corresponden a los cosenos de los ángulos entre el eje y y los ejes x' , y' , z' , respectivamente.

$I_{zx'}, I_{zy'}, I_{zz'}$, corresponden a los cosenos de los ángulos entre el eje z y los ejes x' , y' , z' , respectivamente.

El campo de esfuerzos en el sistema de coordenadas (x, y, z) está dado por:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{s}_x &= I_{xx}^2 \mathbf{s}_H + I_{xy}^2 \mathbf{s}_h + I_{xz}^2 \mathbf{s}_v \\
 \mathbf{s}_y &= I_{yx}^2 \mathbf{s}_H + I_{yy}^2 \mathbf{s}_h + I_{yz}^2 \mathbf{s}_v \\
 \mathbf{s}_{zz} &= I_{zx}^2 \mathbf{s}_H + I_{zy}^2 \mathbf{s}_h + I_{zz}^2 \mathbf{s}_v \\
 \mathbf{t}_{xy} &= I_{xx} I_{yx} \mathbf{s}_H + I_{xy} I_{yy} \mathbf{s}_h + I_{xz} I_{yz} \mathbf{s}_v \\
 \mathbf{t}_{yz} &= I_{yx} I_{zx} \mathbf{s}_H + I_{yy} I_{zy} \mathbf{s}_h + I_{yz} I_{zz} \mathbf{s}_v \\
 \mathbf{t}_{zx} &= I_{zx} I_{xx} \mathbf{s}_H + I_{zy} I_{xy} \mathbf{s}_h + I_{zz} I_{xz} \mathbf{s}_v
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3.2}$$

La solución completa de los esfuerzos en la pared del hoyo en coordenadas cilíndricas fue desarrollada por Jaeger y Cook (1979). Las expresiones finales de este desarrollo vienen dadas por:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{s}_r &= \left(\frac{\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y}{2} \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \left(\frac{\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y}{2} \right) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} - 4 \frac{R^2}{r^2} \right) \cos 2\mathbf{q} \\
 &\quad + \mathbf{t}_{xy} \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} - 4 \frac{R^2}{r^2} \right) \sin 2\mathbf{q} + P_w \frac{R^2}{r^2} \\
 \mathbf{s}_q &= \left(\frac{\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y}{2} \right) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y}{2} \right) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\mathbf{q} \\
 &\quad - \mathbf{t}_{xy} \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2\mathbf{q} - P_w \frac{R^2}{r^2} \\
 \mathbf{s}_z &= \mathbf{s}_{zz} - \nu \left[2 \left(\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y \right) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\mathbf{q} + 4 \mathbf{t}_{xy} \frac{R^2}{r^2} \sin 2\mathbf{q} \right] \\
 \mathbf{t}_{rq} &= \left(\frac{\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y}{2} \right) \left(1 - 3 \frac{R^4}{r^4} + 2 \frac{R^2}{r^2} \right) \sin 2\mathbf{q} + \mathbf{t}_{xy} \left(1 - 3 \frac{R^4}{r^4} + 2 \frac{R^2}{r^2} \right) \cos 2\mathbf{q} \\
 \mathbf{t}_{qz} &= \left(-\mathbf{t}_{xz} \sin \mathbf{q} + \mathbf{t}_{yz} \cos \mathbf{q} \right) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \\
 \mathbf{t}_{rz} &= \left(\mathbf{t}_{xz} \cos \mathbf{q} + \mathbf{t}_{yz} \sin \mathbf{q} \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3.3}$$

Tomando en consideración que para este estudio el análisis de esfuerzos únicamente se realizará en la pared del hoyo, se tiene entonces que r (radio en donde se desea realizar el análisis de esfuerzos) es igual a R , el cual es el radio del hoyo.

Siendo así, se tiene que en definitiva los esfuerzos en la pared del hoyo en coordenadas cilíndricas vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{s}_r &= P_w \\
 \mathbf{s}_q &= \mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y - 2(\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y)\text{Cos } 2\mathbf{q} - 4\mathbf{t}_{xy}\text{Sen } 2\mathbf{q} - P_w \\
 \mathbf{s}_z &= \mathbf{s}_{zz} - 2\nu(\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y)\text{Cos } 2\mathbf{q} - 4\nu\mathbf{t}_{xy}\text{Sen } 2\mathbf{q} \\
 \mathbf{t}_q &= 2(-\mathbf{t}_{xz}\text{Sen } \mathbf{q} + \mathbf{t}_{yz}\text{Cos } \mathbf{q})
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3.4}$$

donde P_w es la presión ejercida por el fluido de perforación en el hoyo y \mathbf{q} es el ángulo a lo largo de la periferia del hoyo.

Se puede observar que al ser la ecuación anterior dependiente del ángulo \mathbf{q} los esfuerzos varían con la posición alrededor de la pared del hoyo, teniendo esto un impacto sobre las posiciones de los “*breakouts*” del hoyo.

Los esfuerzos principales en la pared del hoyo están dados como:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{s}_1 &= \mathbf{s}_r = P_w \\
 \mathbf{s}_2 &= \frac{1}{2} \left[(\mathbf{s}_q + \mathbf{s}_z) + \sqrt{(\mathbf{s}_q - \mathbf{s}_z)^2 + 4\mathbf{t}_{qz}^2} \right] \\
 \mathbf{s}_3 &= \frac{1}{2} \left[(\mathbf{s}_q + \mathbf{s}_z) - \sqrt{(\mathbf{s}_q - \mathbf{s}_z)^2 + 4\mathbf{t}_{qz}^2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3.5}$$

Como el criterio de Mohr-Coulomb está siendo aplicado solo en su forma bidimensional, luego de tener la expresión correspondiente a cada uno de los esfuerzos principales se deben tomar únicamente el esfuerzo principal mayor y el esfuerzo principal menor. Así se podrá dibujar el círculo de Mohr y se observará si el punto que está siendo analizado se encuentra en una situación estable (por debajo del límite dado por la envolvente de falla) o si por el contrario ya sobrepasó el límite de falla.

Como nos interesa el estado de esfuerzos efectivos, entonces se cumple que:

$$\begin{aligned}
\mathbf{s}'_1 &= P_w - P_p \\
\mathbf{s}'_2 &= \frac{1}{2} \left[(\mathbf{s}_q + \mathbf{s}_z) + \sqrt{(\mathbf{s}_q - \mathbf{s}_z)^2 + 4\mathbf{t}_{qz}^2} \right] - P_p \\
\mathbf{s}'_3 &= \frac{1}{2} \left[(\mathbf{s}_q + \mathbf{s}_z) - \sqrt{(\mathbf{s}_q - \mathbf{s}_z)^2 + 4\mathbf{t}_{qz}^2} \right] - P_p
\end{aligned}
\tag{Ec. 3.6}$$

donde P_p es la presión de poro en la formación.

Al disponerse de las expresiones para el cálculo de los esfuerzos efectivos y además de la aproximación lineal de la envolvente de falla del criterio de Mohr-Coulomb, construida con los parámetros de resistencia a la cohesión y ángulo de fricción interna, resta entonces plantear un criterio de comparación entre dicho límite de falla y el círculo de Mohr-Coulomb construido por el análisis de esfuerzos en un punto de la pared del hoyo.

Para determinar si ha ocurrido la falla del material por medio del criterio de Mohr-Coulomb, es posible evaluar el criterio en el plano de los esfuerzos principales mayor y menor, en el cual se tendrá la representación de un punto. También es posible hacerlo en el plano definido por el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal, en el cual se tendrá la representación del círculo de Mohr.

En ambos planos la zona que indica estabilidad del material se encuentra por debajo de la envolvente de falla y la zona por encima de la envolvente indica que ya el material ha fallado.

El esfuerzo cortante y el esfuerzo normal en el punto de contacto entre la envolvente de falla y el círculo de Mohr-Coulomb, cuando éste es tangente a la envolvente, vienen dados por las siguientes expresiones:

$$\mathbf{t} = \frac{1}{2} (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3) \cdot \text{Cos } \mathbf{f}
\tag{Ec. 3.7}$$

$$\mathbf{s} = \frac{1}{2} (\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_3) - \frac{1}{2} (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3) \cdot \text{Sen } \mathbf{f}
\tag{Ec. 3.8}$$

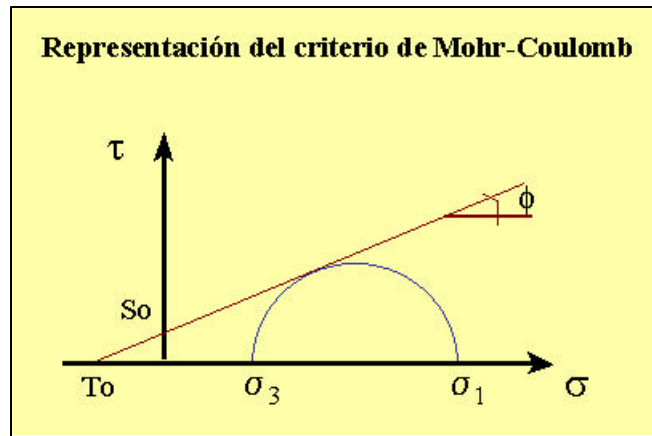


Fig. 3.2: Representación gráfica del círculo de Mohr y la envolvente de falla en el espacio τ - σ .

Siendo la aproximación lineal de la envolvente de falla correspondiente al plano τ - σ la dada por la ecuación 2.4, la cual describe el criterio de Mohr-Coulomb que fue descrito en el segundo capítulo.

Por su parte, la inclinación de la envolvente de falla en el plano de los esfuerzos principales σ_1 - σ_3 está dada por el ángulo α , el cual está relacionado con el ángulo de fricción interna por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{a} = \text{arctg} \left(\frac{1 + \text{sen } \mathbf{f}}{1 - \text{sen } \mathbf{f}} \right) \quad [\text{Ec. 3.9}]$$

Así, la ecuación de la envolvente de falla en el plano de los esfuerzos principales está dada por la expresión:

$$\mathbf{s}_1 = \text{Co} + \mathbf{s}_3 \tan \mathbf{a} \quad [\text{Ec. 3.10}]$$

donde la resistencia a la compresión uniaxial o resistencia a la compresión no confinada (Co) está relacionada con la cohesión del material (So) por la ecuación:

$$\text{Co} = 2\text{So} \frac{\cos \mathbf{f}}{1 - \text{sen } \mathbf{f}} \quad [\text{Ec. 3.11}]$$

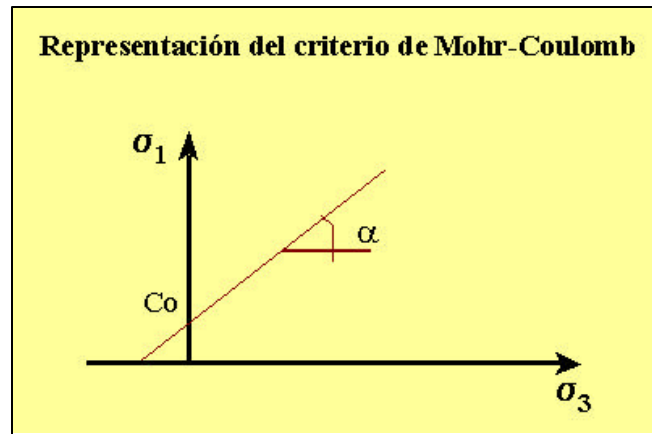


Fig. 3.3: Representación de la envolvente de falla en el espacio de los esfuerzos principales σ_1 - σ_3 .

Se observa entonces de la ecuación 3.10 que al ser el esfuerzo principal menor σ_3 igual a cero, el esfuerzo principal mayor σ_1 tomará el valor de la resistencia a la compresión no confinada (UCS).

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DEL ALGORITMO.

Para la solución del problema planteado se propone realizar la programación en lenguaje FORTRAN del modelo descrito en el capítulo anterior.

El algoritmo que se presenta a continuación describe el método de iteración utilizado para determinar la magnitud del esfuerzo horizontal máximo. Estas iteraciones se realizan hasta encontrar un valor de $S_{Hmáx}$ que complete un estado de esfuerzos que produzca una falla por compresión (*breakout*) con un ángulo igual al ángulo del *breakout* observado en el hoyo a través de un perfil de imágenes. Las características del *breakout* observado en el registro de imágenes son ancho, orientación, profundidad y tipo de roca en la que se localiza.

4.1 ALGORITMO.

La estructuración general del algoritmo desarrollado, consta de:

- Entrada de Datos.
- Procedimiento de cálculo.
- Salidas o Resultados.

4.1.1 Entradas:

Se debe introducir la información necesaria para los cálculos, la cual consta de datos referentes a la geometría del hoyo, a las propiedades físicas y mecánicas de la formación, a los esfuerzos *in-situ*, a los *breakouts* observados en el registro de imágenes y a la densidad del lodo registrada en los reportes diarios de perforación.

4.1.2 Procedimiento de Cálculo:

Una vez que el programa dispone de todos los datos de entrada, se llevan a cabo una serie de sentencias que conducen a la salida o resultado esperado. Es importante señalar que el programa dispone de dos rutinas de cálculo diferentes, de las cuales será utilizada una u otra dependiendo de lo que el usuario desea calcular. Dichas rutinas corresponden al cálculo del esfuerzo horizontal máximo *in-situ*, y la otra al cálculo de la densidad crítica del fluido de perforación.

En el desarrollo de este algoritmo se presenta únicamente el procedimiento correspondiente al cálculo del esfuerzo horizontal máximo. La diferencia que presenta el procedimiento correspondiente al cálculo de la densidad crítica del fluido de perforación, es que en éste el gradiente del esfuerzo horizontal máximo es un dato, y la iteración se realiza para determinar el peso de lodo crítico que comenzaría a producir una falla por corte o *breakout*.

4.1.3 Salidas:

Los resultados arrojados por el programa pueden ser observados tanto en pantalla como en un archivo de texto, con los que luego se pueden realizar las gráficas y análisis que sean necesarios.

Los valores que pueden ser tomados del análisis que se realice corresponden a:

- Valor del esfuerzo horizontal máximo *in-situ* o de la densidad del lodo de perforación, dependiendo del caso que se seleccione.
- Valor del esfuerzo tangencial en la pared del hoyo para cada uno de los ángulos de la periferia.

4.2 ESTRUCTURACIÓN DEL ALGORITMO.

El programa está estructurado por una serie de subrutinas que en conjunto determinan la base del proceso de cálculo y conforman el algoritmo para la solución del problema planteado. Estas son:

- Subrutina para la entrada de datos.
- Subrutina para el cálculo de los cosenos directores, con los cuales se hará la transformación del sistema de coordenadas.
- Subrutina para el cálculo de esfuerzos y determinación de resultados.

Esta última subrutina contiene a su vez varios pasos o procedimientos de cálculo, dividiéndose de la siguiente forma.

- Iteración del esfuerzo horizontal máximo.
- Cálculo de la matriz de esfuerzos en coordenadas cartesianas.
- Cálculo de esfuerzos en coordenadas cilíndricas en la pared del hoyo.
- Cálculo de los esfuerzos principales.
- Comparación del estado de esfuerzos con el criterio de falla de Mohr-Coulomb en cada una de las secciones o ángulos de la periferia del hoyo.
- Determinación del tamaño de la falla en toda la periferia del hoyo (ancho del *breakout*).
- Comparación del ancho de falla obtenido con el valor del ancho del *breakout* observado en el registro de imágenes, el cual fue suministrado como dato.

- Si los valores comparados en el paso anterior son iguales, el programa se detiene y da como resultado el valor obtenido para la magnitud del esfuerzo horizontal máximo, sino continúa la iteración.

4.2.1 Entrada de Datos:

Se introduce la información referente a:

a) Geometría del hoyo:

√ Inclinación del hoyo. [grados]

√ Azimut del hoyo. [grados]

b) Propiedades físicas de la formación:

√ Gradiente de la presión de poro. [psi/pie]

c) Propiedades mecánicas de la formación:

√ Resistencia a la compresión sin confinamiento. [psi]

√ Relación de Poisson. [Adim.]

√ Ángulo de fricción interna. [grados]

d) Esfuerzos *in-situ*.

√ Gradiente del esfuerzo vertical o sobrecarga. [psi/pie]

√ Gradiente del esfuerzo horizontal mínimo. [psi/pie]

e) *Breakout*:

√ Profundidad a la que se encuentra el *breakout* [pies]

√ Ancho del *breakout*. [grados]

√ Orientación del *breakout*, la cual coincide con la del esfuerzo horizontal mínimo. [grados]

f) Parámetros de operación:

√ Densidad del lodo de perforación. [lpg]

4.2.2 Transformación del Sistema de Coordenadas:

Se lleva a cabo con el cálculo de los cosenos directores, para lo cual se toma en cuenta tanto el ángulo de inclinación del hoyo como la diferencia de azimut entre la orientación del hoyo y la orientación del esfuerzo horizontal máximo, ambos medidos con respecto al norte geográfico y en sentido horario.

El objetivo de esto es rotar las componentes de esfuerzos correspondiente a un sistema de coordenadas que tenga uno de sus ejes coincidiendo con la inclinación del pozo tal y como se muestra en la figura 4.1.

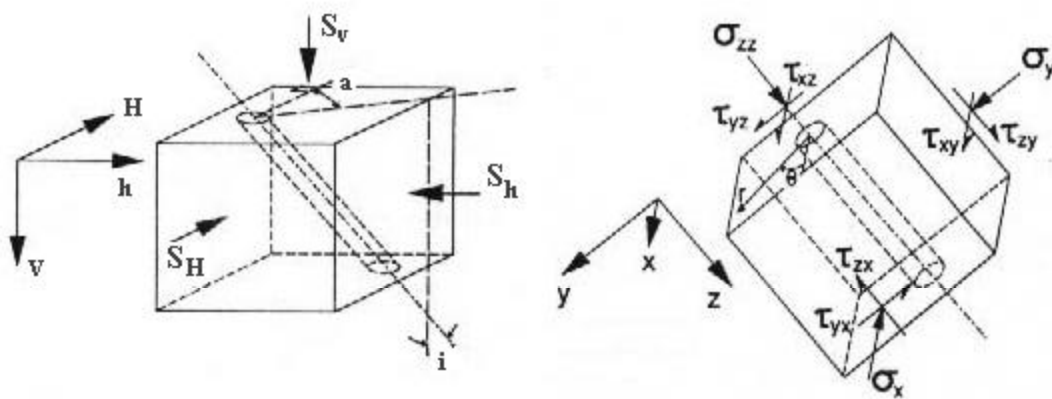


Fig. 4.1: Transformación del Sistema de Coordenadas.

Se realiza la rotación del tensor de esfuerzos en coordenadas cartesianas a partir del campo de esfuerzos *in-situ* y de la orientación que tenga el hoyo mediante las ecuaciones 3.2.

Teniendo los esfuerzos en coordenadas cartesianas correspondientes a un sistema que tiene un eje en la misma dirección que la orientación del pozo, se podrán luego calcular los esfuerzos inducidos en coordenadas cilíndricas en la pared del hoyo.

4.2.3 Cálculo de los Esfuerzo Inducidos en Coordenadas Cilíndricas:

El estado de esfuerzos expresado en coordenadas cilíndricas en algún punto de la periferia del hoyo toma en cuenta tanto el radio del hoyo como el radio en el que se desea realizar el estudio. En el caso particular que se desarrolla en este trabajo, se hace la consideración ($r = R$), ya que el análisis se realiza justamente en la pared del hoyo que es donde se observa el *breakout* (ecuaciones 3.3 y 3.4).

4.2.4 Cálculo de los Esfuerzos Principales:

Los esfuerzos principales efectivos se calculan y se toman en cuenta solamente el esfuerzo principal menor y el esfuerzo principal mayor, despreciando el esfuerzo principal intermedio de acuerdo a la teoría del criterio de falla de Mohr-Coulomb, según las ecuaciones 3.6.

Con estos dos esfuerzos principales se puede evaluar el criterio de falla tanto en el espacio de los esfuerzos principales como en el espacio de esfuerzo cortante y esfuerzo normal en el que se debe hacer la representación del círculo de Mohr.

4.2.5 Comparación del Estado de Esfuerzos con el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb:

Se puede realizar en cualquiera de los dos espacios de esfuerzos que se mencionaron anteriormente. Simplemente se realiza la comparación entre el estado de esfuerzos en la pared del hoyo, específicamente en la sección donde ocurrió la falla, con el límite de resistencia al corte del material dado por la envolvente de falla (ecuación 2.6).

4.2.6 Comparación/Iteración de $S_{Hmáx}$:

Se realiza la iteración del esfuerzo horizontal máximo y se vá comparando con el criterio de falla de Mohr-Coulomb hasta hacer coincidir el ángulo de *breakout* con el observado en el hoyo a través del registro de imágenes.

4.2.7 Resultado:

Se obtiene como principal resultado el valor del esfuerzo horizontal máximo *in-situ* para cada caso analizado, teniendo la posibilidad también de observar el comportamiento del esfuerzo tangencial en cada uno de los puntos de la periferia del hoyo.

Comparación con el polígono de esfuerzos para acotar los valores permisibles de $\sigma_{Hmáx}$ según la teoría de resistencia friccionante (sección 2.6.5 del capítulo II).

4.3 DIAGRAMA DE FLUJO.

En la figura (4.2) se observa el diagrama de flujo del programa para el cálculo del esfuerzo horizontal máximo *in-situ* a partir de la identificación de *breakouts* en la pared del hoyo.

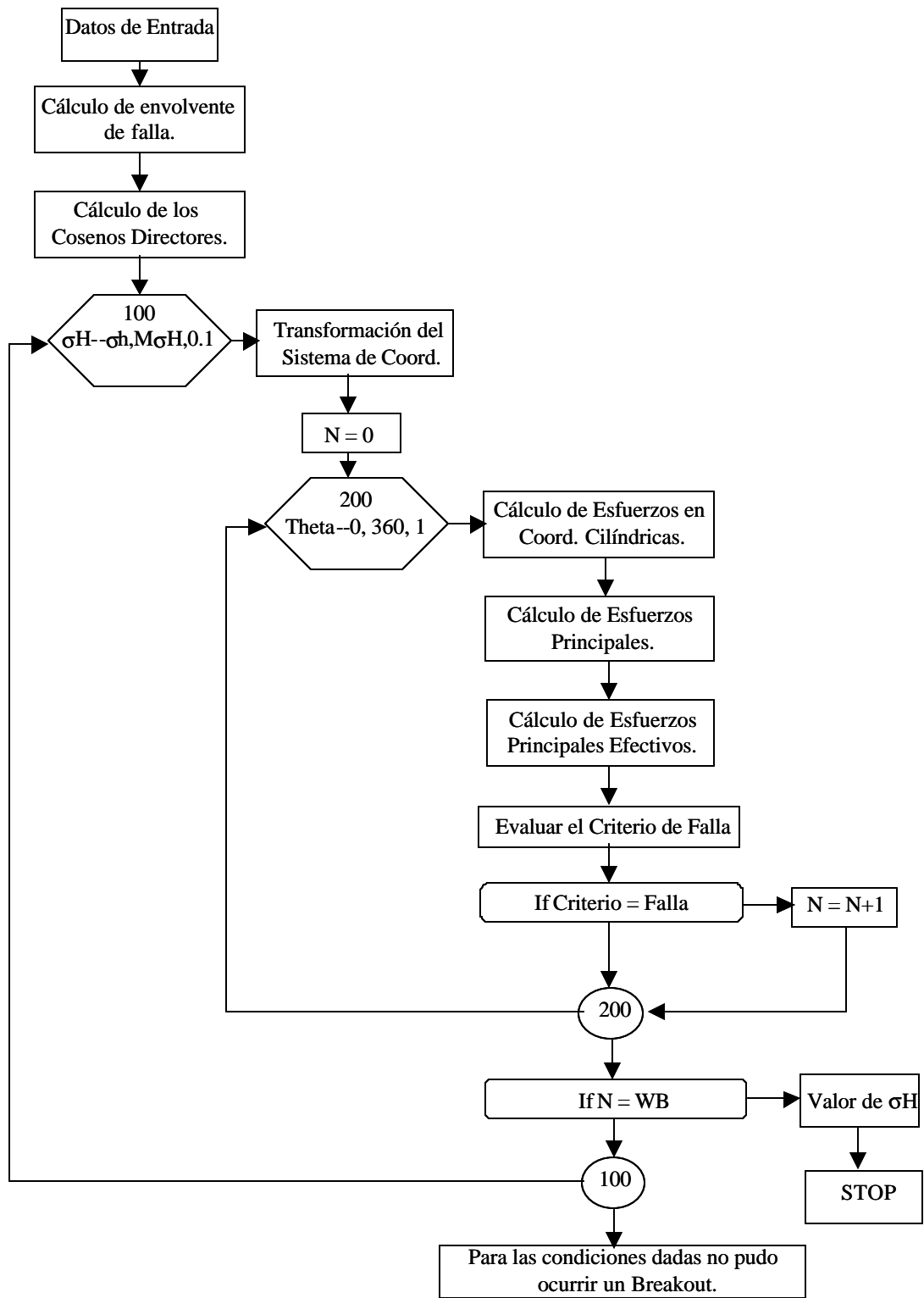


Fig. 4.2: Diagrama de flujo del Programa.

CAPÍTULO V

MARCO GEOLÓGICO.

5.1 AREA NORTE DE MONAGAS.

El área de estudio (Campo Santa Bárbara y Bosque) se encuentra ubicada en el Norte de Monagas como se observa en la figura 5.1, y geológicamente en el piedemonte de la Cordillera de la Costa, en el flanco Norte de la Cuenca Oriental de Venezuela. Es una zona estructuralmente compleja que presenta familias de fallas inversas, normales y corrimientos, formando estructuras que afectan la parte superior del Cretácico y la parte inferior del Terciario.

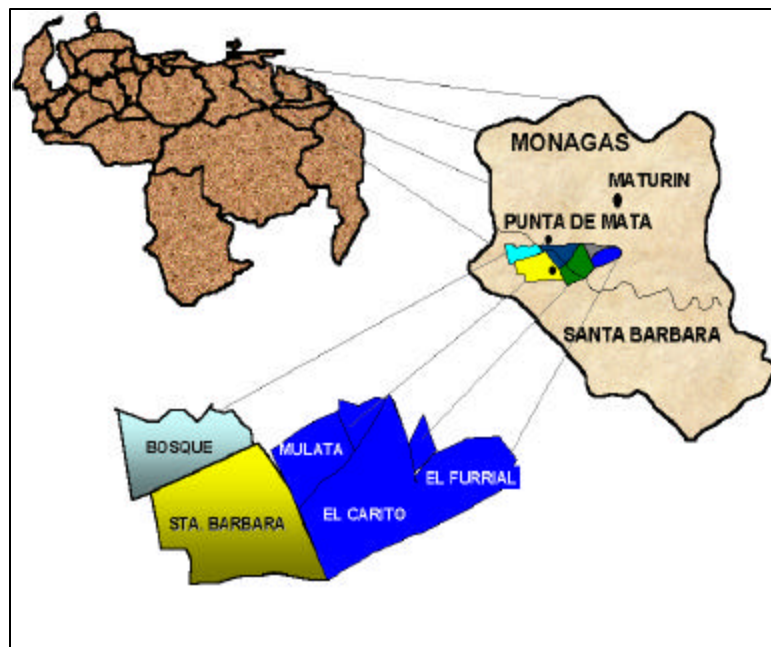


Fig. 5.1: Ubicación Geográfica del Campo Bosque. (Informe final PIC-25)

El campo de Santa Bárbara se encuentra específicamente ubicado a 50 Km. al oeste de la ciudad de Maturín, y pertenece a la subcuenca de Maturín del área norte de Monagas.

5.2 ESTRUCTURA REGIONAL.

El marco estructural del área Norte de Monagas es bastante complejo, característico de áreas de frente de montañas. Se divide en dos unidades estructurales: una unidad de carácter compresivo, la cual se iniciaría en el límite Plio-Pleistoceno, por el movimiento relativo de la placa del Caribe contra la placa de América del Sur y que presenta fallas inversas, corrimientos, fallas transcurrentes perpendiculares a los corrimientos, estructuras de colapso y pliegues sobrecorridos; y otra unidad de carácter extensivo, caracterizada por fallamiento normal, con diapiros o volcanes de barro.

Giraldo y Beltrán (1995) postulan que en el Nor-orienté de Venezuela la actual fase compresiva se ha mantenido constante desde su inicio hasta nuestros días y que en la zona norcentral y noroccidental de Venezuela, se ubica un cinturón de deformación que corresponde al límite entre las placas del Caribe y Suramericana, el cual tiene dirección este-oeste. Además postulan, basándose en resultados de microtectónica y sismos locales, que en esta zona la distribución del campo de esfuerzos es homogénea y que el esfuerzo horizontal máximo tiene una dirección aproximada NW-SE con desviaciones N-S en las zonas de mayor deformación tectónica, a nivel de la zona principal del límite de placas.

La región Norte de Monagas es costumbre dividirla en siete áreas o campos distintos de producción de petróleo denominadas: Santa Bárbara, Bosque, Mulata, Mata Grande, El Carito, Muri y Furrial. Esta subdivisión obedece a razones prácticas más que geológicas, ya que la razón de existencia de estas acumulaciones obedece a causas sedimentológicas y estructurales que no guardan relación con la subdivisión anteriormente mencionada. Como ya se ha mencionado, los campos tomados para este estudio fueron Santa Bárbara y Bosque.

La Cuenca Oriental de Venezuela está ubicada en la zona centro-este de Venezuela formando un anticlinal de rumbo N 70° E. La cuenca es asimétrica con su flanco sur ligeramente inclinado hacia el norte y un flanco norte más tectonizado y

con mayores buzamientos, conectado a la zona plegada y fallada que constituye el flanco meridional de las cordilleras que limitan la cuenca hacia el norte. El levantamiento de esta cuenca es un fenómeno orogénico tardío, cuyos efectos se hacen más visibles desde el comienzo de la sedimentación de la Formación Naricual.

Estructuralmente la Cuenca Oriental de Venezuela está formada por rocas sedimentarias, las cuales se encuentran plegadas y falladas. Los pliegues principales son de rumbo este-oeste en tanto que las fallas pueden agruparse en tres sistemas; el más importante de éstos es longitudinal, paralelo o sub-paralelo al rumbo; seguido en importancia por otro sistema noroeste-sureste y en menor escala un tercer sistema noreste. Entre las fallas del segundo sistema se destacan dos lineamientos importantes con transurrencia dextral, denominados falla de San Francisco y falla de Urica.

Los volcamientos y corrimientos son más abundantes en el flanco sur que en el flanco norte, aunque existe una zona cercana a la costa norte, con dos corrimientos hacia el norte entre los cuales se desarrolla una zona volcada y subrecorrida también hacia el norte. Este volcamiento se considera como el resultado de un empuje dominante hacia el sur, originado por el levantamiento en cuña del flanco norte de la serranía. Las zonas volcadas del flanco sur son a menudo largas y paralelas o subparalelas al rumbo.

Se ha indicado la presencia de dos sistemas de fallas de cizallamiento, dirigidos hacia el NE y NW respectivamente. Las fallas NE son más escasas, pero no infrecuentes y generalmente presentan menor longitud. El sistema NE se observa en la falla de Barbacoa y el sistema noroeste (NW) está expresado por las fallas de San Francisco y la falla de Urica.

5.2.1 La Falla de Urica.

Corresponde al límite oeste del área norte de Monagas y se puede definir como un alineamiento transcurrente que sigue desde muy cerca la línea fronteriza entre los estados Anzoátegui y Monagas, donde se manifiesta de manera prominente.

5.2.2 Corrimiento de Pirital.

Es el límite norte del área norte de Monagas y que comienza hacia el este de la falla de Urica con un plano bien marcado y bien identificado; el borde sur está integrado por tres fallas distintas que de norte a sur son: la falla inversa de Pirital, la falla de Santa Bárbara y continúa hacia el oeste hasta el campo de Tacat donde se encuentra la falla de Urica.

El corrimiento de Pirital, fue originado en toda su longitud por esfuerzos de compresión de naturaleza semejante, los cuales, deben su existencia a empujes procedentes del norte.

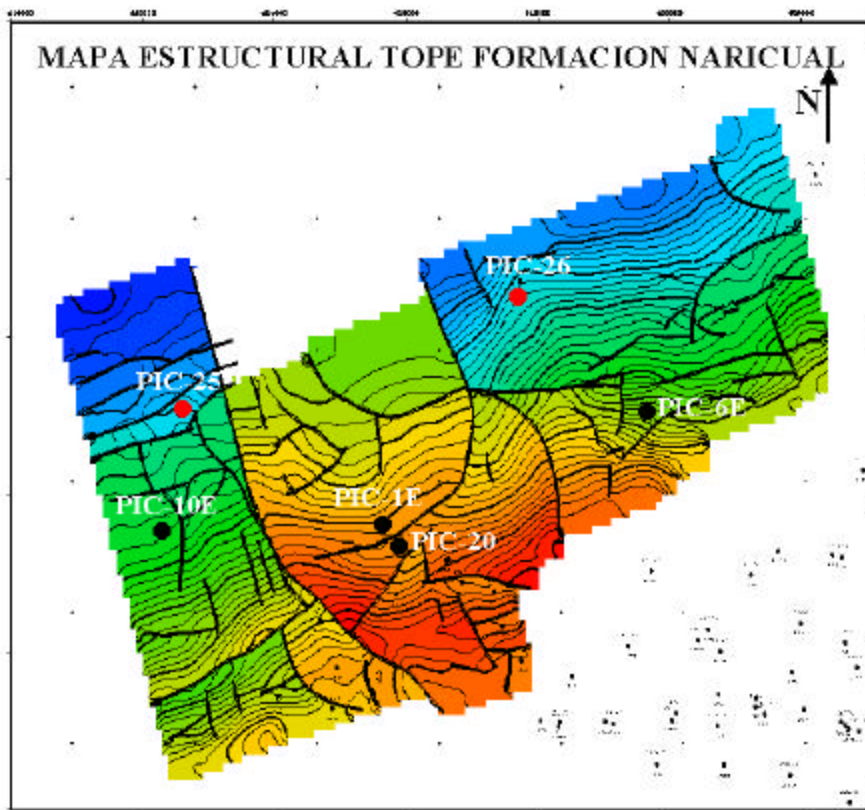


Fig. 5.2: Mapa Estructural de la Formación Naricual (Informe PIC-25, 2000).

En la figura anterior se muestra un mapa estructural de la formación Naricual en la zona donde está ubicado el PIC-25 y algunos otros pozos cercanos.

5.3 ESTRATIGRAFÍA.

La información estratigráfica existente se ha obtenido por medio de los trabajos exploratorios tanto de campo como de laboratorio (muestras de ripios, núcleos, registros, etc.).

La columna estratigráfica es el resultado de extensos ciclos de transgresiones y regresiones que ocurrieron a partir del Cretácico Inferior. Estos ciclos fueron interrumpidos por los eventos tectónicos ocurridos durante el Mioceno Medio que originaron una secuencia Cretácica – Terciario Inferior, altamente deformada sobre las cuales se depositaron después de un largo proceso de erosión las unidades post-orogénicas, en un período de mayor estabilidad tectónica.

Las unidades estratigráficas están representadas por las Formaciones la Mesa, las Piedras, San Antonio, Querecual, Barranquín Carapita, Naricual y San Juan. En la figura. 5.3, se puede observar la sección estructural del área donde se encuentra el pozo PIC-25, el cual es uno de los que está incluido en el estudio que se lleva a cabo en este trabajo. Es importante señalar que las profundidades de interés para este estudio están comprendidas entre las formaciones Carapita, Naricual y San Juan, por ser estas las formaciones en las que por lo general se corre el registro de imágenes.

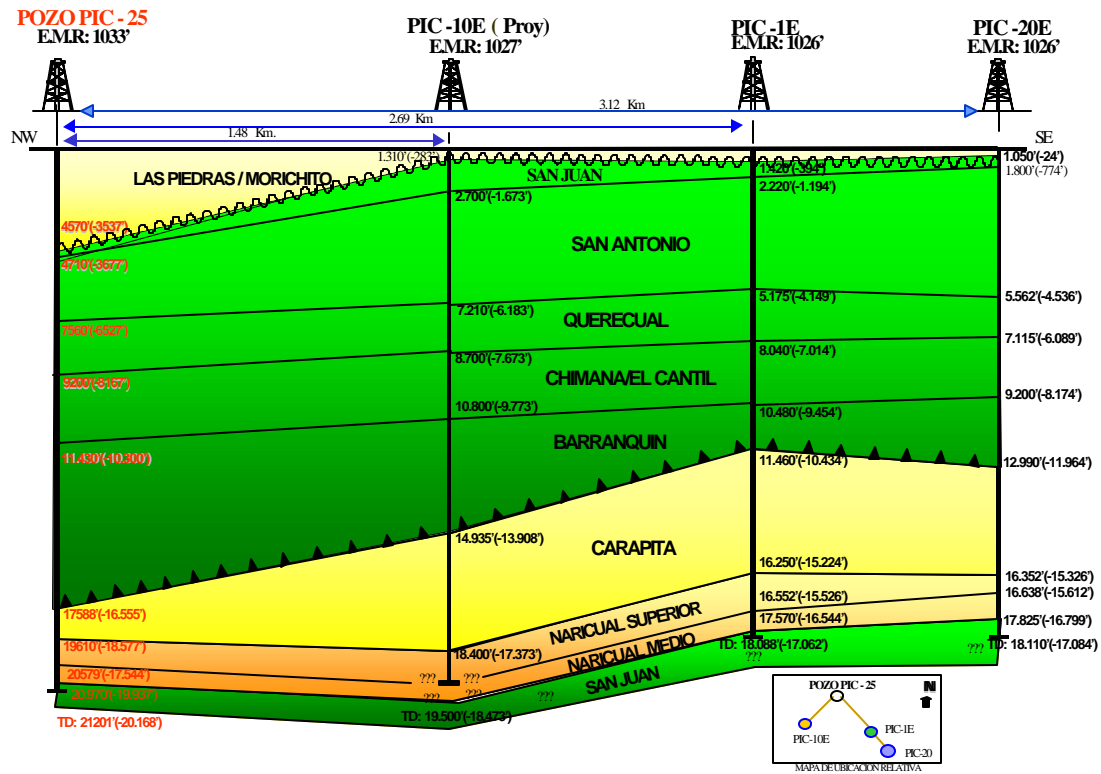


Fig. 5.3: Sección Estructural incluyendo el Pozo PIC-25. (Informe final PIC-25)

5.4 GEOLOGÍA LOCAL.

Un gran potencial de hidrocarburos se encuentra acumulado en la Formación Naricual y San Juan en el campo de Santa Bárbara en la cuenca del Norte de Monagas, a profundidades de entre 15.000 y 20.000 pies, pero marcados y drásticos cambios en la calidad de la roca se presentan en esta área, impactando su potencial de producción y presentando una geología muy compleja, tanto del punto de vista estratigráfico como estructural. Se caracteriza por una distribución única y complicada de hidrocarburos medianos y livianos, que resultan de gran interés económico.

5.5 FORMACIÓN CARAPITA.

Esta formación se caracteriza por estar constituidas por grandes capas de lutitas las cuales se encuentran altamente presurizadas. Ocasionalmente a través de la sección se observan limolitas al igual que areniscas.

Hacia la base de la formación Carapita se desarrollan unos paquetes de areniscas denominados “Carapita E”, separados por lutitas altamente compactados. Generalmente estas arenas presentan unas presiones mayores que las de la formación Naricual, ubicadas por debajo de estas.

5.6 FORMACIÓN NARICUAL.

De edad Oligoceno Medio-Superior, tiene un espesor promedio de 1.500 pies pero que varía dependiendo del área que se esté estudiando. Se compone básicamente de areniscas masivas de color beige, gris claro o marrón oscuro, de grano fino a medio, cemento silicio, matriz arcillosa, en partes calcáreas, con intercalaciones de lutitas y carbón en su sección media a superior. Presenta intercalaciones de limolitas a lo largo de su secuencia, marrón claro a gris, microcarbonosas, no calcáreas, con porosidades promedio de 12 % y permeabilidad variante, produciendo hidrocarburos medianos y livianos dependiendo del campo.

Tabla 6.1: Pozos con información de Registro de Imágenes y/o Minifrac

POZO	UBI (Inter. Perfilado)	Minifrac (prof.)
PIC 25	18915' – 21250'	-----
SBC 37E	20234' – 20464'	19900'
SBC 39	15151' – 17269'	-----
SBC 40	14052' – 14130'	-----
SBC 51	15984' – 17505'	16554'
SBC 62	15720' – 16910'	-----
SBC 68	15250' – 17260'	-----
SBC 90	16420' – 17140'	16461'
SBC 110	15400' – 16700'	-----
SBC 116	15100' – 17060'	-----

No se pudo disponer de los registros de imágenes de todos estos pozos y además, en base a la necesidad de tener la información completa para realizar este análisis, se seleccionaron los pozos PIC-25 y el SBC-90. El análisis de estos dos pozos es presentado a continuación. Como se observa en la tabla 6.1, el pozo PIC-25 no tiene ensayo minifrac por lo que se debe plantear una metodología diferente al análisis que se realice al pozo SBC-90 el cual posee tanto registro de imágenes como ensayo minifrac, aunque se tiene cierta incertidumbre de los parámetros mecánicos especialmente de la resistencia a la compresión, en ambos casos.

6.1. CASO I: POZO SBC-90.

En el pozo SBC-90 se logró interpretar con seguridad sólo un *breakout*, y la litología presente a la profundidad a la que se localizó dicha ovalización es principalmente arenisca. Esto puede ser justificado observando el registro de Gamma Ray.

No se dispone de información de los parámetros mecánicos de la formación señalada anteriormente, ya que no se tienen reportes de ensayos realizados en laboratorio.

La información que se logró recopilar para el análisis de este pozo está constituida por el survey del pozo (profundidad, inclinación y azimut) y registros de densidad, gamma ray, sónico dipolar, caliper, coeficiente o relación de Poisson, imágenes y ensayo minifrac. Estos registros es suficiente tenerlos para un intervalo que encierre la profundidad a la que se localiza la ovalización, excepto el registro de densidad, el cual idealmente es necesario tenerlo desde profundidades cercanas a la superficie para tener un estimado bastante acertado de la magnitud de la sobrecarga.

El registro gamma ray es útil para tener una idea de la presencia de arena o lutita en la formación y es la base para calcular el “Vshale” (volumen de arcilla). El caliper permite observar variaciones en el diámetro del hoyo, y la utilidad del registro de imágenes y del ensayo minifrac ya es conocida.

Para obtener estimados de los parámetros de resistencia de la roca es posible utilizar correlaciones, las cuales están en función de ciertos registros tomados en campo. Las correlaciones disponibles para el cálculo de la cohesión del material son características de formaciones lutíticas, dando un estimado de dicha resistencia en función del porcentaje de arcilla en la formación (Vshale) o de la onda compresional (DTC) del registro sónico. Por otra parte, se dispone de correlaciones para el cálculo del ángulo de fricción interna en función de Vshale (lutitas) y en función de la relación de Poisson, para la cual el autor no indica limitaciones.

En base a esto se presentará el análisis utilizando valores de 35° y 40° para el ángulo de fricción, estimados de los valores dados por las correlaciones utilizadas. Por su parte, los valores de cohesión obtenidos con las correlaciones tienen entre ellos una diferencia apreciable, razón por la cual no se presentará como resultado un valor de esfuerzo horizontal máximo, sino que por el contrario se dará un rango para la magnitud de este esfuerzo en función de la resistencia a la compresión no confinada de la formación (UCS) para cada uno de los valores de ángulo de fricción mencionados anteriormente.

A continuación se presenta una tabla donde se muestra la información del *breakout* tomada del intervalo perfilado por el registro de imágenes del pozo SBC-90. Fue interpretado sólo un evento, el cual presenta las siguientes características.

Tabla 6.2: Información de *breakout* del pozo SBC 90.

Profundidad [pies]	Azimut [grados]	Ancho [grados]	Litología
16755	N107E	90	Arenisca.

6.1.1 Determinación de los Parámetros de Entrada:

A continuación se realiza una descripción del proceso de determinación de los parámetros de entrada para el análisis que se desea realizar.

6.1.1.1 Geometría del Hoyo:

La información referente tanto a la inclinación como a la orientación o azimut del pozo a la profundidad requerida es fácilmente observada en el survey o registro de trayectoria del hoyo (ver anexo # 1). En el survey se puede observar que a la profundidad a la que se encuentra el *breakout* el pozo tiene una inclinación de aproximadamente 10° .

6.1.1.2 Propiedades Mecánicas de la Formación:

a) Valores de Cohesión y UCS:

Para la determinación de la cohesión del material se utilizan algunas correlaciones que son función de mediciones de campo.

Una de estas correlaciones es señalada por Lal (1999), y la plantea como función de la onda compresional del registro sísmico, y es particular para formaciones lutíticas

$$S_o = \frac{5(V_p - 1)}{\sqrt{V_p}} \quad [\text{Ec. 6.1}]$$

donde:

S_o : Cohesión.

V_p : Onda compresional del registro sísmico (velocidad).

Adicionalmente, las otras dos correlaciones (cortesía de CSIRO) disponibles para el cálculo de la cohesión fueron proporcionadas por Tan (2001), las cuales son planteadas como función del porcentaje de arcilla en la formación. Estas correlaciones presentadas por Tan son válidas para formaciones con un porcentaje de arcilla superior al 25%.

En la literatura (Horsrud, 2001) se encontró una correlación para lutitas de la forma:

$$\text{UCS} = A \cdot (V_p)^b \quad [\text{Ec. 6.2}]$$

donde V_p es la onda compresional del registro sísmico y la resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS) viene dada en unidades "psi". Los valores típicos de las constantes "A" y "b" son mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 6.3: Valores típicos de las constantes de la ec. 6.2.

Constante	Valor
A	72,5 - 111
b	3 - 2,93

Adicionalmente, se ha utilizado información de ensayos de laboratorio en arenas del área para determinar un rango de valores de UCS.

En la tabla 6.4 se presenta una recopilación de los valores de UCS obtenidos de ensayos realizados en laboratorio a muestras de arenas de los pozos PIC-4 y SBC-7.

También se dispone de correlaciones encontradas para las arenas C del Eoceno en el Occidente de Venezuela:

$$UCS = -9722 - 21756 \log (\varphi) \quad [\text{Ec. 6.3}]$$

$$UCS = 21762 - 103050\varphi + 111520\varphi^2 \quad [\text{Ec. 6.4}]$$

Para el caso del *breakout* localizado en arenas del pozo SBC-90, el UCS calculado con estas correlaciones para valores de porosidad de 0,086 y 0,0634 es de aproximadamente 13460 psi y 16340 psi respectivamente.

Tabla 6.4: Valores de UCS obtenidos de ensayos de laboratorio.

POZO	Prof. [pies]	UCS [psi]
PIC-4	15555	12790
	15650	10190
	15732	16280
	16167	9360
	16608	13790
SBC-7	16327	12034
	16328	14648
	16538	20720
	16332	15234
	16340	14099
	16555	15164

b) Valores del ángulo de fricción:

Para la estimación del ángulo de fricción interna se tienen también algunas correlaciones que al igual que las utilizadas para el cálculo de la cohesión son función de algunas mediciones de campo.

La correlación presentada por Lal (1999) para el cálculo de este parámetro es función, al igual que la presentada para el cálculo de la cohesión, de la onda compresional del registro sísmico, y vienen dada por:

$$f = \arcsen\left(\frac{V_p - 1}{V_p + 1}\right) \quad [\text{Ec. 6.5}]$$

Por su parte, Tan (2001) también presenta dos correlaciones para el cálculo del ángulo de fricción interna en función del porcentaje de arcilla en la formación, bajo la misma condición para la cual son válidas las presentadas por él mismo para el cálculo de la cohesión.

Sin embargo, se tiene otra correlación que no presenta ninguna limitación con respecto al tipo de material geológico. Esta correlación es presentada en el manual del software IMPACT (Schlumberger), y es función del coeficiente o relación de Poisson.

$$f = 60 \left(1 - \frac{\nu}{(1-\nu)} \right) \quad [\text{Ec. 6.6}]$$

Para las arenas C del Eoceno en Occidente de Venezuela se tiene también una correlación para el cálculo del ángulo de fricción:

$$f = 51,2 - 57,33\varphi \quad [\text{Ec. 6.7}]$$

De acuerdo a esta correlación se tienen valores de ángulo de fricción de 46,2° y 47,6° para valores de porosidad de 0,086 y 0,0634 respectivamente.

c) Relación de Poisson:

Para el caso del coeficiente o relación de Poisson, se dispone de un registro de valores que no es más que el resultado del cálculo de este coeficiente a partir del registro sísmico dipolar por cualquiera de las siguientes dos ecuaciones:

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} \right)^2 - 1}{\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} \right)^2 - 1} \quad [\text{Ec. 6.8}]$$

donde:

Δt_s : Onda de corte del registro sísmico (tiempo)

Δt_p : Onda compresional del registro sísmico (tiempo)

$$v = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad [\text{Ec. 6.9}]$$

donde:

V_p : Onda compresional del registro sísmico (velocidad).

V_s : Onda de corte del registro sísmico (velocidad).

Otra forma para determinar la relación de Poisson a partir de ensayos de laboratorio, calculando la relación de la deformación lateral entre la deformación axial de una muestra que ha sido sometida a un ensayo de compresión en un laboratorio.

$$\nu = \frac{-e_y}{e_x} \quad [\text{Ec. 6.10}]$$

6.1.1.3 Esfuerzos *in-situ*:

El cálculo de la sobrecarga, tal y como se describió en el marco teórico, es una integración de la densidad de las formaciones por encima de la profundidad de interés. Sin embargo, en este caso particular, únicamente se dispone del registro de densidad del intervalo comprendido entre 16363 – 17211 pies. Por lo tanto, para tener un estimado del valor de la sobrecarga fue utilizado el software PREDICT, el cual hace una extrapolación para el intervalo del cual se desconoce la densidad y luego arroja un estimado del valor de la sobrecarga (ver figura 6.2).

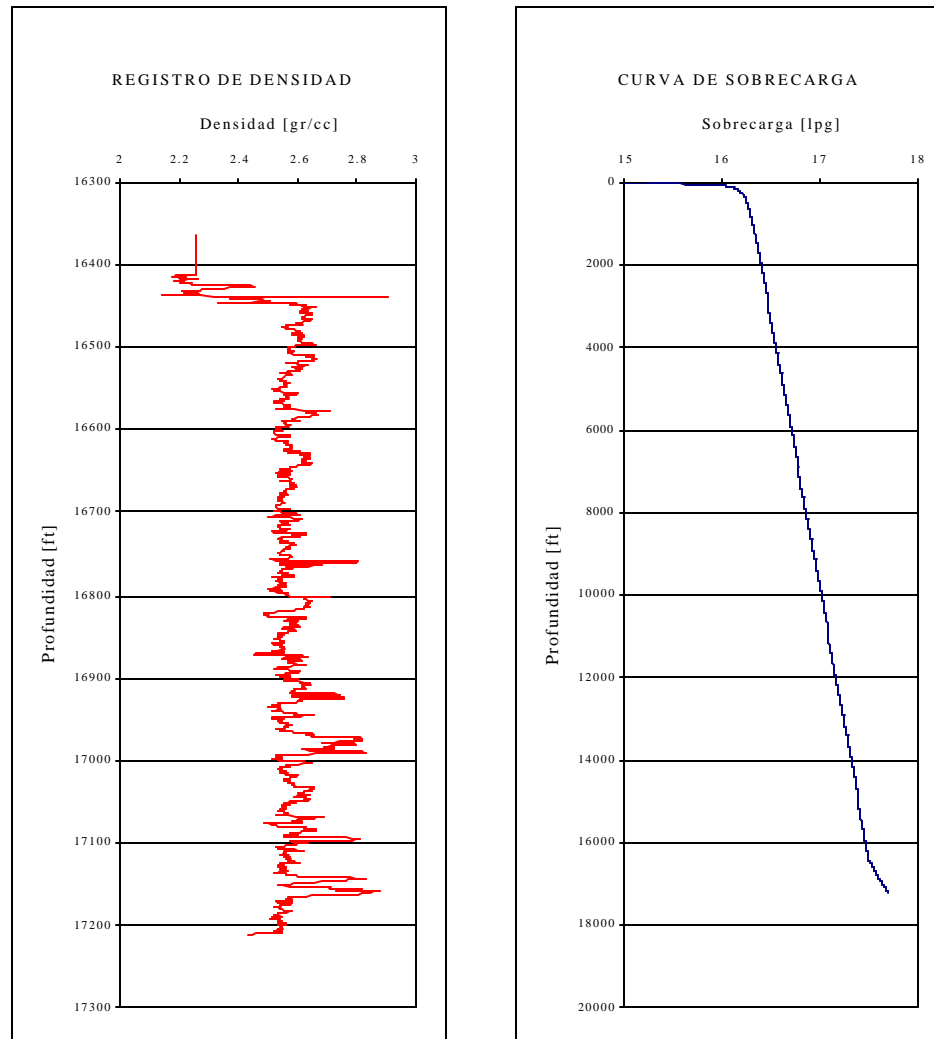


Fig. 6.2: Registro de densidad para un intervalo de la profundidad del pozo SBC-90 y valores de sobrecarga calculados con el PREDICT.

Por su parte, la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo es conocida de un ensayo minifrac que fue realizado en una sección confinada a la profundidad de 16461 pies (ver anexo # 2).

6.1.1.4 Otros datos de entrada:

La profundidad MD a la cual se localiza el *breakout* interpretado se observa en el registro de imágenes del pozo, al igual que el ancho del *breakout* y su orientación.

La magnitud del peso de lodo utilizado es tomada de los reportes diarios de perforación. Sin embargo, en los reportes se observa un valor de peso de lodo de 12,6 lpg utilizado al momento de perforar la profundidad a la que se localiza la ovalización, pero a una profundidad mayor se reportó un peso de lodo más bajo (12,5 lpg), por lo que se utilizará este último para realizar el análisis debido a que mientras menor es el peso de lodo utilizado la roca alrededor del pozo se encuentra soportando esfuerzos mayores. Una recopilación de todos estos datos se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 6.5: Datos correspondientes al *breakout* interpretado en el pozo SBC-90.

Parámetro	Dato	Fuente
Profundidad del Breakout	MD = 16755 pies TVD = 16655 pies	Registro de Imágenes y Survey del pozo
Inclinación del pozo	10° respecto a la vertical	Survey del pozo
Azimut del pozo	62° orientación Noreste	Survey del pozo
Orientación del Breakout	107° orientación Noreste	Registro de Imágenes
Ancho del Breakout	90° de la periferia del hoyo	Registro de Imágenes
Esfuerzo vertical o Sobrecarga	17,6 lpg ó 0.915 psi/pie	Registro de densidad y uso del software PREDICT
Esfuerzo horizontal mínimo	0.8 psi/pie @ 16461 pies	Ensayo de minifrac
Peso de lodo	12.5 lpg	Reporte de perforación de fecha 24/08/98
Relación de Poisson	0.21	Cálculo con registro sísmico
Presión de poro	11.2 – 11.7 lpg	RFT ó reporte 24 Hrs.

Angulo de fricción interna	35° - 40°	Estimado de correlaciones.
UCS	10000 – 16000 psi	Rango estimado de las correlaciones.
Formación	Naricual	Columna Estratigráfica
Litología	Arenisca	Gamma Ray
Vshale	23 %	Gamma Ray

En la figura 6.3 se observa la sección del registro de imágenes donde fue interpretado el *breakout*, el cual se encuentra en la formación Naricual.

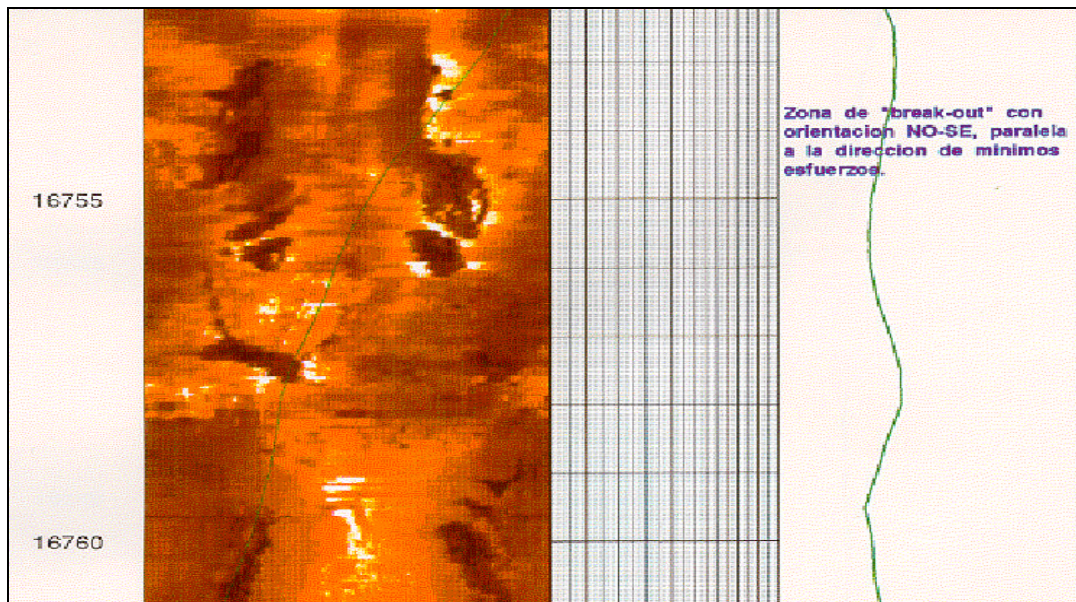


Fig. 6.3: Sección del registro de imágenes del SBC-90.

En la figura 6.4 se observa la representación gráfica de la metodología utilizada para determinar el gradiente del esfuerzo horizontal mínimo a la profundidad en la que se localiza el *breakout*. Para ello se dispone del valor obtenido con el ensayo minifrac y de los valores de esfuerzo mínimo calculados a partir de la siguiente ecuación:

$$s_h = \frac{\nu}{1 - \nu} s_v \quad [\text{Ec. 6.11}]$$

De esta manera, se realiza un desplazamiento de los puntos obtenidos con la ecuación 6.11 hasta el valor obtenido mediante el ensayo. La ecuación 6.11 puede ser utilizada para estimar el esfuerzo horizontal mínimo basándose en la suposición que la formación es elástica y se encuentra relajada tectónicamente.

Este es un modelo limitado porque supone que no hay deformaciones laterales en la cuenca y que hay isotropía de esfuerzos horizontales. Sin embargo, es una herramienta sencilla que puede calibrarse tal como se hizo.

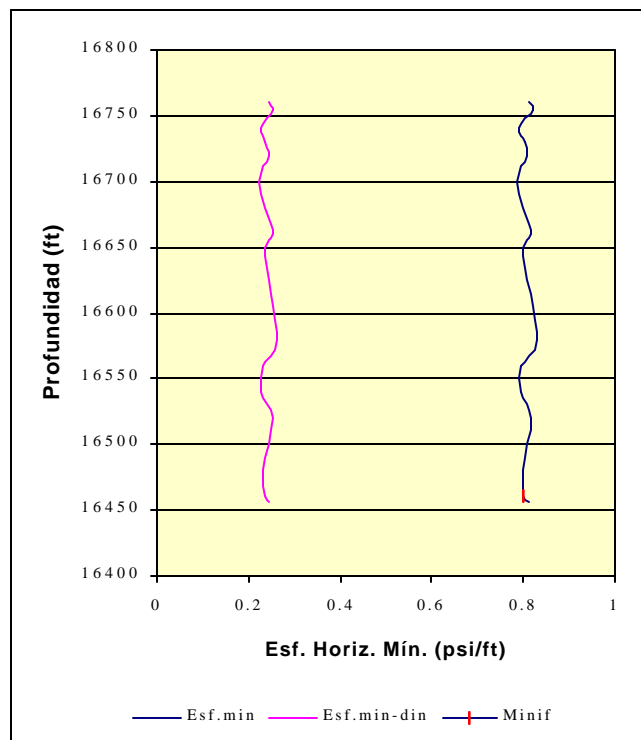


Fig. 6.4: Curva de esfuerzo horizontal mínimo a partir del valor obtenido con el ensayo minifrac

Luego de llevar a cabo el procedimiento descrito, se observa en la gráfica que para una profundidad de 16655 pies (donde se encuentra el *breakout*) el gradiente del esfuerzo horizontal mínimo es 0.8 psi/pie (igual al medido con el ensayo minifrac), ya que no hay mucha variación en el perfil observado.

Los resultados obtenidos de magnitud del esfuerzo horizontal máximo en función del UCS, para el caso de un ángulo de fricción interna de 35°, se muestra en el polígono de esfuerzos de la figura 6.5.

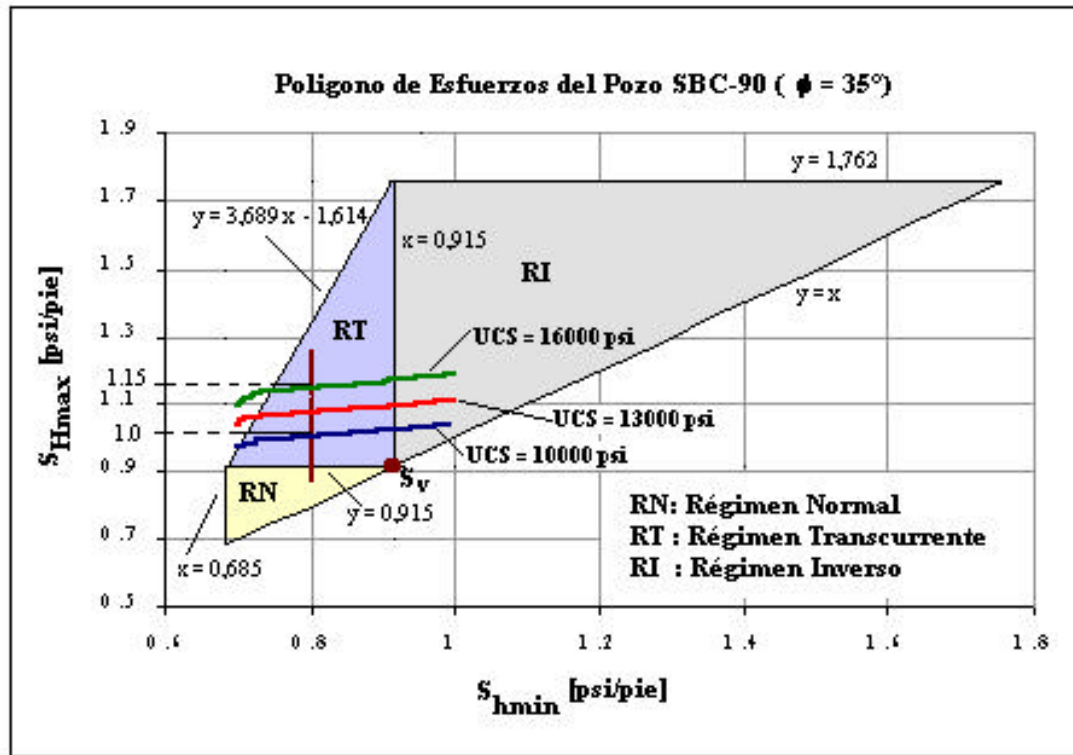


Fig. 6.5: Polígonos de esfuerzos para el caso del pozo SBC-90 para un ángulo de fricción de 35° .

Por otra parte los resultados obtenidos utilizando un ángulo de fricción interna de 40° se muestran en el polígono de esfuerzos de la figura 6.6.

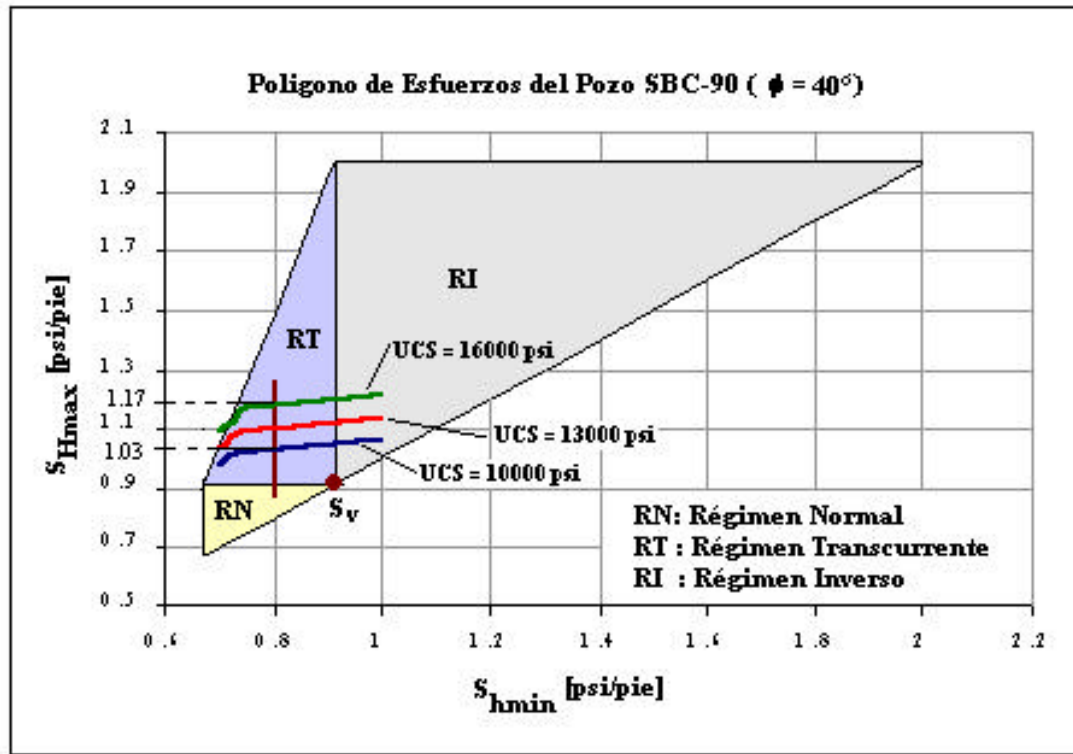


Fig. 6.6: Polígonos de esfuerzos para el caso del pozo SBC-90 para un ángulo de fricción de 40° .

A pesar de la incertidumbre que se tiene en el conocimiento de los parámetros mecánicos de la roca y de la poca cantidad de eventos interpretados en todo el intervalo perfilado por el registro de imágenes (solamente se caracterizó un *breakout*), la información suministrada por las figuras 6.5 y 6.6 permite acotar la magnitud del esfuerzo horizontal máximo entre 1.0 y 1.17 psi/pie para un gradiente de esfuerzo horizontal mínimo de 0,8 psi/pie. Los valores obtenidos indican que se está en presencia de un régimen transcurrente, tal y como se puede observar en el polígono de esfuerzos para ambos valores de ángulo de fricción.

Por otra parte, se realizó el cálculo de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo utilizando la solución explícita dada por la ecuación 2.10, la cual no toma en consideración la inclinación del hoyo. En la tabla 6.6 se muestran los valores

obtenidos por la solución explícita (ecuación 2.10) y por la solución analítica (programa) con lo cual se puede hacer una comparación entre estos dos métodos.

Tabla 6.6: Comparación de valores de $S_{Hmáx}$ obtenidos por ambos métodos.

Método Utilizado	UCS		
	10000 psi	13000 psi	16000 psi
Solución explícita	0,603 psi/pie	0,650 psi/pie	0,697 psi/pie
Solución analítica ($\phi = 35$)	1,0 psi/pie	1,07 psi/pie	1,15 psi/pie
Solución analítica ($\phi = 40$)	1,03 psi/pie	1,10 psi/pie	1,17 psi/pie

Es posible ver que es importante considerar la inclinación del hoyo (aún siendo una inclinación tan ligera como 10°) en el análisis de $S_{Hmáx}$ ya que la diferencia es alrededor de un 40 %.

6.2 CASO II: POZO PIC-25.

Para el PIC-25 no hay información de minifrac, pero se puede tener un estimado de $S_{h\text{mín}}$ partiendo de la información de ensayos minifrac llevados a cabo en pozos cercanos, entre los cuales se encuentran el PIC-10E, el SBC-37E y otros, como se puede observar en el mapa de la figura 6.1 en donde el pozo PIC-25 está denotado como DL-1.

La información de los valores correspondientes al gradiente de esfuerzo mínimo, de los pozos más cercanos al PIC-25, y a los cuales se les realizó ensayo de minifrac, se encuentran en la tabla 6.7.

Tabla 6.7: Magnitud del esfuerzo horizontal mínimo de los pozos cercanos al PIC-25.

Pozo	Profundidad [pies]	S_h [psi/pie]
PIC 3E	17240	0,79
PIC 6E	17678	0,83
PIC 10E	18375	0,84
PIC 14	16116	0,75
PIC 15	16397	0,79
SBC 37E	19900	0,91

El valor del esfuerzo horizontal mínimo se encuentra entre 0,75 y 0,85 psi/pie.

Se utilizan algunas correlaciones para la estimación del ángulo de fricción interna, de resistencia a la compresión no confinada (UCS) o bien de la cohesión. Se ha estimado un valor de la relación de Poisson de 0,25. El cálculo del esfuerzo horizontal máximo, es muy poco sensible a la relación de Poisson, para el modelo utilizado.

Las correlaciones que se utilizaron para la determinación de los parámetros de resistencia, son las mismas que se describieron para el caso anterior (caso del pozo SBC-90).

A diferencia del caso anterior, los *breakouts* que fueron interpretados en el intervalo perfilado por el registro de imágenes del pozo PIC-25 están presentes tanto en formaciones lutíticas como en arenas, de acuerdo a lo observado en el registro *gamma ray* y de imágenes. Sin embargo, aún se tiene incertidumbre de los parámetros de resistencia para las formaciones arcillosas donde se formaron los *breakouts* debido a que estas correlaciones no son específicamente de las lutitas del área.

Se lograron interpretar en el registro de imágenes del pozo PIC-25 un total de treinta y cuatro eventos que tienen las características de ser “*breakouts*” y se presentan en la tabla 6.8.

Dicha información consta básicamente de la profundidad, formación y litología en donde se observan los *breakouts* así como también la orientación y el ancho de los mismos.

Tabla 6.8: Información de los *breakouts* observados en el registro de imágenes del pozo PIC-25.

FORMACIÓN	BREAKOUT			Litología (Gamma Ray)	
	MD [ft]	Azimut. [deg]	Ancho [deg]		
Carapita E Tope Inferior a 19610'	19544	155	90	Arena	
	19723	165	115	Lutita	
Naricual Superior	19894	166	125	Lutita	
	20048	166	85		
Tope Superior a 19610' y	20158	168	110	Lutita	
	20183	172	95	Arena	
Tope Inferior a 20579'	20323	130	75		
	20343	167	75		
	20470	172	90		
Naricual Medio	20498	164	85		
	20538	173	85		
Tope Superior a 20579' y	20546	177	85		
	20788	174	90		
Tope Inferior a 20970'	20790	178	90		
	20821	180	110	Lutita	
Tope Superior a 20579' y	20864	139	90	Arena	
	20889	156	95		
Tope Inferior a 20970'	20937	166	70		
	20941	173	70		
	20964	146	75		
San Juan Tope Superior a 20970' y Tope Inferior a 21201'	20972	146	100	Arena (sucia)	
	20991	155	85	Arena	
	21010	160	85		
	21013	166	90		
	Tope Superior a 20970' y	21029	178	100	Lutita
		21031	178	120	
	Tope Inferior a 21201'	21034	180	120	Arena (sucia)
		21050	188	100	
		21059	174	100	Lutita
		21061	187	120	
		21087	180	110	
		21116	176	75	Arena
		21137	157	100	Lutita
	21138	151	100		

De acuerdo a esta información, en las gráficas mostradas en la figura 6.7 se observa la distribución de frecuencia con que se repite el ancho y orientación de los *breakouts* interpretados en el pozo utilizando el registro de imágenes.

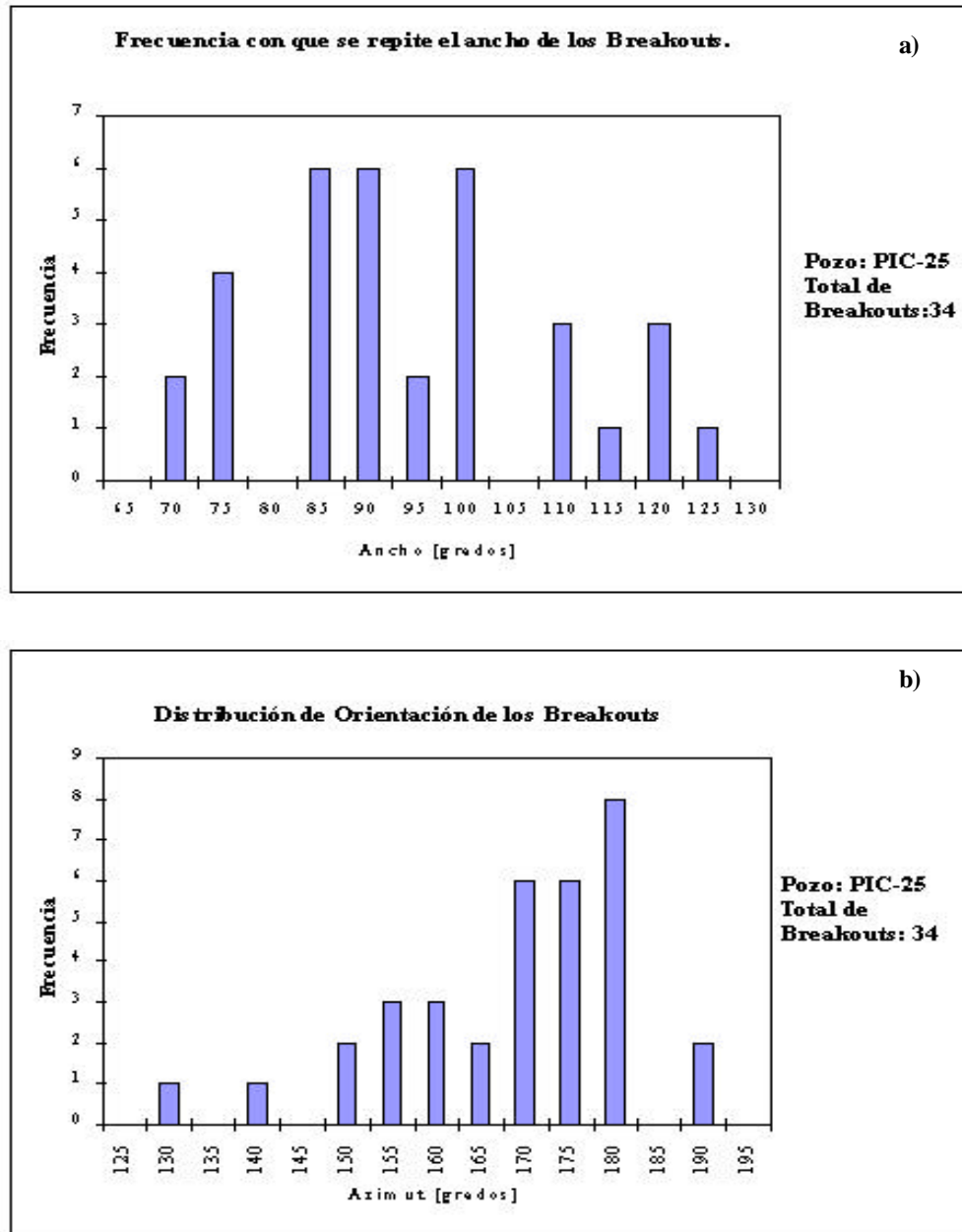


Fig. 6.7: a) Frecuencia de repetición del ancho de los *breakouts*; b) Frecuencia de repetición de la orientación de los *breakouts*.

En la tabla 6.9 se muestra una clasificación, de acuerdo a la litología, de los *breakouts* que representan por sus características a los 34 eventos que fueron en total interpretados, y que serán los utilizados para la determinación de $S_{Hmáx}$.

Tabla 6.9: Información de los *breakouts* del pozo PIC-25, considerados para la determinación del esfuerzo horizontal máximo.

Parámetro	<i>Breakouts en Lutitas</i>		<i>Breakouts en Arenas</i>	
	1	2	1	2
MD [pies]	19894	21031	20048	20183
TVD [pies]	19769	20774	19895	20026
Incli. [grados]	27,11	29,95	25,5	25,62
Azim [grados]	151,61	119,5	148,27	145,61
WBO[grados]	125 ± 5	120 ± 5	85 ± 5	95 ± 5
σ_v [psi/pie]	0,977	0,98	0,977	0,977
MW [lpg]	12,7	13	12,7	13
V_{SHALE} [%]	80	65	10	30
Pp [psi/pie]	0,64	0,64	0,54	0,54
Azim $S_{Hmín}$	166	178	166	172

En la sección del perfil de imágenes del PIC-25 que se muestra en la figura 6.8 se puede observar uno de los *breakouts* que fue interpretado y utilizado para éste análisis. De igual forma, en el lado izquierdo de dicha figura se muestra el registro

gamma ray, en donde se puede observar claramente que el “*breakout*” se encuentra en una formación lutítica.

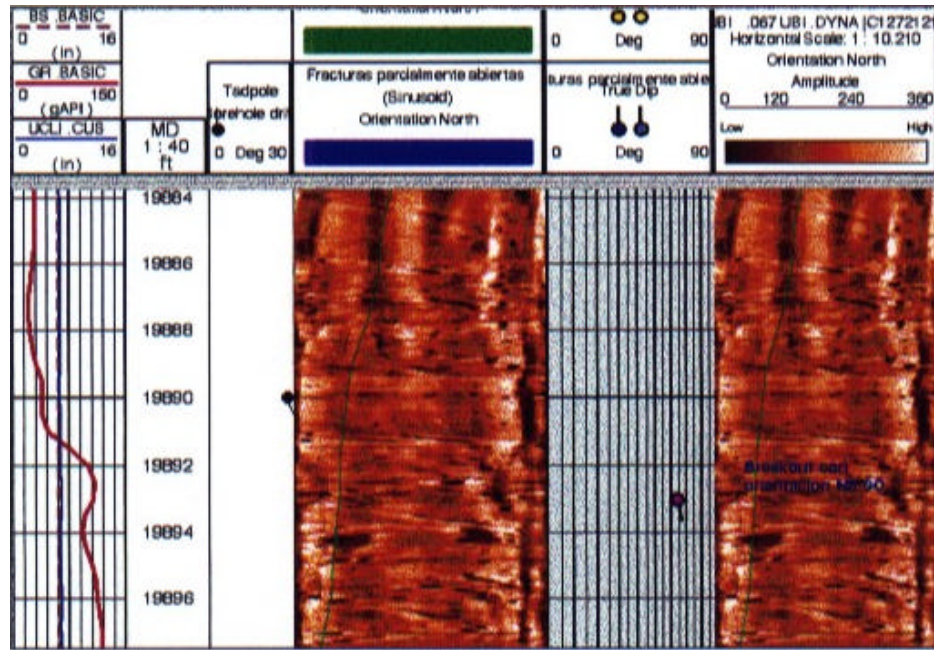


Fig. 6.8: Sección del registro de imágenes del pozo PIC-25 (Schlumberger, 2000).

La presión de poro estimada para el intervalo de interés fue obtenida con el software PREDICT a partir de valores conocidos del ensayo RFT. Los valores obtenidos corresponden a un gradiente de aproximadamente 0.64 psi/pie para las lutitas y de 0,54 psi/pie para las arenas.

Para el caso de “*breakouts*” localizados en formaciones arcillosas, el análisis fue realizado, en cada uno de los casos, para un ángulo de fricción de 30° y UCS de 10000 psi; y un ángulo de fricción de 35° y UCS de 12000 psi. Por su parte, para los casos de los *breakouts* localizados en arenas se utilizó un ángulo de fricción de 40° y UCS de 13000 psi, y un ángulo de fricción de 45° y UCS de 15000 psi. Los altos valores de UCS utilizados para el análisis de *breakouts* en lutitas están sustentados mediante un análisis probabilístico de estabilidad de hoyo para un pozo de alto ángulo del campo Santa Bárbara (ver apéndice B).

El estimado de la sobrecarga se obtiene al igual que la presión de poro con el software PREDICT, de la integración del registro de densidad de un intervalo del pozo, tal y como se muestra en la figura 6.9.

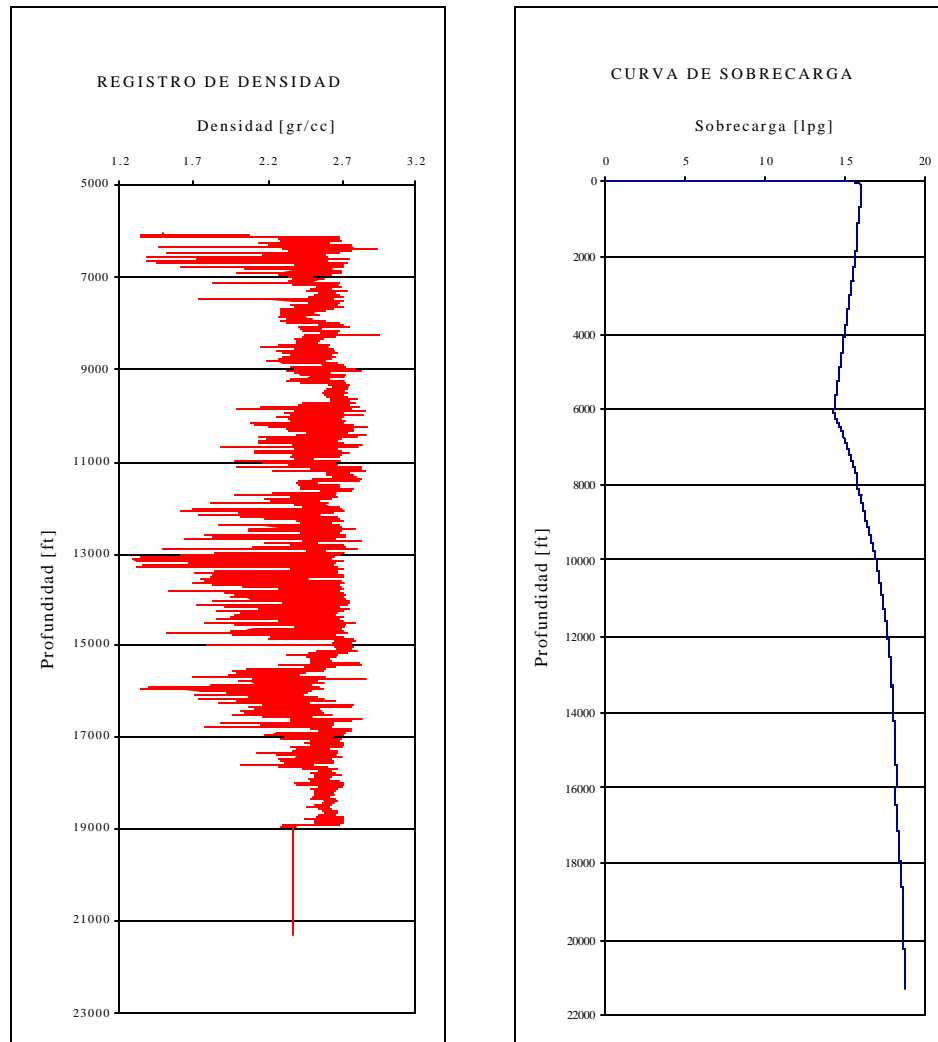


Fig. 6.9: Registro de densidad para un intervalo de la profundidad del pozo PIC-25 y valores de sobrecarga calculados con el PREDICT.

A continuación se muestran de forma gráfica los resultados del análisis realizado para cada uno de los *breakouts* cuyas características se señalaron en la tabla 6.9. En las figuras se pueden observar el rango de valores de esfuerzo horizontal máximo en función del esfuerzo horizontal mínimo obtenidos para los valores de ángulo de fricción y resistencia que se mencionaron anteriormente.

6.2.1 Breakouts en Lutitas:

6.2.1.1 Caso # 1:

Para las condiciones que fueron descritas anteriormente, los resultados obtenidos del análisis del *breakout* localizado a la profundidad (MD) de 19894 pies son mostrados en la figura 6.10.

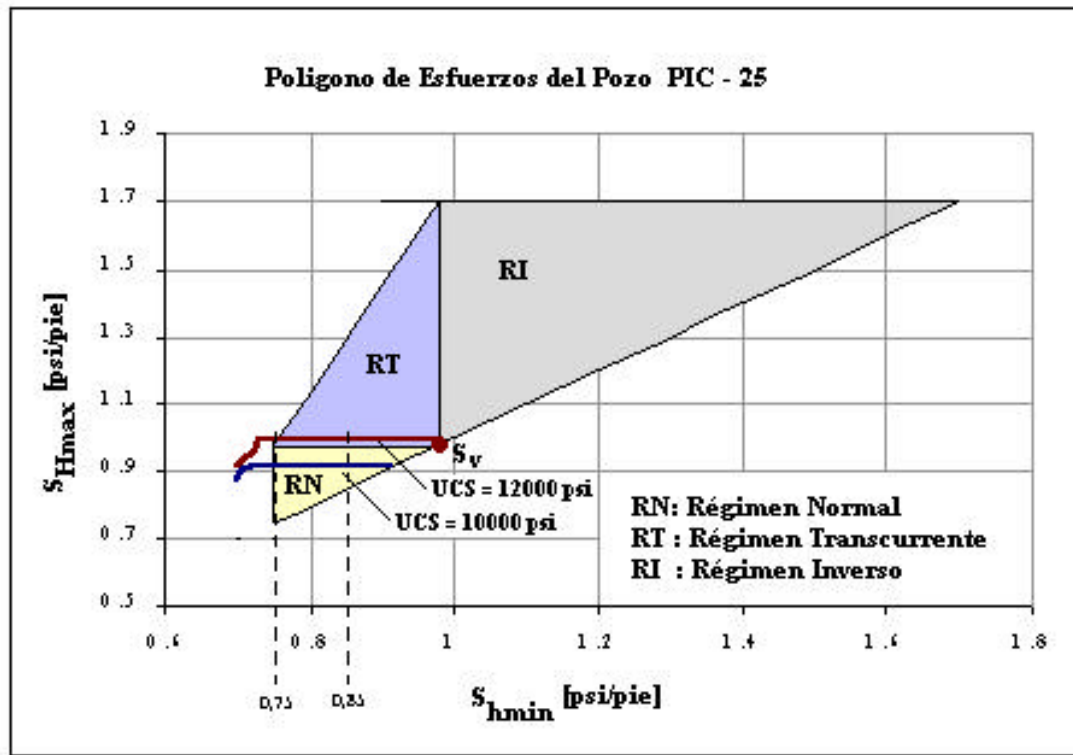


Fig. 6.10: Polígono de esfuerzos para el caso # 1 de “breakouts” en lutitas del PIC-25.

Se aprecia una diferencia notable, en la gráfica, entre las curvas que definen la resistencia de la roca, observándose como era de esperarse que las magnitudes obtenidas de esfuerzo horizontal máximo son mayores a medida que la resistencia de la roca es mayor, y también si el ángulo de fricción interna del material es más grande.

6.2.1.2 Caso # 2:

Los resultados obtenidos de éste análisis en el que, en comparación con el caso anterior, el ancho promedio de *breakout* es menor y el peso de lodo es mayor, son mostrados en la figura 6.11.

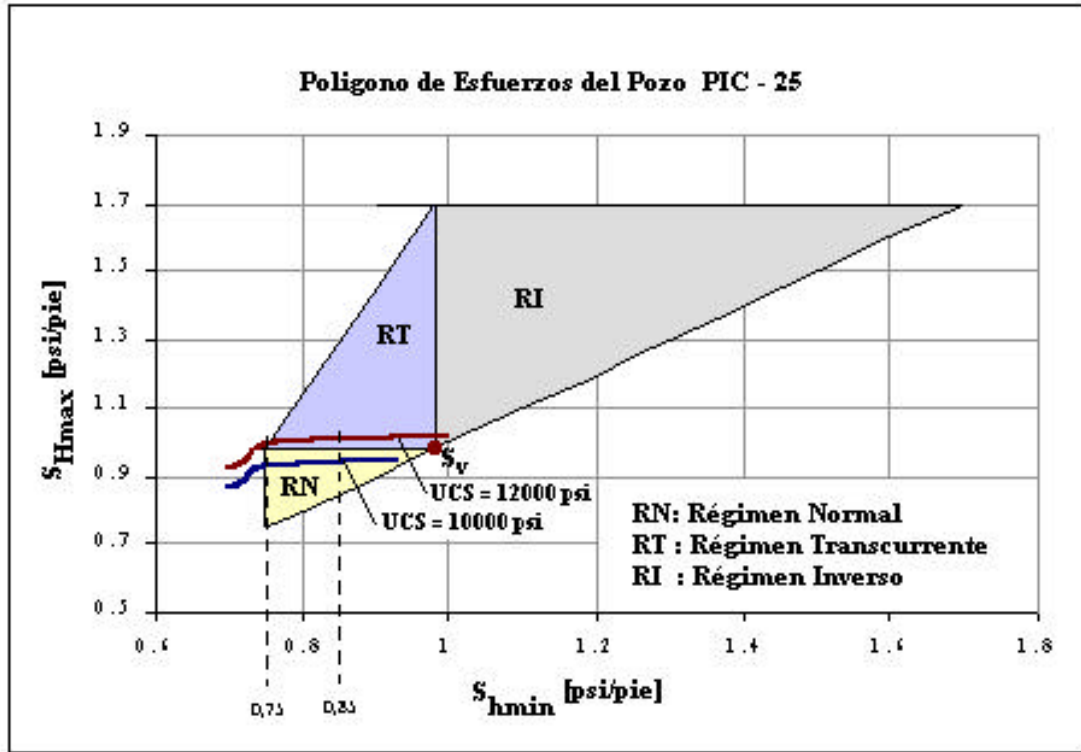


Fig. 6.11: Polígono de esfuerzos para el caso # 2 de “breakouts” en lutitas del PIC-25.

Se puede observar que los rangos de magnitud de esfuerzo horizontal máximo obtenidos en el caso # 2 son bastante similares a los obtenidos en el caso # 1. Con respecto a esto, existen dos puntos importantes que se deben tratar: en primer lugar al ser el peso de lodo en el segundo caso más alto que en el primero, es de esperarse que la magnitud del esfuerzo horizontal máximo sea mayor; y en segundo lugar, con un ancho de *breakout* menor en el segundo caso las magnitudes de esfuerzo horizontal

máximo deben ser menores. La combinación de estas dos condiciones puede resultar en la similitud que existe entre los rangos obtenidos para ambos casos.

6.2.2 Breakouts en Arenas:

6.2.2.1 Caso # 1:

Las principales diferencias observadas entre los *breakouts* localizados en arenas y los localizados en lutitas son que en las arenas los *breakouts* formados tienen un ancho menor que los formados en lutitas y además es conocido que por lo general las propiedades mecánicas de las arenas son mayores que las de las lutitas. Los resultados obtenidos para el primer caso estudiado de *breakouts* formados en arenas, son mostrados en las gráficas de la figura 6.12.

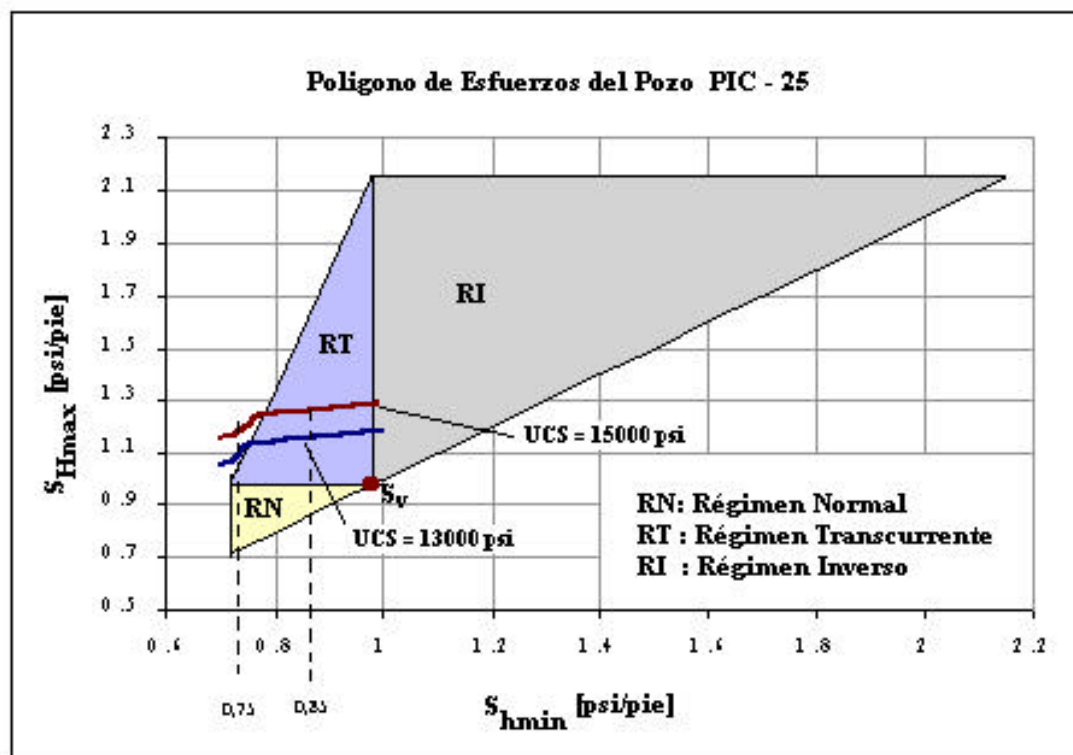


Fig. 6.12: Polígono de esfuerzos para el caso # 1 de "breakouts" en arenas del PIC-25.

6.2.2.2 Caso # 2:

La figura 6.13 muestra los resultados obtenidos del análisis realizado a partir de las condiciones del caso # 2 de *breakouts* formados en arenas. La diferencia entre este segundo caso y el primero es que en éste el promedio del ancho de los *breakouts* observados es menor que en el caso anterior y además el peso de lodo es mayor. De acuerdo a esto, la situación que se presenta es similar a la observada entre los casos analizados de “*breakouts*” en lutitas.

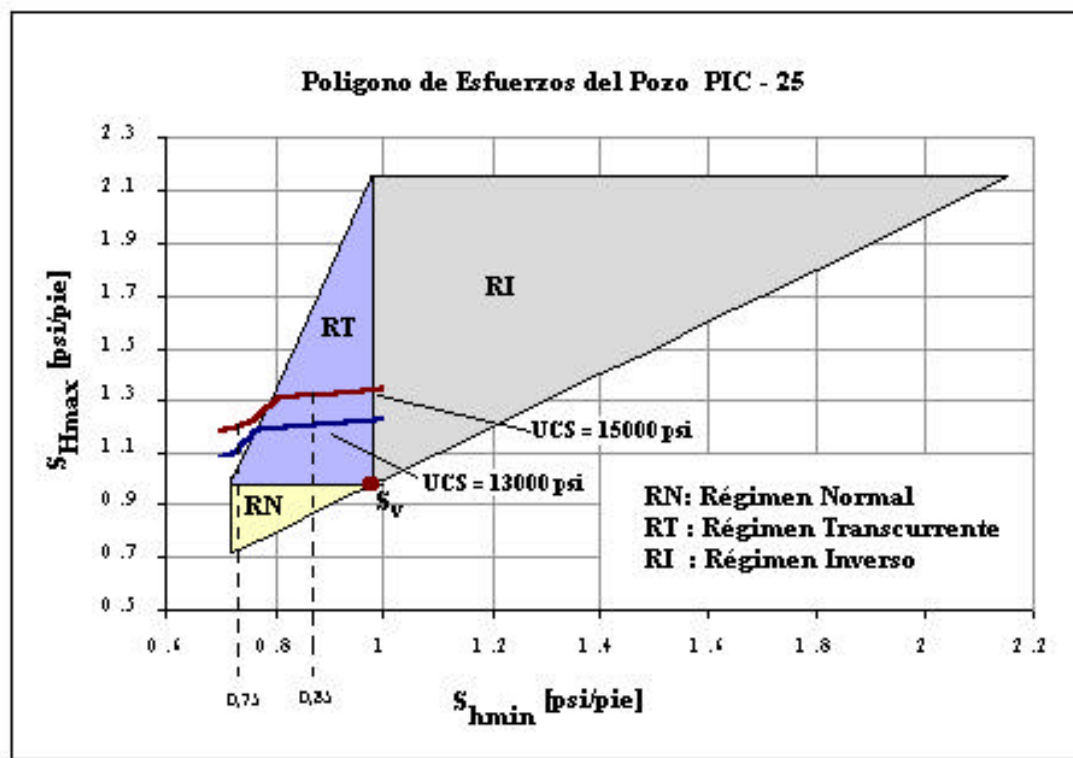


Fig. 6.13: Polígono de esfuerzos para el caso # 2 de “*breakouts*” en arenas del PIC-25.

6.2.3 Fracturas Inducidas en Arenas:

En el intervalo comprendido entre 19400 pies y 19530 pies del perfil de imágenes se observan, de acuerdo al registro *gamma ray*, intercalaciones de lutitas y arenas (arenas con cierto contenido de arcillas), encontrándose en las arenas posibles zonas de fracturas inducidas. Las fracturas inducidas son evidencias de falla por tracción en la pared del pozo y también pueden ser utilizadas para acotar la magnitud de $S_{Hmáx}$.

En la figura 6.14 se observa un intervalo del perfil de imágenes en el que se localizaron las fracturas inducidas que serán la herramienta para el siguiente análisis. Igualmente, en el lado izquierdo de la figura se observa el registro *gamma ray* de una parte del intervalo en el que se encontraron estas fracturas inducidas, con el cual se puede notar claramente que en los intervalos donde se produjeron las fracturas los valores del *gamma ray* son bajos en comparación con los intervalos en los que no se observan fracturas. Es decir, estas fracturas inducidas se generaron en materiales más arenosos y su propagación se limitó al cruzar rocas más arcillosas.

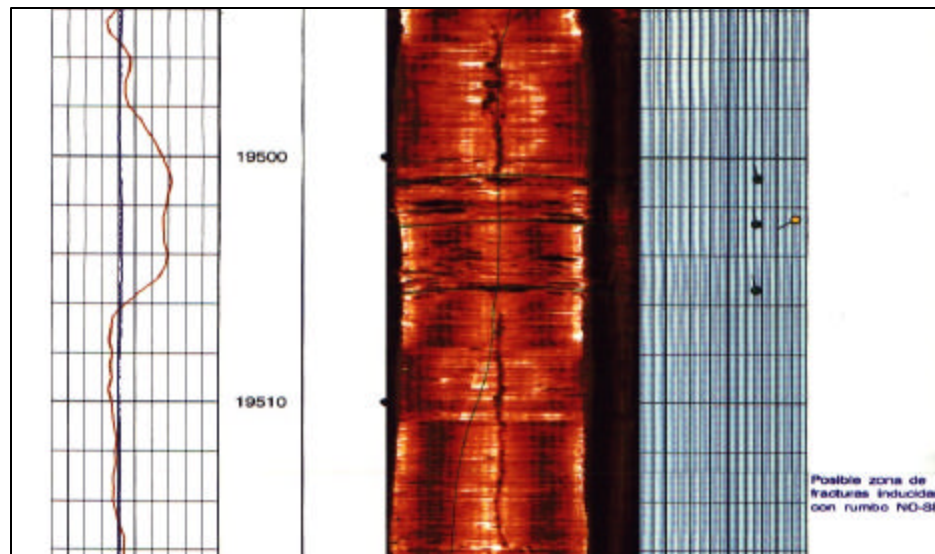


Fig. 6.14: Zona de fracturas inducidas del PIC-25 (Schlumberger, 2000).

La formación de las fracturas inducidas coincide con la orientación del esfuerzo horizontal máximo, es decir, perpendicular a la orientación de los *breakouts*, lo cual es de esperarse según la teoría. La presión de “*breakdown*” o presión requerida para iniciar una fractura hidráulica puede ser calculada con la siguiente ecuación (teoría de elasticidad), para un pozo vertical considerando condición de deformación plana:

$$P_{bd} = 3 \cdot \mathbf{s}_h - \mathbf{s}_H + T - P_p \quad [\text{Ec. 6.12}]$$

donde:

P_{bd} : Presión de *breakdown* o de iniciación de la fractura.

P_p : Presión de poro.

T : Resistencia a la tracción del material.

En este caso la presión de “*breakdown*” es igual al valor más alto de peso de lodo registrado en el tiempo en el que se perforó el intervalo en el que se encuentran las fracturas, o posterior a éste, es decir, el valor de peso de lodo más alto registrado después de haber perforado el intervalo de interés es de 12.9 lpg, lo cual equivale a una presión ejercida por el lodo de perforación de aproximadamente 13.500 psi.

$$P_{bd} = P_w \quad [\text{Ec. 6.13}]$$

La resistencia a la tracción de la roca puede ser tomada de ensayos de laboratorio, pero al igual que para el caso de la resistencia a la compresión no confinada se tiene incertidumbre en la magnitud de esta propiedad. Debido a esto se tomará un estimado dado por la siguiente relación:

$$T = \frac{UCS}{12} \quad [\text{Ec. 6.14}]$$

El valor de UCS utilizado para este análisis es de 13.000 psi ya que, como se dijo anteriormente, las fracturas son observadas en formaciones de arenas. Por su parte el valor estimado para la presión de poro, de la misma forma como se explicó para los análisis de *breakouts* realizados anteriormente, es de aproximadamente 15.000 psi en este intervalo, el cual se encuentra en la formación Carapita (arenas presurizadas), dando un gradiente de 0.78 psi/pie.

El resultado obtenido del esfuerzo horizontal máximo por medio de este método está dado al igual que en los casos anteriores en función del esfuerzo horizontal mínimo. Esto es mostrado en la gráfica de la figura 6.15.

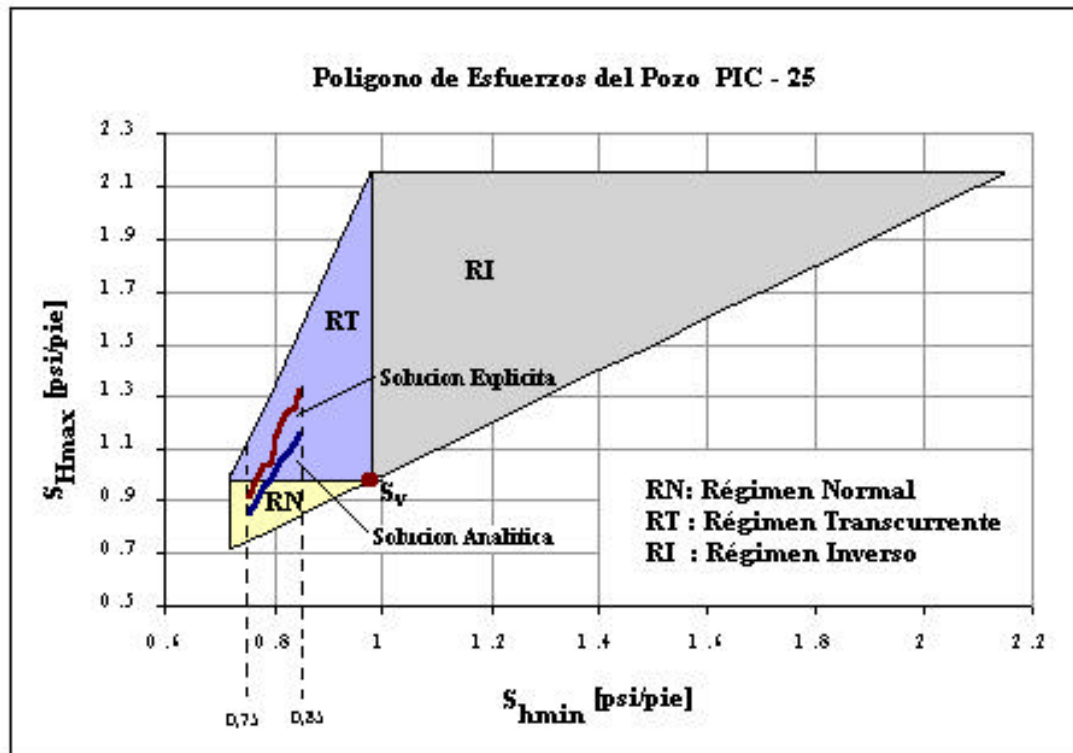


Figura 6.15: Polígono de esfuerzos a partir del análisis de fracturas inducidas en el pozo PIC-25.

Es importante señalar que el análisis realizado con la ecuación explícita (ec. 6.12) para las fracturas observadas en el registro de imágenes no toma en cuenta

la inclinación del hoyo. Sin embargo, en la siguiente tabla se muestra una comparación entre los valores obtenidos por esta ecuación y los calculados por el programa. El programa realizado se adapta al cálculo de $S_{Hm\acute{a}x}$ siguiendo el mismo procedimiento descrito en el capítulo IV, pero en lugar de evaluar el criterio de falla de Mohr-Coulomb, se debe cumplir que el esfuerzo principal menor efectivo sea mayor que la resistencia a la tracción de la roca en la orientación donde se visualiza en el registro de imágenes la fractura inducida.

Tabla 6.10: Valores de $S_{Hm\acute{a}x}$ obtenidos por ecuación explícita (hoyo vertical) y por la solución analítica (hoyo inclinado).

$S_{hm\acute{m}in}$ [psi/pie]	$S_{Hm\acute{a}x}$ [psi/pie]	
	Ecuación explícita (Hoyo vertical)	Solución analítica (Hoyo inclinado)
0,75	0,86	0,91
0,77	0,92	1,0
0,79	0,975	1,05
0,81	1,035	1,147
0,83	1,095	1,244
0,85	1,155	1,32

Por otra parte se puede observar en las gráficas como la magnitud del esfuerzo horizontal máximo es mayor en los casos en los que se analizan *breakouts* en arenas en comparación con los casos en los que se analizan los *breakouts* localizados en lutitas. Esto se debe a que, a pesar de ser los *breakouts* observados en formaciones arenosas de un ancho menor, las propiedades mecánicas estimadas para esta formación son mayores que las estimadas para las lutitas. En el apéndice A se puede observar como la influencia, más que todo del ángulo de fricción, aumenta un poco cuando éste parámetro toma valores más altos.

Los resultados obtenidos de los análisis realizados son mostrados en la tabla 6.11, de donde se puede determinar un intervalo para la magnitud del esfuerzo horizontal máximo, con la combinación de todo el conjunto de valores encontrados.

Tabla 6.11: Valores de $S_{Hmáx}$ obtenidos de los análisis realizados en el pozo PIC-25

Evento		S_H [psi/pie]
Lutitas	<i>Breakout-Caso # 1</i>	0,915 - 1
	<i>Breakout-Caso # 2</i>	0,92 - 1
Arenas	<i>Breakout-Caso # 1</i>	1,13 - 1,26
	<i>Breakout-Caso # 2</i>	1,15 - 1,32
	Fractura	0,91 - 1,32

Un intervalo global de los resultados obtenidos está dado por los valores de 0,91 y 1,32 psi/pie. Estos resultados pueden ser mejor acotados si se tienen un mayor conocimiento de las propiedades mecánicas de la formación.

De acuerdo a éste intervalo, se estaría hablando de un régimen de esfuerzos normal si la magnitud estimada para el esfuerzo horizontal máximo se encuentra entre 0,91 y 0,98 psi/pie, o de un régimen transcurrente si el esfuerzo horizontal máximo toma valores entre 0,98 y 1.32 psi/pie.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló una metodología para la determinación del esfuerzo horizontal máximo a partir de fallas observadas en la pared del hoyo a través de registros de imágenes de pozos.
- Los esfuerzos *in-situ* y los parámetros de resistencia de la roca son determinados bajo una base experimental de laboratorio y de campo, por lo que una buena estimación de estos parámetros es de vital importancia para la determinación del esfuerzo horizontal máximo y para la evaluación de la estabilidad mecánica del hoyo. Estudios de sensibilidad indican que la variación de cada uno de los parámetros tiene un efecto diferente en la aplicación del método para la determinación de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo; siendo la resistencia de la roca, el ángulo de fricción, la presión de poro y la combinación de la magnitud de los esfuerzos *in-situ* los parámetros que tienen un mayor efecto, mientras que la influencia de la variación de la relación de Poisson y el azimut del hoyo es prácticamente despreciable.
- La determinación del esfuerzo horizontal máximo permite conocer completamente el campo de esfuerzos, lo cual es importante para el análisis de trayectoria de pozos cercanos, diseño de fracturas hidráulicas en operaciones de estimulación, determinación del *draw-down* crítico para evaluar las tendencias del pozo en la producción de arenas y la evaluación de problemas de estabilidad de hoyo como los *breakouts*, fracturas inducidas, colapsamiento, selección de ventana operacional de peso de lodo, etc.
- Se observó la presencia consistente de *breakouts* en formaciones arenosas y formaciones con gran contenido de arcillosa (lutitas). Los *breakouts* observados en lutitas presentan un ancho mayor a los observados en arenas. Estas observaciones han permitido acotar el valor de $S_{Hm\acute{a}x}$ entre 0,91 psi/pie y 1,32 psi/pie. Esto indica que

estamos ante un régimen normal o un régimen transcurrente. Este último estado de esfuerzos es el más probable por el ambiente tectónico compresivo del área.

- El modelo y programa computacional implementado permite calcular $S_{Hmáx}$ en pozos de cualquier inclinación y orientación utilizando elasticidad lineal y criterio de falla de Mohr-Coulomb. También es posible utilizarlo para calcular peso de lodo crítico y gradiente de fractura, incluyendo análisis probabilístico del cual resulta, no un valor determinístico, sino un intervalo de confianza en el resultado de peso de lodo arrojado. Este es un resultado que ayuda en la toma de decisiones sobre el peso de lodo ya que incluye un nivel de riesgo asociado al mismo.

RECOMENDACIONES

Realizar una base de datos con las propiedades mecánicas de las diferentes formaciones del área del oriente de Venezuela, y recopilar toda la información de campo disponible y necesaria para poder realizar éste análisis. De esta forma, se podrá construir un mapa de magnitudes de esfuerzos para la zona, que en conjunto con el mapa de orientación de esfuerzos son de valiosa utilidad para posteriores análisis de estabilidad de hoyo.










Continuar este trabajo, planteando el mismo análisis pero con modelos que describan mejor el comportamiento de la roca, por ejemplo, un modelo poroelástico o elasto-plástico. Se debe tener en cuenta que los modelos que describen mejor el comportamiento de la roca, por ser más completos, necesitan una mayor cantidad de datos de laboratorio.











Utilizar otros criterios de falla tales como Druker-Prager y Lade Modificado y realizar comparaciones con el de Mohr-Coulomb. Aunque ya se tiene conocimiento de que el criterio de Mohr-Coulomb es el más conservador, sería interesante observar la diferencia entre los resultados.









Tomar en cuenta, para posteriores estudios, un análisis que incluya los efectos de la temperatura y los efectos químicos.









Utilizar el método probabilístico para el análisis de $S_{Hmáx}$ incluyendo no solo el valor promedio de ancho de *breakout* sino la distribución de ancho de *breakout* observado en el pozo. Esto permitirá tener un valor de confiabilidad de la magnitud de $S_{Hmáx}$ obtenida.

REFERENCIAS



-  Aadnov, B.; Rogaland, U. y Chenevert, M. (1987). "Stability of Highly Inclined Boreholes". SPE/IADC Drilling Conference. New Orleans, LA. SPE 16052.
-  Abass, H. y Neda, J. (1998). "Rock Mechanics in Wellbore Construction". Petroleum Well Construction. John Wiley & Sons. Inglaterra. pp 143-173.
-  Addis, T.; Boulter, D.; Roca, L. y Plumb, D. (1993). "The Quest for Borehole Stability in the Cusiana Field, Colombia". Oilfield Review. Abril-Julio 1993.
-  Altun, G.; Langlinais, J. y Bourgoyne, A. (1999). "Application of a New Model to Analyze Leakoff Tests". SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas. SPE 56761.
-  AMOCO. (1996). "Wellbore Stability". Drilling Handbook.
-  Anderson, E.M. (1951). "The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain (second edition): Edimburg, Oliver and Boyd, 206 pp.
-  Berger, P. y Williams, L. (1993). "Improved Formation Evaluation and Borehole Stability of Ovalized Wellbores". SPE Asia Pacific Oil & Exhibition. Singapore. SPE 25322.
-  Bloch, M.; Siquiera, C.; Ferreira, F. y Conceicao, J. (1997). "Techniques for Determining In-Situ Stress Direction and Magnitudes". Fifth Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition. Rio de Janeiro, Brazil. SPE 39075.
-  Boada, E. (1996). "Estudio de Ovalización de Hoyos en Área Norte de Monagas". Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Caracas, Venezuela.

-  Bourgoyne, A.; Millheim, K.; Chenevert, M. y Young, F. (1986), "Applied Drilling Engineering". SPE Foundation.
-  Brudy, M., Zoback, M.D. (1997). "Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drillholes", *J. Geophys. Res.*, 102, 18453-18475.
-  Byerlee, J., (1978). "Friction of rocks". *Pure and Applied Geophysics*, 116, 615-626.
-  Chenevert, M.E. (1965), "Mechanical Anisotropies of Laminated Sedimentary Rocks". SPE 890.
-  Fjaer, E.; Holt, R.; Horsrud, P.; Raaen, A. y Risnes R. (1992). *Petroleum Related Rock Mechanics*. Elsevier Science Publishers. 331 p.
-  Gazaniol, D.; Forsans, T.; Boisson, M. J. F.; Piau, J-M. (1995) "Wellbore Failure Mechanisms in Shales: Prediction and Prevention". *JPT*, 47(7): 589-595.
-  Gjonnes, M.; Cruz, A.; Horsrud, P. y Holt, R. (1998). "Leak-off tests for horizontal stress determination?". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 20, pp. 63-71.
-  Gough, D., Bell, J. (1981). "Stress orientations from borehole wall fractures with examples from Colorado, east Texas, and northern Canada", *Can. J. Earth Sci.*, vol. 19, 1358-1370.
-  Guenot, A. (1989). "Borehole Breakouts and Stress Fields".
-  Haimson, B. y Herrick, C. (1986). "Borehole breakouts – a new tool for estimating in situ stress?". *International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements*.

-  Haimson, B. y Herrick, C. (1985). "In situ stress evaluation from borehole breakouts. Experimental studies". 26th US Symposium on Rock Mechanics.
-  Jaeger, J.C., Cook, N., (1979). "Fundamentals of rock mechanics", 3rd edition, Chapman and Hill, New York, 593 pp.
-  Lal, M. (1999). "Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength". SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Caracas, Venezuela. SPE 54356.
-  Lawrence, T. (1985). "Insights into the relationship between wellbore breakouts, natural fractures, and in situ stress". 26th US Symposium on Rock Mechanics.
-  Mastin, L. (1988). "Effect of Borehole Deviation on Breakout Orientations". Journal Geophysical Research. Agosto. pp 9187-9195.
-  Maury, V.; Sauzay, J. (1987). "Borehole Instability: Case Histories, Rock Mechanics Approach, and Results". SPE/IADC Drilling Conference. New Orleans, LA. SPE 16051.
-  McLean, M.y Addis, M. (1990). "Wellbore Stability: The Effect of Strength Criteria on Mud Weight Recommendations". 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. New Orleans, LA. SPE 20405.
-  Moos, D. y Zoback, M. (1990). "Utilization of Observations of Wellbore Failure to Constrain the Orientation and Magnitude of Crustal Stresses: Application to Continental, Deep Sea Drilling Project, and Ocean Drilling Program Boreholes". Journal of Geophysical Research. Junio. Vol 95, N° B6, pp. 9305-9325.

-  Ottesen, S. y Kwakwa, K. (1991). "A Multidisciplinary Approach to In-Situ Stress Determination and Its Application to Wellbore Stability Analysis". SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam. SPE 21915.
-  Ramiro, J. y Alejano, L. (2000). "New Safe Mud Weight Window Representations to Prevent Wellbore Instability". IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology. Malaysia. SPE 62800.
-  Steiger Ronald, Leung Peter. (1992) "Cuantitative Determination of the mechanical properties of shales". SPE Drilling Engineering, September. 181-185
-  Tan, C.; Rahman, S.; Chen, X.; Choi, S. y Wu, B. (1998). "Wellbore Stability Analysis and Guidelines for Efficient Shale Instability Management". IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia. SPE 47795.
-  Vásquez, A. y Sánchez, M. (1999). Introducción a la Geomecánica Petrolera. V.V.A. Consultores, C.A. Tercera edición. Caracas, Venezuela.
-  Willson, S.; Last, N.; Zoback, M. y Moos, D. (1999). "Drilling in South America: A Wellbore Stability Approach for Complex Geologic Conditions". SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Caracas, Venezuela. SPE 53940.
-  Wiprut, D. y Zoback, M. (2000). "Constraining the stress tensor in the Visund field, Norwegian North Sea: Application to Wellbore Stability and Sand Production". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Octubre. pp 317-336.
-  Zoback, M.; Mastin, L. y Barton, C. (1986). "In situ stress measurements in deep boreholes using hydraulic fracturing, wellbore breakouts, and stoneyly

wave polarization”. International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements.

-  Zoback, M.; Moos, D. y Mastin, L. (1985). “Well Bore Breakouts and in Situ Stress”. Journal Geophysical Research. Junio. Vol. 90, N° B7, pp. 5523-5530.
-  Zoback, M. y Vernik, L. (1992). “Estimation of Maximun Horizontal Principal Stress Magnitude From Stress-Induced Well Bore Breakouts in the Cajon Pass Scientific Research Borehole”. Journal Geophysical Research. Abril. Vol. 97, N° B4, pp. 5109-5119.

GLOSARIO

ANGULO DE DESVIACIÓN: En la perforación direccional, es el ángulo indicado en grados hacia el cual se desvía el pozo desde la vertical, por medio de uniones curvas u otras herramientas de control.

ANISOTROPÍA: Es la variación de la respuesta elástica de un material independientemente de la dirección que se tome en el mismo para una configuración de esfuerzos dada.

AZIMUT: Es el ángulo medido en sentido de las agujas del reloj desde el norte magnético de la Tierra.

BUZAMIENTO: Manera de describir y orientar un plano en el espacio. Por definición el rumbo y la dirección del buzamiento están en ángulo recto con respecto a ambos.

COLAPSO: Representa las condiciones de falla por corte, y es a través de este que se establece el peso de lodo mínimo necesario para mantener la integridad del hoyo.

DEFORMACIÓN: Cambio en la configuración original o volumen de las masas rocosas, producido por la aplicación de una fuerza.

ESFUERZO: Campo de fuerzas actuantes sobre un material. El esfuerzo es un tensor con tres direcciones principales y ortogonales entre si, ubicado en un sistema tridimensional de coordenadas.

ESFUERZO CORTANTE: Componente de esfuerzo que actúa paralelo a la dirección de un plano real o imaginario dentro de un cuerpo.

ESFUERZO NORMAL: Componente de esfuerzo que actúa perpendicular a un plano real dado o imaginario dentro de un cuerpo.

FALLA: Una grieta en los estratos del subsuelo. Muchas veces los estratos de un lado de la línea de falla se han desplazado (hacia arriba, hacia abajo o lateralmente) con relación a sus posiciones originales.

FALLA DE BUZAMIENTO: Tipo de falla cuya dirección es paralela al buzamiento de los estratos implicados.

FALLA DEXTRAL: Falla de rumbo en la cual un observador que se acerque a la misma verá un bloque opuesto desplazado hacia la derecha.

FALLA INVERSA: Falla de bajo ángulo (menos de 45° de inclinación) a lo largo de la que el bloque levantado se ha movido encima en relación con el bloque hundido. También conocida como falla de desplazamiento inverso.

FALLA NORMAL: Falla cuyo plano presenta comúnmente una inclinación de 45° y 90° en la cual el bloque hundido parece haberse desplazado en forma descendente respecto al levantado.

FALLA TRANSCURRENTE: Una falla de desplazamiento en dirección caracterizada por una superficie inclinada abrupta.

FORMACIÓN: Unidad geológica fundamental de la clasificación litográfica, integrada por capas o depósitos, con características semejantes y de la misma edad.

FRACTURA: Representa las condiciones de falla por tensión y por medio de este se establece el peso máximo del fluido, donde cualquier valor superior provocaría la fractura de la formación.

FRACTURACIÓN DE LA FORMACIÓN: Método de aplicar presión hidráulica a una formación de yacimiento para provocar la apertura de grietas en la roca que hay que fracturar. Se utiliza como un método de estimulación para incrementar la producción.

GEOMECAÁNICA: es la disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas de formación.

NÚCLEOS GEOLÓGICOS: La toma de núcleo consiste en la remoción mecánica de material de formación de un pozo con el menor grado de perturbación posible

PERFILES DE POZO: Designación general por la cual se conocen gráficos y curvas que registran temperatura, presión, saturación, volumen, sonido, profundidad, resistividad, etc., en estudios y trabajos de yacimientos y de petrofísica.

PLANOS PRINCIPALES: Son los tres planos mutuamente perpendiculares en cualquier punto de un cuerpo a lo largo del cual no hay esfuerzos de corte, solamente esfuerzos normales.

PRESIÓN DE CONFINAMIENTO: Es la presión lateral a la que está sometida la roca.

PRESIÓN DE PORO: Presión debida a la presión del fluido del yacimiento.

PROFUNDIDAD MD: *Measured Depth*, es la profundidad medida a lo largo del eje del hoyo, es decir, para pozos inclinados u horizontales, la profundidad MD va a ser mayor que la profundidad TVD.

PROFUNDIDAD TVD: *True Vertical Depth*, es la profundidad real medida verticalmente al punto de estudio.

REVESTIDOR: Tubería colocada en un pozo para evitar que se derrumbe el hoyo mientras se continúa con la perforación. Es un componente muy importante para mantener la estabilidad del hoyo, controlar las presiones del pozo y evitar el flujo de fluidos del pozo hacia la formación.

REVOQUE: Es aquella masa o costra que se forma al endurecer el fluido de perforación.

RIPIOS: Son los “desperdicios” de rocas que provienen del material removido de la formación durante la perforación del hoyo, y que son llevados a la superficie por el fluido de perforación. Pueden ser objeto de análisis o construirse en muestra para identificar la columna geológica.

SARTA: Es el nombre que se le da al conjunto de la mecha de perforación y la tubería que va conectada a esta.

APÉNDICE A

ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES.

El análisis de sensibilidad de la estabilidad de hoyo envuelve una gran cantidad de variables. Generalmente, se realizan sensibilidades debido a que el valor exacto de cada una de las variables consideradas por el modelo que se esté utilizando son desconocidas. Por esta razón, en muchos casos cuando se está modelando la estabilidad de un hoyo, la única vía disponible es considerar intervalos de posibles valores para cada una de las variables.

Lo importante es que no todas las variables tienen el mismo efecto en el modelo. Esto cambia el nivel de incertidumbre del resultado dependiendo de las variables de entrada de las cuales no se tiene conocimiento

Para llevar a cabo un análisis de sensibilidad se debe, como primer paso, establecer un intervalo de valores para cada una de las variables que van a ser estudiadas o de las cuales se tiene incertidumbre. Este intervalo de valores puede ser establecido con la información de campo disponible o con valores seleccionados de algunas publicaciones.

Por otro lado, el programa no realiza los cálculos para un perfil de profundidades, es decir, las simulaciones son realizadas a una profundidad específica. Por esta razón, algunos de los parámetros son dependientes de la profundidad, tales como el esfuerzo de sobrecarga, los esfuerzos horizontales y la presión de poro.

La forma más sencilla de realizar el análisis de sensibilidad planteado es presentar los resultados en una gráfica de peso de lodo en función del ángulo de inclinación del pozo (hoyo vertical, inclinación = 0° ; hoyo horizontal, inclinación = 90°). La razón de esto es que el efecto de algunas de las variables puede ser diferente dependiendo de la inclinación del hoyo y por otro lado, el peso de lodo es la única variable mecánica que puede ser controlada en las aplicaciones en

campo para prevenir el colapso o fracturamiento del hoyo. El análisis que aquí se presenta incluye únicamente falla por compresión.

Con el propósito de llevar a cabo este análisis es necesario, como se dijo anteriormente, establecer tanto la profundidad de estudio como el intervalo de cada uno de las variables que forman parte del modelo. Igualmente, es importante fijar el valor base o más probable para cada parámetro debido a que las sensibilidades son realizadas para cada variable por separado tomando el resto de ellas su valor base o de referencia.

En la tabla A.1 está recopilada la información del intervalo de valores de cada una de las variables que forman parte del análisis de sensibilidad que se está describiendo.

Tabla A.1: Información utilizada en el análisis de sensibilidades.

Parámetro	Intervalo	Valor Base
Poisson	0,15 - 0,25	0,2
Azimut [grados]	0 - 180	0
Presión Poro [psi/pie]	0,4 - 0,6	0,5
σ_v [psi/pie]	0,9 - 1,1	1,0
σ_H [psi/pie]	0,5 - 1.1	0,9
σ_h [psi/pie]	0,5 - 1,0	0,8
Ang. Fricción [grados]	20 - 40	30
Cohesión [psi]	0 - 5000	2000

Presión de Poro:

Los resultados del análisis variando la presión de poros son mostrados en la figura A.1. Los valores utilizados para esta variable son 6000 psi, 7500 psi y 9000 psi.

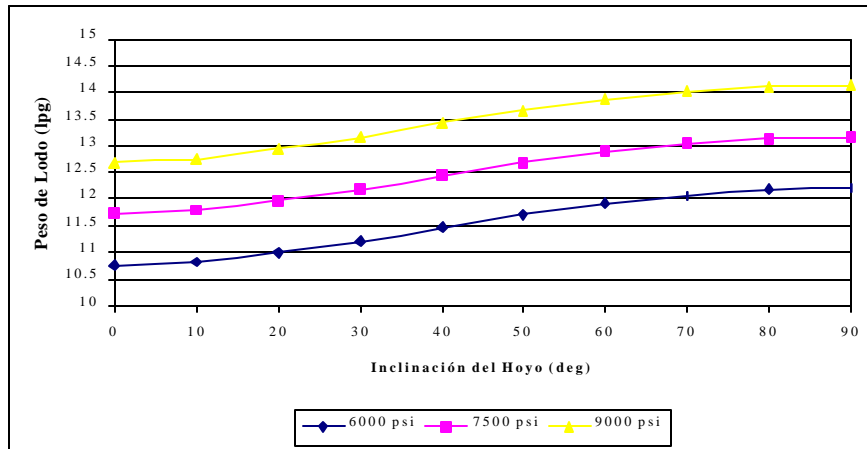


Figura A.1: Análisis de falla por compresión variando la presión de poro.

En la figura anterior se observa como incrementa la presión del hoyo ejercida por el peso de lodo para evitar el colapso a medida que aumenta la presión de poro.

La presión de poro, la cual actúa como un esfuerzo de tensión en la roca, afecta los esfuerzos efectivos y la resistencia de la roca. Mientras el esfuerzo de sobrecarga permanezca constante, a medida que incrementa la presión de poro se reducirán los esfuerzos efectivos. También se puede notar de la gráfica que el modelo es muy sensible a las variaciones en la presión de poro.

Cohesión:

En la figura A.2 se observan los resultados del análisis tomando valores de cohesión del material de 1500 psi, 2500 psi y 3500 psi.

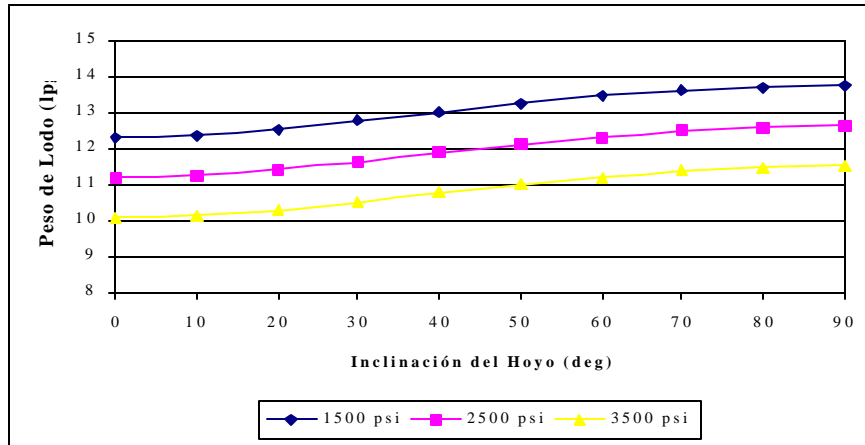


Figura A.2: Análisis de falla por compresión variando la cohesión.

La gráfica muestra que la presión del hoyo requerida para prevenir el colapso disminuye a medida que incrementa la cohesión. La cohesión es una propiedad del material que controla la resistencia de la roca bajo los efectos de esfuerzos de compresión.

Se puede notar que el modelo es muy sensible a la cohesión cuando se realiza un análisis de falla por compresión.

Ángulo de Fricción:

Los resultados del análisis de la variación del ángulo de fricción son mostrados en la figura A.3. El ángulo de fricción tomó los valores 20°, 30° y 40°. Como ya se conoce, el ángulo de fricción es usado en la ecuación de Mohr-Coulomb para determinar la envolvente de falla de dicho criterio. Por esta razón no tendría sentido, al igual que en el caso de la cohesión, hablar de sensibilidad variando este parámetro para un análisis de fracturamiento.

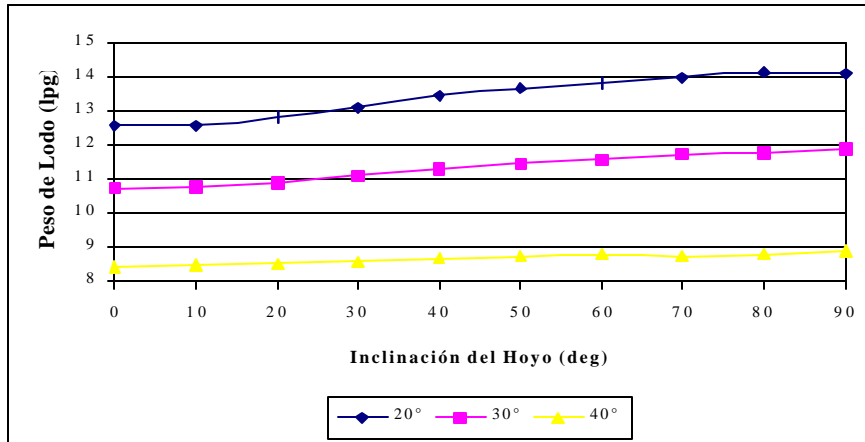


Figura A.3: Análisis de falla por compresión variando el ángulo de fricción.

A medida que se incrementa el ángulo de fricción también incrementa el esfuerzo de corte límite de falla calculado usando la ecuación de Mohr-Coulomb. Por lo tanto, el peso de lodo requerido para prevenir el colapso del hoyo disminuye, tal y como se muestra en la gráfica anterior.

Se puede considerar que al igual que la cohesión, el ángulo de fricción tiene una influencia considerable en los resultados arrojados por el modelo.

Relación de Poisson:

Los valores tomados por la relación de Poisson para el análisis de sensibilidad planteado fueron 0.15, 0.20 y 0.25. Los resultados son mostrados en la figura A.4. La relación de Poisson es usada por el modelo en el cálculo de la distribución de esfuerzos alrededor del hoyo, basado en la deformación de la roca.

En la gráfica se puede observar que la influencia de la relación de Poisson en los resultados arrojados por el modelo es prácticamente despreciable, induciendo a pensar que no tendría ningún riesgo tomar un valor estimado razonable para este parámetro en el caso de que se tenga incertidumbre de éste.

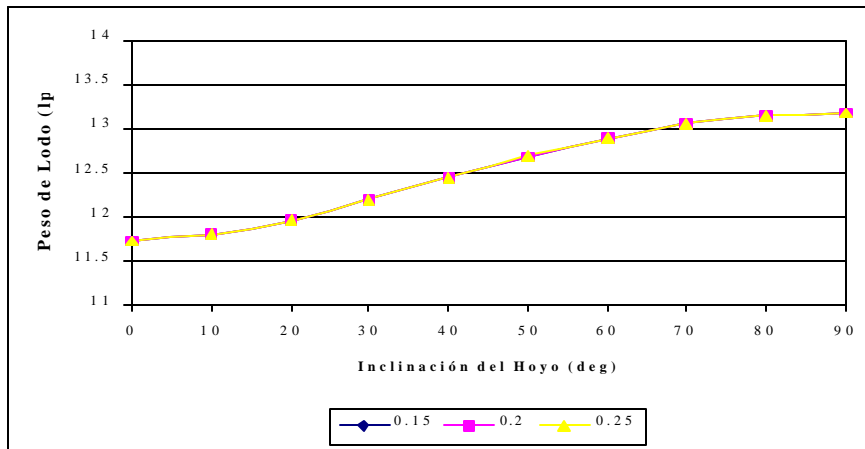


Figura A.4: Análisis de falla por compresión variando la relación de Poisson.

Azimut:

Primero es importante recordar que el valor de azimut que toma el modelo es la diferencia entre la orientación del esfuerzo horizontal máximo y la orientación del hoyo, ambas medidas en sentido horario a partir del norte geográfico. Este ángulo es utilizado en el cálculo de las componentes de esfuerzos correspondientes al sistema de coordenadas que se define en el hoyo.

Los resultados del análisis, obtenidos de la variación de este ángulo azimutal son mostrados en la figura A.5. Los valores usados para esta variable 0° , 45° y 90° . De estos tres valores, el tomado como referencia para el resto de los análisis es 0° , asumiendo con esto que el hoyo estaría orientado en la misma dirección que el esfuerzo horizontal máximo.

La figura muestra que el modelo es muy poco sensitivo a las variaciones de este ángulo. Sin embargo, este resultado puede estar afectado por los valores seleccionados para los esfuerzos horizontales.

El efecto de este ángulo depende además del ángulo de inclinación del hoyo, por lo tanto, la sensitividad del modelo a este ángulo variará dependiendo de la diferencia entre los esfuerzos horizontales mínimo y máximo.

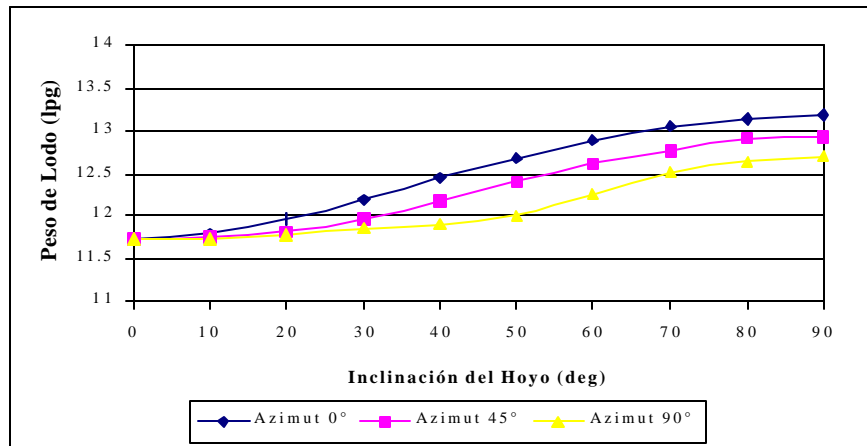


Figura A.5: Análisis de falla por compresión variando el azimut.

Esfuerzo de Sobrecarga:

En la figura A.6 se muestran los resultados del análisis variando el esfuerzo debido a la sobrecarga. Los valores usados fueron 13500 psi, 15000 psi y 16500 psi. El esfuerzo de sobrecarga es uno de los esfuerzos *in-situ* considerado por el modelo en el cálculo de la distribución de esfuerzos alrededor del hoyo.

La gráfica muestra que la presión del hoyo requerida para prevenir el colapso incrementa a medida que incrementa el esfuerzo de sobrecarga. Igualmente, se observa que la sensibilidad del modelo al esfuerzo de sobrecarga es variable y dependiente de la inclinación del pozo, teniendo un nivel mínimo de sensibilidad cuando el hoyo es vertical e incrementándose a medida que se incrementa el ángulo de inclinación.

En la representación gráfica mostrada en la figura A.6 se observa que el resultado obtenido para un esfuerzo de sobrecarga de 13500 psi es una línea recta, es decir, un valor constante. La particularidad de esto es que en este caso el esfuerzo de sobrecarga tiene el mismo valor que el dado al esfuerzo horizontal máximo.

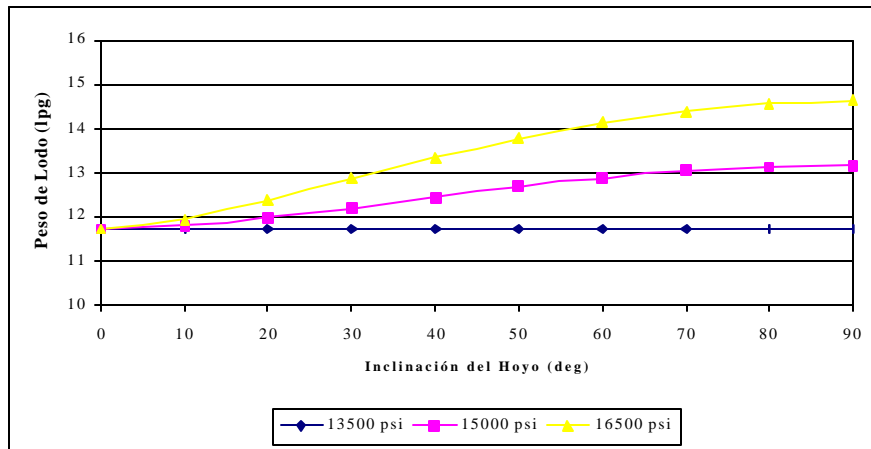


Figura A.6: Análisis de falla por compresión variando el esfuerzo de sobrecarga.

Esfuerzos Horizontales:

Para este análisis de variaciones de los esfuerzos horizontales *in-situ*, la sobrecarga es considerada como el máximo esfuerzo *in-situ*, aunque en algunas situaciones el esfuerzo horizontal máximo puede exceder la sobrecarga. Aquí se plantean tres casos: una primera situación en el que se considera que los tres esfuerzos tienen diferente magnitud entre ellos, siendo el mayor como se dijo anteriormente el esfuerzo de sobrecarga; una segunda situación en la que se considera que la magnitud del esfuerzo horizontal máximo es igual a la magnitud del esfuerzo de sobrecarga; y una tercera situación en la que se asume isotropía de los esfuerzos horizontales.

El esfuerzo de sobrecarga, para los tres casos, tomo el valor 15000 psi, mientras que el esfuerzo horizontal máximo en el primer caso fue 13500 psi, en el segundo caso fue igual al esfuerzo de sobrecarga y en el tercer caso igual al valor del esfuerzo horizontal mínimo. Por su parte, el esfuerzo horizontal mínimo para el primer y último caso fue de 12000 psi, mientras que para el segundo caso fue de 13500 psi.

Cada uno de los casos analizados tuvo un efecto diferente en el resultado obtenido, como se puede observar en la figura A.7. Se nota en la gráfica que el efecto

de cada caso no sólo depende de los valores que toman los esfuerzos sino también del ángulo de inclinación del hoyo y del azimut de éste.

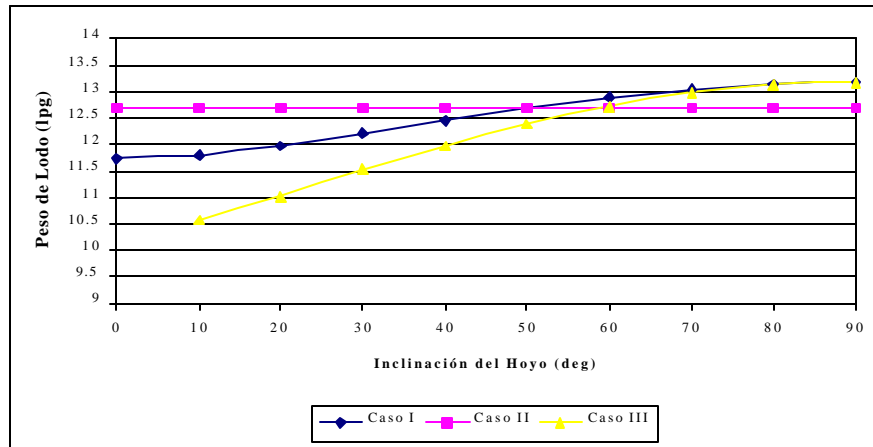


Figura A.7: Análisis de falla por compresión variando los esfuerzos *in-situ*.

Para el primer y el segundo caso se observa de manera general que el peso de lodo para evitar el colapso debe ser mayor a medida que se incrementa el ángulo de inclinación del hoyo. Por otro lado, la curva representativa del segundo caso muestra un comportamiento opuesto al observado en los otros casos, siendo el resultado un valor constante de peso de lodo para cualquier ángulo de inclinación del hoyo.

APÉNDICE B

ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE ESTABILIDAD DE HOYO PARA EL POZO ALTO ÁNGULO DE SANTA BÁRBARA.

ANTECEDENTES.

La construcción del pozo de alto ángulo de Santa Bárbara, SBC-127, presentó diversos problemas durante la perforación, incluyendo dos pegas que finalmente condujeron a la realización de un *sidetrack*. La formación Nar-2, mayormente compuesta por lutitas, quedó sin el revestimiento planificado, quedando expuesta tanto en el hoyo original como en el *sidetrack*.

Para minimizar el daño de la formación en las arenas productoras se planteó la posibilidad de bajar el peso de lodo a un valor alrededor 11.4 lpg durante la perforación, lo cual puede comprometer la estabilidad de las lutitas de Nar -2.

Se había realizado un análisis de estabilidad de hoyo preliminar para este pozo [Sorrentino, 2000], contando con información limitada: a) esfuerzo principal mayor estimado de minifrac alejados del área, y cuyos resultados además son afectados por diversos factores como temperatura. b) Presión de poro estimada a partir de registros eléctricos, ya que no existen mediciones directas que permitan tener este parámetro con alta confiabilidad; c) Resistencia de la lutita se estimó según correlaciones núcleo-perfil, calibrando únicamente con la información que se disponía de la arena medida en laboratorio.

Los resultados de este estudio indicaron un peso de lodo necesario para disminuir el colapso del hoyo para la formación Nar-2 de 13.4 lpg, estimado para una presión de poro de 8400 psi y una profundidad (TVD) de 15482 pies. El *caliper* del pozo SBC-97 indicó efectivamente que este peso conduce a un hoyo perfecto sin ningún tipo de derrumbe pero posiblemente es demasiado conservador.

Ante la evidente incertidumbre en la información disponible se propuso un análisis de estabilidad de hoyo probabilístico.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE HOYO PROBABILÍSTICO.

Para el análisis probabilístico se utilizó el método de Montecarlo multivariable y un modelo sencillo de elasticidad lineal imponiendo un criterio de falla de Mohr-Coulomb, el cual es el utilizado en el presente trabajo especial de grado. En este análisis se consideró una distribución triangular para los valores de los diferentes parámetros de entrada, sobre los cuales se tenía incertidumbre. En la rutina de Montecarlo [Gedler, 2001] se considera el valor más probable del parámetro del cual se tiene incertidumbre (moda) y dos valores extremos (uno mínimo y uno máximo).

1.- Parámetros de entrada.

La distribución de valores para los diferentes parámetros se estimó en base a la experiencia, datos de áreas vecinas y utilizando los resultados de ensayos de laboratorio realizados en lutitas del PIC -25 [Bermúdez, 2001]. Estos resultados corresponden a la formación Carapita encontrada a una profundidad media de 19300 pies. En la tabla A.1 se muestra el intervalo y el valor más probable de ocurrencia para cada uno de los parámetros de los cuales se tiene incertidumbre.

Tabla A.1: Intervalo de los parámetros que presentan incertidumbre

Parámetro	Intervalo	Moda
S_v [psi/pie]	0,9 – 1,07	1,0
S_{Hmax} [psi/pie]	0,8 – 1,0	0,92
S_{hmin} [psi/pie]	0,71 – 0,83	0,8
UCS [psi]	8000 - 12000	10500
ϕ [grados]	20 - 30	25
Pporo [psi]	7000 - 8500	8000

2.- Simulaciones y Resultados

Las simulaciones fueron realizadas para la formación Nar-2 (en la cual se presentó el problema), con una inclinación del hoyo de 73° y un azimut de 250° . Para el cálculo de la ventana operacional se permitió un ángulo total de breakout de 90° . Esto implica que se está admitiendo que la cuarta parte de la pared del hoyo esté en condiciones de falla, tal como se esquematiza en la Figura A.1.

Para definir mejor la ventana de distribución de parámetros se utilizó la información del pozo SBC-97, el cual es cercano al SBC-127, tiene similar azimut y es vertical en la sección que se atravesó NAR 2. Se calibraron los resultados del análisis probabilístico para que reprodujera que con un peso de 13.6-13.7 lpg la confiabilidad fuese de 100% (que fue lo observado en el *caliper* de este pozo).

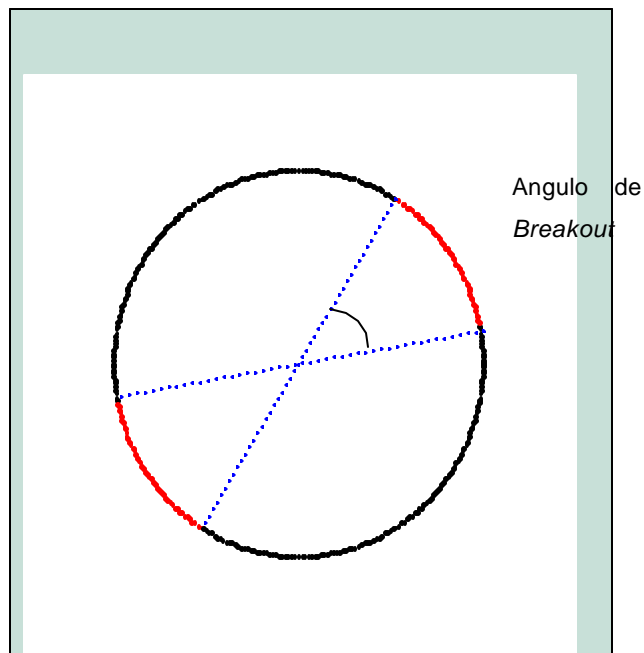


Fig. A.1: Ángulo total de *breakout* en el hoyo de 90° [Marcano, 2001]

Adicionalmente, se usó la experiencia obtenida por el pozo SBC-127, el cual se perforó en esta zona con un peso de lodo de 12.0 lpg sin aparentes problemas de estabilidad de hoyo, como lo indican los reportes de perforación, en los cuales no se

evidencia presencia de ripsos que indiquen falla del hoyo. Sin embargo, no se puede asegurar que cuando se perforó el hoyo con un peso de lodo de 12.0 lpg no se presentaron problemas ya que no se dispone de un registro *caliper* para determinar la calidad del hoyo.

Los resultados de las simulaciones realizadas se presentan en la Fig. A.2 y la Tabla A.2, donde se obtuvo una probabilidad de éxito de 34% aproximadamente, para un peso de lodo de 11.4 lpg.

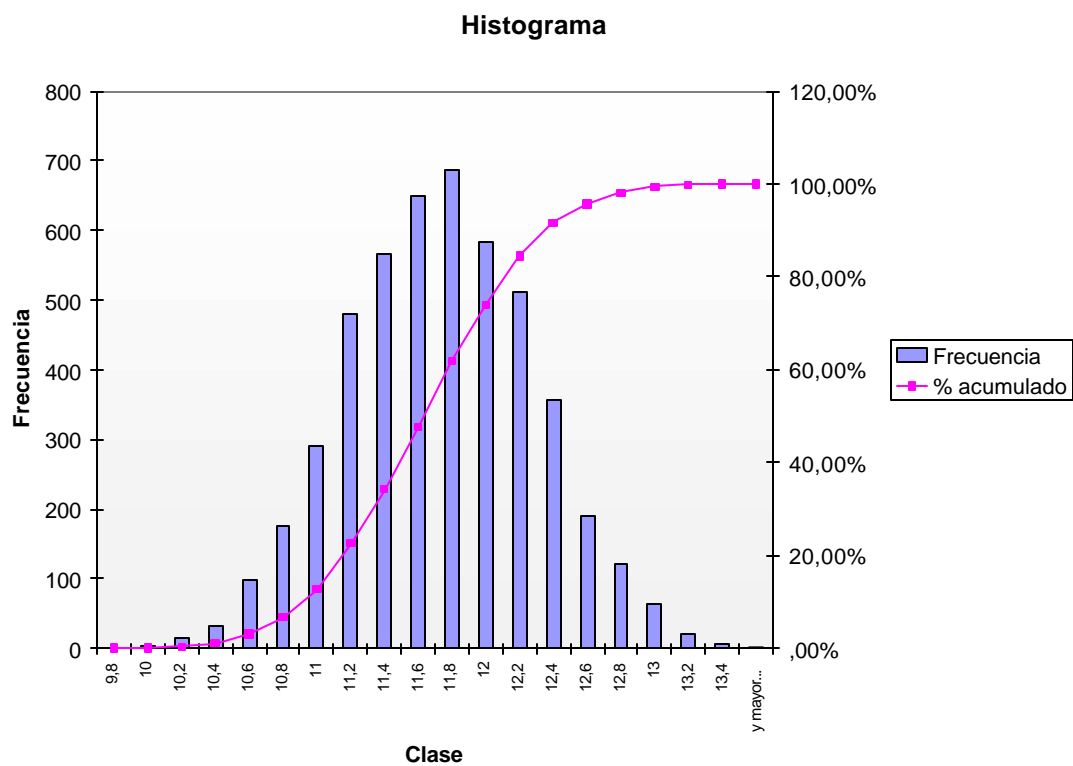


Fig. A.2. Histograma de frecuencia y frecuencia acumulada para peso de lodo crítico para disminuir colapso de hoyo. [Marcano, 2001]

Tabla A2. Frecuencia y porcentaje acumulada para los pesos de lodo crítico para disminuir el colapso de hoyo.[Marcano, 2001]

<i>Clase MW (PPG)</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>
9,8	0	,00%
10	3	,06%
10,2	16	,39%
10,4	33	1,07%
10,6	97	3,07%
10,8	177	6,72%
11	291	12,72%
11,2	480	22,62%
11,4	565	34,27%
11,6	650	47,67%
11,8	687	61,84%
12	582	73,84%
12,2	510	84,35%
12,4	356	91,69%
12,6	189	95,59%
12,8	122	98,10%
13	63	99,40%
13,2	21	99,84%
13,4	7	99,98%

y mayor...	1	100,00%
σ_v	0.9-1.0-1.07	
σ_H	0.8-0.92-1	
σ_h	0.71-0.8-0.83	
UCS	8000-10500-12000	
Angulo de Fricción	20-25-30	
Presión de poro	7000-8000-8500	

Conclusiones y Recomendaciones.

El estudio realizado indica que la probabilidad de éxito utilizando pesos de lodo tan bajos como 11.4 lpg, considerando los aspectos geomecánicos solamente, es muy baja. Otros aspectos a considerar son los asociados a los problemas operacionales: vibraciones, hidráulica, limpieza de hoyo.

No es posible calibrar mejor el modelo utilizado ya que no se tiene evidencia de la integridad del hoyo mediante al menos un *caliper* sencillo y además es necesario reducir la incertidumbre en dos parámetros claves: resistencia de la lutita y esfuerzo principal mayor. Para ello recomendamos realizar un estudio de las lutitas del Nar-2, utilizando muestras de pared, preservadas adecuadamente, en el futuro un núcleo preservado de 30 pies en Nar-2, toma de presiones mediante RFT y correr registro de imágenes o al menos un *caliper* orientado de 4 brazos.

Es muy importante analizar los ripios o recortes que salen del pozo para determinar mecanismos de falla de la roca. En el caso de la lutita de Carapita analizada en el PIC-25 [Bermúdez, 2001] se determinó una influencia determinante de este aspecto en la falla de la roca y habría que analizar si esta es la misma

situación para las lutitas de Nar-2. Si este es el mecanismo de falla predominante, esto se puede considerar para optimizar la orientación del pozo no solo por esfuerzos sino también por el tipo de falla existente.

Referencias

1. Sorrentino, Yelitza y Clarembaux, Juan Carlos. Reporte INT-7820,2000
2. Gedler, Gustavo Comunicación personal. Julio, 2001
3. Bermúdez. Raúl. Desarrollo de una metodología para la preparación de muestras de lutitas de la formación Carapita para ensayos de resistencia en el sistema MTS y análisis de la influencia de lodos de perforación en la resistencia mecánica de estas rocas. Tesis de grado presentada a la Universidad Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional. Para optar al título de Ingeniero Mecánico. Pto. Cabello, Abril de 2001.

ANEXO # 1

REGISTRO DE TRAYECTORIA

POZO : SBC-90

INCLI [grad]	AZIM [grad]	MD [pie]	TVD [pie]
0.00	0.00	0	0
1.49	308.84	500	500
7.68	238.85	3810	3799
2.88	238.02	6589	6565
1.78	148.71	6811	6787
10.36	173.34	8411	8377
11.33	174.86	8505	8469
12.88	177.08	8599	8561
12.80	177.40	8646	8607
12.10	177.10	8740	8699
11.80	175.90	8835	8792
7.90	174.50	9117	9070
5.50	169.70	9400	9351
0.60	138.30	10340	10289
5.00	10.80	11407	11355
7.00	24.20	13456	13392
7.50	36.20	14114	14045
8.30	40.40	14584	14511
9.30	48.10	15337	15255
10.20	62.50	16185	16091
10.00	62.00	17180	17070

ANEXO # 3

PDVSA
POZO PIC-25
REGISTRO DE PERFORACION

MD [pies]	INCLIN	AZIMUT	TVD [pies]
129	0.12	241.98	129
216	0.14	164.07	216
303	0.09	111.69	303
393	0.14	172.84	393
482	0.05	205.46	482
577	0.03	243.54	577
671	0.14	147.68	671
766	0.23	82.12	766
861	0.5	75.36	861
955	0.37	63.63	954.99
1050	0.62	70.98	1049.99
1145	0.76	75.86	1144.98
1239	0.68	87.27	1238.98
1334	0.44	109.01	1333.97
1429	0.33	86.02	1428.97
1523	0.4	52.26	1522.97
1618	0.43	75.31	1617.97
1713	0.52	65.51	1712.96
1807	0.3	31	1806.96
1902	0.69	42.06	1901.96
1997	0.55	33.08	1996.95
2091	0.66	46.22	2090.95
2186	0.72	34.74	2185.94
2281	0.66	21.72	2280.93
2375	0.58	3.27	2374.93
2470	0.48	349.57	2469.92
2564	0.33	350.42	2563.92
2659	0.49	331.69	2658.92
2754	0.4	273.51	2753.91
2848	0.55	291.97	2847.91
2943	0.46	288.73	2942.91
3038	0.54	329.82	3037.9
3132	0.62	294.67	3131.9
3227	0.21	301.93	3226.9
3322	0.38	1.61	3321.9
3416	0.38	35.32	3415.89
3511	0.26	52.92	3510.89
3606	0.15	264.95	3605.89
3700	0.41	268.77	3699.89
3795	0.2	294.25	3794.89
3890	0.12	84.06	3889.89
3984	0.22	110.4	3983.89
4079	0.92	100.41	4078.88

4174	1.02	95.4	4173.87
4268	1.44	87.21	4267.85
4363	1.43	91.71	4362.82
4458	1.4	97.32	4457.79
4552	1.63	113.52	4551.76
4647	1.61	114.28	4646.72
4742	1.82	111.23	4741.68
4836	1.52	102.62	4835.64
4931	1.21	106.32	4930.61
5026	0.97	112.35	5025.59
5120	0.82	134.14	5119.58
5215	0.89	121.01	5214.57
5310	0.92	113.58	5309.56
5404	0.98	133.01	5403.55
5499	0.58	133.46	5498.54
5593	0.31	56.7	5592.54
5688	0.27	67.6	5687.53
5783	0.28	32.14	5782.53
5877	0.41	76.22	5876.53
5972	0.19	64.81	5971.53
6067	0.75	5.43	6066.53
6129	1.14	0.41	6128.52
6182	1.39	344.66	6181.51
6277	1.45	6.52	6276.48
6371	1.7	359.95	6370.44
6466	1.83	353.75	6465.4
6560	1.97	352.82	6559.34
6655	1.81	1.61	6654.29
6749	2.55	337.89	6748.23
6844	2.81	329.96	6843.12
6939	3	326.19	6938
7033	2.95	327.01	7031.87
7128	2.75	328.69	7126.76
7222	3.07	320.92	7220.64
7317	2.78	311.8	7315.51
7411	2.23	293.75	7409.42
7443	2.12	299.17	7441.4
7491	2.19	291.74	7489.37
7586	2.18	289.31	7584.3
7681	2.07	279.34	7679.23
7775	1.85	285.05	7773.18
7870	1.52	289.11	7868.14
7965	1.36	289.26	7963.11
8060	1.62	323.7	8058.08
8154	1.07	305.22	8152.05
8249	0.86	261.81	8247.04
8344	0.24	255.38	8342.03
8439	1.56	206.57	8437.02
8533	2.56	218.3	8530.96
8628	2.79	226.84	8625.86
8723	2.39	234.4	8720.76

8767	2.06	243.24	8764.73
8819	1.66	241.64	8816.7
8913	0.83	220.3	8910.68
9008	0.59	206	9005.67
9103	0.64	155.34	9100.66
9197	0.15	182.05	9194.66
9292	0.11	16.77	9289.66
9387	0.43	358.51	9384.66
9481	0.54	356.99	9478.66
9576	0.63	13.85	9573.65
9671	0.76	5.84	9668.64
9765	0.76	10.17	9762.64
9846	0.79	13.46	9843.63
9964	1.18	14.17	9961.61
10058	1.09	0.17	10055.59
10153	1.24	348.57	10150.57
10248	1.21	349.55	10245.55
10342	1.06	344.81	10339.53
10437	1.06	349.47	10434.52
10532	0.87	345.57	10529.5
10626	1.14	336.27	10623.49
10721	1.68	334.59	10718.46
10746	1.43	333.21	10743.45
10793	1.4	329.32	10790.44
10887	1.33	327.81	10884.41
10982	1.28	324.53	10979.38
11076	1.26	319.48	11073.36
11159	1.34	319.61	11156.34
11202	1.32	319.33	11199.33
11297	1.36	320.08	11294.3
11392	1.35	320.37	11389.28
11486	1.33	320.28	11483.25
11581	1.39	316.86	11578.22
11675	1.27	312.89	11672.2
11770	1.28	309.73	11767.18
11865	1.2	307.91	11862.15
11959	1.2	303.03	11956.13
12054	1.1	295.66	12051.11
12148	1.15	295.55	12145.09
12243	1.25	292.92	12240.07
12338	1.22	291.86	12335.05
12432	1.15	289.05	12429.03
12526	1.21	290.43	12523.01
12621	1.23	287.2	12617.99
12715	1.39	281.78	12711.97
12809	1.48	281.39	12805.94
12903	1.57	280.37	12899.9
12998	1.77	274.03	12994.86
13092	1.86	268.21	13088.82
13186	2.16	266.47	13182.76
13281	2.1	263.9	13277.69

13375	2.31	255.68	13371.62
13469	2.42	252.9	13465.54
13564	2.65	256.01	13560.45
13658	2.83	261.47	13654.34
13745	3.09	261.5	13741.23
13846	3.26	260.08	13842.07
13941	3.37	261.49	13936.91
14023	3.31	263.61	14018.77
14090	3.65	260.15	14085.65
14184	4.15	260.8	14179.43
14278	3.68	264.73	14273.21
14372	2.93	263.42	14367.06
14466	2.69	267.85	14460.94
14560	2.61	265.01	14554.84
14677	1.93	262.66	14671.75
14772	1.85	271.31	14766.7
14868	1.93	265.62	14862.65
14963	1.89	260.8	14957.59
15346	1.57	241.38	15340.42
15441	1.68	227.98	15435.38
15537	1.75	222.57	15531.34
15728	1.54	200.37	15722.26
15823	1.52	190.43	15817.23
16730	1.79	188.93	16723.85
16825	1.37	202.17	16818.82
16953	0.78	183.11	16946.79
17017	0.74	224.69	17010.79
17112	1.37	261.04	17105.77
17208	1.87	260.28	17201.73
17303	3.31	282.99	17296.64
17399	3.38	278.55	17392.47
17495	4.45	281.67	17488.25
17558	4.4	275.57	17551.06
17625	3.45	227.73	17617.92
17721	3.6	221.07	17713.74
17817	4.26	204.27	17809.51
17912	4.99	193.04	17904.21
18008	5.79	180.58	17999.78
18103	5.88	171.45	18094.29
18199	7.55	163.02	18189.63
18295	9.67	162.67	18284.55
18390	11.04	160.31	18378
18486	11.9	160.31	18472.08
18581	12.66	159.65	18564.91
18677	12.53	156.16	18658.6
18773	13.68	154.29	18752.1
18868	14.53	155.11	18844.23
18964	16.99	155.43	18936.61
19059	20.24	153.6	19026.63
19155	25.18	154.94	19115.16
19233	26.87	156.85	19185.25

19328	28.24	156.84	19269.48
19423	29.44	158.13	19352.69
19518	29.69	159.66	19435.33
19613	29.66	157.71	19517.87
19708	28.01	155.47	19601.09
19803	27.87	154.6	19685.02
19898	27.11	151.61	19769.29
19993	25.81	152.3	19854.34
20088	25.07	145.67	19939.81
20184	25.62	145.61	20026.56
20279	25.85	143.86	20112.14
20375	26.8	140.27	20198.19
20470	26.71	137.81	20283.02
20566	26.94	136.26	20368.69
20661	27.56	132.54	20453.15
20757	28.78	125.39	20537.8
20853	30.86	122.21	20621.09
20948	30.8	120.62	20702.67
21044	29.93	119.39	20785.5
21122	29.69	118.29	20853.18

Subroutine DatosPrincipales
Use VariablesComunes

Open(50,file="c:\Mis documentos\Geomecánica\Data.txt")
Read(50,*)Ds
Read(50,*)Incli
Read(50,*)Azi
Read(50,*)Dens
Read(50,*)GESfvertical
Read(50,*)GHorizmin
Read(50,*)AziEM
Read(50,*)Pp
Read(50,*)Poisson
Read(50,*)UCS
Read(50,*)Angfricc
Read(50,*)Ancho

End

```
*****  
**                                     **  
** Rutina para el cálculo de los cosenos **  
** directores, utilizados para realizar **  
** el cambio del sistema de ejes. **  
**                                     **  
*****
```

Subroutine CosenosDirectores
Use VariablesComunes

Pi=Atan(1.)*4
z=Incli*Pi/180
Azim=Azi*Pi/180
AzimEM=AziEM*Pi/180

Azimut=abs(Azim- AzimEM)
Ixx=cos(Azimut)*cos(z)
Ixy=sin(Azimut)*cos(z)
Ixz=- sin(z)
Iyx=- sin(Azimut)
Iyy=cos(Azimut)
Iyz=0
Izx=cos(Azimut)*sin(z)
Izy=sin(Azimut)*sin(z)
Izz=cos(z)

End

```

*****
**
** Subrutina para el cálculo del esfuerzo
** horizontal máximo a partir de un ancho
** de falla conocido.
**
*****

```

```

Subroutine CalculaEsfuerzos
  Use VariablesComunes
  Integer x,y,h,Angfricc
  Pi=Atan(1.)*4

```

```

WBO1=Ancho-2 !Tolerancia permitida al ancho
WBO2=Ancho+2 !del breakout

```

```

Pw=Dens*Ds*(12./231.)
Pporo=Pp*Ds
Esfvertical=GEsfvertical*Ds
Horizmin=GHorizmin*Ds

```

```

Open(20,file="c:\Mis documentos\Geomecánica\Resultado.txt")

```

```

Angfriccion=Angfricc*Pi/180
So=UCS/(2*(cos(Angfriccion))/(1-sin(Angfriccion)))
Angfalla=Pi/4+Angfriccion/2
Tang=Tan(Pi/2- Angfriccion)

```

```

x=0

```

```

!!!!!! Iteración del esfuerzo horizontal máximo

```

```

Do 200 GHorizmax=0.5,2.0,0.1
h=0

```

```

!!!!!! Variación del ángulo alrededor de la
!!!!!! periferia del hoyo

```

```

Do 300 Direc=1,360,1
Theta=Direc*Pi/180

```

```

Horizmax=GHorizmax*Ds

```

```

Axialx=Ixx**2*Horizmax+Ixy**2*Horizmin+Ixz**2*Esfvertical
Axialy=Iyx**2*Horizmax+Iyy**2*Horizmin+Iyz**2*Esfvertical
Axialz=Izx**2*Horizmax+Izy**2*Horizmin+Izz**2*Esfvertical
Cortxy=Ixx*Iyx*Horizmax+Ixy*Iyy*Horizmin+Ixz*Iyz*Esfvertical

```

$Cortyz = Iyx * Ixz * Horizmax + Iyy * Izy * Horizmin + Iyz * Izz * Esfvertical$
 $Cortzx = Izx * Ixx * Horizmax + Izy * Ixy * Horizmin + Izz * Ixz * Esfvertical$

$XY = Axialx + Axialy$
 $YX = Axialx - Axialy$

$Ang = \cos(2 * Theta)$
 $Axialr = Pw$
 $Axialt = (XY - 2 * (YX) * Ang - 4 * Cortxy * \sin(2 * Theta) - Pw)$
 $Axialzz = (Axialz - 2 * Poisson * (YX) * Ang - 4 * Poisson * Cortxy * \sin(2 * Theta))$
 $Cortzt = 2 * (-Cortzx * \sin(Theta) + Cortyz * \cos(Theta))$

$TZZ = Axialt + Axialzz$
 $ZZT = Axialt - Axialzz$

$Princ1 = Axialr$
 $Princ2 = (0.5) * ((TZZ) + (((ZZT) ** 2) + 4 * ((Cortzt) ** 2)) ** (0.5))$
 $Princ3 = (0.5) * ((TZZ) - ((ZZT) ** 2 + 4 * (Cortzt) ** 2) ** (0.5))$

If (Princ1 .GT. Princ2) then
 Mayor=Princ1
 Menor=Princ3
else
 Mayor=Princ2
 If (Princ1 .GT. Princ3) then
 Menor=Princ3
 else
 Menor=Princ1
 end if
end if
EfMay=Mayor-Pporo
EfMen=Menor-Pporo

$Axial = (0.5) * (EfMay + EfMen) + (0.5) * (EfMay - EfMen) * \cos(2 * Angfalla)$
 $Cort = (0.5) * (EfMay - EfMen) * \sin(2 * Angfalla)$

$Axialenv = (((EfMay + EfMen) / 2) * (Tang)) - So / (Tang + \tan(Angfriccion))$
 $Cortenv = So + \tan(Angfriccion) * Axialenv$

!!!!!! Evaluación del Criterio de Falla

If ((Axial.LT.Axialenv).AND.(Cort.GT.Cortenv)) then
 h=h+1
End If

300 Continue

!!!!!! Comparación del ancho de falla determinada

!!!!!! analíticamente con el observado en el
!!!!!! registro de imágenes.

If ((h.GE.WBO1).AND.(h.LE.WBO2)) then

Write(20,*)Grad

x=1

Stop

End if

200 Continue

If (x.EQ.0) then

Write(*,*)'Para estas condiciones no pudo ocurrir un Breakout'

end if

End