

**PRINCIPALES MECANISMOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS QUE
AFECTAN LOS YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS**

JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ CASTILLO

OSCAR MARIO URIBE PEÑARANDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

**PRINCIPALES MECANISMOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS QUE
AFECTAN LOS YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS**

JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ CASTILLO

OSCAR MARIO URIBE PEÑARANDA

Proyecto de grado presentado para optar al título de
Ingeniero de Petróleos

Directora

PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo

Docente UIS

Codirector

PhD. Giovanni Jiménez Díaz

Docente UIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso que nos da la vida y propicia los medios para alcanzar nuestras metas.

A la Universidad Industrial de Santander por el desarrollo profesional, académico y humano alcanzado.

A la doctora Zuly Himelda Calderón Carrillo quien con su experiencia, sabiduría y paciencia supo encaminar el rumbo de mi proyecto de grado, brindándome pautas y consejos de acción profesional en el ejercicio académico.

Al doctor Giovanni Jiménez Díaz por su apoyo y confianza en mi trabajo, lo cual ha sido un aporte invaluable no solo en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como profesional. Debo destacar por encima de todo, su disponibilidad y paciencia para orientar cada una de las actividades propuestas durante la ejecución del proyecto. No cabe duda que su participación activa ha enriquecido el trabajo realizado.

DEDICATORIA

Al Dios y Padre de nuestro Señor Jesucristo que me bendijo con toda bendición espiritual y material en Cristo.

A mi mami Sara por su inmenso amor, orientación, apoyo incondicional y por sembrar en mí el creer que todo se puede con esfuerzo y dedicación.

A mis abuelos Juan María Fernández y Ana María Delgado por sus bendiciones y oraciones, colaboración y apoyo incondicional aún en los momentos más difíciles de mi existencia.

A mis hermanos Juan Alexander y Joseph Andrey por su acompañamiento, comprensión y confianza durante toda mi vida.

A mi tía Martha Isabel Fernández por sus consejos fortalecidos en la iglesia, y sus aportes pequeños pero valiosos.

A todos aquellos que como yo creemos en una vida y futuro mejores.

José Luis Fernández Castillo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a mi familia por su apoyo y amor incondicional durante toda mi vida, en los buenos y malos momentos.

A mi mamá Mery Peñaranda por enseñarme el valor de la disciplina y honestidad, el cual veo reflejado todos los días.

A mi papá Ramón Mario Uribe por inculcarme el valor del estudio y la importancia de la academia.

A mi mejor amigo Wladimir Uribe por ser una persona muy inteligente y agradable.

A mi novia Andrea Velandia por su cariño y tiempo compartido, en el cual hemos vivido grandes experiencias y he aprendido mucho. Por ser tan linda en todos los momentos que la necesite.

Y al resto de amigos que no nombro porque son muchos, pero que estuvieron a mi lado acompañándome en cada día de esta experiencia.

Oscar Mario Uribe Peñaranda

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. GENERALIDADES DE LA GEOMECÁNICA	20
1.1 DEFINICIÓN DE MECÁNICA DE ROCAS.....	20
1.2 APLICACIONES DE LA GEOMECÁNICA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO	21
1.3 ESFUERZO	22
1.3.1 Fuerza: definición, tipos y unidades de medida	22
1.3.2 Esfuerzo: definición y unidades de medida.....	24
1.3.3 Tipos de esfuerzo: presión litostática y esfuerzos debidos a fuerzas de superficie	25
1.3.4 Componentes del esfuerzo	28
1.3.5 Estado de esfuerzo. El tensor de esfuerzo	29
1.4 DEFORMACIÓN.....	32
1.4.1 Definición y tipos.....	32
1.5 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS ROCAS.....	36
1.5.1 Comportamiento elástico	36
1.5.2 Comportamiento viscoso.....	39
1.5.3 Comportamiento plástico	40
2. CONCEPTUALIZACIÓN GENERAL Y GEOMECÁNICA DE FALLAS GEOLÓGICAS.....	42
2.1 FALLAS.....	42
2.1.1 Suposiciones fundamentales de Anderson	43

2.1.2 Fallas normales.....	47
2.1.3 Fallas inversas y cabalgamientos	50
2.1.4 Fallas rumbo-deslizante	52
2.2 CRITERIO TEÓRICO DE FRACTURACIÓN DE COULOMB	54
2.2.1 Envolvente de Mohr o curva intrínseca	61
3. PROPIEDADES GEOMETRICAS DE FALLAS	65
3.1 CRITERIOS PARA CLASIFICAR LAS FALLAS.....	65
3.2 GEOMETRÍA DE FALLAS Y DESPLAZAMIENTO	68
3.2.1 El problema de la separación.....	70
3.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA SEPARACIÓN	71
3.3.1 Separación de fallas y determinación del deslizamiento neto.....	71
3.4 CURVATURAS DE FALLAS.....	73
3.5 TERMINACIONES DE FALLA Y LONGITUD DE FALLA.....	75
3.6 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE FALLA EN EL ANÁLISIS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS.....	76
3.6.1 Roca intacta y mecanismos de fractura	78
4. PARÁMETROS DE INESTABILIDAD DE FALLAS.....	83
4.1 DIRECCIÓN DE ESFUERZOS	83
4.1.1 Caso en donde uno de los ejes principales de esfuerzo es vertical.....	83
4.1.2 Casos en donde el eje principal de esfuerzo intermedio es horizontal	85
4.2 EL ROL DE LOS FLUIDOS.....	88
4.2.1 Correlación entre la presencia de fluidos y la presión ejercida	89
4.2.2 Efecto de los fluidos en el crecimiento de una fractura extensible.....	93
4.3 DESLIZAMIENTO FRICCIONAL	96

4.3.1 Criterios de deslizamiento friccional.....	98
4.4 COHESIÓN.....	100
5. EVALUACIÓN DE LOS PRINCIPALES MECANISMOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN LOS YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS	102
5.1 REACTIVACIÓN DE FALLAS DEBIDO A CAMBIOS EN LA PRESIÓN DE PORO	102
5.1.1 Concepto de falla de Coulomb para el cambio de esfuerzo en fallamiento normal e inverso	106
5.2 EVALUACION DE LA ESTABILIDAD DE FALLAS QUE LIMITAN EL YACIMIENTO DURANTE LA PERFORACIÓN.....	109
5.3 MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE FALLAS EN EL YACIMIENTO DURANTE LA PERFORACIÓN.....	111
5.3.1 Mecánica de fallas	111
5.4 EVALUACIÓN DE LA TENDENCIA A LA REACTIVACIÓN DE FALLAS DURANTE LA INYECCIÓN O PRODUCCIÓN DE FLUIDOS.....	114
5.4.1 Máxima presión de inyección sostenible para prevenir reactivación de fallas	116
5.4.2 Análisis de esfuerzos inducidos usando la teoría de inclusiones.....	118
5.4.3 Cambio de esfuerzos de falla coulomb (ΔEFC)	120
5.4.4 Efecto del coeficiente de fricción en regiones potenciales de reactivación de falla	121
5.4.5 Identificación de los ángulos críticos de buzamiento de falla dentro y alrededor de los yacimientos	122
5.5 ANÁLISIS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS NATURALES CAUSADA POR PROPAGACIÓN DE UNA FRACTURA HIDRÁULICA INDUCIDA	124
6. MODELO PARA EL ANÁLISIS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS	127

6.1 MODELO PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE REACTIVACIÓN DE PLANOS DE FALLA	127
6.1.1 Antecedentes	127
6.1.2 Descripción del modelo.....	131
6.2 EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	138
6.2.1 Análisis de resultados	155
7. CONCLUSIONES	157
8. RECOMENDACIONES.....	160
BIBLIOGRAFÍA.....	162

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de fuerzas de superficie.	23
Figura 2. Esfuerzo que actúa sobre una superficie inclinada.	27
Figura 3. Componentes del esfuerzo.	29
Figura 4. Las nueve componentes de un estado de esfuerzo.	31
Figura 5. Deformación continua o afín (arriba) o discontinua o no afín (abajo).	33
Figura 6. Deformación homogénea y no homogénea.	34
Figura 7. Deformación por plegamiento de dos capas.	35
Figura 8. Los cuerpos teóricos elementales y sus analogías mecánicas.	37
Figura 9. Deformación elástica de un bloque de roca.	38
Figura 10. Diagrama de Mohr mostrando las relaciones entre ϕ , θ , α y la envolvente de falla de Mohr-Coulomb.	46
Figura 11. Clasificación de Anderson.	46
Figura 12. Estado de esfuerzos para fallamiento normal.	47
Figura 13. Análisis del círculo de Mohr para fallamiento normal.	49
Figura 14. Orientación de los esfuerzos principales para fallamiento inverso.	50
Figura 15. Análisis del círculo de Mohr para fallamiento inverso.	52
Figura 16. Orientaciones de los esfuerzos principales para fallas rumbo-deslizantes.	53
Figura 17. Planos de fractura y su relación con los esfuerzos principales.	56
Figura 18. Criterio de Coulomb representado en un diagrama de Mohr.	57
Figura 19. Criterio de Coulomb representado en un diagrama de Mohr.	59
Figura 20. Experimentos de fracturación realizados con arena seca.	60
Figura 21. Significado de ϕ , T, S.	61
Figura 22. Envoltentes de Mohr de una diabasa.	62
Figura 23. Los tres campos de la envolvente de Mohr.	64
Figura 24. Diagrama de bloque mostrando los diferentes tipos de falla.	67
Figura 25. Diagrama de un bloque mostrando el vector de deslizamiento neto.	69

Figura 26. Diagrama de bloque mostrando la separación de inclinación y la separación en rumbo.	72
Figura 27. Curvatura restringida y una curvatura liberada a lo largo de una falla rumbo-deslizante lateral derecha.....	74
Figura 28. Ángulo de aspereza promedio, de primer y segundo orden introducidas por Patton (1966).	80
Figura 29. Comportamiento de corte / deslizamiento de fracturas individuales y cuerpos de roca fracturadas en función del esfuerzo normal.	81
Figura 30. Tipo de falla dependiendo de la orientación del elipsoide de esfuerzo.	85
Figura 31. Fallas si el esfuerzo horizontal es el mismo en todas las profundidades.	86
Figura 32. Fallas si el esfuerzo horizontal superpuesto aumenta hacia abajo.	87
Figura 33. Circulo de Mohr mostrando el efecto de la presión de fluido en el esfuerzo normal efectivo.....	89
Figura 34. Gráfico mostrando la variación en el esfuerzo diferencial necesario para iniciar deslizamiento en fallas inversas, normales y rumbo-deslizantes como función de la profundidad.	92
Figura 35. Gráfica de presión litostática Vs presión hidrostática como función de la profundidad.....	94
Figura 36. Diagrama de Mohr mostrando como el incremento en la presión de poro mueve el círculo de Mohr hacia el origen.	95
Figura 37. Concepto de asperezas y el área real de contacto.....	97
Figura 38. Diagrama de Mohr basado en experimentos con dolomita.....	99
Figura 39. Mecanismos de falla de pozo debido a la producción de fluidos.	104
Figura 40. Producción de fluidos indujo movimiento de falla y cizalladura del casing.	104
Figura 41. Diagramas de Mohr Coulomb para una falla reactivada.	115
Figura 42. Diagrama de Mohr Coulomb para una falla reactivada durante la inyección.....	116

Figura 43. Tres tipos de interacción entre la propagación de una fractura hidráulica inducida y una falla natural.	125
Figura 44. Diagramas de Mohr correspondientes a diferentes análisis de reactivación de fallas.	128
Figura 45. Diagrama de Mohr ilustrando el método de tendencia al deslizamiento.	130
Figura 46. Diagramas de Mohr mostrando la reactivación de cuatro planos de falla representativos.	137
Figura 47. Mapa de esfuerzos neotectónicos de la cordillera oriental.	140
Figura 48. Dirección de los esfuerzos horizontales en el Piedemonte Llanero. ...	143
Figura 49. Régimen de esfuerzos en el Piedemonte Llanero.	144

RESUMEN

TITULO: PRINCIPALES MECANISMOS DE REACTIVACION DE FALLAS QUE AFECTAN LOS YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS¹

AUTORES: FERNANDEZ CASTILLO, José Luis

URIBE PEÑARANDA, Oscar Mario²

PALABRAS CLAVES

Geomecánica aplicada, geología estructural, esfuerzos in-situ, régimen de esfuerzos, criterio de falla de Mohr Coulomb, reactivación de fallas, presión de poro, fracturamiento hidráulico, producción e inyección de fluidos, Sistema de Fallas Guaicáramo, Piedemonte Llanero.

DESCRIPCIÓN

Las fallas, consideradas como discontinuidades geológicas son inherentes en muchos yacimientos de petróleo. Durante la producción de fluidos de yacimientos de hidrocarburos, e inyección de fluidos para recobro mejorado, los cambios en los esfuerzos son inducidos dentro y alrededor de las formaciones de interés. Para garantizar que la producción e inyección sea mantenida de una manera eficaz y efectiva, resulta crítico evaluar el efecto de estos cambios de esfuerzos en la integridad hidráulica de las rocas que limitan las formaciones. Por otro lado, la reactivación de fallas es uno de los incidentes desfavorables durante la perforación y la producción debido principalmente a cambios en los esfuerzos in-situ y a la presión de yacimiento. Solo unos pocos estudios, en esos análisis han incluido los efectos de las propiedades geométricas de las fallas, en particular, aspectos relacionados con: longitud, ángulo de buzamiento y geometría de superficie; mientras estos son factores importantes que controlan el deslizamiento de fallas.

En este artículo se identifican los mecanismos fundamentales de reactivación de fallas, se muestran las propiedades geomecánicas de los materiales en la zona de falla que intervienen en su deslizamiento y se analiza la practicidad de un modelo para la evaluación del potencial de reactivación de planos de falla que puede ser aplicado para fallas cohesivas o no cohesivas sin importar la orientación y las condiciones del campo de esfuerzos regional. Posteriormente dicho modelo es aplicado al Sistema de Fallas Guaicaramo en el Piedemonte Llanero para predecir el deslizamiento de las fallas debido a un régimen de esfuerzos compresivo uniaxial actuando en el plano de falla.

Este tipo de análisis es una herramienta útil para diseñar planes de contingencia que maximicen el valor de las experiencias de cada una de las etapas de perforación, producción, inyección y estimulación del yacimiento durante la vida productiva del campo.

¹ Proyecto de grado.

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Directora Zuly Himelda Calderón Carrillo. Codirector Giovanni Jiménez Díaz.

ABSTRACT

TITLE: MAIN MECHANISMS FOR FAULT REACTIVATION AFFECTING OIL RESERVOIRS³.

AUTHORS: FERNANDEZ CASTILLO, José Luis

URIBE PEÑARANDA, Oscar Mario⁴

KEY WORDS

Applied Geomechanics, structural geology, in-situ stresses, state of stresses, Mohr Coulomb fault criterium, fault reactivation, pore pressure, Hydraulic Fracturing, production and injection of fluids, Guacáramo Fault System, Piedemonte Llanero.

DESCRIPTION

Faults, considered to be geological discontinuities, are inherent in many oil reservoirs. During the production of fluids in such reservoirs, and during the injection of fluids for oil enhanced recovery, the changes on the stresses are induced inside and around the formation of interest. In order to ensure that the production and injection is kept in an efficient effective way, it is necessary to evaluate the effect of such stress changes on the hydraulic integrity of the rocks surrounding the formations. On the other hand, fault reactivation is one of the negative incidents during drilling and producing, due to in-situ stress changes, and also because of reservoir pressure. Only some studies on such data analyses have included the effects of the geometrical properties in faults; particularly aspects regarding length, deep angle and surface geometry. These aspects are important since they control fault slippage.

Main mechanisms of fault reactivation are identified in this article. Slippage-influencing geomechanical properties of the fault zone are shown. Also, the applicability of an evaluation model for the fault plane potentials of reactivation are analyzed. This latter can be applied for cohesive or non-cohesive faults, no matter the orientation and the conditions of the regional field stress. Later on, such model is applied to the Guacáramo Fault System, located in Piedemonte Llanero. This model is applied in order to predict fault slippage due to a regime of uniaxial compressional stresses, acting on the fault plane.

This analysis is a useful tool in order to design contingency plans that maximize the value of the experiences in each one of the drilling stages as well as for the stages of production, injection, and stimulation of the reservoir during the productive life of the oil field.

³ Research Work

⁴ Faculty of Physic-Chemical Engineering. Petroleum Engineering School. Director Zuly Himelda Calderón Carrillo. Codirector Giovanni Jiménez Díaz

INTRODUCCIÓN

Las discontinuidades geológicas, tales como fallas, son inherentes en la mayoría de los yacimientos de hidrocarburos. Es bien conocido que la depleción del yacimiento, junto con las actividades de perforación, producción e inyección de fluidos y fracturamiento hidráulico, pueden redistribuir los esfuerzos in-situ lo suficientemente para reactivar e inducir deslizamiento de fallas cercanas dentro o alrededor de las formaciones de interés. La reactivación de fallas ha tenido un amplio rango de consecuencias: cizalladura de los pozos (perforados a través de porciones deslizadas de la zona de falla), liberación dinámica de la energía elástica almacenada, inducción de sismicidad y cambios en la permeabilidad de la formación y las estrategias de producción-depleción.

Varios modelos basados en el criterio de falla de Mohr Coulomb han sido utilizados para evaluar la tendencia de reactivación de fallas pre-existentes inducida por intervenciones a las formaciones lo cual ocasiona una redistribución de los esfuerzos in situ en la roca.

En el presente libro se identifican los mecanismos fundamentales de reactivación de fallas, se muestran las propiedades geomecánicas de los materiales en la zona de falla que intervienen en su deslizamiento y se analiza la practicidad de un modelo para la evaluación del potencial de reactivación de planos de falla que puede ser aplicado para fallas cohesivas o no cohesivas sin importar la orientación y las condiciones del campo de esfuerzos regional.

Este trabajo destaca la importancia de los análisis de estabilidad de las fallas en la caracterización de los yacimientos y la importancia de esta información en el diseño de estrategias de desarrollo. Este tipo de análisis es una herramienta útil para diseñar planes de contingencia que maximicen el valor de las experiencias de cada una de las etapas de perforación, producción, inyección y estimulación del yacimiento durante la vida productiva del campo.

1. GENERALIDADES DE LA GEOMECÁNICA

1.1 DEFINICIÓN DE MECÁNICA DE ROCAS⁵

“Es la ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de las rocas y masas de rocas. Es la rama de la mecánica que se ocupa del estudio de las respuestas de las rocas y masas de rocas, a los campos de fuerzas que actúan en su entorno. (Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, 1966)”

“Rama de la ingeniería que estudia las propiedades mecánicas de las rocas y la aplicación de este conocimiento a problemas de ingeniería relacionados con rocas. Cuando se diseña una estructura de roca en el subsuelo o se evalúa la estabilidad de una estructura existente, se deben determinar los esfuerzos y/o deformaciones resultantes y la habilidad de la estructura para soportar esos esfuerzos o deformaciones (Obert & Duvall, 1967)”

“Estudio de los efectos de las fuerzas que actúan sobre las rocas, el cual involucra tres aspectos principales (Coates, 1981):

- El análisis de las cargas o fuerzas que actúan sobre las rocas;
- El análisis de los efectos internos de la roca, en términos de esfuerzos, deformaciones o almacenamiento de energía;
- El análisis de las consecuencias de esos efectos internos en la roca; los cuales pueden ser: fractura, flujo o simplemente deformación de la roca”

⁵ CALDERON, Zuly Himelda. Apuntes de Curso Geomecánica aplicada a la Industria de los Hidrocarburos. UIS. 2012.

1.2 APLICACIONES DE LA GEOMECÁNICA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO

Las recomendaciones finales de la investigación desarrollada por la Academia Nacional de Estados Unidos, las Catástrofes de las represas de Malpasset y Vajont junto con problemas ocasionados durante la exploración y explotación de campos petroleros y los inconvenientes técnicos y económicos obligaron a doblar esfuerzos para mejorar el entendimiento de los mecanismos que gobiernan el comportamiento de las rocas y generan diversos problemas:

- Inestabilidad de pozos
- Arenamiento
- Reactivación de fallas
- Compactación y subsidencia
- Ineficiencia Fracturamiento hidráulico
- Rotura, ovalización de casing, etc...
- Yacimientos con altas presiones y altas temperaturas
- Ubicados a grandes profundidades o en aguas ultraprofundas
- Completamiento e ingeniería en yacimientos no convencionales (shale gas, shale oil, tight sand, gas asociado a mantos de carbón, crudo pesado).
- Procesos de recobro en arenas no consolidadas
- Reinyección de recortes de perforación
- Reinyección de agua producida

1.3 ESFUERZO

1.3.1 Fuerza: definición, tipos y unidades de medida

Se define **fuerza** como una magnitud vectorial que tiende a producir un cambio en el movimiento de un cuerpo o en su estructura interna, es decir, tiende a producir una deformación⁶. Debido a su carácter vectorial, varias fuerzas actuando sobre un mismo punto pueden combinarse o sumarse en una sola y, similarmente, una fuerza puede considerarse que está compuesta de varias y puede descomponerse en ellas. Hay dos tipos de fuerzas: del cuerpo (o másicas) y de superficie.

Las **fuerzas del cuerpo** o másicas («*body forces*») están en relación directa con la masa del cuerpo al cual se aplican, aunque su origen puede ser debido a causas externas. Son fuerzas del cuerpo las inducidas por la gravedad, la centrífuga o las creadas por campos magnéticos, por ejemplo. Sólo la gravedad es importante en los procesos que dan lugar a deformaciones de las rocas.

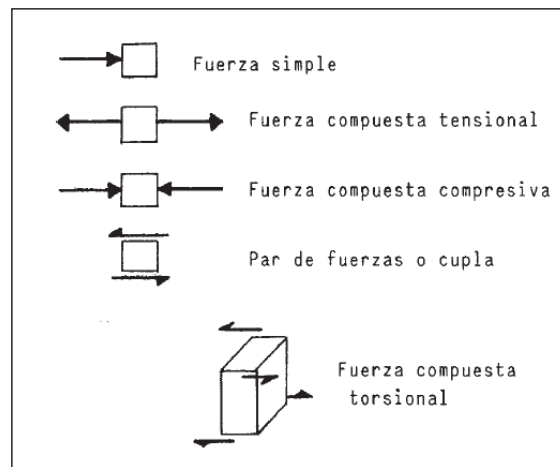
Las **fuerzas de superficie** («*surface forces*») dependen siempre de causas externas al cuerpo y no guardan ninguna relación con la masa del mismo. Se llaman así porque se puede considerar que son aplicadas a una superficie del cuerpo. Las fuerzas de superficie se subdividen en simples y compuestas (Fig.1-1). Las simples tienden a producir movimiento y las compuestas tienden a producir distorsión. Que realmente produzcan o no deformación, dependerá de su intensidad y de las propiedades del cuerpo o de su situación.

Las fuerzas compuestas que consisten en dos fuerzas actuando en sentidos contrarios a lo largo de la misma línea recta se dividen en tensionales, cuando son divergentes, y compresivas o compresionales, cuando convergen hacia el cuerpo (Fig.1). Dos fuerzas actuando en sentidos contrarios según dos rectas paralelas

⁶ DAVIS, G., et al. Structural geology of rocks and regions. California: Printed by John Wiley & Sons, 2012. 861 p. ISBN 978-0-471-15231-6

constituyen lo que se llama un par de fuerzas o cupla. Las fuerzas compuestas pueden ser aún más complicadas, como en el caso de dos pares de fuerzas representadas al final de la Fig.1, que tienden a producir una torsión.

Figura 1. Tipos de fuerzas de superficie.



Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003

La fuerza en los sistemas Cegesimal e Internacional no es una unidad fundamental, sino que la unidad fundamental es la masa (gr y kg respectivamente). La Unidad de fuerza en cada uno se define como la fuerza que es necesario aplicar a un cuerpo de masa unidad para que adquiriera una aceleración igual a una unidad de longitud por cada unidad de tiempo elevada al cuadrado:

En el Sistema Cegesimal (c.g.s), es la **dina**:

$$1 \text{ dina} = 1 \text{ gr} \cdot \text{cm}/\text{s}^2$$

En el Sistema Internacional (S.I. ó M.K.S.) es el **newton** (N):

$$1 \text{ Newton} = \text{Kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$$

Puede calcularse fácilmente que $1 \text{ Newton} = 10^5 \text{ dinas}$

En el Sistema Técnico o Terrestre la fuerza es una unidad fundamental, a diferencia de los dos anteriores:

1 **kilo fuerza** o kilopondio se define como la fuerza con la cual la Tierra atrae en París a un cuerpo cuya masa es de 1 kg (en el Sistema Internacional).

Esa fuerza le haría adquirir una aceleración de $9,81 \text{ m/s}^2$ si cayera libremente en el vacío. La equivalencia con el S.I. es la siguiente: 1 kilo fuerza = 9,81 newtons. Esto es debido a que un newton es la fuerza necesaria para someter a una masa de 1 kg a una aceleración de 1 m/s^2 y un kilo fuerza es la fuerza necesaria para someter a una masa de 1 kg a una aceleración de $9,81 \text{ m/s}^2$. La masa es una unidad secundaria en el Sistema Técnico: la unidad técnica de masa (U.T.M.) se define como la masa de un cuerpo que pesa 9,81 kilos fuerza en París, es decir:

1 U.T.M. = 9,81 kg (masa).

1.3.2 Esfuerzo: definición y unidades de medida

El **esfuerzo** («*stress*») se define como la fuerza por unidad de superficie que soporta o se aplica sobre un plano cualquiera de un cuerpo. Es decir, es la relación entre la fuerza aplicada y la superficie sobre la cual se aplica. Es importante comprender esta relación entre fuerza aplicada y superficie sobre la que se aplica: una fuerza aplicada a un cuerpo es la misma con independencia de la superficie del mismo sobre la cual se aplique. De hecho, se aplica a todo el cuerpo y, por tanto, a todas las infinitas superficies contenidas en él, aunque se puede considerar su efecto sobre una o varias en particular. En cambio, esa misma fuerza no genera el mismo esfuerzo sobre cada una de las superficies del cuerpo, pues al variar la superficie, varía la relación fuerza/superficie, que es el esfuerzo⁷.

⁷ ENGELDER, T. Stress regimes in the lithosphere. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1993. 457 pp. ISBN 9780691085555.

1.3.3 Tipos de esfuerzo: presión litostática y esfuerzos debidos a fuerzas de superficie

Dado que existen fuerzas del cuerpo y fuerzas de superficie, los esfuerzos causados por esas fuerzas serán de distintos tipos.

La gravedad crea el esfuerzo llamado **presión litostática**, que es el esfuerzo que sufre un determinado punto de la Tierra debido al peso de las rocas que tiene encima. Puede establecerse una comparación con la presión hidrostática en los líquidos, que es igual al esfuerzo creado por la columna de líquido que hay encima de un determinado punto del mismo. La presión hidrostática es igual en todas las direcciones, de forma que no sólo actúa en la vertical. Esto puede comprobarse sumergiendo un pequeño globo esférico inflado de gas en una piscina o tanque: el globo va perdiendo volumen al ser sumergido, debido a la presión que ejerce el líquido, pero su forma sigue siendo esférica, lo que indica que se comprime en todas direcciones por igual.

La presión litostática se calcula mediante la fórmula:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot z$$

Ecuación 1

Donde ρ es la densidad media de las rocas que hay por encima del punto, g el valor de la aceleración de la gravedad y z la profundidad.

La presión litostática no suele ser de tipo hidrostático, salvo que las rocas se comporten como líquidos, lo cual sucede en los magmas. En general, por tanto, el esfuerzo en la dirección vertical al que está sometido un punto de la Tierra en profundidad, es igual a la presión litostática, mientras que el esfuerzo en cualquier otra dirección, suele ser diferente. Las diferencias dependen mucho de las propiedades mecánicas de las rocas y, así, a grandes profundidades, donde las rocas están muy calientes y sometidas a una gran presión, se comportan casi como

líquidos y, por ello, las diferencias de presión en unas direcciones u otras son mínimas.

En general, se admite que las deformaciones son tan lentas en Geología, que puede considerarse que en un instante dado, los cuerpos están en equilibrio. Puede, por tanto, aplicárseles la tercera ley del movimiento de Newton, según la cual, para un cuerpo en reposo o en movimiento constante, para cada acción (fuerza) existe una reacción igual en magnitud y dirección y de sentido contrario. Por lo tanto, se puede considerar siempre el esfuerzo como causado por una pareja de fuerzas compuestas, tensionales o compresivas, o bien una cupla, actuando sobre una superficie. Esto vale para la presión litostática y para los esfuerzos causados por fuerzas de superficie.

Como se mencionó anteriormente, la misma fuerza actuando sobre distintos planos crea distintos esfuerzos. La figura 2 representa una fuerza de superficie, F , que actúa sobre un cuerpo rectangular. El esfuerzo que esa fuerza produce sobre una superficie S perpendicular a ella es E_s y el producido sobre otra superficie S' que forma con la fuerza un ángulo θ es $E_{s'}$. Dado que el esfuerzo es la relación entre la fuerza y la superficie sobre la que actúa: $E_s = \frac{F}{S}$ la fuerza F puede expresarse en función del esfuerzo que actúa sobre S :

$$F = E_s \cdot S$$

Ecuación 2

El esfuerzo que actúa sobre S' puede, ahora, expresarse en función del que actúa sobre S :

$$E_{s'} = E_s \cdot S/S'$$

Ecuación 3

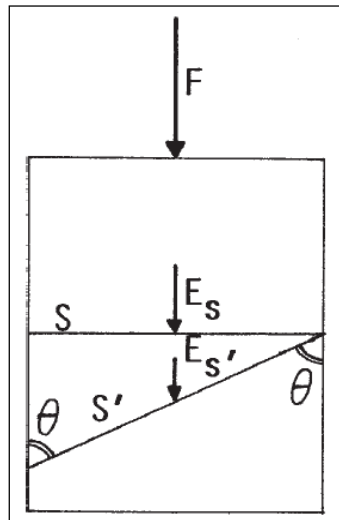
Pero dado que $\text{Sen}\theta = S/S'$ puede escribirse que:

$$E_{S'} = E_S \cdot \text{Sen}\theta$$

Ecuación 4

Es importante resaltar en la figura 2 que el esfuerzo creado por la fuerza F es máximo para $\theta = 90^\circ$ ($\text{Sen}\theta = 1$) es decir, en los planos perpendiculares a su dirección de aplicación, y va decreciendo a medida que disminuye θ . El esfuerzo causado por F sobre los planos paralelos a la dirección de aplicación de la fuerza ($\theta = 0^\circ$) es nulo.

Figura 2. Esfuerzo que actúa sobre una superficie inclinada.



Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

1.3.4 Componentes del esfuerzo

Los esfuerzos causados por fuerzas de superficie son también magnitudes vectoriales, que pueden componerse y descomponerse como tales. Naturalmente, sólo pueden componerse los esfuerzos que actúan sobre un determinado plano y, de forma similar, cuando un vector esfuerzo que actúa sobre un plano se descompone, las componentes obtenidas sólo actúan sobre ese plano.

En el caso general, un vector esfuerzo que actúa sobre un plano lo hace oblicuamente a él.

Un esfuerzo que actúe perpendicularmente a un plano se denomina **esfuerzo normal**, y uno que actúe paralelamente a un plano, **esfuerzo de cizalla**. Un vector esfuerzo oblicuo puede descomponerse en uno perpendicular al plano y en otro paralelo a él (Fig. 3). Esta descomposición da lugar a las componentes del esfuerzo, que se llaman respectivamente normal y de cizalla y se denotan con las letras griegas σ (sigma) y τ (tau) respectivamente. Teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos se opera con esfuerzos compuestos, el esfuerzo normal es el que tiende a comprimir o separar, según sea compresivo o tensional, las dos partes del cuerpo que quedan a ambos lados del plano sobre el que actúa. En cambio, el esfuerzo de cizalla tiende a romper el cuerpo por ese plano y a desplazar las dos mitades del cuerpo una junto a la otra.

Las componentes de un esfuerzo E que actúa sobre un plano con el que forma un ángulo θ son (Fig.3):

$$\sigma = E \cdot \text{Sen}\theta$$

Ecuación 5

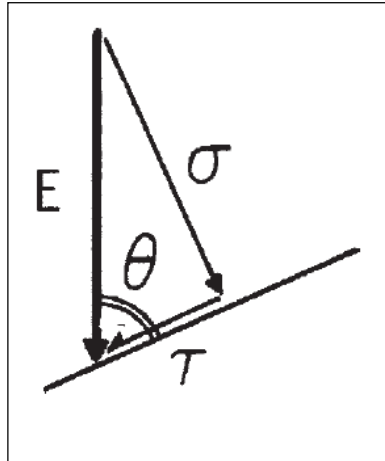
$$\tau = E \cdot \text{Cos}\theta$$

Ecuación 6

En el caso de la Fig. 2, el esfuerzo E_S que actúa sobre la superficie S sólo tiene componente normal:

$$\sigma_S = E_S, \tau_S = 0$$

Figura 3. Componentes del esfuerzo.



Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

1.3.5 Estado de esfuerzo. El tensor de esfuerzo

Cualquier punto del interior de la Tierra está sometido a un complejo sistema de esfuerzos. Esto es debido a que sobre él actúa el peso de las rocas que tiene encima, que no sólo se aplica en dirección vertical sino que es en cierto modo transmitido en todas las direcciones, aunque no siempre con el mismo valor. Además, las rocas adyacentes pueden transmitirle fuerzas que pueden provenir de causas diversas. El conjunto de fuerzas que actúan dan, a su vez, esfuerzos sobre todos y cada uno de los planos que pasan por el punto. Puede considerarse que los esfuerzos que actúan sobre cada plano se componen dando un único esfuerzo resultante. No obstante, dado que por un punto pasan infinitos planos, habrá infinitos

vectores esfuerzo actuando. Además, la configuración de los esfuerzos puede variar de un instante a otro.

Se define **estado de esfuerzo** como el conjunto de los infinitos vectores esfuerzo que actúan sobre los infinitos planos que pasan por un punto, en un instante dado. Esto no es ya una magnitud vectorial, sino una cantidad física compuesta de infinitos vectores, que se denomina un tensor de segundo orden.

Los tensores son cantidades físicas que expresan diferentes cosas. Los tensores de orden cero son los llamados escalares, cantidades físicas que se expresan por un simple número, p. ej. La temperatura en la habitación: $T = 25^{\circ}\text{C}$. Los tensores de primer orden son los vectores, cantidades físicas que representan una intensidad, pero también una dirección en el espacio y un sentido.

Pueden ser expresados por un módulo y dos argumentos: el módulo expresa la intensidad y los argumentos los ángulos que forma con dos de los ejes de coordenadas en el espacio. Una forma más habitual de expresar un vector es por tres números que representan las coordenadas de sus extremos respecto a un sistema de ejes cartesianos.

Las tres cantidades que definen el vector se denominan sus componentes.

Los tensores de segundo orden son cantidades físicas que representan, en general, infinitos vectores o que expresan una propiedad que permite establecer una relación entre dos vectores. El **tensor de esfuerzo** se encuentra entre los del primer tipo.

Normalmente, un tensor de segundo orden necesita 9 cantidades o componentes para ser definido. En el caso del tensor de esfuerzo, se eligen los tres planos, perpendiculares a cada uno de los tres ejes cartesianos de coordenadas y se escogen, en cada plano, tres componentes del vector esfuerzo que actúa sobre él: la componente normal y las dos componentes de cizalla que actúan según las

direcciones paralelas a los ejes de coordenadas paralelas al plano (Fig. 4). Las componentes se denotan como σ_{ij} , donde i es el eje de coordenadas al cual es perpendicular el plano en cuestión, y j es el eje al cual es paralela la componente.

El tensor de esfuerzos se expresa entonces como:

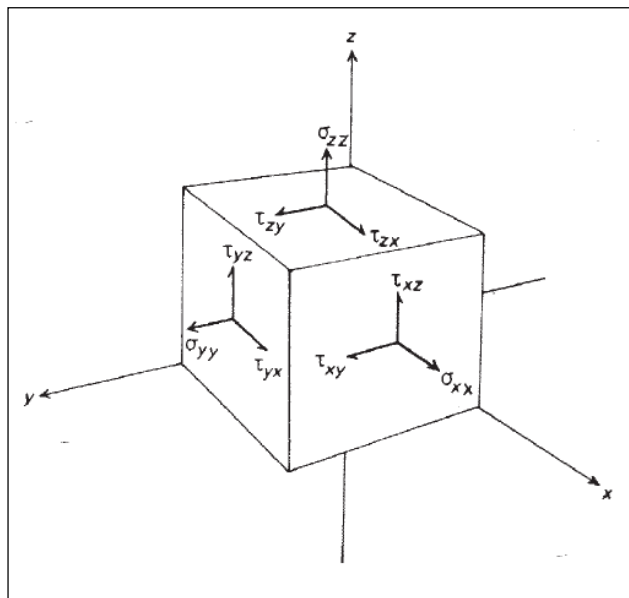
$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

Ecuación 7

$$, \text{ o bien } \sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

Ecuación 8

Figura 4. Las nueve componentes de un estado de esfuerzo.



Fuente. HOBBS, B. E.; MEANS, W. D. & WILLIAMS, P. F.- Geología Estructural. Ed. Omega, 518 pp. 1981.

1.4 DEFORMACIÓN

1.4.1 Definición y tipos

La **deformación** se define como cualquier cambio en la posición o en las relaciones geométricas internas sufrido por un cuerpo como consecuencia de la aplicación de un campo de esfuerzos. Ésta puede constar de hasta cuatro componentes: translación, rotación, dilatación y distorsión⁸. En el caso general, una deformación las incluye a todas, pero deformaciones particulares pueden constar de tres, dos o una de las componentes.

Las deformaciones son causadas por esfuerzos, de forma que ambos conceptos están ligados por una relación de causa a efecto. Aparte de ser conceptos distintos, hay una diferencia en el tratamiento de unos y otras que merece la pena destacar: los esfuerzos se definen y se analizan para un instante dado, mientras que las deformaciones miden cambios producidos en un intervalo de tiempo y se analizan comparando un estado final con uno inicial.

Las dos primeras componentes de la deformación producen cambios en la posición del cuerpo, pero no de su forma ni de sus relaciones geométricas internas. Ante deformaciones de ese tipo, el cuerpo se mueve como un objeto rígido y, por ello, se llaman **deformaciones de cuerpo rígido** o **movimientos rígidos**. Las dos últimas componentes producen cambios en la forma y/o en las relaciones geométricas internas. Por ejemplo, una dilatación no cambia la forma, pero aproxima o aleja unas partículas y otras, con lo que las relaciones geométricas internas resultan modificadas. La distorsión cambia la forma general del cuerpo y sus relaciones geométricas internas.

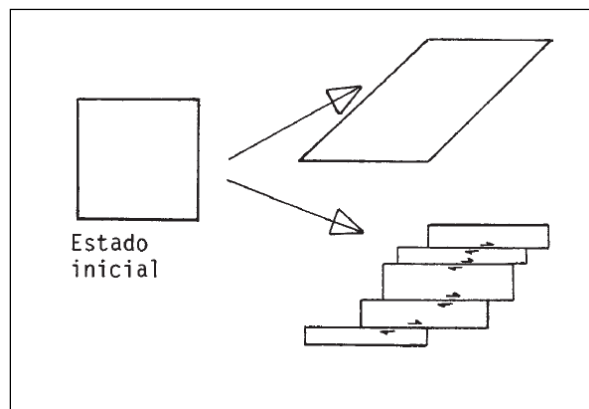
⁸ ELLIOT, D. Deformation paths in structural Geology. Geological Society of America Bulletin 83, 1972.

Las partículas se alejan o se aproximan y las líneas cambian el ángulo que forman entre sí. Esto produce translaciones y rotaciones dentro del cuerpo que ya no se está comportando rígidamente.

Por tanto, estas translaciones y rotaciones son diferentes de las que producen una translación o rotación de todo el cuerpo y que son llamadas movimientos rígid, y se engloban dentro del término **deformación interna** (“*strain*”).

La deformación interna puede clasificarse atendiendo a distintos criterios. El primero de ellos es la continuidad: si una deformación interna no separa ningún par de puntos materiales que estuvieran juntos antes de la deformación se dice que es **continua** o **afín**. En el caso contrario se denomina **discontinua** o **no afín** (Fig. 5). Este último caso implica que han intervenido discontinuidades, bien porque han sido creadas por la deformación en cuestión, bien porque ya existían y han sido utilizadas por la deformación.

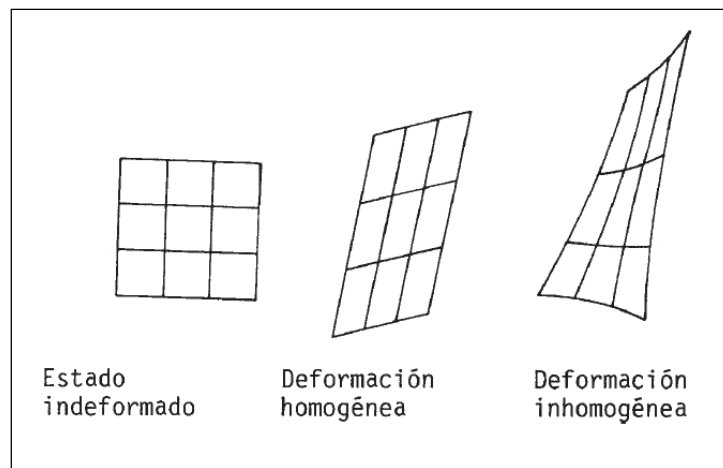
Figura 5. Deformación continua o afín (arriba) o discontinua o no afín (abajo).



Fuente. DAVIS, G.H. Structural Geology of rocks and regions. Cap. 4. 1984

Otro criterio que se utiliza para clasificar la deformación interna es el de los resultados físicos⁹. Según él, se clasifica en frágil y dúctil. La **deformación frágil** (“brittle”) es la que produce rotura, mientras que la **deformación dúctil** (“ductile”) se realiza sin que el cuerpo se fracture. Es obvio que la deformación frágil es discontinua y que la dúctil es continua.

Figura 6. Deformación homogénea y no homogénea.



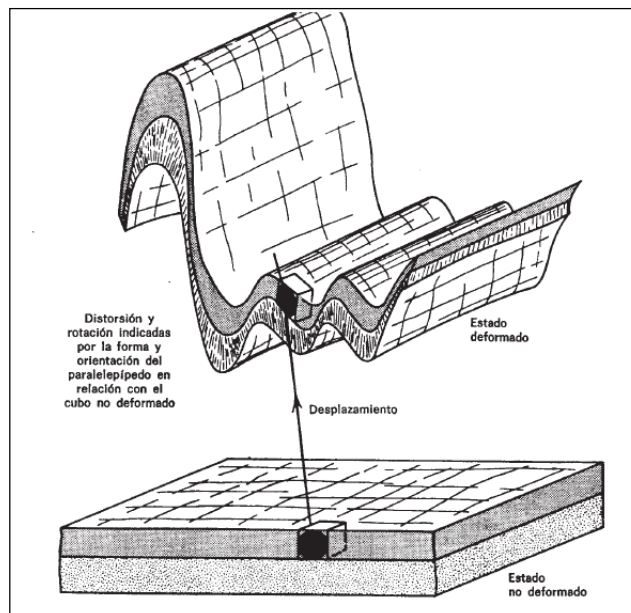
Fuente. DAVIS,G. Structural Geology of rocks and regions. Cap. 4. 1984

La deformación dúctil puede subdividirse en elástica y permanente. **Deformación elástica** es aquella en la cual se produce deformación por aplicación de un campo de esfuerzos pero si los esfuerzos se retiran, la deformación se pierde, recuperando el cuerpo su forma original. Las **deformaciones plástica** y **viscosa** son dos tipos de deformación continua en los que ésta permanece aun cuando el esfuerzo sea retirado, por lo que se denomina **deformación permanente**.

⁹ ELLIOT, D. Deformation paths in structural Geology. Geological Society of America Bulletin 83, 1972.

Según la geometría del resultado de la deformación interna, ésta se clasifica en homogénea y no-homogénea o heterogénea. En una **deformación homogénea**, las líneas que eran rectas antes de la deformación siguen siéndolo después y las rectas paralelas siguen siendo paralelas (Fig. 6). En una **deformación no-homogénea** las condiciones anteriores no se cumplen. La Fig. 7 representa el plegamiento de dos capas. La deformación en este caso es continua y no-homogénea¹⁰.

Figura 7. Deformación por plegamiento de dos capas.



Fuente. DAVIS, G. Structural Geology of rocks and regions. Cap. 4. 1984

Los flancos de los pliegues han experimentado una rotación rígida y, además, una cierta distorsión, marcada por la diferencia entre la forma cúbica del pequeño elemento dibujado en la capa superior y el paralelepípedo en el que se ha

¹⁰ FLINN, D. On folding during three dimensional progressive deformation. Geological Society of London 118, Bulletin 118, 1962-

transformado. Obsérvese que ese pequeño elemento ha sufrido un desplazamiento desde su posición inicial, que se ha expresado por un vector.

Cualquier deformación puede especificarse por los desplazamientos experimentados por los puntos del cuerpo. Se define **vector desplazamiento** como el vector que une la posición de un punto antes y después de la deformación. Ese vector no indica el camino seguido por el punto, sino que se limita a relacionar sus posiciones inicial y final.

1.5 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS ROCAS

1.5.1 Comportamiento elástico

El **comportamiento elástico**, también denominado **Hookeano** o de Hooke, en honor al físico que lo investigó, es aquel en el cual existe una relación lineal, es decir, de proporcionalidad directa, entre el esfuerzo aplicado y la deformación obtenida y, además, la respuesta es instantánea¹¹. Un **cuerpo perfectamente elástico** que se deformase una cierta cantidad al serle aplicado un esfuerzo, se deformaría exactamente el doble al serle aplicado un esfuerzo doble del anterior. Además, la deformación se alcanzaría instantáneamente en cada caso. Si el esfuerzo dejase de aplicarse, la deformación desaparecería, recuperando de nuevo el cuerpo su forma original.

El elemento mecánico que muestra un comportamiento similar es un muelle perfecto. La ecuación constitutiva es en este caso:

$$\sigma = E \cdot e$$

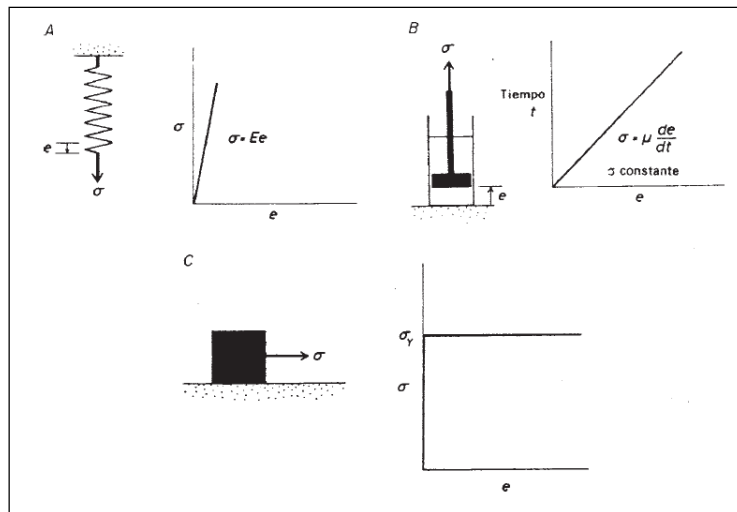
Ecuación 9

¹¹ JAEGER, J. y COOK, N. Fundamentals of rock mechanics. Londres: Ed. Chapman and Hall, 1979. 593 pp.

Donde σ es el esfuerzo aplicado en una dirección, e la elongación en esa dirección y E una constante de proporcionalidad característica de cada cuerpo elástico denominada **módulo de Young**. La relación esfuerzo-deformación es lineal y en un gráfico vendría representada por una recta que pasa por el origen (Fig.8 A). La tangente de esa recta es el módulo de Young.

Figura 8. Los cuerpos teóricos elementales y sus analogías mecánicas.

A- comportamiento elástico. B comportamiento viscoso. C- comportamiento plástico.



Fuente. JAEGER, J. C. y COOK, N. G. W.- Fundamentals of rock mechanics. Ed. Chapman and Hall (London), 593 pp.1979

En la Fig. 9 puede apreciarse lo que le sucede a un bloque de roca elástica sometida a un esfuerzo σ . La elongación longitudinal, es decir, en la dirección de aplicación del esfuerzo, es:

$$e = \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right)$$

Ecuación 10

Mientras que la transversal, perpendicular al esfuerzo, es:

$$e_t = \left(\frac{W - W_0}{W_0} \right)$$

Ecuación 11

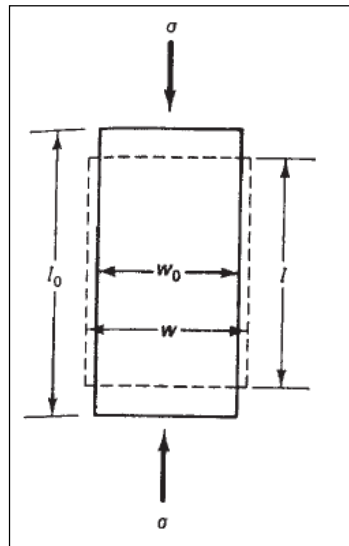
La relación entre la elongación transversal y la longitudinal se denomina **coeficiente de Poisson**:

$$v = e_t/e_l$$

Ecuación 12

Para rocas absolutamente incompresibles, el coeficiente de Poisson vale 0,5, pero en las rocas reales su valor es siempre menor de esa cantidad.

Figura 9. Deformación elástica de un bloque de roca.



Fuente. JAEGER, J. C. y COOK, N. Fundamentals of rock mechanics. Ed. Chapman and Hall (London), 593 pp.1979

Anteriormente, se definió la ecuación constitutiva para el caso de una deformación por cizallamiento puro causada por la aplicación de un esfuerzo normal. Si se aplica un esfuerzo de cizalla, se obtiene una deformación por cizallamiento simple cuya ecuación es:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

Ecuación 13

Donde τ es el esfuerzo de cizalla, γ el valor de la cizalla y G la constante de proporcionalidad que, en este caso, se denomina **módulo de rigidez** o **módulo de cizalla**.

1.5.2 Comportamiento viscoso

El **comportamiento viscoso** se caracteriza por una relación de proporcionalidad directa entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación obtenida. En este caso, la deformación es permanente, es decir, no desaparece si se elimina el esfuerzo. Se define expresamente para un esfuerzo de cizalla y una deformación por cizallamiento simple:

$$\dot{\gamma} = f(t)$$

Ecuación 14

Donde $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación por cizalla ($\dot{\gamma} = \gamma/t$, siendo t el tiempo) y τ el esfuerzo de cizalla (un punto encima del signo que indica un parámetro suele indicar velocidad de ese parámetro). Si la relación es lineal, se denomina **comportamiento viscoso lineal** o **Newtoniano**, en honor de Newton. En este caso, la ecuación constitutiva es:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Ecuación 15

1.5.3 Comportamiento plástico

Se denomina **comportamiento plástico perfecto** o de **Saint Venant**, al de los materiales que no se deforman en absoluto hasta que el esfuerzo aplicado alcanza un cierto valor. Una vez alcanzado ese valor o **esfuerzo de cesión**, el cuerpo se deforma de manera continua hasta que el esfuerzo sea retirado o disminuya, en cuyo caso, la deformación alcanzada permanece, es decir, el cuerpo no se recupera en absoluto.

El elemento mecánico que simula un comportamiento plástico es un peso apoyado sobre una superficie (Fig. 8 C). Si se le aplica una fuerza pequeña, el rozamiento de su cara inferior con la superficie crea una fuerza igual y de sentido contrario que se opone al movimiento y que es consecuencia de la fuerza de rozamiento. La fuerza de rozamiento es igual al peso del cuerpo multiplicado por el coeficiente de rozamiento entre él y la superficie y por su superficie basal. Una vez que la fuerza aplicada es igual o mayor a la fuerza de rozamiento, el cuerpo empieza a moverse con movimiento uniforme, es decir, velocidad constante, y sigue haciéndolo mientras la fuerza aplicada mantenga su valor.

En el caso de estados de esfuerzo triaxiales, el esfuerzo de cesión es un esfuerzo diferencial, y la ecuación constitutiva elemental es:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = K$$

Ecuación 16

Donde k es una constante para el **material perfectamente plástico**. Si se alcanza este valor, la deformación procede de tal forma que los ejes principales del elipsoide de deformación incremental son paralelos a los del elipsoide de esfuerzo, y las relaciones entre los ejes del primero son proporcionales a las de los esfuerzos principales. El factor de proporcionalidad que relaciona esfuerzo y deformación no

es una constante física y varía de unos puntos a otros dentro del material, por lo que no es comparable a la viscosidad.

A diferencia de los dos comportamientos descritos previamente, el comportamiento plástico no implica que para cualquier esfuerzo se produzca una deformación interna. En detalle, las ecuaciones constitutivas para casos tridimensionales son complicadas en cualquiera de los comportamientos anteriores y para calcularlas y aplicarlas se utiliza el álgebra tensorial. Las más complicadas son, no obstante, las del comportamiento plástico, debido a la falta de relación entre esfuerzo y deformación cuando no se alcanza el esfuerzo diferencial necesario para la cesión y a que, cuando éste se alcanza, el factor de proporcionalidad varía a lo largo del cuerpo, incluso si este es inicialmente homogéneo, y es necesario efectuar una serie de asunciones o suposiciones para calcularlo.

2. CONCEPTUALIZACIÓN GENERAL Y GEOMECÁNICA DE FALLAS GEOLÓGICAS

2.1 FALLAS¹²

Son superficies en las que se ha producido un movimiento relativo de un bloque respecto a otro, siguiendo una dirección paralela a la propia superficie. Generalmente, suelen producirse varias fallas con características geométricas y cinemáticas similares, formando una zona de falla. Las fallas son unas estructuras muy importantes en la organización tectónica de la corteza terrestre, por ejemplo, son los límites entre las placas litosféricas. El conjunto de materiales que queda a un lado y otro de la fractura se llama bloque de falla. De acuerdo con la inclinación de la superficie de falla, se define el bloque superior (“hanging wall block”) como aquel que queda por encima del plano de falla; el bloque inferior (“footwall block”) es aquel que queda por debajo del plano de falla. Para el caso de las fallas verticales, cada uno de los bloques puede indicarse según la posición geográfica que ocupa uno con respecto a otro. De esta manera se habla de bloque meridional, septentrional, occidental u oriental. En un afloramiento puede haber fallas generadas en distintos momentos como una respuesta mecánica diferente según las condiciones físicas del medio y la orientación del campo de esfuerzos que las ha originado. Se llama familia de fallas al conjunto de fallas presentes en un afloramiento o en un sector concreto, siempre que tengan orientaciones similares.

Un modelo sencillo de generación de fallas a poca profundidad es conocido como la **teoría de fracturación de Anderson**. La teoría asume un comportamiento de tipo Coulomb y predice que se formarán fallas normales allí donde el esfuerzo vertical sea el esfuerzo máximo, fallas inversas donde el esfuerzo vertical sea el mínimo y fallas de desgarre donde el esfuerzo vertical sea el intermedio.

¹² OROZCO, Miguel. Et al.: Geología física. Editorial Thomson Learning, 2002. 302 p.

Las fallas no se crean en su totalidad en un instante dado. Por el contrario, primero se crea una pequeña fractura que después se va propagando de forma más o menos radial. La zona donde se ha producido translación es la falla y se termina en la **línea terminación**. La translación es mayor en el centro de la falla y se va amortiguando hacia la línea terminación. La zona donde la falla se está propagando se adapta a la envolvente de Mohr, lo que quiere decir que sigue el criterio de Coulomb de forma muy aproximada. Sin embargo, en la zona donde la fractura ya se ha producido, los esfuerzos no tienen que superar la resistencia cohesiva. En esa parte de las fallas y en fallas que se deslizan sin continuar propagándose en sus extremos, la condición de movimiento viene dada por un criterio de Coulomb modificado:

$$\tau = A_o + \mu \sigma$$

Ecuación 17

Donde A_o es la adherencia, es decir, la fuerza que tiende a mantener unidos los dos labios de la falla una vez que ya se ha producido la rotura. De manera precisa, puede definirse **adherencia** como el esfuerzo necesario para mover los dos labios de una falla previamente creada, cuando el esfuerzo normal que actúa sobre ella es cero.

2.1.1 Suposiciones fundamentales de Anderson¹³

E.M. Anderson en 1942 definió tres grupos de fallas que pueden estar relacionados con el esfuerzo principal y de cizalla en la tierra. Al hacer esto, el primero definió un “standar state” como:

¹³ **HATCHER, Robert.** Structural geology: principles, concepts, and problems. New Jersey: Printed by Prentice Hall, 1995. 525 p. ISBN 0-02355713-3.

“...una condición de esfuerzo la cual es la misma en todas las direcciones en cualquier punto, e igual a la que podría ser causada por el peso del material supradyacente, a través de un plano horizontal a nivel particular en la roca. Se supone en esta definición que la superficie es plana y que los estratos son de gravedad específica uniforme”.

En consecuencia, el “standar state” planteado representa un sistema de esfuerzos compuesto por dos partes:

- 1) La fuerza de gravedad
- 2) Un esfuerzo horizontal superpuesto que permanece constante en cualquier plano horizontal pero aumenta con la profundidad, debido al incremento del peso de la columna litostática (Hafner, 1951).

Anderson (1942) hizo varias suposiciones sobre el esfuerzo en la tierra aplicable a los otros planetas diferenciados, suposiciones que aún son usadas en la mecánica de fallas:

- 1) La corteza era inicialmente intacta y no fracturada.
- 2) La dirección del esfuerzo principal es vertical.
- 3) Los otros dos esfuerzos principales, que son perpendiculares al primero y uno con respecto al otro, deben ser horizontales y probablemente mantuvieron una orientación constante durante miles de millones de años.
- 4) Las fuerzas deben balancearse una con respecto a la otra en un cuerpo en equilibrio.

Anderson también reconoció que la orientación del esfuerzo en la corteza superior puede diferir de una región a otra.

Siguiendo sus suposiciones, Anderson sugirió tres posibilidades de desviarse de las condiciones de esfuerzo litostático:

- 1) Los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 son horizontales. El mínimo esfuerzo principal σ_3 es vertical, y la inclinación del plano de falla debería ser $45^\circ - \varphi/2$ (Cerca de 30°).
- 2) El máximo y mínimo esfuerzo principal σ_1 y σ_3 son horizontales, lo cual implica que el esfuerzo intermedio σ_2 es vertical y que el plano de falla tendrá una inclinación casi vertical.
- 3) El esfuerzo principal σ_1 es vertical. Por lo tanto, el plano de falla se inclinará $45^\circ + \varphi/2$ (cerca de 60°).

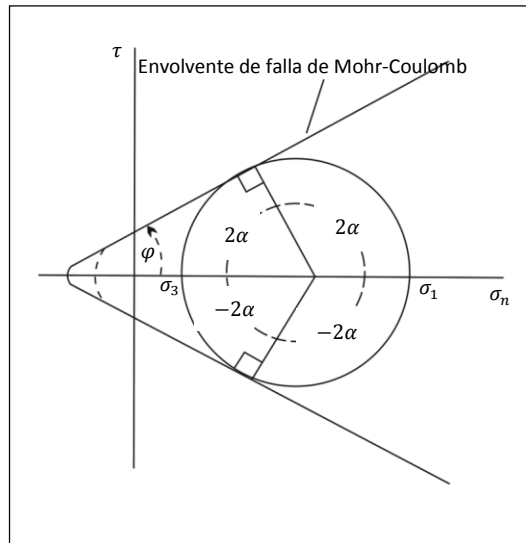
Cada una de las tres condiciones describe el esfuerzo en un importante grupo de falla: fallas inversas, fallas rumbo-deslizantes y fallas normales.

Mucho tiempo después de que Coulomb formuló la teoría de fractura de cizalla en 1776, Navier observó en 1883 que la ruptura no ocurre en los planos del esfuerzo máximo de cizalla que divide los ángulos entre el mayor y menor de los esfuerzos principales. El sugirió que la “fricción interna” era la responsable de la diferencia y propuso una constante que él llamo el *coeficiente de fricción interna*. La observación de que σ_1 (esfuerzo principal máximo) corta el ángulo agudo entre el plano de cizalla de la elipsoide de esfuerzos es llamada *regla de Hartman*. Este ángulo (2α) comúnmente se encuentra entre 60° y 90° debido a que el ángulo de cizalla depende del ángulo de fricción (φ) en el diagrama de Mohr (Fig. 10).

Las fallas pueden ser clasificadas de acuerdo al esquema de Anderson (Zoback, 2007) como normal o extensionales, rumbo-deslizantes e inversas como una función del esfuerzo vertical (σ_v) y el esfuerzo horizontal máximo y mínimo (σ_H y σ_h).¹⁴ (Fig. 11)

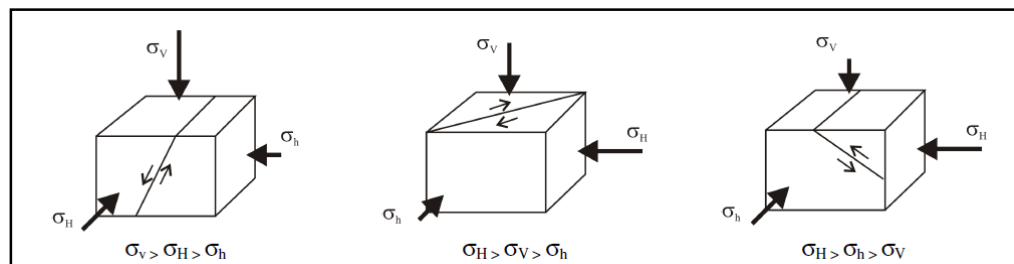
¹⁴ NACHT, P. et al.: Investigation of geological fault reactivation and opening. Asociación Argentina de mecánica computacional, 2010.

Figura 10. Diagrama de Mohr mostrando las relaciones entre ϕ , θ , α y la envolvente de falla de Mohr-Coulomb.



Fuente. HATCHER, Robert D. Structural geology: Principles, concepts and problems. Segunda edición. New Jersey, 1995

Figura 11. Clasificación de Anderson.

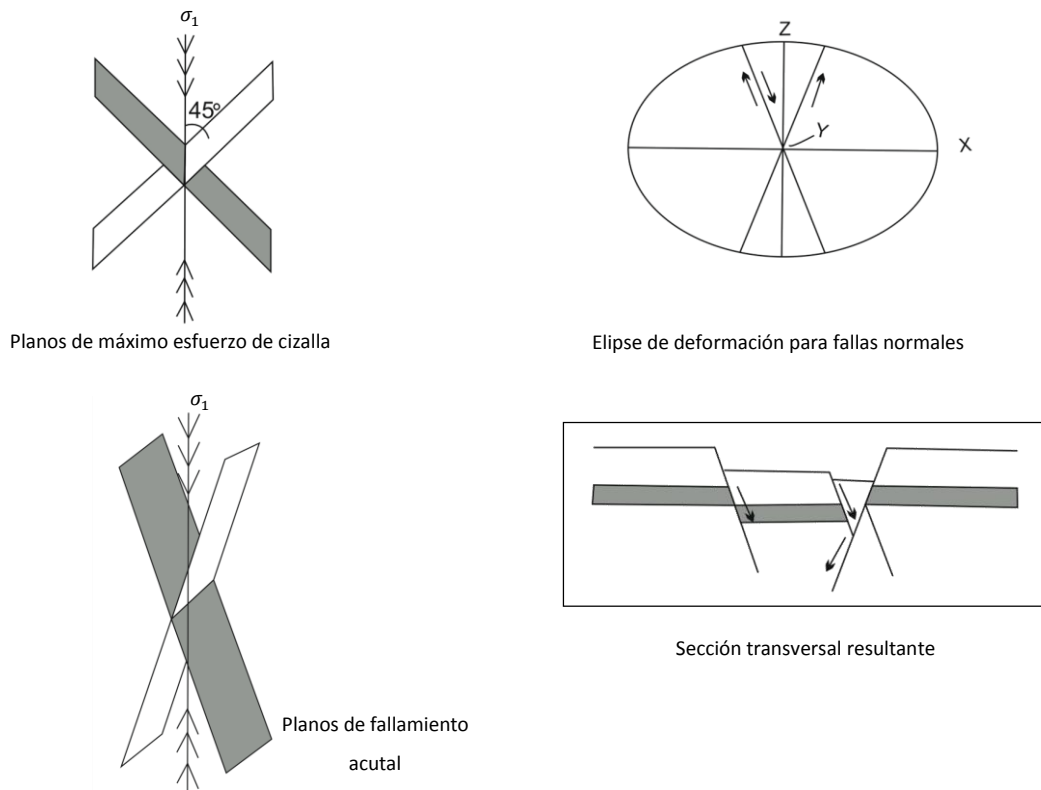


Fuente. NATCH, Pedro, et al. Investigation of Geological Fault Reactivation and Opening. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2010.

2.1.2 Fallas normales

El fallamiento normal implica extensión en la dirección horizontal, con el esfuerzo principal máximo (σ_1) vertical (Fig 12). El plano de cizalla puede esperarse a 45° o menor a los ejes del esfuerzo principal máximo y mínimo y deformación respectivamente. Por lo tanto, ellos formarán planos de falla inclinados localizados simétricamente con respecto al eje vertical¹⁵.

Figura 12. Estado de esfuerzos para fallamiento normal.



Fuente. HATCHER, Robert D. Structural geology: Principles, concepts and problems. Segunda edición. New Jersey, 1995

¹⁵ HATCHER, Robert. Structural geology: principles, concepts, and problems. New Jersey: Printed by Prentice Hall, 1995. 525 p. ISBN 0-02355713-3.

Las fallas normales se producen por un deslizamiento en buzamiento, de tal manera que el bloque de techo se mueve hacia abajo con respecto al bloque de muro que, en términos relativos queda elevado. De la descripción del movimiento relativo entre bloques se deduce que, como resultado de la deformación, se produce una extensión paralela a la dirección de movimiento y de adelgazamiento -acortamiento- en la dirección perpendicular. Aquella parte de la corteza terrestre que está afectada por este tipo de fallas ha sufrido una extensión horizontal, de ahí que estas estructuras sean conocidas como fallas extensionales.

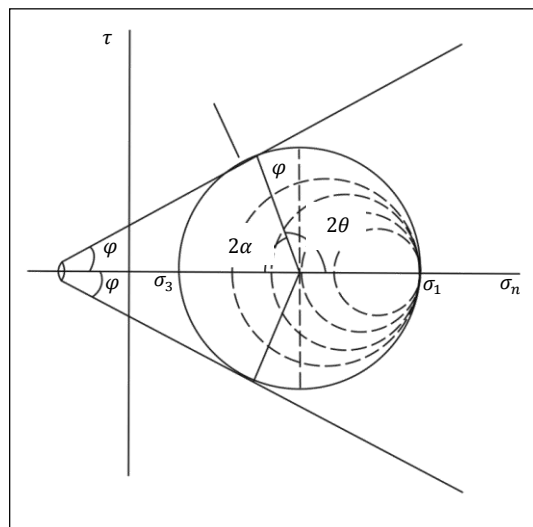
Las fallas normales pueden variar su forma en profundidad, de hecho es frecuente observar a distintas escalas – en afloramiento y en perfiles sísmicos a nivel cortical – el carácter lístrico de estas estructuras. Las diferencias mecánicas entre distintos materiales favorece la geometría curva (cóncava hacia arriba) de las fallas extensionales. Así, mientras que los tramos superiores de las fallas están fuertemente inclinados cerca de la superficie, en profundidad se desarrollan planos prácticamente horizontales, en los cuales convergen otras fallas secundarias, ya sean planas o curvas. Como consecuencia de la curvatura del plano de falla, se producen rotaciones en el bloque de techo que tienden a inclinar las capas en sentido contrario al del buzamiento del plano de cizalla, es decir, el sentido de rotación de la cizalla es opuesto al de rotación de las capas en el bloque de techo.

La rotación de los materiales se produce por la adaptación del bloque de techo a la forma de la superficie curva del bloque de muro, ya que entre ambos no deben quedar huecos. En relación con esta adaptación se generan unos pliegues conocidos como antiformes de tipo “roll-over”. Las asociaciones de fallas normales, en concreto de familias conjugadas, pueden producir zonas que quedan elevadas respecto a otras hundidas y limitadas por fallas normales, denominándose “horst” y “graben” tectónicos, respectivamente. Si predomina una familia de fallas más que su correspondiente conjugada, se denominan a las primeras fallas sintéticas y a las segundas fallas antitéticas.

Las fallas extensionales son necesarias en diversos procesos geológicos para compensar el estiramiento, por ejemplo, de estructuras dómicas relacionadas con la intrusión de materiales salinos o del magma. En concreto, en las partes más altas de los diapiros de sal se desarrollan familias de fallas conjugadas con cierta simetría radial cuando la morfología en planta es aproximadamente circular. Si la estructura dómica está alargada en una determinada dirección, suelen aparecer familias de fallas paralelas y transversales a dicha dirección. Las fallas normales son las estructuras más importantes que se producen en las dorsales oceánicas.

Los análisis del círculo de Mohr del fallamiento normal pueden ser considerados como punto de partida a una gran presión de confinamiento, con σ_3 decreciendo hasta que el tamaño del círculo produce una diferencia de esfuerzos ($\sigma_1 - \sigma_3$) lo suficientemente grande para alcanzar la envolvente de falla (Fig 13). Al igual que con los otros tipos de fallas, otros medios pueden ser usados para incrementar la diferencia de esfuerzos y causar falla.

Figura 13. Análisis del círculo de Mohr para fallamiento normal.

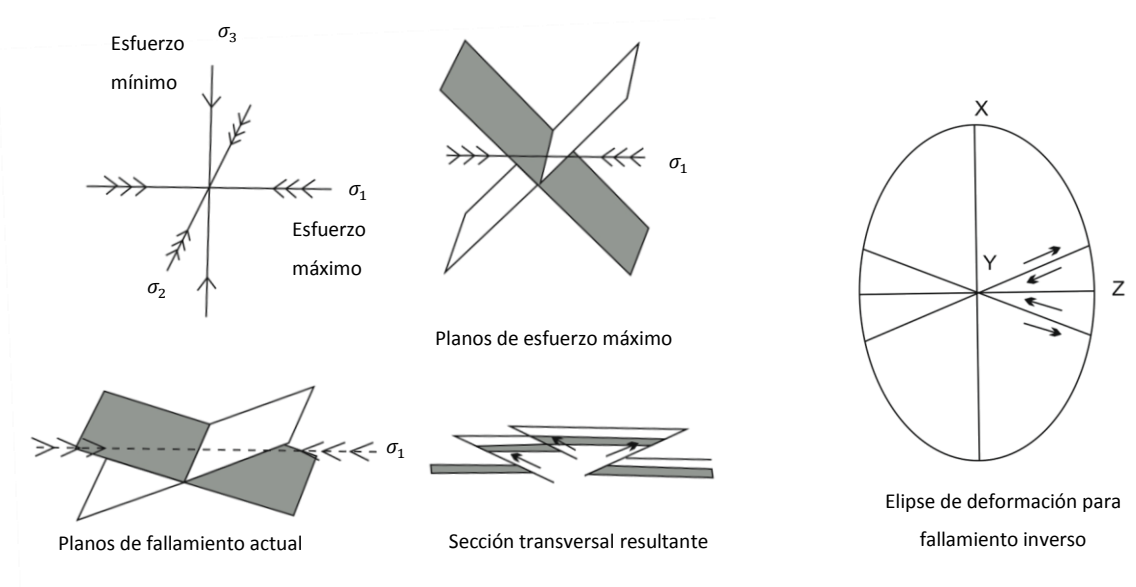


Fuente. HATCHER, Robert D. Structural geology: Principles, concepts and problems. Segunda edición. New Jersey, 1995.

2.1.3 Fallas inversas y cabalgamientos

Las fallas inversas ideales pueden ser definidas mecánicamente como fallas producidas por el esfuerzo principal máximo e intermedio orientados horizontalmente, con el esfuerzo principal mínimo orientado verticalmente (Fig. 14). Por lo tanto, un estado de compresión horizontal se define por fallamiento inverso. Los planos de falla comúnmente forman pequeños ángulos debido a las heterogeneidades en las rocas y a la complejidad del proceso de deformación.

Figura 14. Orientación de los esfuerzos principales para fallamiento inverso.



Fuente. HATCHER, Robert D. Structural geology: Principles, concepts and problems. Segunda edición. New Jersey, 1995

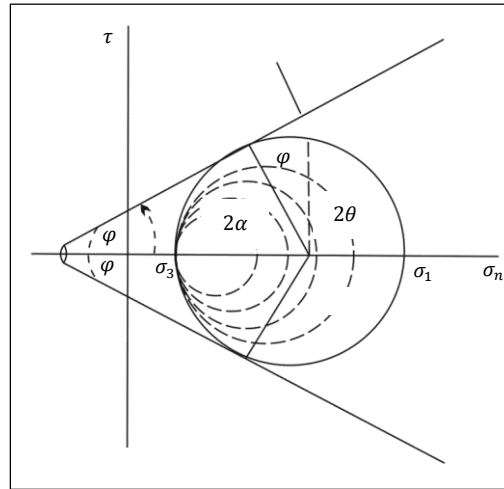
Son fallas en las que se ha producido un deslizamiento en buzamiento de tal manera que el bloque de techo asciende con respecto al bloque de muro. Cuando el plano de falla buza menos de 45° , se denomina cabalgamiento y, si la inclinación es mayor, la fractura se llama falla inversa. En relación con estas estructuras se origina

un acortamiento horizontal de la corteza a la vez que se incrementa su espesor. Para una misma cantidad de desplazamiento, el acortamiento es mayor en los cabalgamientos. Este tipo de fallas suelen ocasionar repeticiones de las secuencias litoestratigráficas y, en general, hacen que las rocas más profundas y más antiguas se emplacen sobre otras más superficiales y más jóvenes. Las fallas inversas y los cabalgamientos se desarrollan preferentemente en marcos tectónicos donde se produce convergencia litosférica, por ejemplo en las zonas de subducción o en las áreas donde hay o ha habido colisión continental. Los cabalgamientos son las estructuras que canalizan las deformaciones que implican importantes acortes horizontales.

Cuando el bloque de techo se desplaza una distancia bastante mayor que su propio espesor, se llama manto de cabalgamiento (“thrust sheet” o “nappe”). De todo lo expuesto hasta ahora, se puede deducir que la lámina superior (bloque de techo o manto de cabalgamiento) se ha trasladado una distancia considerable y ocupa finalmente una posición bastante alejada respecto al lugar de procedencia, por eso se le denomina alóctono; y para el conjunto inferior se reserva el término autóctono (al menos relativo, ya que éste, a su vez, puede cabalgar sobre otro conjunto tectónico).

Los análisis del círculo de Mohr para fallamiento inverso (Fig. 15) puede implicar sucesivamente el aumento de los valores de σ_1 , generando círculos de radios más grandes hasta que la envolvente de falla es alcanzada. Alternativamente, el valor de σ_3 puede ser disminuido por erosión para permitir que la envolvente de falla sea alcanzada.

Figura 15. Análisis del círculo de Mohr para fallamiento inverso.



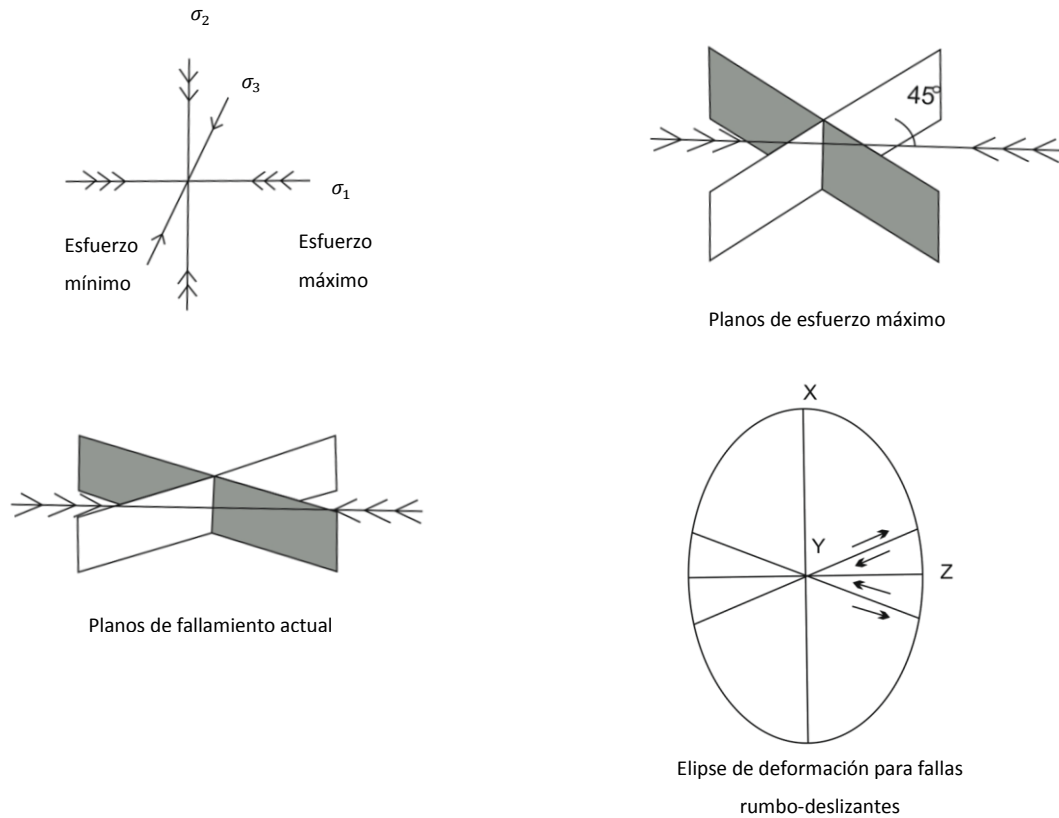
Fuente. HATCHER, Robert D. Structural geology: Principles, concepts and problems. Segunda edición. New Jersey, 1995

2.1.4 Fallas rumbo-deslizante

Si los ejes del esfuerzo principal compresivo máximo y mínimo son horizontales y el eje del esfuerzo principal intermedio es vertical, las condiciones son adecuadas para que se presente fallamiento rumbo-deslizante (Fig. 16).

Son fallas en las que se produce un desplazamiento horizontal entre los bloques, por lo que la mayor parte del deslizamiento es paralelo a la dirección de la fractura. Si se mantiene fijo uno de los bloques, el otro se desplazará hacia un sentido u otro, lo que permite establecer un desplazamiento relativo de tipo dextral o sinistral. Independientemente del adjetivo que se utilice para indicar la rotación de la cizalla (dextrógira vs. Levógira; dextrorsa vs. Sinistrorsa).

Figura 16. Orientaciones de los esfuerzos principales para fallas rumbo-deslizantes.



Fuente. HATCHER, Robert D. Structural geology: Principles, concepts and problems. Segunda edición. New Jersey, 1995

En relación con las fallas de desplazamiento lateral existe una amplia variedad de conceptos utilizados con diversas connotaciones tal y como se indican a continuación: Fallas transformantes son los límites entre placas litosféricas en los que se produce un desplazamiento paralelo a la dirección de la fractura. La dimensiones de estas fallas puede ser de centenares de kilómetros y otros tantos de desplazamiento, como por ejemplo las que existen en los fondos oceánicos; allí las fallas transformantes son segmentos transversales al eje de la dorsal en donde se localizan sentidos de movimientos opuesto entre dos placas litosféricas. Las fallas transcurrentes son también fallas de orden mayor localizadas en el interior de

la corteza continental y no representan una placa. Las dimensiones y los desplazamientos pueden ser similares a los de las fallas transformantes. Las fallas de transferencia (“tear faults”) son de dimensiones relativamente pequeñas en comparación con los anteriores, generadas en relación con despegues horizontales ya sean de tipo contractivo o extensional. Estas fallas son aproximadamente paralelas a la dirección de transporte tectónico, tiene buzamientos altos y pueden acomodar cantidades de desplazamientos diferentes en distintos sectores del bloque de techo de despegue.

Estas fallas también son llamadas fallas de salto en dirección, ya que son estructuras con fuertes buzamientos, que comúnmente tienden a verticalizar a poca profundidad.

Los análisis del círculo de Mohr para fallas rumbo-deslizantes pueden ser los mismos de fallas inversas si existe suficiente esfuerzo diferencial para incrementar el tamaño de los círculos y alcanzar la envolvente de Mohr para cualquier tipo de falla. Con este criterio, incluso las fallas normales podrían ser consideradas “compresionales”

2.2 CRITERIO TEÓRICO DE FRACTURACIÓN DE COULOMB¹⁶

Esencialmente, existen dos tipos de fracturas en las rocas: las producidas por esfuerzos tensionales y las producidas por esfuerzos de cizalla. Las primeras se llaman **fracturas de tensión** y se producen según superficies aproximadamente perpendiculares a la dirección de aplicación del esfuerzo tensional.

Una vez creadas, las dos partes del cuerpo a ambos lados de la fractura tienden a separarse, dejando un hueco que puede ser ocupado por precipitados minerales o

¹⁶ MARTINEZ CATALAN, José. Geología estructural y dinámica global. Universidad de Salamanca: España, 2003. 429 p.

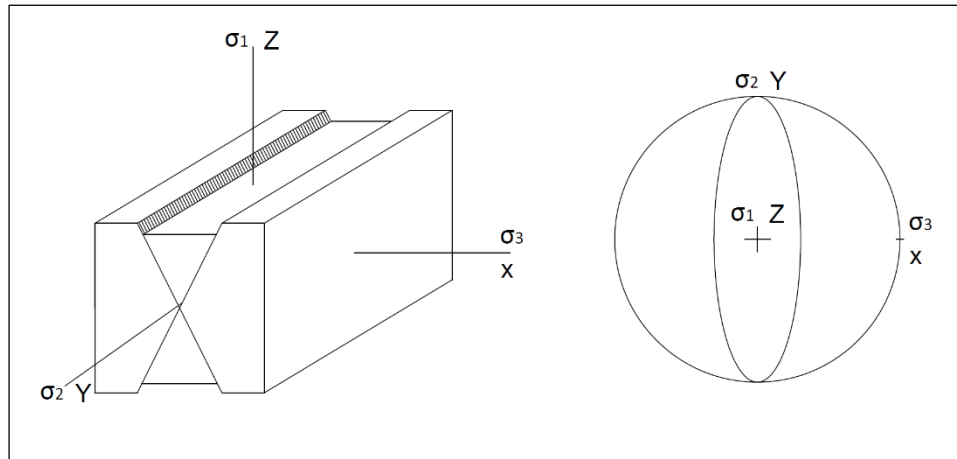
por material fundido que se encuentre en las proximidades. Cuando no se rellena, la fractura se denomina **grieta** si es grande y **fisura** si es pequeña. Si se rellena de material por precipitación a partir de fluidos se llama **filón**, si es grande, y **vena** si es pequeña. Cuando es ocupado por un magma da lugar a un **dique**.

En las producidas por esfuerzos de cizalla, denominadas **fracturas de cizalla**, los labios no tienden a separarse, sino que se deslizan uno sobre otro. Parece lógico, a primera vista, que una roca sometida a un estado de esfuerzo triaxial podría romperse si se alcanza el esfuerzo de rotura, que es un determinado valor del esfuerzo diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$) y que se rompería por los planos que están sometidos al máximo esfuerzo de cizalla, los cuales están a 45° de los esfuerzos mayor y menor y que contienen al esfuerzo principal intermedio. Esto daría lugar a dos familias de fracturas conjugadas perpendiculares entre sí. Sin embargo, esto no sucede ni en la naturaleza ni en el laboratorio y cuando se producen dos familias de fracturas conjugadas, el ángulo menor que forman es de entre 50° y 70° , siendo la bisectriz de este ángulo la dirección de aplicación del esfuerzo principal mayor (Fig. 17).

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Ecuación 18

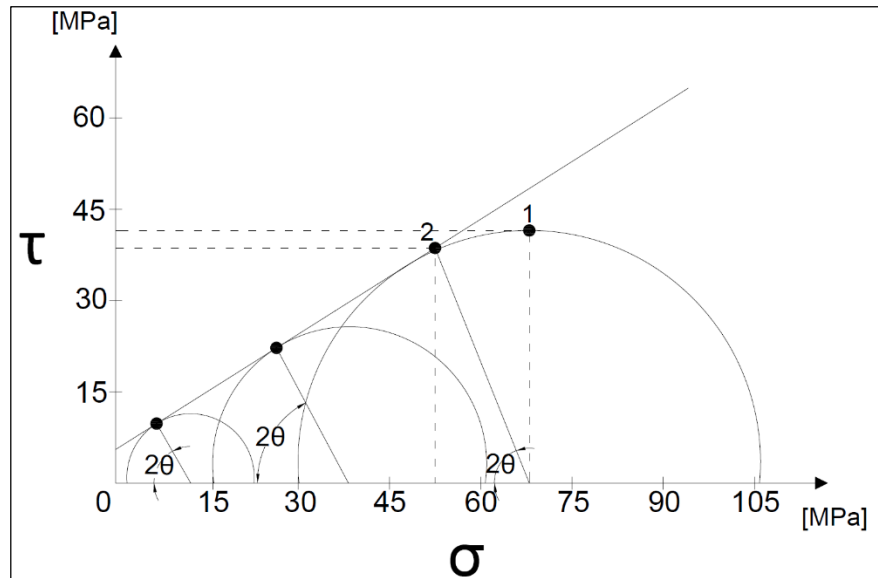
Figura 17. Planos de fractura y su relación con los esfuerzos principales.



Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

La razón de que esto suceda es que los planos sometidos al máximo esfuerzo de cizalla, están sometidos, también, a un esfuerzo normal bastante fuerte, en general, y que ese esfuerzo, actuando perpendicularmente al plano de posible fractura, tiende a impedir su movimiento, debido al rozamiento. En efecto, la fuerza de rozamiento que hay que superar para deslizar un labio de la falla sobre el otro depende del coeficiente de rozamiento, un parámetro característico del material, y del esfuerzo que tiende a juntar ambos labios. En la Fig. 18 puede apreciarse que para un estado de esfuerzo con $\sigma_1 = 107 \text{ MPa}$ y $\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$ (el mayor de los círculos de Mohr dibujados), el plano a 45° de σ_1 , representado por el punto 1 en el diagrama, sufre un $\tau = 40$ y un $\sigma = 68$, mientras que el plano a 33° de σ_1 , representado por el punto 2, tiene un $\tau = 37$ y un $\sigma = 53$. En el plano a 33° , el esfuerzo de cizalla es 3 unidades de esfuerzo menor que en el situado a 45° , pero el esfuerzo normal es 15 unidades menor. Aunque el plano a 45° sufre un esfuerzo de cizalla mayor, la roca tenderá a romper por el otro, debido a que el esfuerzo normal que se opone a su deslizamiento es mucho menor.

Figura 18. Criterio de Coulomb representado en un diagrama de Mohr.



Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

Una teoría o modelo de fracturación que se basa en las consideraciones anteriores fue propuesta por los físicos Coulomb y Navier, por lo que recibe el nombre de **criterio de Coulomb** o de **Navier- Coulomb**. Esta teoría o criterio propone que las rocas se rompen por planos en los que se cumple la ecuación:

$$\tau = C_0 + \mu \sigma$$

Ecuación 19

Donde τ y σ son las componentes de cizalla y normal sobre el plano, C_0 se denomina **resistencia cohesiva** o **cohesión primaria**, y es el esfuerzo de cizalla necesario para romper una roca por un plano en el cual el esfuerzo normal es cero. A veces se denota como τ_0 o como S ó S_0 (de “shear”: cizalla).

μ es el llamado **coeficiente de rozamiento interno** o **coeficiente de fricción** (y no tiene nada que ver con la viscosidad, pese a utilizarse el mismo signo). Multiplicado por el esfuerzo normal da el esfuerzo de rozamiento que hay que superar para producir deslizamiento.

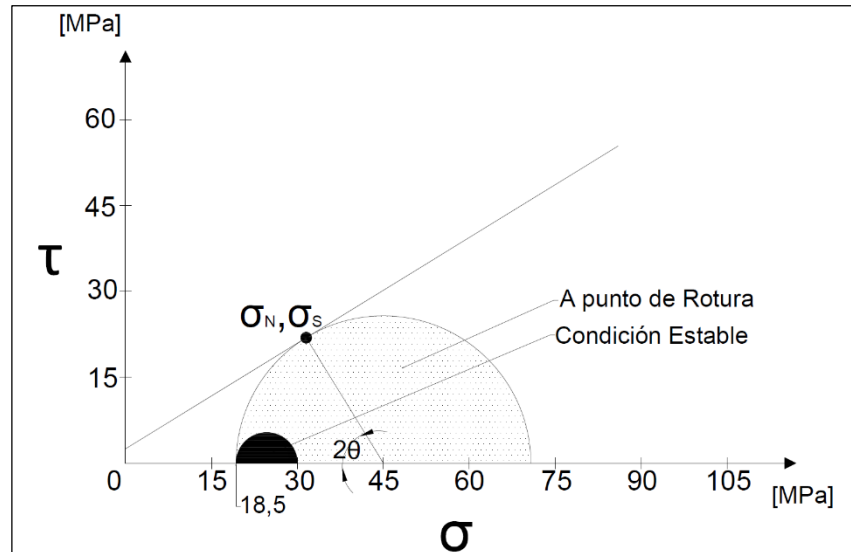
El significado del criterio es el siguiente: si en un plano de una roca el esfuerzo de cizalla supera la resistencia que la roca opone a la rotura, debida a la cohesión entre las partículas que la componen y, además, es capaz de vencer la fuerza de rozamiento que se opone al deslizamiento de los dos bloques de roca a ambos lados de dicho plano, la roca se romperá por él. La ecuación es la de una recta, llamada **envolvente de falla** y representada en la Fig. 18 como la tangente a los círculos de Mohr.

Supuestamente, cada roca estará caracterizada por una recta de ese tipo. La pendiente de la recta es el coeficiente de fricción, y su ordenada en el origen es la resistencia cohesiva. Si en un determinado estado de esfuerzo, el círculo de Mohr para los esfuerzos mayor y menor no toca a la recta, como en el caso del círculo negro de la Fig.19, no se producirán fracturas. Si el círculo toca a la recta, como en el caso del círculo gris, la roca se romperá por planos que forman con la dirección del esfuerzo mayor un ángulo θ .

Puede producirse rotura en un plano o en varios y, en este último caso, los planos pueden ser todos paralelos o pertenecer a dos familias distintas (conjugadas) que formarían entre sí un ángulo igual a 2θ .

En ningún caso el círculo de Mohr puede cortar a la recta en dos puntos, pues cuando es tangente en un punto, la roca rompe y no puede sostener esfuerzos diferenciales mayores. Por tanto, ningún plano de la roca puede soportar esfuerzos de cizalla y normales que se proyecten por encima de la envolvente de falla.

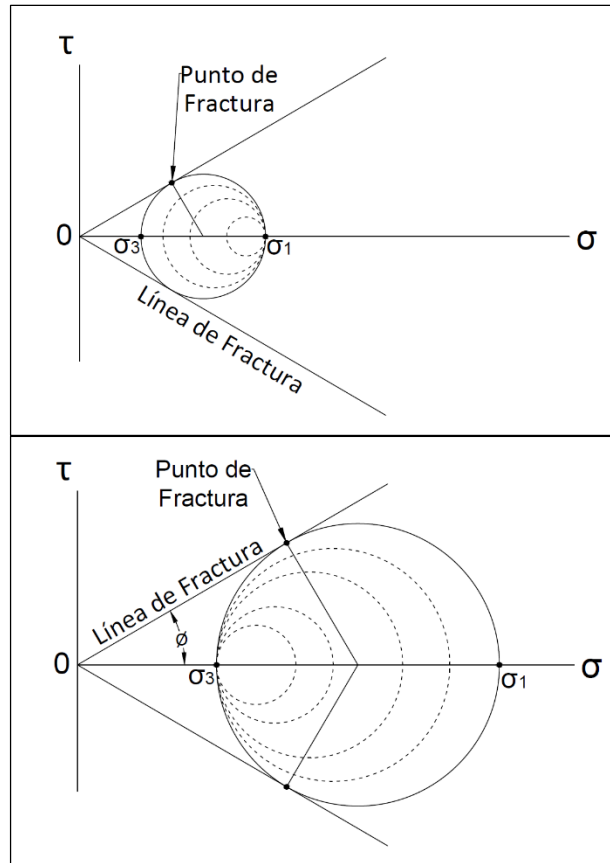
Figura 19. Criterio de Coulomb representado en un diagrama de Mohr.



Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

Aunque a menudo se representa sólo la parte superior del diagrama de Mohr cuando se trata de la envolvente de falla, hay que señalar que el diagrama completo incluye dos rectas simétricas con respecto al eje de abscisas. Eso se debe a que la ecuación se cumple tanto para valores de τ positivos (sinistral) como negativos (dextral). De hecho, las dos familias de fracturas conjugadas que pueden desarrollarse corresponden cada una a uno de los dos signos posibles de τ . La Fig. 20 muestra lo que sucede en dos experimentos diferentes con arena seca no consolidada, que es un material que se adapta perfectamente al criterio de Coulomb pero que carece de cohesión primaria. En el dibujo superior, se ha fijado σ_1 y se ha ido disminuyendo σ_3 (sucesivos círculos a trazos) hasta que el círculo de Mohr toca a la envolvente de falla definida por el criterio de Coulomb. En ese momento, se producirán fracturas.

Figura 20. Experimentos de fracturación realizados con arena seca.

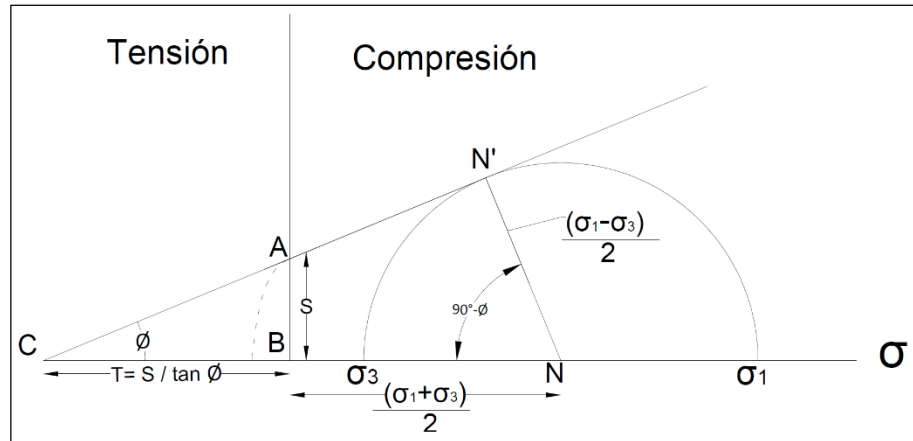


Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

En el dibujo inferior, se ha fijado σ_3 y se ha ido aumentando σ_1 hasta que el círculo de Mohr toca a la recta, produciéndose también falla en la roca. Como puede verse aquí y en la Fig. 18, hay infinitos estados de esfuerzo posibles que pueden provocar rotura en una roca determinada. Pero en una roca que se adapte perfectamente al criterio de Coulomb, los planos de rotura por cizalla siempre forman el mismo ángulo con σ_1 : el ángulo 2θ es siempre el mismo porque el radio del círculo de Mohr que pasa por el punto que representa el plano de rotura es perpendicular a la línea de fractura (Fig. 18). El ángulo que forma la recta con el eje de abscisas se suele denotar como ϕ y se denomina **ángulo de fricción** o **rozamiento interno**. Su

tangente es μ , y se relaciona con los planos de rotura por: $\varphi = 90 - 2\theta$ (Fig. 21). Los valores típicos de φ en las rocas oscilan entre 30° y 40° .

Figura 21. Significado de φ , T, S.



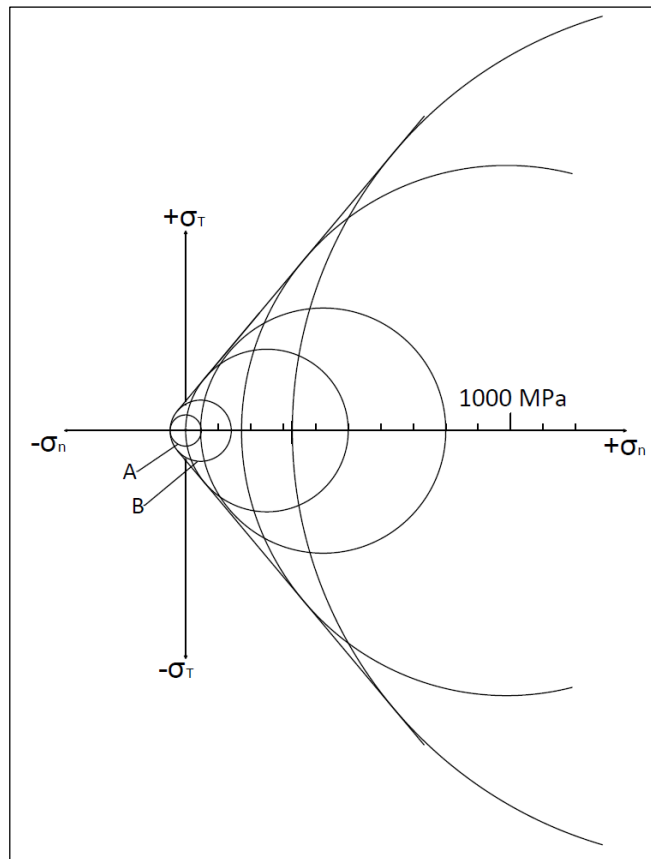
Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

2.2.1 Envolvente de Mohr o curva intrínseca

Si se somete una determinada roca a una serie de experimentos de corta duración en una prensa triaxial, puede obtenerse una línea de fractura empírica, es decir experimental. Normalmente se fija la presión confinante, o sea, la presión del líquido que rodea a la muestra, que representa el menor de los esfuerzos principales, y se va aumentando el esfuerzo en la dirección vertical hasta que la roca rompe. El esfuerzo en el momento de la rotura queda registrado en un gráfico y con él y la presión confinante puede dibujarse el círculo de Mohr. El ángulo que las fracturas forman con el esfuerzo mayor permite dibujar un punto en el círculo de Mohr (o dos simétricos, si las fracturas se han producido en dos sistemas conjugados) que representa el plano de fractura. Repitiendo el experimento con muestras diferentes

de la misma roca para distintas presiones de confinamiento, se obtienen varios puntos y uniéndolos se obtiene la envolvente de falla.

Figura 22. Envoltentes de Mohr de una diabasa.



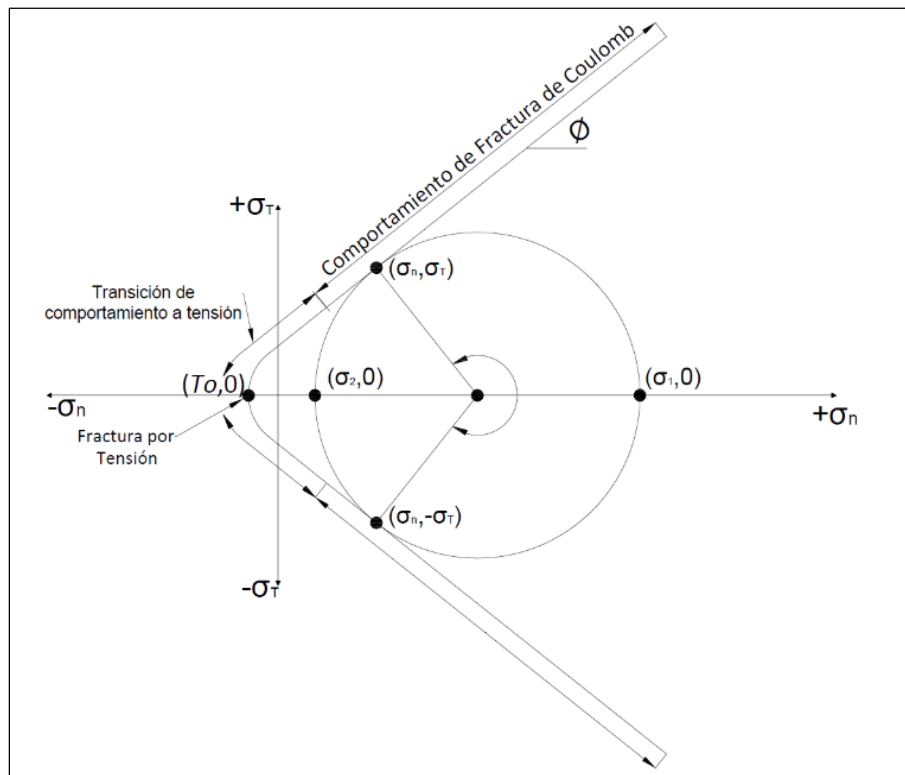
Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

La mayor parte de las rocas dan una línea de fractura como la mostrada en la Fig. 22, que corresponde a una diabasa (roca básica). La línea de fractura empírica se denomina **envolvente de Mohr** o **curva intrínseca** y es la línea que separa los estados de esfuerzos posibles de los imposibles para esa roca: ninguna roca puede

soportar esfuerzos cuyo círculo de Mohr caiga en parte por fuera de la curva. La curva intrínseca consiste, en la mayor parte de los casos, en una especie de parábola muy parecida a la curva que expresa el criterio de Griffith, que corta al eje de abscisas en su parte negativa, y que se abre hacia su parte positiva, donde se continúa por dos rectas simétricas. Esto quiere decir que cuando al menos uno de los esfuerzos principales es tensional, el criterio de Griffith es una buena aproximación al comportamiento de las rocas ante la fractura y que cuando todos los esfuerzos principales son compresivos, la mejor aproximación la suministra el criterio de Coulomb.

La Fig. 23 muestra tres campos posibles de fractura a lo largo de la envolvente de Mohr: las ramas rectas corresponden a las **fracturas de cizalla**, que siguen el criterio de Coulomb, y el punto donde la envolvente corta al eje de abscisas representa las **fracturas tensionales** puras, que se forman a 90° del esfuerzo menor (tensional) y en las que los dos labios se separan en una dirección perpendicular al plano de fractura. El tercer campo, llamado **tensional transicional**, corresponde a la parte curva de la envolvente y, en él, se producen fracturas que en parte son de cizalla y en parte de tensión, es decir, con separación de los dos labios y, además, movimiento lateral relativo de uno respecto al otro. El ángulo que esas fracturas forman con el esfuerzo principal mayor es siempre menor que el del campo que sigue el criterio de Coulomb, y se acerca a cero a medida que el esfuerzo menor se acerca al valor de la resistencia tensional. Dicho más sencillamente: para esfuerzos principales compresivos, las rocas pueden fracturarse según dos familias conjugadas de fracturas sin separación de sus labios, que forman con el esfuerzo mayor un ángulo de entre 25° y 35° ; si al menos uno de los esfuerzos principales es tensional, pueden darse fracturas con separación, que forman con el esfuerzo mayor ángulos menores de 25° , llegando a darse a 0° de él, o a 90° del esfuerzo menor, cuando éste iguala la resistencia tensional.

Figura 23. Los tres campos de la envolvente de Mohr.



Fuente. MARTINEZ CATALAN, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, 2003.

3. PROPIEDADES GEOMETRICAS DE FALLAS

3.1 CRITERIOS PARA CLASIFICAR LAS FALLAS¹⁷

El estilo geométrico de las fallas puede ser utilizado como un criterio para dividir este tipo de fracturas en fallas planares o en fallas curvas o listricas. Las del primer tipo, la superficie de movimiento tiene una orientación constante; y en el segundo caso, varía la dirección y el buzamiento de la superficie. En general las fallas tienden a buzarse menos en profundidad, resultando una forma cóncava hacia arriba.

Las superficies de cizalla suelen ser algo irregulares, aunque siempre es posible definir un plano envolvente que minimice las rugosidades. Las orientaciones de las fallas se expresan con el ángulo horizontal que forma la línea horizontal contenida en el plano de falla y el norte geográfico, así como la inclinación máxima del plano y sentido de la inclinación.

Las fallas también se pueden subdividir teniendo en cuenta el ángulo de buzamiento del plano, así tenemos: fallas de ángulo alto y fallas de ángulo bajo cuando tienen buzamiento mayores o menores que 45° , respectivamente.

Si se considera la dirección del desplazamiento relativo entre bloques, las fallas pueden ser del tipo, rumbo-deslizantes ("*dip slip fault*"), cuando el movimiento se produce según la línea de máxima pendiente del plano, o a lo largo de líneas próximas a ésta. Las fallas de desgarre en dirección ("*strike slip fault*") son aquellas en las que el movimiento entre bloques es horizontal, paralelo a la dirección de la propia falla. Fallas de deslizamiento oblicuo ("*oblique slip fault*"), cuando el desplazamiento entre los bloques es oblicuo a la dirección de la falla. Los vectores de desplazamiento en las fallas con deslizamiento en buzamiento, o con deslizamiento en dirección –en sentido estricto- tienen una inclinación de 90° y 0° ,

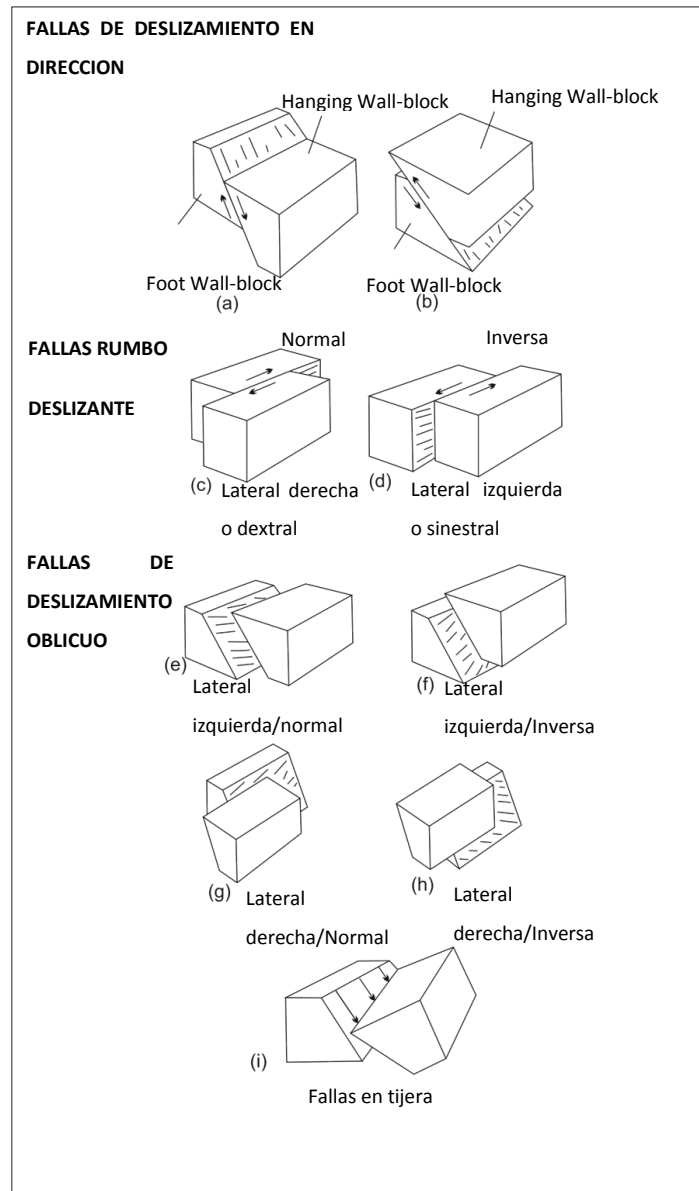
¹⁷ OROZCO, Miguel. Et al.: Geología física. Editorial Thomson Learning, 2002. 302 p.

respectivamente. Realmente, se incluyen en uno u otro tipo aquellos casos en los que se miden ángulos próximos a ellos. Para el caso más general, en las fallas con deslizamiento oblicuo, los vectores de desplazamiento tienen una inclinación comprendida entre 0° y 90° -en sentido estricto-, aunque suele considerarse entre 10° y 80° .

Todo vector de desplazamiento puede descomponerse según varios sistemas de referencia, los más convencionales son: el propio plano de falla y, en tal caso, se puede expresar como la combinación de dos nuevos vectores: uno de ellos paralelo a la dirección de la falla y el otro perpendicular a este, es decir, paralelo a la línea de máxima pendiente del plano. Así se puede estimar la componente en dirección y en buzamiento, respectivamente, de una falla con deslizamiento oblicuo. También se puede descomponer el vector de desplazamiento utilizando como referencia el plano vertical imaginario que lo contiene. Los vectores que resultan son otros dos: uno expresa la componente vertical del desplazamiento y el otro la componente horizontal o longitudinal. A partir del plano vertical que contiene la componente del desplazamiento en buzamiento se puede obtener el desplazamiento longitudinal transversal.

Si se considera el sentido de movimiento relativo entre los bloques, se definen las fallas normales o extensionales ("*normal fault*") como aquellas estructuras en las que el bloque de techo desciende siguiendo una trayectoria paralela a la máxima pendiente del plano. Cuando las fallas de este tipo tienen un buzamiento menor de 45° , se denominan cabalgamientos ("*thrust fault*"). Tanto las fallas normales como las inversas son fallas con deslizamiento en buzamiento. Las fallas con deslizamiento en dirección son conocidas como fallas de desgarre dextral o sinistral. El sentido de movimiento relativo atribuido a un bloque se establece considerando dos observadores. Cada uno de ellos está situado en un bloque, el sentido de movimiento de cada bloque será en el que se aleje uno de otro. Una falla con deslizamiento lateral puede ser dextral (dextrosa, dextrógiro) o sinistral (sinistrorsa, sinestrogira) (Fig 24).

Figura 24. Diagrama de bloque mostrando los diferentes tipos de falla.



Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

3.2 GEOMETRÍA DE FALLAS Y DESPLAZAMIENTO¹⁸

Con el fin de discutir las fallas, es necesario introducir primero un vocabulario de fallas. Para simplificar la discusión, se considera una falla como una superficie geométrica en un cuerpo de roca.

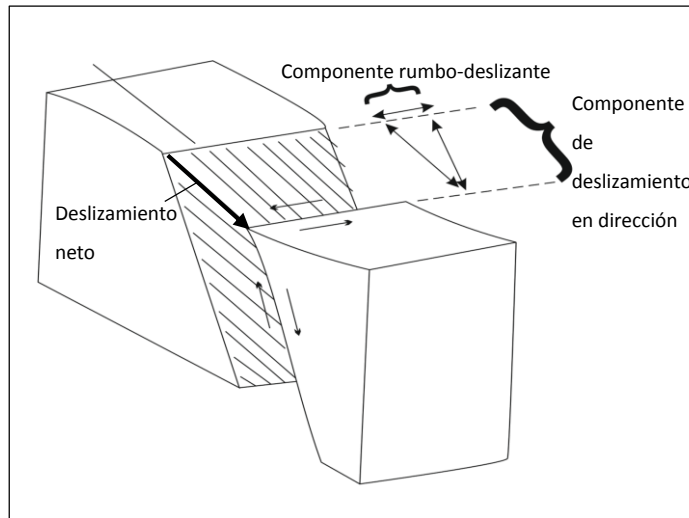
Las rocas adyacentes a la superficie de la falla son la pared de la falla, y el cuerpo de roca movido como consecuencia del deslizamiento en la falla es un **bloque de falla**. Si la falla no es vertical, se puede distinguir entre el “*hanging Wall block*”, el cual es el cuerpo de roca sobre el plano de falla y el “*footwall block*”, el cual es el cuerpo de roca debajo del plano de falla.

Para describir la posición de una falla precisamente se mide el buzamiento o la dirección de buzamiento de la falla. Hay que tener en cuenta que una falla no es necesariamente una superficie planar; esta puede curvarse y cambiar la posición a lo largo de la dirección y/o buzamiento hacia abajo o hacia arriba. Donde tales cambios ocurren un único rumbo y buzamiento no es suficiente para describir la dirección de toda la falla, y se debe proporcionar medidas separadas para distintos segmentos de la falla. Las fallas cuyo buzamiento decrece progresivamente con la profundidad se les ha dado el nombre de fallas lítricas.

Cuando el movimiento de la falla ocurre, un bloque de falla se desliza con respecto al otro, lo cual es descrito por el deslizamiento neto. Se puede describir completamente el desplazamiento especificando el vector de deslizamiento neto, el cual conecta los dos puntos que eran adyacentes anteriormente y que ahora están en las paredes opuestas de la falla. (Fig 25). Para describir un vector de deslizamiento neto, se debe especificar su magnitud y orientación y el sentido del deslizamiento.

¹⁸ VAN DER PLUIJM, Ben. Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics. New York: Printed by W.W. Norton & company, 2004. 656 p. ISBN 0-393-92467.

Figura 25. Diagrama de un bloque mostrando el vector de deslizamiento neto.



Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

Como cualquier vector, el vector de deslizamiento neto puede ser dividido en componentes. Generalmente se usa la dirección y buzamiento de la falla como marco de referencia para definir esas componentes. Específicamente se mide la componente de deslizamiento normal del deslizamiento neto en la dirección paralela a la dirección normal, y la componente rumbo-deslizante del deslizamiento neto en la dirección paralela al rumbo. Si el vector de deslizamiento neto es paralelo a la dirección normal de la falla, la falla es llamada "**falla normal, gravitatoria**" si el vector es aproximadamente paralelo al rumbo de la falla, la falla es llamada "**falla rumbo-deslizante**".

3.2.1 El problema de la separación¹⁹

La interpretación de la dirección y el sentido del deslizamiento en las fallas se dan a menudo por los patrones engañosos creados por la interacción de la estructura y la topografía y por la ausencia de estructuras menores que, si hubiesen estado presentes ayudaría a definir el camino del deslizamiento. La separación es el desplazamiento observado a lo largo de fallas en vistas 2D de afloramientos, mapas o secciones transversales geológicas. Las separaciones se refieren solamente al sentido aparente y la magnitud de desplazamiento a lo largo de las fallas, esto es el movimiento relativo aparente.

La banda estratigráfica (“*Stratigraphic throw*”) es una medida especial de separación, que se utiliza comúnmente en la geología de exploración como una medida conveniente de la magnitud de fallas. La banda estratigráfica es el espesor del intervalo estratigráfico entre dos (“camas”) que se ponen en contacto por la falla.

El movimiento relativo aparente rara vez corresponde al movimiento real entre los bloques de falla. La separación vista en los mapas geológicos y acantilados es un producto de muchas influencias: la orientación de la estratificación, el desgarre y profundidad de la superficie de falla; el deslizamiento de la falla incluyendo la dirección, el sentido, y la magnitud de desplazamiento; y la orientación de la muestra en la que se ve la separación.

¹⁹ OROZCO, Miguel. Et al.: Geología física. Editorial Thomson Learning, 2002. 302 p.

3.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA SEPARACIÓN

Las separaciones vistas en unas muestras en una sección cruzada son descritas simplemente como “normales”, “de cabalgamiento”, e “inversas”. La separación normal se caracteriza por la desviación de bloque superior hacia el bloque inferior. Si el hundimiento de la falla es menor a 45° , esta separación podría ser descrita como el resultado de una falla normal de bajo ángulo. Las fallas de cabalgamiento y fallas inversas, en el sentido de la separación, están caracterizadas por la separación del bloque superior hacia el bloque inferior. El hundimiento de las fallas de cabalgamiento menores a 45° , y el hundimiento de las fallas inversas son más pronunciadas a 45° . La separación vista desde planta es descrita como “lateral izquierdo” o “lateral derecho”. La palabra “diestro” o “sinistro” están reservadas para describir deslizamiento. La descripción completa de la separación están basadas en las vista de planta y vista seccional del desplazamiento. Estas fallas inversas serían descritas como laterales derechas.

3.3.1 Separación de fallas y determinación del deslizamiento neto²⁰

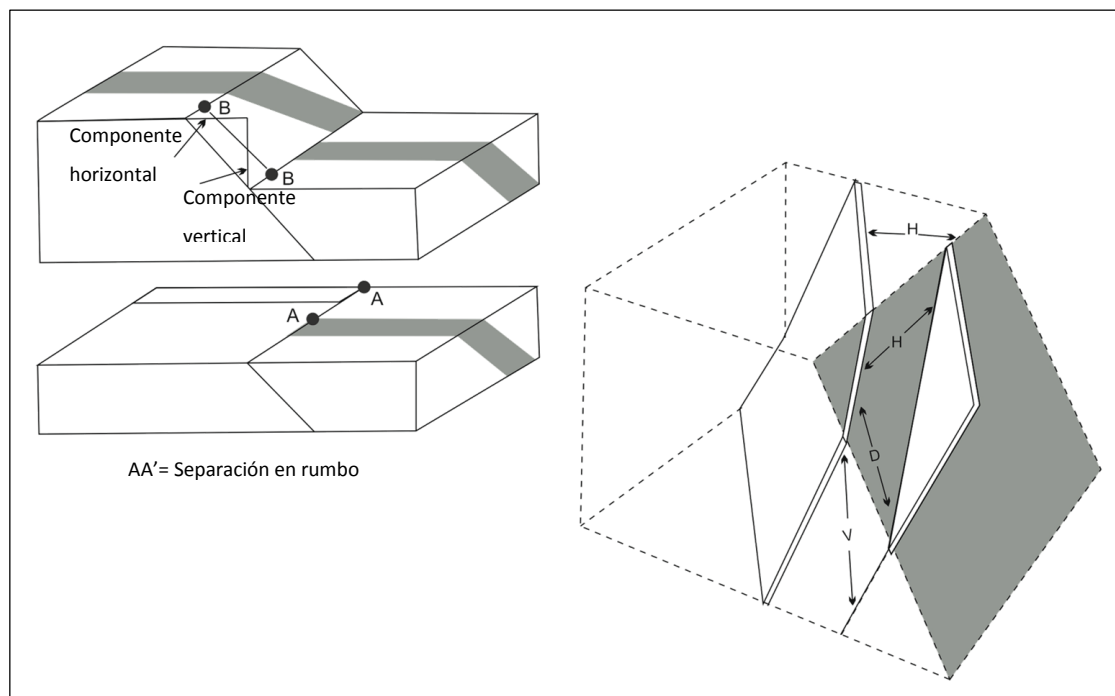
Se define separación de la falla como la distancia entre las partes desplazadas del horizonte guía cuando son medidas a lo largo de una línea específica. Separación y deslizamiento neto no son sinónimos a menos que la línea a lo largo de la cual es medida la separación sea paralela al vector de deslizamiento neto. La separación para una falla dada a lo largo de una línea específica depende de la posición del horizonte guía desviado. Por lo tanto, la separación a lo largo de una línea específica no es la misma para dos horizontes guía no-paralelos. La separación de la falla es un poco difícil de visualizar, así que se describirán diferentes tipos de separación de

²⁰ VAN DER PLUIJM, Ben. Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics. New York: Printed by W.W. Norton & company, 2004. 656 p. ISBN 0-393-92467.

falla con referencia a la figura 26, la cual muestra una falla de deslizamiento oblicuo que corta el buzamiento de una capa.

Con el fin de definir completamente el vector de deslizamiento neto, se debe especificar su magnitud absoluta, la dirección de desplazamiento y el sentido del deslizamiento. Si se tiene la suerte para reconocer ahora los dos puntos en las paredes opuestas de la falla que eran adyacentes antes del desplazamiento algunas veces referidos como “*piercing points*”, entonces se podrá medir el deslizamiento neto en campo.

Figura 26. Diagrama de bloque mostrando la separación de inclinación y la separación en rumbo.



Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

Sin embargo, comúnmente no se tiene la suerte para observar un desplazamiento lineal y se deberá calcular el vector de deslizamiento neto de otra información. Esto puede ser hecho por medida de

- a) Separación a lo largo de una línea específica de la intersección de un horizonte guía y la falla, más información de la dirección de deslizamiento.
- b) Separación a lo largo de dos líneas no-paralelas, de la intersección entre un plano único y la falla.
- c) Separación a lo largo de una línea específica de dos horizontes guía no-paralelos.

Si no se tiene información suficiente para determinar el deslizamiento neto, se puede obtener información valiosa acerca del desplazamiento de la falla buscando alineaciones de deslizamiento e indicadores de sentido de cizallamiento.

Las alineaciones de deslizamiento son estructuras en la falla que se forman paralelas al vector de desplazamiento neto durante al menos el último incremento de movimiento de la falla y posiblemente para movimiento acumulado durante la deformación progresiva.

Los indicadores de sentido de cizallamiento son estructuras en la superficie de la falla o adyacente a la superficie de la falla que define la dirección en la cual un bloque de una falla se mueve con respecto al otro.

Por otro lado, la magnitud del vector de deslizamiento neto en fallas naturales va desde milímetros hasta miles de kilómetros.

3.4 CURVATURAS DE FALLAS

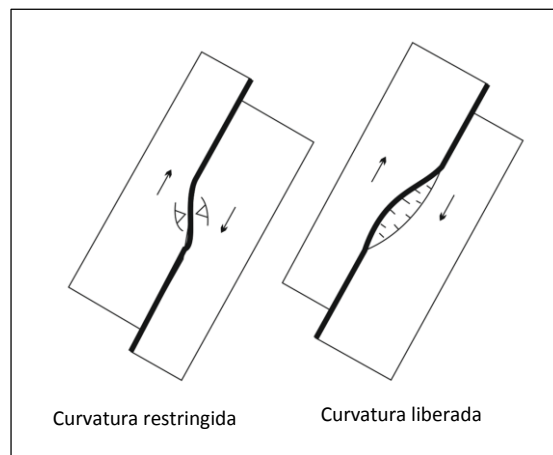
Si el buzamiento o dirección de una falla cambia abruptamente, la posición del cambio es llamado curvatura de falla. Las fallas normales que atraviesan una secuencia estratigráfica en la cual las capas tienen diferentes propiedades

mecánicas normalmente contienen numerosas curvaturas estratigráficamente controladas que hacen que el trazado de la falla en la sección cruzada se parezca a los de una escalera. Algunos segmentos de falla son paralelos a la estratificación llamados “flats” y algunos que atraviesan la estratificación son llamados “ramps”.

Si la falla no ha sido plegada subsecuente a su formación los “flats” son (sub)horizontales, mientras que las “ramps” tienen ángulos de 30° a 45°.

Las curvaturas de falla a lo largo de fallas rumbo-deslizantes causan cambios en el rumbo de la falla. Tenga en cuenta que la presencia de curvaturas a lo largo de una falla rumbo-deslizante resulta en contracción o extensión a través de la curva dependiendo de su geometría. Los lugares hacia donde la curvatura está orientada de tal manera que los bloques en los lados opuestos son comprimidos juntos son curvaturas de contención, mientras que los lugares hacia donde la curvatura está orientada de tal forma que los bloques en los lados opuestos de la falla se separan el uno del otro son curvaturas de liberación (Fig.27).

Figura 27. Curvatura restringida y una curvatura liberada a lo largo de una falla rumbo-deslizante lateral derecha.



Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

3.5 TERMINACIONES DE FALLA Y LONGITUD DE FALLA

El fallamiento se desarrolla en todas las escalas, desde fallas microscópicas que desplazan los límites de un solo grano, hasta fallas macroscópicas que atraviesan lateralmente miles de kilómetros de corteza. Pero incluso las más grandes fallas no se extienden infinitamente en todas las direcciones. Ellas terminan en varias formas.

Las fallas terminan donde son cortadas por estructuras más jóvenes tales como otra falla, una inconformidad o una intrusión. La aplicación del principio de “*cross-cutting relationships*” permite determinar la edad relativa de las fallas con respecto a las estructuras que las cortan. Algunas fallas se conectan a otras fallas mientras ambas están activas.

Donde una falla no termina contra otra estructura, esta debe desaparecer lo que significa que la magnitud de desplazamiento decrece a lo largo del trazado de la falla, llegando a cero en sus extremos. En algunos casos, la falla se divide en numerosas ramificaciones cerca de su fin, creando así un abanico de pequeñas fracturas llamadas “*horsetail*”, o esta puede extinguirse en una serie de fracturas pinnadas. Alternativamente, la deformación asociada con la falla, desaparece en una zona de deformación dúctil. El límite entre la región deslizada y la no-deslizada en el fin de una falla es el “*tip line*” de la falla.

Mientras la longitud de algunas fallas está limitada por su intersección o truncamiento por otras estructuras, para muchas fallas la longitud del trazado cambia con el tiempo cuando la falla evoluciona.

Para visualizar este proceso, se idealiza una falla que crece hacia afuera. En un instante de tiempo dado, el deslizamiento ha ocurrido donde la superficie de la falla ya existe, pero no hay deslizamiento más allá del extremo de la falla. Un poco más tarde, después de la propagación del extremo de la falla, hay un aumento de deslizamiento en el centro de la falla.

Como consecuencia, el desplazamiento cambia a lo largo de la longitud de la falla y la magnitud del desplazamiento debe ser menor que la longitud de la falla. Considerando esta relación, es de esperar una relación general entre longitud de falla y desplazamiento: entre más largo sea el trazado de falla, más grande será el desplazamiento.

3.6 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE FALLA EN EL ANÁLISIS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS

La Reactivación de fallas es uno de los incidentes desfavorables durante la perforación y la producción de yacimientos de hidrocarburos debido a los cambios de esfuerzos in situ y la presión del yacimiento. Sólo unos pocos estudios, en dichos análisis, han incluido los efectos de las propiedades geométricas de falla, en particular la longitud, ángulo de inclinación y la geometría de la superficie, mientras que éstos son importantes parámetros que controlan el deslizamiento de fallas.

Las investigaciones muestran que la extensión de la zona dañada a lo largo de la falla reactivada está muy influenciada por la geometría de superficie de la falla y la presión de inyección. Cuanto mayor sea el ángulo de inclinación, menor es la fuerza de deslizamiento de la falla. Estudios de análisis de sensibilidad de la presión de inyección y propiedades de la superficie de la falla han mostrado que el potencial de reactivación de la falla es una función de múltiples parámetros, pero más sensible a la presión de inyección que a las propiedades de las fallas "in-fill". También se ha observado que la trayectoria de flujo de hidrocarburos después de la reactivación de falla es hacia los segmentos cizallados de una zona de falla, en el cual aumenta la permeabilidad. Las distribuciones del esfuerzo de corte son claramente heterogéneas a lo largo y cerca de planos de falla. Esto sugiere que los segmentos de falla específicos podrían ser propensos a experimentar fugas cuando otros podrían retener una columna de hidrocarburos.

El potencial de fuga de las fallas puede afectar a la exploración y el éxito de la producción en las zonas con yacimientos fallados. Por tanto, es fundamental entender las fugas y el sellamiento de las fallas potenciales al tomar decisiones sobre la ubicación óptima y el diseño de los pozos, la compartimentalización de los yacimientos, los patrones de drenaje, y las técnicas de recuperación mejorada. Se entiende que las fallas con altas relaciones de cizalla a esfuerzos normales en sus superficies son críticamente esforzados y propensos a activarse con el campo de esfuerzos actuales (Fjær et al, 2008;. Soltanzadeh y Hawkes, 2009; Wiprut y Zoback, 2000).

Un cambio en la presión del fluido dentro de un yacimiento poroso, generalmente, induce cambios en los esfuerzos dentro del yacimiento y las rocas que lo rodean. Entre los peligros potenciales, como resultado de estos cambios inducidos en los esfuerzos es la reactivación de fallas o fracturas existentes, que puedan infringir la integridad hidráulica de las rocas sello que delimitan el yacimiento. Por lo tanto, los análisis de reactivación de falla son esenciales para ser llevados a cabo en yacimientos.

Muchos estudios analíticos y numéricos han demostrado que, durante la depleción del yacimiento, hay una tendencia hacia la reactivación de falla y daño mecánico en las rocas cercanas a los flancos laterales de éste, en un régimen de esfuerzos de falla normal. Un caso similar se presenta en un régimen de esfuerzos de falla inversa, en donde hay una tendencia hacia la reactivación de falla en las rocas que están por encima y por debajo del yacimiento, pero no hay ninguna tendencia a la reactivación de falla en cualquier lugar dentro del yacimiento durante la depleción (Fjær et al, 2008;. Soltanzadeh y Hawkes, 2009). También se ha encontrado que el potencial de reactivación de falla depende de la geometría del yacimiento y el ángulo de buzamiento de la falla²¹.

²¹ ASADI, M. et al.: Coupled hydro geomechanical simulation and analysis of fault reactivation: influence of fault geometry. Paper SPE 133070, 2010.

A pesar de muchos intentos de investigación para estudiar la influencia de los cambios de los parámetros en la reactivación de falla, como la magnitud y dirección de los esfuerzos, cambios en la presión de poro, resistencia de la formación, localización de fallas, y la forma del yacimiento (Soltanzadeh y Hawkes, 2009; Wiprut y Zoback, 2000), pocos estudios se han ocupado de los efectos de la geometría de falla (es decir, ángulo de inclinación y orientación), así como de sus propiedades de superficie (es decir, la cohesión, la fricción interna, y el ángulo de fricción de la superficie) sobre la reactivación de falla “in-fill”. Sagy et al. (2007) estudiaron los efectos de la rugosidad de la superficie de la falla en la evolución de deslizamiento de la falla.

3.6.1 Roca intacta y mecanismos de fractura

El deslizamiento y cizallamiento son los dos mecanismos que pueden ocurrir como resultado del cizallamiento de las superficies de fractura a lo largo de ellas. El criterio de falla para el deslizamiento de una fractura suave es el bien conocido criterio de Coulomb, que se expresa como:

$$\tau_f = C_f + \sigma_n \tan \phi_f$$

Ecuación 20

Donde τ es igual a la fuerza de la fractura de cizalla; C_f = cohesión de contacto de la fractura; σ_n = esfuerzo normal que actúa verticalmente en un plano de fractura y ϕ_f ángulo de fricción de las superficies de contacto de las fracturas. Cuando la superficie de fractura se vuelve más áspera, el proceso de cizallamiento se hace mecánicamente más complicado a medida que las degradaciones toman lugar a través de los contactos ásperos de la fractura. La forma más sencilla para mostrar los efectos de la rugosidad es aumentar el coeficiente de fricción de Coulomb en el

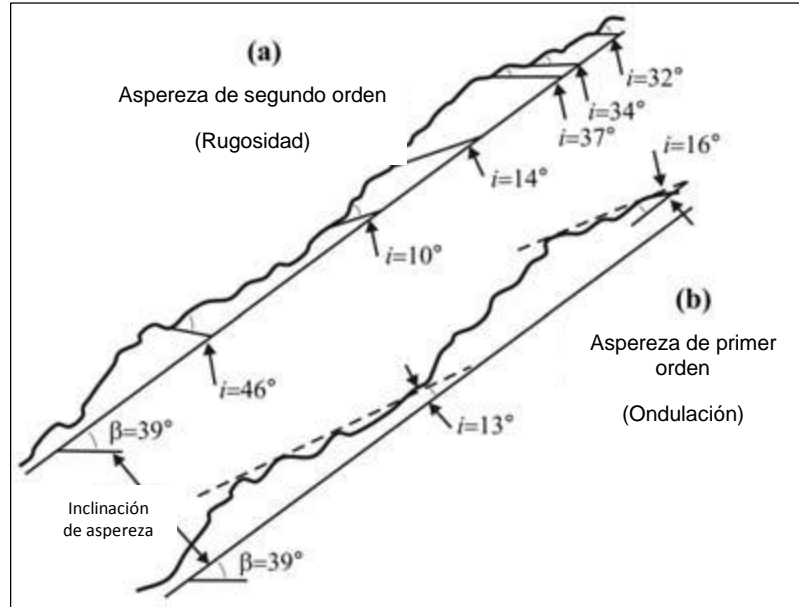
criterio introducido por Patton (1966). Él propuso el ángulo promedio de aspereza, i mostrado en la Figura 28 como parámetro de rugosidad de la fractura e incluyó esto en el criterio de resistencia al de cizalla:

$$\tau_f = C_f + \sigma_n \tan(\phi_f + i)$$

Ecuación 21

Sin embargo, tal implementación no tiene en cuenta la degradación de aspereza y, además, en las fracturas de roca reales determinar el ángulo promedio de rugosidad no es una práctica sencilla. El ángulo promedio de aspereza, i mostrado en la Figura 28 puede ser diferente a distintas escalas. Vale la pena observar que para las fracturas naturales, las asperezas de primer orden y de segundo orden introducidos por Patton (1966) y mostradas en la figura 28 parecen tener diferentes impactos en la resistencia de cizalla de la fractura. A bajos esfuerzos normales, las asperezas de segundo orden influyen predominantemente en el comportamiento de cizalla de las fracturas, mientras que a altos esfuerzos normales son las asperezas de primer orden (referido como ondulación) las que juegan un papel importante en la respuesta al corte de las fracturas o fallas de gran escala. Por lo tanto, una estimación de esfuerzo normal, por encima del cual la ondulación de la fractura se hace efectiva, es importante.

Figura 28. Ángulo de aspereza promedio, de primer y segundo orden introducidas por Patton (1966).



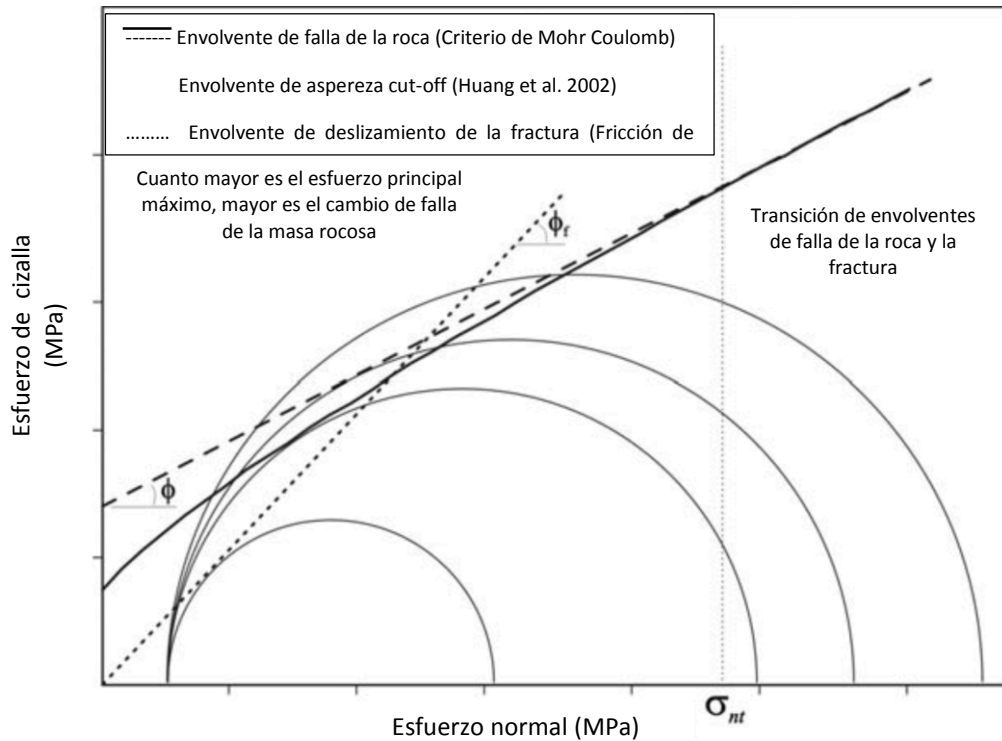
Fuente. ASADI, M. et al. Coupled hydro-geomechanical simulation and analysis of fault reactivation: influence of fault geometry. SPE 133070, 2010.

En general, se espera que el proceso de cizallamiento de las fracturas sea una combinación del deslizamiento de contacto a bajos esfuerzos normales, cizallamiento por asperezas a esfuerzos normales relativamente altos, y la falla de la roca a esfuerzos normales más grandes que un esfuerzo normal transicional (Rasouli y Harrison, 2010). Este umbral de esfuerzo normal está definido para unos perfiles de fractura como:

$$\sigma_n^T = c(\cot i - \tan \phi) \cos^2 \phi$$

Ecuación 22

Figura 29. Comportamiento de corte / deslizamiento de fracturas individuales y cuerpos de roca fracturadas en función del esfuerzo normal.



Fuente. ASADI, M. et al. Coupled hydro-geomechanical simulation and analysis of fault reactivation: influence of fault geometry. SPE 133070, 2010.

La figura 29 muestra los puntos de transición entre estos tres mecanismos los cuales varían como una función del ángulo de fricción básico de fractura y la cohesión, el ángulo de fricción y la cohesión, y el ángulo de aspereza de la fractura. Es de señalar que no todos los tres mecanismos son necesarios para que esto ocurra y dependiendo del nivel de esfuerzo normal (magnitudes de los esfuerzos in-situ), la fractura comenzará a experimentar la aspereza de corte o incluso la falla se iniciará dentro de la roca intacta. Cuatro círculos de Mohr diferentes que tienen los mismos esfuerzos mínimos y diferentes esfuerzos máximos cruzan las envolventes de falla en diferentes escenarios, los cuales clarifican que en el análisis del

deslizamiento de falla, la variedad de parámetros deben ser tenidos en cuenta, como es mostrado en la figura 29.

Se afirma que a medida que aumenta el esfuerzo normal a mayores profundidades, la posibilidad de fallas en las rocas aumenta. Esto puede reducir la permeabilidad de la formación, si se encuentra dentro de la sección del yacimiento, lo cual es un escenario bastante posible. Uno de los retos en el análisis de reactivación de fallas es la variación de la permeabilidad de la zona de falla que se diferencia como resultado de cambiar la relación de esfuerzos cizalla sobre los normales. Se cree que la distinción entre el aumento y la reducción de las zonas de permeabilidad en una zona de la falla es tedioso debido a la gran cantidad de cambios en los parámetros, en casos reales, lo cual puede causar cambios en esta relación. Los contactos de las asperezas de la fractura indujeron a desarrollar fallas por tensión cercanamente perpendiculares al plano de fractura, que a su vez afecta a la permeabilidad asociada con deformaciones de corte y de tensión. Por otra parte, la determinación exacta de las propiedades del material de relleno de la falla, el coeficiente de fricción y la cohesión de las rocas circundantes son importantes. Dado que estas propiedades cambian en un amplio rango, el mecanismo de falla de la roca podría ser significativamente diferente y esto podría conducir a variaciones significativas de permeabilidad dentro de la zona cizallada y las rocas circundantes.

4. PARÁMETROS DE INESTABILIDAD DE FALLAS

4.1 DIRECCIÓN DE ESFUERZOS²²

El objetivo de este capítulo es determinar el comportamiento de las fallas y la dirección del desplazamiento a través de ellas, cuando las rocas están sujetas a esfuerzos.

4.1.1 Caso en donde uno de los ejes principales de esfuerzo es vertical

El esfuerzo elipsoidal puede tener cualquier orientación concebible en la corteza de la tierra. El caso más simple que será analizado primero es aquel en el que uno de los ejes principales de esfuerzo es vertical. Obviamente los otros dos ejes principales de esfuerzos serán horizontales y formaran un ángulo de 90° el uno con el otro. Ahora bien, resulta importante considerar el “*standar state*” que aunque idealizado ofrece un estándar de referencia conveniente. Es una condición en la cual la presión litostática es uniforme en todos los lados de cualquier bloque imaginario en la corteza. Esta presión uniforme incrementa regularmente con la profundidad e idealmente es igual al peso de la columna litostática. Por otro lado, se considera una situación a cierta profundidad en la tierra en donde el efecto neto de todas las fuerzas es producir una presión adicional paralela a una línea horizontal este-oeste y a una presión paralela más pequeña en una línea horizontal norte-sur. El esfuerzo elipsoidal esta ahora orientado (Fig 30a) con el eje vertical de esfuerzo mínimo (R), con el eje principal de esfuerzo intermedio horizontal norte-sur (Q) y con el eje principal de esfuerzo máximo horizontal este-oeste (P). Cuando el esfuerzo máximo (P) es incrementado al punto en que la diferencia de esfuerzos (P-

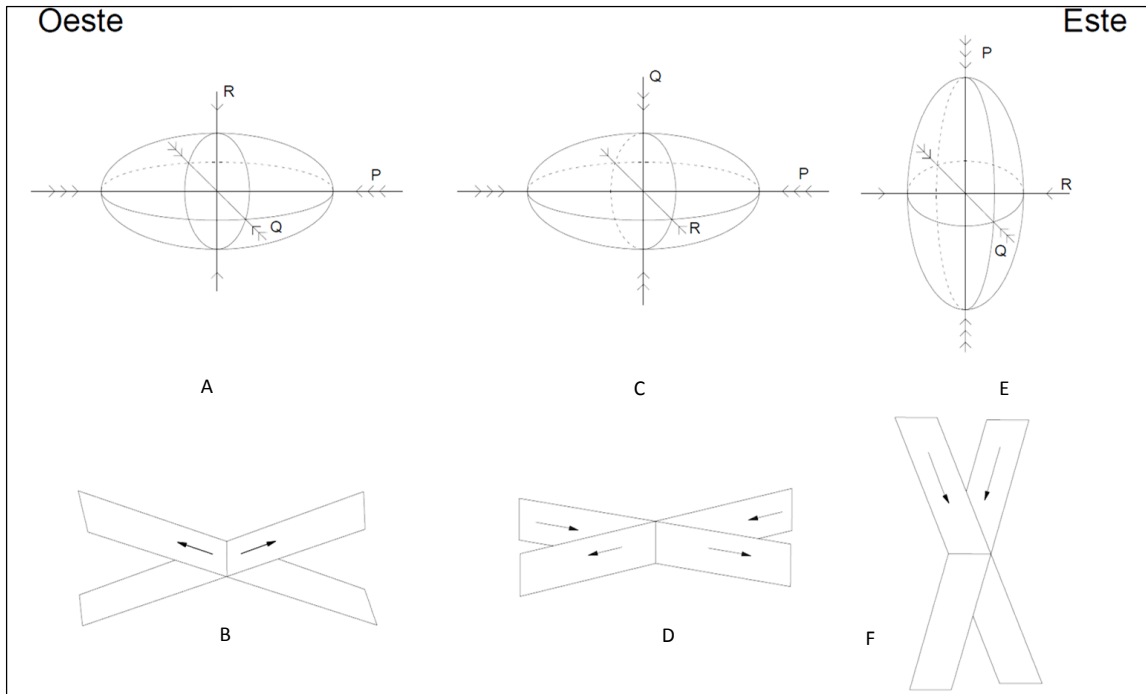
²² BILLINGS, Marland. Structural geology. New Jersey: Printed by Prentice Hall, 1954. 514 p.

R) excede un valor crítico, las rocas fallaran si son lo suficientemente frágiles. Estas fracturas serán paralelas a Q y formaran un ángulo de 30° con P (Fig 30b). Esto es, en terminología geológica que las fracturas se darán en sentido norte-sur; un grupo se dirigirá 30° al este y el otro grupo 30° al oeste. Además como se muestra en la figura 30b se crearán fallas inversas; en ambos grupos el “*hanging Wall*” se moverá relativamente hacia arriba por encima del “*footWall*”.

Si se considera ahora una situación similar en donde, empezando con el “*standard state*” se le aplica una presión adicional paralela a una línea horizontal este-oeste (Fig 30c). En este caso se asume que hay una disminución en la presión -hacia un valor menor que el del “*standard state*” en una dirección horizontal norte-sur. La presión de sobrecarga se asume que se mantiene constante. El eje principal de mayor esfuerzo P es horizontal este-oeste, el eje principal de esfuerzo intermedio Q es vertical, y el eje principal de esfuerzo mínimo R es horizontal de norte-sur. Cuando la diferencia de esfuerzo (P-R) excede un valor crítico las rocas se fracturarán. Las fracturas de cizalla serán verticales y un grupo se dirigirá E-N-E y el otro grupo se dirigirá W-N-W (Fig 30d). Si ocurre una falla, el grupo E-N-E serán fallas rumbo-deslizantes hacia la derecha y el grupo W-N-W serán fallas rumbo-deslizantes hacia la izquierda.

Por otro lado, empezando con el “*standard state*”, el efecto neto de todas las fuerzas es producir una disminución en la presión paralela a la dirección horizontal E-W y también una disminución en la presión paralela (más pequeña) a la dirección horizontal N-S. La presión de sobrecarga se asume que se mantiene constante. El eje principal de esfuerzo máximo P es ahora vertical, el eje principal de esfuerzo intermedio Q es horizontal N-S y el eje principal de esfuerzo mínimo R es horizontal E-W (Fig 30E). Cuando la diferencia de esfuerzos excede un valor crítico las rocas se fracturarán. En términos geológicos las fracturas se dirigirán N-S; un grupo se dirigirá 60° al este, el otro grupo se dirigirá 60° al oeste (Fig 30F). Si ocurre desplazamiento, las fracturas se convertirán en fallas de gravedad donde el “*hanging Wall*” se moverá hacia abajo con referencia a los “*footwalls*”.

Figura 30. Tipo de falla dependiendo de la orientación del elipsoide de esfuerzo.



Fuente. BILLINGS, Marland. Structural Geology. Segunda edición. Estados Unidos, 1955

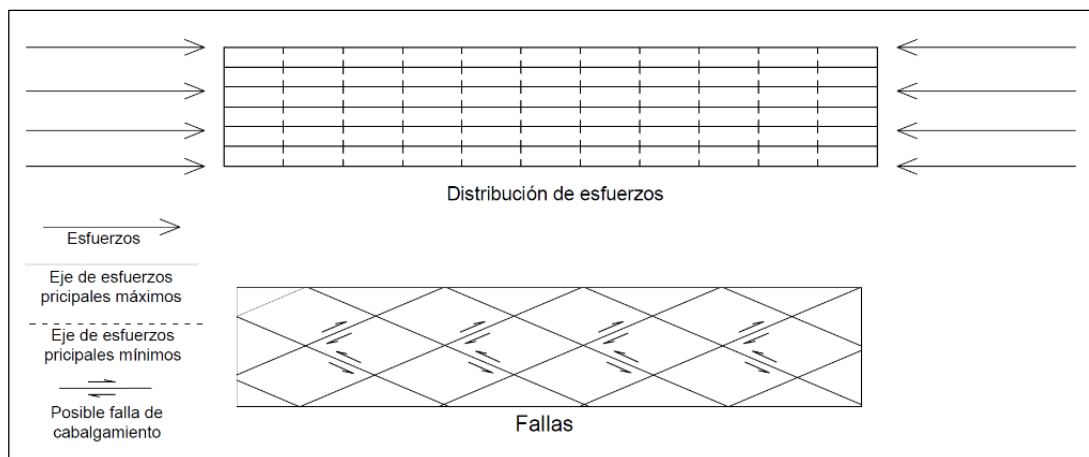
4.1.2 Casos en donde el eje principal de esfuerzo intermedio es horizontal

En el caso ilustrado en la Fig. 31 una presión adicional horizontal es impuesta sobre el “*standard state*”. Esta presión horizontal sobrepuesta se asume que tiene el mismo valor en todas las profundidades. La presión en ambos extremos del bloque debe ser la misma, de otra manera el bloque se movería. El diagrama superior de la Fig. 31 muestra la distribución de los esfuerzos. Las líneas continuas horizontales representan las trayectorias de los ejes principales de mayor esfuerzo. Ellas están paralelas de manera horizontal al plano del papel. Las líneas punteadas son las trayectorias de los ejes principales de esfuerzo mínimo que se encuentran de

manera vertical. Los ejes principales de esfuerzo intermedio se encuentran de manera perpendicular al plano del papel.

Si la presión adicional sobrepuesta crece lo suficiente las rocas se fracturarán como se muestra en el diagrama inferior de la Fig. 31, idealmente abra dos grupos de fracturas formando ángulos de 30° con los ejes principales de esfuerzo máximo. La dirección de desplazamiento será paralela al trazado de los ejes principales de esfuerzo máximo en las fracturas. En términos geológicos, los “*hanging walls*”, se mueven hacia arriba con referencia a los “*foot walls*”. Así las fallas son inversas. Por supuesto el espaciado regular de las fallas es enteramente diagramático. Además bajo condiciones naturales uno de los grupos puede desarrollarse en con tendencia hacia los otros.

Figura 31. Fallas si el esfuerzo horizontal es el mismo en todas las profundidades. En el diagrama superior se muestra las trayectorias de los ejes de esfuerzos. El diagrama inferior muestra la posición de posibles fallas inversas.



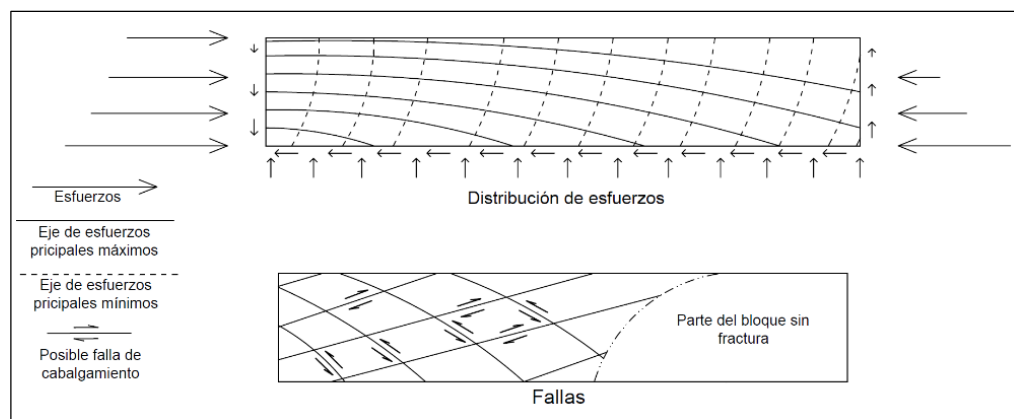
Fuente. BILLINGS, Marland. Structural Geology. Segunda edición. Estados Unidos, 1955.

En el caso ilustrado en la figura 32 una presión horizontal adicional es impuesta sobre el “*standard state*”. Se asume que esta presión adicional incrementa hacia abajo; esto es indicado al extremo izquierdo del diagrama superior por las flechas de mayor longitud hacia la parte inferior del diagrama. También se asume que la efectividad de la presión sobreimpuesta disminuye en intensidad de izquierda a derecha; este hecho es indicado por las flechas horizontales de mayor longitud al lado izquierdo del diagrama comparadas con las que están a la derecha.

Las líneas continuas en el diagrama superior muestran la orientación de las trayectorias de los ejes principales de esfuerzo máximo. Las líneas punteadas son las trayectorias de los ejes principales de esfuerzo mínimo. Los ejes principales de esfuerzo intermedio se encuentran paralelos y perpendiculares al plano del papel.

Si el esfuerzo suplementario se vuelve lo suficientemente grande las fracturas de cizalla se orientarán como se muestra en la parte inferior de la Fig. 32.

Figura 32. Fallas si el esfuerzo horizontal superpuesto aumenta hacia abajo. En el diagrama superior se muestra las trayectorias de los ejes de esfuerzo. El diagrama inferior muestra la posición de posibles fallas inversas.



Fuente. BILLINGS, Marland. Structural Geology. Segunda edición. Estados Unidos, 1955

4.2 EL ROL DE LOS FLUIDOS²³

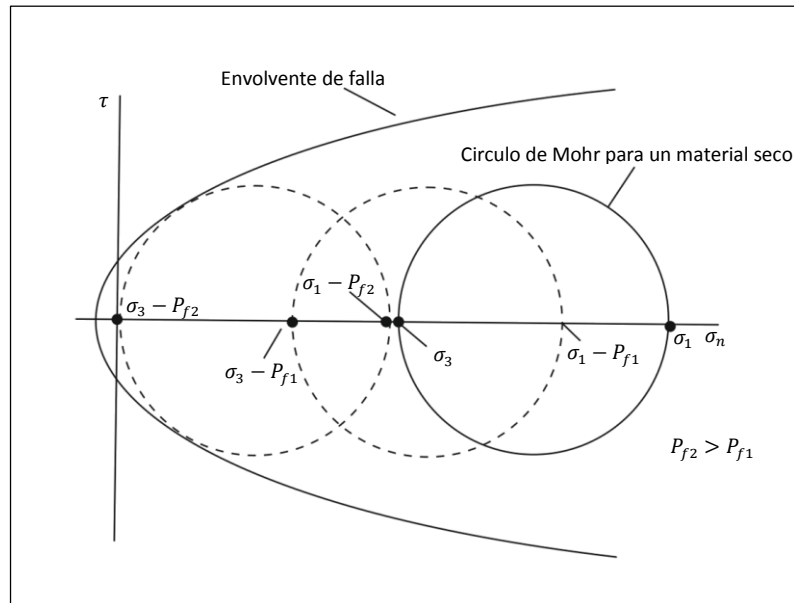
M. King Hubbert and William W. Rubey (1959) aplicaron las observaciones de Terzaghi de la mecánica de suelos y demostraron que los fluidos juegan un rol importante en el deslizamiento de fallas. Ellos reconocieron que el efecto “lubricante” del fluido en una zona de falla es realmente un efecto boyanza que reduce el esfuerzo de cizalla necesario para permitir el deslizamiento de la falla, cuando la presión de fluido reduce el esfuerzo normal en el plano de falla. El esfuerzo resultante es el esfuerzo normal efectivo, el cual puede ser determinado restando la presión del fluido (P) al esfuerzo normal (σ_n).

El círculo de Mohr es desplazado hacia la izquierda de la envolvente de falla y luego de tocarla conducirá a la ruptura y al movimiento a lo largo de la falla (Fig. 33).

El esfuerzo normal efectivo horizontal es asumido el mismo en todas las direcciones mientras que el esfuerzo normal efectivo vertical varía con el peso de la columna de roca menos la componente vertical de la presión de fluido.

²³ HATCHER, Robert. Structural geology: principles, concepts, and problems. New Jersey: Printed by Prentice Hall, 1995. 525 p. ISBN 0-02355713-3.

Figura 33. Circulo de Mohr mostrando el efecto de la presión de fluido en el esfuerzo normal efectivo.



Fuente. HATCHER, Robert D. Structural geology: Principles, concepts and problems. Segunda edición. New Jersey, 1995.

4.2.1 Correlación entre la presencia de fluidos y la presión ejercida²⁴

No hay duda de que los fluidos pueden desempeñar un papel importante en las zonas de falla, dado que comúnmente se encontrará que las rocas con fallas están alteradas por una reacción con una fase fluida (por ejemplo formaciones arcillosas en zonas de falla donde hay reacción de feldespatos con el agua), y las zonas de falla contienen abundantes vetas de minerales que se han precipitado de un fluido (por ejemplo cuarzo, calcita, clorita y minerales económicos). La fractura que acompaña al desplazamiento de la falla crea un espacio abierto entre la zona de

²⁴ VAN DER PLUIJM, Ben. Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics. New York: Printed by W.W. Norton & company, 2004. 656 p. ISBN 0-393-92467.

falla causado por el fluido entrante. Debido al incremento del espacio abierto la presión del fluido en la zona de falla cae temporalmente en relación a la roca circundante. El gradiente de presión de fluido resultante puede incluso conducir agua subterráneas al interior de la zona de falla hasta que se establezca un nuevo equilibrio. Este movimiento de fluidos iniciado por la falla es conocido como fallas valvulantes o bombeo sísmico.

La presencia de agua en las zonas de falla afecta los esfuerzos en los que las fallas ocurren de tres formas: 1) la alteración de los minerales formados por la reacción con el agua en la zona de falla tienden a tener una menor resistencia a la cizalla que los minerales en rocas sin alteraciones, y así su presencia puede permitir que la falla se deslice a un menor esfuerzo friccional que en cualquier otro caso. 2) la presencia de agua en una roca puede causar debilitamiento hidrolítico de silicatos minerales y así permitir que la deformación ocurra a menor esfuerzo. 3) la presión de poro de agua (P_{fluid}) en la zona de falla disminuye el esfuerzo efectivo normal en un cuerpo de roca y así disminuye la magnitud del esfuerzo de cizalla necesario para iniciar una ruptura de cizalla en una roca intacta o iniciar un desplazamiento friccional en una superficie pre-existente. Si la presión de fluido P_{fluid} en la zona de separación se acerca a la presión litostática (que es la magnitud de la presión del fluido que se acerca al peso de la roca suprayacente) entonces el esfuerzo efectivo normal a través de los planos de falla se acerca a cero. Por lo tanto, el esfuerzo de cizalla necesario para inducir el deslizamiento en la zona de separación se tornaría también muy pequeño de manera que las láminas inversas se pueden mover antes de que se deforme internamente. Esta idea se conoce como la *hipótesis de Hubbert-Rubey*, y enfatiza el papel de la presión de fluido elevada durante el movimiento en las zonas de separación y tiene una amplia aplicabilidad. De hecho, las mediciones modernas confirman que en regiones donde fallas separadas se mueven, la presión de fluido cerca al intervalo de separación usualmente excede condiciones hidrostáticas y puede incluso acercarse a valores litostáticos. Note que la presión

de fluido no puede exceder la presión litostática por largos periodos de tiempo dado que esto forzaría el movimiento de las rocas hacia arriba.

El asunto de que tan grande debe ser el esfuerzo de cizalla σ_s para iniciar fallas o a reactivar fallas pre-existentes sigue siendo altamente controversial. La magnitud de σ_s necesaria para dar inicio a una falla depende de la presión de fluidos, litología, tasa de deformación, temperatura y la orientación de la falla pre-existente. Recordemos que para un rango dado de orientaciones el esfuerzo necesario para iniciar un deslizamiento friccional en una falla pre-existente es menor que el necesario para iniciar una nueva falla. Los experimentos en mecánica de rocas entregan una vía de acercamiento a este problema. De experimentos de carga triaxial en el laboratorio se ha determinado que siendo todos los demás factores iguales, el esfuerzo de cizalla necesario para que ocurra fallamiento se incrementa tanto como la presión de confinamiento se incrementa y que σ_s es mayor por fallamiento contraccional y menor por fallamiento extensional. Las condiciones limitantes para cada uno de los tres tipos de fallas se muestran en la figura 34 basadas en la siguiente relación:

$$\sigma_d \geq \beta(\rho \cdot g \cdot z)(1 - \lambda)$$

Ecuación 23

Donde σ_d es el esfuerzo diferencial (es decir, $2\sigma_s$); β es 3, 1.2 y 0.75 para fallas inversas, fallas rumbo-deslizantes y fallas normales respectivamente; y λ es un parámetro de presión de fluidos definida como la razón de la presión de poro y la presión litostática (λ oscila desde ~ 0.4 , para presión de fluidos hidrostáticos hasta 1 para presión de fluidos litostáticos).

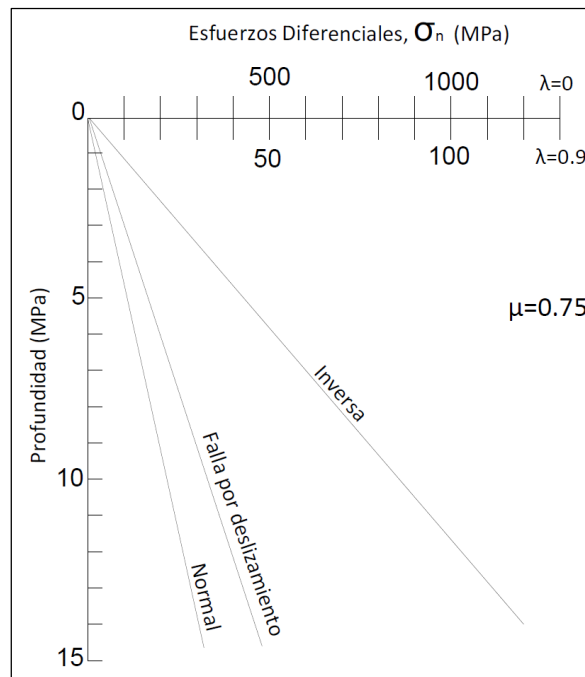
Si el movimiento en la superficie de las fallas en los regímenes frágiles de la corteza involucra desplazamiento friccional, parte del trabajo hecho durante el movimiento de la falla se transforma en calor. Este proceso llamado calentamiento de cizalla se rige por la siguiente ecuación:

$$\sigma_s \cdot u = E_e + E_s + Q$$

Ecuación 24

Donde σ_s es el esfuerzo de cizalla a través de la falla, u es la cantidad de deslizamiento en la falla, E_e es la energía irradiada por los movimientos internos, E_s es la energía utilizada para crear nuevas superficies (ruptura de enlaces químicos) y Q es el calor generado. Esta ecuación sugiere que $\sigma_s \cdot u > Q$, y así si se conoce u , el valor de Q puede darnos un estimado mínimo del valor de σ_s .

Figura 34. Gráfico mostrando la variación en el esfuerzo diferencial necesario para iniciar deslizamiento en fallas inversas, normales y rumbo-deslizantes como función de la profundidad.



Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

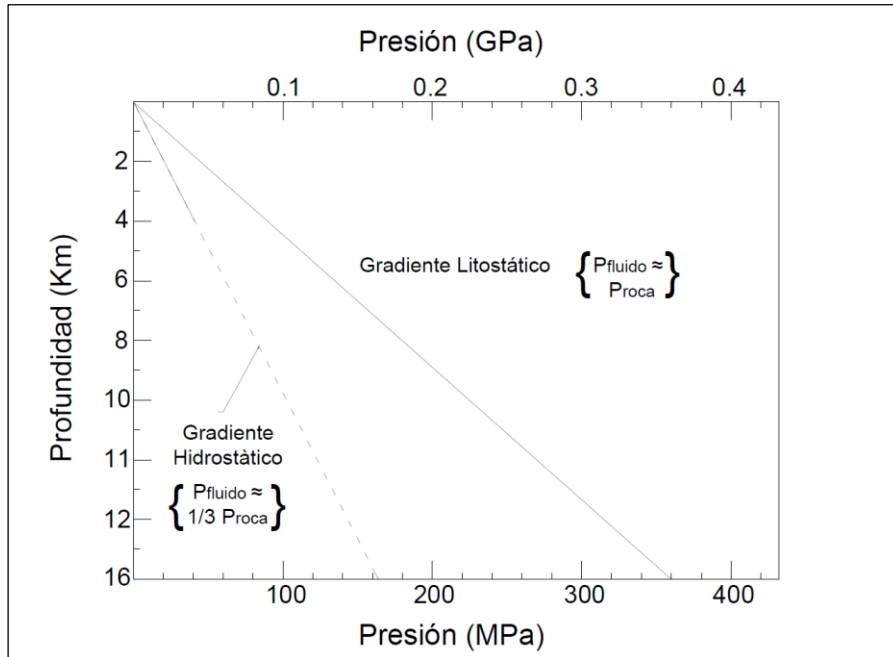
4.2.2 Efecto de los fluidos en el crecimiento de una fractura extensible

Todas las rocas contienen poros y rupturas, se ha observado que tan importantes son estas en los procesos de fallamiento frágil. En la corteza superior de la tierra bajo la capa de agua, estos espacios que constituyen la porosidad de la roca están llenos de fluido. Este fluido es en la mayoría de los casos agua, aunque en algunos lugares puede ser aceite o gas.

Si hay un alto grado de permeabilidad en la roca (es decir, que el agua puede fluir relativamente fácil de poro a poro y/o dentro y fuera de la capa de roca) entonces la presión en un volumen de agua de poro en un lugar en la corteza es aproximadamente hidrostática (es decir, que la presión refleja el peso de la columna de agua supradistante; Fig. 35). La presión hidrostática (fluida) es definida por la relación $P_f = \rho \cdot g \cdot h$, donde ρ es la densidad del agua (1000 Kg/m^3), g es la constante gravitacional, y h es la profundidad. La presión de poro que es la presión de fluido ejercida por los fluidos dentro de los poros de la roca, puede exceder la presión hidrostática si la permeabilidad está restringida.

Por ejemplo, el fluido atrapado en un lentejón de arenisca rodeado por shale impermeable no puede escapar, entonces la presión de poro en la arenisca puede acercarse o incluso igualar la presión litostática (P_l), es decir que la presión se acerca al peso de la columna supradistante de roca. Notese que la roca en promedio es tres veces más densa que el agua. Cuando la presión de fluido del agua de poro excede la presión hidrostática, se dice que el fluido está sobrepresionado.

Figura 35. Gráfica de presión litostática Vs presión hidrostática como función de la profundidad.

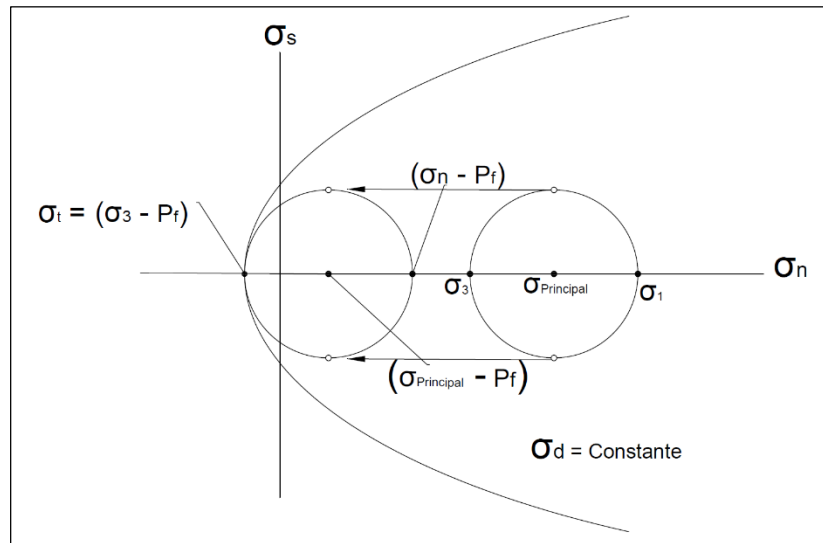


Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

¿Cómo afecta la presión de poro a la fuerza de falla extensible de la roca? La presión de poro produce un empuje hacia el exterior que se opone a la compresión hacia adentro proveniente de la roca, por lo tanto el fluido soporta parte de la carga aplicada. Si la presión de poro excede el esfuerzo compresivo mínimo σ_3 en la roca, los esfuerzos extensivos en los extremos de las fracturas orientados perpendicularmente en dirección a σ_3 se vuelven suficientes para que se propague la fractura. En otras palabras la presión de poro en una roca puede causar que las fracturas extensibles se propaguen incluso si ninguno de los esfuerzos remotos son extensibles, porque la presión de poro puede inducir un esfuerzo extensivo en las puntas de las fracturas que exceda la magnitud de σ_3 . Este proceso es llamado

fracturamiento hidráulico. En un diagrama de Mohr esto puede ser representado por el movimiento del círculo de Mohr hacia la izquierda (Fig 36). Note que las rocas no tienen que estar sobrepresionadas para que ocurra un fracturamiento hidráulico natural pero P_f debe ser igual o exceder la magnitud de σ_3 .

Figura 36. Diagrama de Mohr mostrando como el incremento en la presión de poro mueve el círculo de Mohr hacia el origen.



Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

Otro efecto de los fluidos proviene de la reacción química de estos fluidos con los minerales que forman la roca.

La reacción con los fluidos puede disminuir el esfuerzo extensivo necesario para causar la propagación de una fractura incluso si la presión de poro es baja. El agua por ejemplo, reacciona con el cuarzo para crear una sustitución de moléculas OH por átomos de O embebido en los extremos de la fractura.

Dado que el enlace entre los grupos OH adyacente no es tan fuerte como el enlace entre los átomos de O, éste se rompe más fácilmente, por lo tanto se necesita menos esfuerzo remoto extensivo para causar la propagación de la fractura. Este fenómeno es llamado *crecimiento subcrítico de fractura*, porque la propagación de la fractura ocurre a esfuerzos menores al esfuerzo crítico necesario para causar la propagación de fracturas en una roca seca.

4.3 DESLIZAMIENTO FRICCIONAL

La fricción es la resistencia al deslizamiento sobre una superficie. El deslizamiento friccional se refiere al movimiento en una superficie que ocurre cuando un esfuerzo de cizalla paralelo a la superficie excede la resistencia friccional al deslizamiento. Este concepto se rige bajo las *leyes de fricción de Amontons*:

- 1) La fuerza friccional es función de la fuerza normal
- 2) La fuerza friccional es independiente del área (aparente) de contacto (en sus palabras, “la resistencia causada por el rozamiento solo se incrementa o disminuye en proporción a la mayor o menor presión y no de acuerdo a la mayor o menor extensión de las superficies”)
- 3) La fuerza friccional es mayormente independiente del material usado (en sus palabras, “la resistencia causada por el rozamiento es más o menos la misma para el hierro, el plomo, el cobre y la madera en cualquier combinación si las superficies son cubiertas con grasa de cerdo”).

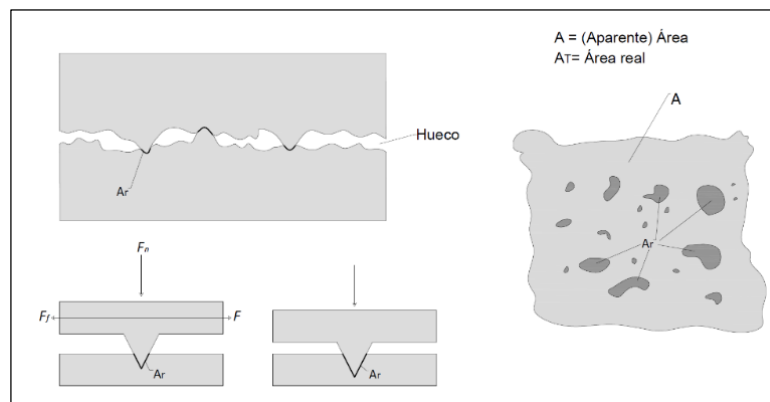
Es importante distinguir entre fricción estática la cual está asociada al primer movimiento (asociada con el criterio de falla de Coulomb) y la fricción dinámica, la cual está asociada al movimiento continuo.

La fricción existe dado que no hay ninguna superficie en la naturaleza que sea perfectamente suave sin importar cuán finamente pulida se encuentre. Los baches

e irregularidades que sobresalen de una superficie áspera son llamados asperezas (Fig. 37). Cuando dos superficies están en contacto ellas se tocan solo a través de las asperezas y las asperezas de una superficie pueden intentar penetrar la superficie opuesta. Para iniciar el deslizamiento de una superficie de roca más allá de otra es necesario, o que las asperezas se rompan o que creen una ranura o surco en la superficie opuesta.

El esfuerzo necesario para romper una aspereza o para causar el surcamiento depende del área real de contacto, por lo tanto mientras más sea el área real de contacto la resistencia friccional al deslizamiento incrementa. Así, la resistencia friccional al deslizamiento es proporcional a la componente de la fuerza normal a través de la superficie, debido a la relación entre el área real de contacto y la fricción. Un incremento en la fuerza normal (carga) empuja más profundamente las asperezas dentro de la superficie opuesta, causando un incremento en el área real de contacto.

Figura 37. Concepto de asperezas y el área real de contacto.



Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

4.3.1 Criterios de deslizamiento friccional

Debido a la fricción, cierto esfuerzo crítico de cizalla debe ser alcanzado en una roca antes de que se inicie un deslizamiento friccional sobre una fractura pre-existente; y una relación que define este esfuerzo crítico es *el criterio de falla de deslizamiento friccional*. Experimentos han demostrado que el criterio de falla de deslizamiento friccional es básicamente independiente del tipo de roca.

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_n} = \text{constante}$$

La relación empírica entre esfuerzo normal y esfuerzo de cizalla que mejor se ajusta a estas observaciones (conocido como la ley de Byerlee) depende del valor de σ_n . Para $\sigma_n < 200 \text{ MPa}$, el criterio que mejor se ajusta es una línea descrita por la relación $\sigma_s = 0.85\sigma_n$ mientras que para $200 \text{ MPa} < \sigma_n < 2000 \text{ MPa}$, el criterio que mejor se ajusta es una línea descrita por la ecuación $\sigma_s = 50 \text{ MPa} + 0.6 \sigma_n$. La proporcionalidad entre esfuerzo normal y esfuerzo de cizalla es llamada coeficiente de fricción μ .

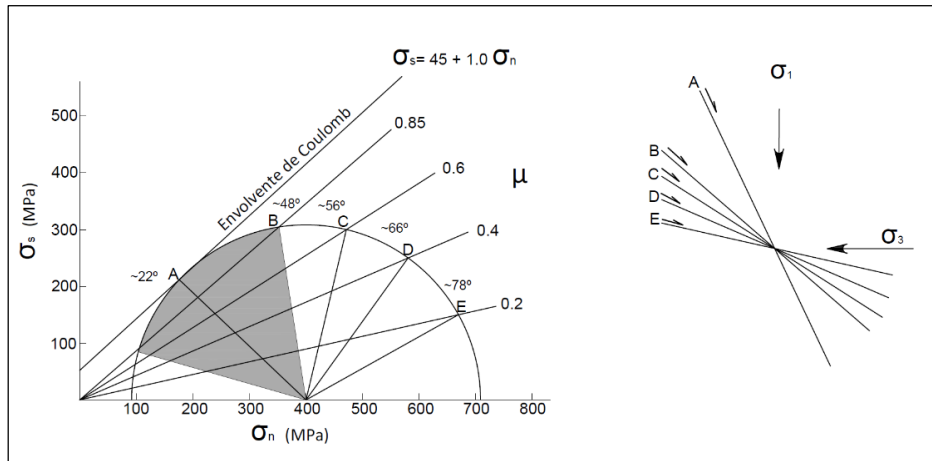
La envolvente de falla permite determinar rápidamente si es más probable que una ruptura de cizalla se deslice en una muestra o que una nueva ruptura de cizalla se forme (Fig. 38).

En la gráfica se puede observar que la pendiente y el intercepto de las dos envolventes son diferentes, de manera que para un rango específico de orientaciones de fracturas pre-existentes el círculo de Mohr que representa el estado de esfuerzos en una falla toca la envolvente friccional antes de que ésta alcance la envolvente de fractura, lo que quiere decir que la fractura pre-existente se deslice antes de que se forme una nueva fractura.

Sin embargo, las fracturas pre-existentes no siempre se deslizan antes de que una nueva fractura aparezca. Experimentos de presión confinada indican que si la fractura pre-existente está orientada en un ángulo mayor a la dirección de

σ_1 (generalmente $> 75^\circ$), la componente del esfuerzo normal a través de la discontinuidad es mayor que la resistencia al deslizamiento friccional, y es de hecho más fácil iniciar una nueva fractura a un ángulo más pequeño a la dirección de σ_1 . Entonces, el deslizamiento ocurrirá en la nueva fractura. Si la fractura pre-existente está en un ángulo muy pequeño a la dirección de σ_1 (generalmente $<15^\circ$), el esfuerzo de cizalla en la superficie es relativamente bajo, así que de nuevo termina siendo más fácil iniciar una nueva fractura de cizalla que puede causar deslizamiento en una superficie débil. Por lo tanto, los planos pre-existentes cuyos ángulos con respecto a σ_1 estén entre 15° y 75° probablemente se reactivaran antes de que se formen nuevas fracturas.

Figura 38. Diagrama de Mohr basado en experimentos con dolomita. Mostrando cómo un único estado de esfuerzos podría contactar la envolvente de deslizamiento friccional antes de que esta pudiera contactar la envolvente de Coulomb.



Fuente. VAN DER PLUIJM, Ben A & MARSHAK, Stephen. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. Segunda Edición, New York, 2004.

4.4 COHESIÓN²⁵

Las fallas no se crean en su totalidad en un instante dado. Por el contrario, primero se crea una pequeña fractura que después se va propagando de forma más o menos radial. La zona donde se ha producido translación es la falla y se termina en la **línea terminación**. La translación es mayor en el centro de la falla y se va amortiguando hacia la línea terminación. La zona donde la falla se está propagando se adapta a la envolvente de Mohr, lo que quiere decir que sigue el criterio de Coulomb de forma muy aproximada. Sin embargo, en la zona donde la fractura ya se ha producido, los esfuerzos no tienen que superar la resistencia cohesiva. En esa parte de las fallas y en fallas que se deslizan sin continuar propagándose en sus extremos, la condición de movimiento viene dada por un criterio de Coulomb modificado:

$$\tau = A_o + \mu\sigma$$

Ecuación 25

Donde A_o es la adherencia, es decir, la fuerza que tiende a mantener unidos los dos labios de la falla una vez que ya se ha producido la rotura. De manera precisa, puede definirse **adherencia** como el esfuerzo necesario para mover los dos labios de una falla previamente creada, cuando el esfuerzo normal que actúa sobre ella es cero.

A poca profundidad la adherencia es prácticamente nula. Sin embargo, para valores del esfuerzo normal sobre el plano de rotura superiores a 200 MPa (lo que equivale a profundidades superiores a unos 7 u 8 Km), la ecuación empírica de deslizamiento es:

²⁵ MARTINEZ CATALAN, José. Geología estructural y dinámica global. Universidad de Salamanca: España, 2003. 429 p.

$$\tau = 50 \text{ MPa} + 0,60 \sigma$$

Ecuación 26

Los 50 MPa de la derecha de la ecuación no equivalen a la resistencia cohesiva, puesto que Byerlee realizó sus experimentos con rocas previamente fracturadas. La conclusión es que ese término equivale a la adherencia, que tiene un valor diferente de cero a partir de cierta profundidad.

5. EVALUACIÓN DE LOS PRINCIPALES MECANISMOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN LOS YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS

5.1 REACTIVACIÓN DE FALLAS DEBIDO A CAMBIOS EN LA PRESIÓN DE PORO²⁶

Dependiendo del régimen de esfuerzos, las fallas usualmente normales o inversas pueden o no ser tectónicamente activas. Las fallas activas se deslizan bajo los movimientos tectónicos existentes y cargas litostáticas correspondientes al peso de sobrecarga (Mandl, 1988; Scholz, 1990). Los mecanismos transitorios de fricción en las fallas activas son comúnmente pensados como los responsables de muchos eventos sísmicos.

Es muy importante en este proyecto, reconocer que incluso una leve perturbación en el campo de esfuerzos in-situ podría desencadenar que tales fallas se deslicen. Aunque el cambio en los esfuerzos litostáticos típicamente se acumulan a través de periodos de tiempo geológico, las perturbaciones de esfuerzos pueden también ocurrir mucho más rápido, por ejemplo, a través de la escala de tiempo de la vida humana. Además existen un número de actividades humanas, tales como la producción e inyección de fluidos en un yacimiento de hidrocarburos, que pueden alterar suficientemente los esfuerzos in-situ en un periodo de pocos años o incluso meses, resultando en reactivación y deslizamiento de las fallas cercanas.

La reactivación de fallas debido a la depleción del yacimiento puede tener un amplio rango de consecuencias. Desde el punto de vista ingenieril, esto podría cizallar los pozos perforados a través de la zona de falla, liberar dinámicamente energía elástica almacenada e inducir eventos sísmicos y afectar drásticamente la

²⁶ CHANPURA, Rajesh. Fault reactivation as a result of reservoir depletion. Georgia, 2001. 320 p. Thesis for the degree (Doctor of Philosophy in Civil Engineering). Georgia Institute of Technology. School of Civil and Environmental Engineering.

permeabilidad de la formación. Desde el punto científico está claramente demostrada la importancia del efecto poroelástico. En efecto, la estabilidad de la falla no se verá afectada si la poroelásticidad del material del yacimiento no es tenida en cuenta. En la mayoría de los casos, el yacimiento es tratado como una inclusión poroelástica drenada rodeado por material elástico, y aparte del modelamiento numérico convencional, dos enfoques se han implementado:

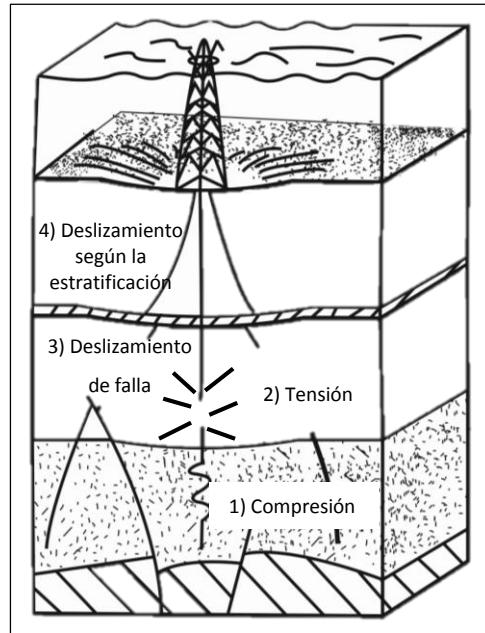
1. El yacimiento es modelado como una inclusión con las mismas propiedades del material para la matriz, pero con presión de poro diferente (Geertsma, 1966 and 1973; Segall, 1985, 1989 and 1992).
2. El yacimiento es modelado como una inclusión elipsoidal uniformemente presurizado con propiedades diferentes comparado con la roca circundante.

La reactivación de fallas durante la producción de petróleo es usualmente atribuida a la falla en pequeña escala asociado con la perforación de pozos. En este caso, las cavidades abiertas probablemente representan el caso extremo de una situación real, maximizando la perturbación de esfuerzos.

Hamilton et al. (1992) concluyeron que la producción de fluidos indujo daño de la tubería de revestimiento principalmente por cuatro mecanismos (Fig. 39):

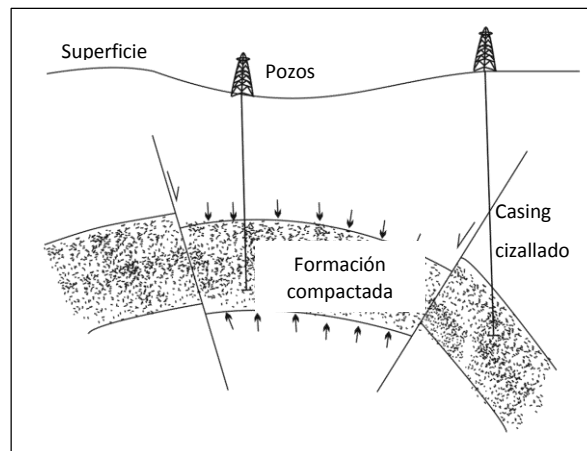
- 1) Falla por compresión y pandeo dentro del yacimiento.
- 2) Falla por tensión en los estratos de sobrecarga.
- 3) Falla por cizallamiento a lo largo de las fallas reactivadas en los estratos de sobrecarga.
- 4) Falla por cizallamiento a los largo de los planos de estratificación débiles en los estratos de sobrecarga.

Figura 39. Mecanismos de falla de pozo debido a la producción de fluidos.



Fuente. CHANPURA, Rajesh. Fault reactivation as a result of reservoir depletion. Tesis de doctorado, Instituto Tecnológico de Georgia. 2001.

Figura 40. Producción de fluidos indujo movimiento de falla y cizalladura del casing.



Fuente. CHANPURA, Rajesh. Fault reactivation as a result of reservoir depletion. Tesis de doctorado, Instituto Tecnológico de Georgia. 2001

La reactivación de fallas resultante de la producción o inyección de fluidos en medios porosos, puede estar acompañada de actividad sísmica, subsidencia, daño al pozo y la creación de patrones de pérdida de fluidos. Para asegurar el desarrollo aceptable del yacimiento en la producción de hidrocarburos, o proyectos de almacenamiento geológico, resulta crítico evaluar las tendencias de reactivación de fallas existentes y fracturas.

Durante la producción de fluidos de yacimientos de hidrocarburos y la inyección de fluidos durante un proceso de recobro mejorado, los cambios en los esfuerzos son inducidos dentro y alrededor de los yacimientos. Para asegurar que la producción o inyección pueda ser mantenida en una manera segura y efectiva, es importante evaluar el efecto de estos cambios de los esfuerzos en la integridad hidráulica de las rocas que limitan el yacimiento. Por ejemplo, si las superficies de falla por cizalla o tensión son inducidas, o si las fallas existentes o fracturas son reactivadas, probablemente estas características servirán como patrones de pérdida de fluidos. Además los pozos que están dentro o son adyacentes al yacimiento pueden ser cizallados o dañados, comprometiendo su integridad hidráulica y las estructuras de superficie pueden colapsar debido a la subsidencia. En casos extremos, los sismos pueden ser inducidos causando daño al equipo de operaciones y a las estructuras civiles.

Los cambios en la presión de poro resultantes de la producción o inyección de fluidos generaran cambios en los esfuerzos efectivos. Si un yacimiento fuera un cuerpo libre, los cambios en los esfuerzos efectivos podrían simplemente resultar en su contracción o expansión. Sin embargo, el yacimiento está unido a la roca circundante, donde se asume que no ha ocurrido cambios en la presión de poro. Debido a esta rivalidad entre las fuerzas internas y las restricciones externas, los cambios anisótropicos en el esfuerzo total pueden ser inducidos, dependiendo de la geometría del yacimiento, los contrastes entre las propiedades mecánicas del

yacimiento y la roca circundante y la distribución de las presiones de poro dentro del yacimiento. Este fenómeno ha sido llamado arqueamiento²⁷.

La relación del cambio en el esfuerzo total $\Delta\sigma_{ij}$ al cambio efectivo en la presión de poro $\alpha\Delta P$ dentro del yacimiento ha sido nombrado como la relación de arqueamiento de esfuerzo normalizado, $\gamma_{\alpha(ij)}$ por Soltanzadeh & Hawkes y expresado de la siguiente forma:

$$\gamma_{\alpha(ij)} = \frac{\Delta\sigma_{ij}}{\alpha\Delta P}$$

Ecuación 27

Asumiendo que la relación de arqueamiento de esfuerzo normalizado para un yacimiento dado ha sido determinada, el cambio de esfuerzo efectivo dentro del yacimiento puede ser calculado como sigue:

$$\Delta\sigma'_{ij} = -(\delta_L\delta_{ij} - \gamma_{\alpha(ij)})(\alpha\Delta P)$$

Ecuación 28

Donde δ_{ij} es el delta de Kronecker y δ_L es el índice de localización el cual es igual a uno (1) dentro del yacimiento y cero (0) dentro de la roca circundante.

5.1.1 Concepto de falla de Coulomb para el cambio de esfuerzo en fallamiento normal e inverso

El método de falla de Coulomb para el cambio de esfuerzo ha sido desarrollado para evaluar la posibilidad de reactivación de falla dentro y por fuera del yacimiento. El

²⁷ SOLTANZADEH, H. y HAWKES, C. A semi analytical model for predicting fault reactivation tendency induced by pore pressure change. Department of Civil and geological engineering. University of Saskatchewan, Canada.

esfuerzo de falla de Coulomb (CFS, por sus siglas en inglés) está definido como sigue (King et al. 1994):

$$CFS = \tau - \mu_s \sigma'_n$$

Ecuación 29

Donde τ y σ'_n respectivamente son el esfuerzo efectivo de cizalla y normal en el plano de falla y μ_s es el coeficiente de fricción en el plano de falla. Un plano de falla será reactivado cuando $CFS \geq 0$.

En un escenario de producción o inyección, donde los cambios de esfuerzos han sido inducidos, el cambio en el esfuerzo de falla de Coulomb puede ser evaluado como:

$$\Delta CFS = \Delta\tau - \mu_s \Delta\sigma'_n$$

Ecuación 30

Donde $\Delta\tau$ y $\Delta\sigma'_n$ son los cambios inducidos del esfuerzo efectivo de cizalla y normal en el plano de falla, respectivamente. El signo de $\Delta\tau$ es positivo cuando éste apunta en la misma dirección que el esfuerzo de cizalla inicial en el plano. El signo de $\Delta\sigma'_n$ es positivo para un incremento en el esfuerzo compresivo. Como tal, un valor de ΔCFS positivo indica una tendencia hacia la reactivación. Valores de ΔCFS tan pequeños como 0,1 MPa han sido encontrados para inducir actividad sísmica en escenarios fallados donde los valores de CFS inicial son cercanos a cero (0) (King et al., 1994; Segall et al., 1994).

Basado en el concepto de falla de Coulomb para el cambio de esfuerzo, Soltanzadeh & Hawkes, definieron el “factor reactivación de falla” (λ) el cual es un parámetro adimensional:

$$\lambda = \frac{\Delta CFS}{\alpha \Delta P}$$

Ecuación 31

Bajo condiciones de deformación plana, para regímenes de esfuerzo de falla normal e inversa, este parámetro puede ser escrito como:

$$\lambda = \delta_F (\delta_L - \gamma_{\alpha(H)}) \text{sen}\theta (\cos\theta + \delta_F \mu_s \text{sen}\theta) - \delta_F (\delta_L - \gamma_{\alpha(V)}) \cos\theta (\text{sen}\theta + \delta_F \mu_s \cos\theta) + \delta_D \gamma_{\alpha(HV)} ((\text{sen}^2\theta - \cos^2\theta) \delta_F - 2\mu_s \text{sen}\theta \cos\theta)$$

Ecuación 32

Donde:

θ = Ángulo de inclinación de la falla

$\gamma_{\alpha(H)}$ = Relación de arqueamiento de esfuerzo normalizado horizontal

$\gamma_{\alpha(V)}$ = Relación de arqueamiento de esfuerzo normalizado vertical

$\gamma_{\alpha(HV)}$ = Relación de arqueamiento de esfuerzo normalizado de cizalla

δ_F = Índice de régimen de esfuerzo

= 1 Para un régimen de esfuerzo de falla normal

= -1 Para un régimen de esfuerzo de falla inversa

δ_D = Índice de dirección de inclinación de la falla

= 1 Para fallas inclinadas de derecha a izquierda (Teniendo una pendiente positiva en un sistema de coordenadas cartesianas)

= -1 Para fallas inclinadas de izquierda a derecha

5.2 EVALUACION DE LA ESTABILIDAD DE FALLAS QUE LIMITAN EL YACIMIENTO DURANTE LA PERFORACIÓN²⁸

La experiencia de la perforación y los datos así obtenidos durante la exploración y desarrollo de campos pueden ser utilizados para caracterizar las propiedades geomecánicas de las fallas y sus implicaciones en la evaluación de riesgos. Los resultados del modelamiento geomecánico están basados en los registros disponibles y los datos de perforación, junto con las observaciones de falla de distintos pozos vecinos. Dicho modelo geomecánico de tres dimensiones permite determinar las condiciones de esfuerzo cerca de estas fallas. El tensor de esfuerzos es combinado con un criterio de falla para evaluar la posible inestabilidad de la falla.

La perforación a través de algunas de estas fallas se hace necesaria para alcanzar los principales objetivos de un yacimiento. Entonces, se deben conocer los esfuerzos efectivos que actúan sobre cada superficie de la falla con el fin de determinar si estas fallas están activas bajo el campo de esfuerzos actual. Para entender el riesgo de pérdidas durante la perforación, es necesario estimar la presión de fondo de pozo, y la densidad del lodo requerida para inducir la falla de cizallamiento a lo largo de las principales superficies de falla.

Los datos MWD son utilizados con éxito para validar el modelo y resaltar la importancia de la evaluación de la estabilidad de falla para ayudar a controlar la presión del fondo del hueco y mitigar el riesgo de pérdidas durante la perforación.

El modelado predictivo de la estabilidad de falla representa una parte integral de la geomecánica petrolera, no sólo desde una perspectiva de producción en el campo, sino también desde el punto de vista de la perforación. Se trata de dos aspectos críticos en los que la estabilidad de la falla juega un papel importante, no siempre

²⁸ FERNANDEZ, Fermín. y CASTILLO, David. Assessing stability of reservoir bounding faults while drilling. Paper SPE 132826, 2010.

considerados durante la planificación del desarrollo del campo. Un gran conjunto de datos han sido publicados en la evaluación de fallas sellantes desde el punto de vista de producción/exploración, (e.g., Finkbeiner et al., 1997; Castillo et al., 2000; Wirprut and Zoback, 2000; Langhi et al., 2010); sin embargo, pocos estudios discuten sobre el potencial de inestabilidad de la falla mientras se perfora.

Las fallas y fracturas son estructuras sensibles a los esfuerzos los cuales pueden responder mecánicamente (deslizamiento por cizallamiento) a los cambios en el campo de esfuerzos en la forma de fallamiento de cizalla o al cierre de la fractura. El fallamiento de cizalla a lo largo de las fallas puede aumentar la permeabilidad de éstas y comprometer la integridad de las fallas que limitan los yacimientos. Los cambios en la presión del yacimiento y los cambios subsiguientes en esfuerzos tienen impacto directo sobre la estabilidad de las fallas cercanas. En este sentido, los estudios de estabilidad de falla están normalmente enfocados en los efectos de la inyección o depleción a nivel de yacimiento, sin embargo, los problemas suelen venir durante las primeras etapas de la perforación.

Es una idea común que las pérdidas tienen lugar cuando el gradiente de fractura es sobrepasado debido al fracturamiento hidráulico de la formación. Sin embargo, esta no es la única fuente de pérdidas, y en muchos casos la porosidad secundaria (fallas / fracturas) y altas presiones de fondo de pozo (BHP) son la razones de las pérdidas dinámicas. En yacimientos donde hay fallas en sus fronteras es una práctica común perforar a través de algunas de estas fallas para alcanzar el objetivo principal. Si estas fallas están óptimamente orientadas, ellas podrían ser reactivadas por un peso del lodo más bajo que el esfuerzo principal mínimo y el límite superior de la ventana de operación de lodo podría ser reducido (es decir, las fallas óptimamente orientadas podrían reactivarse antes de alcanzar el esfuerzo principal mínimo o el gradiente de fractura).

Desde el punto de vista de la perforación, un análisis de estabilidad de falla puede proporcionar la máxima presión del fondo del pozo (BHP) permisible que no sea excedida durante la perforación, de modo que no ocurra reactivación de falla. Los análisis de estabilidad de falla requieren un conocimiento preciso de las geometrías de falla, las presiones de poro y las magnitudes y orientaciones de los esfuerzos in-situ. La experiencia en perforación y los datos obtenidos durante la exploración de campo y las campañas de desarrollo son poderosas fuentes de información que pueden ser utilizadas para caracterizar las propiedades geomecánicas de las zonas de falla y sus implicaciones en la evaluación de riesgos.

5.3 MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE FALLAS EN EL YACIMIENTO DURANTE LA PERFORACIÓN²⁹

5.3.1 Mecánica de fallas

La mecánica de fractura lineal elástica es un enfoque que tiene sus raíces en el balance de energía de Griffith. Esto es un enfoque de la mecánica del continuo en el cual la fractura es idealizada matemáticamente como una abertura estrecha y plana en un medio lineal elástico. Consiste en analizar el campo de esfuerzos alrededor de la fractura y luego formular un criterio de fractura basado en parámetros críticos del campo de esfuerzos.

En la formulación del criterio de fractura se busca una relación entre los esfuerzos principales y algunos parámetros con los cuales un material puede ser caracterizado. El criterio el cual los experimentos muestran que es generalmente adecuado, es en el que la falla de tensión se producirá con la separación en un plano normal al esfuerzo principal mínimo, cuando ese esfuerzo es tensil y excede

²⁹ FERNANDEZ, Fermín. y CASTILLO, David. Assessing stability of reservoir bounding faults while drilling. Paper SPE 132826, 2010.

algún valor T_o (resistencia a la tensión). Así $\sigma_3 = -T_o$. La falla por cizalla bajo un estado de esfuerzos compresivos es comúnmente descrita con el criterio de falla de Mohr-Coulomb. De acuerdo a este criterio, la falla friccional de Coulomb de una falla no-cohesiva, ocurrirá si τ , el esfuerzo de cizalla y σ'_n el esfuerzo normal efectivo ($\sigma'_n = \sigma_n - P_p$), están relacionadas por:

$$\tau = \mu \sigma'_n$$

Ecuación 33

Donde μ es el coeficiente de fricción interna. El esfuerzo de cizalla y el esfuerzo normal efectivo actuando en cada plano de fractura son calculados usando las magnitudes de los esfuerzos principales, la presión de poro y la orientación del plano de fractura con respecto a las orientaciones de los esfuerzos principales (Jaeger & Cook, 1979).

La función de falla de Coulomb (CFF) puede ser definida como:

$$CFF = \tau - \mu(\sigma_n - P_p)$$

Ecuación 34

El criterio de falla de Coulomb puede ser resuelto en términos de la presión de poro (llamada presión de poro crítica, P_{pcrit}), en el cual un elemento de falla empezará a deslizarse cuando $CFF = 0$.

$$P_{pcrit} = \sigma_n - \frac{\tau}{\mu}$$

Ecuación 35

La P_{pcrit} y CFF son usualmente calculados usando un coeficiente de fricción de 0,6 basado en medidas de laboratorio de la resistencia friccional de la roca prefracturada (Byerlee, 1978). La diferencia entre la presión de poro crítica y la presión de poro de referencia es llamada diferencia de presión de poro crítica:

$$\Delta P_{crit} = P_{crit} - P_p$$

Ecuación 36

Estos valores muestran que tan cercano está un elemento de falla al deslizamiento, dada la presión de poro de referencia determinada para el campo. ΔP_{crit} es una medida del exceso de presión por encima de la presión de poro que cada segmento de la falla puede resistir antes de deslizarse; por lo tanto, esto es una medida de la probabilidad de falla relacionada con el flujo de fluidos.

El elipsoide de esfuerzos es utilizado para visualizar las orientaciones y magnitudes relativas de los esfuerzos principales en un punto, y para clarificar la relación entre los vectores de esfuerzos en un plano individual y el tensor de esfuerzos representado por la orientación y forma del elipsoide completa. Sin embargo, no es muy conveniente para mostrar la relación entre la orientación del plano y las magnitudes de los esfuerzos normal y de cizalla sobre ella. El diagrama de Mohr es usualmente considerado en este caso.

El diagrama de Mohr es una herramienta comúnmente usada para representar la relación entre los esfuerzos normales σ_n y de cizalla τ actuando en una superficie particular. σ_1 y σ_3 representan el máximo y mínimo esfuerzo principal actuando en una superficie de falla. Cuando la presión de poro es considerada (P_p), las magnitudes de los esfuerzos principales se reducen, resultando en lo que se conoce como esfuerzos efectivos (σ'_1 y σ'_3). La resistencia de falla o fricción de deslizamiento es una propiedad intrínseca de cada falla o fractura, y es usada como un enfoque de que tan fuerte es la falla. Esta propiedad es también trazada junto con el círculo de Mohr como una línea cuya pendiente es definida como la resistencia de falla.

Si la relación del esfuerzo de cizalla al esfuerzo normal efectivo excede la fricción de deslizamiento, la probabilidad de que la falla por cizalla ocurra es alta, y entonces se dice que la fractura esta críticamente esforzada. Si la falla de cizalla ocurre, la

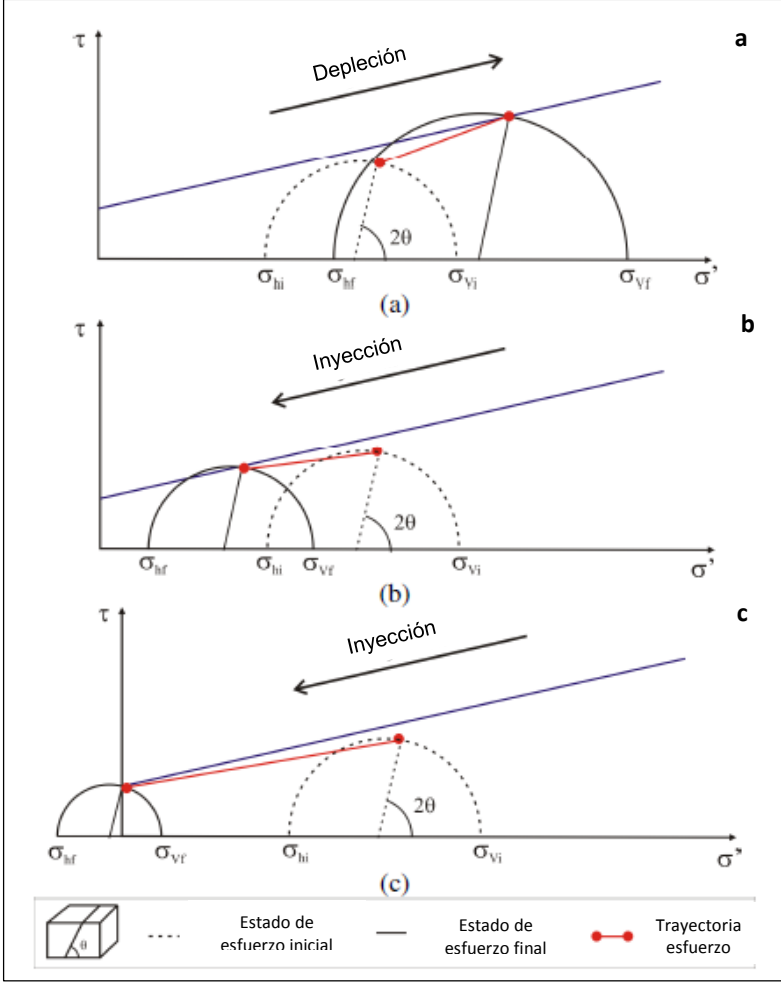
membrana sello dentro de la fractura se romperá y se formará la permeabilidad de fractura. Se ha demostrado que las fracturas con altas relaciones de esfuerzo de cizalla al esfuerzo normal efectivo, tienden a ser hidráulicamente conductivas, mientras que las fracturas con bajas relaciones de esfuerzo de cizalla al esfuerzo normal efectivo no tienden a ser hidráulicamente conductivas.

5.4 EVALUACIÓN DE LA TENDENCIA A LA REACTIVACIÓN DE FALLAS DURANTE LA INYECCIÓN O PRODUCCIÓN DE FLUIDOS

La reactivación y apertura de fallas geológicas durante la inyección de fluidos al yacimiento es un aspecto importante en el diseño de presiones de inyección para campos de petróleo. Como la presión de poro se incrementa en el yacimiento, el esfuerzo normal efectivo en el plano de falla decrece, y como consecuencia la falla se desliza y se reactiva. Eventualmente, debido al incremento de la presión de poro, el esfuerzo normal efectivo decrece a cero y la falla se abre. Ambos fenómenos son indeseables, ya que los fluidos hidrocarburos pueden así migrar desde el yacimiento a otras capas porosas y/o causar fuga de fluidos a superficie. Durante la depleción, el esfuerzo horizontal σ_h decrece y así se incrementa el diferencial $\sigma_v - \sigma_h$. Como consecuencia, la falla puede reactivarse a pesar del incremento en los esfuerzos efectivos como se muestra en la figura 41(a). Por otro lado durante la inyección el esfuerzo horizontal se incrementa y reduce la diferencia $\sigma_v - \sigma_h$ como se ilustra en la figura 41 (b)-(c). En este caso, la falla puede reactivarse si el esfuerzo de cizalla alcanza la envolvente de falla y/o la falla puede abrirse si el esfuerzo normal efectivo llega a ser cero, como es mostrado en las figuras 41 (b)-(c) respectivamente. Nótese que dependiendo de las propiedades y orientación de la falla, es posible para una falla abrirse antes de la reactivación y como consecuencia permitir el flujo de fluidos.

Figura 41. Diagramas de Mohr Coulomb para una falla reactivada.

a) Una falla reactivada durante la depleción: b) Una falla reactivada durante la inyección; c) Apertura de falla durante la inyección.



Fuente. NATCH, Pedro, et al. Investigation of Geological Fault Reactivation and Opening. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2010.

5.4.1 Máxima presión de inyección sostenible para prevenir reactivación de fallas

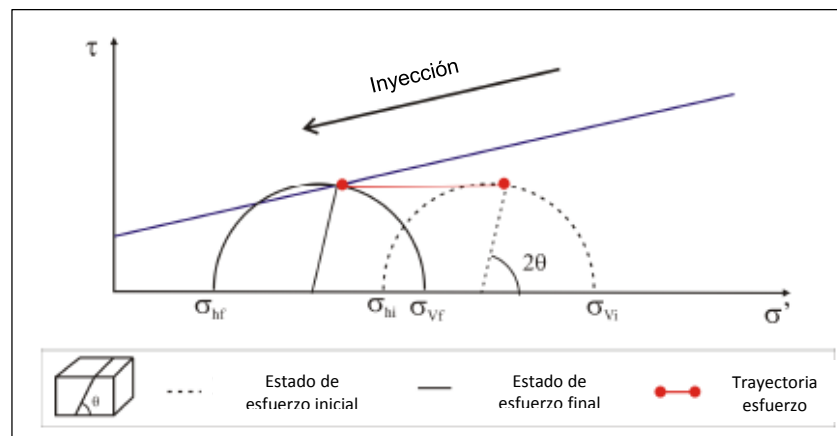
Durante la inyección, un estimativo de la presión de inyección requerida para inducir reactivación de fallas, puede ser obtenido sin tener en cuenta cambios verticales y horizontales. Por lo tanto, una expresión explícita para la presión de poro puede ser hallada resolviendo siguiente ecuación

$$ST = \frac{\tau}{\tau_{slip}}$$

Ecuación 37

Para P cuando $ST = 1$. En este caso, el círculo de Mohr se mueve hacia el origen sin cambios en el tamaño como se muestra en la figura 42.

Figura 42. Diagrama de Mohr Coulomb para una falla reactivada durante la inyección.



Fuente. NATCH, Pedro, et al. Investigation of Geological Fault Reactivation and Opening. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2010.

Los resultados demuestran que, durante la producción de un yacimiento con régimen de falla de esfuerzos normales, la reactivación de falla tiende a ocurrir dentro del yacimiento y sus flancos adyacentes. Para un régimen de esfuerzos en falla inversa, solo las fallas localizadas en las rocas supradycientes y subadyacentes del yacimiento tienden a reactivarse. Los resultados para un caso análogo de inyección de fluidos, son exactamente opuestos. Los análisis de sensibilidad muestran que en los sitios de límites donde se definen las regiones con tendencia de reactivación (o estabilización) no son muy sensibles al coeficiente de fricción de falla.

Durante la producción de hidrocarburos de un yacimiento, la inyección de fluidos para el recobro mejorado, los cambios inducidos en los esfuerzos dentro y alrededor del yacimiento podrían conducir a la reactivación de discontinuidades geológicas existentes incluyendo fallas, fracturas o diaclasas (referidas en este texto en conjunto como fallas). Varios riesgos están relacionados a la reactivación de estas fallas. Posterior a la reactivación, estas características tenderán a servir como patrones de fuga de fluidos. Además, los pozos dentro o alrededor de los yacimientos pueden fallar y dañarse, y la subsidencia de la superficie del terreno algunas veces asociada con la reactivación de fallas puede dañar las estructuras en superficie. En casos extremos, los sismos pueden ser inducidos causando daños a las estructuras civiles o a las facilidades de superficie³⁰.

Varios métodos han sido desarrollados para evaluar la tendencia de reactivación de fallas para fallas existentes inducidas por la producción o inyección de fluidos dentro del yacimiento. Streit y Hillis usaron un criterio de falla de Mohr-Coulomb para predecir el rango de ángulos de buzamiento de falla, el cual pudo ser reactivado dentro del yacimiento durante la producción de crudo del campo Ekofisk, en el sector Noruego del mar del Norte. Sus análisis asumieron que no hay cambios en los esfuerzos verticales ocurridos durante la producción, pero el esfuerzo horizontal

³⁰ **SOLTANZADEH H. y HAWKES C.** A semi analytical model for predicting fault reactivation tendency induced by pore pressure change. Department of Civil and geological engineering. University of Saskatchewan, Canada.

mínimo disminuyó a medida que la presión del yacimiento decaía. Una tasa constante en el cambio de la presión para cambiar el esfuerzo horizontal mínimo fue usada en su trabajo, el cual fue usado en mediciones de campo. Su aproximación fue similar, en principio, al presentado por Hawkes y compañeros, quienes combinaron un escenario de compresión uniaxial con el criterio de falla de Mohr-Coulomb para predecir el rango de ángulo de buzamiento para fallas dentro de un yacimiento que tiende hacia la reactivación durante la inyección o producción de fluidos. En trabajos posteriores, la proporcionalidad entre el cambio de la presión de poro el cambio en el esfuerzos horizontal estuvo basado en la teoría poro-elástica, para un yacimiento de extensión lateral infinita.

Soltanzadeh y Hawkes usarón la teoría de inclusiones para la mitad del espacio para resolver los esfuerzos inducidos dentro y por fuera de un yacimiento bajo condiciones de deformación planar, para yacimientos de secciones transversal rectangular y elíptica. Su trabajo incluyó yacimientos de tipo horizontal, así como también yacimientos que se sumergían dentro del plano de sección transversal. Ellos integraron los resultados del análisis de esfuerzos inducidos con la metodología del cambio de esfuerzos de falla de Coulomb (ΔEFC) para proporcionar un medio de evaluación de la tendencia de reactivación de fallas dentro y por fuera de los yacimientos como consecuencia de la producción o inyección de fluidos.

5.4.2 Análisis de esfuerzos inducidos usando la teoría de inclusiones

El cambio de la presión de poro como resultado de la producción o inyección de fluidos en un yacimiento de hidrocarburos puede generar cambios en los esfuerzos efectivos. El cambio de esfuerzo efectivo $\Delta\sigma'_{ij}$ está relacionado al cambio de la presión de poro ΔP y al cambio del esfuerzo total $\Delta\sigma_{ij}$ como sigue:

$$\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma'_{ij} + \alpha\Delta P\delta_{ij}$$

Ecuación 38

Donde α es el coeficiente de Biot, δ_{ij} es el delta Kronecker, y ΔP es considerado positivo para la inyección y negativo para la producción.

Si un yacimiento fuera un cuerpo libre, el cambio del esfuerzo efectivo podría simplemente resultar en contracción o expansión. Sin embargo, debido al hecho de que el yacimiento está unido a sus rocas vecinas, los cambios en la presión de poro resultantes de la producción o inyección de fluidos generarán cambios anisotrópicos en los esfuerzos totales dentro y alrededor de este. Este fenómeno ha sido llamado arqueamiento. Las razones de los cambios en los esfuerzos totales ($\Delta\sigma_{ij}$) en cualquier punto dado al cambio efectivo en la presión de poro (ΔP) dentro del yacimiento han sido denominadas como razones de arqueamiento de los esfuerzos normalizados ($\gamma_{\alpha(ij)}$) hecho por Soltanzadeh y Hawkes.

$$\gamma_{\alpha(ij)} = \Delta\sigma_{ij}/(\alpha\Delta P)$$

Ecuación 39

Asumiendo que las razones de arqueamiento del esfuerzo normalizado para un yacimiento dado han sido determinadas, los cambios de los esfuerzos efectivos dentro del yacimiento pueden ser calculados como sigue:

$$\Delta\sigma'_{ij} = -(\delta_L\delta_{ij} - \gamma_{\alpha(ij)})(\alpha\Delta P)$$

Ecuación 40

Donde δ_L es el índice de ubicación el cual es igual a uno dentro del yacimiento y cero dentro de las rocas vecinas. Los valores de las razones de arqueamiento de los

esfuerzos normalizados dependen principalmente de las propiedades mecánicas y la geometría del yacimiento y de sus rocas vecinas.

Para un caso especial de un yacimiento homogéneo, lineal elástico con las mismas propiedades elásticas que sus rocas vecinas, los valores de las razones de arqueamiento de los esfuerzos normalizados pueden encontrarse usando la teoría de las inclusiones como lo presentaron Soltanzadeh y Hawkes para un yacimiento de extensión infinita. (Condiciones de deformación plana).

5.4.3 Cambio de esfuerzos de falla coulomb (ΔEFC)

El método ΔEFC fue desarrollado para evaluar la probabilidad de reactivación de falla debido a los cambios en los esfuerzos efectivos. En el escenario de inyección y/o producción, en los cuales los cambios de esfuerzos han sido inducidos, el cambio en el esfuerzo de falla Coulomb pueden ser evaluados por:

$$\Delta EFC = \Delta\tau - \mu_s \Delta\sigma'_n$$

Ecuación 41

Donde $\Delta\tau$ y $\Delta\sigma'_n$, respectivamente, son los cambios inducidos de cizalla y los esfuerzos normales efectivos en el plano de falla, y μ_s es el coeficiente de fricción. Un valor de ΔEFC positivo indica una tendencia hacia la reactivación de fallas. Los valores ΔEFC tan pequeños como 0.1 MPa han sido encontrados para inducir la actividad sísmica en entornos con fallas donde los valores iniciales de EFC son cercanos a cero.

Basado en el concepto de cambios de esfuerzos de falla Coulomb, Soltanzadeh y Hawkes definieron el factor de reactivación de falla λ , el cual es un parámetro adimensional:

$$\lambda = (\delta_L - \gamma_{\alpha(H)}) \text{sen } \theta (\delta_F \cos \theta + \mu_S \text{sen } \theta) - (\delta_L - \gamma_{\alpha(V)}) \cos \theta (\delta_F \text{sen } \theta - \mu_S \cos \theta) + \delta_D \gamma_{\alpha(HV)} ((\text{sen}^2 \theta - \cos^2 \theta) \delta_F - 2\mu_S \text{sen } \theta \cos \theta)$$

Ecuación 42

Donde θ es el ángulo de buzamiento, $\gamma_{\alpha(H)}$ es la razón de arqueamiento del esfuerzo horizontal normalizado, $\gamma_{\alpha(V)}$ es la razón de arqueamiento del esfuerzo vertical normalizado, $\gamma_{\alpha(HV)}$ razón de arqueamiento del esfuerzo de cizalla normalizada, δ_F es el índice del régimen de esfuerzos, el cual es igual a 1 para el régimen de esfuerzos de fallas normales y -1 para el régimen de esfuerzos de fallas inversas, y δ_D es el índice de dirección de buzamiento de la falla, el cual es igual a 1 para fallas que buzaban hacia la esquina inferior izquierda del plano de análisis transversal y -1 para falla que buzaban hacia la esquina inferior derecha.

La tendencia de reactivación de fallas para un yacimiento durante la depleción o inyección pueden ser evaluadas evaluando el factor de reactivación de fallas (λ) usando la ecuación anterior.

5.4.4 Efecto del coeficiente de fricción en regiones potenciales de reactivación de falla³¹

El valor exacto del coeficiente de fricción de la superficie de falla es una de las incertidumbres en el análisis de reactivación de fallas. Una de las aplicaciones útiles de la metodología descrita anteriormente es el estudio de la sensibilidad de las regiones potenciales a la reactivación de fallas usando el valor de μ_S . Byerlee sugirió que los valores de coeficiente de fricción varían entre 0.65 y 0.8 para superficies de

³¹ **SOLTANZADEH H. y HAWKES C.** A semi analytical model for predicting fault reactivation tendency induced by pore pressure change. Department of Civil and geological engineering. University of Saskatchewan, Canada.

deslizamiento natural en un amplio rango de rocas; sin embargo, hay algunas fallas conocidas con baja resistencia friccional.

Es importante destacar, sin embargo, que el coeficiente de fricción es un parámetro muy sensible cuando se predice la magnitud de la cambio de presión (por lo tanto el esfuerzo) requerido para reactivar una falla.

5.4.5 Identificación de los ángulos críticos de buzamiento de falla dentro y alrededor de los yacimientos³²

La metodología presentada anteriormente para identificar las regiones que tienden hacia la reactivación de fallas para un ángulo de buzamiento dicho puede extenderse a una metodología más general que considere todos los ángulos de buzamiento usando el criterio $\lambda = 0$, $\Delta EFC = 0$ para identificar las fronteras entre regiones de reactivación y estabilización de fallas.

Por lo tanto es posible predecir el rango de ángulos de buzamiento de falla en cualquier punto de análisis del plano de la sección cruzada que tiende hacia la reactivación. Resolviendo la ecuación 42 para un valor de $\lambda = 0$ resulta en la siguiente ecuación para un ángulo de buzamiento de falla crítico (θ).

$$M \tan^2 \theta + N \tan \theta + Q = 0$$

Ecuación 43

Donde

$$M = \mu_s R_\sigma + \delta_D \delta_F R_\tau$$

Ecuación 44

³² SOLTANZADEH H. y HAWKES C. A semi analytical model for predicting fault reactivation tendency induced by pore pressure change. Department of Civil and geological engineering. University of Saskatchewan, Canada.

$$N = \delta_F(R_\sigma - 1) - 2\mu_s\delta_D R_\tau$$

Ecuación 45

$$Q = \mu_s - \delta_F\delta_D R_\tau$$

Ecuación 46

En esta ecuación, R_σ es la razón de cambio del esfuerzo el cual ha sido definido previamente, como la razón del cambio de esfuerzo efectivo horizontal al cambio de esfuerzos efectivos verticales:

$$R_\sigma = \frac{\Delta\sigma'_H}{\Delta\sigma'_V} = \frac{\delta_L - \gamma_{\alpha(H)}}{\delta_L - \gamma_{\alpha(V)}}$$

Ecuación 47

Y R_τ es la razón de cambio del esfuerzo de cizalla, el cual está definido como la razón de cambio del esfuerzo de cizalla al cambio de esfuerzo efectivo vertical.

$$R_\tau = \frac{\Delta\tau_{HV}}{\Delta\sigma'_V} = \frac{\gamma_{\alpha(HV)}}{\delta_L - \gamma_{\alpha(V)}}$$

Ecuación 48

Este diagrama de flujo provee un rango de los ángulos de buzamiento de falla, $\theta_{min} < \theta < \theta_{max}$ donde el factor de reactivación de falla (λ) es negativo, λ es positivo para ángulos de buzamiento de fallas por fuera de este rango. Por lo tanto, cualquier falla con un ángulo de buzamiento dentro del rango tiende hacia la reactivación durante la producción y tiende a la estabilización durante la inyección. En contraste, cualquier falla con un ángulo de buzamiento por fuera de este rango tiende hacia la estabilización durante la producción y hacia la reactivación durante inyección.

5.5 ANÁLISIS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS NATURALES CAUSADA POR PROPAGACIÓN DE UNA FRACTURA HIDRÁULICA INDUCIDA³³

Un modelo basado en la teoría de dislocaciones permitió predecir la reactivación de una falla natural debido a la presencia de una fractura hidráulica cercana. En particular, el modelo permitió el análisis del campo de esfuerzos a lo largo de la interface para determinar la ubicación más probable de la re-iniciación de la fractura inducida. El modelo tiene en cuenta la influencia del ángulo de fricción de falla, la orientación de falla y la presión en la fractura inducida. En ausencia de cohesión en la falla, la fractura inducida no podrá, en la mayoría de los casos, cruzar la falla sin un desplazamiento.

La propagación de las fracturas hidráulicas a través de interfaces naturales o discontinuidades es un tema importante, que hay que entender para predecir o interpretar la estimulación del medio fracturado, tales como gas en areniscas compactadas, gas asociado a mantos de carbón o shales (Anderson 1981, Medlin & Fitch 1988, Daneshy 2003). Varios estudios de campo y experimentos de laboratorio han revelado la complejidad de los patrones de fracturas (Teufel & Clark 1984, Warpinski & Teufel 1987, Jeffrey et al. 1992, de Pater & Beugelsdijk 2005). La cuestión principal es si la fractura inducida cruzará una interface, si puede detenerse en la interface o continuará con un desvío, como se muestra en la figura 43. Dependiendo de la aplicación, se quiere evitar que la fractura se detenga o se desvíe para maximizar la amplitud de la fractura, o garantizar la reapertura de la falla para incrementar las áreas de superficie de roca expuesta.

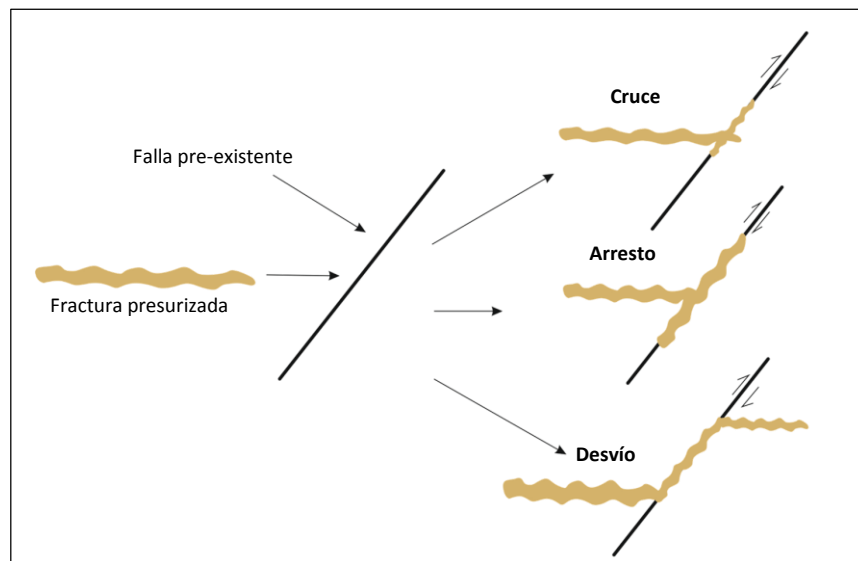
Trabajos previos utilizaron un par de modelos numéricos que han demostrado la complejidad de los mecanismos de propagación, tales como la influencia del coeficiente de fricción de la falla y esfuerzos de la tierra (Keer y Chen 1981, Shaffer et al. 1984, Jeffrey et al. 1987, Zhang y Jeffrey 2006, Zhang et al, en prensa). Sin

³³ **THIERCELIN M. y MAKKHYU, E.** Stress field in the vicinity of a natural fault activated by the propagation of an induced hydraulic fracture", Schlumberger Moscow Research, Moscow.

embargo, un análisis numérico completo no permite un análisis rápido para ser utilizado para la aplicación en el campo.

En esta sección, la reactivación de falla se debe a la presencia de una fractura hidráulica cercana. En particular se ha analizado el campo de esfuerzos a lo largo de la interface para determinar la ubicación más probable de la nueva fractura inducida. Este enfoque se basó en la suposición de que la reiniciación en el lado opuesto de la falla natural se produce antes de que la fractura inducida alcance la interface (Thiercelin y compañeros, 1987). En la interface existe fricción y cohesión, aunque los autores han asumido que la cohesión de la interface es igual a cero. El modelo predice que la zona de apertura de falla y el deslizamiento se encuentran en función de propiedades de la falla y la inclinación de ésta, de los esfuerzos in situ, y de las características de la fractura inducida.

Figura 43. Tres tipos de interacción entre la propagación de una fractura hidráulica inducida y una falla natural.



Fuente. THIERCELIN, M. & MAKHYU, E. Stress field in the vicinity of a natural fault activated by the propagation of an induced hydraulic fracture. Schlumberger Moscow Research, Moscow, 2004.

Thiercelin et al. demostraron que la longitud de la apertura y la zona de deslizamiento se incrementa cuando la fractura alcanza la falla, y que la zona de deslizamiento es en estos casos mucho más grande que la zona abierta.

Más significativa aún es la influencia del perfil de presión en la fractura inducida. Un perfil de caída de presión parabólico dentro de la fractura genera mayor reactivación de la falla pre-existente que un perfil de presión constante. En otras palabras, al mismo campo de esfuerzos cerca del extremo de la fractura, el perfil de presión parabólico generará mayores zonas de deslizamiento y apertura que el perfil de presión constante. Esto demuestra que la reactivación de fallas, no es solamente debido a la particularidad de esfuerzos cerca de los extremos sino también al campo de esfuerzo total causado por la fractura presurizada.

Por otro lado, un aumento del ángulo de inclinación de la interface disminuirá la longitud de la zona de apertura y de cizalla.

Para el caso de una fractura uniformemente presurizada la zona de deslizamiento es casi igual a la zona de apertura, lo cual permite altas concentraciones de esfuerzos de tensión en ambos extremos de las zonas reactivadas.

Así que cuanto más cortas son las longitudes de los segmentos activos en las fallas pre-existentes, mayores esfuerzos de tensión aparecerán en el lado opuesto de la falla natural, y cuanto más cerca está la longitud de la zona de deslizamiento a la longitud de la zona abierta, los esfuerzos de tensión estarán más concentrados.

Además existe una correlación entre el ángulo de inclinación de la falla pre-existente y las longitudes de las zonas activas; una alta inclinación favorece el cruce (existencia de una zona de alta tensión al otro lado de la falla) y un bajo ángulo de inclinación favorece la activación de la interface.

La ubicación de estas zonas de alta tensión cerca de la falla natural, depende también del ángulo de inclinación, el coeficiente de fricción a lo largo de la falla, el campo de esfuerzos lejano y obviamente dependerá de la distancia entre el extremo de la fractura y la falla.

6. MODELO PARA EL ANÁLISIS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS

6.1 MODELO PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE REACTIVACIÓN DE PLANOS DE FALLA³⁴

6.1.1 Antecedentes

El control mecánico de reactivación de fallas es una cuestión muy importante para entender el riesgo sísmico (McKenzie, 1969; Scholz, 1998). Durante tres décadas, los investigadores han desarrollado métodos derivados directamente de la teoría de Mohr Coulomb y se han enfocado en estimar el potencial de reactivación de fallas existentes.

El primer método, introducido por Sibson (1985), consiste en un análisis 2-D que calcula la relación de esfuerzo efectivo $R = \sigma'_1 / \sigma'_3$ requerida para reactivar el plano de falla. Para ser reactivado, el plano de falla debe alcanzar la envolvente de reactivación gobernada por el criterio de Mohr-Coulomb ($\tau = \mu_s \sigma_n$) donde τ es el esfuerzo de cizalla en el plano pre-existente, μ_s el coeficiente de fricción estática y σ_n el esfuerzo normal actuando en el plano de falla (Fig 44). El análisis de reactivación de falla requiere el conocimiento del ángulo θ_r entre el plano de falla y el esfuerzo principal máximo σ_1 . Esto está también limitado para casos en los cuales el esfuerzo principal intermedio σ_2 está en el plano de falla. Por último, este método asume que las fallas son no cohesivas.

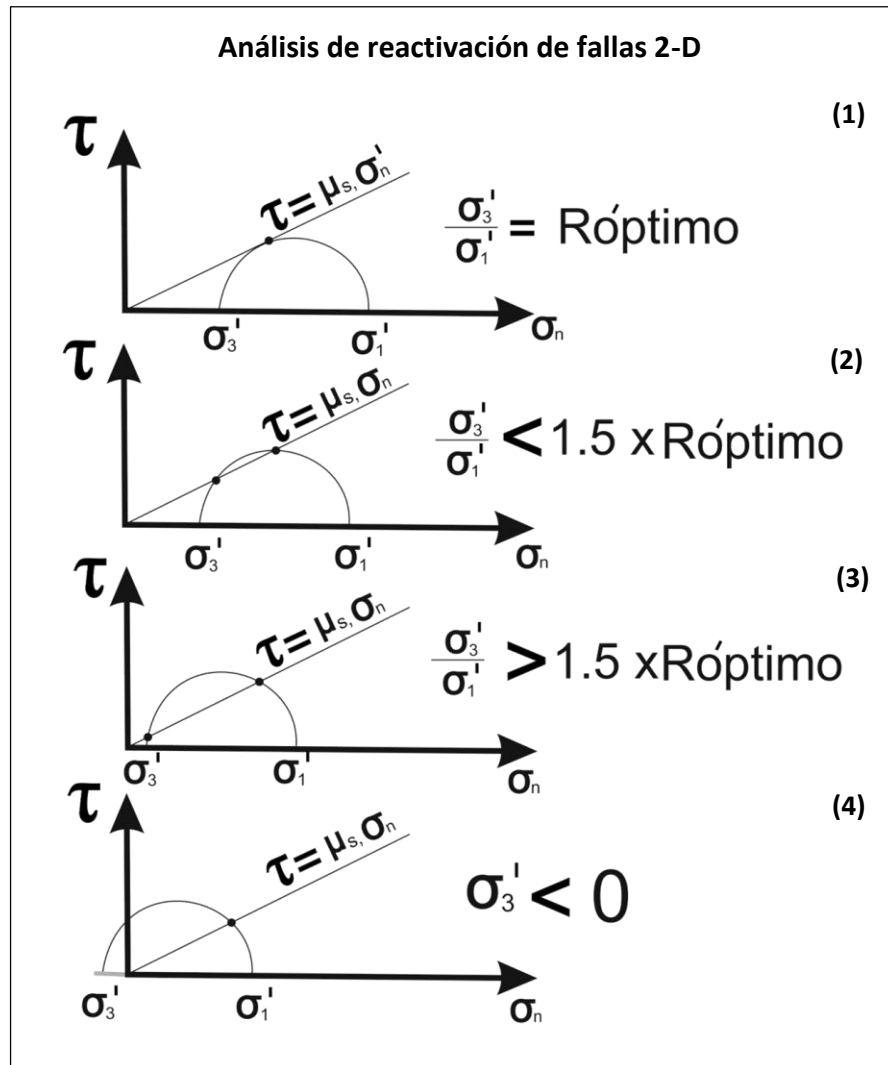
Dependiendo del valor de la relación de esfuerzo efectivo, R, Sibson (1985) introdujo tres clases de orientaciones de falla.

- 1) Fallas favorablemente orientadas: fallas cuyo valor de R está entre el R mínimo (R_{optimo}) y ($1,5 \times R_{optimo}$) (Fig 44, caso (1) y (2)).

³⁴ LECLERE, Henri. y FABBRI, Olivier. A new three dimensional method of fault reactivation analysis, Journal of structural geology, 2012.

- 2) Fallas desfavorablemente orientadas: fallas cuyo valor de R es más grande que $(1,5 \times R_{optimo})$ (Fig 44, caso (3)).
- 3) Fallas severamente mal orientadas: fallas que tienen valores negativos de R (Fig 44, caso (4)).

Figura 44. Diagramas de Mohr correspondientes a diferentes análisis de reactivación de fallas.



Fuente. LECLERÈ, Henri & FABBRI, Olivier. A new three-dimensional method of fault reactivation analysis. Journal of structural geology 48, 2013.

Un valor negativo de R indica que la magnitud del esfuerzo principal efectivo mínimo es negativo ($\sigma'_3 = \sigma_3 - P_f < 0$) e implica que la reactivación de fallas es posible solo si la presión de poro es más grande que la magnitud del esfuerzo principal mínimo $P_f > \sigma_3$.

Para evaluar el potencial de reactivación de planos de fallas que no contienen el eje σ_2 , Morris et al. (1996) desarrollo un método de caracterización de reactivación de fallas denominado tendencia al deslizamiento. El método de tendencia al deslizamiento estima el potencial de reactivación para cualquier plano de falla sin importar su orientación con respecto a la orientación de los ejes de esfuerzo principal. Esto usa un diagrama de Mohr-Coulomb 3-D (Fig. 45 caso (a)) y el conocimiento de la envolvente de reactivación para calcular la relación de esfuerzos $T_s = \frac{\tau}{\sigma_n}$ para reactivar cualquier plano de falla sin saber la magnitud de las componentes de esfuerzos principales. De hecho, el valor de T_s puede ser calculado conociendo solamente la orientación de los tres ejes de esfuerzos principales y la relación de forma de esfuerzos $\varphi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$. Para estimar la habilidad de una falla a ser reactivada bajo un estado de esfuerzos dado, Morris et al. (1996) normalizo la tendencia al deslizamiento para cualquier superficie con la tendencia al deslizamiento máximo posible $T_{s\ max}$. La relación normalizada es llamada NT_s y es igual a $\frac{T_s}{T_{s\ max}}$. Una razón NT_s entre 1 y 0,5 indica que el plano de falla está bien orientado con respecto al campo de esfuerzos mientras que una razón NT_s menor que 0,5 indica que el plano de falla está mal orientado. Aunque el método NT_s es aplicable para planos de falla con cualquier orientación, este no tiene en cuenta la cohesión de la falla, y difiere del método 2-D, en que no puede identificar aquellos planos de falla que podrían ser reactivados solamente con sobrepresión de fluidos ($P_f > \sigma_3$).

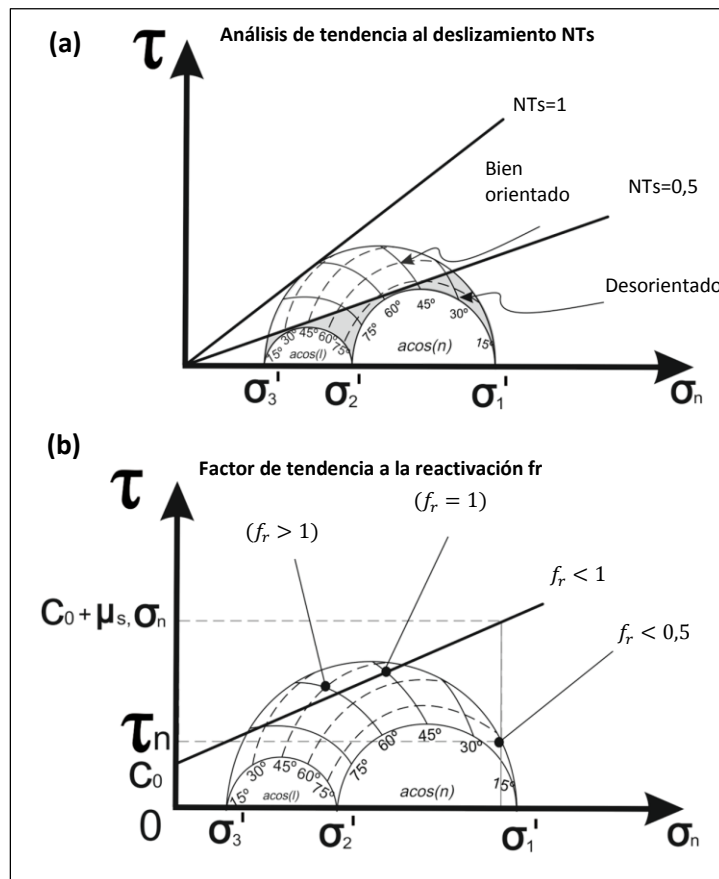
Para tener en cuenta la resistencia cohesiva de planos pre-existentes Ton and Yin (2011) extendieron el trabajo de Morris et al. (1996) introduciendo un nuevo parámetro, el factor de tendencia a la reactivación

$$f_R = \tau_n / (C_0 + \mu_s \sigma'_n)$$

Ecuación 49

Donde τ es el esfuerzo de cizalla actuando en el plano pre-existente y $(C_0 + \mu_s \sigma'_n)$ es el esfuerzo de cizalla crítico requerido para reactivar un plano de falla cohesivo pre-existente (Fig. 45 b). Un factor de tendencia a la reactivación $f_R \geq 1$ indica que el plano pre-existente está bien orientado con respecto al campo de esfuerzos, y puede ser reactivado, mientras que un $f_R < 1$ indica que el plano de falla está mal orientado.

Figura 45. Diagrama de Mohr ilustrando el método de tendencia al deslizamiento.



Fuente. LECLERÈ, Henri & FABRI, Olivier. A new three-dimensional method of fault reactivation analysis. Journal of structural geology 48, 2013.

6.1.2 Descripción del modelo³⁵

La reactivación de planos de fallas sigue el criterio de Mohr-Coulomb (Jaeger et al., 2007):

$$\tau = C_o + \mu_s(\sigma_n - P_f)$$

Ecuación 50

Donde C_o es la resistencia cohesiva del plano de falla y P_f es la presión de poro. Si el plano de falla es no-cohesivo, la ecuación (50) puede ser escrita como:

$$\tau = \mu_s(\sigma_n - P_f)$$

Ecuación 51

Si las magnitudes y orientaciones de los esfuerzos principales efectivos ($\sigma'_1 = (\sigma_1 - P_p) > \sigma'_2 = (\sigma_2 - P_p) > \sigma'_3 = (\sigma_3 - P_p)$) son conocidas, el esfuerzo de cizalla y el esfuerzo normal efectivo actuando en un plano está dado por la formula (Jaeger et al., 2007):

$$\tau^2 = (\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 l^2 m^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 m^2 n^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2 l^2 n^2$$

Ecuación 52

y

$$\sigma'_n = l^2 \sigma'_1 + m^2 \sigma'_2 + n^2 \sigma'_3$$

Ecuación 53

³⁵ LECLERE, Henri. y FABBRI, Olivier. A new three dimensional method of fault reactivation analysis, Journal of structural geology, 2012.

Donde l, m y n son los cosenos directores entre la normal n al plano de falla y los ejes de los esfuerzos principales σ_1, σ_2 y σ_3 respectivamente.

Para calcular la dirección coseno l, m y n para cualquier posible orientación de los ejes de σ_1, σ_2 y σ_3 se calculan las componentes cartesianas de la normal n del plano de falla dado en un sistema de coordenadas geográficas (x, y, z como norte, este y sur) usando las siguientes formulas:

$$n_x = -\text{sen}(\delta_n) \cdot \cos(\theta_n)$$

Ecuación 54

$$n_y = -\text{sen}(\delta_n) \cdot \text{sen}(\theta_n)$$

Ecuación 55

$$n_z = \cos(\delta_n)$$

Ecuación 56

Donde δ_n es el ángulo de inclinación entre la superficie de la tierra y el plano de falla, y θ_n es el ángulo (medido en sentido horario) entre el eje x y la dirección de buzamiento del plano de falla.

Las componentes cartesianas de los ejes σ_1, σ_2 y σ_3 en el sistema de coordenadas geográficas (x, y, z como norte, este y sur) son luego calculadas con las siguientes formulas:

$$x_i = \cos(\delta_i) \cdot \cos(\theta_i)$$

Ecuación 57

$$y_i = \cos(\delta_i) \cdot \cos(\theta_i)$$

Ecuación 58

$$z_i = \text{sen}(\delta_i)$$

Ecuación 59

Donde $i = 1, 2$ y 3 para los ejes σ_1 , σ_2 y σ_3 respectivamente, δ_i es el ángulo de caída del eje σ_i y θ_i es el ángulo medido en sentido horario entre el eje x y el azimut del eje σ_i .

Finalmente los cosenos directores l, m y n pueden ser calculadas usando las siguientes formulas:

$$l = \frac{x_1 \cdot n_x + y_1 \cdot n_y + z_1 \cdot n_z}{\sqrt{(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \cdot (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}}$$

Ecuación 60

$$m = \frac{x_2 \cdot n_x + y_2 \cdot n_y + z_2 \cdot n_z}{\sqrt{(x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) \cdot (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}}$$

Ecuación 61

$$n = \frac{x_3 \cdot n_x + y_3 \cdot n_y + z_3 \cdot n_z}{\sqrt{(x_3^2 + y_3^2 + z_3^2) \cdot (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}}$$

Ecuación 62

Las ecuaciones (52) y (53) pueden ser usadas solamente si las magnitudes y orientaciones de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 son conocidas. En muchos casos, las magnitudes absolutas de los esfuerzos principales son desconocidas. Sin embargo, sus magnitudes relativas expresadas por la relación de forma de esfuerzos φ pueden ser determinadas por métodos de inversión o datos de deslizamiento de falla e inversión de mecanismos focales de esfuerzos. (Carey and Brunier, 1974; Angelier, 1979; Gephart and Forsyth, 1984; Michael, 1984, 1987; Delvaux and Sperner, 2003; Zolohar and Vrabec, 2010).

Usando la relación de forma de esfuerzos φ y la relación de esfuerzo efectivo

$$Q = \sigma'_3 / \sigma'_1$$

Ecuación 63

σ'_2 y σ'_3 pueden ser expresados como función de σ'_1 :

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \cdot Q$$

Ecuación 64

$$\sigma'_2 = \sigma'_1[\varphi(1 - Q) + Q]$$

Ecuación 65

Por sustitución de las ecuaciones (64) y (65) en las ecuaciones (52) y (53), el esfuerzo de cizalla τ y el esfuerzo normal efectivo σ'_n puede ser expresado como:

$$\tau^2 = \sigma'_1{}^2 \{ [1 - (\varphi(1 - Q) + Q)]^2 l^2 m^2 + (\varphi(1 - Q))^2 m^2 n^2 + (Q - 1)^2 l^2 n^2 \}$$

Ecuación 66

$$\sigma'_n = \sigma'_1 (l^2 + (\varphi(1 - Q) + Q)m^2 + Q \cdot n^2)$$

Ecuación 67

La reactivación de un plano de falla pre-existente con cohesión debe satisfacer el criterio de falla de Mohr-Coulomb (ver ecuación (51)) la cual puede ser reescrita como:

$$\mu_s = \frac{\tau - C_o}{\sigma'_n}$$

Ecuación 68

Combinando las ecuaciones (66) y (68) da:

$$\mu_s = \frac{\sqrt{(1 - (\varphi(1 - Q) + Q))^2 l^2 m^2 + (\varphi(1 - Q))^2 m^2 n^2 + (Q - 1)^2 l^2 n^2} - \frac{C_o}{\sigma'_1}}{l^2 + (\varphi(1 - Q) + Q)m^2 + Q \cdot n^2}$$

Ecuación 69

La cual puede ser reescrita como:

$$\mu_s = \frac{\sqrt{Q^2 C - 2QC + C} - \frac{C_0}{\sigma'_1}}{Q \cdot A + B}$$

Ecuación 70

Donde

$$A = m^2 + n^2 - \varphi m^2$$

Ecuación 71

$$B = l^2 + \varphi m^2$$

Ecuación 72

$$C = (1 - \varphi)^2 l^2 m^2 + \varphi^2 n^2 m^2 + l^2 n^2$$

Ecuación 73

La expresión de Q como una función de l, m, n, φ y C_0/σ'_1 es una función polinomial de segundo grado

$$Q^2(A^2 \mu_s^2 - C) + Q(2 \cdot A \cdot D \cdot \mu_s + 2C) + D^2 - C = 0$$

Ecuación 74

Con

$$D = B \cdot \mu_s + \frac{C_0}{\sigma'_1}$$

Ecuación 75

La cual puede ser resuelta como sigue:

$$\Delta = (2A \cdot D \cdot \mu_s + 2C)^2 - 4(A^2 \mu_s^2 - C)(D^2 - C)$$

Ecuación 76

$$Q = \frac{-(2A \cdot D \cdot \mu_s + 2 \cdot C) \pm \sqrt{\Delta}}{2(A^2 \mu_s^2 - C)}$$

Ecuación 77

Con

$$\{Q \in \mathbb{R}; Q \leq 1\}$$

$$\{\mu_s \in \mathbb{R}; 0 \leq \mu_s\}$$

De acuerdo a la ecuación (77), Q toma valores entre $-\infty$ y $Q_{MAX} = 1$ el cual es obtenido cuando $\sigma'_1 = \sigma'_3$. Q_{optimo} está definido en la ecuación 78:

$$Q_{optimo} = \frac{1 - \mu_s \cdot \tan(\theta_r) - \frac{C_o}{\sigma_1 \cdot \text{sen}(\theta_r) \cdot \text{cos}(\theta_r)}}{1 + \mu_s \cdot \text{cot}(\theta_r)}$$

Ecuación 78

El ángulo (θ_r) es el ángulo entre el eje σ_1 y el plano de falla óptimamente orientado en la opinión de Sibson (1985) y está dado por:

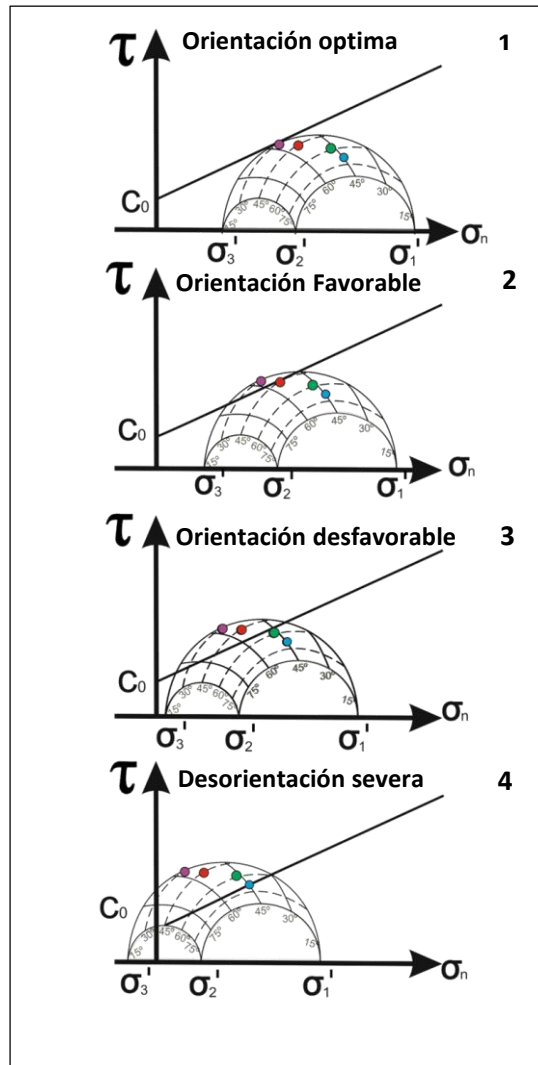
$$\theta_r = 0,5 \tan^{-1} \frac{1}{\mu_s}$$

Ecuación 79

En un diagrama de Mohr, el caso de Q_{optimo} corresponde a un círculo de Mohr (σ'_1, σ'_3) tangente a la envolvente de reactivación (Fig. 46, caso (1)), y cualquier orientación favorable pasara cerca a la posición tangente (Fig. 46, caso (2)).

El sector de orientación desfavorable contiene los valores de Q comprendidos entre los $\frac{2}{3}Q_{optimo}$ y cero (0). En un diagrama de Mohr, las fallas orientadas desfavorablemente serán trazadas como se ilustra en la fig. 46 (caso (3)).

Figura 46. Diagramas de Mohr mostrando la reactivación de cuatro planos de falla representativos.



Fuente. LECLERÈ, Henri & FABBRI, Olivier. A new three-dimensional method of fault reactivation analysis. Journal of structural geology 48, 2013.

Los diagramas de Mohr muestran la reactivación de cuatro planos representativos de falla: 1) orientación óptima de la falla, para el cual el círculo (σ_1, σ_3) es tangente a la envolvente de reactivación (punto morado); 2) falla orientada favorablemente (punto rojo); 3) falla orientada desfavorablemente (punto verde); 4) falla severamente desorientada (punto azul). La envolvente de reactivación en los cuatro casos, tiene el mismo coeficiente de fricción μ_s y la misma resistencia cohesiva C_o . En el caso (3) la reactivación del plano es posible incluso si $\sigma'_3 > 0$. En el caso (4), la reactivación solamente es posible si $\sigma'_3 < 0$, tal que $P_p > \sigma_3$.

Por último, el sector de desorientación severa, está caracterizado por valores negativos de Q , implicando que la reactivación de falla solamente es posible para presiones de poro P_p mayores que σ_3 . El límite, o *lock up* propuesto por Gibson (1985) entre la región de orientación desfavorable y la región de desorientación severa corresponde a valores de Q cercanos a cero. En un diagrama de Mohr, las fallas severamente desorientadas requieren un valor de σ'_3 negativo (Fig 46, caso (4)).

6.2 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para ilustrar la utilidad del método propuesto se presenta un análisis del campo de esfuerzos actuando en el Piedemonte Llanero, el cual proporciona una visión sobre el estado mecánico del sistema de fallas Guaicáramo.

El sistema del Guaicáramo está compuesto de una serie de segmentos de dirección general N40°E, que se presentan al noreste del Sistema de Servitá-Santa María. Pone en contacto rocas del cretáceo que cabalgan rocas Terciarias y Cuaternarias ubicados en el frente montañoso y en la cuenca de los Llanos Orientales, respectivamente.

La falla del Guaicáramo ha sido dividida en tres tramos, cuyas direcciones oscilan entre N45°E y N10°E: Guaicáramo Norte, Guaicáramo Centro y Guaicáramo Sur. El

segmento de Guaicáramo Centro es el más extenso, con una longitud total de 80 Km, de los cuales 44 Km tienen indicios fuertes y moderados de actividad neotectónica. Su plano de falla buza alrededor de 35° al noroeste (Renzoni, 1975)³⁶.

El primer paso en el análisis consiste en determinar la orientación y magnitud de los esfuerzos principales y la razón de forma de esfuerzos φ para la zona de falla. Se ha utilizado la tabla 1 del artículo “*Geodynamics of Northern Andes: subduction and intracontinental deformation (Colombia)*” para conocer la orientación de los esfuerzos principales (*azimut, plunge*).

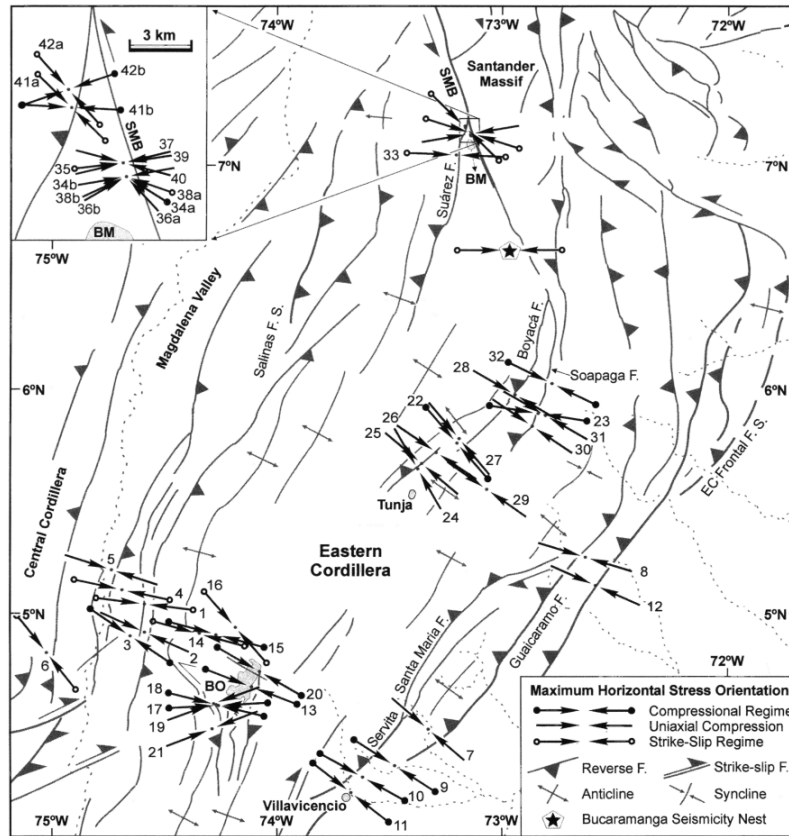
La magnitud de los esfuerzos ha podido ser determinada gracias a la aplicación de diferentes técnicas de medición entre las cuales están overcoring, técnicas de fracturamiento hidráulico, pruebas de leak off, esfuerzos de cizalla y fracturas inducidas por tensión en las paredes de los pozos³⁷.

Esta región se caracteriza porque el esfuerzo principal máximo e intermedio están orientados horizontalmente, y el esfuerzo principal mínimo orientado verticalmente. Por lo tanto, un estado de compresión horizontal uniaxial está definido como régimen inverso para el sistema de fallas Guaicaramo.

³⁶ INGEOMINAS. Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. Cap. 1. 1997

³⁷ GARCIA, María Angélica. Determinación de la orientación y magnitud del esfuerzo máximo horizontal a partir del modelamiento de breakouts en la zona del Piedemonte Llanero Colombiano. Tesis de pregrado (Ingeniería de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. 2006

Figura 47. Mapa de esfuerzos neotectónicos de la cordillera oriental.



Fuente. TABOADA, Alfredo et al. Geodynamics of the northern Andes Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, Vol. 19, No. 5, 787-813 p. 2000.

Para la presente aplicación se han tomado las orientaciones de los esfuerzos principales en los sitios 8 y 12 (ver Tabla 1).

Para los sitios 8 y 12, el esfuerzo principal máximo σ_1 tiene un gradiente que varía entre 1.2 y 1.7 psi/ft, el esfuerzo principal mínimo σ_3 tiene un gradiente de 1.07 psi/ft y el gradiente del esfuerzo principal intermedio σ_2 ha sido determinado con las relaciones de forma de esfuerzos de la tabla 1 y calculado como sigue:

SITIO 8

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

$$0,14 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Usando los valores extremos de los gradientes de σ_1 y el valor del gradiente de σ_3 se determinó el rango del gradiente de σ_2 .

$$\sigma_2 = R\sigma_1 - R\sigma_3 + \sigma_3$$

Valor extremo mayor:

$$\sigma_2 = (0,14 * 1,7) - (0,14 * 1,07) + 1,07$$

$$\sigma_2 = 1,15 \text{ Psi/ft}$$

Valor extremo menor:

$$\sigma_2 = (0,14 * 1,2) - (0,14 * 1,07) + 1,07$$

$$\sigma_2 = 1,09 \text{ Psi/ft}$$

$$1,7 \geq \sigma_1 \geq 1,2 \text{ [Psi/ft]}$$

$$1,15 \geq \sigma_2 \geq 1,09 \text{ [Psi/ft]}$$

$$\sigma_3 = 1,07 \text{ [Psi/ft]}$$

Tabla 1. Resultados de los análisis de esfuerzos microtectónicos en la cordillera Oriental.

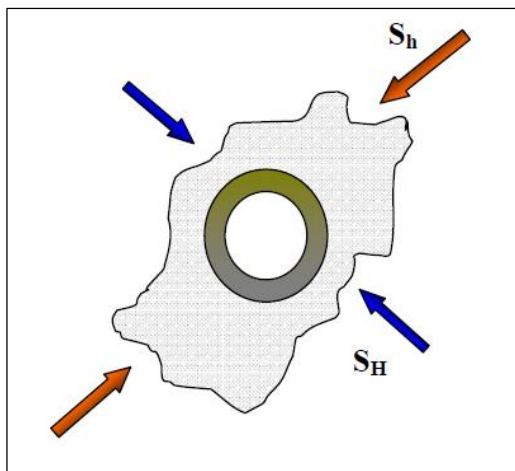
Estrato	Longitud	Latitud	Litología	Edad	Estrato	S1	S2	S3	R	FTL
1	-74,53°	5,03°	limolita	Cretaceo	112°, 32°S	227°, 10°	022°, 57°	181°, 31°	0,52	Andino temprano
2	-74,53°	4,9°	calcita	Cretaceo		114°, 07°	002°, 69°	204°, 19°	0,10	Andino
3	-74,59°	4,88°	arenizca	Terciario	045°, 38°W	304°, 01°	034°, 29°	212°, 61°	0,46	Andino
4	-74,63°	5,09°	conglomerado	Terciario	006°, 18°E	282°, 22°	135°, 65°	017°, 12°	0,57	Andino
5	-74,67°	5,18°	conglomerado - arenizca	Terciario	014°, 40°E	108°, 36°	241°, 43°	357°, 26°	0,01	Andino
6	-74,95°	4,81°	arenizca	Terciario		142°, 37°	315°, 53°	049°, 03°	0,74	Andino temprano
7	-73,31°	4,44°	arenizca	Jurasico	064°, 47°N	311°, 17°	161°, 71°	044°, 09°	0,00	Andino
8	-72,64°	5,23°	lodolita	Cretaceo		287°, 25°	181°, 30°	049°, 49°	0,14	Andino
9	-73,45°	4,28°	lodolita	Neogeno		123°, 01°	033°, 01°	262°, 89°	0,57	Andino
10	-73,59°	4,22°	arenizca	PlioCuaternario		119°, 05°	026°, 29°	219°, 61°	0,34	Andino tardío
11	-73,64°	4,15°	grava	Cretaceo		128°, 26°	222°, 09°	329°, 63°	0,84	Andino
12	-72,6°	5,10°	lodolita	Cuaternario		114°, 36°	003°, 26°	245°, 43°	0,04	Andino tardío
13	-74,08°	4,65°	arcilla	Terciario	023°, 54°E	111°, 27°	212°, 20°	333°, 56°	0,49	Andino
14	-74,29°	4,90°	arcilla	Cretaceo	000°, 40°E	285°, 11°	100°, 79°	195°, 01°	0,75	Andino
15	-74,23°	4,88°	arcilla	Cretaceo	020°, 44°E	105°, 11°	012°, 18°	225°, 69°	0,29	Andino
16	-74,14°	4,92°	arcilla	Cretaceo		319°, 19°	090°, 62°	222°, 20°	0,83	Andino
17	-74,22°	4,56°	arenizca	Cretaceo	019°, 45°E	087°, 14°	351°, 26°	203°, 60°	0,38	Andino temprano
18	-74,23°	4,57°	arcilla	Cretaceo	023°, 45°S	104°, 13°	195°, 04°	303°, 77°	0,50	Andino
19	-74,24°	4,57°	arenizca	Cretaceo	150°, 50°E	070°, 07°	161°, 05°	282°, 81°	0,23	Pre-Andino

Fuente. TABOADA, Alfredo et al. Geodynamics of the northern Andes Subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics, Vol. 19, No. 5, 787-813 p. 2000.

El gradiente de presión de poro es 0.44 Psi/ft.

La dirección del esfuerzo horizontal máximo es aproximadamente NW-SE (Figura 48). Esta dirección de esfuerzos se determinó principalmente, a través del análisis de breakouts en pozos verticales empleando calliper de cuatro brazos e imágenes de pozos.

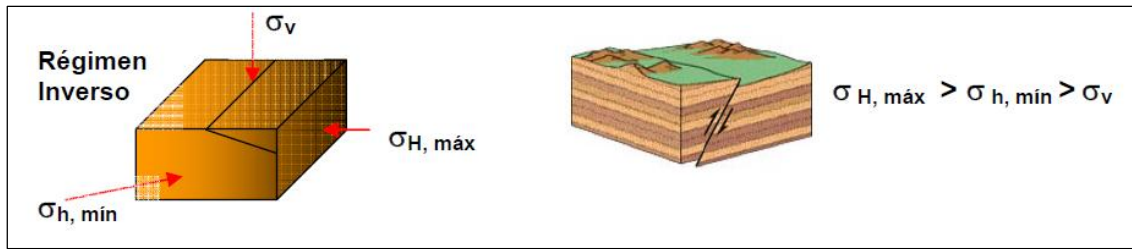
Figura 48. Dirección de los esfuerzos horizontales en el Piedemonte Llanero.



Fuente. Los Autores.

Dado que los campos están localizados en una región dominada por empuje activo, la mecánica de fallas andersonianas, predice que el esfuerzo principal mínimo es el vertical; el esfuerzo principal intermedio es igual al esfuerzo mínimo horizontal; y el esfuerzo horizontal máximo es el esfuerzo principal máximo. En conclusión en la cuenca de estudio se tiene un régimen de falla inversa con esfuerzos compresivos uniaxiales actuando en el plano de falla (Figura 49).

Figura 49. Régimen de esfuerzos en el Piedemonte Llanero.



Fuente. Los Autores.

a) Tomando los valores extremos inferiores de los gradientes de esfuerzos

Se encontró que la zona de falla está localizada a 10500 ft de profundidad. Entonces, las magnitudes de los esfuerzos principales actuando en la zona de falla son:

$$\sigma_1 = 12600 \text{ Psi}$$

$$\sigma_2 = 11445 \text{ Psi}$$

$$\sigma_3 = 11235 \text{ Psi}$$

Tales magnitudes fueron calculadas tomando un gradiente de esfuerzo principal máximo de 1.2 Psi/ft, un gradiente de esfuerzo principal intermedio de 1,09 Psi/ft y un gradiente de esfuerzo principal mínimo de 1.07 Psi/ft.

La superficie de falla se considera no cohesiva $C_o = 0$.

La presión de poro en la zona de falla será:

$$P_p = 0.44[\text{Psi}/\text{ft}] \times \text{TVD}[\text{ft}] = 0.44 \times 10500 = 4620 \text{ Psi}$$

Entonces las magnitudes de los esfuerzos principales efectivos serán:

$$\sigma'_1 = (\sigma_1 - P_p) = 12600[Psi] - 4620[Psi] = 7980 [Psi]$$

$$\sigma'_2 = (\sigma_2 - P_p) = 11445[Psi] - 4620[Psi] = 6825 [Psi]$$

$$\sigma'_3 = (\sigma_3 - P_p) = 11235[Psi] - 4620[Psi] = 6615[Psi]$$

Se calculan las componentes cartesianas de la normal n del plano de falla dado en un sistema de coordenadas geográficas utilizando las ecuaciones 54, 55 y 56.

$$\delta_n = 35^\circ$$

$$\theta_n = 50^\circ$$

$$n_x = -\text{sen}(35^\circ)\cos(50^\circ)$$

$$n_x = -0,36868$$

$$n_y = -\text{sen}(35^\circ)\text{sen}(50^\circ)$$

$$n_y = -0,43938$$

$$n_z = \cos(35^\circ)$$

$$n_z = 0,81915$$

Se determinan las componentes cartesianas de los ejes σ_1 , σ_2 y σ_3 en el sistema de coordenadas geográficas mediante las ecuaciones 57, 58 y 59

	x_i	y_i	z_i
σ_1	[-0,86670	-0,86670	0,42261]
σ_2	-0,01511	-0,01511	0,5]
σ_3	0,49513	0,49513	0,75470]

Finalmente los cosenos directores l, m y n pueden ser calculadas usando las siguientes formulas 60, 61 y 62

$$l = 0,80719$$

$$m = 0,84281$$

$$n = 0,21186$$

Ahora se puede determinar el esfuerzo normal efectivo y el esfuerzo de cizalla actuando en el plano de falla utilizando las ecuaciones 66 y 67:

$$\sigma'_n = 10331,0141 \text{ Psi}$$

$$\tau = 832,7388 \text{ Psi}$$

El coeficiente de resistencia friccional en la superficie de falla puede ser calculado por la ecuación 70, pero antes deben ser calculados los factores A , B Y C mediante las ecuaciones 71, 72 y 73:

$$A = 0,65576$$

$$B = 0,75101$$

$$C = 0,37217$$

De esta forma se calcula el μ_s usando la ecuación 70, asumiendo $C_o = 0$:

$$\mu_s = 0,080605$$

Para resolver la expresión de Q como una función de l, m, n, φ y C_o/σ'_1 la cual es una función polinomial de segundo grado como se muestra en la ecuación 74, primero se deben resolver los términos de las ecuaciones 75 y 76 así:

$$D = 0,060536$$

$$\Delta = 0,01914$$

De esta forma Q es determinado por la ecuación 77:

$$Q_1 = 0,828947$$

$$Q_2 = 1,2035$$

Con

$$\{Q \in \mathbb{R}; Q \leq 1\}$$

$$\{\mu_s \in \mathbb{R}; 0 \leq \mu_s\}$$

De acuerdo a la ecuación (77), Q toma valores entre $-\infty$ y $Q_{MAX} = 1$ el cual es obtenido cuando $\sigma'_1 = \sigma'_3$. Q_{optimo} está definido en la ecuación 78:

$$Q_{optimo} = 0,85126$$

El ángulo (θ_r) es el ángulo entre el eje σ_1 y el plano de falla óptimamente orientado en la opinión de Sibson (1985) y está dado por la ecuación 79:

$$\theta_r = 42,6958 \text{ grados}$$

En un diagrama de Mohr, el caso de Q_{optimo} corresponde a un círculo de Mohr (σ'_1, σ'_3) tangente a la envolvente de reactivación (Fig. 46, caso (1)), y cualquier orientación favorable pasara cerca a la posición tangente (Fig. 46, caso (2)).

El sector de orientación desfavorable contiene los valores de Q comprendidos entre los $\frac{2}{3}Q_{optimo}$ y cero (0). En un diagrama de Mohr, las fallas orientadas desfavorablemente serán trazadas como se ilustra en la fig. 46 (caso (3)).

$$\text{Inicio Orientacion desfavorable} = \frac{2}{3}Q_{optimo} = 0,56751$$

$$0,56751 \geq Q \geq 0$$

Finalmente se calcula el factor de reactivación por medio de la ecuación 49:

$$f_R = 1$$

b) Tomando los valores extremos superiores de los gradientes de esfuerzos

Se encontró que la zona de falla está localizada a 10500 ft de profundidad. Entonces, las magnitudes de los esfuerzos principales actuando en la zona de falla son:

$$\sigma_1 = 17850 \text{ Psi}$$

$$\sigma_2 = 12075 \text{ Psi}$$

$$\sigma_3 = 11235 \text{ Psi}$$

Tales magnitudes fueron calculadas tomando un gradiente de esfuerzo principal máximo de 1.7 Psi/ft, un gradiente de esfuerzo principal intermedio de 1,15 Psi/ft y un gradiente de esfuerzo principal mínimo de 1.07 Psi/ft.

La superficie de falla se considera no cohesiva $C_o = 0$.

La presión de poro en la zona de falla será:

$$P_p = 0.44[\text{Psi}/\text{ft}] \times \text{TVD}[\text{ft}] = 0.44 \times 10500 = 4620 \text{ Psi}$$

Entonces las magnitudes de los esfuerzos principales efectivos serán:

$$\sigma'_1 = (\sigma_1 - P_p) = 17850[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 13230 [\text{Psi}]$$

$$\sigma'_2 = (\sigma_2 - P_p) = 12075[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 7455 [\text{Psi}]$$

$$\sigma'_3 = (\sigma_3 - P_p) = 11235[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 6615[\text{Psi}]$$

El esfuerzo normal efectivo y el esfuerzo de cizalla actuando en el plano de falla utilizando las ecuaciones 66 y 67 será:

$$\sigma'_n = 14273,8498 \text{ Psi}$$

$$\tau = 4035,5803 \text{ Psi}$$

Ahora se calcula el μ_s usando la ecuación 70, asumiendo $C_o = 0$:

$$\mu_s = 0,282725$$

$$Q_1 = 0,5$$

$$Q_2 = 1,93658$$

Con

$$\{Q \in \mathbb{R}; Q \leq 1\}$$

$$\{\mu_s \in \mathbb{R}; 0 \leq \mu_s\}$$

$$Q_{optimo} = 0,57225$$

$$\theta_r = 37,10652 \text{ grados}$$

$$\text{Inicio Orientacion desfavorable} = \frac{2}{3} Q_{optimo} = 0,3815$$

Finalmente se determina el factor de reactivación por medio de la ecuación 49:

$$f_R = 1$$

SITIO 12

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = 0,04$$

a) Tomando los valores extremos inferiores de los gradientes de esfuerzos

Se encontró que la zona de falla está localizada a 10500 ft de profundidad. Entonces, las magnitudes de los esfuerzos principales actuando en la zona de falla son:

$$\sigma_1 = 12600 \text{ Psi}$$

$$\sigma_2 = 11445 \text{ Psi}$$

$$\sigma_3 = 11235 \text{ Psi}$$

Tales magnitudes fueron calculadas tomando un gradiente de esfuerzo principal máximo de 1.2 Psi/ft, un gradiente de esfuerzo principal intermedio de 1,09 Psi/ft y un gradiente de esfuerzo principal mínimo de 1.07 Psi/ft.

La superficie de falla se considera no cohesiva $C_o = 0$.

La presión de poro en la zona de falla será:

$$P_p = 0.44[\text{Psi}/\text{ft}] \times \text{TVD}[\text{ft}] = 0.44 \times 10500 = 4620 \text{ Psi}$$

Entonces las magnitudes de los esfuerzos principales efectivos serán:

$$\sigma'_1 = (\sigma_1 - P_p) = 12600[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 7980 [\text{Psi}]$$

$$\sigma'_2 = (\sigma_2 - P_p) = 11445[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 6825 [\text{Psi}]$$

$$\sigma'_3 = (\sigma_3 - P_p) = 11235[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 6615[\text{Psi}]$$

Se calculan las componentes cartesianas de la normal n del plano de falla dado en un sistema de coordenadas geográficas utilizando las ecuaciones 54, 55 y 56.

$$\delta_n = 35^\circ$$

$$\theta_n = 50^\circ$$

$$n_x = -\text{sen}(35^\circ)\cos(50^\circ)$$

$$n_x = -0,36868$$

$$n_y = -\text{sen}(35^\circ)\text{sen}(50^\circ)$$

$$n_y = -0,43938$$

$$n_z = \cos(35^\circ)$$

$$n_z = 0,819152$$

Se determinan las componentes cartesianas de los ejes σ_1 , σ_2 y σ_3 en el sistema de coordenadas geográficas mediante las ecuaciones 57, 58 y 59

	x_i	y_i	z_i	
σ_1	[0,73907	0,73907	0,58778]
σ_2	[0,04703	0,04703	0,43837]
σ_3	[-0,6628	-0,66283	0,68199]

Finalmente los cosenos directores l, m y n pueden ser calculadas usando las siguientes formulas 60, 61 y 62

$$l = -0,09651$$

$$m = 0,72415$$

$$n = 0,94396$$

Ahora podemos determinar el esfuerzo normal efectivo y el esfuerzo de cizalla actuando en el plano de falla utilizando las ecuaciones 66 y 67:

$$\sigma'_n = 9466,32318 \text{ Psi}$$

$$\tau = 158,8978 \text{ Psi}$$

El coeficiente de resistencia friccional en la superficie de falla puede ser calculado por la ecuación 70, pero antes deben ser calculados los factores A, B Y C mediante las ecuaciones 71, 72 y 73:

$$A = 1,39449$$

$$B = 0,03029$$

$$C = 0,01355$$

De esta forma se calcula el μ_s usando la ecuación 70, asumiendo $C_o = 0$:

$$\mu_s = 0,016785$$

Para resolver la expresión de Q como una función de l, m, n, φ y C_o/σ'_1 la cual es una función polinomial de segundo grado como se muestra en la ecuación 74, primero se deben resolver los términos de las ecuaciones 75 y 76 así:

$$D = 0,0005$$
$$\Delta = 3,1 \times 10^{-5}$$

De esta forma Q es determinado por la ecuación 77:

$$Q_1 = 0,82894$$
$$Q_2 = 1,25715$$

Con

$$\{Q \in \mathbb{R}; Q \leq 1\}$$

$$\{\mu_s \in \mathbb{R}; 0 \leq \mu_s\}$$

De acuerdo a la ecuación (77), Q toma valores entre $-\infty$ y $Q_{MAX} = 1$ el cual es obtenido cuando $\sigma'_1 = \sigma'_3$. Q_{optimo} está definido en la ecuación 78:

$$Q_{optimo} = 0,96698$$

El ángulo (θ_r) es el ángulo entre el eje σ_1 y el plano de falla óptimamente orientado en la opinión de Sibson (1985) y está dado por la ecuación 79:

$$\theta_r = 44,51917 \text{ grados}$$

En un diagrama de Mohr, el caso de Q_{optimo} corresponde a un círculo de Mohr (σ'_1, σ'_3) tangente a la envolvente de reactivación (Fig. 46, caso (1)), y cualquier orientación favorable pasara cerca a la posición tangente (Fig. 46, caso (2)).

El sector de orientación desfavorable contiene los valores de Q comprendidos entre los $\frac{2}{3}Q_{optimo}$ y cero (0). En un diagrama de Mohr, las fallas orientadas desfavorablemente serán trazadas como se ilustra en la fig. 46 (caso (3)).

$$\text{Inicio Orientacion desfavorable} = \frac{2}{3}Q_{optimo} = 0,64465$$

$$0,64465 \geq Q \geq 0$$

Finalmente se calcula el factor de reactivación por medio de la ecuación 49:

$$f_R = 1$$

Por último, el sector de desorientación severa, está caracterizado por valores negativos de Q , implicando que la reactivación de falla solamente es posible para presiones de poro P_p mayores que σ_3 , lo cual no se da para el Piedemonte Llanero. En un diagrama de Mohr, las fallas severamente desorientadas requieren un valor de σ'_3 negativo (Fig 46, caso (4)).

b) Tomando los valores extremos superiores de los gradientes de esfuerzos

Se encontró que la zona de falla está localizada a 10500 ft de profundidad. Entonces, las magnitudes de los esfuerzos principales actuando en la zona de falla son:

$$\sigma_1 = 17850 \text{ Psi}$$

$$\sigma_2 = 12075 \text{ Psi}$$

$$\sigma_3 = 11235 \text{ Psi}$$

Tales magnitudes fueron calculadas tomando un gradiente de esfuerzo principal máximo de 1.7 Psi/ft, un gradiente de esfuerzo principal intermedio de 1,15 Psi/ft y un gradiente de esfuerzo principal mínimo de 1.07 Psi/ft.

La superficie de falla se considera no cohesiva $C_o = 0$.

La presión de poro en la zona de falla será:

$$P_p = 0.44[\text{Psi}/\text{ft}] \times \text{TVD}[\text{ft}] = 0.44 \times 10500 = 4620 \text{ Psi}$$

Entonces las magnitudes de los esfuerzos principales efectivos serán:

$$\sigma'_1 = (\sigma_1 - P_p) = 17850[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 13230 [\text{Psi}]$$

$$\sigma'_2 = (\sigma_2 - P_p) = 12075[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 7455 [\text{Psi}]$$

$$\sigma'_3 = (\sigma_3 - P_p) = 11235[\text{Psi}] - 4620[\text{Psi}] = 6615[\text{Psi}]$$

El esfuerzo normal efectivo y el esfuerzo de cizalla actuando en el plano de falla utilizando las ecuaciones 66 y 67 será:

$$\sigma'_n = 9625,35443 \text{ Psi}$$

$$\tau = 770,04333 \text{ Psi}$$

Ahora se calcula el μ_s usando la ecuación 70, asumiendo $C_o = 0$:

$$\mu_s = 0,08$$

$$Q_1 = 0,5$$

$$Q_1 = 24,51782$$

Con

$$\{Q \in \mathbb{R}; Q \leq 1\}$$

$$\{\mu_s \in \mathbb{R}; 0 \leq \mu_s\}$$

$$Q_{optimo} = 0,85228$$

$$\theta_r = 42,713 \text{ grados}$$

$$\text{Inicio Orientacion desfavorable} = \frac{2}{3} Q_{optimo} = 0,56818$$

Finalmente se calcula el factor de reactivación por medio de la ecuación 49:

$$f_R = 1$$

6.2.1 Análisis de resultados

El modelo muestra valores bajos de coeficientes de fricción actuando en la superficie de falla en los puntos 8 y 12 para el sistema de fallas Guaicáramo, lo cual indica la presencia de minerales arcillosos hidratados en la roca. Como consecuencia, pequeños valores de coeficiente de fricción de la superficie del material no puede ser invocado para explicar la reactivación de planos de falla orientados desfavorablemente o severamente desorientados. Se determinó que para el sistema de fallas Guaicáramo, valores bajos de coeficientes de fricción son obtenidos cuando los gradientes de esfuerzos tienden a ser más bajos, y éstos aumentan cuando el gradiente de esfuerzos aumenta. También se encontró que para el sitio 8, los valores de coeficiente de fricción son más altos que para el sitio 12.

Por otro lado, asumiendo una superficie de falla no cohesiva ($C_o = 0$), se encontró que el esfuerzo normal efectivo y el esfuerzo de cizalla actuando en el plano de falla son mayores, cuanto mayor son los gradientes de los esfuerzos principales. Pero es importante aclarar que dichos esfuerzos efectivos son aún mayores en el sitio 8 que en el sitio 12, lo cual puede ser explicado por los altos valores de coeficiente de fricción en esa zona.

Ahora bien, el ángulo θ_r que en la opinión de Sibson (1985), corresponde al ángulo entre el eje del esfuerzo principal máximo σ_1 y el plano de falla óptimamente orientado para la reactivación, exhibe valores de 37° a 42° lo cual demuestra que el plano de falla tenderá a la reactivación cuando la dirección del esfuerzo compresivo es menor a 45° resultando en un modo de reactivación de falla inversa. También se concluyó que para el sistema de fallas Guaicáramo, este ángulo es mayor para las zonas cuyos gradientes de esfuerzos son los menores; sin embargo, los valores de θ_r son mayores para el sitio 12 de la falla.

Finalmente, y como resultado de la aplicación del modelo 3-D que evalúa el potencial de reactivación del plano de falla para el sistema de Fallas Guaicáramo ubicado en el Piedemonte Llanero, se concluyó que en los sitios 8 y 12, las superficies de falla tienen un $f_r = 1$ para cualquier valor de gradiente de esfuerzos, lo cual indica, que los planos pre-existentes están bien orientados con respecto al campo de esfuerzos actual, y podrán ser reactivados independientemente de la presión en la vecindad de la zona de falla. Lo anterior permite reafirmar que el segmento de Guaicáramo centro es la zona de mayor actividad neotectónica y por ende la zona más propensa a causar deslizamiento a lo largo del trazado de falla.

7. CONCLUSIONES

- Se identificaron los principales mecanismos de reactivación de fallas dentro y alrededor de los yacimientos de hidrocarburos durante las actividades de perforación de pozos, depleción del yacimiento, producción e inyección de fluidos y fracturamiento hidráulico, bajo diferentes regímenes de esfuerzos. Los análisis de esfuerzos se llevaron a cabo utilizando modelos semi-analíticos basados en el criterio de falla de Mohr Coulomb por medio de las propiedades de los materiales homogéneos e isotrópicos, bajo condiciones de deformación plana.
- La comprensión de las propiedades mecánicas de las rocas y de los esfuerzos alrededor de las fallas y el modo de hallarlas a lo largo de estructuras tridimensionales es altamente valioso, no sólo desde el punto de vista de la perforación, sino también desde la perspectiva del yacimiento. La reactivación de fallas durante la perforación no sólo representa un riesgo para la integridad del pozo, sino también para el yacimiento. En el caso de las fallas que delimitan el yacimiento, si las fallas intersectan el yacimiento, el deslizamiento puede propagarse a los estratos superiores del yacimiento y romper la roca sello, con la consiguiente fuga de fluidos.
- Los cambios en las presiones del yacimiento debido a la depleción o inyección de fluidos implican cambios en las magnitudes de los esfuerzos principales que actúan a nivel del yacimiento. Tales cambios pueden causar un cambio en las magnitudes relativas de los esfuerzos principales que actúan sobre una falla que limita el yacimiento, llevando eventualmente a una ruptura de la roca sello y consecuentemente fugas. El mismo modelo utilizado en este estudio para estimar las presiones máximas de fondo de pozo durante la perforación podría ser utilizado para evaluar la cantidad máxima

de depleción que una falla puede soportar antes de que se produzca una fuga.

- Se mostró que distintas estrategias de depleción afectan la estabilidad de la falla diferentemente. Los gradientes de presión de poro dentro del yacimiento tienen una mayor tendencia a reactivar e inducir deslizamiento de las fallas cercanas. La dirección de la depleción es una consideración importante al evaluar la integridad de los huecos perforados a través de zonas de fallas propensas a deslizarse. Por otro lado, la reactivación de fallas es más probable cuando ocurre la depleción en un yacimiento blando que en un yacimiento rígido.
- El patrón general de reactivación falla en un régimen de esfuerzo normal de falla muestra que, durante la producción, las regiones dentro y cerca de los flancos laterales del yacimiento tienden hacia la reactivación, mientras que durante la inyección, las regiones subyacentes y supradycientes del yacimiento tienden hacia la reactivación. Para un régimen de esfuerzos de falla inversa, las rocas supradycientes y las rocas subyacentes tienden a la reactivación durante la producción, mientras que, durante la inyección, el yacimiento y las rocas cerca de los flancos laterales del depósito tienden a reactivarse.
- Durante el fracturamiento hidráulico, la reactivación de fallas naturales cercanas a la fractura presurizada no permitirá que ésta atraviese la falla natural sin que ocurra una desviación y podría reducir la concentración de esfuerzos de tensión en el lado opuesto de la falla mientras el deslizamiento de la falla reducirá aún más la concentración de esfuerzos. La zona de deslizamiento es también en la mayoría de los casos mucho más grande que la zona abierta a menos que la fricción sea muy grande.

- Todos los parámetros afectan el comportamiento de las fallas lo cual afectará, el comportamiento de cruce de la falla durante el fracturamiento hidráulico, incluyendo las propiedades de la interface, el ángulo de inclinación, el campo de esfuerzos lejano y el perfil de presión de la fractura. El tamaño de las zonas reactivadas es lo suficientemente grande para demostrar que es el campo total de esfuerzos generado por la fractura, más no solamente el campo de esfuerzos en la punta de la fractura el que afecta el comportamiento.
- El método descrito para el análisis de reactivación de fallas puede ser empleado para estimar el potencial de reactivación de planos de falla para cualquier sección geológica. Esto combina todas las posibilidades dadas anteriormente por los métodos para otros mecanismos y parece ser más sensible para describir la habilidad de los planos de falla a ser reactivados.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda un análisis más detallado para cada uno de los mecanismos de reactivación de fallas en un yacimiento de hidrocarburos, teniendo en cuenta datos de laboratorio y de campo, mediante el desarrollo de modelos analíticos y modelos numéricos con el fin de obtener resultados específicos para cada uno de ellos. Por ejemplo validar los modelos con datos obtenidos durante la perforación, y resaltar la importancia de la evaluación en la estabilidad de falla para ayudar a controlar la presión del fondo del hueco y mitigar el riesgo de pérdidas durante la perforación.
- Se propone desarrollar un estudio detallado durante las etapas de perforación de pozos que se desean tener, ya sean exploratorios o para el desarrollo de campos, y analizar los datos así obtenidos para caracterizar las propiedades geomecánicas de las fallas y sus implicaciones en la evaluación de riesgos. También se deben estudiar las respuestas de las fallas detectadas en los pozos vecinos, pues se sabe de la existencia de grandes fallas sísmicas que atraviesan yacimientos enteros de hidrocarburos.
- Para estudios posteriores se sugiere el desarrollo de modelos geomecánicos en base a los registros eléctricos disponibles y los datos de perforación, o también usando los datos de producción e inyección de fluidos, teniendo en cuenta que estas actividades alteran el campo de esfuerzos in-situ de los yacimientos.
- Se recomienda evaluar la dirección de perforación a través de las fallas existentes para alcanzar los principales objetivos de un yacimiento, examinando los esfuerzos efectivos que actúan sobre cada superficie de fallas con el fin de determinar si estas fallas están activas bajo el campo de

esfuerzo actuales. Para entender el riesgo de pérdidas de fluidos durante la perforación, se debe estimar la presión de fondo de pozo adecuada, y la densidad del lodo requerido para inducir el cizallamiento de la falla a lo largo de las principales superficies de fallas.

- El análisis de reactivación de fallas debe ser aplicado a los campos colombianos, en especial aquellos que se encuentran en el Piedemonte Llanero y en general, en cuencas tectónicamente activas.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILERA, Roberto & AGUILERA, María Silvia. Aspectos geológicos y de ingeniería de yacimientos naturalmente fracturados. Revista Fuentes, 2001.
2. ASADI, M. et al.: Coupled hydro geomechanical simulation and analysis of fault reactivation: influence of fault geometry. Paper SPE 133070, 2010.
3. BILLINGS, Marland. Structural geology. New Jersey: Printed by Prentice Hall, 1954. 514 p.
4. BUCHMANN, T. et al.: Recent faulting in the Upper Rhine Graben (Germany): a 3D finite element approach to predict fault reactivation. ARMA, 2008.
5. CHANPURA, Rajesh. Fault reactivation as a result of reservoir depletion. Georgia, 2001. 320 p. Thesis for the degree (Doctor of Philosophy in Civil Engineering). Georgia Institute of Technology. School of Civil and Environmental Engineering.
6. DAVIS, G., et al. Structural geology of rocks and regions. Arizona: Printed by John Wiley & Sons, 2012. 861 p. ISBN 978-0-471-15231-6.
7. DENNIS, John. Structural geology. California: Printed by John Wiley & Sons, 1972. 532 p. ISBN 0-47106746-6.
8. DEWHURST D. y JONES R. Influence of physical and diagenetic processes on fault geomechanics and reactivation. Journal of geochemical exploration, 2003.
9. DUNAYEVSKY, V. et al.: Reservoir pressure depletion induced exterior fault activation. ARMA 10-304, 2010.

10. ENGELDER, T. Stress regimes in the lithosphere. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1993. 457 p. ISBN 9780691085555.
11. FERNANDEZ, Fermín. y CASTILLO, David. Assessing stability of reservoir bounding faults while drilling. Paper SPE 132826, 2010.
12. GARCIA, María Angélica. Determinación de la orientación y magnitud del esfuerzo máximo horizontal a partir del modelamiento de breakouts en la zona del Piedemonte Llanero Colombiano. Trabajo de grado (Ingeniera de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. 2006.
13. GUIMARAES, L. et al.: Influence of mechanical constitutive model on the coupled hydro-geomechanical analysis of fault reactivation. Paper SPE 119168, 2009.
14. HATCHER, Robert. Structural geology: principles, concepts, and problems. New Jersey: Printed by Prentice Hall, 1995. 525 p. ISBN 0-02355713-3.
15. INGEOMINAS. Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. Cap. 1. 1997
16. LECLERE, Henri. y FABRI, Olivier. A new three dimensional method of fault reactivation analysis, Journal of structural geology, 2012.
17. MARTINEZ CATALAN, José. Geología estructural y dinámica global. Universidad de Salamanca: España, 2003. 429 p.
18. MAXWELL, S. et al.: Fault activation during hydraulic fracturing. SEG Houston International Exposition and Annual Meeting, 2009.

19. NACHT, P. et al.: Investigation of geological fault reactivation and opening. Asociación Argentina de mecánica computacional, 2010.
20. OROZCO, Miguel. Et al.: Geología física. Editorial Thomson Learning, 2002. 302 p.
21. OZAN, C. et al.: Fault reactivation due to fluid production and injection in compacting reservoirs. ARMA 11-516, 2011.
22. PABÓN GÉLVEZ, Eduard. y OBEID, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cuiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. 2004.
23. PEREIRA L. et al.: Specialist program for injection pressure limits considering fault reactivation criteria. ARMA 10-214, 2010.
24. SOLTANZADEH H. y HAWKES C. A semi analytical model for predicting fault reactivation tendency induced by pore pressure change. Department of Civil and geological engineering. University of Saskatchewan, Canada.
25. STREIT J. y HILLIS R. Estimating fluid pressures that can induce reservoir failure during hydrocarbon depletion. 2002.
26. TABOADA, Alfredo et al. Geodynamics of the northern Andes Subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics, Vol. 19, No. 5, 787-813 p. 2000.
27. THIERCELIN M. y MAKHYU, E. Stress field in the vicinity of a natural fault activated by the propagation of an induced hydraulic fracture”, Schlumberger Moscow Research, Moscow.

28. VAN DER PLUIJM, Ben. Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics. New York: Printed by W.W. Norton & company, 2004. 656 p. ISBN 0-393-92467.

29. YI, X. Steam flooding field fault reactivation maximum reservoir pressure prediction. Paper SPE 114909, 2008.

30. ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics: Earth Stress and Rock Mechanics Applied to Exploration, Production and Wellbore Stability. Department of geophysics, Stanford University: Printed by Cambridge University Press, 2007. 449 p.