

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DIFERENTES CRITERIOS DE FALLA  
QUE INDICAN BAJO QUÉ CONDICIONES FALLAN LAS ROCAS Y SU  
IMPACTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA**

**JAINES ANDREA FRÍAS GÓMEZ  
ROSO ANDRÉS PLATA BAUTISTA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2012**

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DIFERENTES CRITERIOS DE FALLA  
QUE INDICAN BAJO QUÉ CONDICIONES FALLAN LAS ROCAS Y SU  
IMPACTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA**

**JAINES ANDREA FRÍAS GÓMEZ  
ROSO ANDRÉS PLATA BAUTISTA**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

**Ing. Zuly Himelda Calderón  
Director**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

A Dios por darme inteligencia y perseverancia en cada una de mis etapas por la universidad, y cumplir mi más preciado sueño, permitir culminar esta etapa con mucho éxito.

A mi Mama por ser esa pieza llena de luz, brindando siempre palabras de fortaleza, firmeza y dulzura, recalcando siempre que lo mejor requiere dedicación.

A mis hermanas Ana Luz y Janis por estar siempre ahí con su apreciado apoyo incondicional demostrando siempre que la familia es el mayor vínculo de fortaleza.

A mi familia en especial mi mamá por regalarme buenos y malos momentos que permiten edificar a una persona y saber reaccionar bien ante cualquier obstáculo que se ponga al frente, gracias a ellos son quien soy, y de verdad han contribuido grandemente en mi realización como profesional.

A mi novio por ser paciente, y por darme palabras de emprendimiento, amor y mucha comprensión en mi paso por la universidad.

A mis grandes amigos definitivamente sin ellos el paso por la u no hubiese sido igual, su apoyo incondicional no tiene gratitud que valga. Y todos los compañeros que de una u otra forma contribuyeron a mi realización como profesional.

**.Jaines Andrea Frías.**

Dedico este proyecto a Dios por ser mi guía durante toda mi vida y por haberme dado la salud para poder llegar a este punto.

A la memoria de mis Padres y Abuelos. Agradezco profundamente a mi MAMA por ser el mejor PAPA del mundo, por ser esa mujer dulce y humana que siempre estuvo allí en los momentos más difíciles, brindándome su paciencia, apoyo y comprensión.

A mis hermanos Yamid y Bibiana porque siempre han creído en mí, por darme su gran cariño y enseñanza.

A mi sobrina Lucía por haberme devuelto la esperanza, pues ella pintó mi mundo de colores con su llegada y las ganas de seguir adelante.

Indudablemente a mis Amigos y Amigas de colegio y universidad, que con fiestas, paseos y salidas alegraron mi paso por la Universidad.

A la persona que me hizo tan feliz en tan poco tiempo.

Sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

Roso Andrés Plata.

## AGRADECIMIENTOS

**Los autores expresa sus agradecimientos a:**

*La Universidad Industrial de Santander por brindarnos los conocimientos y el apoyo necesario para alcanzar este logro.*

*La Escuela de Ingeniería de Petróleos, por la colaboración prestada al desarrollo de esta actividad.*

*Zuly Calderón nuestra directora, por su colaboración durante el desarrollo de nuestro proyecto, su apoyo y acompañamiento constante para el correcto cumplimiento del proyecto.*

*Los profesores de la Universidad Industrial de Santander por su colaboración, por inyectarnos esa maravillosa dosis de motivación, constancia y disciplina.*

*Nuestros compañeros de carrera y amigos quienes hicieron posible de alguna forma la realización de nuestro proyecto.*

Muchas gracias.

**Jaines Andrea Frías.**

**Roso Andrés Plata.**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	19
1. ASPECTOS GENERALES DE LA GEOMECANICA Y SU IMPACTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA.....	21
1.1 DEFINICIÓN DE LA MECÁNICA DE ROCAS .....	21
1.2 DEFINICIÓN DE GEOMECANICA .....	22
1.3 ESTABILIDAD MECÁNICA DE POZOS .....	22
2. CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE ROCAS Y CRITERIOS DE FALLA .....	26
2.1 ESFUERZO .....	26
2.1.1 Esfuerzo normal. ....	27
2.1.2 Esfuerzo cortante. ....	28
2.2 TIPOS DE FUERZAS .....	29
2.2.1 Fuerza compresiva. ....	29
2.2.2 Fuerza de corte. ....	29
2.2.3 Fuerza de tensión. ....	30
2.3 TENSOR DE ESFUERZOS .....	31
2.4 PROPIEDADES DE LAS ROCAS .....	33
2.4.1 Módulo de Young (E).....	33
2.4.1.1 Ley de Hooke.....	33
2.4.2 Relación de Poisson (v). ....	34
2.4.3 Módulo de Rigidez (G). ....	35
2.4.4 Valor de Cohesión o UCS.....	35
2.4.5 Angulo de fricción interna ( $\varphi$ ) o ángulo de fricción .....	35
2.4.6 Presión de Poro (Pporo). ....	35
2.5 ENSAYO DE ROCAS .....	36
2.5.1 Tipos de rotura de los suelos. ....	36
2.5.2 Ensayos de resistencia y deformabilidad.....	37
2.5.2.1 Ensayo uniaxial .....	37
2.5.2.2 Ensayo triaxial. ....	38
2.6 CRITERIOS DE FALLA .....	40

2.6.1	Definición de un criterio de falla general.....	40
2.6.2	Criterio de falla por tensión.....	42
2.6.3	Criterio de falla por compresión.....	43
2.6.3.1	Criterio de Hoek- Brown.....	43
2.6.3.2	Criterio de falla de Mohr – Coulomb .....	51
2.6.3.2.1	Criterio de Coulomb, cohesión y ángulo de rozamiento interno .....	53
2.6.3.2.2	Formulación del Criterio de Mohr-Coulomb .....	54
2.6.3.3	Criterio de Drucker – Prager .....	58
2.6.3.4	Criterio Modificado de Lade .....	60
3.	APLICACIÓN PRÁCTICA SEGÚN CADA CRITERIO DE FALLA.....	63
3.1	CASO ESTUDIO 1 .....	63
3.1.1	Perfil geológico.....	63
3.1.2	Resultados.....	65
3.2	CASO ESTUDIO 2 .....	69
3.3.1	Simulaciones de comportamiento de esfuerzo en litologías de rocas.....	70
3.3	CASO ESTUDIO 3 .....	76
3.3.1	Antecedentes.....	76
3.3.2	Simulación del puenteo (Bridging) del pozo: Modelo geomecánico .....	80
3.3.3	Esfuerzos in-situ de campo .....	80
3.3.4	Propiedades mecánicas de la roca .....	82
3.3.5	Criterio de falla utilizados.....	85
3.3.6	Simulación Bridging.....	85
3.3.7	Operación de perforación normal.....	85
3.3.8	Situación de reventón.....	87
3.3.9	Análisis de resultados.....	94
4.	ANÁLISIS DE PROPIEDADES Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LA ROCA PARA YACIMIENTOS DE PETRÓLEO.....	95
4.1	YACIMIENTOS CONVENCIONALES .....	95
5.	LAS PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS CRITERIOS DE FALLA.....	100
5.1	CRITERIOS DE FALLA Y SU IMPACTO EN LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE POZOS.....	100

5.1.1	Análisis de sensibilidad .....	101
5.1.2	Los parámetros, criterios de falla y procedimientos .....	101
5.1.3	La geometría del pozo.....	101
5.1.4	Las condiciones in situ y propiedades mecánicas de las rocas .....	101
5.1.5	Procedimiento del análisis .....	103
5.1.6	Resultados y discusiones. ....	104
6.	SCREENING DE APLICABILIDAD DE LOS DIFERENTES CRITERIOS DE FALLA EN LA INDUSTRIA PETROLERA.....	111
6.1	VARIABLES.....	111
6.1.1	Esfuerzos principales. ....	111
6.1.2	Régimen de esfuerzo. ....	112
6.1.3	Propiedades de las rocas .....	112
6.2	SCREENING .....	112
6.3	Screening Hoek-Brown y Mohr-Coulomb: <i>RocData</i> . ....	115
6.2.1	Screening Hoek-Brown .....	116
6.2.1.1	Evaluación de variables. ....	118
6.2.2	Screening Mohr-Coulomb .....	120
6.2.2.1	Evaluación de variables .....	122
7.	CONCLUSIONES .....	125
8.	RECOMENDACIONES.....	128
	BIBLIOGRAFIA.....	129

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descomposición de una fuerza en fuerzas Normal y Cortante.....	27
Figura 2. Fuerza compresiva.....	29
Figura 3. Fuerza de corte.....	30
Figura 4. Fuerza de tensión.....	30
Figura 5. Esfuerzos en el plano YZ perpendicular al eje X de un elemento cubico. ....	31
Figura 6. Presión de poro (Pporo) .....	36
Figura 7. Forma de rotura de una muestra .....	36
Figura 8. Muestras de rocas perfectamente maquinadas para ensayos de laboratorio. ....	37
Figura 9. Ensayo uniaxial. Se ejecuta en un testigo de roca cilíndrico con sensores de deformación que miden la deformación vertical y diametral. Las grietas verticales son típicas después del valor máximo.....	38
Figura 10. Ensayo triaxial cambiando la presión lateral. ....	39
Figura 11. Representación del criterio de rotura en términos bidimensionales. Modificada de según Melentijevic. 2005.....	42
Figura 12. Representación del criterio de rotura de HOEK – BROWN, en el espacio de tensiones normal y tangencial.....	44
Figura 13. Construcción del círculo de Mohr .....	52
Figura 14. Envolvente de falla en diferentes pruebas para diferentes escenarios propuestos.....	53
Figura 15. Deslizamiento tras un muro de contención. Observaciones de Coulomb.....	53
Figura 16. Diagrama de Mohr en tres dimensiones.....	55
Figura 17. Diagrama de Mohr en dos dimensiones. Condición de rotura.....	56
Figura 18. Diagrama del criterio de Mohr-Coulomb donde además se muestra el círculo de Mohr correspondiente a un estado de esfuerzos crítico. ....	57
Figura 19. Criterio de Drucker-Prager.....	59
Figura 20. Criterio de Drucker-Prager en 2D.....	60
Figura 21. Criterio de Lade .....	61
Figura 22. Perfil del macizo rocoso, indicando la definición geométrica del talud, de la superficie potencial de falla, de las líneas de estratificación y de la presión de poros considerada.....	64
Figura 23. Variación de los esfuerzos principales a lo largo de la S.P.F .....	65
Figura 24. Distribución de los esfuerzos normales totales, normales efectivos y tangenciales movilizados, a lo largo de la S.P.F.....	66
Figura 25. Envolvente de resistencia al corte de Mohr-Coulomb.....	67
Figura 26. Variación de los esfuerzos normales totales, normales efectivos y tangenciales movilizados a lo largo de la S.P.F. ....	67

Figura 27. Comparación de la distribución de esfuerzos obtenido por diferentes métodos. Con presión de poros y sin presión de poros. ....	68
Figura 28. Predicción de colapso densidad del fluido Vs el ángulo de inclinación para el campo Cyrus.....	71
Figura 29. Densidad de colapso Vs ángulo de inclinación para tres litologías simuladas, sometidas un régimen de esfuerzo extensional usando el criterio de falla de Drucker-Prager. ....	72
Figura 30. Densidad de colapso Vs ángulo de inclinación para la formación caliza simulada, sometidas a un régimen de esfuerzo extensional y de desgarre, usando el criterio de falla de Drucker-Prager.....	72
Figura 31. Densidad falla de tensión Vs ángulo de inclinación para tres litologías simuladas, sometidas a un régimen de esfuerzo extensional usando el criterio de falla de Drucker-Prager. ....	74
Figura 32. Densidad falla de tensión para la formación de caliza simulada, sometida a un régimen de esfuerzo extensional y de desgarre usando el criterio de falla de Drucker-Prager .....	75
Figura 33. Definición de escenarios y simulación de la presión de fondo fluyendo .....	77
Figura 34. Temperatura y registro sísmico a lo largo de la profundidad del pozo.....	78
Figura 35. Trayectoria del Pozo SWA 184-ST1 .....	79
Figura 36. Orientación de esfuerzos in-situ y la ubicación del pozo.....	81
Figura 37. Crossplot de Vp y Vs .....	82
Figura 38. Registros usados para obtener las propiedades de resistencia del shale.....	83
Figura 39. Cohesión y Angulo de fricción interna calculado para el campo de interés. ....	84
Figura 41. Ángulos de breakout para operación normal basado en criterio Mohr-Coulomb .....	86
Figura 40. Ángulos de breakout para operación normal basado en criterio Modificado de Lade. ....	86
Figura 42. Reventón: presión del pozo por OLGA2000.....	87
Figura 43. Reventón, Modificado Lade: presión de pozo por el simulador.....	88
Figura 44. Reventón, Mohr Coulomb: presión de pozo por el simulador .....	89
Figura 45. Ángulo de breackout en TVD=2327 m.....	90
Figura 46. Comparación de SFIB y nuestro simulador para operación normales.....	91
Figura 47. Mohr-coulomb y Modifica de Lade para situaciones normales.....	92
Figura 48. Comparación de tres sets de simulaciones .....	93
Figura 49. Análisis de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb.....	98
Figura 50. Análisis de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb.....	99
Figura 51. Distribución SH - Régimen de esfuerzo falla normal.....	104
Figura 52. Distribución de la simulación CMW cuando varia SH - Régimen de esfuerzo falla normal y el criterio de Mohr-Coulomb .....	105
Figura 53. Variaciones de CMW y FMW correspondiente a la variación de los parámetros de entrada para diferentes criterios de falla – falla normal.....	107

Figura 54. Variaciones de CMW y FMW correspondiente a la variación de los parámetros de entrada para diferentes criterios de falla – falla inversa .....	107
Figura 55. Variaciones de CMW y FMW correspondiente a la variación de los parámetros de entrada para diferentes criterios de falla – falla de rumbo.....	108
Figura 56. Screening: Sensibilidad de las variables para diferentes criterios de falla, en un régimen de esfuerzo de falla normal.....	113
Figura 57. Screening: Sensibilidad de las variables para diferentes criterios de falla, en un régimen de esfuerzo de falla inversa. ....	114
Figura 58. Screening: Sensibilidad de las variables para diferentes criterios de falla, en un régimen de esfuerzo de falla inversa. ....	115
Figura 59. Caso de estudio Dolomite Triaxial Data. ....	117
Figura 60. Sensibilización: Variación del GSI.....	118
Figura 61. Caso de estudio Dolomite.....	121
Figura 62. Sensibilización para cada AFI (ángulo de fricción interna).....	122
Figura 63. Línea de falla (criterio de Mohr-Coulomb) por encima de las envolventes para un AFI= 50,157° .....	123

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Constantes que dependen de las propiedades del macizo rocoso y del grado de fracturamiento de la roca antes de someterla a los esfuerzos de rotura. ....	46
Tabla 2. GSI de macizos rocosos foliados y no foliados .....	48
Tabla 3. Guías para estimar el factor de alteración D.....	49
Tabla 4. Características geomecánicas del macizo rocoso .....	65
Tabla 5. Características geomecánicas del macizo rocoso. <i>Formación Cyrus</i> .....	69
Tabla 6. Parámetros de los criterios de falla.....	95
Tabla 7. Parámetros e incertidumbres para la simulación de Monte Carlo .....	102
Tabla 8. Regímenes de esfuerzos.....	102
Tabla 9. Resumen de los parámetros e incertidumbres para la simulación de Monte Carlo - Régimen de esfuerzo falla normal (SV>SH>Sh) .....	103
Tabla 10. Peso simulado del lodo - régimen de esfuerzo falla normal.....	106
Tabla 11. Valores iniciales.....	116
Tabla 12. Valores de esfuerzo normal y esfuerzo de corte para distintos GSI's .....	117
Tabla 13. Screening para Hoek-Brown.....	119
Tabla 14. Valores iniciales de los parámetros.....	120
Tabla 15. Valores de esfuerzo normal y esfuerzo de corte para distintos AFI (ángulo de fricción interna) para el caso de estudio Dolomita Triaxial .....	121
Tabla 16. Screening para Mohr-Coulomb .....	124

## RESUMEN

**TITULO: DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DIFERENTES CRITERIOS DE FALLA QUE INDICAN BAJO QUÉ CONDICIONES FALLAN LAS ROCAS Y SU IMPACTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA\***

**AUTORES:** JAINES ANDREA FRÍAS  
ROSO ANDRÉS PLATA \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Esfuerzos, Geomecánica, Estabilidad de Pozo, Criterios de Falla, Peso de Lodo, Deformación. \*\*

### DESCRIPCIÓN

La geomecánica es la disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman la roca de formación. Esta disciplina está basada sobre los conceptos, teorías de mecánica de rocas y mecánica de suelos, que relacionan el comportamiento de la formación bajo los cambios de esfuerzos.

La inestabilidad de pozo sigue siendo una preocupación importante para las compañías porque además de ser potencialmente costosa, aumenta los problemas asociados a las tareas de perforación, completamiento y producción. Para prevenir estos problemas indeseables es recomendable realizar un estudio de esfuerzos antes, durante y después de la perforación, conociendo las propiedades de las rocas, su resistencia y los límites para determinar bajo qué condiciones fallan las rocas, usando las teorías de fallas o criterios de falla.

En este proyecto se enfatiza en cada criterio de falla: Hoek - Brown, Mohr - Coulomb, Druker - Prager y Modificado de Lade, los cuales involucran el estado de esfuerzos como un factor importante. La investigación presenta los resultados de la recopilación de conceptos geomecánicos básicos, la definición de cada criterio de falla, el análisis de resultados de casos de estudios aplicados a cada uno de los criterios y una sensibilización de las propiedades y parámetros de resistencia de la roca. Finalmente la investigación concluye con las principales aplicaciones de los criterios plasmadas en un Screening. Estos Screening mejorará la gestión de la integridad del pozo, con lo que aumenta la eficiencia y la reducción de los costos de perforación entre otras mejoras.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de petróleos, Director Zuly Himelda Calderón

## ABSTRACT

**TITLE: DETERMINATION AND ANALYSIS OF THE DIFFERENT FAILURE CRITERIA WHICH INDICATE UNDER WHAT CONDITIONS ROCKS FAIL AND THEIR IMPACT ON THE PETROLEUM INDUSTRY\***

**AUTHORS:** JAINES ANDREA FRÍAS  
ROSO ANDRÉS PLATA \*\*

**KEYWORDS:** Stresses, Geomechanical, Mud weigh, Criteria failure, Wellbore Stability, Deformation.

### DESCRIPTION

The geomechanics is the discipline that studies the mechanical characteristics of the geologic materials that make up the rock formation. This discipline is based on concepts, theories of rock mechanics and soil mechanics, linking training behavior under stress changes.

Wellbore instability is a concern for companies because besides being potentially costly problems associated increases the drilling, completion and production. To prevent these problems is undesirable recommended a study of efforts before, during and after drilling, knowing the properties of the rocks, their resistance and limits to determine under what conditions fail the rocks, using the theories of failure or criteria fails.

This project emphasizes each failure criteria: Hoek - Brown, Mohr - Coulomb, Drucker - Prager and Modified Lade, which involves the state of stress as an important factor and prioritizes various rock mechanical parameters, in-situ stresses and pore pressure conditions that affect wellbore instability. The investigation presented the results of the collecting basic concepts of geomechanics, the definition of each failure criterion, the analysis of results of case studies applied to each of the criteria and an awareness of the properties and strength parameters of the rock. Finally, the study concludes with the main applications of the criteria set forth in a screening. This screening improves future risk reduction, for wellbore stability analysis; improve the management of wellbore integrity, thereby increasing drilling efficiency and reducing drilling cost.

---

\* Graduate Work

\*\* Physicochemical School of Engineering School of Petroleum Engineering, Director Zuly Himelda Calderón

## INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de pozo sigue siendo una preocupación importante para las compañías petroleras porque además de ser potencialmente costosa, aumenta los problemas asociados a las tareas de perforación, completamiento y producción.

Para prevenir estos problemas indeseables es recomendable realizar un estudio de esfuerzos antes, durante y después de la perforación, conociendo las propiedades de las rocas, su resistencia y los límites para determinar bajo qué condiciones fallan las rocas, usando las teorías de fallas o los criterios de falla. La industria del petróleo ha tenido en cuenta la ciencia de la mecánica de rocas en los últimos años, ya que ha sido una herramienta importante para la exploración del aceite y gas. Cuando un yacimiento comienza su vida productiva, se conoce que la extracción de los fluidos contenidos en la roca altera el ambiente natural estable de las formaciones rocosas y por eso se hace importante conocer y estudiar esta ciencia.

Actualmente se está estudiando y se está entendiendo los criterios de falla asociados con la inestabilidad del pozo, los cuales involucran el estado de esfuerzos como un factor importante. Ya se tienen métodos y procedimientos para la determinación de estos esfuerzos, sin embargo para utilizar muchos de estos métodos se requiere de un acceso directo a la roca que está siendo medida, mediante ensayos de rocas.

Todo esto hizo que la industria petrolera se enfocará y comenzará a implementar estudios de mecánica de roca por medio de la geomecánica aplicada al yacimiento con lo que se ha desarrollado nuevas técnicas para la medida de los esfuerzos in situ a partir de los pozos. De igual forma nuevas correlaciones de esfuerzo-deformación y criterios de falla más apropiados, todo esto está siendo desarrollados específicamente para el problema de inestabilidad de pozos.

Por esta razón se vuelve indispensable hacer un estudio detallado de los distintos criterios de falla que existen en la industria y así mejorar la forma de solucionar problemas relacionados a la inestabilidad de pozos y yacimientos; contribuyendo a la eficiencia de las operaciones de perforación, completamiento y producción de yacimientos.

El objetivo del presente trabajo es determinar y analizar los diferentes criterios de falla que indican bajo qué condiciones fallan las rocas, explicar en cuáles de ellos se considera satisfactoria su aplicación a la industria de los hidrocarburos y en cuáles de los criterios, existen inconvenientes e incertidumbres en su implementación.

El libro está distribuido de tal manera, que se facilite la comprensión del tema, distribuido en seis capítulos; en el primer capítulo se presenta el concepto de mecánica de rocas, geomecánica y aspectos generales de la misma aplicados a la industria de los hidrocarburos. El segundo capítulo contiene una revisión bibliográfica realizada para definir los criterios de falla, su principio y funcionamiento, en el tercer capítulo se describen ejemplos de la literatura de cada uno de los criterios de falla, identificando así su aplicabilidad en la industria, en el capítulo cuatro se presenta un análisis de propiedades y parámetros de resistencia de la roca, usando los criterios de falla para yacimientos de petróleo. En el capítulo cinco se define el orden de aplicación de los criterios de falla con sus respectivas consideraciones, teniendo en cuenta los estudios anteriormente realizados. Por último en el capítulo seis se encuentra un Screening de aplicabilidad de los diferentes criterios de falla aplicados a la industria, tomando como base un estudio de la literatura.

# **1. ASPECTOS GENERALES DE LA GEOMECANICA Y SU IMPACTO EN LA INDUSTRIA PETROLERA**

## **1.1 DEFINICIÓN DE LA MECÁNICA DE ROCAS**

La temática de la ingeniería de mecánica de rocas, como una práctica aplicada a la ingeniería de minas e ingeniería civil, es concerniente a las aplicaciones de los principios de la ingeniería mecánica, que evalúa el comportamiento de la roca en túneles y pozos; es decir, si la roca es propensa a derrumbarse o no por la actividad minera o petrolera. Esta disciplina está estrechamente relacionada con las corrientes principales de la mecánica clásica y de la mecánica de materiales, pero hay varios factores específicos que la identifican como un campo distinto y coherente de la ingeniería.

La mecánica de rocas se encarga del estudio teórico-práctico de las propiedades, comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico. Su finalidad es conocer y predecir la respuesta de la roca a las cargas impuestas en ella, de tal forma que la roca pueda tener resistencia en tensión, compresión y cizalladura, por esta razón es de fundamental importancia para la ingeniería de petróleos ya que al realizar perforaciones, esta analiza los cambios que ocurren en el subsuelo, producto de estos trabajos; minimizando los daños en la formación.

Cuando se tienen problemas relacionados con la baja productividad, que generalmente se atribuyen a daño inducido en la perforación y/o permeabilidad baja del yacimiento, el fracturamiento hidráulico es una de las técnicas de estimulación de pozos en yacimientos de hidrocarburos más utilizada en el mundo. Esta técnica fue un importante desarrollo tecnológico que sirvió para la aplicación de los conceptos de la mecánica de roca ya que es utilizada para medir los esfuerzos in situ y la deformación de la roca e incluyendo los cambios en el estado de esfuerzos en el yacimiento ya que es un requisito fundamental para determinar la orientación y geometría de la fractura.

## **1.2 DEFINICIÓN DE GEOMECANICA**

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

El origen de la geomecánica nace en la ingeniería civil, debido al estudio de suelos y rocas como materiales fundamentales en la construcción de obras como: túneles, represas, socavones, vías, etc. Al pasar del tiempo las aplicaciones de la geomecánica se extendieron a mineros, aplicaciones en la industria del petróleo, en la ingeniería mecánica entre otras.

La geomecánica aplicada a yacimientos es el estudio formado por el estado de esfuerzo, presión de poro, propiedades físicas de los yacimientos, fallas, fracturas naturales, y roca sello, que suministra un entendimiento de la interacción entre condiciones geológicas y prácticas de producción e ingeniería con el fin de establecer y/o implementar modelos que predigan el comportamiento del yacimiento y del pozo exclusivamente, con el fin de crear estrategias que permitan mantener al pozo en condiciones estables.

## **1.3 ESTABILIDAD MECÁNICA DE POZOS**

La mecánica de rocas tiene una aplicación en la industria del gas y petróleo muy importante, ya que ayuda a resolver problemas de inestabilidad, por ejemplo cuando los pozos comienzan a producir arena o fallan durante su etapa de perforación. La inestabilidad de pozo es un serio problema que puede incrementar los costos de perforación y completamiento de pozos ya que se presentan problemas como ensanchamientos del pozo, pegadas de tubería, dificultad en la corrida de registros, derrumbes, etc. Todas estas dificultades a la hora de iniciar

con un proyecto petrolero, son el resultado de la no utilización o del desconocimiento de los principios básicos de la mecánica de rocas.

La geomecánica en la industria del petróleo se extiende en varias aplicaciones entre ellas esta<sup>1</sup>:

- Optimización de la localización del pozo y de la trayectoria.
- Análisis de esfuerzos en el subsuelo.
- Caracterización de yacimientos fracturados.
- Diagnóstico de problemas de perforación.
- Predicción y control de la producción de arena.
- Pronóstico y control de la estabilidad del pozo.
- Predicción y control de la compactación y subsidencia del yacimiento.
- Fracturamiento hidráulico.
- Predicción de la presión de poro.

Los problemas que acarrea la estabilidad de pozos durante la perforación son mencionados a continuación:

- Consolidación, pega de tubería y pérdida de circulación.
- Exceso de torques y altas presiones de bombeo en la perforación.
- Dificultad en la toma de registros.
- Side-tracking.
- Fallas de pozo inducidas por la perforación.
- Pobre cementación con sus respectivos problemas.
- Ensanchamiento del pozo (breakouts)
- Daño del pozo inducidos por los esfuerzos

---

<sup>1</sup>TERAN, Claudia. Acoplamiento de un modelo de flujo de fluidos y geomecánica con el análisis de estabilidad mecánica de pozos en yacimientos naturalmente fracturados. Aplicación a un caso colombiano. Tesis, Bucaramanga, 2006.

- Reducción del tamaño del pozo debido al flujo plástico de la roca dentro del pozo generalmente en formaciones de shale.

Estas aplicaciones ayudan a resolver problemas de estabilidad tanto en pozos desviados como en pozos verticales. Estos problemas se originan y se convierte en un problema mayor cuando:

- Se perfora pozos de alta profundidad en zonas geológicamente complejas y en zonas tectónicamente activas.
- Cuando el fluido de perforación y la roca de formación interaccionan químicamente.
- Perforaciones a presiones y temperaturas altas.

Para establecer un balance entre los esfuerzos y la resistencia de la formación, el cual debe ser mantenido durante la fase de perforación y producción a través del control de las siguientes variables<sup>2</sup>:

- Selección adecuada del peso del lodo
- Control de la trayectoria de perforación
- Composición química del lodo
- Control térmico del pozo
- Control de las prácticas de perforación/viajes

La geomecánica utiliza resultados experimentales de campo y laboratorio conjuntamente con soluciones analíticas para resolver problemas particulares. Los estudios geomecánicos casi siempre necesitan muestras de la roca y por lo tanto resulta necesaria la obtención de núcleos geológicos. Estos núcleos serán utilizados para tomar muestras para ensayos especializados de laboratorio.

---

<sup>2</sup> CORZO, Reinel y RINCON, Claudio. Medición y evaluación de la magnitud y dirección de los esfuerzos in-situ en campo. Tesis, Bucaramanga, 2004.

Un análisis de estabilidad involucra los siguientes estudios y pruebas:

- Realizar pruebas de campo.
- Tomar registros especiales.
- Toma de núcleos geológicos.
- Realizar ensayos geomecánicos en laboratorio.
- Elaborar modelo sobre el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia mecánica.
- Elaborar correlaciones núcleo-perfil.
- Usar métodos analíticos o numéricos con los parámetros obtenidos para predecir las condiciones de estabilidad.
- Pensamiento ingenieril.

Existen una gran variedad de ensayos de laboratorio para medir diferentes propiedades mecánicas de la roca. Las propiedades mecánicas de interés se dividen en aquellas que miden resistencia, las que miden deformaciones y las que miden comportamiento esfuerzo-deformación. Entre los tipos de ensayos, el más común en la geomecánica es el de compresión triaxial, con el cual se determinan varias propiedades de una muestra de suelo. Otro tipo de ensayo muy utilizado es el de compresión uniaxial que utiliza para definir algunas propiedades reológicas de muestras de suelo.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE ROCAS Y CRITERIOS DE FALLA

La roca, bajo cierta condición de esfuerzo, pierde su integridad, lo cual es llamado "falla". Para describir totalmente el comportamiento de las rocas, bajo condiciones de carga, es necesario combinar los modelos de comportamiento con un criterio de falla.

Los criterios simulan la condición de carga bajo la cual la roca falla. Existen varios criterios ampliamente utilizados para describir el comportamiento de falla de las rocas, tales como, el criterio de Mohr Coulomb, criterio de Drucker-Prager, Hoek-Brown y criterio Modificado de Lade, entre otros, los anteriores criterios mencionados son los más utilizados en la industria petrolera.

Antes de conocer los criterios de falla, es necesario tener en cuenta algunos conceptos de áreas como la física, geología, resistencia de materiales, geometría y álgebra tensorial entre otros, que son aplicados al estudio de esfuerzos con el fin de lograr un mejor entendimiento de los criterios.

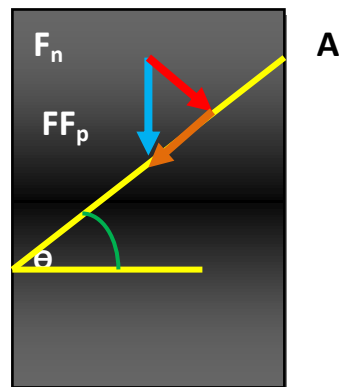
### 2.1 ESFUERZO

El esfuerzo se define como la fuerza por unidad de superficie que soporta o se aplica sobre un plano cualquiera de un cuerpo (en este caso la roca). Es decir, es la relación entre la fuerza aplicada y la superficie sobre la cual se aplica:

$$\sigma = \frac{dF}{dA} \quad (1)$$

En general, un vector esfuerzo que actúa sobre un plano lo hace oblicuamente a él. Un vector esfuerzo oblicuo puede descomponerse en uno perpendicular al plano y en otro paralelo a él, (ver figura 1). Esta descomposición da lugar a las componentes del esfuerzo, que se llaman respectivamente normal y cortante, se denotan con las letras griegas  $\sigma$  y  $\tau$  respectivamente.

**Figura 1.** Descomposición de una fuerza en fuerzas Normal y Cortante.



**Fuente.** CORONEL, Iván y MATEUS, Darwin. Evaluación de los mecanismos de falla que conducen a la inestabilidad de pozo. Tesis, Bucaramanga, 2004.

El esfuerzo normal es el esfuerzo que es perpendicular al plano sobre el que se aplica las fuerzas, que es distribuido de manera uniforme por toda su superficie. En cambio el esfuerzo cortante se define como la relación entre la fuerza y el área a través de la cual se produce el deslizamiento, donde la fuerza es paralela a la superficie.

**2.1.1 Esfuerzo normal.** Es aquel que tiene en cuenta la componente normal de la fuerza aplicada sobre el área transversal:

$$\sigma_N = \frac{F_n}{A} \quad (2)$$

**2.1.2 Esfuerzo cortante.** Es aquel que tiene en cuenta las componentes paralelas de la fuerza respecto al área transversal:

$$\tau_p = \frac{F_p}{A} \quad (3)$$

En la mecánica de rocas, la convención es que los esfuerzos compresivos son positivos, ya que la mayoría de las situaciones están bajo condiciones de carga compresiva.

Es de gran importancia destacar que los esfuerzos tienen las mismas unidades que las presiones (psi, Kpa). La diferencia es que las presiones se relacionan a fluidos y son hidrostáticas (igual valor en cualquier dirección). Mientras que los esfuerzos se relacionan a sólidos y son generalmente no hidrostáticos<sup>3</sup>.

En la mecánica de rocas se conocen tres tipos de esfuerzos. El estado de los esfuerzos puede ser descrito por tres esfuerzos principales que son perpendiculares entre sí: esfuerzo principal máximo  $\sigma_1$ , esfuerzo principal intermedio  $\sigma_2$  y esfuerzo principal mínimo  $\sigma_3$ . Debido a que las direcciones de los esfuerzos principales son ortogonales, la dirección de dos esfuerzos principales automáticamente describe la dirección de todos ellos.

Los esfuerzos principales son los mayores esfuerzos que actúan sobre el macizo rocoso. Los esfuerzos normales principales se notan como  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , donde  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ , y en el ángulo de rotación en el que se dan el esfuerzo cortante es cero.

---

<sup>3</sup>PABON, Eduard y OBEID, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cusiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos. Tesis, Bucaramanga, 2004.

- Esfuerzo máximo principal ( horizontal)
- Esfuerzo intermedio principal (vertical)
- Esfuerzo mínimo principal (horizontal)

## 2.2 TIPOS DE FUERZAS

Dentro de la mecánica de roca existen tres tipos de fuerzas:

**2.2.1 Fuerza compresiva.** En este caso las fuerzas externas están dirigidas una contra la otra, es decir las partículas a ambos lados del plano se encuentran más juntas o cercanas como se muestra en la *figura 2*. Como resultado de su acción el material tiende a reducir su volumen.

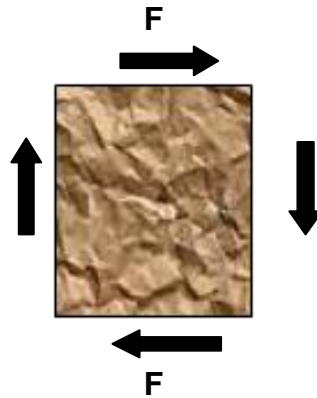
**Figura 2.** Fuerza compresiva



Fuente. Autores

**2.2.2 Fuerza de corte.** Se presenta cuando las fuerzas externas están paralelas y en direcciones opuestas, pero en diferentes planos. Como resultado tiende a desplazar algunas partes del material con respecto a otras, como se muestra en la *figura 3*.

**Figura 3.** Fuerza de corte



Fuente. Autores

**2.2.3 Fuerza de tensión.** Ocurre cuando las fuerzas externas son paralelas y en dirección opuesta, es decir las partículas a ambos lados del plano tienden a separarse. Como resultado el material tiende a formarse grietas o fracturas, como se muestra en la *figura 4*.

**Figura 4.** Fuerza de tensión



Fuente. Autores

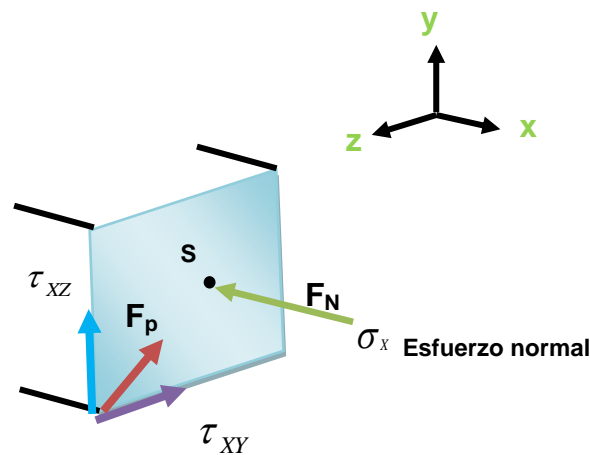
## 2.3 TENSOR DE ESFUERZOS

El tensor de esfuerzos está asociado a las tensiones internas que existen en el medio. Por ejemplo, si se calienta un medio elástico, los átomos en su interior van a moverse y generar un cambio del tensor de esfuerzos<sup>4</sup>.

Para establecer una descripción completa del estado de esfuerzos en un punto P dentro de un cuerpo, es necesario identificar los esfuerzos relacionados con las superficies orientadas en tres direcciones ortogonales.

Considérese un elemento cúbico en un campo de esfuerzos tridimensional. Si se aplica una fuerza en un punto S sobre el plano normal al eje X, ésta podrá descomponerse en dos esfuerzos: Un esfuerzo normal al plano perpendicular al eje X y un esfuerzo cortante paralelo a dicho plano. El esfuerzo de corte sobre el plano puede no estar alineado con ninguno de los dos ejes Y o Z, sin embargo éste esfuerzo se puede también descomponer en dos esfuerzos de corte en dirección de dichos ejes, tal como se muestra en la *figura 5*.

**Figura 5.** Esfuerzos en el plano YZ perpendicular al eje X de un elemento cubico.



**Fuente.** CORONEL, Iván y MATEUS, Darwin. Evaluación de los mecanismos de falla que conducen a la inestabilidad de pozo. Tesis, Bucaramanga, 2004.

<sup>4</sup>CORONEL, Iván y MATEUS, Darwin. Evaluación de los mecanismos de falla que conducen a la inestabilidad de pozo. Tesis, Bucaramanga, 2004.

Estas tres componentes de esfuerzos alineados con los tres ejes coordenados pueden ser expresadas en forma vectorial:

$$(\sigma_x \tau_{xy} \tau_{xz})$$

Similarmente se pueden obtener los esfuerzos relacionados con la superficie normal al eje Y, y los esfuerzos relacionados con la superficie normal al eje Z.

De esta manera se generan los vectores de esfuerzos sobre los planos Y y Z respectivamente:

$$(\sigma_Y \tau_{YX} \tau_{YZ}) \quad Y \quad (\sigma_Z \tau_{ZX} \tau_{ZY})$$

Si se agrupan los tres vectores en un solo arreglo matricial se obtiene:

$$\vec{\sigma}_T = \begin{pmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{YX} & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ \tau_{ZX} & \tau_{ZY} & \sigma_Z \end{pmatrix}$$

Esta expresión es llamada el tensor de esfuerzos y representa una descripción completa del estado de esfuerzos en el punto S<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> CORZO, Reinel y RINCON, Claudio. Medición y evaluación de la magnitud y dirección de los esfuerzos in-situ en campo. Tesis, Bucaramanga, 2004.

## 2.4 PROPIEDADES DE LAS ROCAS

Dentro de las propiedades elásticas se encuentran el Modulo de Young, relación de Poisson y módulo de rigidez<sup>6</sup>:

**2.4.1 Módulo de Young (E).** Es una medida de la propiedad que tiene la roca para resistir la deformación. El principio básico es que si a un cuerpo se le aplica un esfuerzo, y después de un tiempo este se retira, el cuerpo retorna a su cuerpo y tamaño original. Matemáticamente el Modulo de Young está dada por:

$$\sigma = E * \varepsilon_{ax} \quad (4)$$

Donde  $\varepsilon_{ax}$  corresponde a la deformación axial del cuerpo. Esta propiedad puede ser obtenida de pruebas esfuerzo-deformación.

Como El Módulo de Young es la pendiente del comportamiento esfuerzo vs deformación de una roca y esto representa la resistencia que presenta cada material a alargarse elásticamente bajo una tensión dada; cuando esto ocurre, se suele decir que el material "obedece a la ley de Hooke".

**2.4.1.1 Ley de Hooke.** Esta ley afirma que la deformación elástica que sufre un cuerpo es proporcional a la fuerza que produce tal deformación, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad<sup>7</sup>.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{F}{AE} \quad (5)$$

---

<sup>6</sup>PABON, Eduard y OBEID, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cusiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos. Tesis, Bucaramanga, 2004.

<sup>7</sup>PABON, Eduard y OBEID, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cusiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos. Tesis, Bucaramanga, 2004.

Donde  $\delta$  el alargamiento,  $L$  la longitud original,  $E$  módulo de Young. Ala sección transversal de la pieza estirada. La ley se aplica a materiales elásticos hasta un límite denominado límite elástico.

**2.4.2 Relación de Poisson ( $\nu$ ).** Es la relación entre la deformación transversal y la longitudinal. Cuando una muestra de roca está sometida a una carga de tracción simple se produce en ella un aumento de longitud en la dirección de la carga, así como una disminución de las dimensiones laterales perpendiculares a esta. La relación entre la deformación en la dirección lateral y la de la dirección axial se define como *relación de Poisson*<sup>8</sup>.

La relación de Poisson matemáticamente está dada por:

$$\nu = \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{ax}} \quad (6)$$

Donde  $\epsilon_{lat}$  y  $\epsilon_{ax}$  corresponden a la deformación transversal y axial de cuerpo respectivamente.

---

<sup>8</sup>PABON, Eduard y OBEID, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cusiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos. Tesis, Bucaramanga, 2004.

**2.4.3 Módulo de Rigidez (G).** Representa la medida de la resistencia de un cuerpo a cambiar de forma.

El módulo de rigidez matemáticamente está dado por:<sup>9</sup>

$$G = \frac{\text{Esfuerzodecorte}}{\text{resistenciadecorte}} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (7)$$

**2.4.4 Valor de Cohesión o UCS.** Es la atracción entre partículas, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua. Por lo tanto, la cohesión de un suelo variará si cambia su contenido de humedad. La cohesión se mide kg/cm<sup>2</sup>. Los suelos arcillosos tienen cohesión alta de 0,25 kg/cm<sup>2</sup> a 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, o más. Los suelos limosos tienen muy poca, y en las arenas la cohesión es prácticamente nula.

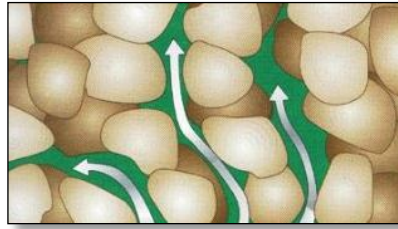
**2.4.5 Angulo de fricción interna (φ) o ángulo de fricción.** El ángulo de fricción interna φ resulta de la fricción mecánica directa entre granos y de la conexión entre ellos. Básicamente depende de: tamaño de las partículas, formas de las partículas, distribución de tamaños de partículas y densidad. Los valores de este ángulo, varían de prácticamente 0° para arcillas plásticas, hasta 45° o más, para gravas y arenas secas, compactas y de partículas angulares. Generalmente, el ángulo φ para arenas es alrededor de 30°.

**2.4.6 Presión de Poro (Pporo).** Se define como la presión que actúa sobre los fluidos en los espacios porosos de la roca (*ver figura 6*).

---

<sup>9</sup>PABON, Eduard y OBEID, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cusiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos. Tesis, Bucaramanga, 2004.

**Figura 6.** Presión de poro ( $P_{poro}$ )



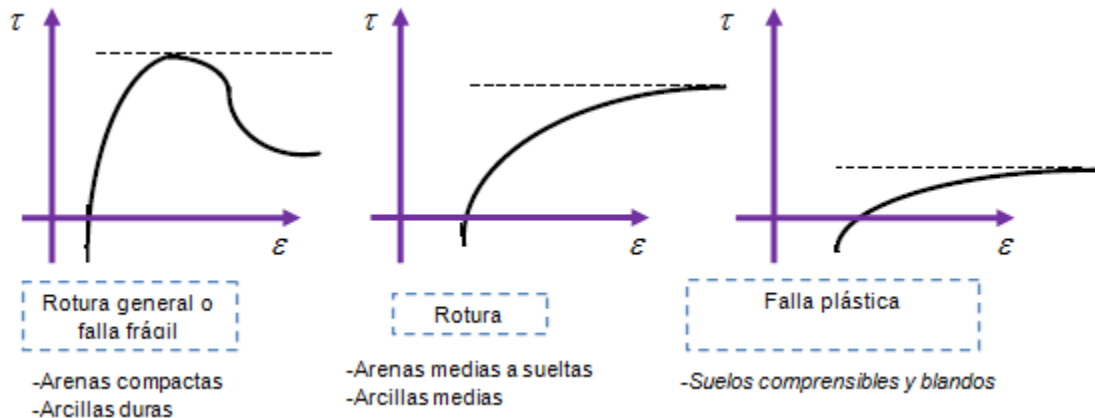
**Fuente.** CENIT DEL PETROLEO. Presión de poro. [En línea]. <http://www.cenit-del-petroleo.com/> [citado el 22 de Septiembre de 2012]

## 2.5 ENSAYO DE ROCAS

Los ensayos de rocas estudian el comportamiento físico de las rocas sometidas a condiciones de esfuerzo de diversos orígenes. Estos ensayos se realizan en el laboratorio en donde se somete una muestra de roca a condiciones de esfuerzo definidas para entender las condiciones bajo las cuales una roca o las rocas fallan.

**2.5.1 Tipos de rotura de los suelos.** La forma de rotura al fallar una muestra, depende del tipo de suelos ver *figura 7*:

**Figura 7.** Forma de rotura de una muestra

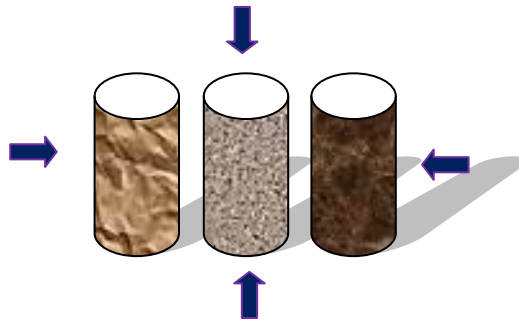


**Fuente.** [http://www.icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/.../06\\_resistencia\\_al\\_corte.pdf](http://www.icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/.../06_resistencia_al_corte.pdf) [En línea]. [Citado el 08 de Agosto de 2012]

**2.5.2 Ensayos de resistencia y deformabilidad.** Toda la información obtenida en los ensayos de laboratorio está relacionada fundamentalmente con las características de tensión y deformación de los materiales probados. Los ensayos que se ejecutan generalmente en muestras cilíndricas de rocas como se muestra en la *figura 8*, son los siguientes:

- Evaluación de la deformación y la resistencia a la compresión en condiciones uniaxiales.
- Evaluación de la deformación y la resistencia a la compresión en condiciones triaxiales.

**Figura 8.** Muestras de rocas perfectamente maquinadas para ensayos de laboratorio.



Fuente. Autores

**2.5.2.1 Ensayo uniaxial.** El ensayo uniaxial se realiza llevando a cabo la aplicación de una carga creciente a velocidad de tensión constante entre 0,5 y 1,0 MPa/s este ensayo consiste en aplicar cargas compresivas axiales cada vez mayores, a la muestra, hasta producir su rotura, como se muestra en la *figura 9*. Los valores de deformación axial y radial se miden con gran precisión (alrededor de  $5 \times 10^{-6}$ ). Estos ensayos son rápidos y económicos para aproximar la

resistencia de suelos cohesivos a poca profundidad y son poco confiables para muestras obtenidas a profundidades grandes<sup>10</sup>.

**Figura 9.** Ensayo uniaxial. Se ejecuta en un testigo de roca cilíndrico con sensores de deformación que miden la deformación vertical y diametral. Las grietas verticales son típicas después del valor máximo.



**Fuente.** CONTROLS. Equipo de ensayo para la industria de la construcción [en línea] [http://www.controls-group.com/...php/url...45\\_es.../nomefile=45\\_es.pdf](http://www.controls-group.com/...php/url...45_es.../nomefile=45_es.pdf) [citado el 23 de Julio de 2012]

**2.5.2.2 Ensayo triaxial.** El ensayo triaxial se realiza en muestras de rocas contenidas en una membrana de goma que se colocan dentro de una célula

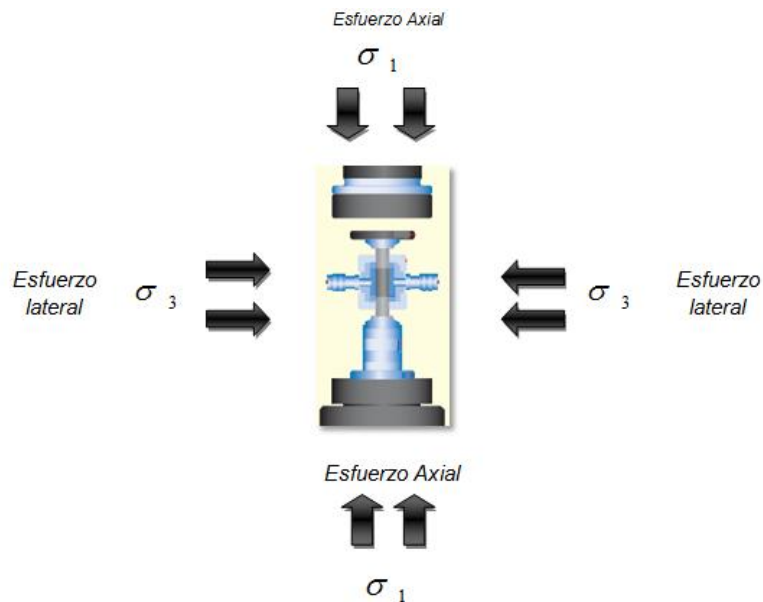
---

<sup>10</sup>CONTROLS. Equipo de ensayo para la industria de la construcción [en línea] [http://www.controls-group.com/...php/url...45\\_es.../nomefile=45\\_es.pdf](http://www.controls-group.com/...php/url...45_es.../nomefile=45_es.pdf) [citado el 23 de Julio de 2012]

triaxial y se someten a una presión isotrópica (normalmente entre 5 y 60 MPa) que se mantiene constante para todo el ensayo. En el ensayo triaxial, se aumenta la presión lateral en etapas programadas y se determina la carga axial  $\sigma_1$  correspondiente. El ensayo consiste, básicamente, en variar continuamente el punto de rotura cambiando la presión lateral  $\sigma_3$  como se muestra en la *figura 10*.

Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones en que se necesite analizar una muestra de suelo, las clases de ensayos para realizarlos serán consolidados no drenado (CU), no consolidado no drenado (UU) o consolidado drenado (CD)<sup>11</sup>.

**Figura 10.** Ensayo triaxial cambiando la presión lateral.



**Fuente.** CONTROLS. Equipo de ensayo para la industria de la construcción [en línea] [http://www.controls-group.com/...php/url...45\\_es.../nomefile=45\\_es.pdf](http://www.controls-group.com/...php/url...45_es.../nomefile=45_es.pdf) [citado el 23 de Julio de 2012]

<sup>11</sup>CONTROLS. Equipo de ensayo para la industria de la construcción [en línea] [http://www.controls-group.com/...php/url...45\\_es.../nomefile=45\\_es.pdf](http://www.controls-group.com/...php/url...45_es.../nomefile=45_es.pdf) [citado el 23 de Julio de 2012]

A partir de las mediciones registradas durante el ensayo, se obtiene la siguiente información:

- Velocidad de tensión en función de la deformación axial y radial
- Tensión máxima de rotura
- Módulo de Young tangente y secante medido en la curva de tensión-deformación axial
- Proporción entre la deformación radial y la deformación axial para obtener el coeficiente de Poisson
- Tensión máxima respecto a la presión de la célula (en los ensayos triaxiales) para definir la envolvente de rotura y las propiedades correspondientes (cohesión y fricción) dibujando los círculos de Mohr que representan los esfuerzos de falla de la muestra.
- Características de permeabilidad de las rocas y el comportamiento de la roca

## 2.6 CRITERIOS DE FALLA

Teniendo en cuenta el estado de esfuerzos originados en el pozo, antes, durante y después de la perforación, debido a esfuerzos límites que actúan sobre la pared del pozo. Si el estado de esfuerzo excede la resistencia de la roca, ya sea en tensión o en compresión, la falla se origina<sup>12</sup>.

**2.6.1 Definición de un criterio de falla general.** Existen dos formas para definir el comportamiento de falla de una roca: mediante el estado de tensiones o mediante el de deformaciones. Principalmente se utiliza el estado de tensiones (González Vallejo, 2002). De esta forma, se toma como resistencia de la roca la máxima tensión que la roca pueda soportar.

---

<sup>12</sup> PORTAL UPCOMMONS. Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas. [en línea] <http://www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6529/7/06.pdf> > [citado el 19 de Julio de 2012]

Cualquier punto del macizo rocoso, el tensor de esfuerzos está definido por seis componentes, tres componentes normales, y tres componentes tangenciales, como se mostró anteriormente, en un sistema de coordenadas (x, y, z). Dependiendo de la magnitud y dirección de las seis componentes del tensor, se obtienen las tres tensiones principales,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , donde  $\sigma_1$  es la tensión máxima principal,  $\sigma_2$  la tensión intermedia principal y  $\sigma_3$  la tensión mínima principal.

Para un material isótropo (presenta las mismas características físicas en cualquier dirección), cualquier dirección, es la dirección principal, con lo que las tres tensiones principales aparecen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . En este caso se define como criterio de falla a la superficie  $f$ , que delimita en el espacio de tensiones principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) un cierto dominio que llamamos dominio elástico viene expresado por la siguiente ecuación<sup>13</sup>:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (8)$$

Para obtener los resultados experimentales, se utilizan equipos que nos dan datos sobre las tensiones principales, si a esto le añadimos que la tensión intermedia principal ( $\sigma_2$ ) se suele ignorar, el criterio de rotura se define bidimensionalmente en función de la tensión máxima principal ( $\sigma_1$ ), y la tensión mínima principal ( $\sigma_3$ ), como:

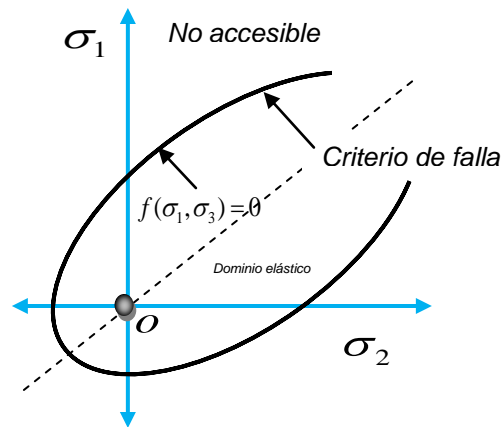
$$f(\sigma_1, \sigma_3) = 0 \quad (9)$$

$f$  es la superficie que limita el dominio elástico del material, en el espacio bidimensional de tensiones principales, y la ecuación que describe esta superficie de fluencia es el criterio de falla, *ver figura 11*.

---

<sup>13</sup>PORTAL UPCOMMONS. Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas. [en línea] <http://www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6529/7/06.pdf> [citado el 19 de Julio de 2012]

**Figura 11.** Representación del criterio de rotura en términos bidimensionales. Modificada de según Melentijevic. 2005.



**Fuente.** PORTAL UPCOMMONS. Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas. [en línea] <http://www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6529/7/06.pdf> > [citado el 19 de Julio de 2012]

Los puntos representados encima del dominio elástico ( $f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$ ) están en situación de falla y los puntos del macizo con estado tensional en el interior del dominio elástico no están en falla, sino que están en estado elástico. Los puntos del exterior del dominio elástico son puntos tensionales inaccesibles, es decir no se pueden obtener dichas tensiones para el macizo en cuestión<sup>14</sup>.

Dependiendo de cómo se defina la ecuación de la superficie de fluencia ( $f$ ) se obtienen distintos criterios de falla.

**2.6.2 Criterio de falla por tensión.** La teoría del esfuerzo principal mínimo es usada para predecir la falla tensil del pozo, la cual está dada por (asumiendo la compresión como positiva)<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> PORTAL UPCOMMONS. Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas. [en línea] <http://www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6529/7/06.pdf> > [citado el 19 de Julio de 2012]

<sup>15</sup> PORTAL UPCOMMONS. Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas. [en línea] <http://www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6529/7/06.pdf> > [citado el 19 de Julio de 2012]

$$\sigma_3 - p_{poro} \leq \sigma_t \quad (10)$$

$\sigma_3$ : Esfuerzo menor principal

$P_{poro}$ : Presión de poro en la cara del pozo

$\sigma_t$  : Resistencia tensil de la roca.

**2.6.3 Criterio de falla por compresión.** En la practica de buscar posibles soluciones a los problemas de estabilidad de pozo y disminuir los costos de produccion, podemos hablar de la existencia de cuatro modelos o criterios de falla extensamente usados en la mecanica de suelos y escasamente nombrandos en la industria petrolera, que buscan realizar o identificar mediante los esfuerzos bajo que condiciones la roca falla,es decir, predecir la respuesta de la roca a las cargas impuestas en ella. Cabe resaltar que el uso de diferentes criterios de falla puede llevar a resultados significativamente diferentes.

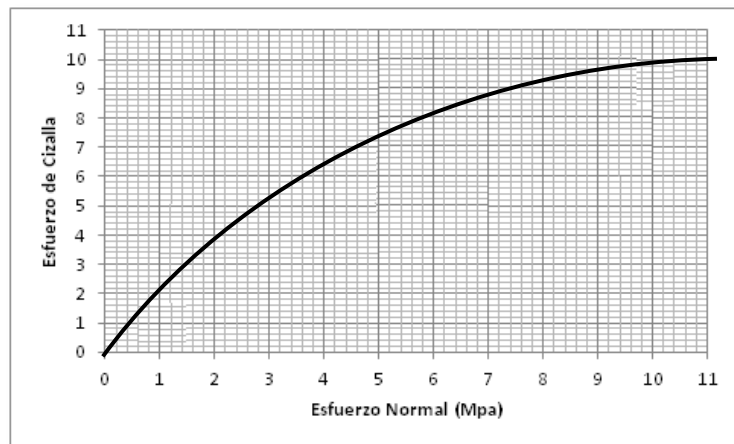
**2.6.3.1Criterio de Hoek- Brown.** Hoek y Brown introdujeron su criterio de rotura en un intento de proporcionar los datos de partida para el análisis necesario en el diseño de excavaciones subterráneas. El criterio se dedujo a partir de los resultados de las investigaciones de Hoek de roturas frágiles de rocas intactas y de un modelo de estudio del comportamiento de macizos rocosos de Brown. El criterio partía de las propiedades de la roca intacta. Este criterio de falla para macizos rocosos es ampliamente aceptado y se ha aplicado en un gran número de proyectos en todo el mundo. Su versión original fue introducido en el 1980 desde entonces su uso se ha generalizado en el ámbito de la mecánica de rocas, traspasando los límites para los que fue propuesto (cálculo de la estabilidad en taludes y estados tensionales en el entorno de un túnel, para macizos rocosos duros). Debido a esto, y con el fin de mejorarlo, el criterio ha sufrido varias modificaciones así como la introducción de nuevos parámetros para definir el

estado del material, y nuevas propuestas para obtener la caracterización del macizo rocoso, la última en 2002 (Hoek et al, 2002).

Se trata de un criterio no lineal, puramente empírico, que permite valorar, de manera sencilla, la rotura de un medio rocoso mediante la introducción de las principales características geológicas y geotécnicas.

En la *Figura 12* se representa las tensiones de rotura para el criterio de falla de Hoek – Brown, se aprecia que la función que define el dominio elástico es no lineal. Los estados de tensiones encima de la curva están en rotura, mientras que los interiores están en el dominio elástico, y los estados tensionales por encima de la curva son inaccesibles para este determinado caso<sup>16</sup>.

**Figura 12.** Representación del criterio de rotura de HOEK – BROWN, en el espacio de tensiones normal y tangencial.



**Fuente.** Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 – Evert Hoek: Consulting Engineer, Vancouver, Canadá- Carlos Carranza-Torres, USA.

---

<sup>16</sup>EVERT, Hoek y CARRANZA, Carlos. Hoek-Brown Failure Criterion. Itasca Consulting Group Inc - Rocscience Inc., Toronto, Canada. 2002.

A continuación se explica el criterio de rotura original de Hoek & Brown y su última versión. El Criterio de Hoek-Brown muestra una ecuación empírica que ajusta el comportamiento de la roca y que depende de distintos parámetros que se asocian al macizo rocoso:






$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (11)$$

- $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  : Corresponde al esfuerzo efectivo máximo y mínimo al fallar
- $\sigma_{ci}$  : Resistencia a la compresión uniáxial de la roca intacta
- $m$  y  $s$ : Constantes que dependen de las propiedades del macizo rocoso (*ver tabla 1*) y del grado de fracturamiento de la roca antes de someterla a los esfuerzos de rotura. El parámetro  $s$  es la medida de disminución de la resistencia a compresión simple de la roca debido a la fracturación.  $m$  influye en la resistencia al corte del material<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup>EVERT, Hoek y CARRANZA, Carlos. Hoek-Brown Failure Criterion. Itasca Consulting Group Inc - Rocscience Inc., Toronto, Canada. 2002

**Tabla 1.** Constantes que dependen de las propiedades del macizo rocoso y del grado de fracturamiento de la roca antes de someterla a los esfuerzos de rotura.

$m_i$	Macizo rocoso	Ilustración
$5 < m_i < 8$	Carbonatos	
$4 < m_i < 10$	Rocas arcillosas	
$15 < m_i < 24$	Arenas	
$16 < m_i < 19$	Rocas ígneas de grano fino	
$22 < m_i < 33$	Rocas ígneas de grano grueso	

**Fuente.** Modificada por los autores. Tomada de Curso Geomecánica Básica - M.Sc. Reinel Corzo. Julio 8-9 del 2010.

El uso del criterio no solo es en macizos rocosos duros, sino también en macizos de rocas débiles, por lo que ha supuesto una reformulación del criterio, así como la introducción de nuevos parámetros.

Su última versión se expresa:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (12)$$

- $m_b$ : Es un valor reducido de la constante del material  $m_i$

- $$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (13)$$

- GSI: (Geological Strength Index) es una clasificación geomecánica (Hoek, 1994; Hoek, Kaiser y Bawden, 1995, (Ver tabla 2))

- $a$  y  $s$ : Constantes del macizo rocoso

- $$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (14)$$

- $$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \quad (15)$$






**Tabla 2. GSI de macizos rocosos foliados y no foliados**

<p><b>CARACTERISTICAS DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR EL INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI)</b></p> <p>A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.</p>		CONDICION SUPERFICIE DE DISCONTINUIDAD	
ESTRUCTURA		DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE	
MACIZOS NO FOLIADOS	MACIZOS FOLIADOS	DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE	
 <p><b>INTACTO O MASIVO</b> macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación</p>	 <p><b>POCO FOLIADO</b> macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas</p>	90	N/A
 <p><b>NO FOLIADO/FRACTURADO</b> macizo rocoso poco perturbado consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas ortogonales de discontinuidades, muy bien unidos entre sí</p>	 <p><b>MODERADAMENTE FOLIADO</b> macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes</p>	70	N/A
 <p><b>NO FOLIADO/MUY FRACTURADO</b> macizo rocoso parcialmente perturbado consistente de bloques angulares unidos entre sí, formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades</p>	 <p><b>FOLIADO</b> macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas</p>	50	30
 <p><b>NO FOLIADO/PERTURBADO</b> macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de varios sistemas de discontinuidades</p>	 <p><b>MUY FOLIADO</b> macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas</p>	N/A	20
 <p><b>NO FOLIADO/DESINTEGRADO</b> macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente unidos entre sí</p>	 <p><b>BRECHADO/CIZALLADO</b> macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide,</p>	N/A	10

Fuente. M. Truzman, 2007

D es un factor que depende del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las excavaciones, *ver tabla 3*.

**Tabla 3.** Guías para estimar el factor de alteración D

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor <i>D</i> sugerido
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel</p>	<p><math>D = 0</math></p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante.</p> <p>Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.</p>	<p><math>D = 0</math></p> <p><math>D = 0.5</math> No invert</p>
	<p>Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.</p>	<p><math>D = 0.8</math></p>
	<p>Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.</p>	<p><math>D = 0.7</math> Good blasting</p> <p><math>D = 1.0</math> Poor blasting</p>
	<p>Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento.</p> <p>En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.</p>	<p><math>D = 1.0</math> Production blasting</p> <p><math>D = 0.7</math> Mechanical excavation</p>

**Fuente.** El criterio de rotura de Hoek-Brown - E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum - University of Minnesota, RocScience Inc.

El factor fue introducido en la última versión del criterio de rotura de Hoek&Brown (Hoek et al., 2002. Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, D. (ver tabla 3) porque se detectó que para el caso de macizos de rocas no alteradas (D=0), el criterio daba parámetros resistentes demasiado optimistas. El factor adopta valores desde 0 para la roca no alterada en condiciones in situ, hasta el valor de 1 para la roca muy alterada<sup>18</sup>.

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene haciendo  $\sigma_3' = 0$  en la ecuación (12), dando así:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} S^a \quad (16)$$

Y siendo la resistencia a tracción:

$$\sigma_t = -\frac{S \sigma_{ci}}{m_b} \quad (17)$$

La ecuación se obtiene haciendo  $\sigma_1' = \sigma_3' = \sigma_t$ , en la ecuación (12). Esto representa una condición de tensión biaxial.

Las tensiones normal y tangencial en función de las tensiones principales tienen la siguiente expresión (Balmer, 1952).

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cdot \frac{d\sigma_1' / d\sigma_3' - 1}{d\sigma_1' / d\sigma_3' + 1} \quad (18)$$

---

<sup>18</sup>EVERT, Hoek y CARRANZA, Carlos. Hoek-Brown Failure Criterion. Itasca Consulting Group Inc - Rocscience Inc., Toronto, Canada. 2002.

$$\tau = (\sigma_1' \sigma_3') \frac{\sqrt{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'}}}{\sqrt{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} + 1}} \quad (19)$$

$$\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} = 1 + am_b (m_b \sigma_3' / \sigma_{Ci} + s)^{a-1} \quad (20)$$

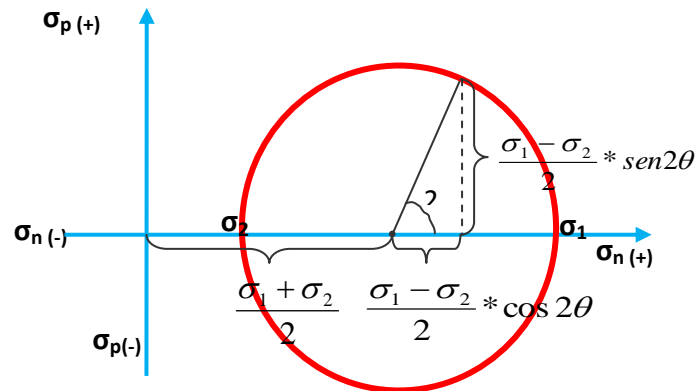
**2.6.3.2 Criterio de falla de Mohr – Coulomb.** Desarrollo hecho por Christian Otto Mohr (1835-1918). Desde hace mucho tiempo los círculos de Mohr han sido una forma de solución gráfica de la ecuación del esfuerzo cortante máximo y es útil para determinar los ángulos donde esas tensiones sean máximas. Generalmente la rotura se producirá para el caso de tensión principal máxima, mientras que la hipótesis de Coulomb se emplea para determinar la combinación de esfuerzo cortante y normal que causa una fractura del material.

El Círculo de Mohr muestra el ángulo de inclinación del plano ( $\theta$ ), y las magnitudes del esfuerzo de corte ( $\sigma_p$ ) y del esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) como se muestra en la *figura 13*,<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup>ANTICO, Federico y PEZZOTTI, Santiago. Círculo De Mohr: Para el cálculo de tensiones principales en el plano y el espacio. Universidad Nacional de La Plata. 2008.

**Figura 13.** Construcción del círculo de Mohr

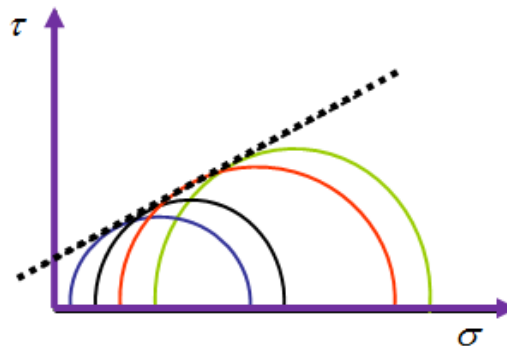


**Fuente.** Círculo De Mohr: Federico Antico Sr. Santiago Pezzotti - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata – 2008.

Para analizar el criterio de falla en el laboratorio se elaboran diferentes pruebas, para diferentes escenarios propuestos, posteriormente a los diferentes círculos de Mohr se traza una tangente a todos los círculos que es lo que se denomina envolvente de falla como se muestra en la *figura 14*. Esta envolvente de falla cumple con el criterio de Mohr-Coulomb que nos indica que la envolvente de falla va a depender de la cohesión del material (el punto de intersección con el eje cortante) y del coeficiente de fricción interna (pendiente de la recta envolvente)<sup>20</sup>.

<sup>20</sup>ANTICO, Federico y PEZZOTTI, Santiago. Círculo De Mohr: Para el cálculo de tensiones principales en el plano y el espacio. Universidad Nacional de La Plata. 2008

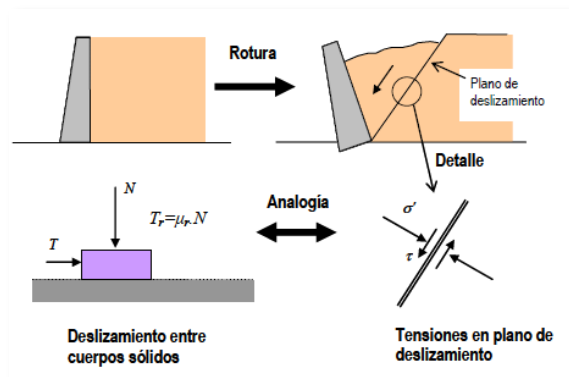
**Figura 14.** Envolvente de falla en diferentes pruebas para diferentes escenarios propuestos



**Fuente.** Círculo De Mohr: Federico Antico Sr. Santiago Pezzotti - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata – 2008.

**2.6.3.2.1 Criterio de Coulomb, cohesión y ángulo de rozamiento interno.** Los primeros estudios de la resistencia al corte de los suelos fueron realizados por Coulomb. En 1773 planteo, a partir de observaciones reales que las tierras situadas tras un muro de contención que vuelca se rompen por deslizamiento a lo largo de una superficie plana inclinada, como se muestra en la *figura 15*.

**Figura 15.** Deslizamiento tras un muro de contención. Observaciones de Coulomb.



**Fuente.** DEFORMABILIDAD Y RESISTENCIA DE LOS SUELOS. La resistencia de los suelos. Conceptos básicos. Grupo Geotecnia. Universidad de Cantabria.

La resistencia al deslizamiento a lo largo de este plano se evaluó según Coulomb, partiendo del hecho experimental de que el deslizamiento entre dos cuerpos sólidos se produce cuando la fuerza tangencial entre ellos alcanza un valor,  $T_r$ , proporcional a la fuerza normal,  $N$ , siendo la constante de proporcionalidad el denominado coeficiente de rozamiento entre ambas superficies,  $\mu_r$ <sup>21</sup>:

$$T_r = \mu_r N \quad (21)$$

Coulomb demostró que la resistencia al deslizamiento por unidad de superficie en un plano en el interior del suelo, se debe solo al rozamiento entre partículas, y debe ser por tanto proporcional a la presión normal actuante en dicho plano; el coeficiente de rozamiento lo expreso como tangente de un ángulo, que llamo ángulo de rozamiento interno del suelo,  $\phi$  :

$$\tau_r = \sigma' .tg \phi \quad (22)$$

En "tierras cohesivas", supuso Coulomb que podía haber otro sumando de valor constante e independiente de dicha presión normal, al que denomino cohesión,  $C$ . Así pues, la resistencia tangencial según un plano vendría dada en el caso general por:

$$\tau_r = c + \sigma' .tg \phi \quad (23)$$

**2.6.3.2.2 Formulación del Criterio de Mohr-Coulomb.** La ecuación (23) expresa la condición de deslizamiento a lo largo de un determinado plano, previamente conocido, como se muestra en la *Figura 16*. La situación no siempre es tan fácil, y el plano o planos de rotura pueden no ser conocidos a priori. Por ello, es preciso

---

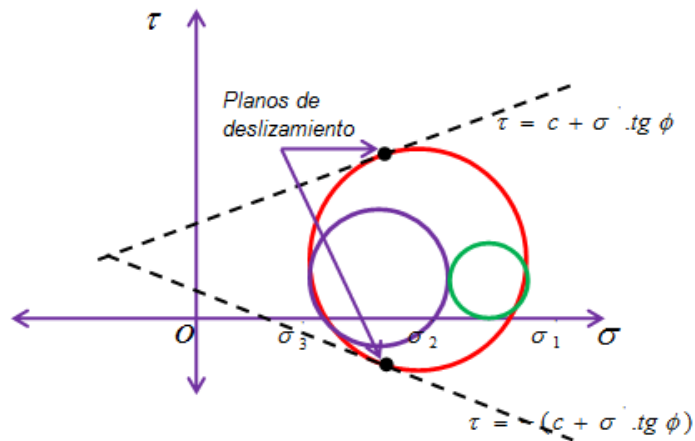
<sup>21</sup>DEFORMABILIDAD Y RESISTENCIA DE LOS SUELOS. La resistencia de los suelos. Conceptos básicos. Grupo Geotecnia. Universidad de Cantabria.

formular la condición de rotura en términos de las tensiones aplicadas según los ejes coordenados generales<sup>22</sup>.

En un elemento de suelo sometido a un cierto estado de tensiones, postulo Mohr (1882) que se produce la plastificación cuando en alguno de los planos que pasan por él, las tensiones alcanzan a cumplir la relación de la ecuación (23).

La condición de rotura resultante se conoce como criterio de Mohr-Coulomb, y se visualiza de forma clara usando el diagrama de Mohr, como se muestra en la *Figura 16*.

**Figura 16.** Diagrama de Mohr en tres dimensiones



**Fuente.** Deformabilidad y resistencia de los suelos. La resistencia de los suelos. Conceptos básicos. Grupo Geotecnia. Universidad de Cantabria.

Los puntos representativos de los planos que pasan por el punto  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  forman un recinto interior al círculo y exterior a los círculo  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  y  $(\sigma_2 - \sigma_3)$ .

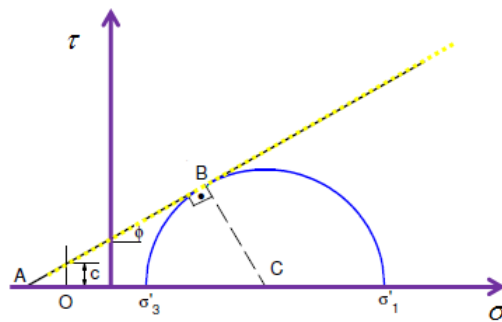
<sup>22</sup>DEFORMABILIDAD Y RESISTENCIA DE LOS SUELOS. La resistencia de los suelos. Conceptos básicos. Grupo Geotecnia. Universidad de Cantabria.

Los puntos representativos de los planos, en que se alcance la condición de falla, deben estar en el círculo exterior (ver figura 16).

La formulación del criterio de Mohr-Coulomb en términos de las tensiones principales se establece imponiendo la condición de tangencia del círculo exterior de Mohr con la línea de resistencia como se muestra en la *Figura 17*:

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - c \cdot \cos \phi - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \cdot \text{sen} \phi = 0 \quad (24)$$

**Figura 17.** Diagrama de Mohr en dos dimensiones. Condición de rotura



**Fuente.** Deformabilidad y resistencia de los suelos. La resistencia de los suelos. Conceptos básicos. Grupo Geotecnia. Universidad de Cantabria.

Expresada en esta forma, la condición de Coulomb es un criterio de plastificación. Como ya se ha dicho, la expresión del criterio de Mohr-Coulomb no depende de la tensión principal intermedia,  $\sigma_2$ .

El criterio de falla de Mohr-Coulomb, trabajado por primera vez por Coulomb en el año 1773, estudiando los suelos, es un criterio de rotura lineal. Esto significa, que la ecuación que define la superficie de fluencia es una ecuación lineal. Este criterio se sigue utilizando mucho por su sencillez y comodidad.

También es conocido como el criterio de fricción interna. Este predice que el material fallara si el esfuerzo cortante en un plano potencial de fractura excede el

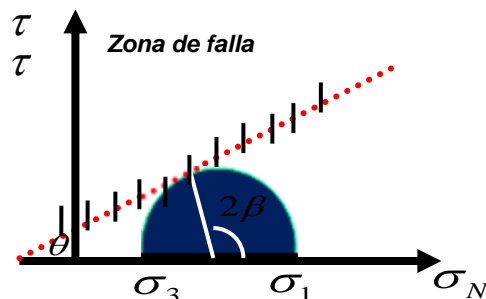
valor dado por el producto del esfuerzo normal y un coeficiente conocido como fricción interna más un cierto valor inicial:

$$|\tau| = \tau_0 - \eta\sigma \quad (25)$$

- $\tau$  : Esfuerzo de corte absoluto
- $\tau_0$  : Cohesión, es la medida de cementación de la roca y se utiliza para representar la resistencia al corte producido por la cementación.
- $\eta$  : Coeficiente de fricción interna, depende de varios factores como tamaño, forma y distribución de granos.

Al graficar la ecuación se formara una línea de fractura para un material particular. Donde  $\eta$  es la pendiente de la línea recta y es definida por  $\tan\phi = \eta$  y  $\tau_0$  es el punto de corte con la ordenada  $\tau$ . Donde además se muestra el ángulo  $2\beta$  el cual da la posición del punto de coincidencia del círculo de Mohr y la línea de falla (ver figura 18).

**Figura 18.** Diagrama del criterio de Mohr-Coulomb donde además se muestra el círculo de Mohr correspondiente a un estado de esfuerzos crítico.



**Fuente.** CORZO, Reinel y RINCON, Claudio. Medición y evaluación de la magnitud y dirección de los esfuerzos in-situ en campo. Tesis, Bucaramanga, 2004.

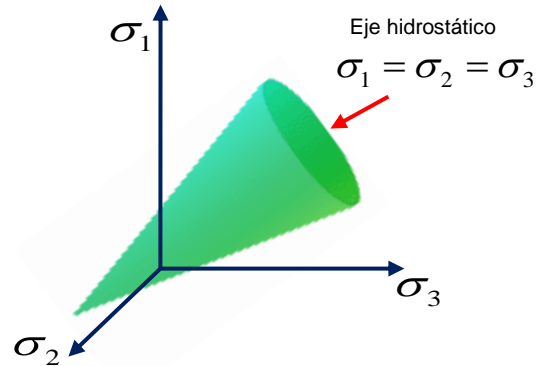
**2.6.3.3 Criterio de Drucker – Prager.** Se trata de un criterio perfectamente plástico desarrollado por Drucker y Prager (1952) para la simulación de materiales granulares y con el objetivo de mejorar el criterio de Mohr-Coulomb. Es un criterio que depende de la presión (Componente simétrico del tensor de esfuerzos), y permite calcular si un material ha fallado o se ha plastificado y se puede utilizar para simular el comportamiento de los materiales del suelo como arena y grava. Este criterio fue introducido en un primer momento para tratar la deformación en suelos. Más tarde, este criterio, y otros derivados de él, han sido aplicados a rocas, hormigón, espumas y otro tipo de materiales cuya plastificación depende de la tensión simétrica. Se conoce de la existencia de tres criterios de falla, extensamente aceptados en la mecánica de suelos, para los cuales pueden considerarse entre uno y dos parámetros que caracterizan la naturaleza de la roca deformable, entre ellos están el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) y la cohesión del material (C), los cuales son utilizados por los criterios de Mohr-Coulomb, mencionado anteriormente, el criterio de Drucker-Prager y el criterio Modificado de Lade, a tratar más adelante<sup>23</sup>.

El criterio de resistencia de Drucker-Prager, es esencialmente derivada de la ley de Mohr Coulomb y se escribe en términos de los esfuerzos y de los parámetros de resistencia (C,  $\phi$ ) y tiene en cuenta el efecto del esfuerzo principal intermedio. El estudio parte de la ley de resistencia al corte de Mohr-Coulomb escrita en términos de esfuerzos principales, que luego con la ayuda de los esfuerzos desviados permite encontrar la función de fluencia y de potencial plástico. El criterio de Drucker-Prager es similar al de Mohr-Coulomb con la salvedad de que la superficie de fluencia adopta una forma “redondeada” para evitar la aparición de aristas como se puede ver en la *figura 19*.

---

<sup>23</sup>D. GALLEGO, Eutiquio. Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with-elastic material models. Tesis, Madrid. 2006.

**Figura 19.** Criterio de Drucker-Prager



**Fuente.** D. GALLEGO, Eutiquio. Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with-elastic material models. Tesis, Madrid. 2006.

La ecuación que modelo el criterio de Drucker Prager es:

$$\tau_{oct} = \tau_o + m \cdot \sigma'_{oct} \quad (26)$$

$T_0$  y  $m$ : Parámetros característicos del tipo de roca (adimensionales) y son análogos a la Cohesión del material y el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) definidos en el criterio de Mohr – Coulomb. Los rangos de  $\phi$  varían de  $90 \geq \phi \geq 0$  y  $C \geq 0$ .

$$\sigma'_{oct} = \frac{1}{3} (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (27)$$

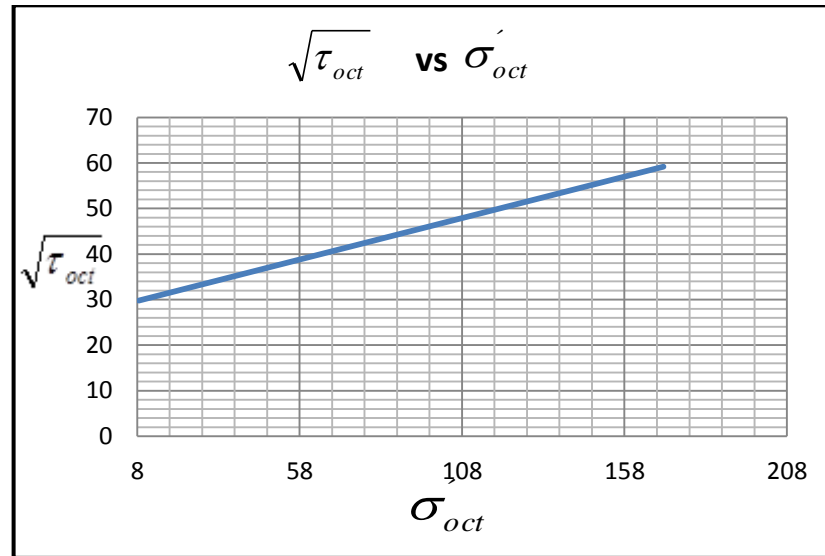
$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2} \quad (28)$$

$$\tau_o = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (29)$$

$$m = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (30)$$

La figura 20, modela este comportamiento es el siguiente donde el ángulo de la pendiente es el ángulo de fricción interna  $\phi$ .

**Figura 20.** Criterio de Drucker-Prager en 2D

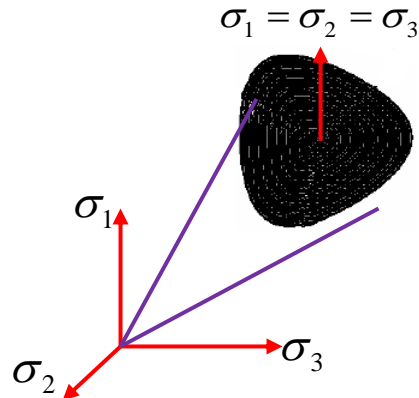


Fuente. Autores

**2.6.3.4 Criterio Modificado de Lade.** El criterio de falla Modificado de Lade es un criterio de fractura de roca 3D propuesto por Ewy, la cual es una modificación del criterio elastoplástico desarrollado por Lade (1977) para el caso de suelos sin cohesión y supone la existencia de un endurecimiento isotrópico tal y como se observa en la figura 21.<sup>24</sup>

<sup>24</sup>Russell T. Ewy. Wellbore-Stability Predictions by Use of a Modified Lade Criterion. Paper SPE 56862, 1999.

**Figura 21.** Criterio de Lade



**Fuente.** D. GALLEGO, Eutiquio. Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with-elastic material models. Tesis, Madrid. 2006.

La ventaja de este criterio en comparación con el criterio de Mohr-Coulomb y Drucker -Prager es que describe correctamente el efecto del esfuerzo principal intermedio para la resistencia de la roca, y en cuanto al análisis de estabilidad del pozo, produce resultados más realistas. Para este criterio tener sólo dos parámetros de resistencia de la roca, como la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna ( $\varphi$ ) será suficiente.

Describe correctamente la influencia del esfuerzo principal intermedio en la resistencia de la roca, y por tanto en la estabilidad del pozo, puede ser reorganizado para dar una solución al peso del lodo crítico, para cualquier orientación del pozo<sup>25</sup>.

La ecuación matemática representada por este modelo es<sup>26</sup>:

$$\frac{(I_1'')^3}{I_3''} = 27 + \eta \quad (31)$$

<sup>25</sup>Russell T. Ewy. Wellbore-Stability Predictions by Use of a Modified Lade Criterion. Paper SPE 56862, 1999.

<sup>26</sup> Petroleum Related Rock Mecchanics 2<sup>nd</sup> edition, E. FJAER, RM, HOLT,P. HOURSRUDA.MRAAEN Y R.RISNES

$$I'_1 = (\sigma_1 + S_1) + (\sigma_2 + S_1) + (\sigma_3 + S_1) \quad (32)$$

$$I'_3 = (\sigma_1 + S_1)(\sigma_2 + S_1)(\sigma_3 + S_1) \quad (33)$$

$$S_1 = \frac{c}{\tan \phi} \quad (34)$$

$$\eta = 4 \tan^2 \phi \frac{9-7 \sin \phi}{1-\sin \phi} \quad (35)$$

$I'_1$  = Primera Invariante de esfuerzo

$I'_3$  = Tercera Invariante de esfuerzo

$\eta$  = Parámetro del material relacionado con la fricción

$S_1$  = Parámetro del material. Cohesión

### 3. APLICACIÓN PRÁCTICA SEGÚN CADA CRITERIO DE FALLA

En este capítulo se describen ejemplos de la literatura de cada uno de los criterios de falla, con el fin de identificar aquellos parámetros que influyen notoriamente en estos criterios y así identificar su aplicabilidad en la industria del petróleo.

Se estudiaron tres ejemplos específicos de diferentes lugares, los cuales se nombraron como casos de estudio.

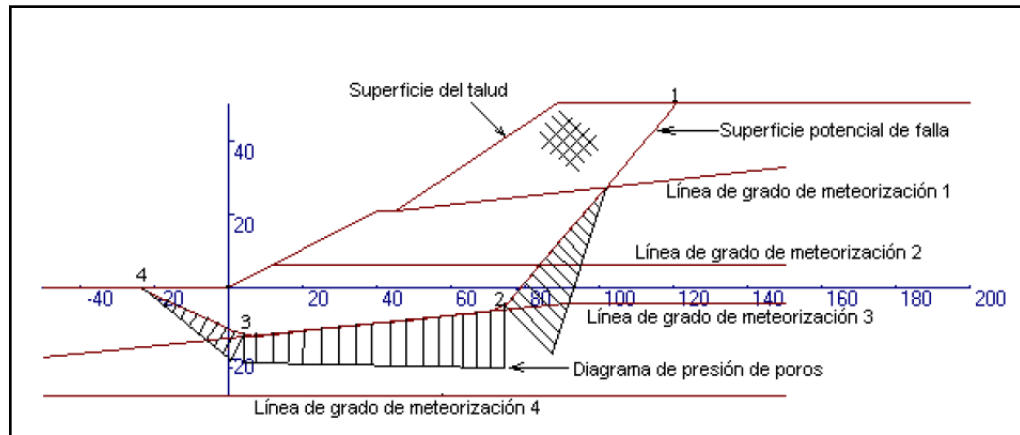
#### 3.1 CASO ESTUDIO 1: Aplicación práctica. Criterio de falla Hoek y Brown.<sup>27</sup>

**3.1.1 Perfil geológico.** La *figura 22*, se muestra el perfil de un macizo rocoso, formado por cuatro paquetes de arenisca diferenciados por el grado de meteorización. El macizo rocoso se caracterizó por los parámetros (m, s) de Hoek y Brown (1980), conjuntamente con el índice geomecánico (GSI). Este problema fue resuelto por Rojas y Ucar (2001), pero en ese momento el material se caracterizó con los parámetros C y  $\phi$ .

---

<sup>27</sup>Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes – Facultad de Ingeniería – Escuela de Civil. Venezuela.

**Figura 22.** Perfil del macizo rocoso, indicando la definición geométrica del talud, de la superficie potencial de falla, de las líneas de estratificación y de la presión de poros considerada



**Fuente.** Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes-Facultad de Ingeniería-Escuela de Civil. Venezuela.

Se ha considerado que a lo largo de la Superficie Potencial de Falla, actúa una presión de poros que comienza a partir de cierta cota y la cual decrece con la profundidad, tomando en cuenta que al pie del talud debe presentarse cierta descarga hacia la cara del mismo, tal como se indica en la figura. Las características geomecánicas del macizo rocoso se presentan en la *tabla 4*<sup>28</sup>.

<sup>28</sup>Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes – Facultad de Ingeniería – Escuela de Civil. Venezuela.

**Tabla 4.** Características geomecánicas del macizo rocoso

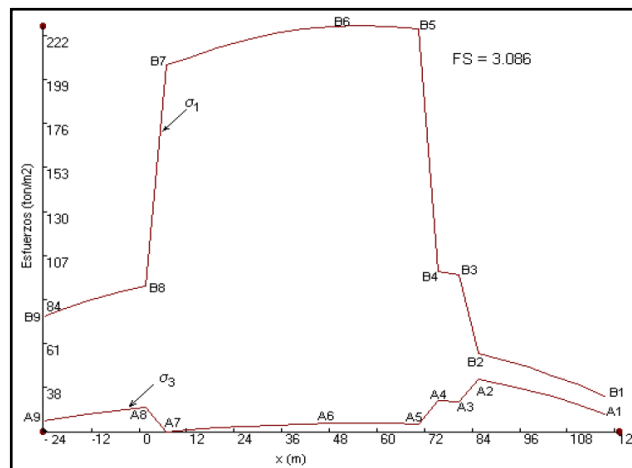
Estrato	GSI	m	s	$\gamma_h$ (ton/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (ton/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (ton/m <sup>2</sup> )
1	26,00	0,0070	0,0000	1,96	2,00	500,00
2	26,00	0,0040	0,00001	1,86	1,95	1000,00
3	37,50	0,1400	0,0001	2,11	2,20	1000,00
4	50,00	0,7000	0,0040	2,00	2,30	2000,00

**Fuente.** Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes. Venezuela.

**3.1.2 Resultados.** Los resultados de este estudio aplicando la metodología propuesta en este trabajo por el criterio de falla Hoek y Brown, se presenta en las *figuras 23, 24 y 25*.

La *figura 23* muestra la variación de los esfuerzos principales a lo largo de la SPF, donde se observa que el mayor esfuerzo desviador ocurre en el tramo (2-3) de la Superficie Potencial de Falla, donde existe la más alta resistencia al corte, tal como lo ilustra la envolvente 3, en la *figura 25*

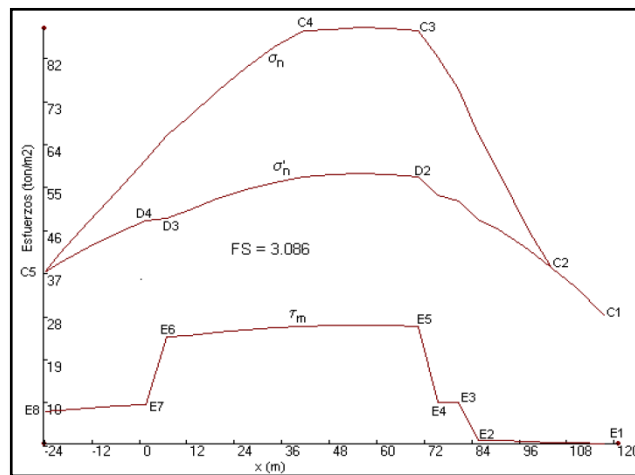
**Figura 23.** Variación de los esfuerzos principales a lo largo de la S.P.F



**Fuente.** Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes. Venezuela.

En la *figura 24*, se tiene la distribución de los esfuerzos normales totales, normales efectivos y tangenciales. Con los parámetros de resistencia calculados y presentados en la *figura 25*.

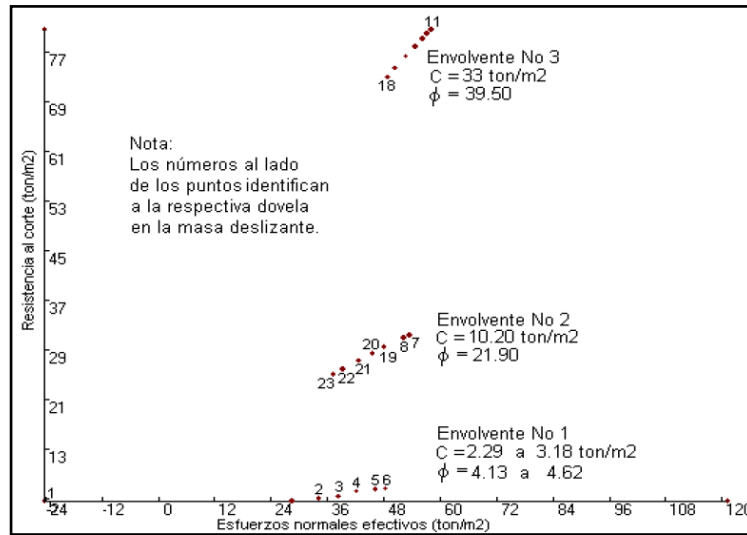
**Figura 24.** Distribución de los esfuerzos normales totales, normales efectivos y tangenciales movilizados, a lo largo de la S.P.F.



**Fuente.** Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes. Venezuela.

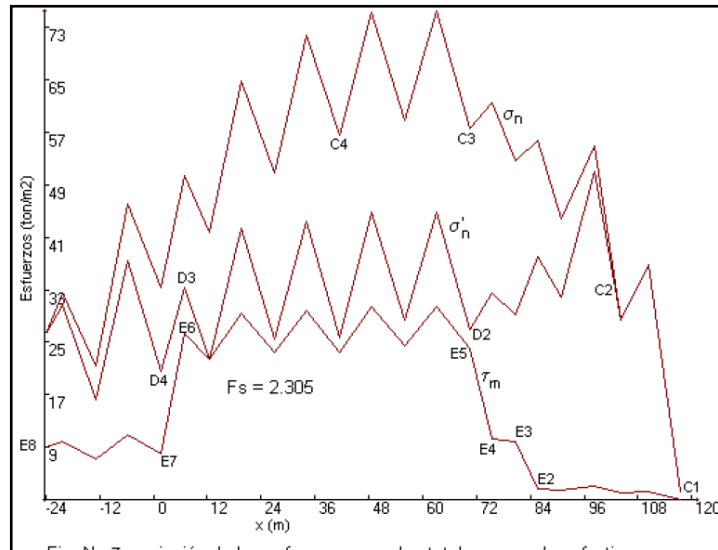
Se calculó del factor de seguridad aplicando el método de Leshchinsky y Huang (1992) y donde Rojas (1994) ha hecho algunas pequeñas sugerencias. A través de este procedimiento se obtuvieron los valores de esfuerzo que se muestran en la *figura 26*, para un FS = 2,305.

**Figura 25.** Envoltente de resistencia al corte de Mohr-Coulomb



**Fuente.** Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes. Venezuela.

**Figura 26.** Variación de los esfuerzos normales totales, normales efectivos y tangenciales movilizados a lo largo de la S.P.F.

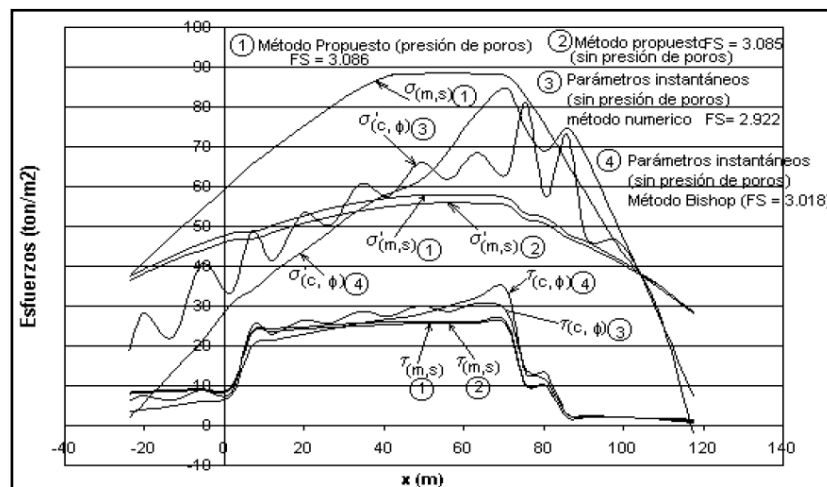


**Fuente.** Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes. Venezuela.

Se puede observar que el valor de FS que resulta, cuando la solución se hace por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb (FS = 2,305) es menor del valor obtenido a través del criterio de falla de Hoek y Brown (1980) (FS = 3,086). La diferencia en los valores del factor de seguridad, indican que ambas teorías, no tienen ninguna coincidencia y por consiguiente no se puede hablar que la metodología aquí desarrollada es menos conservadora, sino que sencillamente los criterios serán menos o más sensibles a ciertos factores. Uno de estos factores es el agua, el cual tiene gran influencia en los resultados obtenidos a través del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, teniendo poco efecto en el del factor de seguridad, cuando se aplica el criterio de falla de Hoek y Brown (1980).

La *figura 27*, refleja lo comentado anteriormente, en cuanto a que la presión de poro no afecta la resistencia al corte y la distribución de esfuerzos efectivos, cuando se aplica el criterio de rotura de Hoek y Brown (1980). Sin embargo, podemos ver como incrementó el factor de seguridad y el nivel de esfuerzos cuando se trabaja con los parámetros (C,  $\phi$ ), donde no estuvo presente la presión de poros.

**Figura 27.** Comparación de la distribución de esfuerzos obtenido por diferentes métodos. Con presión de poros y sin presión de poros.



**Fuente.** Rojas G y Silvio H. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN MACIZOS ROCOSOS APLICANDO EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK Y BROWN. Universidad de Los Andes. Venezuela.

Se debe ver con cuidado el criterio de rotura de Hoek y Brown, por cuanto tendrá mejor aplicación a un macizo rocoso con alta frecuencia de discontinuidades, de tal forma que el mismo tenga la suficiente capacidad de drenaje.

### 3.2 CASO ESTUDIO 2: Aplicación práctica. Criterio de falla Drucker-Prager<sup>29</sup>.

El criterio de falla Drucker-Prager se aplicó en una formación de arenisca del yacimiento de Cyrus en el Continente de Reino Unido. Tabla 5 se muestra las características geomecánicas del macizo rocoso determinadas en ensayos triaxiales de una arenisca de esta formación. Este formación fue normalmente presionada (0,45 psi / ft gradiente de presión de poro) a una profundidad de alrededor de 8580 pies. El criterio de Drucker-Prager predice densidades de colapso en el intervalo de 5,0 a 8,2 lbm / gal, mientras que el criterio de Mohr-Coulomb predice densidades de colapso en el intervalo de 9,0 a 11,3 lbm / gal. La diferencia en la densidad de colapso, predicha por los dos criterios de falla, es realmente significativa en cualquier ángulo inclinación.

**Tabla 5.** Características geomecánicas del macizo rocoso. *Formación Cyrus*

Formation	$S_0$ (psi)	$\phi$ (deg.)	$\nu$	$\sigma_v$ (psi/ft)	$\sigma_H$ (psi/ft)	$\sigma_h$ (psi/ft)	Depth (ft)	Pore-pressure ((psi/ft)
Cyrus	860	43.8	0.20	1.0	0.75	0.75	8580	0.450

**Fuente.** Ali A. Garrouch, SPE, and Abdullah S. Ebrahim, SPE. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS POZOS INCLINADOS. California. 2001.

Exploración y desarrollo de pozos perforados en este campo demostraron que el pozo se perforó con éxito con un lodo base aceite de densidad de 9.6 lbm / gal tanto para pozos verticales como horizontales. Esta densidad del lodo es un límite superior, puesto que ningún pozo fallo, esto se observó durante perforaciones en

<sup>29</sup>Ali A. Garrouch y Abdullah S. Ebrahim. Evaluación de la estabilidad de los pozos inclinados. SPE California. 2001.

el yacimiento. Es posible, por lo tanto, que densidades más bajas de lodo pudieron haber sido utilizadas. Estos resultados muestran que el criterio de Mohr-Coulomb es más conservador que el criterio de Drucker-Prager. Este campo evidencia y puede sugerir que el criterio de Drucker-Prager proporciona predicciones más cercanas desde las condiciones reales de roca, el criterio Mohr-Coulomb requeriría significativamente densidades de lodo más altas que 9.6 lbm / gal, actualmente utilizada esta densidad para la perforación de pozos horizontales.

**3.3.1 Simulaciones de comportamiento de esfuerzo en litologías de rocas.** Las simulaciones realizadas para las dos densidades, densidad de colapso y densidad de fractura del fluido, se realizaron para una arenisca consolidada, areniscas arcillosas, y las formaciones de rocas de carbonato a la misma profundidad vertical de 9000 pies, y para el mismo gradiente de presión de poro de 0,465 psi / ft. La elección de las propiedades mecánicas de la roca puede hacer una profunda diferencia en los resultados modelados en la estabilidad del pozo. Formaciones de roca caliza fueron, por lo tanto, consideradas con una resistencia cohesiva superior de la roca y el ángulo de fricción de una formación de arenisca consolidada que cuenta con valores más altos que una roca de arenisca arcillosa. La *tabla 5* muestra las propiedades mecánicas de las rocas de los casos simulados.

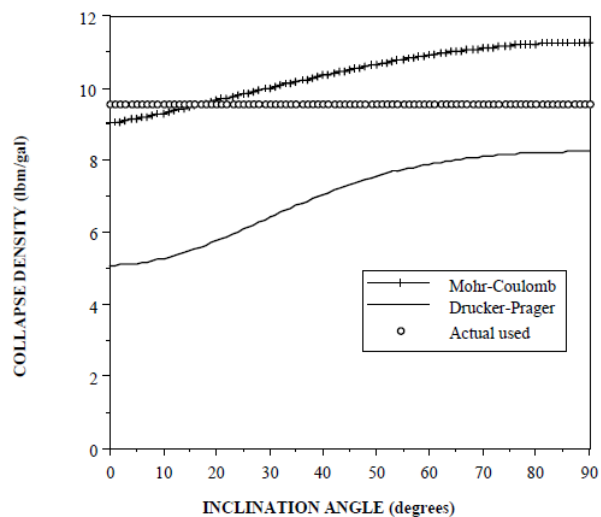
Los esfuerzos in situ medidos en diversas partes del mundo, parecen revelar que los rangos de  $\sigma_H / \sigma_h$  son de 1 a 2, y  $\sigma_h / \sigma_v$  oscila entre 0,3 a 1,5 para las profundidades típicas del yacimiento de 3000 m, valores de esfuerzos mínimo, máximo horizontal, y esfuerzo de sobrecarga fueron elegidos de acuerdo (Tabla 5).

Los resultados de estas simulaciones se muestran en la *figura 29* a través de la *figura 32*. Como se muestra en la *figura 29*, la densidad de colapso del fluido para la formación simulada de roca caliza es menor que el de una formación de

arenisca consolidada, que es a cambio más pequeño que el de una formación de arenisca lutítica. Esto implica que formaciones de roca caliza son en general más estables que las arenas consolidadas y formaciones arcillosas de roca arenisca. En estas condiciones simuladas, las tres litologías parecen compartir el mismo umbral del ángulo de inclinación de aproximadamente 20° por encima de la tasa de cambio de la densidad de colapso con respecto al ángulo de inclinación, se incrementa significativamente.

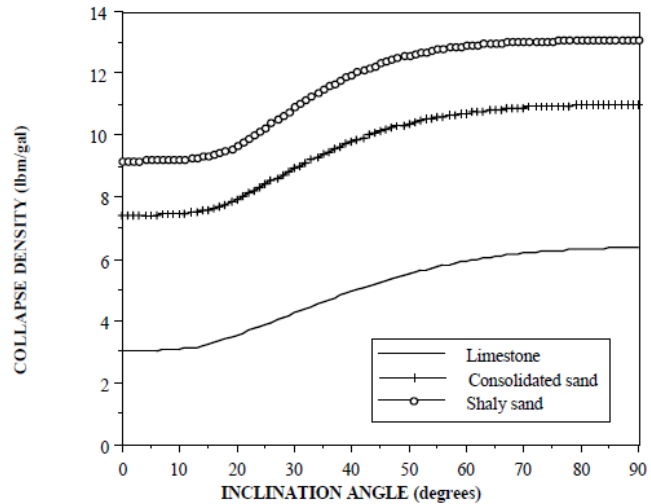
La densidad de colapso sigue aumentando hasta un ángulo de inclinación de 60°. Por encima de este valor, las tres litologías no parecen requerir aumentar la densidad de lodo para evitar el colapso del pozo. Estas conclusiones son sin embargo, ciertas para un régimen de esfuerzo normal. En un régimen de esfuerzos de rumbo tanto la roca arenisca y formaciones arcillosa de arenisca se encuentra inestables, simulando las condiciones paramétricas de profundidad, la presión de poro y propiedades mecánicas de la roca (ver tabla 5).

**Figura 28.** Predicción de colapso densidad del fluido Vs el ángulo de inclinación para el campo Cyrus



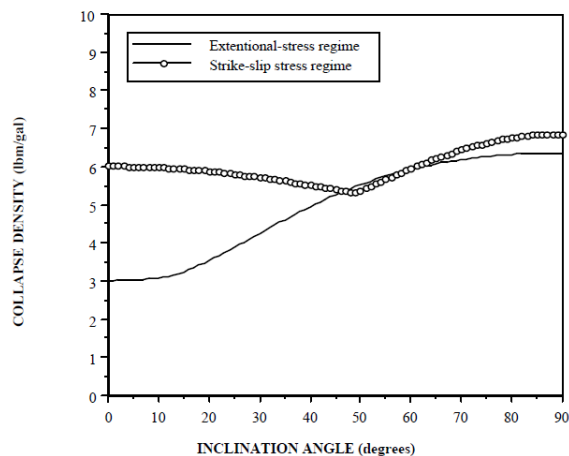
**Fuente.** Ali A. Garrouch, SPE, and Abdullah S. Ebrahim, SPE. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS POZOS INCLINADOS. California. 2001.

**Figura 29.** Densidad de colapso Vs ángulo de inclinación para tres litologías simuladas, sometidas un régimen de esfuerzo extensional usando el criterio de falla de Drucker-Prager.



**Fuente.** Ali A. Garrouch, SPE, and Abdullah S. Ebrahim, SPE. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS POZOS INCLINADOS. California. 2001.

**Figura 30.** Densidad de colapso Vs ángulo de inclinación para la formación caliza simulada, sometidas a un régimen de esfuerzo extensional y de desgarre, usando el criterio de falla de Drucker-Prager.



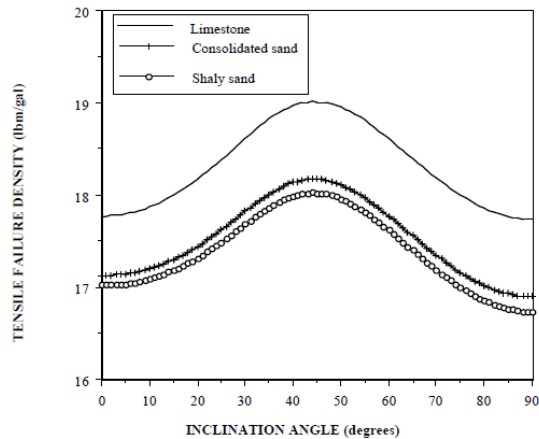
**Fuente.** Ali A. Garrouch, SPE, and Abdullah S. Ebrahim, SPE. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS POZOS INCLINADOS. California. 2001.

Se ha comprobado que estas simulaciones de pozos perforados en un régimen de esfuerzo normal, son más estables cuando se perfora con un ángulo azimut con respecto al eje horizontal de la tensión máxima de  $90^\circ$ , paralelo al esfuerzo horizontal mínimo, es decir, mientras que pozos perforados en un régimen de esfuerzos de rumbo fueron más estable cuando se perfora con un ángulo de azimut con respecto al eje de máxima tensión horizontal de  $0^\circ$ , es decir, paralela al esfuerzo horizontal máximo. En general, las tres litologías parecían ser más estables en un régimen de esfuerzo normal que a un régimen de esfuerzos inverso.

La formación caliza, sin embargo, requiere una mayor densidad del fluido en un régimen de esfuerzo de rumbo, que en un régimen de esfuerzo normal donde se evita el colapso del pozo (*figura 30*). La diferencia en la densidad del fluido es especialmente pronunciada para una ventana de ángulo de inclinación que abarca de  $0$  a  $40^\circ$ . El criterio de falla de Mohr-Coulomb ha sido verificado para estas tres litologías simuladas para predecir mayores densidades de colapso que el criterio de Drucker-Prager.

La *Figura 31* muestra las densidades de lodo en la que se produce la falla, esto como una función del ángulo de inclinación para las tres litologías simuladas. El comportamiento de la falta de tensión la densidad parece llevar a cabo una forma de anticlinal, alcanzando un ángulo máxima de inclinación de un poco más de  $40^\circ$ . Las cimas de estos anticlinales que corresponden a la forma más segura a la falla de tensión con densidades que parece corresponder a una ventana con inclinación angular que se extiende desde aproximadamente  $20$  a  $60^\circ$ . Este es la misma ventana para que la tasa de cambio de densidades de colapso con respecto al ángulo de inclinación sea notablemente mayor. Los resultados de las *Figuras 31 y 29* combinados sugieren que para esta ventana el ángulo de inclinación es de  $20$  a  $60^\circ$ .

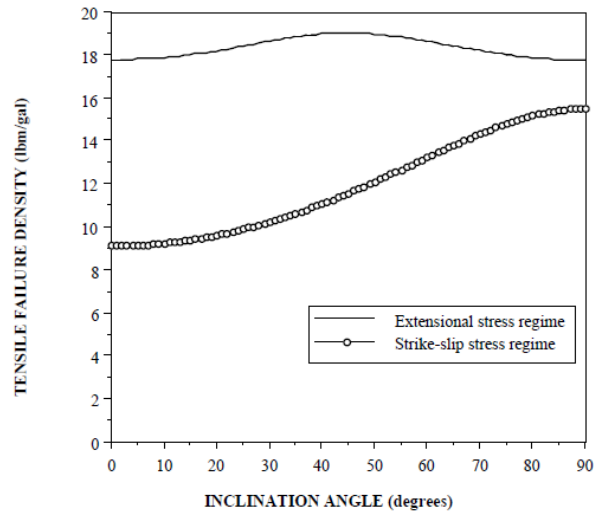
**Figura 31.** Densidad falla de tensión Vs ángulo de inclinación para tres litologías simuladas, sometidas a un régimen de esfuerzo extensional usando el criterio de falla de Drucker-Prager.



**Fuente.** Ali A. Garrouch, SPE, and Abdullah S. Ebrahim, SPE. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS POZOS INCLINADOS. California. 2001.

Como se muestra en la *figura 32*, para el régimen de esfuerzo de rumbo, las densidades de falla de tensión son muy inferiores a la impuesta en un régimen de esfuerzos normal de todos los ángulos de inclinación. Estos resultados sugieren que las formaciones sometidas a un régimen de esfuerzos normal son menos vulnerables a la falta de tensión que esas formaciones sometidas a un régimen de esfuerzos de falla inversa.

**Figura 32.** Densidad falla de tensión para la formación de caliza simulada, sometida a un régimen de esfuerzo extensional y de desgarre usando el criterio de falla de Drucker-Prager.



**Fuente.** Ali A. Garrouch, SPE, and Abdullah S. Ebrahim, SPE. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS POZOS INCLINADOS. California. 2001.

El análisis de estabilidad pozo depende del régimen de esfuerzos in-situ, la presión de poro, la densidad del lodo y de parámetros de resistencia. La estimación exacta y precisa de estos parámetros es necesaria para obtener muy buenas predicciones. Los resultados presentados aquí se aplican a las rocas isotropas que son elásticas lineales hasta el punto de falla. En formaciones reales, las rocas pueden presentar un comportamiento plástico. Para medios porosos elastoplásticos, el campo de tensiones alrededor de un pozo se ha demostrado que es menor que la predicción basada en modelos lineales elásticos.

Los resultados de los criterios de falla tanto el de Mohr-Coulomb como el de Drucker-Prager, se compararon con respecto a la estimaciones de densidad del fluido de perforación en el que el pozo colapsaría, mostrando que el criterio de falla de Mohr-Colulomb sobreestima las densidades del lodo requeridas para prevenir el colapso del pozo, mientras que el análisis de algunos casos de campos

sugiere que el criterio de Drucker-Prager imita rendimientos de densidades de colapso a necesidades reales.

### **3.3 CASO ESTUDIO 3:** Aplicación práctica. Criterio de falla Mohr-Coulomb y Modificado de Lade<sup>30</sup>.

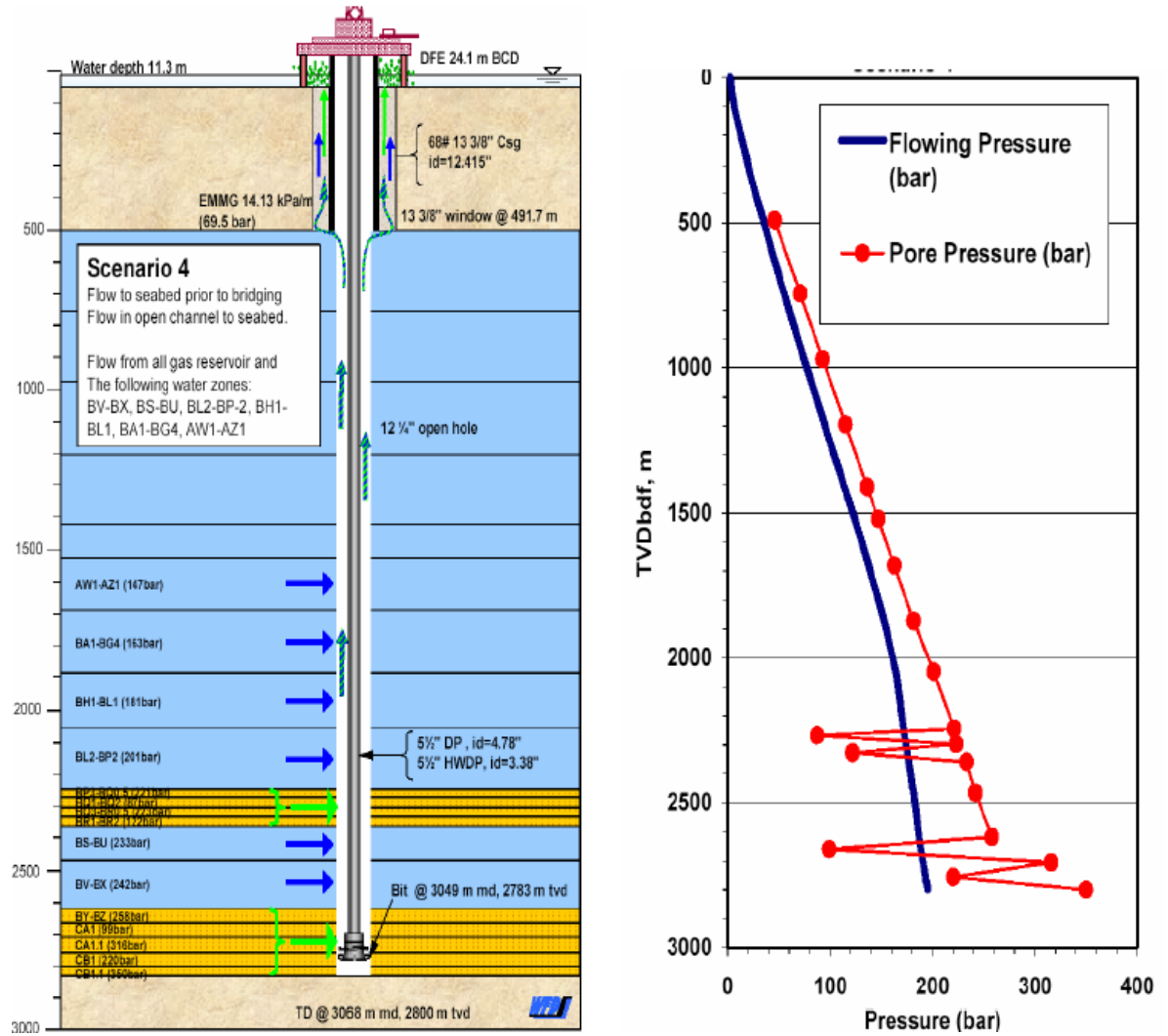
**3.3.1 Antecedentes.** La consultora en ingeniería John Wright (JWCO) proporciono los datos para esta investigación, de un campo donde ocurrió un reventón (blowout) de uno de los pozos. Los datos disponen el escenario del reventón antes del bridging (puenteo ver *figura 33*), el ruido y los registros de temperatura a lo largo del pozo (ver *figura 34*). Los registros de rayos gamma en ese informe indican algunos puentes (bridging) detrás de la tubería son de alrededor 1000 m de profundidad vertical verdadera (TVD) en la parte superior de las primeras arenas gasíferas son de alrededor 2200mTVD, y otro tapón (plug) dentro de la profundidad de 2670 a 2680mTVD.

El reventón del pozo (SWA-184 ST1) fue el primer sidetrack de un pozo productor. El operador trabajo con una ventana de lodo a 490 m TVD y perforo a 12 ¼ in, la ventana del pozo está a una profundidad actual verdadera (TD) de 3068 m de la profundidad medida (MD) y 2800 m TVD (ver *figura 3*). El ángulo de inclinaciones de 26,3° y el azimut del pozo es - 293°.

---

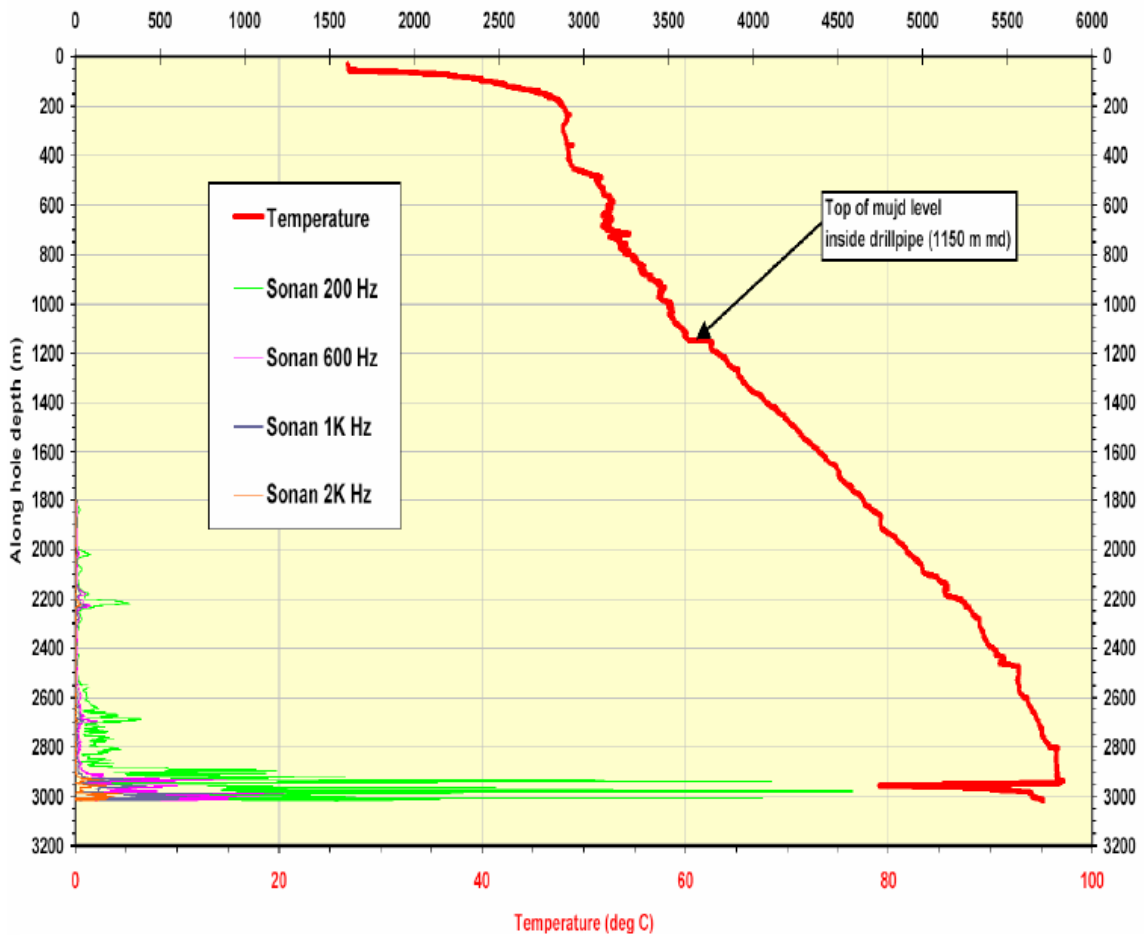
<sup>30</sup>NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

**Figura 33.** Definición de escenarios y simulación de la presión de fondo fluyendo



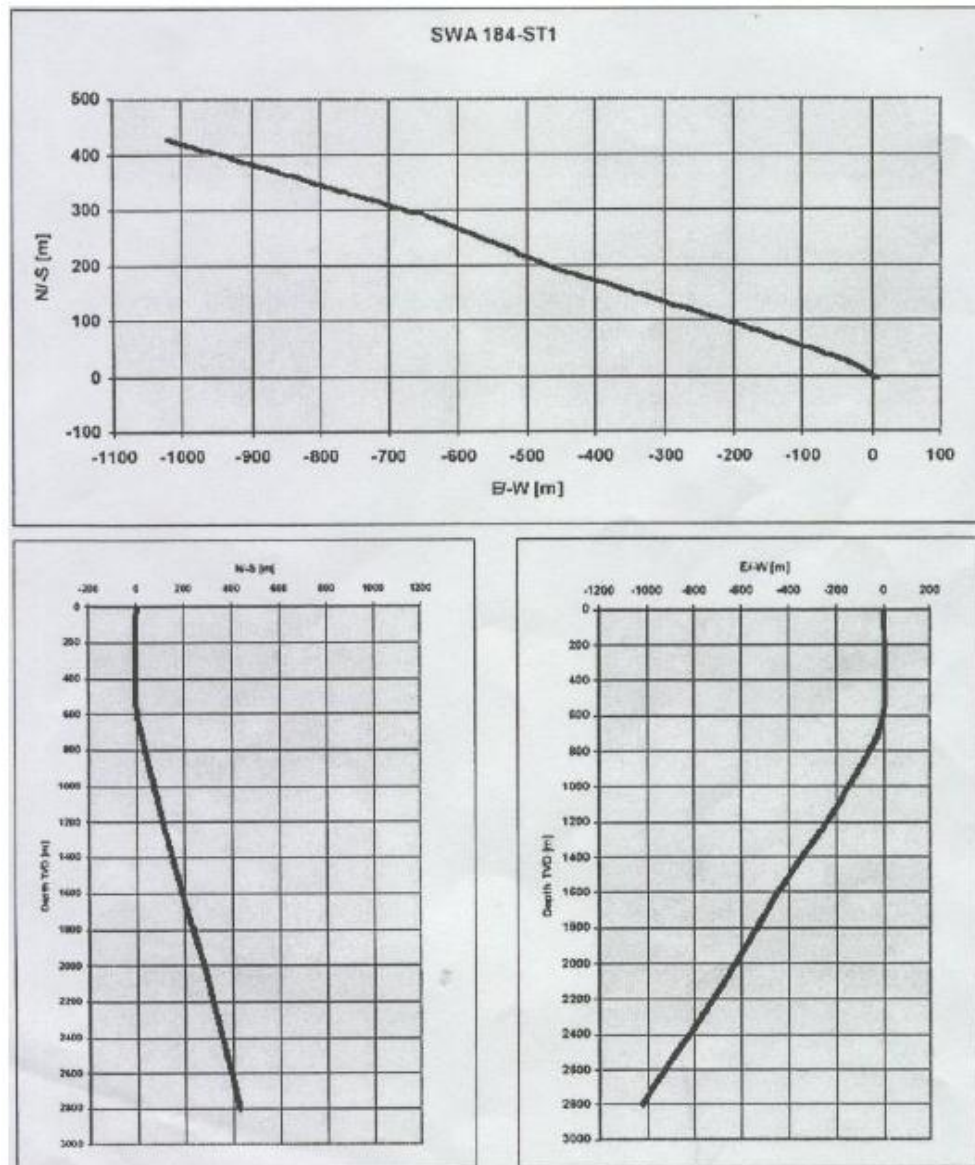
**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

**Figura 34.** Temperatura y registro sónico a lo largo de la profundidad del pozo.



**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

**Figura 35.** Trayectoria del Pozo SWA 184-ST1.



**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

El pozo hizo un reventón de gas a 2,800 m TVD. Después de tratar de circular por fuera de la patada, el operador observa una fuga de gas alrededor del casing y vio brotar gas a la superficie por debajo de la plataforma.

JWCO utilizado el simulador OLGA2000 para investigar y simular la explosión. Ellos usaron la curva de desempeño de la afluencia del yacimiento como condición de entrada y seleccionaron el fondo marino como la condición de frontera del sistema y la presión de fractura en el zapato (491 m TVD) para alguno de los casos.

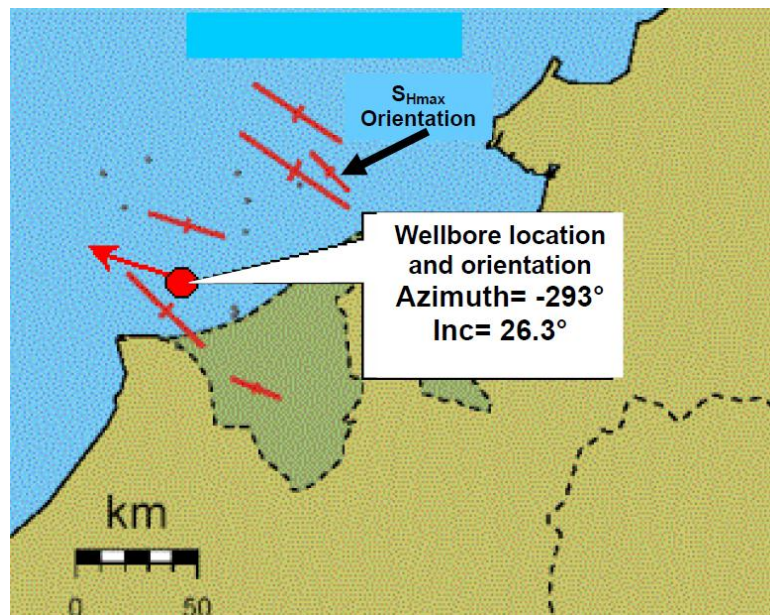
Las observaciones mostraron un buen lavado desde el zapato del casing hasta la superficie. Por lo tanto, el escenario con paso de flujo abierto fue seleccionado como escenario realista (*ver figura 33*). Este escenario supone que el sistema tiene restricciones muy bajas para hacer cualquier cambio de presión significativo desde el zapato del casing hasta el fondo del mar.

**3.3.2 Simulación del puenteo (Bridging) del pozo: Modelo geomecánico.** En general un modelo geomecánico consta de la magnitud y orientación de los tres esfuerzos principales, la presión de poro y la fuerza compresiva uniaxial de la roca. Para analizar el *bridging* del pozo se construyó un modelo geomecánico adecuado para este caso con cuatro subprogramas principales que se muestran a continuación: el primero está relacionado con los esfuerzos in-situ del campo que actúan en la región del pozo. El segundo es un módulo computacional que calcula el perfil de la presión del fluido a lo largo del pozo. El tercero ha sido diseñado para determinar las propiedades de la formación en el intervalo de tiempo transitorio sónico, y el cuarto ha sido creado para integrar los tres módulos previos en una simulación *bridging*. Como dato de entrada en los cálculos, se utilizó los datos específicos del pozo como TVD, presión de poro, inclinación y ángulo entre

**3.3.3 Esfuerzos in-situ de campo.** En pozos desviados donde no es posible determinar la dirección del esfuerzo máximo horizontal directamente desde el azimut geográfico de fallas observadas, un nuevo modelo es necesario. Sin embargo, en este caso los esfuerzos in-situ de campo se calcula a partir de los

datos obtenidos de la data del campo Brunei. Esta región tiene un régimen de esfuerzo normal con un esfuerzo vertical máximo y un alto nivel de anisotropía en todo el campo, con el máximo esfuerzo horizontal orientado en la dirección de  $314^\circ$ . Por lo tanto, el ángulo entre el pozo y la dirección del esfuerzo máximo es de  $21^\circ$ . La orientación de los esfuerzos in-situ en el campo se muestra en la *figura 36*.

**Figura 36.** Orientación de esfuerzos in-situ y la ubicación del pozo.



**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

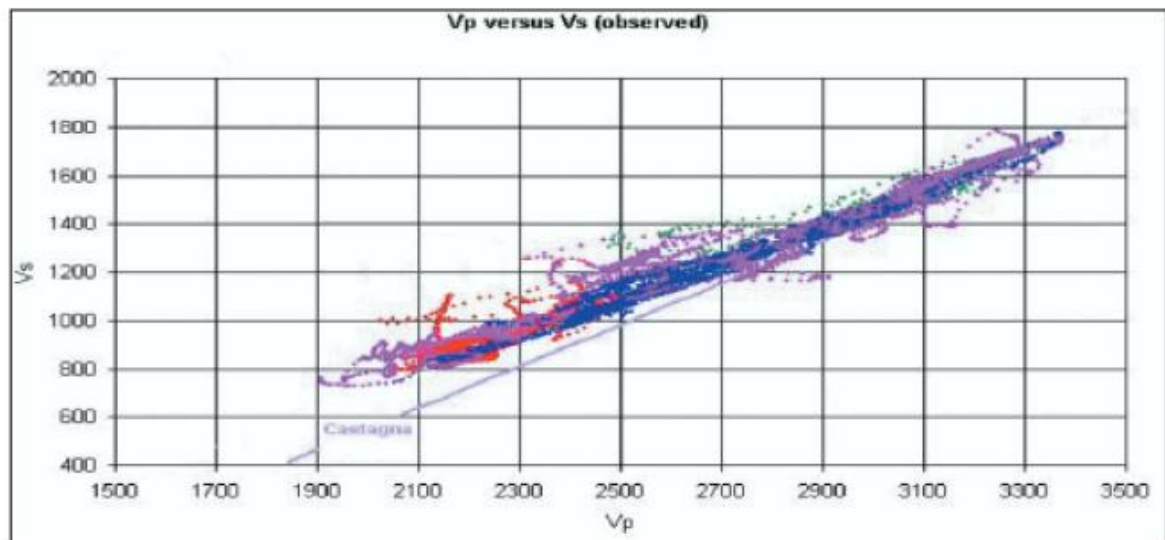
El gradiente del esfuerzo vertical cambia entre 0,8 y 1,05 psi/ft. Por el esfuerzo horizontal mínimo, se usó una correlación desarrollada por Breckels and Eekelen de 15 pruebas de fracturamiento hidráulico para la producción del campo. Todos estos datos se obtuvieron de pruebas minifracturadas realizadas específicamente para determinar los niveles de esfuerzos, en lugar de los tratamientos de estimulación a gran escala. Se ajustó la presión de poro.

Por lo general, después de que el azimut del esfuerzo horizontal máximo está determinado, se puede utilizar el azimut para verificar y luego limitar la magnitud del esfuerzo horizontal máximo utilizando tanto el breakouts del pozo y

perforaciones inducidas por observaciones de fractura. Sin embargo, en este estudio debido a la anisotropía, se asumió que la magnitud del esfuerzo horizontal máximo es igual al esfuerzo vertical.

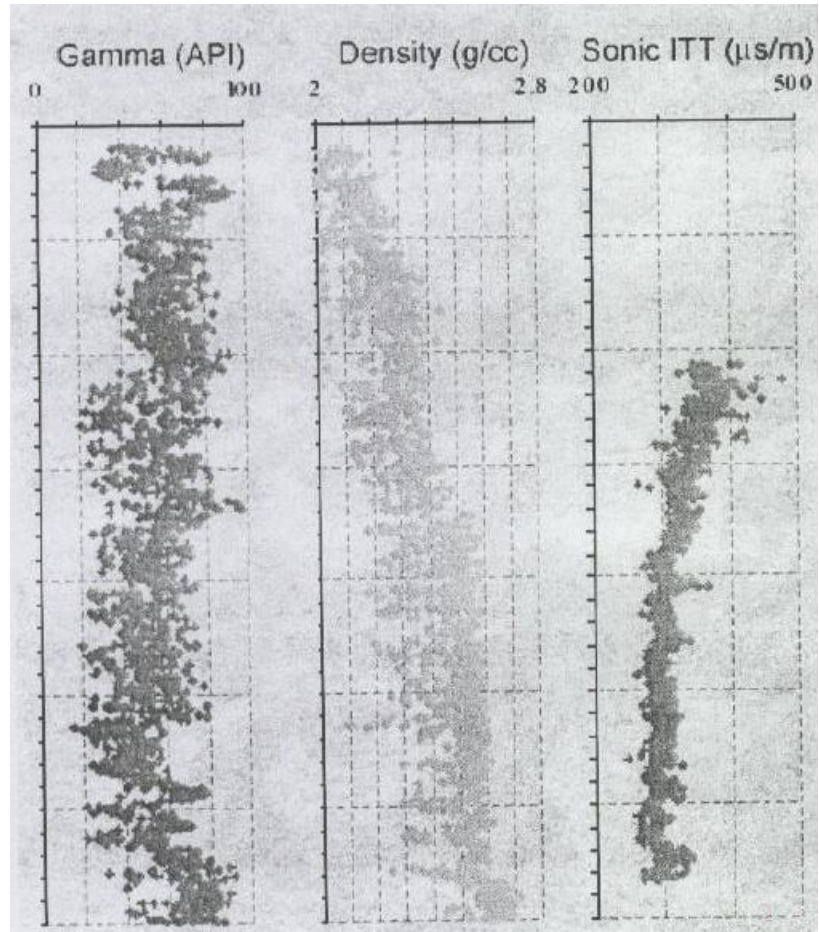
**3.3.4 Propiedades mecánicas de la roca.** Se usaron los típicos registros sísmicos para la región de interés para obtener las propiedades de la formación (*ver figura 37 y 38*)  $V_p$ : compressional wave sonic velocity, km/s,  $V_s$ : shear-wave Sonic velocity, km/s

**Figura 37.** Crossplot de  $V_p$  y  $V_s$



**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

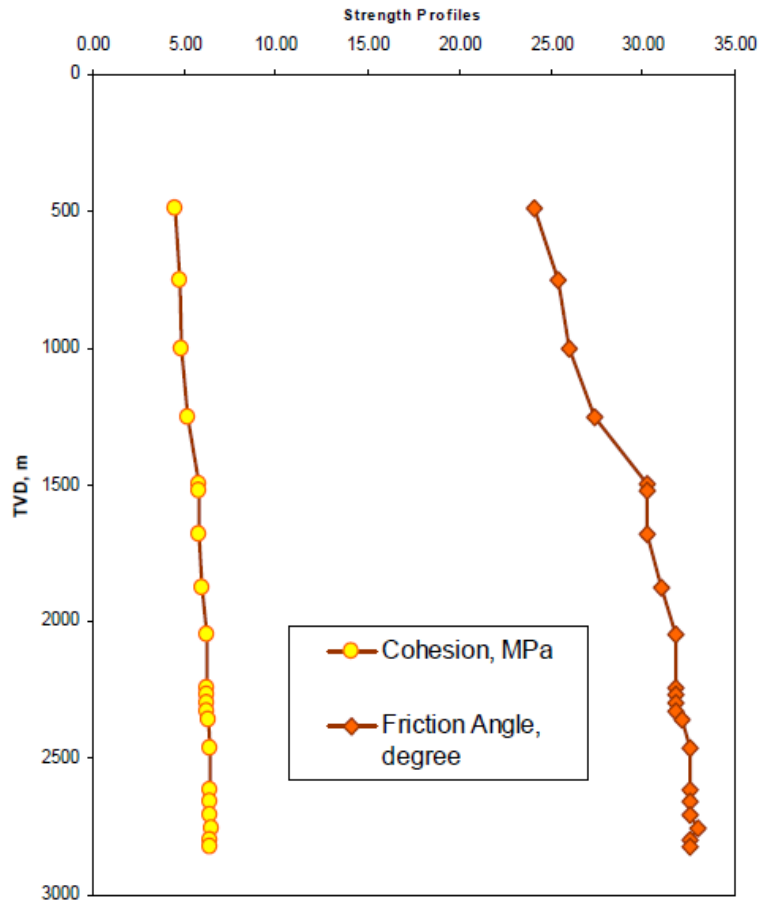
**Figura 38.** Registros usados para obtener las propiedades de resistencia del shale.



**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

Teniendo velocidad sónica de compresión, se obtuvo el ángulo de fricción interna y la cohesión (*ver figura 39*) por medio de la correlación Manohar, esta se obtuvo a partir de una amplia gama de datos de shale.

**Figura 39.** Cohesión y ángulo de fricción interna calculado para el campo de interés.



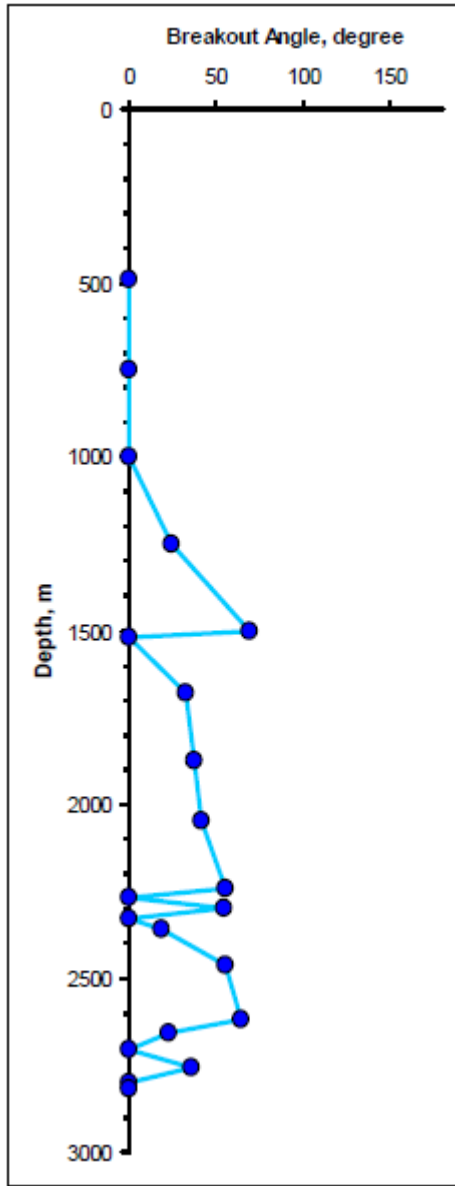
**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

**3.3.5 Criterio de falla utilizados.** Para los intervalos de shale se utilizaron los criterios de Mohr-Coulomb y Modificado de Lade para comparar los resultados de estos dos enfoques.

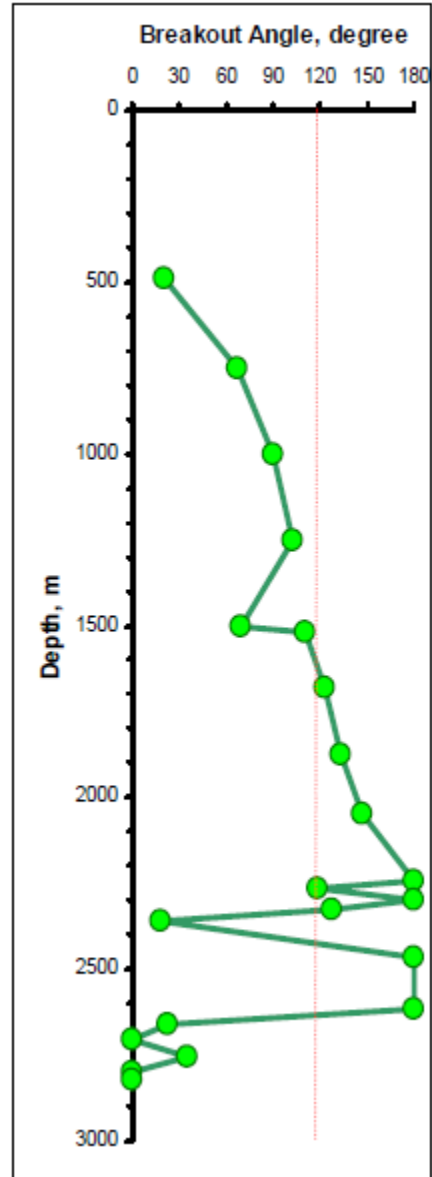
**3.3.6 Simulación Bridging.** Usando Mohr-Coulomb, Modificado de Lade, y correlaciones de resistencia para criterios de areniscas, se compararon los esfuerzos inducidos en la región de la cara de pozo con resistencia de la roca a determinar la localización potencial de fractura o intervalos de colapso. Se usó un modelo elástico usando un generalizado tridimensional plano-esfuerzo, soluciones para comparar el esfuerzo inducido y la resistencia de la roca. Todos los tres criterios de falla y el modelo usa la entrada de parámetros de resistencia presentado en *Figura 39*. Tres casos fueron simulados con diferentes perfiles de presión de cara de pozo para tratar de coincidir con el bridging. Como el pozo es desviado, se consideró el ángulo crítico como  $120^\circ$  y se consideró que cualquier ubicación con ángulo de breakout mayor que este valor crítico, es una parte potencial de falla en cara de pozo.

**3.3.7 Operación de perforación normal.** Se corrió la simulación para el pozo, con pesos de lodo usados después del reventón (10.1 lb/gal). Los resultados de la simulación por los criterios de Modificado de Lade y Mohr-Coulomb son presentados en *figura 40* y *figura 41*.

**Figura 41.** Ángulos de breakout para operación normal basado en criterio Modificado de Lade.



**Figura 40.** Ángulos de breakout para operación normal basado en criterio Mohr-Coulomb

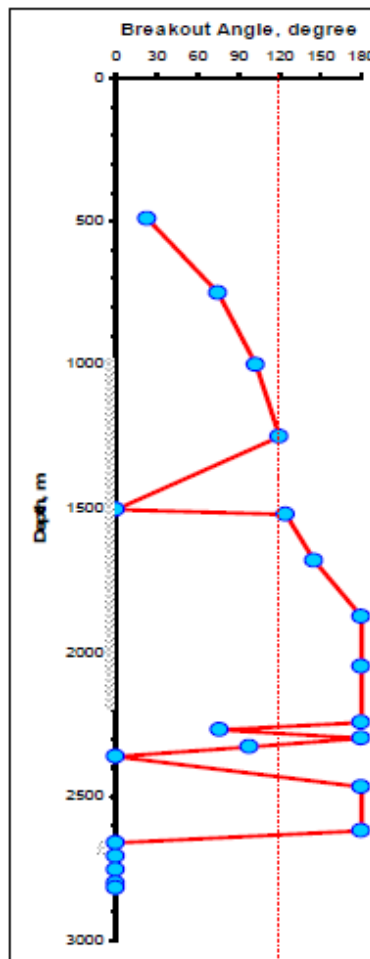


Fuente. NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

Los resultados de la simulación Modificado de Lade demostraron que después del reventón el pozo fue estable a lo largo de la longitud total, mientras que los resultados de la simulación de Mohr-Coulomb mostraron que las fallas en el pozo estaban alrededor de 1682 m a 2620 m

**3.3.8 Situación de reventón.** Como un segundo set de simulación los valores de presión a lo largo del pozo fueron obtenidos para el mejor escenario probable de reventón reportado. Se utilizó la presión del pozo modelado para predecir el colapso del pozo *figuras 42* muestran los resultados de la simulación.

**Figura 42. Reventón: presión del pozo por OLGA2000.**

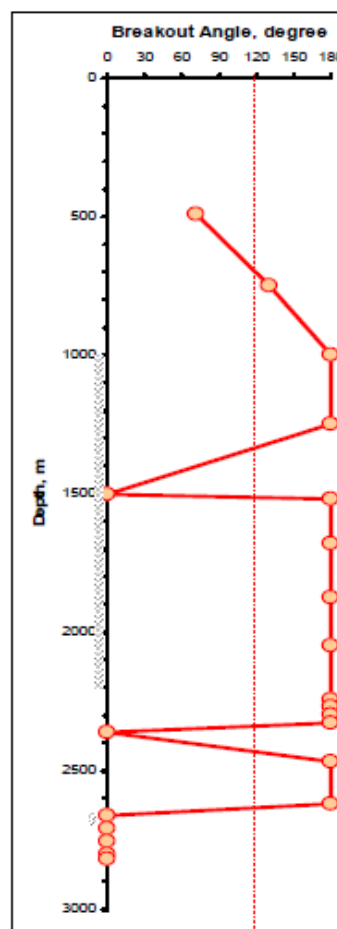


**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

En esta simulación aplicamos el criterio de falla Modificado de Lade para la determinación de las fallas en el pozo. Los resultados de la simulación demostraron que el colapso del pozo es probable que ocurra en los rangos de profundidad de 1520 a 2240 m, 2280 a 2325 m y 2475 a 2626 m.

En la *figura 43* se muestra el resultado del tercer set de simulaciones. En esta simulación se utilizó el perfil de la presión del pozo obtenida por el simulador.

**Figura 43.** Reventón, Modificado Lade: presión de pozo por el simulador.

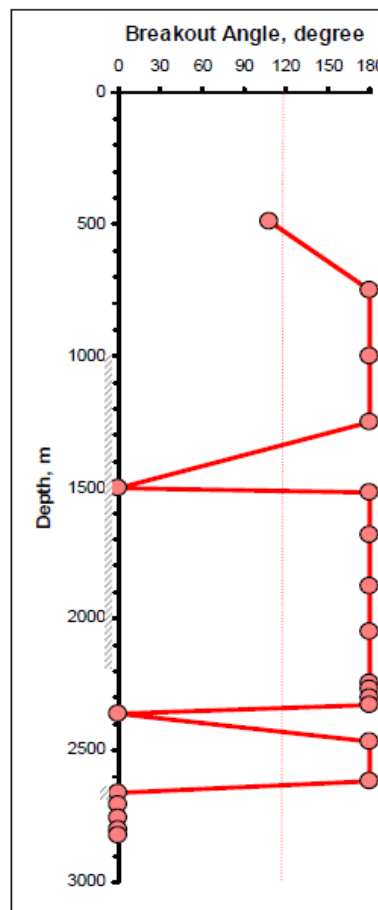


**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

De acuerdo al escenario más probable para este caso, los cuales se asumen para una trayectoria de flujo abierto. Esto no es una restricción suficiente para hacer

cualquier contrapresión significativa. Por lo tanto, para simular la presión del pozo durante el reventón, se modelo solamente el flujo de gas, que es consistente con el escenario del reventón, pero con la rata de flujo de gas observado de 150,000 Mscf/D. En este caso el *bridging* se espera que dentro de la escala de profundidad de 700 a 1340 m, 1525 a 2340 m, y 2475 a 2625 m. Comparando los resultados. Se simulo el pozo con el criterio de Mohr-Coulomb (ver figura 44).

**Figura 44.** Reventón, Mohr Coulomb: presión de pozo por el simulador.



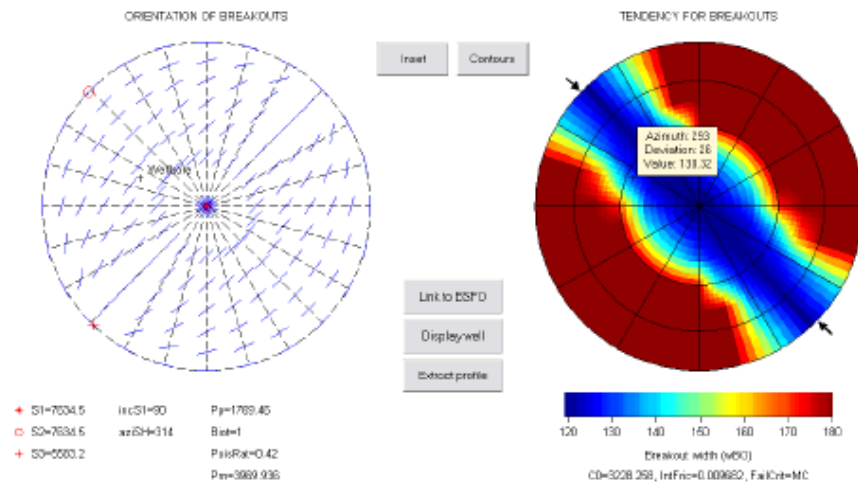
**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

De acuerdo al criterio de Mohr-Coulomb y basado en el perfil de la presión de cara de pozo obtenido por el simulador, el bridging es esperado dentro de las profundidades de 530 a 1340 m, 1525 a 2340 m y 2475 a 2625 m.

Los resultados para ambas simulaciones, uno basado en el perfil de presión obtenido por OLGA2000 y el cual uso el modelado de flujo de gas a lo largo del pozo, demostrando algunos resultados. De acuerdo a estas simulaciones, el bridging es el más esperado dentro de formaciones de shale. La razón es que la magnitud del esfuerzo in situ incrementa, mientras que la resistencia del shale no cambia significativamente.

Para comprobar la exactitud del simulador se aplicó esfuerzo GMI's y software de fallas a perforaciones inclinadas (GMI•SFIB) para operaciones normales de perforación. Este software ofrece completamente el modelamiento de esfuerzos en 3D tanto para los breakouts del pozo y fracturas de tensión de las paredes. *Figura. 45* muestra el SFIB resultado por TVD de 2327 m.

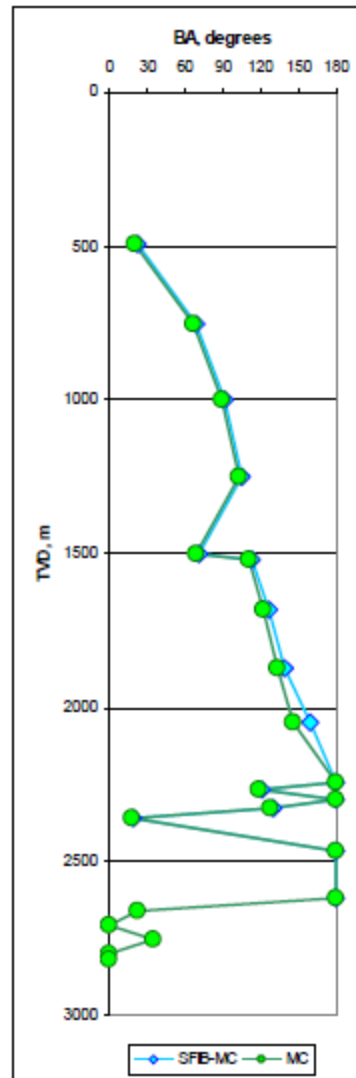
**Figura 45.** Ángulo de breakout en TVD=2327 m.



**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

En la *figura 46* se compara valores del ángulo del breakout a lo largo del pozo por nuestro simulador y software SFIB basado en el criterio de falla Mohr- Coulomb.

**Figura 46.** Comparación de SFIB y nuestro simulador para operación normales.

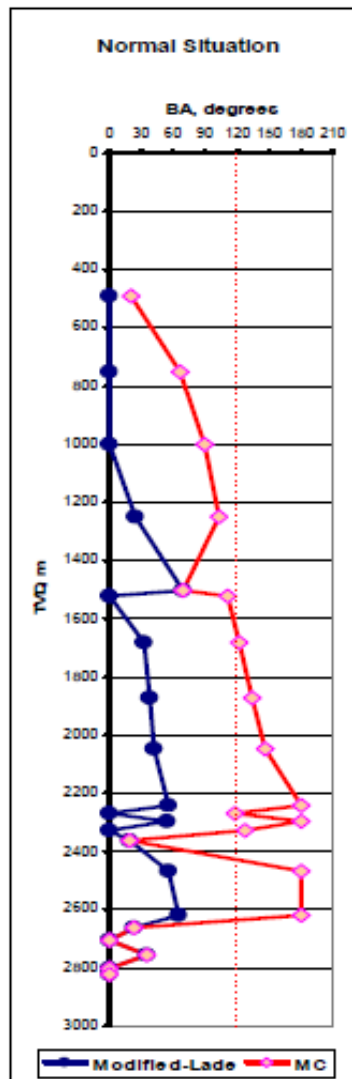


**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

Esta comparación demuestra buena correlación entre el simulador y el software SFIB.

En la *figura 47* se muestra la comparación junto a los criterios Mohr-Coulomb y Modificado de Lade.

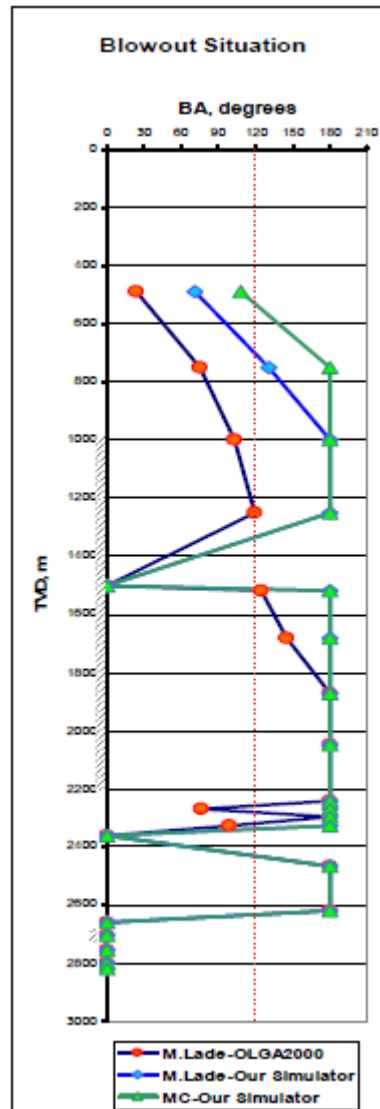
**Figura 47.** Mohr-coulomb y Modifica de Lade para situaciones normales.



**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

En la *figura 48* se muestra la comparación de tres simulaciones para el perfil de presión obtenidos de OLGA2000 y nuestro modelo de flujo de gas.

**Figura 48.** Comparación de tres sets de simulaciones.



**Fuente.** NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.

**3.3.9 Análisis de resultados.** Los resultados de ambas simulaciones, demostraron casi los mismos resultados. Conforme a estas simulaciones, el bridging es más esperado en las formaciones de shale. La razón es que la magnitud de los esfuerzos in-situ incrementa mientras que la resistencia de la arcilla no cambia significativamente.

También la comparación entre Mohr-Coulomb y Modificado de Lade muestra un resultado bastante cerca para la situación del ángulo de breakout pero en situaciones normales de perforación Mohr-Coulomb se muestra más conservador a los resultados y sobrestima el ángulo del breakout

También se obtuvo que los resultados de la simulación dependen fuertemente en la calidad de los datos disponibles y la confiabilidad de las correlaciones, y es importante contar con datos más precisos como registros de imágenes, esto llevará a construir un robusto modelo geomecánico para obtener resultados más realistas.

## 4. ANÁLISIS DE PROPIEDADES Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LA ROCA PARA YACIMIENTOS DE PETRÓLEO

En este capítulo se analizarán los efectos de las propiedades geomecánicas y parámetros de las rocas para yacimientos de hidrocarburos sensibles a esfuerzos.

### 4.1 YACIMIENTOS CONVENCIONALES

Con el fin de determinar el grado de influencia de cada una de las propiedades, se realizará una comparación y análisis de las propiedades y parámetros de resistencia de la roca usando los criterios de falla para yacimientos de petróleo convencional. Señalando que cada criterio de falla modela la resistencia de la roca de forma distinta como se puede observar en la *tabla 6* en la cual cada criterio tiene una ecuación diferente y por lo tanto parámetros diferentes.

**Tabla 6. Parámetros de los criterios de falla**

CRITERIO	ECUACIÓN	PARÁMETROS
<b>HOEK-BROWN</b>	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$	$m_i, s, m_b, a, GSI, D,$
<b>MOHR-COULOMB</b>	$\tau = \tau_o - \eta \sigma$	$C, \phi$
<b>DRUCKER-PRAGER</b>	$\tau_{oct} = \tau_o + m \sigma'_{oct}$	$C, \phi$
<b>MODIFICADO DE LADE</b>	$\frac{(I_1'')^3}{I_3''} = 27 + \eta$	$C, \phi$

**Fuente.** Autores

El análisis de cada parámetro estará basado en la influencia que tiene cada propiedad según su criterio de falla correspondiente. Por ejemplo para el criterio de falla de Hoek-Brown, teniendo en cuenta la ecuación (11) correspondiente a este criterio le haremos el correspondiente análisis según la experiencia en casos de estudio tomados del software RocData como se puede ver en las *figuras 49 y 50*.

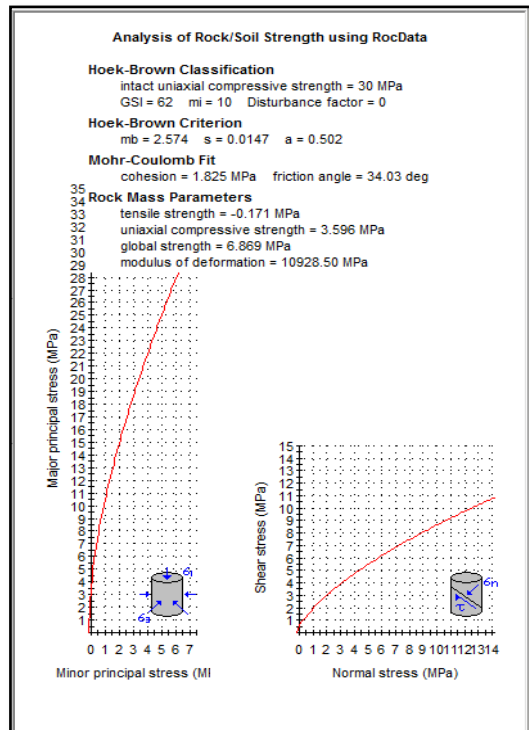
- $\sigma_3'$ : Por encima de este valor ya se produce la ruptura, se puede observar que el esfuerzo máximo principal está en función del esfuerzo mínimo principal, puede ser una función no lineal lo que permite que sea exponencial.
- **GSI**: Es el índice de resistencia geológica que básicamente representa la estabilidad en el macizo rocoso, al observar la tendencia de la gráfica de Hoek-Brown al aumentar el GSI el esfuerzo principal mayor aumenta lo que significa que el macizo rocoso puede soportar una carga bastante alta dependiendo del valor del GSI si este se encuentra en el rango de 70-100 se puede decir que es de buena calidad geotécnica. Si el valor del GSI es bajo disminuye el esfuerzo principal mayor lo que para nosotros no es favorable puesto que el macizo rocoso no va a soportar mucha carga impuesta en él.
- **$m_i$** : Es constante para cada tipo de roca, obtenida a través de ensayos triaxiales, o de manera aproximada con las tablas aportadas por Hoek y Brown (1997). Usando el simulador RocData se observa que a medida que se aumenta  $m_i$  el esfuerzo principal máximo aumenta, lo que nos indica que es una relación directamente proporcional, también se puede decir que

a medida que el grano de la roca sea mayor la resistencia de este será mejor. También se puede observar la gráfica de esfuerzo de corte vs esfuerzo normal, analizando  $m_i$ , a medida que este aumenta el esfuerzo normal crece pero no tan rápido como el esfuerzo de corte ya que los esfuerzos normales tienen a cambiar el volumen del material (como la presión hidrostática) y son soportados por el módulo de Young y la relación de Poisson, mientras que los esfuerzos de corte tienden a deformar el material pero sin cambiar su volumen.

- **D:** Es un factor reductor de la resistencia que depende del grado de alteración que haya sufrido el macizo rocoso por varios efectos. al observar el resultado de la grafica a medida que el factor D aumenta, el esfuerzo principal mayor disminuye puesto que en este punto (de  $D=1$ ) el macizo esta muy alterado y es poco lo que este puede soportar. Además el factor D penaliza mas a los terrenos con bajos indice GSI que a los macizos con mayor indice.
- **$m_b$ :** Es un valor reducido de la constante del material  $m_i$  y está dada por la ecuación (13): Observando el simulador RocData este término dependerá directamente de  $m_i$  el cual ya fue analizado, este valor se hace grande a medida que GSI aumenta y D disminuye, por consiguiente el esfuerzo principal máximo crece, y básicamente esto es lo que se quiere ya que el macizo puede soportar más.
- **s:** Es una constante del macizo rocoso que presenta el mismo comportamiento de  $m_b$ , Ecuación (14) es decir crece si, GSI aumenta y D disminuye, fenómeno que es conveniente.

- **a:** Este parámetro depende de GSI anteriormente analizado, ecuación (15), pero este se mantiene aproximadamente constante al cambiar el GSI por lo que se puede inferir que el esfuerzo principal mayor aumenta de forma muy pasiva.

**Figura 49.** Análisis de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb.

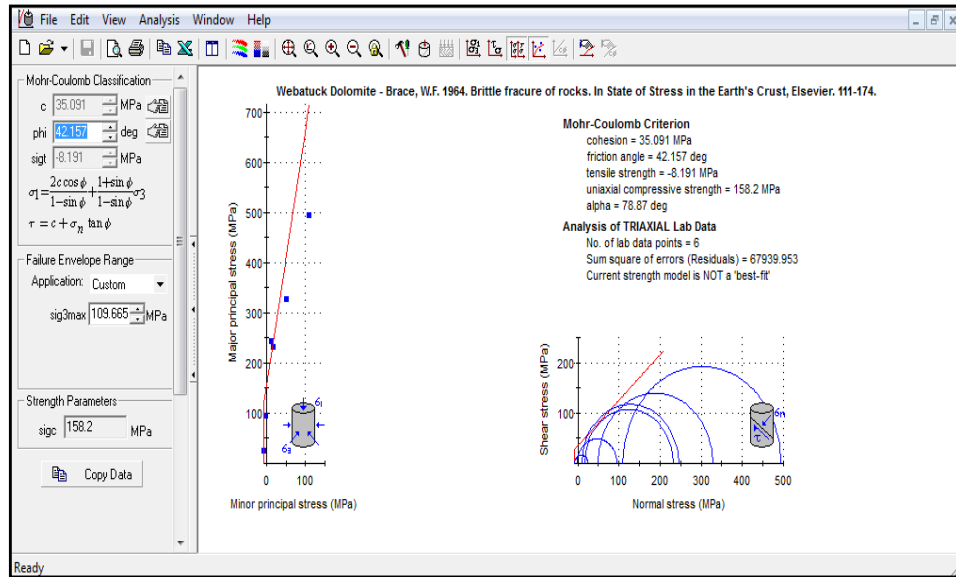


**Fuente.** SOFTWARE. Rocdata.

Teniendo en cuenta la ecuación (23) para el criterio de falla de Mohr-Coulomb se hizo el correspondiente análisis:

- **$\phi$ :** Este es el único parámetro bajo el cual los esfuerzos principales mayor y menor varían ya que este proporciona la dirección de la rotura. La orientación del plano de falla es muy diferente que el plano de inclinación. Este ángulo se mide en sentido contrario al de las manecillas del reloj en una compresión tomando sé cómo positivo mientras en una tensión el ángulo se mide en el sentido de las manecillas y se toma como negativo.

**Figura 50.** Análisis de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb.



Fuente. SOFTWARE.Rocdata.

En Drucker-Prager, teniendo en cuenta la ecuación (26) que modela este criterio la cual es:

- Las variables  $\sigma_3, \sigma_1, \sigma_2$  actúan directamente proporcional, señalando que 1/3 de los esfuerzos principales contribuyen al aumento de la resistencia al deslizamiento, dependiendo del tipo de roca a analizar ya que  $\tau_0$  y  $m$  son directamente dependientes de la cohesión del material y la tangente AFI (Angulo de fricción interna) en este caso el esfuerzo principal intermedio juega un papel muy importante y es como ese punto medio que no permite que el macizo rocoso falle. Por otro lado la variable que tiene mayor influencia es  $\phi$  ya que la cohesion se mantiene constante para cada tipo de suelo. A medida que este aumenta la pendiente de la grafica es mas pronunciada lo que significa que la roca es capaz de resistir mas a la fractura.

## 5. LAS PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS CRITERIOS DE FALLA

En este capítulo se define el orden de aplicación de los criterios de falla con sus respectivas consideraciones teniendo en cuenta la aplicabilidad que posee cada uno en la industria y enfatizar porque se presentan inconvenientes e incertidumbres con ciertos criterios, todo esto teniendo en cuenta los estudios anteriormente realizados.

Estas aplicaciones se obtuvieron teniendo en cuenta los capítulos anteriores y en especial a un *paper* publicado por la American Rock Mechanics Association (ARMA) en el 2010.

### 5.1 CRITERIOS DE FALLA Y SU IMPACTO EN LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE POZOS<sup>31</sup>

Los parámetros mecánicos de la roca, los esfuerzos in situ y la presión de poro también son considerados en este capítulo por ser condiciones que afectan la estabilidad de los pozos junto con los criterios de falla más usados en este tipo de análisis por los ingenieros de petróleo como el de Mohr-Coulomb, Drucker Prager, modificado de Lade y criterio de falla por tensión. Además se analiza los diferentes regímenes de esfuerzos como falla normal, falla de rumbo y fallas inversas.

Los criterios de falla y los diferentes regímenes de esfuerzo fueron analizados y priorizados mediante el método de simulación de Monte Carlo.

---

<sup>31</sup>Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. Paper, ARMA 10-328, 2010.

**5.1.1 Análisis de sensibilidad.** El método de Monte Carlo permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. Es un método no determinístico o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud.

A pesar de sus altos costos asociados a informática, la simulación de Monte Carlo se ha observado que proporciona constantemente un rendimiento más satisfactorio en comparación con otros métodos. Por lo tanto, en este estudio, el método de simulación de Monte Carlo se eligió debido a su conservadurismo observado y un rendimiento satisfactorio.

**5.1.2 Los parámetros, criterios de falla y procedimientos.** Los parámetros utilizados en el análisis de la inestabilidad del pozo (*ver tabla 11*), se pueden subdividir en 3 categorías principales:

**5.1.3 La geometría del pozo.** En la categoría de la geometría del pozo puede incluirse la profundidad de la perforación, el ángulo de inclinación del pozo y el azimut es parte del diseño y son conocidos a menudo con precisión.

**5.1.4 Las condiciones in situ y propiedades mecánicas de las rocas.** En esta categoría entran la presión de poro, la medida de esfuerzos de campo, la resistencia y las propiedades elásticas a menudo estas condiciones se calcula a partir de pruebas de pozo, como la sísmica, registros de pozo y por lo general estas contienen grandes incertidumbres.

El módulo de Young es conocido a priori por no afectar la distribución de esfuerzos en la pared del pozo, y por lo tanto fue excluido de los análisis de sensibilidad. Dentro de los parámetros e incertidumbres para la simulación de Monte Carlo junto con los diferentes regímenes de esfuerzos tenemos (*ver tabla 7 y 8*):

**Tabla 7.** Parámetros e incertidumbres para la simulación de Monte Carlo.

PARAMETROS
$\nu$
$P_{\text{poro}}$
$S_v$
$S_H$
$S_h$
<b>Esfuerzo cortante <math>\tau</math></b>
<b>Cohesión, <math>C</math></b>
<b>Angulo de fricción <math>\phi</math></b>

**Fuente.** The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

**Tabla 8.** Regímenes de esfuerzos

REGIMENES DE ESFUERZOS	FALLA
$S_v > S_H > S_h$	Normal
$S_H > S_h > S_v$	Inversa
$S_H > S_v > S_h$	Rumbo

**Fuente.** The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

**5.1.5 Procedimiento del análisis.** Se supuso la misma variación (3%) de los valores medios de cada parámetro. Generar aleatoriamente una población para cada parámetro. Ejemplos de distribuciones generadas de  $S_H$ ,  $S_h$ , y  $S_V$  para el régimen de esfuerzo de falla normal, inversa y de rumbo. Todos los parámetros se supone que son independientes el uno del otro y se distribuyen normalmente.

Se aplicó el método de Monte Carlo para simular el peso del lodo fractura (fracture mud weight FMW) y el peso derrumbe del lodo (collapse mud weight CMW) bajo diferentes criterios de falla de corte para un parámetro a la vez con su población generada (ver tabla 9).

**Tabla 9.** Resumen de los parámetros e incertidumbres para la simulación de Monte Carlo - Régimen de esfuerzo falla normal ( $S_V > S_H > S_h$ ).

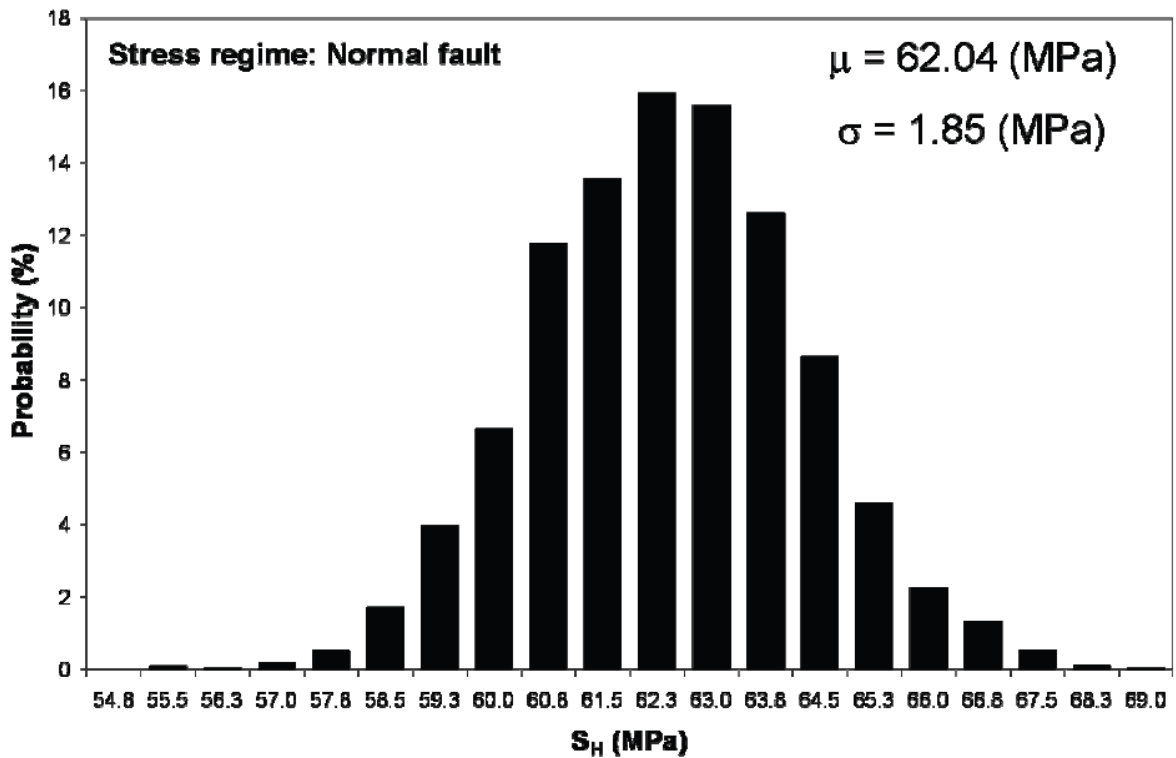
Parámetros	$\mu$	Variación	$\sigma$
$\nu$	0,3	3%	0,009
$P_{\text{poro}}$ (MPa)	33	3%	0,99
$S_V$ (MPa)	86	3%	2,58
$S_H$ (MPa)	62	3%	1,86
$S_h$ (Mpa)	55	3%	1,65
Resistencia a la tensión, $\tau$	2	3%	0,06
Cohesión, c (Mpa)	17	3%	0,51
Angulo de fricción, $\phi$ (°)	45	3%	1,35

**Fuente.** The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

Esta misma tablas se obtuvo para los mismos parámetros e incertidumbres pero con régimen de esfuerzo falla inversa ( $S_H > S_h > S_V$ ) y Régimen de esfuerzo falla de rumbo ( $S_H > S_V > S_h$ ).

En la *figura 51* se muestra la distribución que se hizo para el esfuerzo máximo horizontal. Esta misma distribución se realizó para los esfuerzos  $S_h$  y  $S_v$  – Régimen de esfuerzo falla normal.

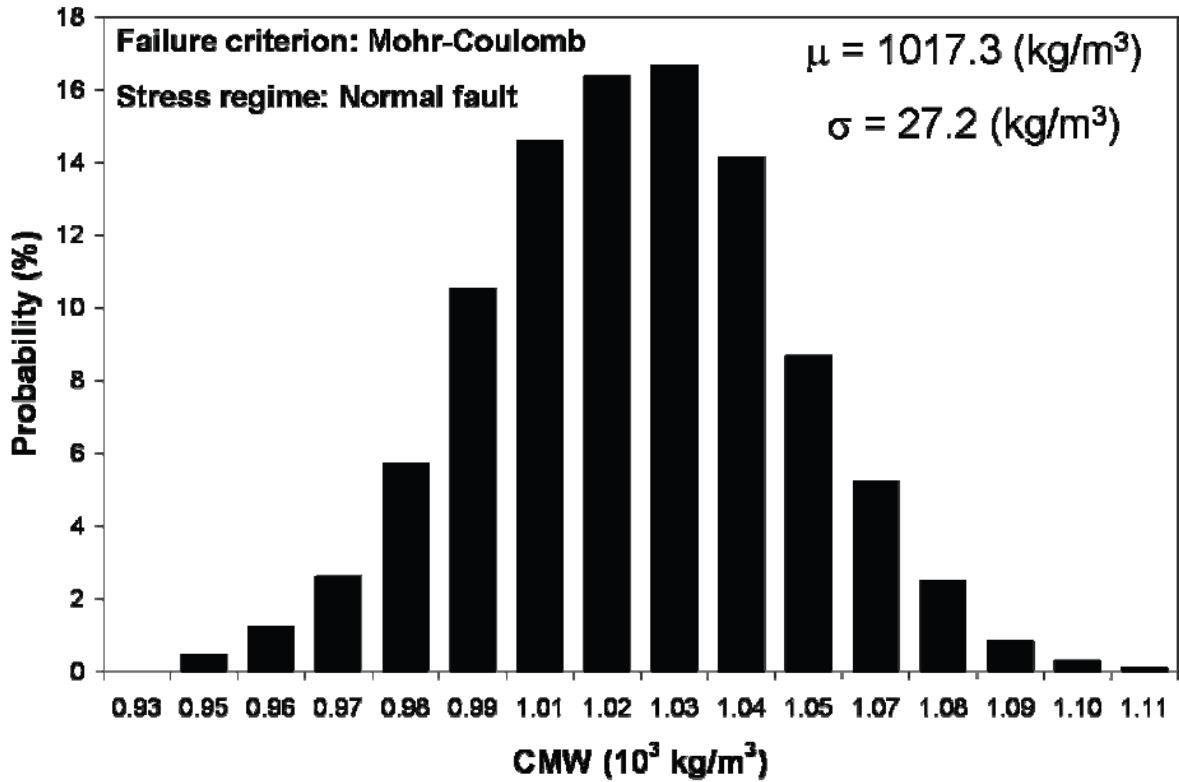
**Figura 51.** Distribución SH - Régimen de esfuerzo falla normal.



**Fuente.** The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

**5.1.6 Resultados y discusiones.** Con la simulación de Monte Carlo se analizó la distribución del peso del lodo de colapso usando el criterio de falla de Mohr-Coulomb al asumiendo la variación de  $S_H$  para el régimen de esfuerzo de falla normal como se muestra en la *figura 52*.

**Figura 52.** Distribución de la simulación CMW cuando varia SH - Régimen de esfuerzo falla normal y el criterio de Mohr-Coulomb.



**Fuente.** The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

La media y la desviación estándar simulada de la CMW y FMW junto con los valores obtenidos a partir del método determinista (sin incertidumbres en los parámetros de entrada, ver *tabla 10*) para cada régimen de esfuerzo de falla (normal, inversa y de rumbo). Se muestra solo para el régimen de esfuerzo falla normal.

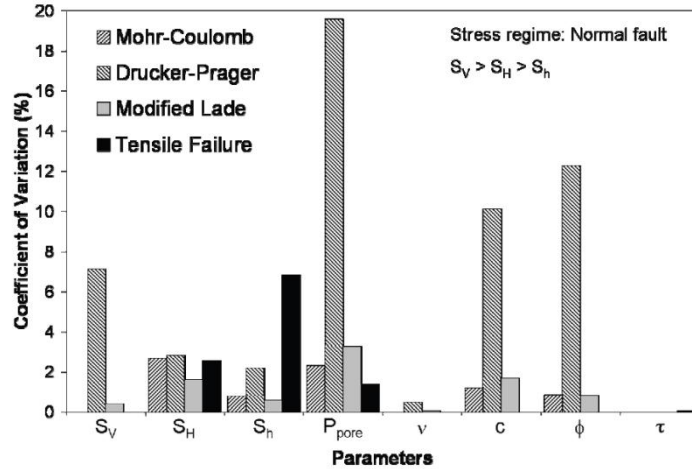
**Tabla 10.** Peso simulado del lodo - régimen de esfuerzo falla normal.

	PESO DEL LODO A PARTIR DEL METODO DETERMINISTICO (Kg/m3)			
	M-C	M-L	D-P	FMW
	1017.4	849.6	195.3	2421.8
VARIACIÓN	PESO DEL LODO SIMULADO POR MONTE CARLO (kg/m3)			
v	1017.4 ±0.0	849.5±0.5	195.1±0.96	2421.8±0.0
Pporo	1016.9±23.6	849.5±272.7	195.2±38.2	2422.1±33.4
Sv	1017.4±0.0	849.7±3.6	195.4±13.9	2421.8±0.0
SH	1017.3±27.2	849.9±13.7	195.2±5.5	2421.2±62.1
Sh	1016.6±8.1	849.3±5.0	196.0±4.3	2427.5±165.4
c	1017.1±12.2	849.7±14.4	195.4±19.8	N/A
φ	1017.4±8.5	850.3±6.9	196.5±23.9	N/A
τ	N/A	N/A	N/A	2422.1±2.2

**Fuente.** The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

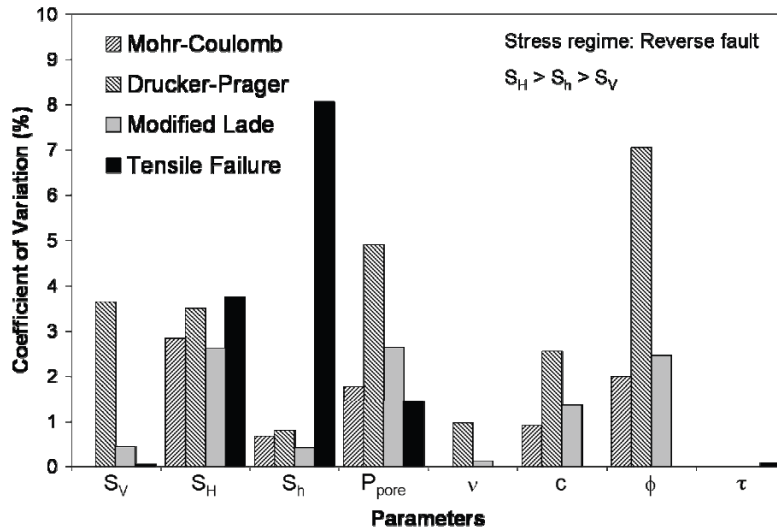
Para CMW y FMW correspondiendo a la variación de cada parámetro de entrada para diferentes regímenes de esfuerzo de falla se resumen en las *figuras 53, 54 y 55* cuyos resultados muestran la sensibilidad en función del coeficiente de variación (%) de los criterios de falla con respecto a las variables o parámetros analizados.

**Figura 53.** Variaciones de CMW y FMW correspondiente a la variación de los parámetros de entrada para diferentes criterios de falla – falla normal.



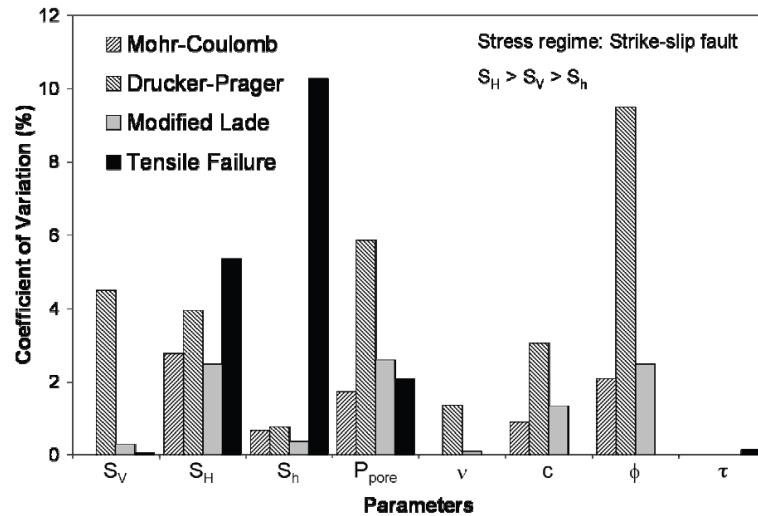
**Fuente.**The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

**Figura 54.** Variaciones de CMW y FMW correspondiente a la variación de los parámetros de entrada para diferentes criterios de falla – falla inversa.



**Fuente.**The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

**Figura 55.** Variaciones de CMW y FMW correspondiente a la variación de los parámetros de entrada para diferentes criterios de falla – falla de rumbo.



**Fuente.** The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. 2010, Paper, ARMA 10-328, Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

Los resultados mostraron que el rango de sensibilidad de los diversos parámetros depende tanto de los criterios de falla y del estado de régimen de esfuerzos. Un régimen de esfuerzo de falla normal y el criterio de falla de Mohr-Coulomb tienen el máximo esfuerzo principal horizontal ( $S_H$ ) como el parámetro más importante que afecta la densidad del lodo, mientras que el criterio de Drucker-Prager y Lade modificado ambos tienen la presión de poro ( $P_{pore}$ ) como la variable más crítica (ver figura 53). Por otra parte, en un régimen de esfuerzo de falla de rumbo, mientras  $S_H$  y  $P_{pore}$  permanecen como los parámetros más sensibles para el criterio de Mohr-Coulomb y Modificado Lade respectivamente, el ángulo de fricción,  $\phi$ , se convierte en los parámetros más importantes del criterio de Drucker-Prager (ver figura 55).

Entre los diversos factores in-situ que son problemáticos para mediciones de campo,  $S_H$  y  $P_{pore}$  demostraron tener más impactos sobre el CMW en comparación

con  $S_h$  para todos los criterios de falla y un régimen de esfuerzo. El mínimo esfuerzo principal horizontal,  $S_h$ , por otra parte, es el factor más dominante que afecta al FMW para todos los regímenes de esfuerzos como se puede ver en las *figuras 53, 54 y 55*.

Además, mientras que  $S_H$  ha demostrado en estudios anteriores que tienen el mayor efecto sobre el análisis de la estabilidad el pozo junto con el criterio de Mohr-Coulomb; la función de  $P_{\text{poro}}$  en CMW ha demostrado ser bastante modesto cuando se compara los parámetros de resistencia de la roca y  $S_H$ . En este estudio,  $P_{\text{poro}}$  se tomó como el parámetro más importante en el estudio de la inestabilidad del pozo empleando el criterio Lade modificado independientemente de los regímenes de esfuerzo (*ver figuras 53, 54 y 55*).

Los resultados también mostraron que los parámetros de resistencia,  $C$  y  $\phi$ , tienen la mayor influencia en CMW entre las diversas propiedades mecánicas de las rocas para todos los criterios de falla y los regímenes de esfuerzo. Además, para el régimen de esfuerzo falla inversa y falla de rumbo,  $\phi$  es un parámetro más crítico comparado con  $C$  para el análisis CMW. Además, los efectos del esfuerzo cortante en el análisis FMW demostró ser sutil en comparación con otros factores in-situ tales como  $S_H$ ,  $S_h$ , y  $P_{\text{poro}}$ .

Por último, como se muestra en las *Figura 54*, el CMW del criterio de Mohr-Coulomb y FMW son prácticamente insensibles a la relación de Poisson, ( $\nu$ ) y esfuerzo vertical principal ( $S_V$ ). Esta insensibilidad es debido al hecho de que sólo el criterio de falla de Mohr-Coulomb tiene en cuenta los esfuerzos principales máximo y mínimo, en los casos considerados en este estudio, ambos puestos en un plano horizontal ( $r-\theta$ ).

**5.1.7 Conclusiones de la simulación de Monte Carlo.** La sensibilidad de varios parámetros incluyendo las propiedades mecánicas de las rocas y las condiciones in-situ, afecta directamente a la estabilidad de los pozos perforados en falla normal, falla inversa y falla de rumbo. En cada régimen de esfuerzo, el criterio de Lade modificado, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, y criterio de falla por tensión se utiliza para el análisis de CMW y de FMW.

Los resultados mostraron que el impacto de la magnitud de los diferentes parámetros visto, aplicados en CMW y FMW, depende altamente tanto del uso de los criterios de falla, así como el estado regional de esfuerzos de campo. Además, para todos los criterios de falla y los regímenes de esfuerzos, los resultados mostraron que  $S_H$  y  $P_{\text{poro}}$  tienen mayor efecto en CMW en comparación con  $S_h$ . Mientras  $S_H$  también ha demostrado por medio de estudios previos ser el parámetro más sensible para el criterio de Mohr-Coulomb en todos los estados de esfuerzos, en cambio la  $P_{\text{poro}}$  mostro mayores impactos cuando se trabaja el criterio de Lade Modificado.

Por último, entre las diversas propiedades mecánicas de las rocas, los parámetros de resistencia,  $C$  y  $\phi$ , demostraron tener mayores efectos sobre el CMW. Además, el análisis del criterio por tensión demostró ser menos influenciado por el esfuerzo cortante como por los esfuerzos in situ y la presión de poros para todos los regímenes de esfuerzos.

Este estudio mejorará la reducción del riesgo futuro para el análisis de estabilidad del pozo mediante la identificación de los parámetros más importantes para un criterio de falla y un régimen de esfuerzos geológicos.

## 6. SCREENING DE APLICABILIDAD DE LOS DIFERENTES CRITERIOS DE FALLA EN LA INDUSTRIA PETROLERA

En este capítulo se encuentra el screening de aplicabilidad de los diferentes criterios de falla, cuya finalidad es identificar el criterio más adecuado según sea el caso que se esté trabajando.

El screening se desarrolló con base en los estudios realizados previamente y en base a los resultados que arrojó el análisis de sensibilidad en el capítulo 5, con la simulación de Monte Carlo, se analizaron diversas variables como propiedades mecánicas de la roca, los esfuerzos in situ y la presión de poro. Estas variables son analizadas por ser condiciones que afectan la estabilidad del pozo junto con los criterios de falla más usados en este tipo de análisis por la industria petrolera como el criterio de falla por tensión, el criterio de Mohr-Coulomb, Drucker Prager y modificado de Lade, estos se analizaron en diferentes regímenes de esfuerzos como falla normal, falla de rumbo y falla inversa.

Las variables analizadas se muestran a continuación, algunas de estas diferentes para el criterio de Hoek - Brown en el que se analizaron otros tipos de variables:

### 6.1 VARIABLES

Algunas de estas variables son:

**6.1.1 Esfuerzos principales.** El comportamiento de los criterios de falla depende directamente de esfuerzos principales que presenta la roca, estos juegan un papel importante ya que las ecuaciones que representan los criterios, se escriben en términos de estos (ver figuras 56, 57 y 58). En el criterio de falla por tensión se escribe en términos del esfuerzo principal mínimo. El criterio de falla generalizado de Hoek-Brown para macizos rocosos fracturados está expresado en términos de los esfuerzos principales máximo y mínimo ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ). Lo mismo se tiene para el

criterio de Mohr-Coulomb, se escribe en función de los esfuerzos principales mayor y menor. Para Mohr-Coulomb el esfuerzo intermedio principal ( $\sigma_2$ ), no tiene ninguna influencia en el esfuerzo de la roca. En los criterios de Drucker-Prager y Modificado de Lade, si se considera la influencia del esfuerzo principal intermedio y de los esfuerzos principales máximo y mínimo en los ensayos de resistencia y en sus ecuaciones<sup>32</sup>.

**6.1.2 Régimen de esfuerzo.** El screening de aplicabilidad también cuenta con los regímenes de esfuerzos incluyendo la falla normal, inversa y de rumbo.

**6.1.3 Propiedades de las rocas.** Dentro de las variables, también se encuentran algunas propiedades de las rocas como son la presión de poro ( $P_{\text{poro}}$ ), la relación de Poisson ( $\nu$ ), la Cohesión ( $C$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ). En las propiedades elásticas (módulo de Young), este parámetro es conocido a priori por no afectar la distribución de esfuerzos en la pared del pozo<sup>33</sup>.

## 6.2 SCREENING

A continuación se encuentra el Screening obtenido de estudios anteriormente revisados en los capítulos dos, tres, cuatro y cinco en este, se tuvo en cuenta el estudio de sensibilidad del método de Monte Carlo para los criterios de falla<sup>34</sup>.

En la *figura 56* se muestra el screening de aplicabilidad para los diferentes criterios en un régimen de esfuerzo de falla normal., se encuentran los criterios de falla analizados: Criterio de falla por tensión, criterio de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager y Modificado de Lade.

---

<sup>32</sup>Pawel A. Nawrocki. Critical Wellbore Pressures Using Different Rock Failure Criteria. Paper. ISRM International, India. 2010

<sup>33</sup>Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. Paper, ARMA 10-328, 2010.

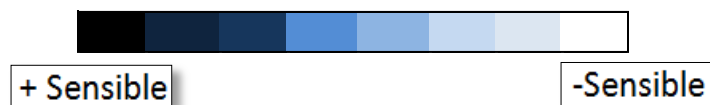
<sup>34</sup>Tran, Minh H. and Abousleiman, Younane N. The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. Paper, ARMA 10-328, 2010.

En la segunda columna se muestran los esfuerzos principales en que se escriben los criterios de falla, por ejemplo para un criterio de falla de Mohr-Coulomb, ver *figura56*, este criterio se escribe en términos de los esfuerzos principales máximo y mínimo ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ), como se puede observar en la ecuación que modela este criterio, (Ec. 25) y en la tercera columna se muestra el grado de sensibilidad de cada parámetro con respecto a un criterio de falla y a un régimen de esfuerzo dado. En esta el grado de sensibilidad de los parámetros se realizó observando las figuras 53, 54 y 55 donde se muestra el coeficiente de variación (%) de cada criterio con respecto a los parámetros. En la *figura 53* se observa que para el criterio de Drucker- Prager, la Pporo en un régimen de esfuerzo de falla normal, el coeficiente de variación (%) es más o menos diecinueve (19), lo que indica que este parámetro es muy sensible a este criterio y por lo tanto es un parámetro importante que afecta la estabilidad del pozo. Este mismo análisis se realizó con cada parámetro dado con su respectivo criterio de falla.

**Figura 56.** Screening: Sensibilidad de las variables para diferentes criterios de falla, en un régimen de esfuerzo de falla normal.

CRITERIO DE FALLA	ESFUERZOS PRINCIPALES	REGIMEN DE ESFUERZO							
		FALLA NORMAL							
		Sv	SH	Sh	Pp	v	C	$\phi$	$\tau$
CRITERIO POR TENSION	$\sigma_3$								
MOHR – COULOMB	$\sigma_1, \sigma_3$								
DRUCKER – PRAGER	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$								
MODIFICADO DE LADE	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$								

Fuente: Autores

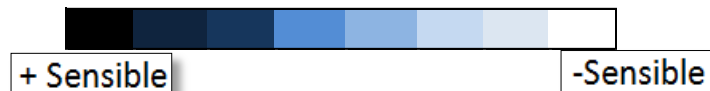


En un régimen de esfuerzo de falla inversa y el criterio de falla de Mohr-Coulomb (ver figura 57), tienen al máximo esfuerzo principal horizontal máximo (SH), el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la Presión de poro  $P_{\text{poro}}$ , como los parámetros más importantes que afecta la estabilidad del pozo, Sh y C, permanecen como los parámetros menos sensibles para este criterio. Por otra parte el criterio de Mohr-Coulomb es prácticamente insensible a la relación de Poisson, ( $\nu$ ), al esfuerzo vertical principal (SV) y el esfuerzo cortante (T). Esta insensibilidad es debido al hecho de que sólo el criterio de falla de Mohr-Coulomb tiene en cuenta los esfuerzos principales máximo y mínimo.

**Figura 57.** Screening: Sensibilidad de las variables para diferentes criterios de falla, en un régimen de esfuerzo de falla inversa.

CRITERIO DE FALLA	ESFUERZOS PRINCIPALES	REGIMEN DE ESFUERZO							
		FALLA INVERSA							
		Sv	SH	Sh	Pp	$\nu$	C	$\phi$	$\tau$
CRITERIO POR TENSION	$\sigma_3$	Light Blue	Dark Blue	Black	Dark Blue	White	White	White	Light Blue
MOHR – COULOMB	$\sigma_1, \sigma_3$	White	Black	Light Blue	Dark Blue	White	Light Blue	Dark Blue	White
DRUCKER – PRAGER	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Black	White
MODIFICADO DE LADE	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Light Blue	Dark Blue	Light Blue	Black	Light Blue	Light Blue	Dark Blue	White

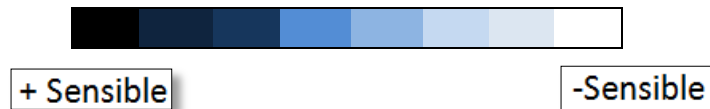
Fuente: Autores



**Figura 58.** Screening: Sensibilidad de las variables para diferentes criterios de falla, en un régimen de esfuerzo de falla inversa.

CRITERIO DE FALLA	ESFUERZOS PRINCIPALES	REGIMEN DE ESFUERZO							
		FALLA DE RUMBO							
		Sv	SH	Sh	Pp	v	C	$\varphi$	$\tau$
CRITERIO POR TENSION	$\sigma_3$	+	-	-	-				+
MOHR – COULOMB	$\sigma_1, \sigma_3$		-	+	-		+	-	
DRUCKER – PRAGER	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	-	+		-	+	+	-	
MODIFICADO DE LADE	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	+	-	+	-		+	-	

Fuente: Autores



Estos Screening mejorarán la reducción de un riesgo futuro, para el análisis de estabilidad del pozo, mediante la identificación de los parámetros más importantes para un criterio de falla y un régimen de esfuerzo dado. Mejorará la gestión de la integridad del pozo, con lo que aumenta la eficiencia de perforación y la reducción de los costos de perforación entre otras mejoras.

### 6.3 Screening Hoek-Brown y Mohr-Coulomb: *RocData*.

Se realizó un análisis de sensibilidad con la ayuda del software *RocData* obteniendo un screening similar a los anteriores, utilizando casos de estudio que posee este software buscando comparar ambos screening y verificar la veracidad del estudio, analizando que tanto se alejan o difieren los resultados, o por lo contrario que tan similares pueden ser los resultados.

**6.2.1 Screening Hoek-Brown.** Tomando un ejemplo (Dolomite Triaxial Data) contenido en el software RocData de casos reales analizamos el comportamiento de las variables que influyen directamente en este criterio, realizando estimaciones fiables de propiedades del macizo rocoso, así como también la visualización de los posibles cambios de los esfuerzos de corte mayor y esfuerzo normal, realizando una sensibilización del parámetro que mayor influencia tiene en el comportamiento de resistencia de la roca bajo el criterio de Hoek-Brown. Se alteraran algunas variables partiendo de las condiciones iniciales que presenta el software las cuales se pueden observar en la *tabla 11* y su respectivo comportamiento de resistencia como se puede observar en la *Figura 59*. Este facilita manipular la data en Excel, razón por la que se generó una tabla de datos de esfuerzo normal y esfuerzo de corte para distintos GSI's como se muestra en la *tabla 12*, con los cuales se realizó una sensibilización como se puede ver en la *Figura 60*.

**Tabla 11.** Valores iniciales

EJEMPLOS/VARIABLES	sigci (Mpa)	GSI	mi	D
Dolomita	50	100	4	0

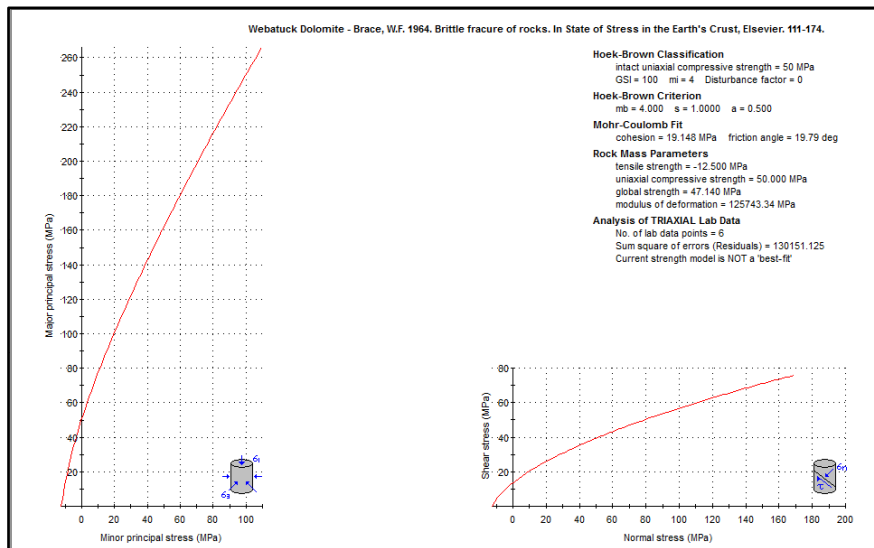
**Fuente:** Software RocData

**Tabla 12.** Valores de esfuerzo normal y esfuerzo de corte para distintos GSI's.

GSI=100		GSI=88		GSI=80		GSI=74		GSI=65	
Normal stress	Shear stress	Normal stress	Shear stress	Normal stress	Shear stress	Normal stress	Shear stress	Normal stress	Shear stress
-5	0	-2,02319108	0	-1,106831473	0	-0,704068555	0	-0,35720302	0
-5	0	-2,02319108	0	-1,106831473	0	-0,704068555	0	-0,35720302	0
-1,869240837	6,601504436	0,958763896	5,664228225	1,798835272	5,13221889	2,148529708	4,765420111	2,416486644	4,25425499
1,014746708	10,59206842	3,670305883	9,018945323	4,416078524	8,12575698	4,699024129	7,511485962	4,868502894	6,6598102
3,768222208	13,87920498	6,244065336	11,75807801	6,890508651	10,5547978	7,103385831	9,729215188	7,170729426	8,58910153
6,428891677	16,7606768	8,721837434	14,14496786	9,266948356	12,662858	9,408681413	11,64808931	9,373315698	10,2512546
9,017149487	19,36501519	11,12583936	16,29273369	11,5689041	14,5540785	11,63932211	13,36586144	11,50180821	11,7347467
11,54600189	21,76294282	13,470048	18,26334043	13,8110109	16,2852892	13,81037941	14,93570184	13,57177035	13,0874422
14,02453078	23,99871379	15,76411251	20,0954047	16,00328627	17,8917881	15,93209962	16,39054358	15,59367031	14,3388543
16,4594601	26,10236561	18,01510704	21,81504038	18,15302111	19,3973741	18,01189742	17,75253692	17,57501607	15,5087564
18,85597778	28,09547162	20,22844266	23,44093885	20,265757	20,819036	20,0538056	19,03745995	19,52144265	16,6111865
21,21821173	29,99418616	22,4083917	24,98705242	22,34584478	22,1694249	22,0669326	20,25703928	21,43732563	17,6565472
23,54952603	31,81100073	24,55841166	26,46413847	24,39678777	23,458273	24,05006949	21,42028071	23,32615379	18,6528065
25,85271535	33,55582456	26,68135653	27,88070745	26,42146457	24,6932645	26,00767005	22,53428339	25,19076869	19,6062305
28,1301381	35,23668378	28,77962071	29,24363511	28,42228019	25,8805959	27,94213182	23,60476396	27,03352543	20,5218544

Fuente. Autores

**Figura 59.** Caso de estudio Dolomite Triaxial Data.

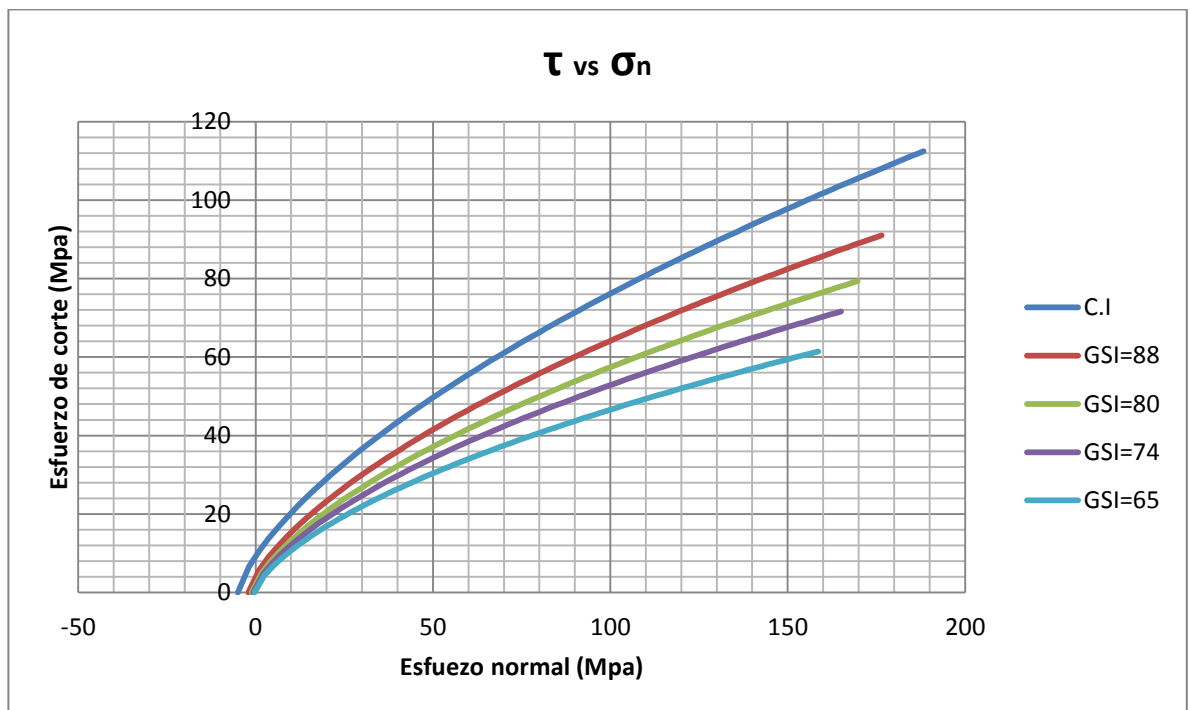


Fuente: Software RocData

**6.2.1.1 Evaluación de variables.** Se realizó un análisis de sensibilidad para las siguientes variables

- **GSI:** Es el índice de resistencia geológica. En *la Figura 60* se presenta una sensibilización en cuanto al GSI para el caso de estudio Dolomita triaxial, este parámetro fue alterado de sus condiciones iniciales para los cuales el GSI tomo valores en orden descendente de 100, 88, 80,74 y 65, para cada uno de estos casos el comportamiento de resistencia o línea de falla varia, de tal forma que la pendiente disminuye a medida que el GSI es menor, señalando que a mayor pendiente mayor AFI (ángulo de fricción interna) garantizando así una mayor resistencia para la roca dentro del rango de GSI de 70 a 100 generando una alta calidad geotécnica y por ende una mayor estabilidad del macizo rocoso.

**Figura 60.** Sensibilización: Variación del GSI.



Fuente. Autores

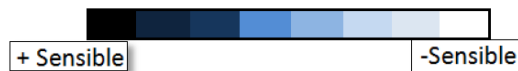
- **mi:** Este parámetro siempre debe variar entre un tipo de litología y otro ya que existe un rango de **mi** para cada macizo rocoso, como es nuestro caso que tenemos dolomita aplica a carbonatos razón por la cual este parámetro no se puede variar. Señalando que a medida que el grano de la roca sea mayor, la resistencia de este será mejor.
- **D:** Tiene en cuenta el grado de alteración que haya sufrido el macizo rocoso por varios efectos, en nuestros casos se observa que ambos tienen un  $D=0$  lo cual indica que los resultados de alteración será mínima en cuanto al macizo rocoso por este motivo se decidió no alterar este parámetro ya que con  $D=0$  indica que no tiene alteraciones. Lo ideal para una formación es que la calidad de este sea muy buena ante alguna alteración y los dos macizos presentan esta característica. Si empieza a aumentar este parámetro es evidente que la resistencia del macizo será baja.

De acuerdo al anterior análisis se recomienda el siguiente screening para Hoek-Brown (ver tabla 13):

**Tabla 13.** Screening para Hoek-Brown.

CRITERIO DE FALLA	ESFUERZOS PRINCIPALES	PARAMETROS				
						
		SH	Sh	mb	S	a
HOEK-BROWN	$\sigma_1, \sigma_3$					

Fuente. Autores



Bajo estas condiciones se garantiza teóricamente que cualquier alteración que se le haga al macizo rocoso, este será levemente alterado, y tanto  $\sigma_3'$  como  $\sigma_1'$  mantendrán valores óptimos para resistir cualquier fractura.

**6.2.2 Screening Mohr-Coulomb.** A diferencia de Hoek-Brown los parámetros que tiene en cuenta Mohr-Coulomb son: la cohesión **c** y el ángulo de fricción interna  $\phi$ . Se tomó nuevamente el ejemplo (Dolomite Triaxial Data *ver tabla 14*) por medio de los cuales se hará un análisis de estos parámetros y que efectos tendrían en la resistencia de la roca. Se alteraran algunas variables partiendo de las condiciones iniciales que presenta el software las cuales se pueden observar en la *tabla 15* y su respectivo comportamiento de resistencia como se puede observar en la *Figura 61*. Este facilita manipular la data en Excel, razón por la que se generó una tabla de datos de esfuerzo normal y esfuerzo de corte para distintos ángulos como se muestra en la *tabla 15* con los cuales se realizó una sensibilización como se puede ver en la *Figura 62*.

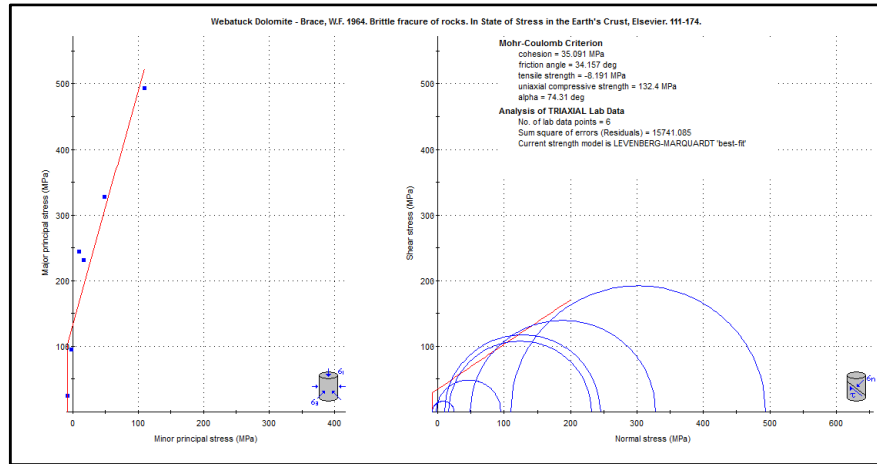
**Tabla 14.** Valores iniciales de los parámetros.

EJEMPLOS/VARIABLES	c Mpa	$\phi^\circ$
Dolomita	35,091	34,157

Fuente: Software RocData

Como se observa en la *figura 61*, se presenta el gráfico que modela el comportamiento de este criterio de acuerdo a los valores iniciales arrojados por el software:

**Figura 61.** Caso de estudio Dolomite.



Fuente: Software RocData

**Tabla 15.** Valores de esfuerzo normal y esfuerzo de corte para distintos AFI (ángulo de fricción interna) para el caso de estudio Dolomita Triaxial.

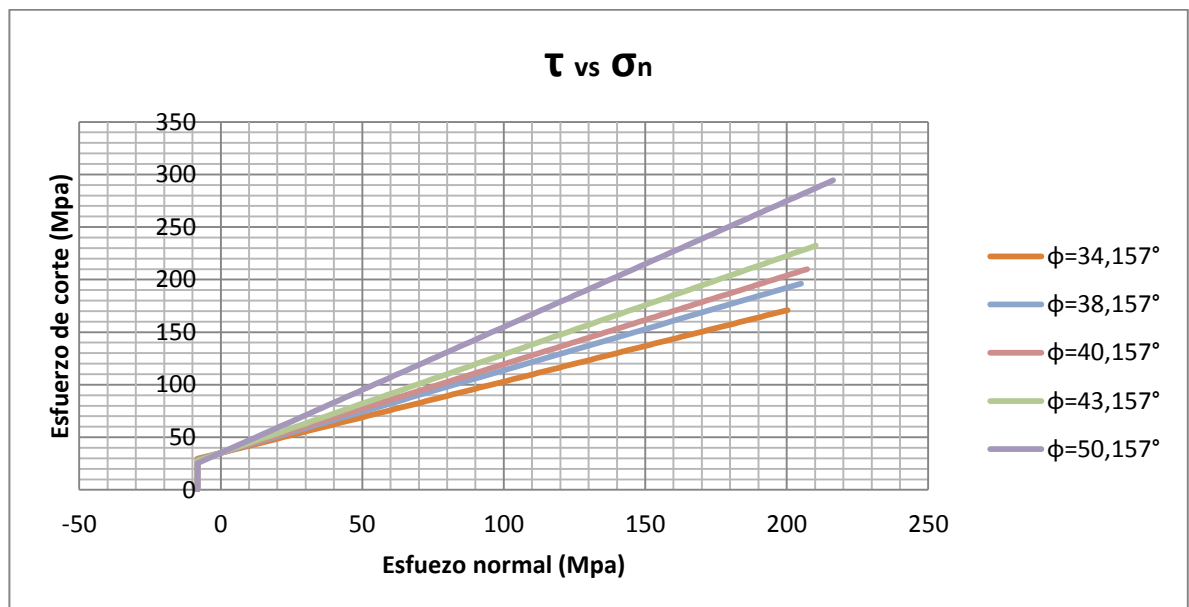
$\phi = 34,157^\circ$		$\phi = 38,157^\circ$		$\phi = 40,157^\circ$		$\phi = 43,157^\circ$		$\phi = 50,157^\circ$	
Normal stress	Shear stress	Normal stress	Shear stress	Normal stress	Shear stress	Normal stress	Shear stress	Normal stress	Shear stress
-8,191	0	-8,191	0	-8,191	0	-8,191	0	-8,191	0
-8,191	29,533384	-8,191	28,65526668	-8,191	28,17959892	-8,191	27,41069905	-8,191	25,2748458
18,12577357	47,38938716	16,28683997	47,88769866	15,32426816	48,0213093	13,82981501	48,05854259	10,12822406	47,2287376
20,0036075	48,66350264	18,23244824	49,41637843	17,30242614	49,69043923	15,85501382	49,95747268	12,25420548	49,7765293
21,88144142	49,93761812	20,17805651	50,9450582	19,28058412	51,35956915	17,88021264	51,85640277	14,38018691	52,324321
23,75927535	51,2117336	22,12366478	52,47373796	21,2587421	53,02869907	19,90541145	53,75533286	16,50616834	54,8721126
25,63710927	52,48584907	24,06927305	54,00241773	23,23690008	54,697829	21,93061027	55,65426295	18,63214976	57,4199043
27,5149432	53,75996455	26,01488132	55,5310975	25,21505806	56,36695892	23,95580908	57,55319304	20,75813119	59,9676959
29,39277712	55,03408003	27,96048959	57,05977726	27,19321604	58,03608885	25,98100789	59,45212313	22,88411261	62,5154876
31,27061105	56,30819551	29,90609785	58,58845703	29,17137402	59,70521877	28,00620671	61,35105322	25,01009404	65,0632793
33,14844498	57,58231098	31,85170612	60,1171368	31,149532	61,37434869	30,03140552	63,24998331	27,13607547	67,6110709
35,0262789	58,85642646	33,79731439	61,64581657	33,12768998	63,04347862	32,05660434	65,14891341	29,26205689	70,1588626
36,90411283	60,13054194	35,74292266	63,17449633	35,10584796	64,71260854	34,08180315	67,0478435	31,38803832	72,7066542

Fuente. Autores

**6.2.2.1 Evaluación de variables.** Se realizó un análisis de sensibilidad para las siguientes variables

**$\phi$ :** Este es el único parametro bajo el cual los esfuerzos normales y de corte varían ya que este proporciona la dirección de la ruptura. Se puede observar en la Figura 61, para el caso de Dolomita que los círculos sobrepasan la línea de fractura lo que indica que se encuentra en zona de falla algo no conveniente para el macizo, en la figura 62 se observa que a medida que el ángulo (AFI) aumenta, la pendiente de este es mayor, lo que garantiza que las embolventes queden por debajo de la línea de falla, lo que es lo ideal, lo cual se consiguió para un AFI=50,157 como se puede ver en la figura 63 algo muy favorable para el análisis de estabilidad, lo que indica que abra mayor resistencia de esta formación.

**Figura 62.** Sensibilización para cada AFI (ángulo de fricción interna).

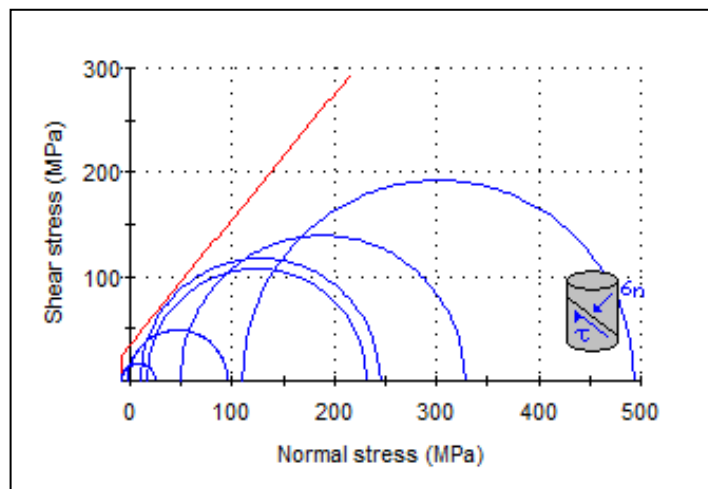


Fuente. Autores

**C:** la cohesion es unica para cada tipo de formacion, por lo mismo no varia y dentro del software se mantiene constante.

De acuerdo al analisis anteriormente realizado se propone un screening para el caso de Mohr-Coulomb en el cual se confirma que los resultados del estudio realizado en el capitulo 5 coinciden con los resultados arrojados por el software RocData, el cual se puede observar en la *tabla 15* donde se concluye que la variable mas sensible en cuanto a parametros alterados es el  $S_H$  y el menos sensible es el  $S_h$ :


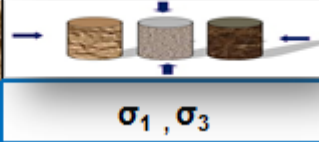
**Figura 63.** Línea de falla (criterio de Mohr-Coulomb) por encima de las envolventes para un  $AFI= 50,157^\circ$ .



**Fuente.** Software RocData

De acuerdo al anterior análisis se recomienda el siguiente screening para Mohr-Coulomb (ver tabla 16):

**Tabla 16.** Screening para Mohr-Coulomb.

CRITERIO DE FALLA	ESFUERZOS PRINCIPALES	PARAMETROS			
					
MOHR-COULOMB	$\sigma_1, \sigma_3$	SH	Sh	C	$\varphi$

Fuente. Autores



En cuanto a los criterios de falla Modificado de Lade y Ducker-Prager no se realizó el screening ya que estos son criterios tridimensionales y el software solo maneja criterios de falla bidimensionales.

## 7. CONCLUSIONES

- Analizando los resultados en cuanto al criterio de falla Hoek-Brown, al aumentar el GSI el esfuerzo principal mayor aumenta lo que significa que el macizo rocoso puede soportar una carga bastante alta dependiendo del valor del GSI, si este se encuentra en el rango de 70-100 se puede decir que es de buena calidad geotécnica.
- D, es un factor reductor de la resistencia que depende del grado de alteración que haya sufrido el macizo rocoso por varios efectos. Al observar los resultados a medida que el factor D aumenta, el esfuerzo principal mayor disminuye, puesto que el macizo está muy alterado y es poco lo que este puede soportar. Lo ideal sería que el D tendría un valor de cero ya que indica que el macizo rocoso no tiene ninguna alteración. Además el factor D penaliza más a los terrenos con bajos índices GSI que a los macizos con mayor índice.
- AFI ( $\varphi$ ) es el único parámetro bajo el cual los esfuerzos normal y de corte varían en cuanto al criterio de falla Mohr-Coulomb ya que este proporciona la dirección de la ruptura. Este ángulo define, si la línea de falla está por encima o por debajo de las envolventes lo que indica que por debajo de la línea de falla se encuentra el dominio elástico y por encima de esta línea se encuentra el estado de rotura. Este ángulo se mide en sentido contrario al de las manecillas del reloj en una compresión tomándose como positivo mientras en una tensión el ángulo se mide en el sentido de las manecillas y se toma como negativo.

- Las variables que afectan en mayor proporción a los criterios de falla son las relacionadas con los parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción interna), otras variables son la presión de poro, los diferentes regímenes de esfuerzos, la medida de esfuerzos de campo ( $S_v$ ,  $S_H$ ,  $S_h$ ) aunque el esfuerzo vertical principal,  $S_v$  es casi insensible a los criterios al igual que las propiedades elásticas (modulo de Young), este ultimo es conocido a priori por no afectar la distribución de esfuerzos en la pared del pozo.
  
- Estos Screening mejorarán la reducción de un riesgo futuro, para el análisis de estabilidad del pozo, mediante la identificación de los parámetros más importantes para un criterio de falla y un régimen de esfuerzo dado. Mejorará la gestión de la integridad del pozo, con lo que aumenta la eficiencia y la reducción de los costos de perforación entre otras mejoras.
  
- En la practica de buscar posibles soluciones a los problemas de inestabilidad de pozo y disminuir los costos de operacion, se habla de la existencia de una variedad de modelos o criterios de falla extensamente usados en la mecanica de suelos y algunos de ellos nombrados en la industria petrolera como lo son: los criterios de Hoek - Brown, Mohr - Coulomb, Druker - Prager y Modificado de Lade.
  
- Es importante tener en cuenta que los criterios de falla por compresión buscan identificar mediante los esfuerzos, bajo qué condiciones falla la roca, es decir, predecir la respuesta de la roca a las cargas impuestas en ella. Señalando que el uso de diferentes criterios de falla puede llevar a resultados significativamente diferentes dependiendo según el grado de

aplicabilidad en la industria, según los esfuerzos principales a considerar y según el efecto que tiene cada uno bajo los esfuerzos.

- Los criterios de falla más utilizados en la industria petrolera son: Mohr-Coulomb, Drucker-Prager y Modificado de Lade. El criterio de Hoek- Brown difiere de los demás porque no tiene en cuenta el efecto de la cohesión y el ángulo de fricción interna en un macizo rocoso, por esta razón no tiene aplicabilidad en la industria del petróleo, contrario a la ingeniería civil en donde si tiene gran aplicabilidad para el caso de túneles que son macizos rocosos duros.
- La inestabilidad de pozo es un serio problema debido a que puede incrementar los costos en las tareas de perforación, completamiento y producción, problemas tales como ensanchamientos del pozo, pegas de tubería, dificultad en la corrida de registros, derrumbes, etc. Para prevenir estos problemas es recomendable realizar un estudio de esfuerzos in situ antes, durante y después de la perforación, conociendo las propiedades de las rocas, su resistencia y los límites. Estos problemas son resueltos gracias a la aplicación de la geomecánica lo que hizo que la industria petrolera se enfocara y comenzara a implementar estudios de mecánica de roca por medio de esta disciplina aplicada al yacimiento con lo que se ha desarrollado nuevas técnicas para la medida de los esfuerzos in situ a partir de los pozos.

## 8. RECOMENDACIONES

Para un próximo trabajo de grado sobre este tema se debe tener en cuenta las siguientes sugerencias:

- Trabajar con datos de campo (pruebas de laboratorio sobre núcleos) para determinar las propiedades mecánicas y parámetros de resistencia de formaciones de estudio con el fin de obtener datos más reales y así realizar pruebas de sensibilidad de estos parámetros a los criterios de falla, estableciendo cuál de ellos tiene mayor efecto en la inestabilidad de pozos.
- Para futuros trabajos, consideramos necesario tener como ayuda un software que modele el comportamiento de cada criterio según el cambio de variables y mirar la comparación entre estos.
- Debido a la escasa de información con respecto a las propiedades mecánicas de las formaciones en yacimientos no convencionales. Se recomienda buscar buenas fuentes de información como núcleos, registros, experiencia de perforación entre otras, obteniendo una caracterización geomecánica más completa de estas formaciones.
- Estar actualizando información conceptual en cuanto a geomecánica aplicada a la estabilidad de pozo, permitiendo estar a la vanguardia de la tecnología en esta disciplina y así contemplar la posibilidad de involucrar nuevos criterios de falla como el criterio Friccional de Zoback, el criterio de Barton-Bandis, el de Tresca, el criterio de Von Mises, Mogi-Coulomb, etc, que puedan ser aplicados a la industria del petróleo.

## BIBLIOGRAFIA

1. ALI A. Garrouch y ABDULLAH S. Ebrahim. Evaluación de la estabilidad de los pozos inclinados. SPE California. 2001.
2. ANTICO, Federico y PEZZOTTI, Santiago. Círculo De Mohr: Para el cálculo de tensiones principales en el plano y el espacio. Universidad Nacional de La Plata. 2008.
3. CONTROLS. Equipo de ensayo para la industria de la construcción [en línea] [http://www.controls-group.com/...php/url...45\\_es.../nomefile=45\\_es.pdf](http://www.controls-group.com/...php/url...45_es.../nomefile=45_es.pdf) [citado el 23 de Julio de 2012]
4. CORONEL, Iván y MATEUS, Darwin. Evaluación de los mecanismos de falla que conducen a la inestabilidad de pozo. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 2004.
5. CORZO, Reinel y RINCON, Claudio. Medición y evaluación de la magnitud y dirección de los esfuerzos in-situ en campo. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 2004.
6. DEFORMABILIDAD Y RESISTENCIA DE LOS SUELOS. La resistencia de los suelos. Conceptos básicos. Grupo Geotecnia. Universidad de Cantabria. 2008.

7. D. GALLEGO, Eutiquio. Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with-elastic material models. Tesis, Madrid. 2006.
8. E. FJAER, RM, HOLT,P. HOURSUDA.MRAAEN Y R.RISNES. Petroleum Related Rock Mecchanics 2nd edition.
9. E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum. El criterio de rotura de Hoek-Brown - - University of Minnesota, RocScience Inc.
- 10.EVERT, Hoek y CARRANZA, Carlos. Hoek-Brown Failure Criterion. Itasca Consulting Group Inc- Rocscience Inc., Toronto, Canada. 2002.
- 11.NESHELI, Babak Akbarnejad. ROCK MECHANICS ASPECTS OF BLOWOUT, Tesis, Texas A&M University, 2006.
- 12.OSISANYA, S. Practical guidelines for predicting sand production. En society of Petroleum Engineers SPE 136980, 2010, 2P.
- 13.PABON, Eduard y OBEID, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cusiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 2004.

14. PAWEL A. Nawrocki. Critical Wellbore Pressures Using Different Rock Failure Criteria. Paper. ISRM International, India. 2010.
  
15. PORTAL UPCOMMONS. Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas.[enlínea]<http://www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6529/7/06.pdf>Similares> [citado el 19 de Julio de 2012]
  
16. ROJAS G y SILVIO H. Análisis de estabilidad en macizos rocosos aplicando el criterio de rotura de Hoek y Brown. Universidad de Los Andes. Venezuela. 2009.
  
17. RUSSELL T. Ewy. Wellbore-Stability Predictions by Use of a Modified Lade Criterion. Paper SPE 56862, 1999.
  
18. TERAN, Claudia. Acoplamiento de un modelo de flujo de fluidos y geomecánica con el análisis de estabilidad mecánica de pozos en yacimientos naturalmente fracturados. Aplicación a un caso colombiano. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 2006.
  
19. TRAN, Minh H. and Abousleiman, Younane N. The Impacts of Failure Criteria and Geological Stress States on the Sensitivity of Parameters in Wellbore Stability Analysis. Paper, ARMA 10-328, 2010.