

**Evaluación de los modos de falla breakout y exfoliación en la pared del pozo  
mediante simulación numérica y pruebas de laboratorio**

**Miguel Fernando Palencia Muñoz**

**Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería de Hidrocarburos**

**Director(a):**

**Zuly Himelda Calderón Carrillo**

**Ph.D. Ingeniería Química**

**Codirectores:**

**Jenny Mabel Carvajal, Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos**

**Darwin Mateus Tarazona, Magíster en Ingeniería Civil**



**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Petróleos  
Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos  
Bucaramanga**

**2018**

## **Agradecimientos**

*El autor extiende sus agradecimientos a:*

*Dios por ser quien guía cada uno de mis pasos.*

*A mis padres y hermana que han sido un pilar fundamental en todos mis logros y creer siempre en mí.*

*A Laurita por su apoyo incondicional, comprensión y aliento.*

*La Universidad Industrial de Santander, a la Escuela en Ingeniería de Petróleos, docentes y compañeros de maestría por todo el apoyo brindado, por permitirme conocer personas con gran calidad profesional y humana.*

*El grupo de investigación de Estabilidad de Pozo por la oportunidad de elaborar este trabajo.*

*La Doctora Zuly Calderón, la Ingeniera Jenny Carvajal, los Ingenieros Néstor Saavedra, Darwin Mateus, Yair Quintero, Julio Forero, Ludwing López y demás profesionales del grupo de investigación de Estabilidad de Pozos y del Instituto Colombiano de Petróleos por sus consejos y guía durante el desarrollo del trabajo.*

*Al Instituto Colombiano de Petróleo ICP, por su disponibilidad en el uso de laboratorios y equipos necesarios para el desarrollo de la investigación.*

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	17
1.1. Objetivo General .....	17
1.2. Objetivos Específicos .....	17
2. Marco teórico .....	18
2.1. Mecanismos de falla en un pozo .....	19
2.2. Modos de falla por esfuerzo de corte (compresión) .....	20
2.3. Modos de falla por tensión .....	21
2.4. Cavings.....	21
2.4.1. Cavings tabulares .....	22
2.4.2. Cavings angulares .....	23
2.4.3. Cavings splintered o astillosos .....	23
2.5. Modelos analíticos para análisis de esfuerzos y deformación.....	24
2.5.1. Modelo de Kirsch.....	25
2.5.2. Solución analítica para estabilidad de pozo .....	30
2.6. Modelo constitutivo del material.....	34
2.6.1. Modelo lineal elástico .....	34
2.6.2. Modelo Poroelástico.....	36
2.7. Software Abaqus .....	39
3. Priorización de variables que influyen en los modos de falla breakout y exfoliación .....	44
3.1. Breakout .....	44
3.1.1. Relación entre los breakout y magnitud de los esfuerzos .....	46
3.2. Exfoliación .....	48
3.3. Selección de variables influyentes y aplicación de la metodología MICMAC .....	50
4. Selección prueba para análisis de fallas tipo breakout y exfoliación .....	56
4.1. Ensayos de cilindros de pared gruesa.....	56
4.2. Diseño experimental.....	58
4.3. Preparación muestras de cemento .....	61
4.4. Caracterización mecánica de las muestras .....	66
4.5. Ensayos de compresión uniaxial y triaxial .....	71
4.5.1. Ensayos de compresión uniaxial y análisis con microscopio HIROX .....	73

5.	Modelo analítico para deformación plana en ABAQUS .....	81
5.1.	Evaluación de los esfuerzos y deformaciones que generan las fallas a compresión y tensión aplicando el modelo analítico de kirsch en ABAQUS. ....	82
6.	Simulación de las fallas tipo breakout y exfoliación en un modelo 3D .....	93
6.1.	Análisis condiciones de esfuerzos que generan las fallas tipo breakout .....	98
6.2.	Análisis condiciones de esfuerzos que generan las fallas tipo exfoliación .....	105
7.	Análisis deformación y correlación con morfología de cavings .....	124
8.	Conclusiones .....	126
9.	Recomendaciones.....	128
10.	Referencias bibliográficas .....	130

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Códigos relaciones directas (Fuente: Cely, 1999).....	52
Tabla 2. Porcentajes de motricidad .....	54
Tabla 3. Porcentajes de dependencia.....	54
Tabla 4. Variables seleccionadas .....	55
Tabla 5. Niveles de factores (Datos tomado de Uchida et al., 2014). .....	59
Tabla 6. Variables escogidas para el ensayo .....	60
Tabla 7. Diferentes configuraciones de pruebas a realizar.....	60
Tabla 8. Componentes para Mezcla de 1m <sup>3</sup> .....	61
Tabla 9. Caracterización de la arena. ....	61
Tabla 10. Componentes para Mezcla de 46 Litros.....	62
Tabla 11. Porosidad por inyección capilar .....	71
Tabla 12. Datos para determinación del módulo elástico .....	72
Tabla 13. Modelos de estabilidad de pozo .....	81
Tabla 14. Propiedades del Material.....	82
Tabla 15. Propiedades del Material (Fuentes: García, 2006; Zoback, 2007; Zamora, 2016).....	83
Tabla 16. Condiciones de carga (Fuentes: García, 2006; Zoback, 2007; Zamora, 2016). ....	83
Tabla 17. Sensibilidad del mallado analizando deformación.....	85
Tabla 18. Datos modelo breakout 3D (Fuentes: García, 2006; Zoback, 2007; Zamora, 2016). ....	94
Tabla 19. Regímenes de esfuerzos (Fuente: García, 2006);.....	99
Tabla 20. Datos modelo exfoliación 3D (Fuentes: García, 2006; Zoback, 2007; Zamora, 2016). .	105

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Relación entre magnitudes de esfuerzos y régimen de falla (Fuente: Zoback et al., 2007). .....	19
Figura 2. Modos de falla por esfuerzo de corte (Tomado de Chen et al., 1996). ....	20
Figura 3. Modos de falla por tensión (Tomado de Chen et al., 1996). ....	21
Figura 4. Forma de un caving tabular (Tomado de Bradford et al., 2000). ....	22
Figura 5. Forma de un caving angular (Tomado de Bradford et al., 2000). ....	23
Figura 6. Forma de un caving splintered (Tomado de Bradford et al., 2000). ....	24
Figura 7. Esquema del problema de Kirsch (Tomado de Susca et al., 2007). ....	25
Figura 8. Estado biaxial de carga problema de Kirsch (Tomado de Susca et al., 2007). ....	27
Figura 9. Diagrama para un pozo inclinado (Tomado de Ostadhassan, et al., 2014). ....	31
Figura 10. Deformación inducida por esfuerzos uniaxiales. (Fuente: Fjaer et al., 2008). ....	34
Figura 11. Componentes de un modelo en Abaqus (Fuente: Abaqus documentation 6.11). ....	39
Figura 12. Familia de elementos (Fuente: Abaqus documentation 6.11). ....	43
Figura 13. Elementos según orden de interpolación (Fuente: Abaqus documentation 6.11). ....	43
Figura 14. Esquema de un breakout (Tomado de Tianshou et al., 2015). ....	45
Figura 15. Esquema parámetros breakout (Tomado de Fjaer et al., 2008). ....	47
Figura 16. Representación gráfica de una falla por Exfoliación (Tomado de Chen et al., 1996). ....	50
Figura 17. Matriz de relaciones directas (Fuente: Cely, 1999). ....	53
Figura 18. Gráfico de Relaciones Directas.....	55
Figura 19. Núcleo para ensayos de cilindros de pared gruesa (Fuente: Alsayed et al, 2002). ....	57
Figura 20. Sección cilindro hueco de pared gruesa sometido a carga axial, presión interna y externa. Esquema de ensayo utilizando la celda de Hoek (Fuente: Alsayed et al, 2002). ....	58
Figura 21. Variable críticas (Fuente: Uchida et al., 2014). ....	59
Figura 22. Muestras.....	61
Figura 23. Mezclado y fraguado de las muestras .....	63
Figura 24. Extracción y pulido de las muestras.....	64
Figura 25. Muestras con Bentonita al 1.5% .....	65
Figura 26. Muestras con Bentonita al 3% .....	65
Figura 27. Pruebas de indentación y esclerómetro.....	66
Figura 28. Resultados módulos de Young de pruebas de indentación.....	67
Figura 29. Resultados de dureza superficial obtenidos en pruebas de indentación.....	68
Figura 30. Módulos de Young promedio de muestras seleccionadas .....	69

Figura 31. Dureza superficial promedio de muestras seleccionadas.....	69
Figura 32. Módulo de indentación muestras seleccionadas .....	70
Figura 33. Esfuerzo Axial vs. Deformaciones muestra ID 201146690.....	72
Figura 34. Montaje ensayos uniaxiales .....	73
Figura 35. Módulo de Young ensayos uniaxiales .....	74
Figura 36. UCS muestras de cemento .....	75
Figura 37. Falla por cizalla muestra convencional 1.5% Bentonita ID 201146710.....	75
Figura 38. Falla por cizalla muestra convencional 3% Bentonita ID 201150462.....	76
Figura 39. Fallas en muestra TWC 1.5% Bentonita ID 201150455.....	77
Figura 40. Fallas en muestra TWC 1.5% Bentonita ID 201150459.....	78
Figura 41. Fallas en muestra TWC 1.5% Bentonita ID 201150461.....	78
Figura 42. Fallas en muestra TWC 3% Bentonita ID 201150466.....	79
Figura 43. Fallas en muestra TWC 3% Bentonita ID 201171837.....	80
Figura 44. Geometría de placa analizada .....	82
Figura 45. Tipo de elementos utilizados en el modelo (Fuente: Abaqus documentation 6.11). .....	84
Figura 46. Selección y refinado del mallado.....	84
Figura 47. Sensibilidad de la malla analizando deformación.....	86
Figura 48. Modelo 1 deformación plana .....	87
Figura 49. Modelo 1 deformación plana .....	88
Figura 50. Esfuerzos radiales utilizando elementos de primer orden.....	89
Figura 51. Esfuerzos tangenciales utilizando elementos de primer orden .....	89
Figura 52. Deformación .....	90
Figura 53. Esfuerzos radiales utilizando elementos de segundo orden .....	91
Figura 54. Esfuerzos tangenciales utilizando elementos de primer orden .....	91
Figura 55. Valores de esfuerzos radiales, tangenciales y ecuaciones de Kirsch para modelos 1 y 2 en dirección “X” ( $\theta = 0^\circ$ ). .....	92
Figura 56. Valores de esfuerzos radiales, tangenciales y ecuaciones de Kirsch para modelos 1 y 2 en dirección “Y” ( $\theta = 90^\circ$ grados). .....	93
Figura 57. Cargas y condiciones de frontera modelo 3D .....	94
Figura 58. Mallado modelo 3D .....	95
Figura 59. Comparación esfuerzos radiales modelo plano y 3D.....	96
Figura 60. Comparación esfuerzos tangenciales modelo plano y 3D .....	96
Figura 61. Valores de esfuerzos radiales, tangenciales y ecuaciones de Kirsch para modelo 3D en dirección “Y” ( $\theta = 90^\circ$ grados). .....	97

Figura 62. Modelo Breakout .....	98
Figura 63. Esfuerzo radial régimen normal $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ .....	99
Figura 64. Esfuerzo tangencial régimen normal $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ .....	100
Figura 65. Deformación plástica equivalente régimen normal $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ .....	100
Figura 66. Esfuerzo radial régimen transcurrente $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ .....	101
Figura 67. Esfuerzo tangencial régimen transcurrente $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ .....	102
Figura 68. Deformación plástica equivalente régimen transcurrente $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ .....	102
Figura 69. Esfuerzo radial régimen inverso $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ .....	103
Figura 70. Esfuerzo tangencial régimen inverso $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ .....	103
Figura 71. Deformación plástica equivalente régimen inverso $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ .....	104
Figura 72. Esfuerzos $\sigma_r$ y $\sigma_\theta$ modelo exfoliación régimen normal en condición de balance.....	106
Figura 73. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen normal $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición de balance .....	106
Figura 74. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen normal $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición de balance .....	107
Figura 75. Esfuerzos $\sigma_r$ y $\sigma_\theta$ modelo exfoliación régimen en condición de balance.....	108
Figura 76. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen transcurrente $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición de balance.....	108
Figura 77. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen transcurrente $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición de balance.....	109
Figura 78. Esfuerzos $\sigma_r$ y $\sigma_\theta$ modelo exfoliación régimen inverso en condición de balance .....	110
Figura 79. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen inverso $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición de balance.....	110
Figura 80. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen inverso $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición de balance.....	111
Figura 81. Esfuerzos $\sigma_r$ y $\sigma_\theta$ modelo exfoliación régimen normal en condición overbalance .....	112
Figura 82. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen normal $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición overbalance.....	113
Figura 83. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen normal $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición overbalance.....	113
Figura 84. Esfuerzos $\sigma_r$ y $\sigma_\theta$ modelo exfoliación régimen transcurrente en condición overbalance .....	114
Figura 85. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen transcurrente $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición overbalance .....	115

Figura 86. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo  
 régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición overbalance ..... 115

Figura 87. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen inverso en condición overbalance..... 116

Figura 88. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo  
 régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición overbalance ..... 116

Figura 89. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo  
 régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición overbalance ..... 117

Figura 90. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$  en condición  
 underbalance ..... 118

Figura 91. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo  
 régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición underbalance ..... 118

Figura 92. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo  
 régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición underbalance ..... 119

Figura 93. Esfuerzos radial y tangencial modelo exfoliación régimen transcurrente en condición  
 underbalance ..... 119

Figura 94. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo  
 régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición underbalance ..... 120

Figura 95. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo  
 régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición underbalance ..... 121

Figura 96. Esfuerzos radial y tangencial modelo exfoliación régimen inverso en condición  
 underbalance ..... 121

Figura 97. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo  
 régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición underbalance ..... 122

Figura 98. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo  
 régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición underbalance ..... 123

Figura 99. Análisis de deformación nodal para correlación con la morfología de cavings ..... 124

Figura 100. Análisis de nodo para su correlación con la morfología de cavings ..... 125

## Resumen

**Título:** Evaluación de los modos de falla breakout y exfoliación en la pared del pozo mediante simulación numérica y pruebas de laboratorio.\*

**Autor:** Miguel Fernando Palencia Muñoz\*\*

**Palabras Claves:** Breakout, exfoliación, elementos finitos, Abaqus, cavings.

### Descripción:

Reducir los tiempos no productivos durante la perforación, relacionados con problemas de estabilidad de pozo es de gran importancia para la industria de los hidrocarburos; por lo que, un buen análisis geomecánico, en el cual se estudien los mecanismos que generan los modos de falla breakouts y exfoliación en la cara del pozo, es esencial para determinar los controles adecuados que ayudaran a mitigar problemas de estabilidad durante la perforación. Por tal razón, este trabajo de investigación busca evaluar las condiciones en que los breakouts y la exfoliación puedan ser originados por otros modos de fallas a los reportados por la literatura.

Con este estudio se espera contribuir con una mayor comprensión de los fenómenos físicos que originan las fallas por breakouts y exfoliación en la cara del pozo, e indirectamente un mejor ajuste y calibración en los modelos geomecánicos, que permitan disminuir costos en el control de problemas de inestabilidad durante la perforación y definir una mejor trayectoria a perforar. Por tal motivo se evaluará el comportamiento de las fallas tipo breakout y exfoliación bajo los tres regímenes de esfuerzo, normal, transcurrente e inverso, así como la dirección en la que actúan y las condiciones en las que se generan.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director(a): Ph.D. Zuly Calderón Carrillo. Codirectores: MSc. Jenny Carvajal, MSc Darwin Mateus.

## Abstract

**Título:** Evaluation of breakout and exfoliation failure in the borehole wall by numerical simulation and laboratory tests.\*

**Autor:** Miguel Fernando Palencia Muñoz\*\*

**Palabras Claves:** Breakout, exfoliation, finite elements, Abaqus, cavings.

### Descripción:

Reduce non-productive times during drilling, related to wellbore stability problems is of great importance for the hydrocarbon industry; Therefore, a good geomechanical analysis, in which the mechanisms that generate the failure modes breakouts and exfoliation in the face of the well are studied, is essential to determine the adequate controls that will help to mitigate problems of stability during the drilling. For this reason, this research work seeks to evaluate the conditions in which breakouts and exfoliation can be originated by other failure modes to those reported by the literature.

With this study it is expected to contribute with a greater understanding of the physical phenomena that originate the breakouts and exfoliation faults in the face of the borehole, and indirectly a better adjustment and calibration in the geomechanical models, that allow to reduce costs in the control of problems of instability during drilling and define a better trajectory to drill. For this reason, the behavior of the breakout and exfoliation faults will be evaluated under the three stress, normal, transient and inverse regimes, as well as the direction in which they act and the conditions in which they are generated.

---

\* Graduation Project.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director(a): Ph.D. Zuly Calderón Carrillo. Codirectores: MSc. Jenny Carvajal, MSc Darwin Mateus.

## Introducción

En la actualidad, el 40% de los tiempos no productivos (NPT) durante la perforación están relacionados con problemas de presión de poro y estabilidad de pozos, este porcentaje representa un costo anual a nivel mundial de 8 billones de dólares por año<sup>1</sup>. Para controlar este problema es necesario realizar un análisis geomecánico del régimen de esfuerzos que actúa en la vecindad del pozo, las propiedades mecánicas de la formación, la presión de poro y la trayectoria del pozo. Este análisis servirá para definir los parámetros a controlar para mejorar la estabilidad del pozo, como propiedades y densidad del lodo, tasa de perforación y configuración del ensamble de fondo.

Para un mejor conocimiento del modelo geomecánico, es importante estudiar los modos de falla de un pozo, los cuales se clasifican por esfuerzos de corte (fallas tipo breakout, tórica, helicoidal y alargada) o por esfuerzos de tensión (fallas por exfoliación y fractura hidráulica). Las fallas más comunes asociadas a estos regímenes de esfuerzo son los breakout y la exfoliación. Aunque la literatura asocia los breakout a fallas por cizalla cercanas a la vecindad del pozo, en rocas frágiles es la tensión local, la que puede originar la falla. Este análisis ha sido reportado en pocos estudios como los publicados por: Brudy y Zoback (1993), Germanovich et al (1994) y Hedayat et al (2014). También durante el monitoreo on site de estabilidad se ha registrado la presencia de cavings (derrumbes) tipo splintered asociados a

---

<sup>1</sup> Dodson, J et al. (January 2009). Technologies needed to meet deepwater business needs. En Offshore Magazine.

fallas por tensión (exfoliación) en regiones no sobre presionadas, indicando que estos pueden ser generados por otros mecanismos de falla a los establecidos en la literatura.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, este proyecto de investigación se enfoca en la evaluación de las condiciones y variaciones de esfuerzos que puedan originar las fallas por breakouts y exfoliación, y la relación que puede existir entre estas fallas con la morfología de los cavings angulares y splintered.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Evaluar los modos de falla breakout y exfoliación en la pared del pozo mediante simulación numérica y pruebas de laboratorio.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Priorizar las variables más influyentes de los modos de falla breakout y exfoliación, analizando las condiciones de esfuerzos que los generan.

Reproducir estos modos de falla en el laboratorio a través de ensayos representativos en mecánica de rocas, utilizando muestras sintéticas o de afloramientos, mediante un diseño experimental.

Representar un modelo analítico para deformación plana utilizando un simulador numérico para analizar los esfuerzos y deformación que se pueden producirse alrededor de un pozo, utilizando como modelo base un orificio circular en una placa delgada.

Simular numéricamente las variaciones de esfuerzos que puedan representar las fallas tipo breakout y exfoliación en un modelo 3D, analizando la deformación del pozo y la posible relación con la morfología de los cavings.

Evaluar las condiciones de falla que generan los cavings tipo angular y splintered, y su relación con los modos de falla breakout y exfoliación, a partir de los resultados obtenidos por pruebas de laboratorio y simulación numérica.

## 2. Marco teórico

La clave para comprender un modelo geomecánico es conocer el estado actual de los esfuerzos en la roca a perforar. Las fallas durante la perforación ocurren porque los esfuerzos concentrados en la cara del pozo superan la resistencia de la roca, y su magnitud se encuentra en función de la profundidad, presión de poro y procesos geológicos activos. Por lo tanto, un esfuerzo principal es generalmente normal a la superficie de la tierra,  $S_v$ , el cual está relacionado con la presión de sobrecarga (overburden), y los otros dos esfuerzos actúan en un plano horizontal,  $S_{Hmax}$  y  $S_{Hmin}$ , según Anderson (1951), citado por Zoback (2007)<sup>2</sup>.

De acuerdo a la relación que existe entre los esfuerzos principales, Anderson definió tres tipos de falla: falla normal donde  $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ ; falla rumbo deslizante (strike – slip) donde  $S_{Hmax} > S_v > S_{Hmin}$  y falla inversa (reverse) donde  $S_{Hmax} > S_{Hmin} > S_v$ ; tal como se ilustra en la figura 1.

---

<sup>2</sup> Zoback, M.D. (2007). Reservoir Geomechanics. First edition. United Kingdom at the University Press, Cambridge.

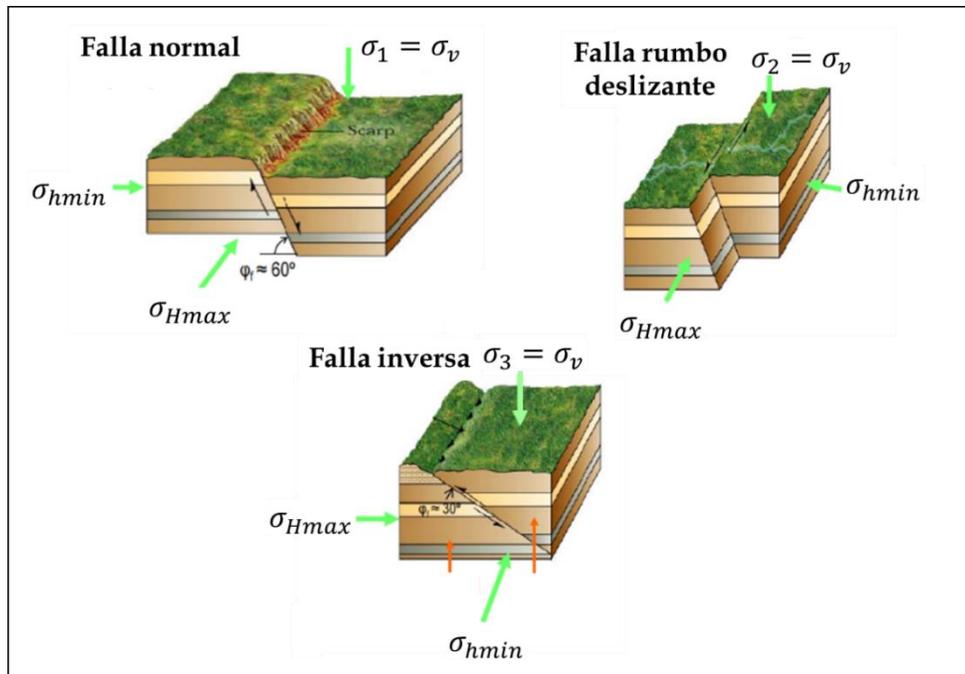


Figura 1. Relación entre magnitudes de esfuerzos y régimen de falla (Fuente: Zoback et al., 2007)

## 2.1. Mecanismos de falla en un pozo

La redistribución de esfuerzos que se origina durante la perforación está relacionada con los mecanismos de falla responsables de la geometría final del pozo (Detournay et al, 1986). Estos modos de falla se originan cuando los esfuerzos en la vecindad del pozo exceden la resistencia a la tensión o la resistencia al corte de la formación<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Chen, X., Tan, C. P., and Haberfield, C. M. (1996, January 1). Wellbore Stability Analysis Guidelines for Practical Well Design. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/36972-MS.

## 2.2. Modos de falla por esfuerzo de corte (compresión)

Las fallas por esfuerzo de corte se presentan en las paredes de un pozo cuando los esfuerzos de compresión exceden la resistencia mecánica de la formación. Este tipo de fallas se clasifica de cuatro maneras (en términos de los esfuerzos principales y en coordenadas cilíndricas): Breakout, Tórica o de corte por hinchamiento, Helicoidal y Alargada, ver figura 2. Las fallas por cizalla: Breakout y Tórica ocurren cuando la presión del lodo no es lo suficientemente alta para soportar las paredes del pozo, mientras que las fallas por Helicoidal y Alargada, se presentan cuando la presión del lodo es excesivamente alta (Chen et al, 1996).

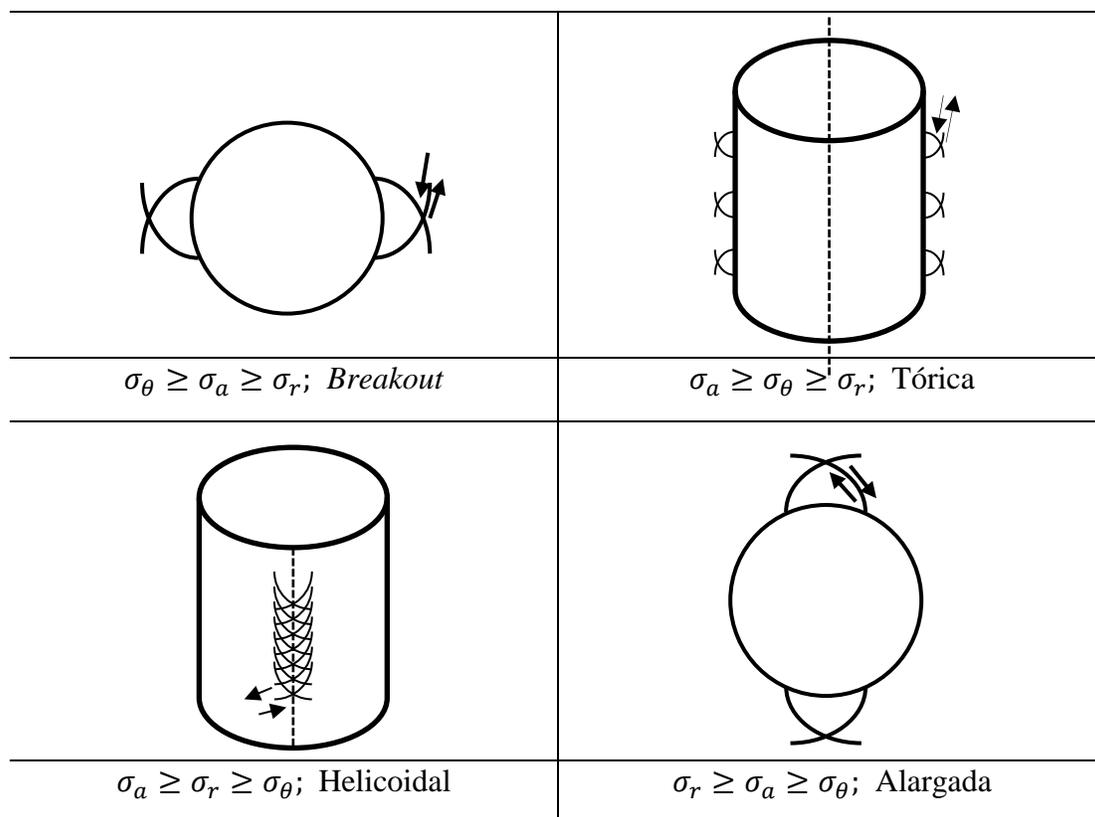


Figura 2. Modos de falla por esfuerzo de corte (Tomado de Chen et al., 1996)

### 2.3. Modos de falla por tensión

Las fallas por tensión se generan en la práctica cuando los esfuerzos por tensión vencen la cohesión de la roca. Este tipo de fallas se clasifica de dos maneras (en términos de los esfuerzos principales y en coordenadas cilíndricas): en fracturas inducidas por una alta densidad en el lodo y en exfoliación originada cuando la presión de poro es más alta que la presión ejercida por el lodo en las paredes del pozo<sup>4</sup>, ver modos en figura 3.

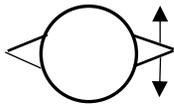
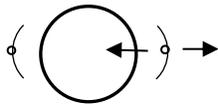
	
$\sigma_{\theta} < \sigma_r; \text{ y } \sigma_{\theta} - P_p < 0;$	$\sigma_r < \sigma_{\theta}; \text{ y } \sigma_r - P_p < 0;$
Fractura Hidráulica	Exfoliación

Figura 3. Modos de falla por tensión (Tomado de Chen et al., 1996)

### 2.4. Cavings

Se define como cavings a cualquier fragmento de roca producto de la inestabilidad de las paredes de un pozo, que alcanzan la superficie por medio de los fluidos de perforación. La morfología de los cavings es de gran importancia para el análisis en tiempo real de la estabilidad en pozo, debido a que permite establecer los posibles mecanismos de falla que están actuando; usualmente su forma puede ser tipo tabular, angular y splintered. Su interpretación no siempre es fácil porque múltiples modos de falla pueden coexistir bajo

<sup>4</sup> Zimmerman, R. W. (2010, Jun 15). Some Rock Mechanics Issues in Petroleum Engineering. International Society for Rock Mechanics.

diferentes circunstancias, además estas morfologías pueden ser afectadas cuando son transportadas hacia superficie por el anular. (Bradford, et al., 2000; Karimi, 2013).

**2.4.1. Cavings tabulares.** Exhiben superficies planas y paralelas, son el resultado de planos preexistentes de debilidad como la estratificación y las fracturas naturales que indican inestabilidad tectónica o estructural. En el caso de las fracturas naturales, la presión del fluido en el anular excede el mínimo esfuerzo horizontal, resultando en la invasión del lodo en la red de fracturas cercana a la cara del pozo. Por otra parte, los planos de debilidad son afectados por una baja densidad del lodo y ángulos de buzamiento mayores de 15 grados, puede inducir fallas masivas a lo largo de los planos de debilidad y estos cavings tienen la característica de tener caras planas y paralelas a la dirección de las capas (Bradford, et al., 2000).



*Figura 4. Forma de un caving tabular (Tomado de Bradford et al., 2000)*

**2.4.2. Cavings angulares.** Presentan formas irregulares y textura de superficie rugosa, sus caras son curvas con estructuras desiguales y superficies que se interceptan en ángulos agudos ( $<90^\circ$ ), su presencia indica concentración de esfuerzos en el pozo que exceden la resistencia compresiva de la formación dando lugar a fallas por cizalla. Cada superficie generada se convierte en una nueva superficie de fractura (Bradford, et al., 2000).



*Figura 5. Forma de un caving angular (Tomado de Bradford et al., 2000)*

**2.4.3. Cavings splintered o astillosos.** Tienen una morfología elongada, son laminados y cóncavos. Muestran dos superficies cercanamente paralelas que pueden exhibir estructura tipo pluma. Son el resultado de zonas sobrepresionadas perforadas en condiciones de sobrebalance (overbalance) y se encuentran relacionados con el astillamiento de la pared del pozo debido a fallas tensiles. Este tipo de cavings se produce comúnmente en los shales (Bradford, et al., 2000).

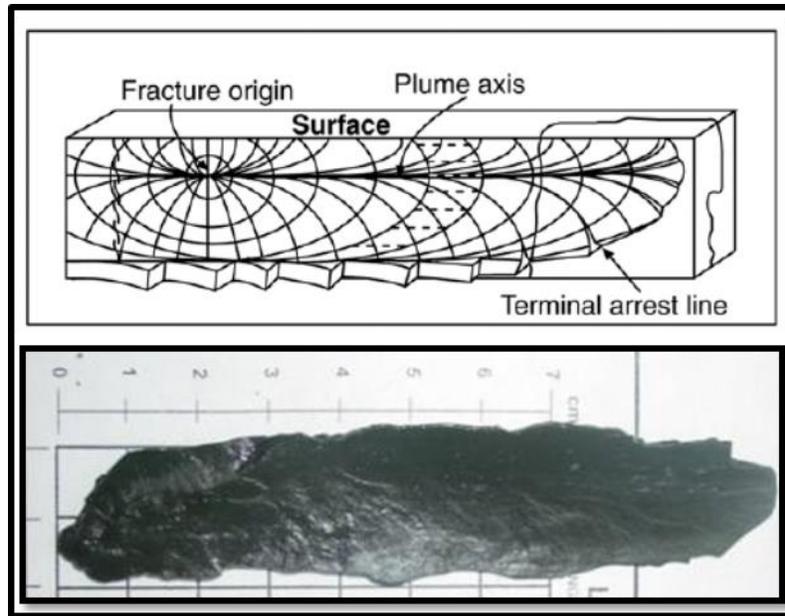
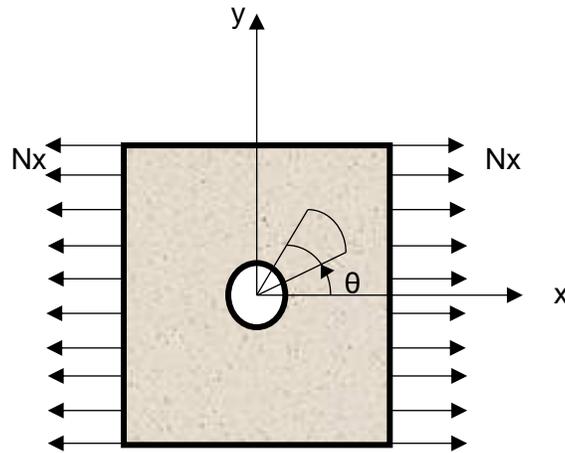


Figura 6. Forma de un caving splintered (Tomado de Bradford et al., 2000)

## 2.5. Modelos analíticos para análisis de esfuerzos y deformación

Con el propósito de evaluar la deformación y redistribución de esfuerzos originadas durante la perforación de la roca, y modelar las condiciones mínimas que deben existir para mantener la estabilidad de la formación y el orificio perforado varios autores han presentado análisis estructurales de esfuerzos para medios elásticos, plásticos, etc. (Lamé, 1852; Kirsch, 1898; Inglis, 1913; Fenner, 1938; Kastner, 1949; Hoek y Brown 1980; Zoback y otros, 1997). Estos trabajos son considerados la base para el posterior desarrollo tridimensional en el análisis numérico. A continuación, se explicarán los dos modelos más usados para el análisis del comportamiento de la deformación en pozos.

**2.5.1. Modelo de Kirsch.** Kirsch planteo un modelo para estudiar la concentración de esfuerzos que se produce en un orificio circular practicado en una placa delgada de dimensiones infinitas, de material isótropo, y sometida a un esfuerzo de tracción uniaxial,  $N_x=N$  en su plano, ver figura 7. Susca et al., 2007 y Cao, et al., 2016.



*Figura 7. Esquema del problema de Kirsch (Tomado de Susca et al., 2007)*

La ecuación diferencial que gobierna el estado plano de esfuerzos junto las condiciones de frontera del sistema es la siguiente:

$$\nabla^4 F = 0; \quad (1)$$

F es la denominada tradicionalmente función esfuerzo, o función de Airy, y en ausencia de fuerzas de volumen, se relaciona con los esfuerzos normales del plano  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  a través de las conocidas expresiones:

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2};$$

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}; \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y};$$

La solución de la ecuación biarmónica, expresión (1), junto con las condiciones de frontera, permite determinar las expresiones de los esfuerzos del plano. Realizando un cambio de coordenadas cartesianas a coordenadas polares,  $r$  y  $\theta$ , se obtienen las expresiones de los esfuerzos radial y tangencial,  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  respectivamente en la forma:

$$\sigma_r = \frac{N}{2h} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{N}{2h} \left( 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta); \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{N}{2h} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{N}{2h} \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta); \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{N}{2h} \left( 1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sen(2\theta); \quad (5)$$

Donde:

$a$  = radio del orificio circular;

$\theta$  = coordenada angular medida en sentido antihorario;

$N$  = esfuerzo uniforme por unidad de longitud aplicada en los bordes;

$r$  = coordenada radial medida desde el centro del orificio al punto escogido;

Cundo la placa se somete un estado biaxial y uniforme de carga en su plano,  $N_x=N_y=N$ .

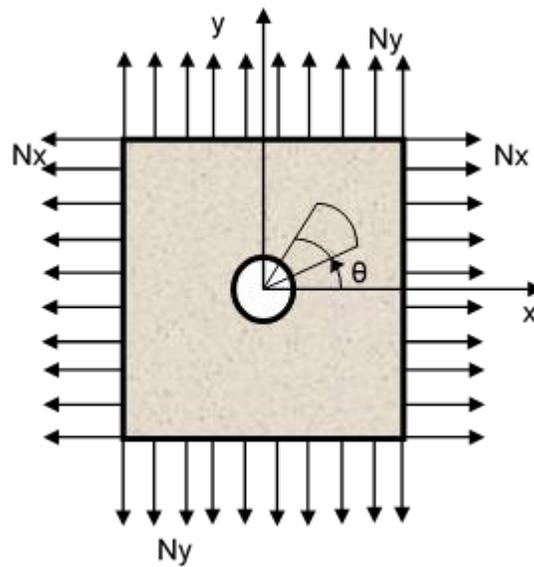


Figura 8. Estado biaxial de carga problema de Kirsch (Tomado de Susca et al., 2007)

Las expresiones resultantes para las componentes del tensor de esfuerzos son:

$$\sigma_r = \frac{N}{h} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right); \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{N}{h} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right); \quad (7)$$

Diversas configuraciones de carga y geometría de orificios están resueltas analíticamente y por métodos aproximados en la bibliografía técnico-científica para materiales isotrópicos. Para formas geométricas particulares, la solución analítica del sistema diferencial se vuelve de difícil obtención o prácticamente imposible. La solución analítica se dificulta aún más, cuando el material empleado, posee características elásticas anisotrópicas. Un caso especial sucede cuando el material de un cuerpo homogéneo tiene tres planos de simetría elástica perpendiculares entre sí que pasan a través de cada punto del dominio. Entonces el material se dice ortótropo (Susca et al., 2007).

Otros autores han analizado la concentración de esfuerzos en medios ortótropos ante diversas geometrías de orificio. (Sánchez, et al., 2003; Maiz, et al., 2004). Para el caso de una placa de material ortótropo, Si las direcciones principales de elasticidad coinciden con los ejes coordenados y no se consideran fuerzas de volumen, la ecuación diferencial gobernante es:

$$\frac{1}{E_2} * \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + \left( \frac{1}{G} - \frac{2\nu_1}{E_1} \right) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1}{E_1} * \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0; \quad (8)$$

Donde:

$F$  = función del tensor de esfuerzos que cumple con las expresiones del numeral (7);

$E_1, E_2$  = módulos de Young en las direcciones principales elásticas “x” e “y”;

$G = G_{12}$  = módulo de elasticidad transversal;

$\nu_1 = \nu_{12}$  = módulo de Poisson que caracteriza la disminución de longitud en la dirección “y” durante la tracción en dirección “x”, y análogamente  $\nu_2 = \nu_{21}$ ;

Debido a la simetría de los materiales ortótropos existe la siguiente relación entre los módulos de Young y los módulos de Poisson, Susca et al., 2007:

$$E_1 * \nu_2 = E_2 * \nu_1; \quad (9)$$

Resolviendo la ecuación diferencial (8) junto con las condiciones de frontera, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sigma_\theta = p \frac{E_a}{E_1} [-k + k(k + n)\cos^2(\theta) + (1 + n)\sin^2(\theta)]; \quad (10)$$

Donde:

$p$  = esfuerzos en las dos direcciones principales;

$\theta$  = ángulo polar medido desde el eje “x” positivo en sentido antihorario;

$E_\theta$  = módulo de Young en la dirección tangente al borde del orificio;

$$K = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}; \quad (11)$$

$$n = \sqrt{2 \left( \frac{E_1}{E_2} - \nu_1 \right) + \frac{E_1}{G}}; \quad (12)$$

**2.5.2. Solución analítica para estabilidad de pozo.** La solución analítica para un pozo vertical para una formación lineal elástica con esfuerzos in situ (conocida como un problema de deformación plana) es como sigue (Yu, 2000).

$$\sigma_r = \frac{P_o}{2} \left[ (1 + K) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1 - K) \left( 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \right] - \frac{P_w a^2}{r^2}; \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_o}{2} \left[ (1 + K) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1 - K) \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \right] - \frac{P_w a^2}{r^2}; \quad (14)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - \mu \frac{4a^2 (1 - K) P_o}{r^2} - \frac{3a^4}{2}; \quad (15)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{P_o}{2} \left[ (1 - K) \left( 1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \text{sen}(2\theta) \right]; \quad (16)$$

$$\tau_{rz} = \tau_{r\theta}; \quad (17)$$

Donde:

$a$  = radio del pozo;

$K$  = coeficiente de presión;

$P_o$  = presión externa del pozo;

$\mu$  = relación de Poisson esfuerzos en las dos direcciones principales;

$E_\theta$  = módulo de Young en la dirección tangente al borde del orificio;

$r$  = coordenada radial medida desde el centro del orificio al punto escogido;

Una solución general para este problema es un pozo desviado (ver figura 9), el cual se resuelve como un sistema de coordenadas locales donde el eje  $z$  es paralelo al eje del pozo y  $x$  es paralelo a la dirección radial del pozo (Fjaer et al, 2008).

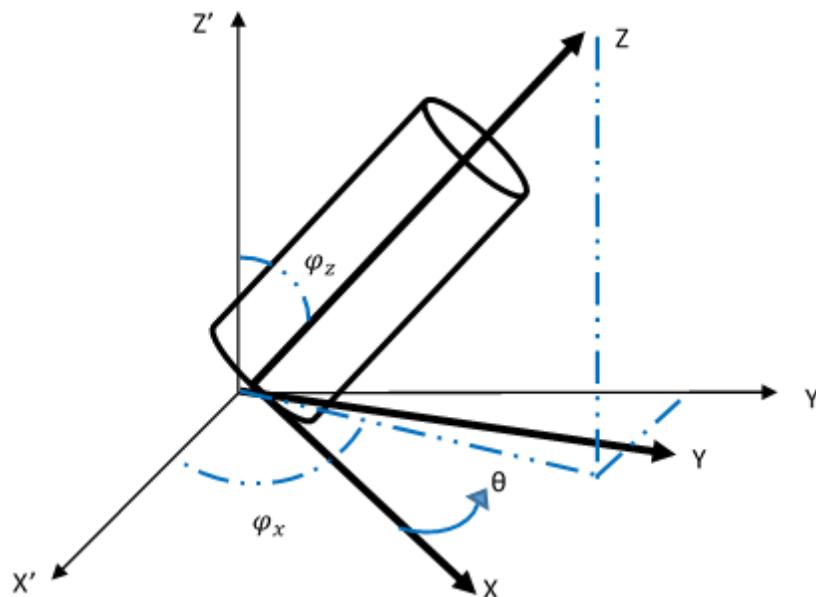


Figura 9. Diagrama para un pozo inclinado (Tomado de Ostadhassan, et al., 2014)

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^0 \\ \sigma_y^0 \\ \sigma_z^0 \\ \sigma_{xy}^0 \\ \sigma_{yz}^0 \\ \sigma_{xz}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx'}^2 & I_{xy'}^2 & I_{xz'}^2 \\ I_{yz'}^2 & I_{yy'}^2 & I_{yz'}^2 \\ I_{zx'}^2 & I_{zy'}^2 & I_{zz'}^2 \\ I_{xx'}I_{yx'} & I_{xy'}I_{yy'} & I_{zz'}I_{yz'} \\ I_{yx'}I_{zx'} & I_{zy'}I_{yy'} & I_{zz'}I_{yz'} \\ I_{yx'}I_{zx'} & I_{zy'}I_{yy'} & I_{zz'}I_{xz'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_H \\ \sigma_h \\ \sigma_v \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} I_{xx'} & I_{xy'} & I_{xz'} \\ I_{yx'} & I_{yy'} & I_{yz'} \\ I_{zx'} & I_{zy'} & I_{zz'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_x \cos\varphi_z & \sin\varphi_x \cos\varphi_x & -\sin\varphi_z \\ -\sin\varphi_x & \cos\varphi_x & 0 \\ \cos\varphi_x \cos\varphi_z & \sin\varphi_x \cos\varphi_x & \cos\varphi_z \end{bmatrix}; \quad (19)$$

Donde:

$\varphi_x$  = ángulo azimut;

$\sigma_H, \sigma_h, \sigma_v$  = campo de esfuerzos;

$\varphi_z$  = ángulo de inclinación del pozo;

$\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0, \tau_{xy}^0, \tau_{yz}^0, \tau_{xz}^0$  = coordenadas locales del campo de esfuerzos;

A continuación, se presentan la solución analítica del campo de esfuerzos tomada de Fjaer et al, 2008:

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \left( \frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2} \right) \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) + \left( \frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \right) \left( 1 + 3 \frac{r^4}{a^4} - 4 \frac{r^2}{a^2} \right) \cos(2\theta) \\ & + \tau_{xy}^0 \left( 1 + 3 \frac{r^4}{a^4} - 4 \frac{r^2}{a^2} \right) \sin(2\theta) + \frac{P_w r^2}{a^2}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\sigma_{\theta} = \left( \frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2} \right) \left( 1 + \frac{r^2}{a^2} \right) - \left( \frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \right) \left( 1 + 3 \frac{r^4}{a^4} \right) \cos(2\theta) - \tau_{xy}^0 \left( 1 + 3 \frac{r^4}{a^4} \right) \operatorname{sen}(2\theta) - \frac{P_w r^2}{a^2}; \quad (21)$$

$$\tau_{r\theta} = \left( \frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \right) \left( 1 - 3 \frac{r^4}{a^4} + 2 \frac{r^2}{a^2} \right) \operatorname{sen}(2\theta) + \tau_{xy}^0 \left( 1 - 3 \frac{r^4}{a^4} - 4 \frac{r^2}{a^2} \right) \cos(2\theta); \quad (22)$$

$$\tau_{\theta z} = \left( -\tau_{xy}^0 \operatorname{sen}(\theta) + \tau_{yz}^0 \cos(\theta) \right) \left( 1 + 2 \frac{r^2}{a^2} \right); \quad (23)$$

$$\tau_{rz} = \left( \tau_{xz}^0 \cos(\theta) + \tau_{yz}^0 \operatorname{sen}(\theta) \right) \left( 1 - 2 \frac{r^2}{a^2} \right); \quad (24)$$

Donde:

$\sigma_z$  = esfuerzo axial;

$\sigma_r$  = esfuerzo radial;

$\sigma_{\theta}$  = esfuerzo tangencial;

$a$  = radio del pozo;

$\theta$  = ángulo del máximo esfuerzo horizontal;

$\sigma_{\theta}$  = radio del pozo;

## 2.6. Modelo constitutivo del material

Los modelos constitutivos del material son las expresiones que describen la relación matemática entre el esfuerzo al que se encuentra sometida la roca y su tasa de deformación. Aunque existen diversos modelos como los elastoplásticos, viscoelásticos, elastoviscoplasticos, entre otros, el más aplicado es el modelo lineal elástico, por su menor complejidad en la cantidad de parámetros, tomado de Fjaer et al., 2008.

**2.6.1. Modelo lineal elástico.** La teoría lineal elástica se ocupa de las situaciones en las que hay una relación lineal entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes (Fjaer et al., 2008). Aunque la mayoría de las rocas se comportan de manera no lineal cuando se somete a grandes esfuerzos, su comportamiento puede ser descrito por las relaciones lineales para cambios en los esfuerzos.

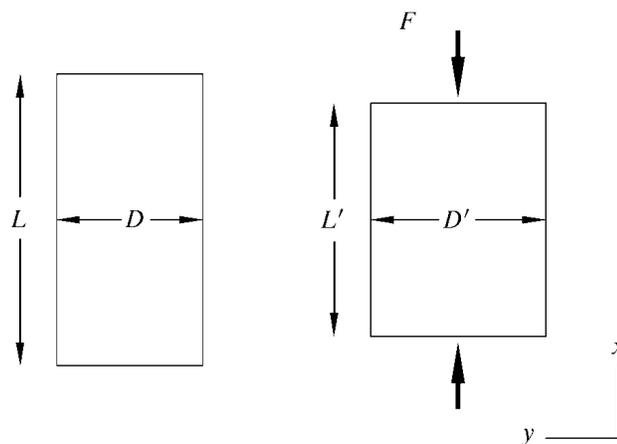


Figura 10. Deformación inducida por esfuerzos uniaxiales. (Fuente: Fjaer et al., 2008)

En una muestra de longitud  $L$ , con área de sección transversal  $A=D^2$ , ver figura 10. se aplica una fuerza  $F$  y se obtiene las siguientes expresiones, la longitud de la muestra se reduce hasta  $L'$ . El esfuerzo aplicado en dirección  $x$ ,  $\sigma_x = F/A$ ; y la correspondiente deformación es  $\varepsilon_x = (L - L')/L$ ; si la muestra se comporta linealmente, existirá una relación entre  $\sigma_x$  y  $\varepsilon_x$ , conocida como la ley de Hooke, donde el coeficiente  $E$  se denomina módulo de Young, tomado de Fjaer et al., 2008.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x; \quad (25)$$

Otra consecuencia de aplicar el esfuerzo,  $\sigma_x$ , es un incremento en el ancho  $D$  de la muestra, la deformación lateral es  $\varepsilon_y = \varepsilon_z = (D - D')/D$ , a partir de esta expresión se obtiene la relación de Poisson, tomado de Fjaer et al., 2008.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}; \quad (26)$$

Para un material homogéneo, isotrópico y lineal elástico, las relaciones constitutivas para las rocas, para esfuerzos normales y por cizalla son:

$$\sigma_x = (\lambda + 2G)\varepsilon_x + \lambda\varepsilon_y + \lambda\varepsilon_z; \quad (27)$$

$$\sigma_y = \lambda \varepsilon_x + (\lambda + 2G)\varepsilon_y + \lambda \varepsilon_z; \quad (28)$$

$$\sigma_z = \lambda \varepsilon_x + \lambda \varepsilon_y + (\lambda + 2G)\varepsilon_z; \quad (29)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}; \quad (30)$$

$$\tau_{zx} = G\gamma_{zx}; \quad (32)$$

Otros módulos elásticos son; constante de Lamé  $\lambda$ ; módulo de rigidez  $G$ ; módulo volumétrico  $K$ ; deformación al corte  $\gamma_{xy}$ , tomado de Fjaer et al., 2008.

**2.6.2. Modelo Poroelástico.** Las rocas por naturaleza en su estructura interna presentan grietas y poros, que se encuentran saturados por uno o más fluidos, los cuales tiene una gran influencia sobre el comportamiento mecánico de las rocas (Jaeger et al., 2007). Muchos análisis en mecánica de rocas no tienen en cuenta las fuerzas que puedan ejercer los fluidos dentro de la roca, asumiendo que la presión de la formación es independiente de la deformación. Cuando se incluye en el modelo elástico, la influencia de la porosidad y los fluidos contenidos, el modelo se vuelve poroelástico. Para este modelo se considera una roca porosa con un volumen total  $V_b$ , que es igual a la suma del volumen del espacio poroso  $V_p$ , más el volumen de las componentes minerales o matriz, tomado Jaeger et al., 2007.

$$V_b = V_m + V_p; \quad (33)$$

$$\phi = \frac{V_p}{V_m}; \quad (34)$$

Según Zimmerman et al, (1986), citado por Jaeger et al., (2007), existen dos volúmenes y presiones independientes que pueden actuar sobre la roca, que son ( $V_b$  y  $V_p$ ), la presión de poro  $P_p$  y la presión externa de confinamiento  $P_c$ , de tal forma que se pueden definir cuatro compresibilidades, que permiten relacionar los cambios de  $P_p$  y  $P_c$  con la deformación volumétrica  $\varepsilon_v$  (cambios en el volumen poros,  $V_p$  y en el volumen total,  $V_b$ ).

$$\begin{aligned} C_{bc} &= \frac{-1}{V_b^i} \left( \frac{\delta V_b}{\delta V_c} \right)_{P_p}; & C_{bp} &= \frac{-1}{V_b^i} \left( \frac{\delta V_b}{\delta V_p} \right)_{P_c} \\ C_{pc} &= \frac{-1}{V_p^i} \left( \frac{\delta V_b}{\delta V_c} \right)_{P_p}; & C_{pp} &= \frac{-1}{V_p^i} \left( \frac{\delta V_p}{\delta V_p} \right)_{P_c} \end{aligned} \quad (35)$$

Las expresiones que relacionan las deformaciones y los coeficientes de compresibilidad para las diferentes condiciones de presión de poro y de confinamiento son:

$$\varepsilon_b = \frac{dV_b}{V_b} = (C_m - C_b)dP_p + C_b dP_c; \quad (36)$$

$$\varepsilon_p = \frac{dV_p}{V_p} = C_m dP_p + \frac{1}{\phi} (C_b - C_m)(dP_c + dP_p); \quad (37)$$

Donde  $C_m$  es la compresibilidad de la matriz rocosa y  $C_b$  es la compresibilidad total.

Por otro lado, el coeficiente de Skempton (B), es un parámetro elástico hidrostático, el cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\delta P_p}{dP_c}\right)_{\text{sin drenaje}} = B = \frac{C_p}{C_p - C_f} = \frac{1}{1 + \frac{C_f}{C_p}}; \quad (38)$$

Donde  $C_f$  representa la compresibilidad del fluido. El coeficiente de Skempton (B) varía entre 0 y 1.

Coeficiente de Biot ( $\beta$ ), también es conocido como el coeficiente del esfuerzo efectivo

$$C_b = \frac{1}{V_b} \frac{dV_b}{[dP_c - (1 - \frac{C_m}{C_b}) dP_p]}; \quad (39)$$

$$\beta = \left(1 - \frac{C_m}{C_b}\right); \quad (40)$$

La anterior deducción de Biot supone que no hay cambio de porosidad bajo variaciones equivalentes de presión de poro y presión de confinamiento. De otra manera, si se considera el comportamiento drenado y no drenado de la roca, se debe utilizar la siguiente expresión.

$$\beta = \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1 - 2\nu)(1 + \nu_u)}; \quad (41)$$

Donde  $\nu_u$  y  $\nu$  corresponden a la relación de Poisson en condiciones no drenadas y drenadas respectivamente y  $B$  es el coeficiente de Skempton.

## 2.7. Software Abaqus

ABAQUS es un programa CAE de cálculo por elementos finitos, proporciona soluciones de análisis y simulación 3D por elementos finitos, para realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, dinámicos incluyendo simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, térmicos, acoplamientos acústico-estructurales, mecánica de fluidos, piezoeléctricos entre otros.

Un modelo de simulación en ABAQUS se realiza de acuerdo con los módulos requeridos, en los cuales se define el tipo de análisis, cargas y salidas requeridas.

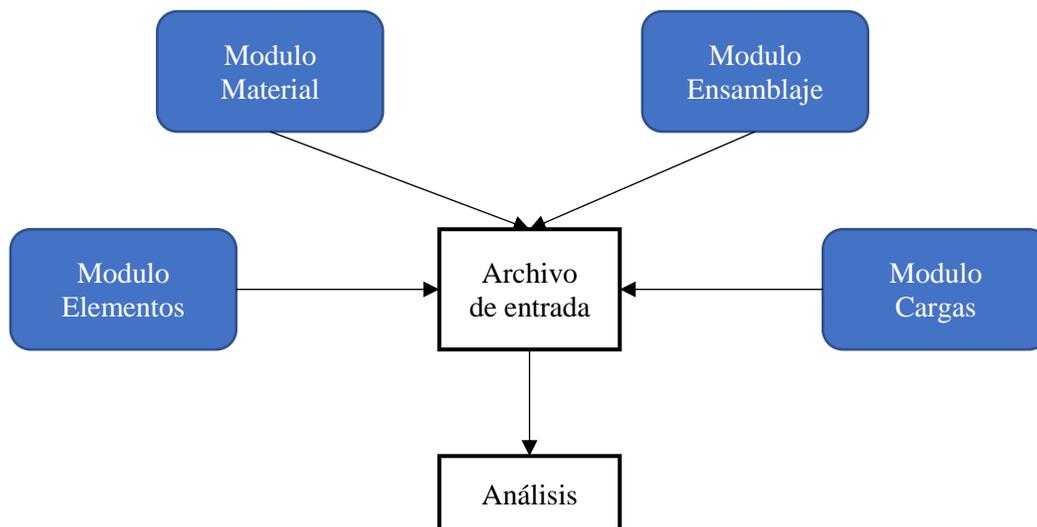


Figura 11. Componentes de un modelo en Abaqus (Fuente: Abaqus documentation 6.11).

### **Módulo de partes o elementos**

Las partes son los bloques constructores de los modelos y tiene una representación basada en características, que permite ser construida y modificada. Las partes son construidas de una lista de características y parámetros que definen la geometría del modelo. Entre la característica bases se encuentran, planar, extrusión y revolución:

- Planar: Se dibuja la característica en un plano de dibujo 2D.
- Extrusión: Se dibuja el perfil de la característica y luego lo extruye a través de una distancia específica.

Las características que más se ajustan al tema de investigación por lo planteado en los objetivos será las de tipo planar y extrusión.

### **Módulo de propiedades**

En este módulo se puede definir el tipo de materiales, crear y asignar secciones, orientaciones, definir capas compuestas e inercia en una parte. Es posible asignar diferentes propiedades a una parte o región del modelo. En este módulo se escoge el criterio de falla y el tipo de secciones a usar en el modelo que pueden ser:

- Secciones Sólidas: Define las propiedades de las secciones de regiones sólidas 2D, 3D y ejesimétrica
- Sección Sólida Homogénea: Para materiales 2D y 3D, en el caso 3D es necesario especificar el espesor del plano de esfuerzos o del plano de deformaciones.

- Sección de Plano de Deformación Generalizado: Para materiales con espesor y ángulos de cuñas. Este tipo sólo se asigna para regiones planares 2D.

### **Módulo de ensamblaje**

Un modelo puede estar compuesto por varias partes, por lo cual el acoplamiento de las diferentes partes que conforman el modelo se denominan ensamble.

### **Módulo de pasos**

En este módulo se crean los pasos de análisis, se especifican los requerimientos de salida y los controles del análisis. La secuencia de los pasos proporciona una forma conveniente para capturar los cambios en las condiciones de frontera, cargas, en la forma que las partes del modelo interactúan con otras y reproducir el fenómeno de estudio por etapas logrando una mayor fidelidad del proceso.

- Paso Inicial: Abaqus lo crea automáticamente, permite definir las condiciones de frontera, campos predefinidos, e interacciones que se aplican al comienzo del análisis.
- Pasos del Análisis: Están asociados con un procedimiento específico que define el tipo de análisis que se desarrolla durante el modelo, análisis de esfuerzos estáticos o dinámicos, análisis de Esfuerzo/Desplazamiento, estático, transitorio con respuesta del material dependiente del tiempo, campo geoestático de esfuerzos.

### **Módulo de carga**

Las condiciones iniciales, de cargas, de frontera y campos predefinidos son objetos paso-dependientes, lo que significa que se debe especificar los pasos del análisis en los cuales están activos.

### **Módulo de enmallado**

Este módulo permite generar las mallas en partes y ensamblajes creados dentro de Abaqus/Cae. Para realizar un enmallado relativamente aceptable se debe seguir los siguientes pasos:

- Asignar los atributos de la malla y fijar los controles de esta: Se especifica las características de la malla como densidad, forma y tipo de elemento.
- Generar la malla: Se especifica la técnica de enmallado, la cual determina el nivel de control que se tendrá sobre la malla.
- Refinar la malla: Se especifican las semillas, se divide el modelo complejo en varias regiones más simples para obtener mejor calidad de la malla.
- Optimizar la malla: Se pueden asignar reglas de remallado a las regiones del modelo para permitir un sucesivo refinamiento de la malla de acuerdo a los resultados del análisis.
- Verificar la malla: Se verifica la calidad de la malla la cual influye significativamente en la precisión y exactitud de los resultados del análisis.

**Elementos Finitos**

Son los componentes fundamentales de un modelo en Abaqus. Los elementos finitos se caracterizan por tipos de familia y tipos de elementos de acuerdo con el orden de interpolación.

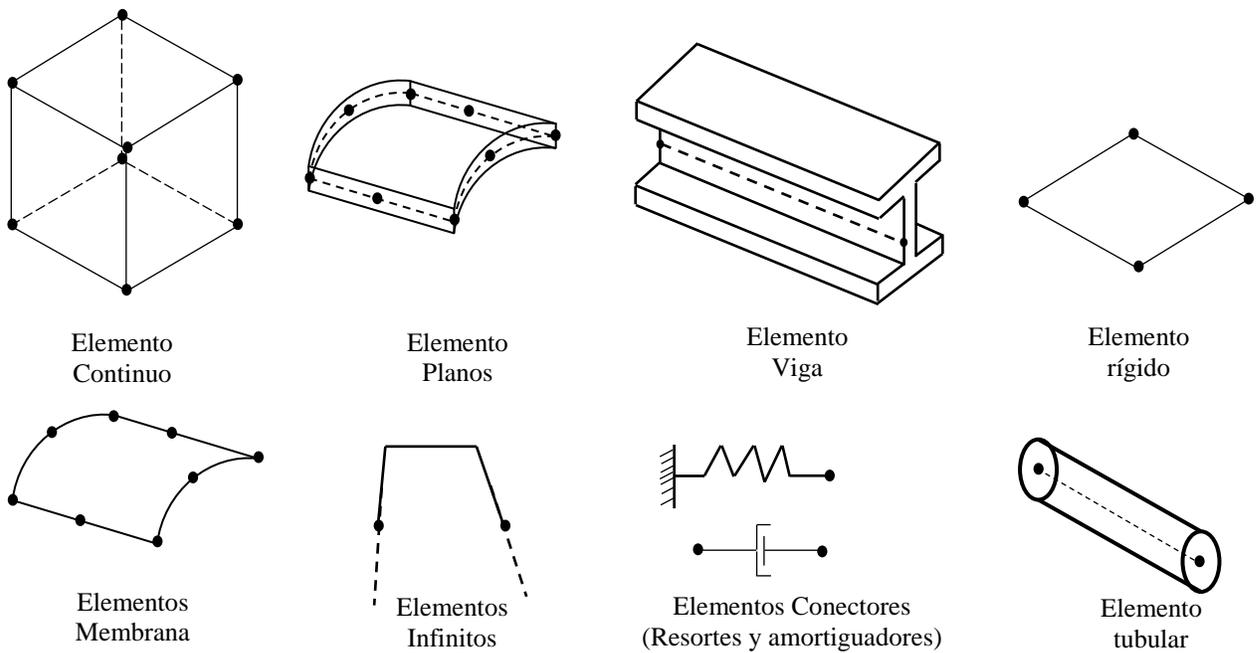


Figura 12. Familia de elementos (Fuente: Abaqus documentation 6.11).

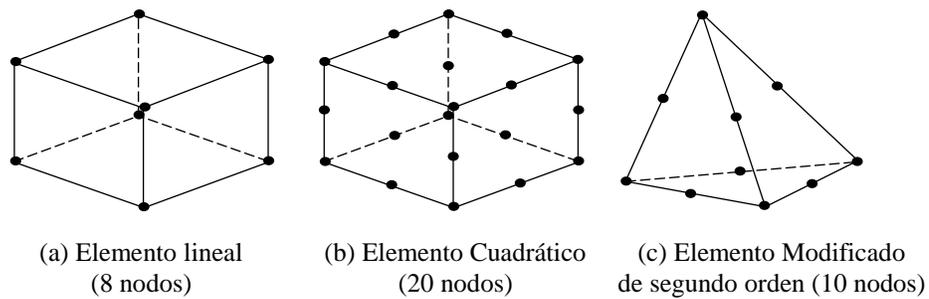


Figura 13. Elementos según orden de interpolación (Fuente: Abaqus documentation 6.11).

## **Módulo de trabajo**

Finalizadas todas las tareas que se incluyen en la definición de un modelo (tales como definir la geometría del modelo, asignar las propiedades de la sección y definir las condiciones iniciales y de frontera y el enmallado del mismo), ABAQUS utiliza un módulo de trabajo para analizar el modelo. Este módulo permite crear un trabajo, enviarlo para su análisis y monitorear su progreso. Si se quiere se pueden crear varios modelos, trabajos, correr y monitorear los trabajos simultáneamente.

### **3. Priorización de variables que influyen en los modos de falla breakout y exfoliación**

Se realizó una revisión bibliográfica de los diferentes estudios asociada a estos modos de falla, realizando una clasificación directa y utilizando la metodología MICMAC (Matriz de Impactos Cruzados - Multiplicación Aplicada a una Clasificación) para determinar las variables más influyentes que genera este tipo de fallas en la cara del pozo.

#### **3.1. Breakout**

Es un fenómeno de ruptura que se presenta en muchos tipos de roca. Se forman en lados opuestos del pozo debido a fallas compresivas en la región del esfuerzo mínimo tangencial cuando la resistencia compresiva de la roca es excedida. Está relacionado con la anisotropía

de esfuerzos, la ovalización del pozo y los cavings tipo angulares observados durante la perforación.

Este modo de falla ocurre cuando el esfuerzo tangencial es máximo y el esfuerzo radial es mínimo,  $\sigma_{\theta} \geq \sigma_a \geq \sigma_r$ . Se debe a que el peso del lodo de perforación es demasiado bajo para mantener las paredes del pozo, lo cual puede traer como consecuencia un colapso del pozo. Esta falla se caracteriza por ser ancha, ángulos de falla entre 30 y 60° generalmente y por lo tanto poco profunda. Se presenta en un plano radial-tangencial debido a que los esfuerzos están orientados en este plano, y su orientación está en dirección del esfuerzo radial (Tianshou et al., 2015).

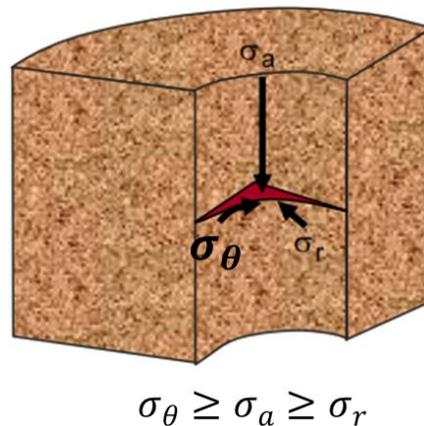


Figura 14. Esquema de un breakout (Tomado de Tianshou et al., 2015).

Los breakouts en la pared del pozo se han utilizado durante muchos años como un indicador del campo de esfuerzos in situ (Bell y Gough, 1983; Shamir y Zoback, 1992; Bois, 2014). Detournay et al, (1986), menciona que cualquier intento de correlacionar el área o volumen de la roca perforada con la magnitud de los esfuerzos in situ, requiere una comprensión completa del mecanismo de falla responsable de la geometría final del pozo.

Hasta ahora la literatura se ha concentrado en analizar y asociar los breakout a fallas por cizalla cercanas a la vecindad del pozo (Zoback et al, 1985; Ong y Roegiers, 1993; Guo et al, 2014; Shahri, 2015).

**3.1.1. Relación entre los breakout y magnitud de los esfuerzos.** Debido a que una medición directa del esfuerzo horizontal máximo no es posible, como si se puede hacer con el esfuerzo vertical o de sobrecarga – (overburden). Autores como Zoback et al, (1985), propusieron un análisis cuantitativo para estimar la magnitud de los esfuerzos. Estudios teóricos y de laboratorio concluyeron que en rocas cuasi-isotrópicas (e.g., sedimentarias), la geometría de los breakouts (profundidad y forma) son relacionadas a la magnitud de los esfuerzos horizontales. Haimson, (1986) declaró que existe potencial en el uso de los breakouts en la estimación de la magnitud de los esfuerzos si las dimensiones de la zona fallada pueden ser determinadas.

Muchos Autores utilizando el criterio de Mohr Coulomb, determinaron expresiones presentadas en las ecuaciones 44 a la 46 relacionadas con la figura 15, las cuales utilizando el ancho de breakout permiten determinar el esfuerzo horizontal máximo, (Zoback et al., 1985; Barton et al., 1988; Fjaer et al., 2008; Walton et al., 2015).

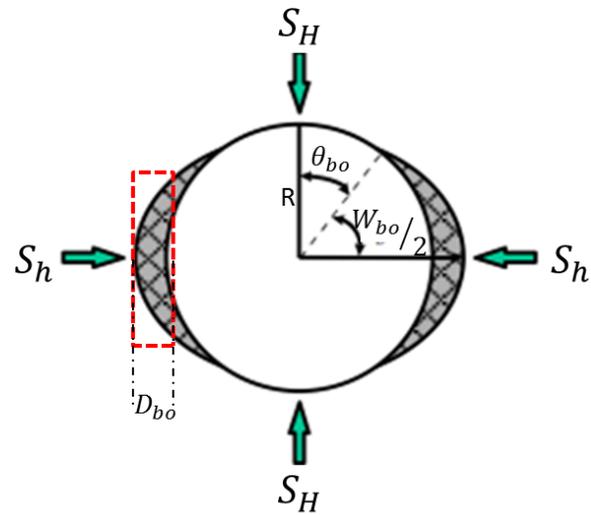


Figura 15. Esquema parámetros breakout (Tomado de Fjaer et al., 2008).

Donde:

$\theta_{bo}$  : Angulo breakout.

$W_{bo}$  : Ancho breakout.

$D_{bo}$  : Profundidad breakout.

$R$  : Radio del pozo.

$$W_{bo} = \pi - 2\theta_{bo} \quad (42)$$

$$D_{bo} = \text{Caliper} - R \quad (43)$$

Expresión propuesta por Zoback (1985):

$$S_H = \frac{(P_w - P_p) \left(1 + \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)}\right) + UCS - S_h(1 + 2 \cos(\pi - \theta_{b0}))}{1 - 2 \cos(\pi - \theta_{b0})} \quad (44)$$

Expresión propuesta por Barton (1988):

$$S_H = \frac{C_o + \Delta P_w + P_p}{1 - 2 \cos(2\theta)} - S_h \frac{1 + 2 \cos(2\theta)}{1 - 2 \cos(2\theta)} \quad (45)$$

Expresión propuesta por Fjaer – Kirsch (2008):

$$S_H = \frac{UCS + P_w + P_p - S_h(1 - 2 \cos 2\theta_b)}{(1 + 2 \cos 2\theta_b)} \quad (46)$$

### 3.2. Exfoliación

El origen de la exfoliación en las rocas ha sido objeto de debate desde la teoría de Gilbert (1904) que relaciona la laminación de la roca con la tensión inducida por la expansión de la roca, en respuesta a la erosión. Debido a la importancia de conocer la deformación y fracturas en las rocas para diseño de excavaciones mineras y perforación de pozos uno de los primeros autores en analizar las fallas por tensión fue Griffith en 1924, estableciendo el criterio que lleva su mismo nombre. La laminación de la roca ha sido atribuida a varias causas incluyendo la tensión local y el alto diferencial de esfuerzos (White, 1946; Holzhausen, 1989). En 1961 Brace presentó pruebas de que las grietas, a partir de las cuales se propaga la fractura en la roca, probablemente se encuentran dentro de los límites de los granos de la roca, incluso en

rocas de origen sedimentario, que exhiben foliación y anisotropía. En el caso de una roca anisotrópica, se pueden visualizar dos sistemas de falla o fractura diferentes: (a) un conjunto de fracturas relativamente grandes orientadas preferentemente, a lo largo de los planos de estratificación; y (b) fracturas orientadas al azar que son probablemente más pequeñas que las fracturas en el plano de estratificación (Hoek, 1964). Posteriormente autores como Cadman (1969), Johnson (1970) y Holman (1976) utilizaron la deformación principal máxima  $\epsilon_1$  para predecir las fallas por exfoliación cuando se supera la deformación crítica  $\epsilon_c$ . Más adelante Holzhausen (1989), indicó que las fallas por exfoliación se propagan en el plano del esfuerzo principal mayor, normal al menor esfuerzo principal en la roca. En 1994 Zoback y en estudios posteriores Aadnoy (2009) y Zhong (2015) hacen referencia sobre la influencia de los planos de debilidad y el buzamiento de las capas en las fallas por exfoliación.

Las fallas por tensión dentro de la roca pueden ser generadas por campos de esfuerzos a tensión y en algunos casos a compresión. Sin embargo, debido a sus orientaciones aleatorias, fracturas preexistentes en la roca y discontinuidades en la roca intacta rara vez son sometidos a tracción pura (Modo I de carga), más bien, son sometidos a un modo mixto de carga (Modo I-II), el cual combina esfuerzos a tensión y compresión (Erarslan, et al., 2013).

La exfoliación se origina cuando la presión de poro es mayor que la presión ejercida por el fluido de perforación en la cara del pozo. en otras palabras, se presenta cuando la presión del lodo es menor que el esfuerzo tangencial,  $\sigma_r < \sigma_\theta$ ; y  $\sigma_r - P_p < 0$ ; (Chen et al., 1996), de tal manera que la fractura no se produce en la pared del pozo sino adentro en la formación como se ilustra en la figura 16. Este tipo de falla da lugar al astillamiento de las paredes del

pozo y a los cavings cóncavos, alargados y con estructura tipo pluma denominados splintered, estos fenómenos han sido observados en rocas shale. En estas fallas influyen los planos de debilidad y el buzamiento de las capas (Aadnoy et al., 2009; Zhong et al., 2015).

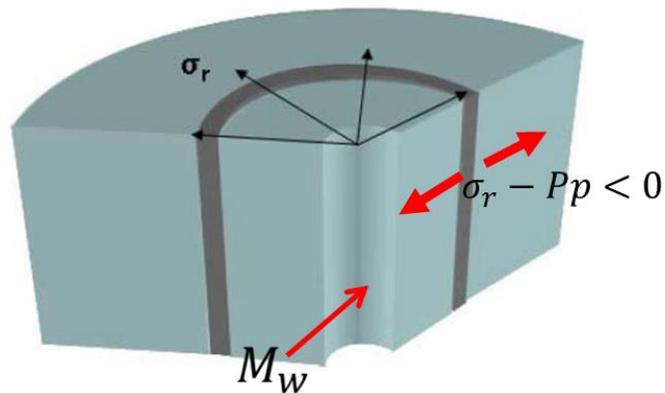


Figura 16. Representación gráfica de una falla por Exfoliación (Tomado de Chen et al., 1996).

### 3.3. Selección de variables influyentes y aplicación de la metodología MICMAC

El análisis de la metodología MICMAC puede ser utilizado para determinar las variables claves en las que se debe basar el estudio y la relación existente entre ellas (CELY, 1999). A continuación, se enuncian las variables que pueden ser estudiadas según su relación con los modos de falla breakout y exfoliación, las cuales fueron determinadas en un análisis preliminar de la revisión bibliográfica.

**Variables:**

- A. Presión de poro
- B. Cohesión de la roca
- C. Ancho breakout
- D. Angulo fricción interna
- E. Peso de lodo
- F. Angulo de breakout
- G. Módulos elásticos
- H. Esfuerzos in situ
- I. Radio del pozo

En la matriz de análisis estructural o matriz MICMAC la motricidad hace referencia al nivel de influencia de una variable sobre las otras, esto depende del impacto que ejerce cada variable sobre las otras, el cual puede ser directo, indirecto y potencial (CELY, 1999). El resultado final del análisis genera una gráfica que se divide en cuatro zonas en las que se ubican las variables de acuerdo con su porcentaje de motricidad y dependencia en el sistema y señala el nivel de importancia de cada variable, estas zonas son:

- Zona de poder: Las variables ubicadas en esta zona son las más importantes ya que no dependen de las demás, por lo que presentan un bajo índice de dependencia mientras que alteran fácilmente a las otras por lo cual su índice de motricidad es alto.

- Zona de conflicto: Estas variables también tienen gran importancia ya que, aunque dependen de las demás, también las alteran en gran medida.
- Zona de problemas autónomos: Son variables sin importancia, ya que no alteran ni son alterados por las demás significativamente.
- Zona de salida: En esta zona se ubican variables sin gran influencia, pero muy dependientes de las otras por lo que no son tomadas en cuenta como variables críticas.

El límite de las zonas se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$m = \frac{100}{n} \quad (47)$$

Donde n es el número de variables.

Inicialmente se definió la matriz de relaciones directas para las 9 variables identificadas con letras desde la “A” hasta la “I” mencionadas anteriormente, según influencia de variables establecidas en la tabla 1.

*Tabla 1. Códigos relaciones directas (Fuente: Cely, 1999).*

<b>Influencia</b>	<b>Código</b>
Directa	1
Nula	0
Potencial	0

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0	1	1	0	1	1	1	0	0
B	1	0	1	0	0	1	1	1	0
C	0	0	0	0	1	0	0	0	1
D	0	1	0	0	1	0	1	1	0
E	1	0	1	0	0	1	0	0	1
F	0	0	0	0	1	0	0	0	0
G	1	1	1	1	1	1	0	1	0
H	1	1	1	1	1	1	1	0	1
I	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Figura 17. Matriz de relaciones directas (Fuente: Cely, 1999).

Con base en la matriz anterior se determinó el porcentaje de motricidad y dependencia de cada variable de acuerdo con las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\%M = \frac{IM}{SIM} * 100 \quad (48)$$

$$\%D = \frac{ID}{SID} * 100 \quad (49)$$

**Donde:**

IM: Índices de motricidad (Filas).

SMI: Sumatoria de los índices de motricidad.

ID: Índices de dependencia (Columnas).

SDI: Sumatoria de los índices de dependencia.

*Tabla 2. Porcentajes de motricidad*

<b>Variables</b>	<b>IM</b>	<b>%M</b>
A	5	13.51
B	5	13.51
C	2	5.41
D	4	10.81
E	4	10.81
F	1	2.70
G	7	18.92
H	8	21.62
I	1	2.70
<b>SMI</b>	<b>37</b>	

*Tabla 3. Porcentajes de dependencia*

<b>Variables</b>	<b>ID</b>	<b>%D</b>
A	4	10.81
B	4	10.81
C	6	16.22
D	2	5.41
E	6	16.22
F	5	13.51
G	4	10.81
H	3	8.11
I	3	8.11
<b>SDI</b>	<b>37</b>	

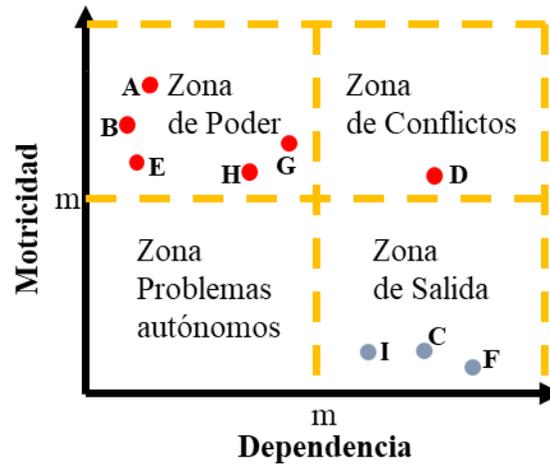


Figura 18. Gráfico de Relaciones Directas

Las variables más importantes para cada modo de falla fueron las ubicadas en la zona de poder debido a que no dependen de las demás, presentando un bajo índice de dependencia al mismo tiempo que alteran fácilmente a las otras debido a un alto índice de motricidad.

Del análisis a través de la metodología MICMAC se estableció que las variables más representativas a utilizar en el modelo numérico y experimental para realizar los respectivos análisis elástico y plástico de los modos de falla breakout y exfoliación son las mencionada en la tabla 4.

Tabla 4. Variables seleccionadas

Parámetros analizados	Fallas por <i>breakout</i>	Fallas por exfoliación
Presión de poro	√	√
Cohesión de la roca	√	√
Esfuerzos in situ	√	√
Peso de lodo	√	√
Módulos elásticos	√	√
Ángulo fricción interna		√

#### **4. Selección prueba para análisis de fallas tipo breakout y exfoliación**

Para observar cómo se puede generar la deformación en una perforación y la relación entre los esfuerzos inducidos, breakout y esfuerzos en situ, se han realizado diferentes pruebas en varias universidades y centros de investigación. Los resultados muestran que cada prueba presenta variaciones según el modelo físico a estudiar y la disponibilidad de equipos para desarrollar dichos estudios. Entre las pruebas con mayor enfoque para el análisis de los breakout se encontró el ensayo biaxial realizado en el “Poromechanics Institute” de la universidad de Oklahoma (AL-TAHINI et al, 2008), el ensayo poliaxial realizado en la universidad Católica de Rio de Janeiro (Guzman Villarroel et al, 2010), la prueba de compresión uniaxial para estudiar los breakout en rocas, diseñada por “Chevron Energy Technology Co” (Kanagawa et al, 2008). Debido a la complejidad de los equipos requeridos para realizar los ensayos y la dificultad en el proceso de preparación de las muestras, en esta investigación se seleccionaron los ensayos de Cilindros de Pared Gruesa para realizar las pruebas respectivas.

##### **4.1. Ensayos de cilindros de pared gruesa**

Entre los ensayos revisados la prueba de resistencia a la compresión triaxial en cilindros de pared gruesa puede ser útil para reproducir los breakouts en el laboratorio, utilizando un núcleo con un orificio de media pulgada, con dimensiones estándar de acuerdo con la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), (Figura 19). De igual forma se buscará variar los parámetros para producir fallas a tensión en estas muestras.

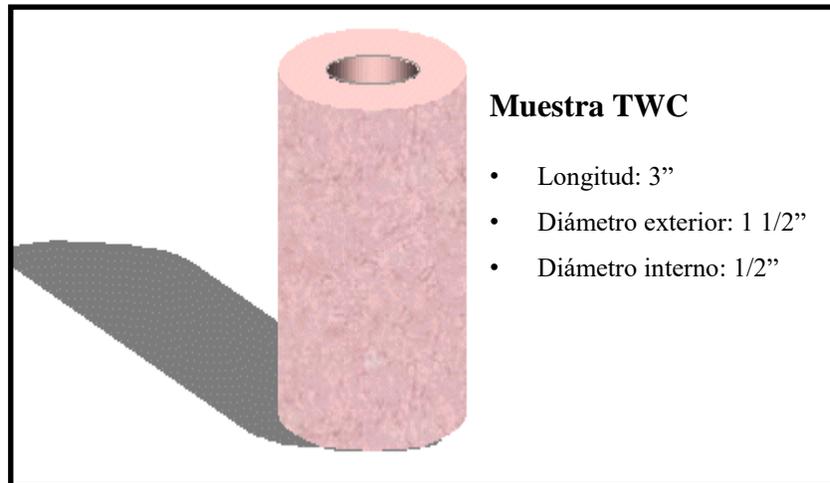


Figura 19. Núcleo para ensayos de cilindros de pared gruesa (Fuente: Alsayed et al, 2002).

Este ensayo permite determinar los esfuerzos en coordenadas cilíndricas ( $r, \theta, z$ ), radial,  $\sigma_r$ ; tangencial,  $\sigma_\theta$ ; y axial,  $\sigma_z$ , en cualquier punto de una distancia radial  $r$ , para un cilindro de radio interior,  $R_i$ ; radio exterior,  $R_o$ , y longitud axial,  $L$ ; sometido a presiones hidrostáticas internas y externas uniformes,  $P_i$  y  $P_o$ , respectivamente, y a una fuerza axial,  $F$ , teniendo en cuenta la configuración de la prueba mostrada en la figura 20, y utilizando las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_r = \frac{P_o R_o^2 - P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{(P_o - P_i) R_i^2 R_o^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)}; \quad (50)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_o R_o^2 - P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{(P_o - P_i) R_i^2 R_o^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)}; \quad (51)$$

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi (R_o^2 - R_i^2)} - \frac{P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}; \quad (52)$$

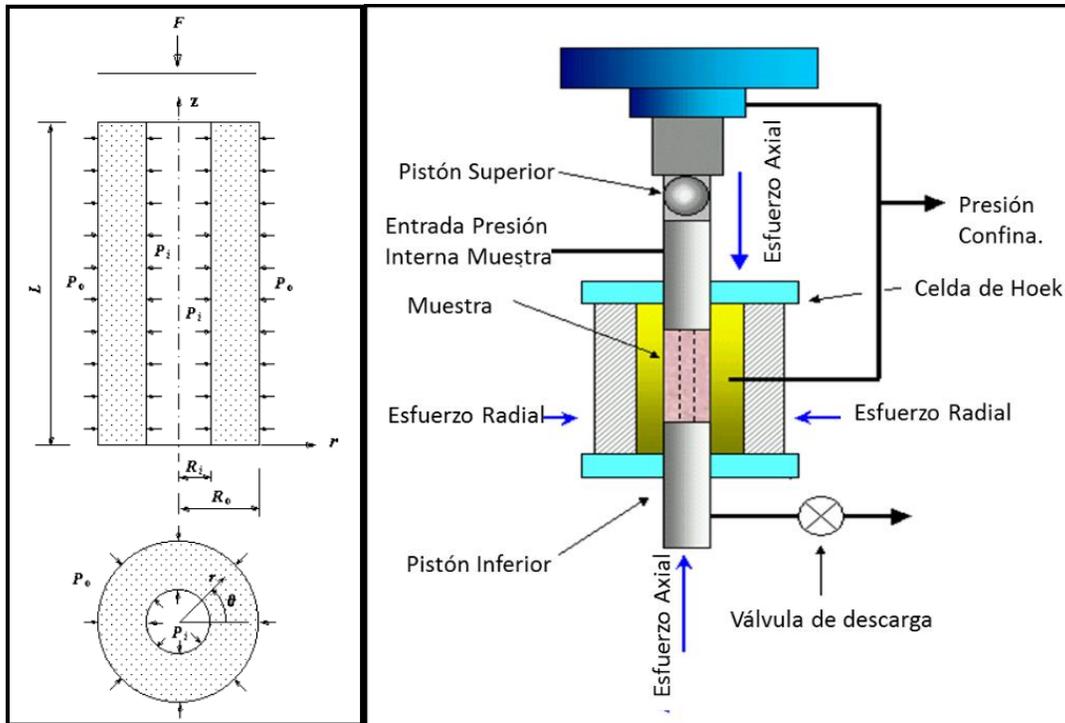


Figura 20. Sección cilindro hueco de pared gruesa sometido a carga axial, presión interna y externa. Esquema de ensayo utilizando la celda de Hoek (Fuente: Alsayed et al, 2002).

#### 4.2. Diseño experimental

Existen diversas técnicas y análisis para realizar estudios experimentales, pero elegir el más adecuado depende de la complejidad del estudio y la cantidad de ensayos requeridos para realizar un análisis representativo. En este caso se trabajará con un diseño experimental factorial  $2^k$ , debido a que proporciona resultados aceptables con el menor número de repeticiones, permitiendo analizar  $k$  factores en un diseño factorial de dos niveles. En el experimento se analizarán todas las posibles combinaciones para dos niveles de factores en cada réplica del experimento, estudiando el efecto conjunto de estos sobre una respuesta.

Luego de revisar las diferentes variaciones de ensayos TWC, se establecieron las variables críticas para la configuración de la prueba y los niveles o rangos de variación de estas, ver figura 21 y tabla 5.

Se debe aclarar que las variables priorizadas anteriormente se encuentran intrínsecas en las variaciones establecidas para el ensayo. Los módulos elásticos y propiedades mecánicas de la roca son introducidos durante la preparación de las lechadas, los esfuerzos in situ y presión de lodo están relacionados con las cargas axial y de confinamiento que deberán ser aplicadas durante la prueba.

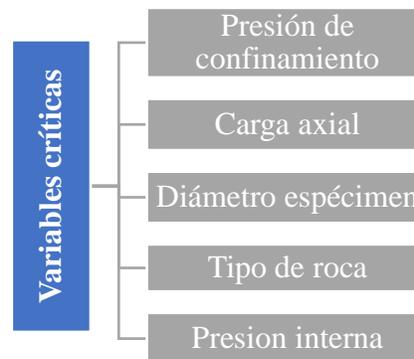


Figura 21. Variable criticas (Fuente: Uchida et al., 2014).

Tabla 5. Niveles de factores (Datos tomado de Uchida et al., 2014).

<b>Variables Criticas</b>	<b>Nivel Alto</b>	<b>Nivel Bajo</b>
Presión de confinamiento	20 Mpa [2900 psi]	1 Mpa [145 psi]
Carga axial	70 Mpa [10000 psi]	20 Mpa [2900 psi]
Diámetro espécimen	1.5"	1"
Tipo de roca	Shale Afloramiento	Shale Sintético / Cemento
Presión interna	3 Mpa [435 psi]	1 Mpa [145 psi]

Para este caso inicialmente se estableció un experimento factorial  $2^5$ , el cual se redujo a un diseño de experimento  $2^3$ , ver tabla 6, dejando constante variables como el diámetro de la muestra, carga axial y tipo de roca, con el objeto de optimizar tiempos de laboratorio y disminuir probabilidades de incertidumbre en los resultados. Para cuantificar la influencia del porcentaje de arcilla en las muestras se estableció adicionar Bentonita al 1.5% y 3% durante la preparación de las lechadas de cemento según norma (API RP 10v2). Cada combinación de ensayo mostrada en la tabla 7 debe tener una repetibilidad de dos a tres pruebas, en total son 16 ensayos con Bentonita al 1.5% y 16 con Bentonita al 3%.

*Tabla 6. Variables escogidas para el ensayo*

<b>Variables Críticas</b>	<b>Nivel Alto</b>	<b>Nivel Bajo</b>
Presión de confinamiento	20 Mpa [2900 psi]	1 Mpa [145 psi]
Cemento	con arcilla al 3%	con arcilla al 1.5%
Presión interna	3 Mpa [435 psi]	1 Mpa [145 psi]

*Tabla 7. Diferentes configuraciones de pruebas a realizar*

<b>Ensayo - Combinaciones</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
1	1 Mpa [145 psi]	1.5 % Bentonita	1 Mpa [145 psi]
2	20 Mpa [2900 psi]	1.5 % Bentonita	1 Mpa [145 psi]
3	1 Mpa [145 psi]	3 % Bentonita	1 Mpa [145 psi]
4	20 Mpa [2900 psi]	3 % Bentonita	1 Mpa [145 psi]
5	1 Mpa [145 psi]	1.5 % Bentonita	3 Mpa [435 psi]
6	20 Mpa [2900 psi]	1.5 % Bentonita	3 Mpa [435 psi]
7	1 Mpa [145 psi]	3 % Bentonita	3 Mpa [435 psi]
8	20 Mpa [2900 psi]	3 % Bentonita	3 Mpa [435 psi]

### 4.3. Preparación muestras de cemento

Para preparar las muestras inicialmente se trabajó con cemento estructural utilizado en obras civiles, realizando la mezcla según norma ASTM C-31. La caracterización de los componentes de la mezcla se efectuó según normas técnicas colombianas (N.T.C. 77 – 92 – 127 - 176).

*Tabla 8. Componentes para Mezcla de 1m<sup>3</sup>.*

Componente	Cantidad	Unidades
Agua	230	lts
Cemento	525	Kg
Arena	1650	Kg

*Tabla 9. Caracterización de la arena.*

Gravedades específicas			
	A Fino		A Fino
Real	2.67	Peso unitario suelto	1400 kg/m <sup>3</sup>
Aparente	2.63	Peso compacto	1610 kg/m <sup>3</sup>
Aparente SSS	2.65	Absorción %	2%
		Porcentaje de vacío	38%



*Figura 22. Muestras*

Debido al contenido y tamaño de arena de estas muestras se evidencio que posiblemente no tendría un comportamiento plástico requerido para evaluar las fallas por breakout, motivo por el cual se procedió a trabajar con cemento tipo G utilizado para preparar lechadas de cementación, las muestras y la configuración de diseños de preparación según porcentaje de Bentonita utilizado se realizaron según norma (API RP 10v2).

*Tabla 10. Componentes para Mezcla de 46 Litros*

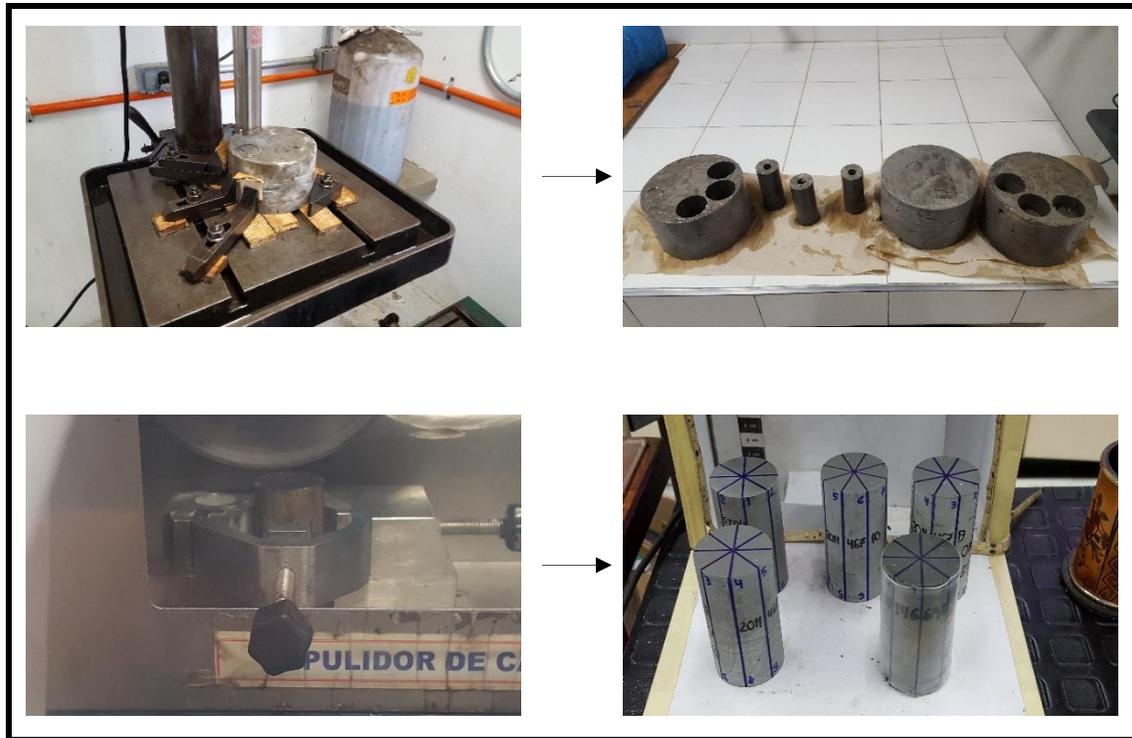
<b>Conc.</b>	<b>Unit</b>	<b>Material Requerido</b>		
100	%bwoc	Cemento	59.4	kg
0	%bwoc	Arena	0.0	kg
1.5	%bwoc	Bentonita	0.9	kg
45.79	%bwoc	Agua	27.2	kg

<b>Conc.</b>	<b>Unit</b>	<b>Material Requerido</b>		
100	%bwoc	Cemento	55.0	kg
0	%bwoc	Arena	0.0	kg
3	%bwoc	Bentonita	5.5	kg
48.50	%bwoc	Agua	26.7	kg

A continuación, se muestra su proceso de preparación utilizando cemento tipo G, para la cual se utilizaron los equipos del área de corte del laboratorio Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo.



*Figura 23. Mezclado y fraguado de las muestras*



*Figura 24. Extracción y pulido de las muestras*

A continuación, se muestra el set de muestras con porcentaje de Bentonita del 1.5% y 3% preparadas para realizar los ensayos.



Figura 25. Muestras con Bentonita al 1.5%

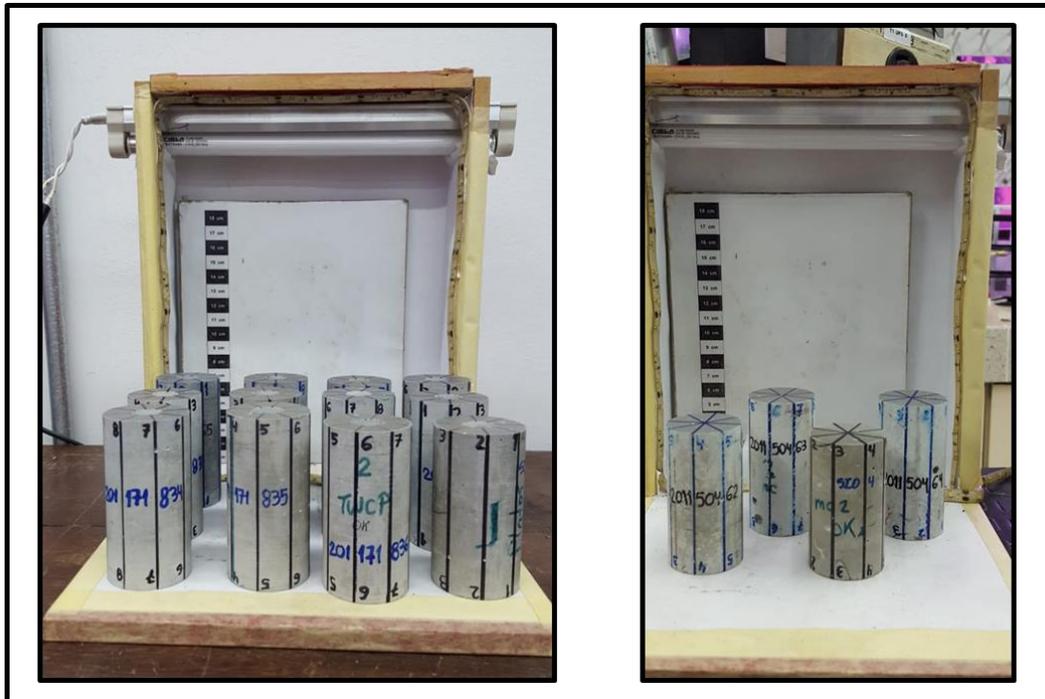


Figura 26. Muestras con Bentonita al 3%

#### 4.4. Caracterización mecánica de las muestras

Se realizaron ensayos de indentación y esclerometría a las 36 muestras para obtener propiedades mecánicas de las rocas como módulo de elasticidad y dureza, que servirán para verificar los datos obtenidos en los posteriores ensayos triaxiales. De estas pruebas se obtuvo un valor promedio de 122263 psi como módulo de Young, ver figura 28, el cual es un valor bajo comparado con el real debido a que estas son pruebas índices no destructivas, además en este análisis también se incluyeron las muestras de cilindro de pared gruesa, en las cuales se observó una disminución del 10% en el módulo de Young respecto a las muestras convencionales.

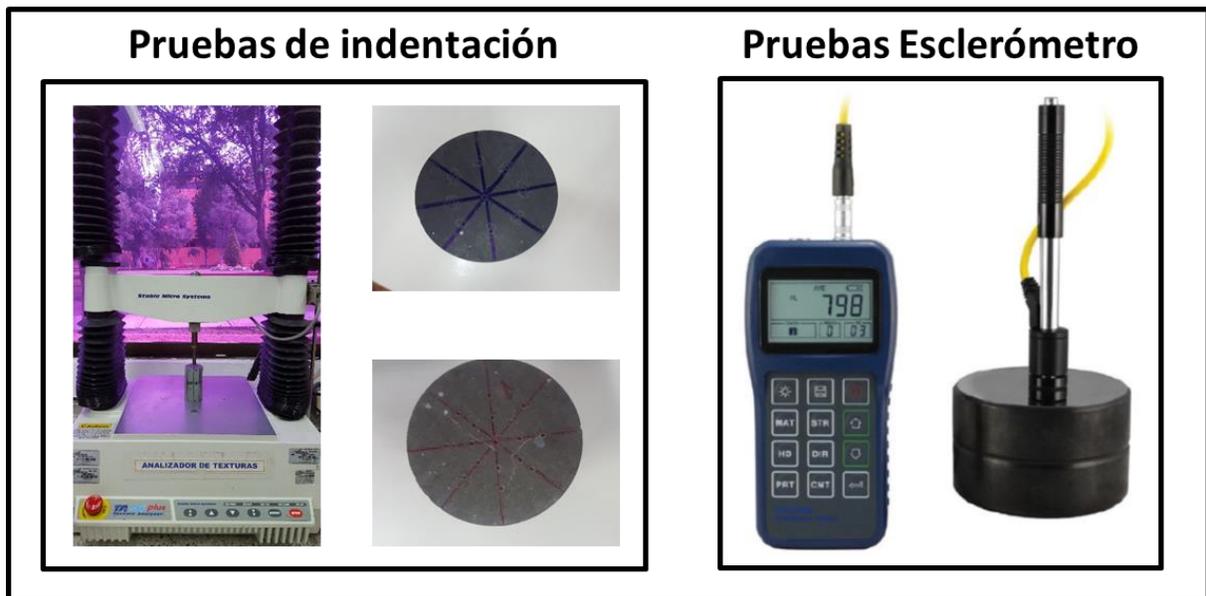


Figura 27. Pruebas de indentación y esclerómetro

En la figura 28 se puede apreciar que las lechadas preparadas según la norma (API RP 10v2) presentan algo de heterogeneidad, se refleja en los valores de módulo de Young encerrados en círculos rojos, los cuales se alejan de la línea de tendencia azul. De esto se concluye que 8 muestras deben ser retiradas del análisis quedando un total de 28 de las 36 iniciales para realizar ensayos. Por lo cual se descartó una muestra convencional con Bentonita al 1.5% (MC B-1,5%), 5 muestras de cilindro de pared gruesa o TWC con Bentonita al 1.5% (TWC B-1,5%) y dos muestras de TWC con Bentonita al 3% (TWC B-3%).

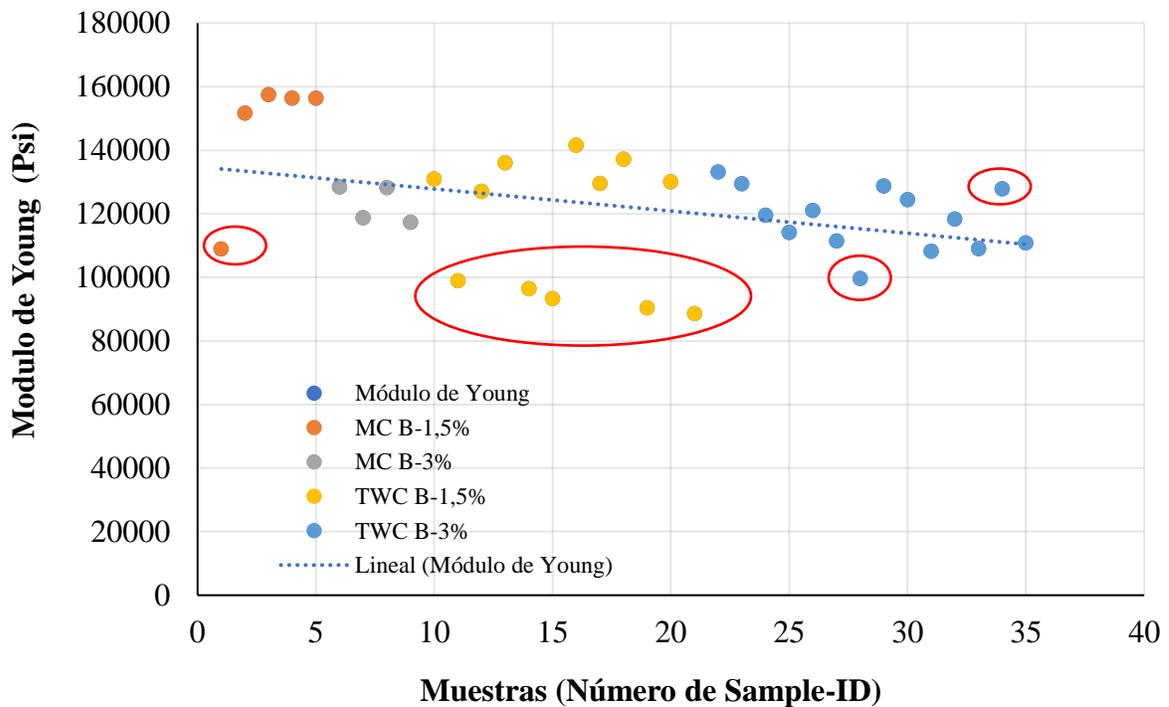


Figura 28. Resultados módulos de Young de pruebas de indentación

Estos mismos resultados se aprecian en los cálculos de dureza superficial como se puede observar en la siguiente figura.

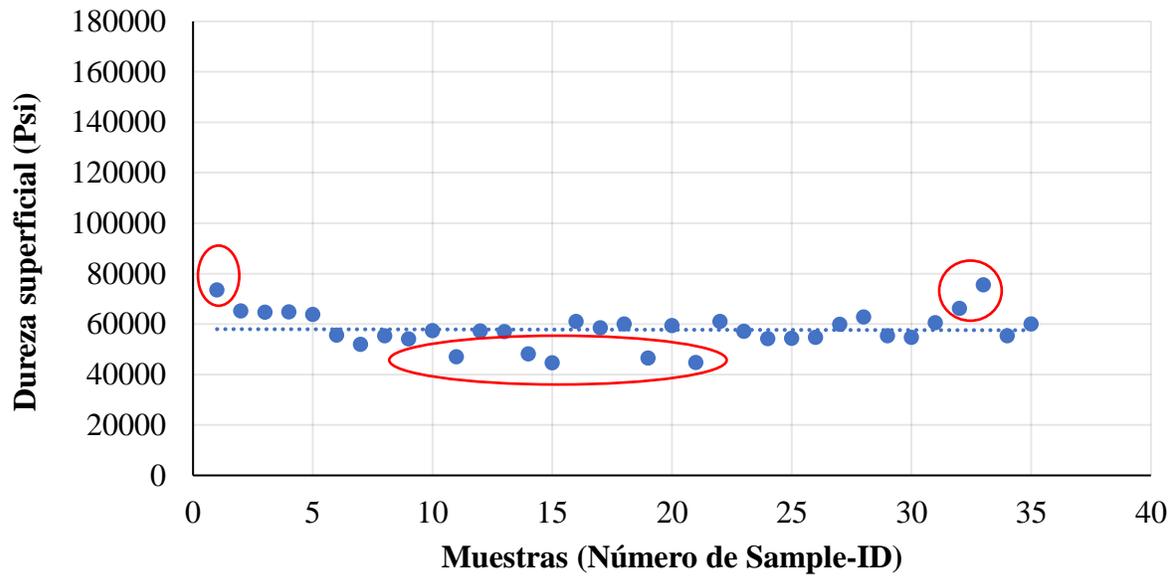


Figura 29. Resultados de dureza superficial obtenidos en pruebas de indentación

Luego de realizar la selección de las muestras a ensayar según su homogeneidad los valores promedio de módulo de Young, indentación y dureza superficial se consolidan en las siguientes figuras.

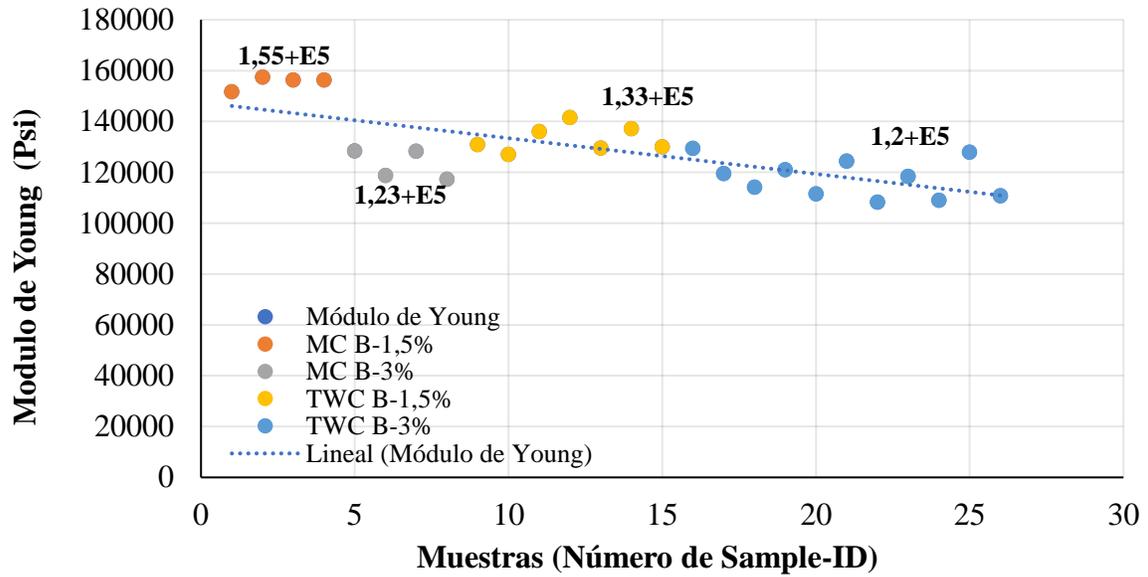


Figura 30. Módulos de Young promedio de muestras seleccionadas

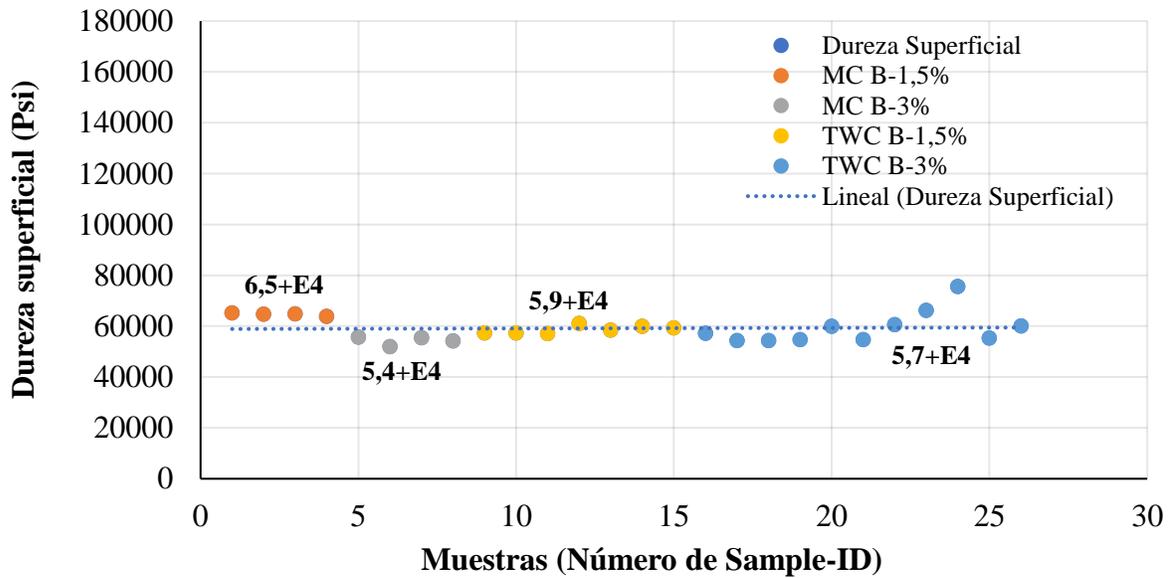


Figura 31. Dureza superficial promedio de muestras seleccionadas

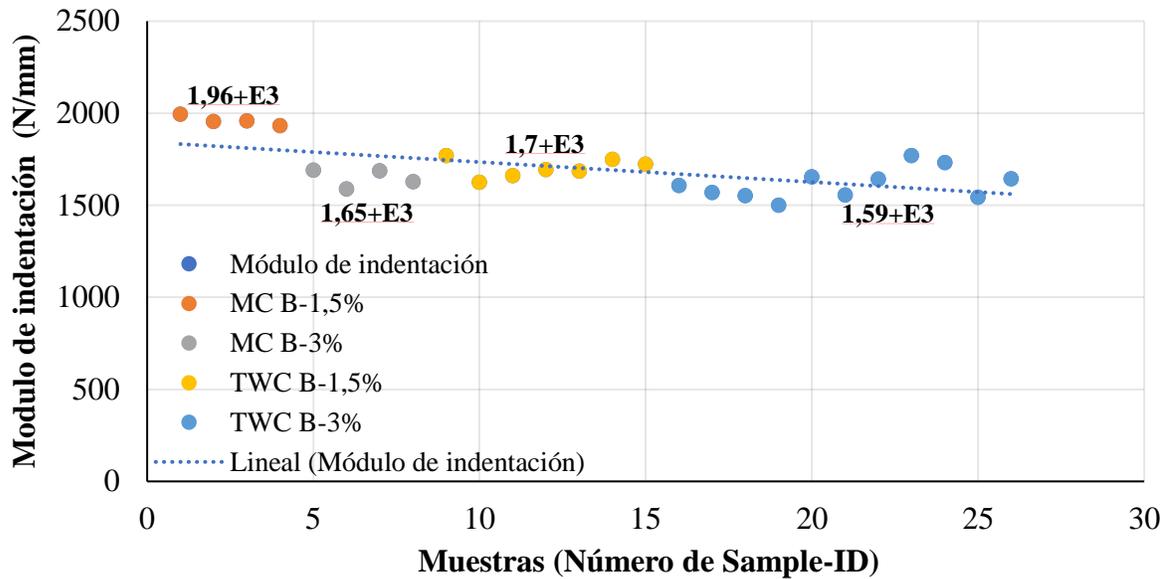


Figura 32. Módulo de indentación muestras seleccionadas

Posteriormente, a las muestras seleccionadas se les determinó su porosidad a través de prueba de presión capilar por inyección de mercurio. En la tabla 11 se consolidan los resultados obtenidos. En general los resultados permiten observar que hay bastante homogeneidad en las muestras y que, a mayor porcentaje de Bentonita la densidad aumenta. El valor de saturación de aire va disminuyendo a medida que el mercurio es inyectado en la muestra y alcanza su valor mínimo final. Para el set de 4 muestras de cemento tipo G con 1.5% de Bentonita el valor de densidad promedio fue 2.297 g/cc y para el set de 4 muestras de cemento tipo G con 3.0% de Bentonita el valor de densidad promedio fue 2.39 g/cc. La variación en composición de la muestra afecta principalmente la porosidad y la densidad. No se observa una clara dependencia de la variación en composición con la saturación residual de aire final.

Tabla 11. Porosidad por inyección capilar

SAMPLE ID	Intervalo de profundidad	Porosidad por inyección de HG	Densidad Skeletal	Diámetro moda	Saturación de aire ajustada a 5000
	ft	%	g/mL	micrones	psi
201146690	Cemento tipo G 1.5% Bentonita	21.48	22.374	0.0427	41.04
201146710	Cemento tipo G 1.5% Bentonita	21.31	22752	0.0427	37.80
201146711	Cemento tipo G 1.5% Bentonita	23.94	23.677	0.0427	52.65
201146712	Cemento tipo G 1.5% Bentonita	25.18	23078	0.0427	41.58
201150462	Cemento tipo G 3.0% Bentonita	26.11	24.155	0.0427	61.96
201150463	Cemento tipo G 3.0% Bentonita	26.64	24086	0.0427	47.66
201150464	Cemento tipo G 3.0% Bentonita	25.29	23.940	0.0427	42.96
201171838	Cemento tipo G 3.0% Bentonita	26.62	23523	0.0525	30.11

#### 4.5. Ensayos de compresión uniaxial y triaxial

En la tabla 12 se aprecia los resultados obtenidos del ensayo triaxial realizado en una muestra convencional con Bentonita de 1.5%, los valores de resistencia a la compresión ver tabla 12, se aproximan a los establecidos en la tabla 6, en la figura 33 se observa la curva esfuerzo vs deformación de la muestra ensayada (sample ID 201146690).

Tabla 12. Datos para determinación del módulo elástico

Datos de módulos elásticos			
Porcentaje de esfuerzo	50%	20%	80%
Esfuerzo buscado (psi)	5394,208286	2636,614692	8151,801881
Deformación axial (mm/mm)	5374,409701	2635,919524	8141,718071
	<b>Tangente</b>	<b>Secante</b>	<b>Promedio</b>
Módulo de Young	1,234E+06	1,137E+06	1,258E+06
Relación de Poisson	0,433	0,524	0,265

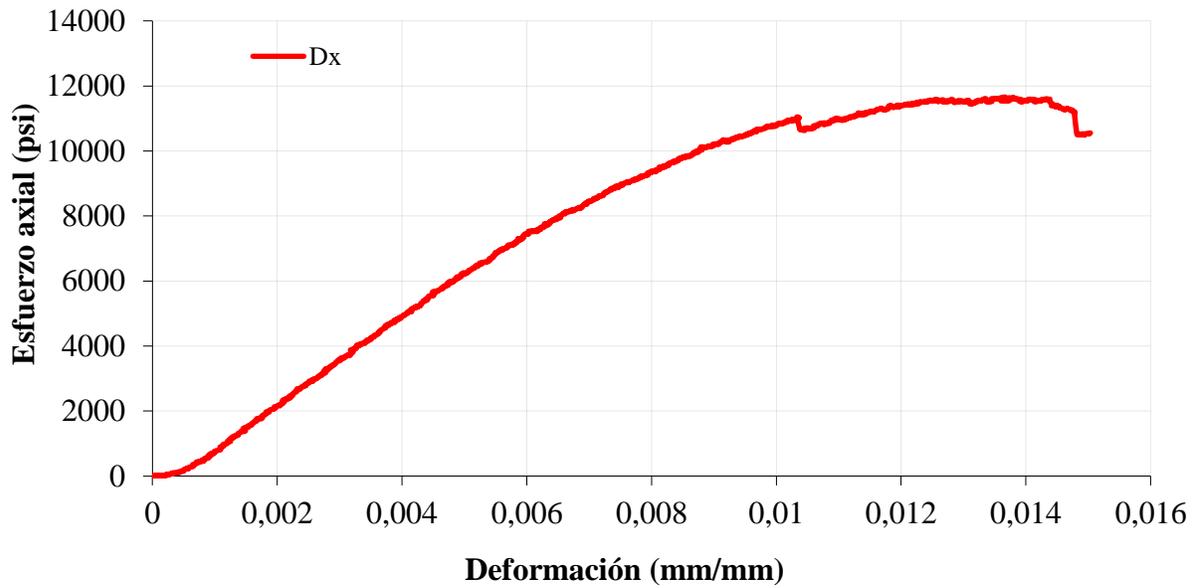


Figura 33. Esfuerzo Axial vs. Deformaciones muestra ID 201146690

**4.5.1. Ensayos de compresión uniaxial y análisis con microscopio HIROX.** Se realizaron 10 pruebas de compresión uniaxial utilizando las muestras más homogéneas para cada lechada según datos obtenidos en las pruebas índices realizadas previamente, el montaje de estas se aprecia en la figura 34.



*Figura 34. Montaje ensayos uniaxiales*

Para las muestras convencionales con 1.5% de Bentonita el módulo de Young promedio fue de  $7.41E+5$  psi, con un esfuerzo máximo de 8395 psi; para el caso de 3% de Bentonita el valor fue de  $6.42E+5$  psi con un esfuerzo máximo de 7290 psi respectivamente, indicando una resistencia un 13% más baja, que puede estar relacionada con el mayor contenido de

Bentonita y el comportamiento más plástico de esta. Este efecto se aprecia con las muestras de cilindro de pared gruesa que registran valores de resistencia menores a los obtenidos en las muestras convencionales para las mismas lechadas, los datos de resistencia a la compresión y módulo de Young para las muestras de TWC con Bentonita de 1.5% fueron 6492 psi y  $5.97E+5$  psi respectivamente; para el caso de 3% de Bentonita fue de 5670 psi y  $5.41E+5$  psi, estos valores se aprecian en las figuras 35 y 36.

Es de aclarar que el orificio interno de las muestras de TWC afecta la resistencia de estas, pero en esta investigación lo que se desea evaluar es el comportamiento de las fallas y el efecto que puede generar este concentrador de esfuerzos en las muestras.

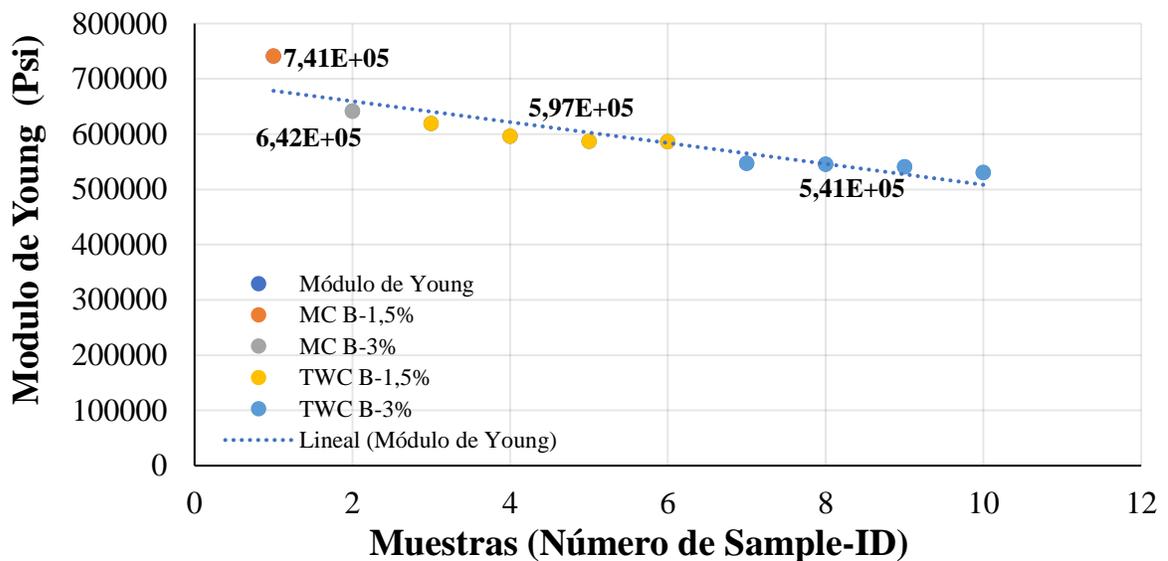


Figura 35. Módulo de Young ensayos uniaxiales

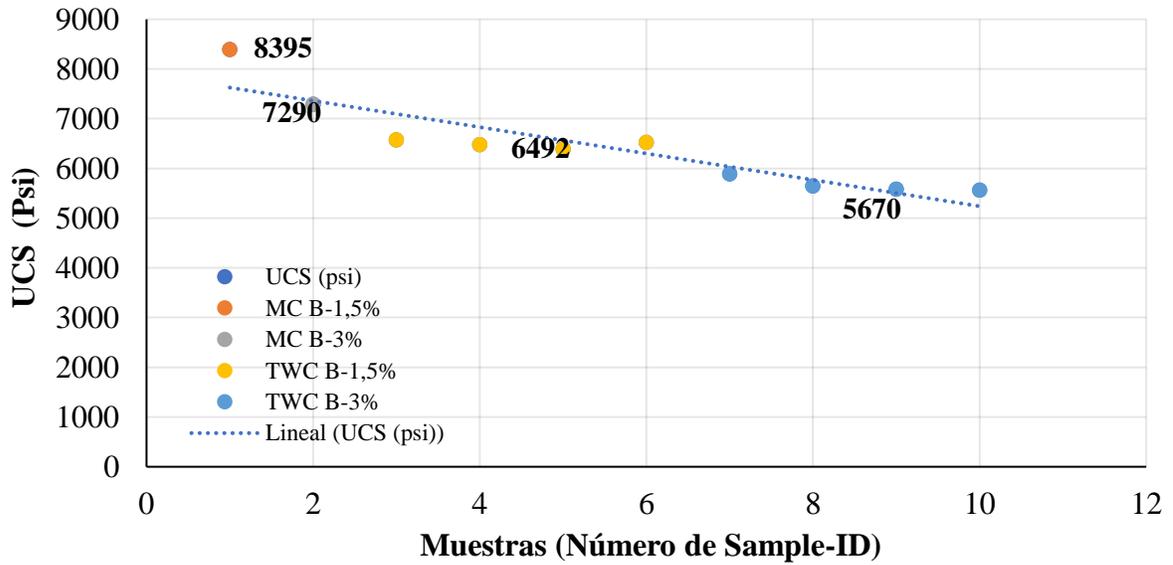


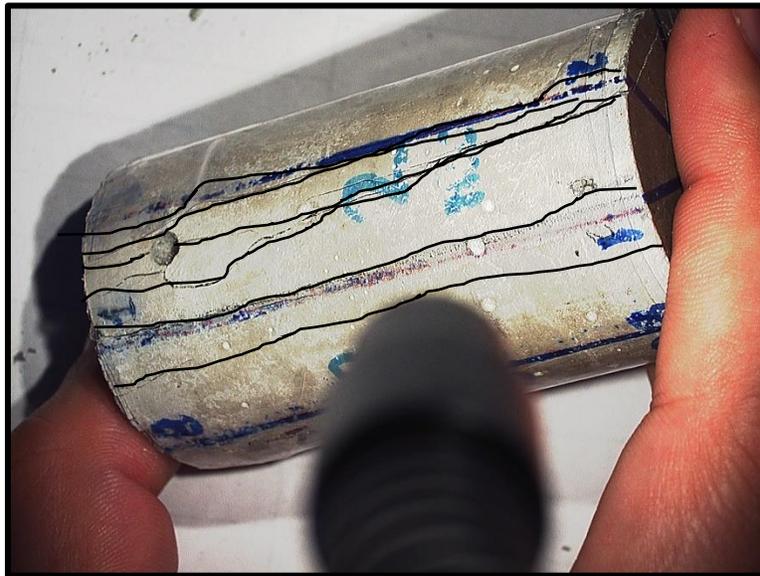
Figura 36. UCS muestras de cemento

Las fallas observadas en las muestras analizadas a través del Microscopio “HIROX” del laboratorio de materiales del Instituto Colombiano del Petróleo son de cizalla, lo cual se evidencia en las grietas en forma de “X” presentes en la superficie exterior de las muestras convencionales, ver figura 37.



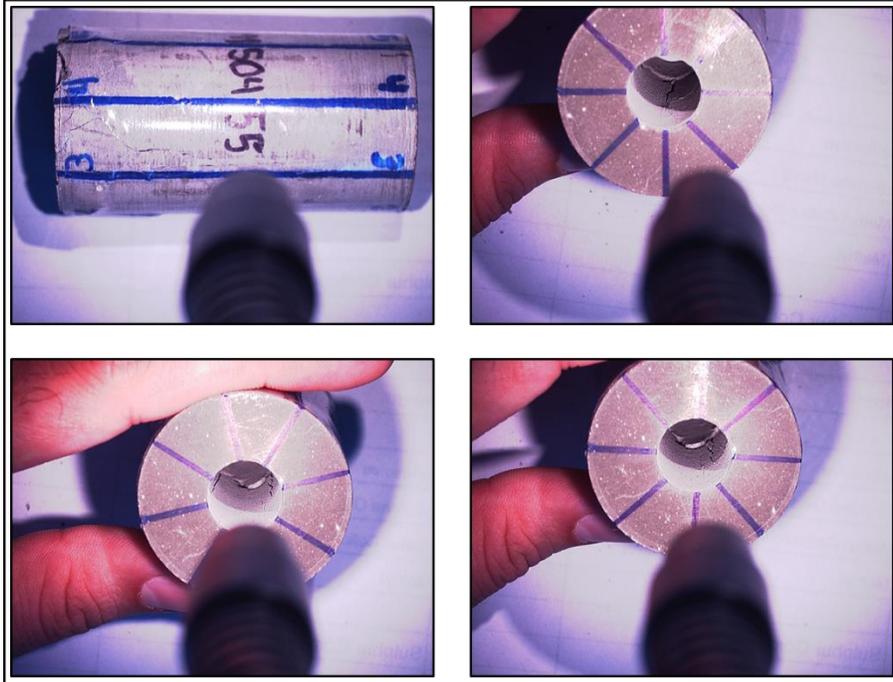
Figura 37. Falla por cizalla muestra convencional 1.5% Bentonita ID 201146710

En la muestra convencional identificada con ID 201150462 el material falla por desarrollo de fracturas extensionales como resultado de compresión, esta muestra contiene 3% de Bentonita, ver figura 38.



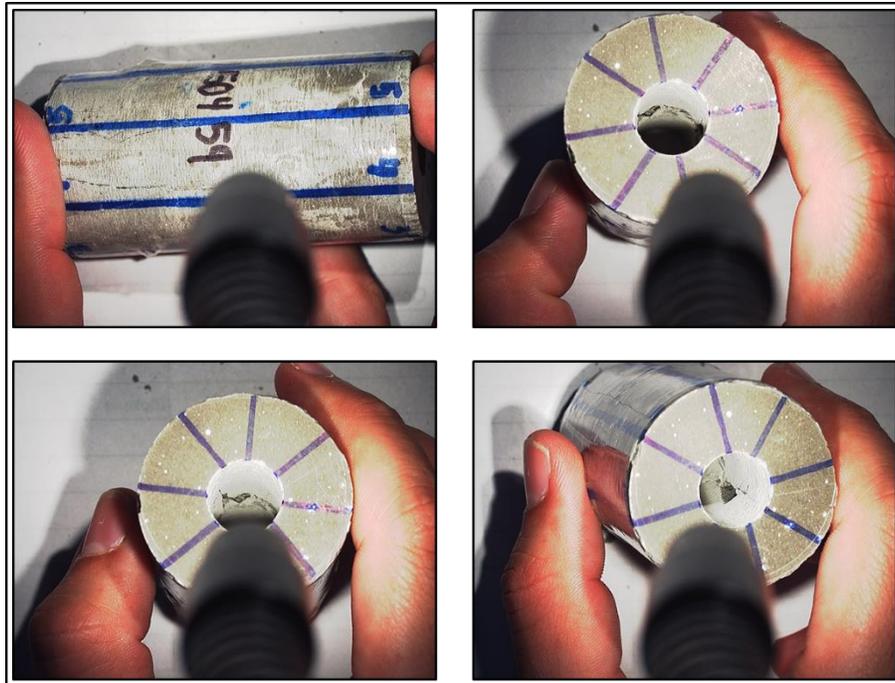
*Figura 38. Falla por cizalla muestra convencional 3% Bentonita ID 201150462*

En las muestras de cilindro de pared gruesa para el caso de ambas lechadas las fallas se generan en su mayoría en la cara interna del cilindro, esto en razón que el esfuerzo tangencial siempre es mayor al esfuerzo radial interno, en algunos casos estas grietas se propagan hacia el radio externo de la muestra. Los esfuerzos radial y tangencial se calcularon con las ecuaciones de Lamé (ecuación 50) y (ecuación 51). En las siguientes figuras se aprecia el comportamiento de dichas fallas.

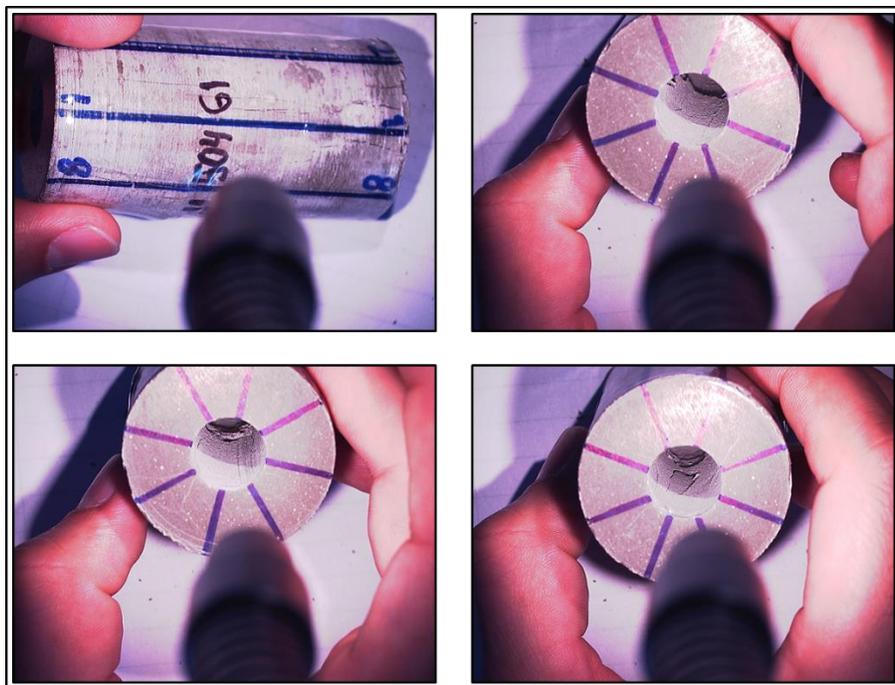


*Figura 39. Fallas en muestra TWC 1.5% Bentonita ID 201150455*

En la figura 39, 40 y 41 se observa fallas tipo breakout a 180° en la cara interna del cilindro, producto del diferencial entre los esfuerzos tangencial y radial ( $\sigma_{\theta} \gg \sigma_r$ ), con valores promedio de 6500 psi y 2950 psi respectivamente.

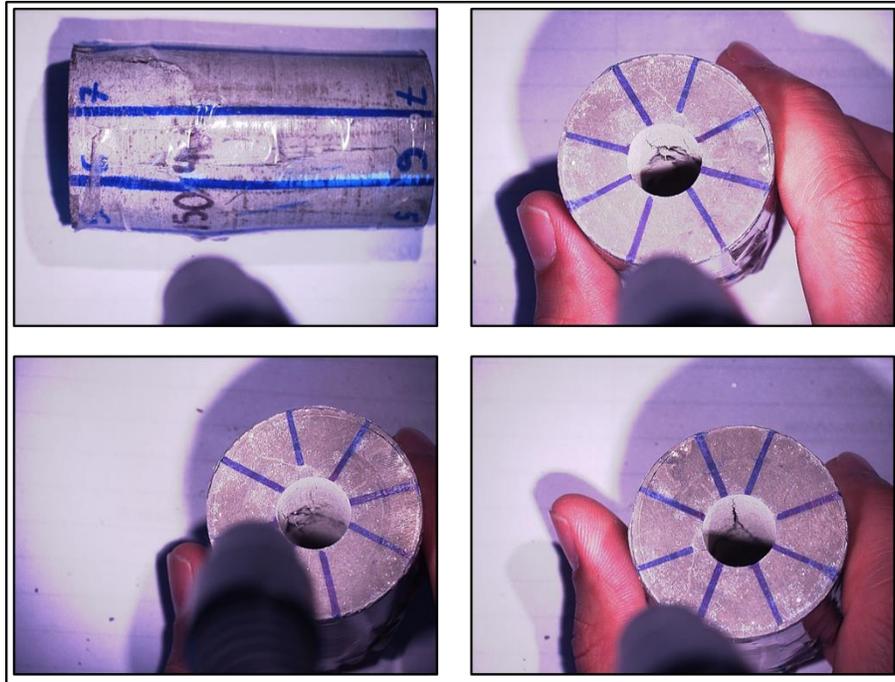


*Figura 40. Fallas en muestra TWC 1.5% Bentonita ID 201150459*

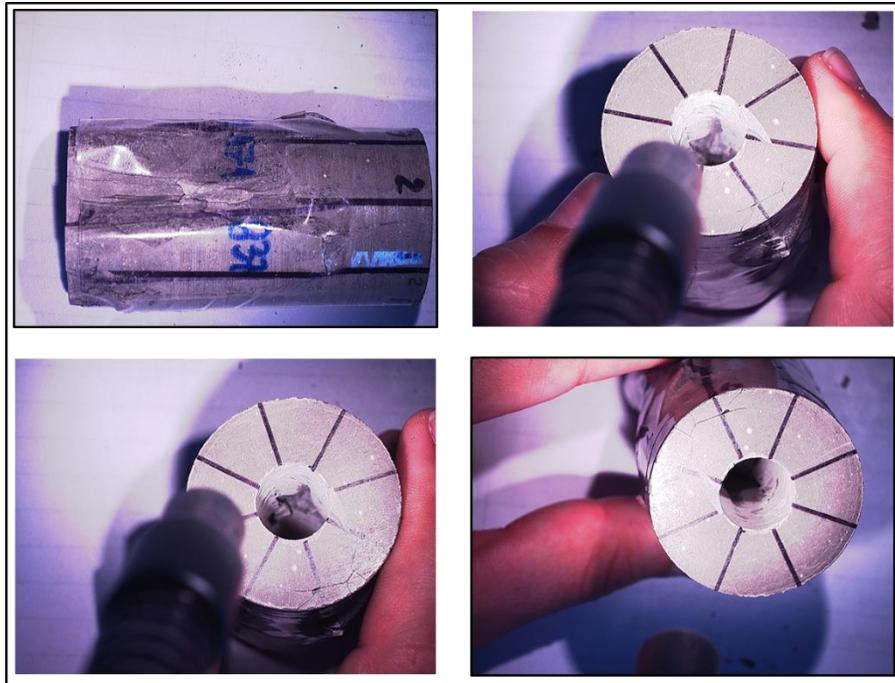


*Figura 41. Fallas en muestra TWC 1.5% Bentonita ID 201150461*

En la figura 42 y 43 se observa fallas tipo breakout a 180° en la cara interna del cilindro, producto del diferencial entre los esfuerzos tangencial y radial ( $\sigma_{\theta} \gg \sigma_r$ ), con valores promedio de 5800 psi y 2700 psi respectivamente, con fracturas extensionales en la parte externa del cilindro en algunos casos.



*Figura 42. Fallas en muestra TWC 3% Bentonita ID 201150466*



*Figura 43. Fallas en muestra TWC 3% Bentonita ID 201171837*

Los resultados obtenidos en el laboratorio sirven como aproximación y calibración de los análisis numéricos, con ellos se corroboró el comportamiento de las fallas por cizalla en los ensayos de resistencia a la compresión realizados en las muestras convencionales, observando planos de falla a  $45^\circ$  y desarrollo de fracturas extensionales como resultado de la compresión. De igual forma se corroboró las fallas por cizalla en los cilindros de pared gruesa, con roturas tipo breakout generadas en dirección del esfuerzo mínimo y a  $180^\circ$  en la cara interna del cilindro, producto de alto diferencial entre los esfuerzos radial y tangencial ( $\sigma_\theta \gg \sigma_r$ ).

### 5. Modelo analítico para deformación plana en ABAQUS

Con el propósito de evaluar la deformación y redistribución de esfuerzos originadas durante la perforación de la roca, y modelar las condiciones mínimas que deben existir para mantener la estabilidad de la formación, varios autores han presentado análisis estructurales de esfuerzos para medios elásticos, plásticos y otros (ver tabla 13). De la revisión bibliográfica se escogió como modelo base la solución analítica de Kirsch (1898) y Bradley (1979), los cuales representan los esfuerzos efectivos que se generan en la cara de un pozo vertical e inclinado respectivamente, y han sido ampliamente usados como punto de partida para estudios posteriores (Ostadhassan, 2014; Zamora, 2016). Estos modelos fueron detallados en el capítulo dos de este libro.

*Tabla 13. Modelos de estabilidad de pozo*

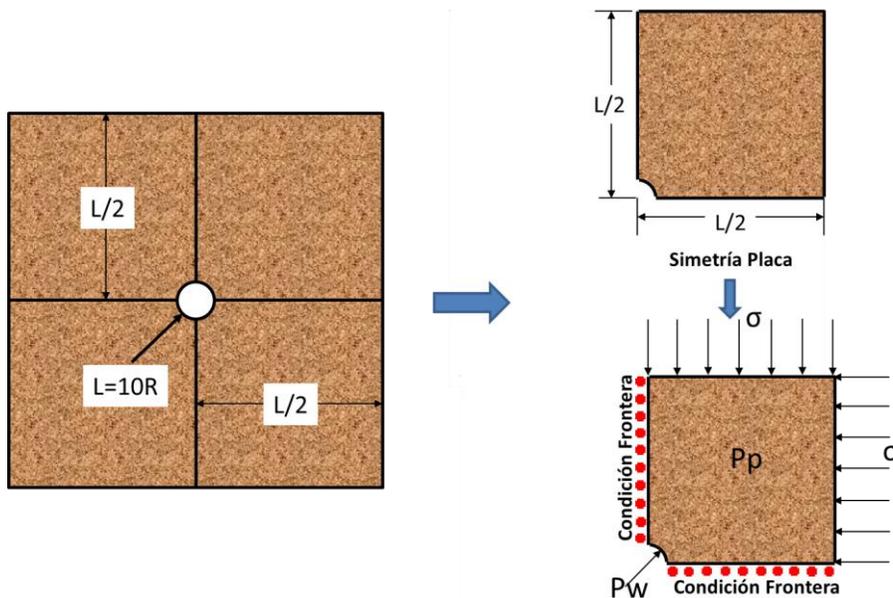
<b>Referencia</b>	<b>Tipo Modelo</b>	<b>Aplicación</b>
Bradley (1898)	Elasticidad lineal	Pozos verticales
Bradley (1979)	Elasticidad lineal	Pozos direccionales
Fuh et al. (1988)	Elasticidad lineal	Pozos direccionales
Aadnoy Chenevert (1987)	Elasticidad lineal	Pozos direccionales
McLean and Addis (1990)	Elasticidad lineal	Pozos direccionales
Zhou et al. (1996)	Elasticidad lineal	Pozos direccionales
Djurhuus and Aadnoy (2003)	Elasticidad lineal	Pozos direccionales
Ostadhassan, et al., 2009.	Elasticidad lineal	Pozos direccionales
Cao, et al., 2016	Elasticidad lineal	Pozos direccionales
Yew and Liu (1992)	Poroelasticidad lineal	Esfuerzos en la pared del pozo
Hsiao (1998)	Poroelasticidad lineal	
Sherwood (1993, 1994, 1995)	Poroelasticidad lineal	Efectos químicos (potencial químico de cada especie) para análisis de laboratorio.
Wong and Heidug (1995)	Poroelasticidad lineal	

**5.1. Evaluación de los esfuerzos y deformaciones que generan las fallas a compresión y tensión aplicando el modelo analítico de kirsch en ABAQUS.**

Para desarrollar esta investigación inicialmente se estableció la geometría del modelo teniendo en cuenta los parámetros requeridos para aplicar la solución analítica de Kirsch con relación a la estabilidad de pozo, ver figura 44. Por tal razón la relación longitud-radio de la geometría definida debe ser mayor que 10 para representar una placa delgada de dimensiones infinitas y eliminar el efecto de borde en la simulación, estos valores se observan en la tabla 14.

*Tabla 14. Propiedades del Material*

Propiedad	Valor
Espesor =	0.01 pulgadas
Lado =	200 pulgadas
Radio =	8.5 pulgadas
Profundidad análisis =	3000 m (10000 ft)



*Figura 44. Geometría de placa analizada*

Por otro lado, se establecieron los criterios de falla a utilizar, para la simulación se planteó un modelo elasto-plástico, utilizando el modelo elástico y Mohr Coulomb-Plástico de Abaqus 6.11. Las propiedades de la roca y los esfuerzos in situ fueron tomados de artículos publicados por (Zoback, 2007; Ostadhassan, et al, 2014; Zamora, et al, 2016), ver tabla 15. Estos datos corresponden a una profundidad de 3000 m, para una arcilla bajo un régimen de falla normal.

Tabla 15. Propiedades del Material (Fuentes: García, 2006; Zoback, 2007; Zamora, 2016)

<b>Densidad de la roca [lb/ft<sup>3</sup>]</b>		183.33
<b>Elasticidad</b>	Modulo Young [GPa]	37
	Relación de Poisson	0.3
<b>Conductividad Hidráulica</b>		0.0285
<b>Relación de Vacíos</b>		0.33
<b>Plasticidad Mohr Coulomb</b>	Ángulo de Fricción	33
	Ángulo de dilatación	18
<b>Tipo de roca</b>	Lutita / Cemento	
<b>Régimen de falla</b>	Normal	

Posteriormente se definió el número de pasos de trabajo del programa. los cuales se dividen en tres, i) paso inicial, ii) paso Geoestático y iii) paso estático – perforación; así como las condiciones de frontera y carga (esfuerzos), ver tabla 16.

Tabla 16. Condiciones de carga (Fuentes: García, 2006; Zoback, 2007; Zamora, 2016)

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
$\sigma_{Hmax} =$	8224 psi
$\sigma_{hmin} =$	2900 psi
$\sigma_v =$	10000 psi @ 3000m
$P_{mud} =$	4900 psi
$P_p =$	0.435 psi/ft

Se delimitó el tipo de elemento a utilizar, para este caso se utilizaron elementos continuos de primer orden, debido a su comportamiento similar con los elementos de segundo orden, ver figura 45. Adicional, se seleccionó una malla tipo estructural, se refino la malla cerca a la cara del pozo (Lee et al, 2011) y se realizó sensibilidad del mallado para determinar la cantidad de elementos requeridos, arrojando un valor cercano a los 2000 elementos, ver figuras 46 y 47.

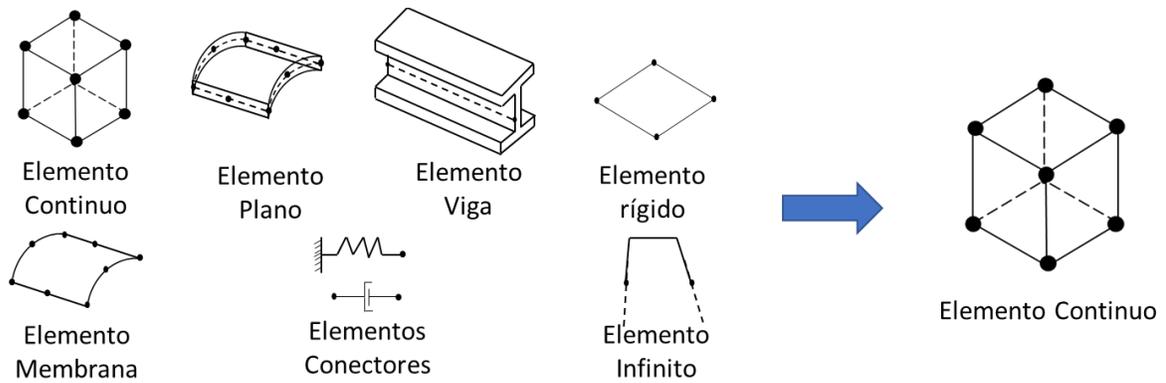


Figura 45. Tipo de elementos utilizados en el modelo (Fuente: Abaqus documentation 6.11)

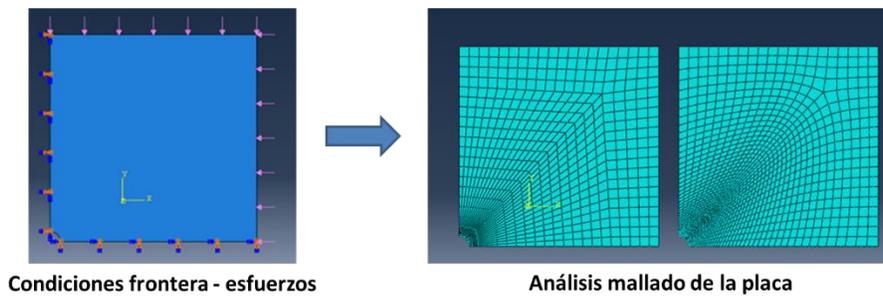


Figura 46. Selección y refinado del mallado

Para realizar el análisis de sensibilidad de la malla utilizada en la placa, se consideró el número y tipo de elementos que la conforman, la geometría y técnica de mallado. Como se mencionó anteriormente, la selección de elementos continuos de segundo orden utilizados en el modelo obedece a que estos ofrecen una mayor cantidad de nodos utilizando menos elementos, factor a considerar debido al tiempo de uso del procesador al ejecutarse el modelo, esto se aprecia en el análisis de sensibilidad del mallado ver tabla 17 y figura 47.

*Tabla 17. Sensibilidad del mallado analizando deformación*

N° Elementos	Lineales		Cuadráticos	
	N° nodos	deformación ( $10^{-3}$ m)	N° nodos	deformación ( $10^{-3}$ m)
<b>100</b>	<b>121</b>	<b>9.450</b>	<b>341</b>	<b>9.843</b>
196	225	9.850	645	9.833
400	441	9.835	1281	9.832
676	729	9.800	2133	9.832
1024	1089	9.803	3339	9.832
1600	1681	9.806	5215	9.832

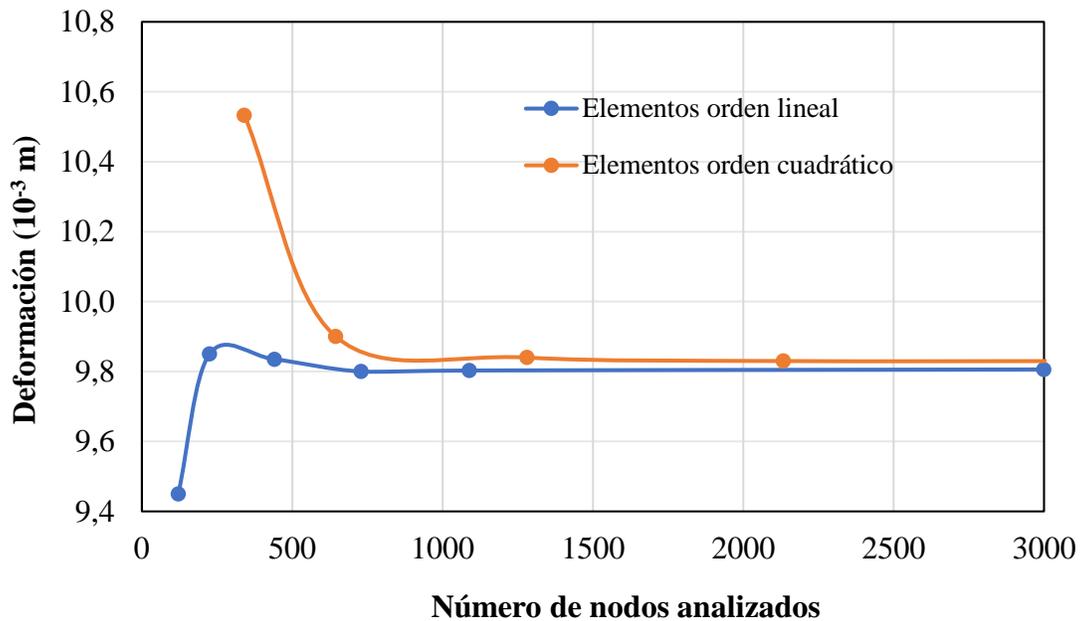
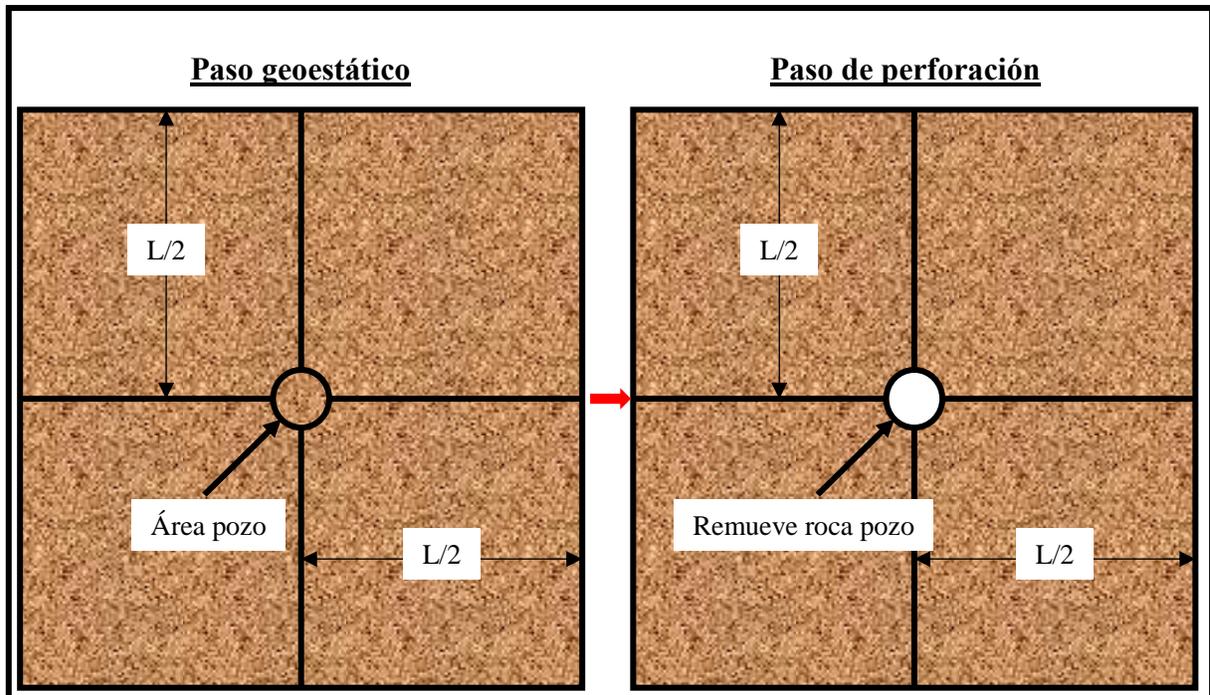


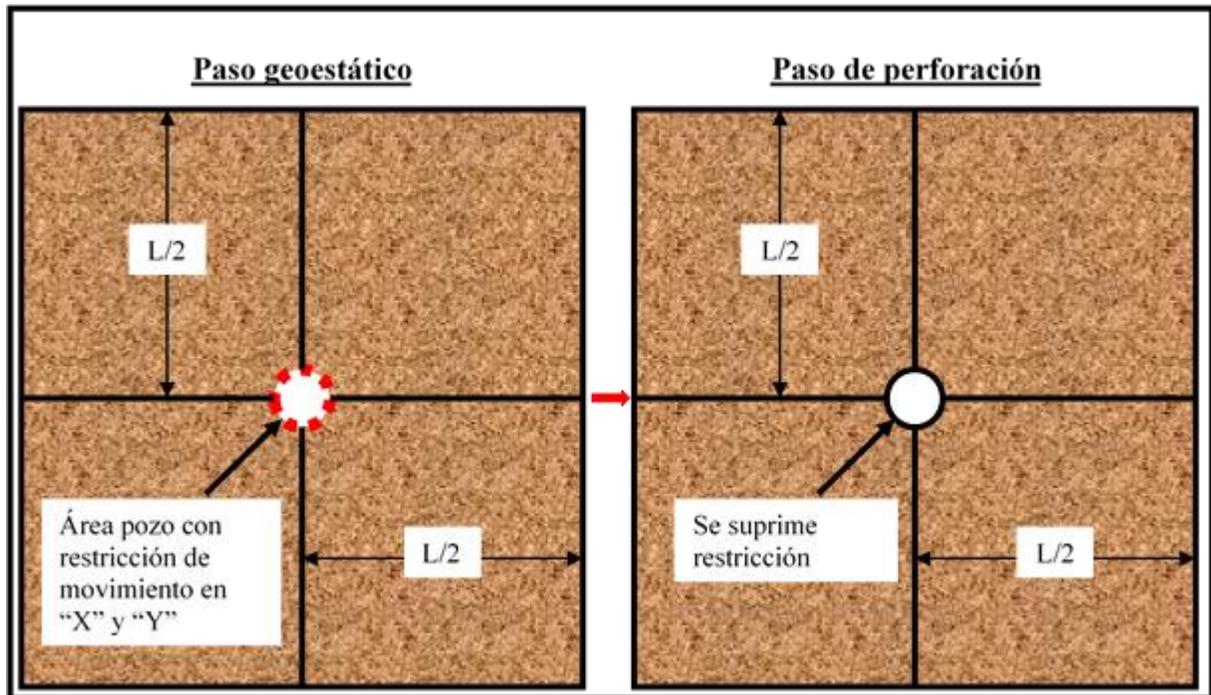
Figura 47. Sensibilidad de la malla analizando deformación

A partir de los datos y configuraciones mencionadas anteriormente se simuló en Abaqus un pozo en 2D con las condiciones de carga y frontera establecidas en las tablas 14 y 16, realizando su respectiva validación a través de las ecuaciones de Kirsch (modelo analítico). Para esto se plantearon dos maneras de abordar el problema en Abaqus utilizando elementos de primer y segundo orden. En el primer modelo se utilizó una placa sin perforar en el paso geostático, en el cual se obtendrán las condiciones iniciales y estabilidad del modelo; en el segundo paso, se retira los elementos que conforman el área del pozo para simular la perforación, ver figura 48.



*Figura 48. Modelo 1 deformación plana*

En el segundo modelo, en el paso geostático se encuentra perforado el pozo, pero se establece una restricción de movimiento en la cara con el propósito de simular que el bloque de roca se encuentra intacto, en el paso de perforación esta restricción es suprimida para dar paso a la perturbación en la cara del pozo, las propiedades y la malla son similares al primer modelo, ver figura 49.



*Figura 49. Modelo 1 deformación plana*

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con ambos modelos, para los cuales se analizó un cuarto de placa debido a la simetría en la geometría de la placa, el signo negativo solo indica que los esfuerzos están a compresión.

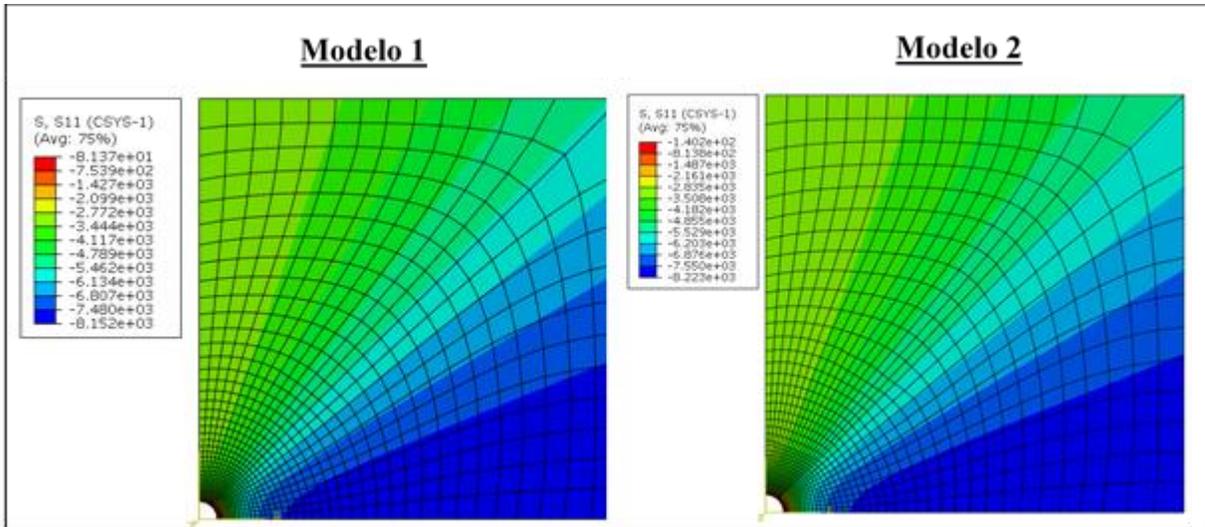


Figura 50. Esfuerzos radiales utilizando elementos de primer orden

En la figura 50 se aprecia que entre ambos esfuerzos máximos existe una diferencia de 0.87%, una aproximación buena para cualquiera de los dos modelos, utilizando elementos de primer orden.

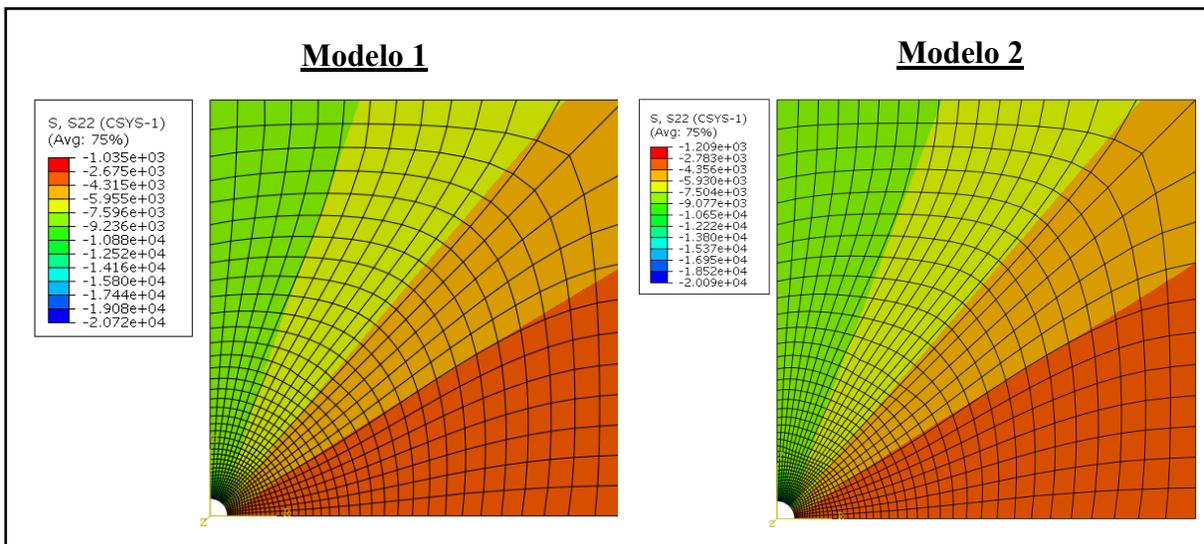


Figura 51. Esfuerzos tangenciales utilizando elementos de primer orden

En la figura 51 se aprecia que entre ambos esfuerzos máximos existe una diferencia de 3.14%, aun con el incremento en el porcentaje de error sigue siendo viable cualquier modelo, utilizando elementos de primer orden. En la figura 52 se observa que Abaqus alcanza el equilibrio en en las condiciones iniciales del paso geostático (esfuerzos in situ) sin generar desplazamiento y deformación en el modelo, evidenciado en los ceros numéricos observados en la figura.

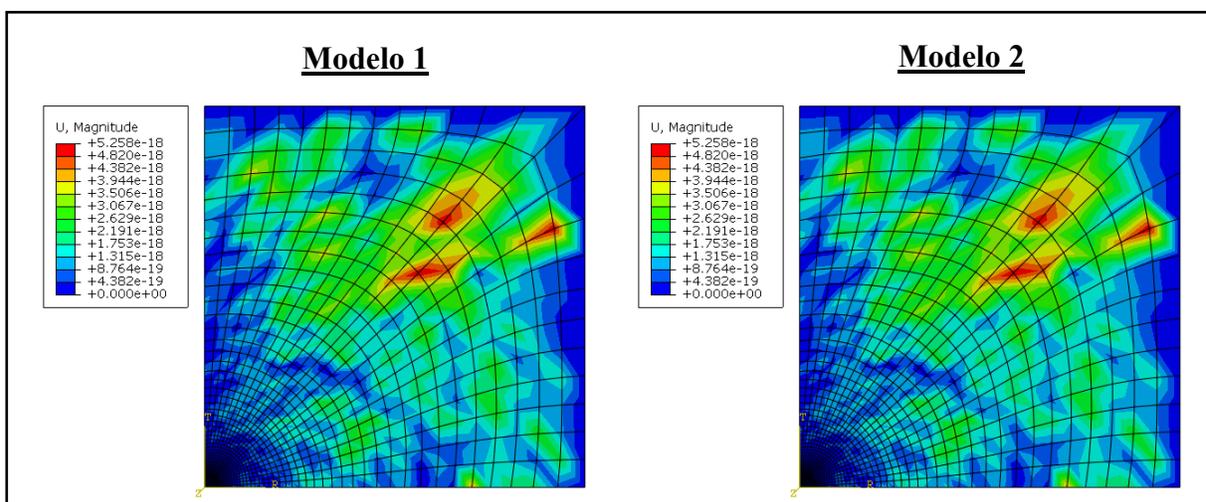


Figura 52. Deformación

En la figura 53 se aprecia que entre ambos esfuerzos máximos existe una diferencia de 0.89%, una aproximación buena para cualquiera de los dos modelos utilizando elementos de segundo orden.

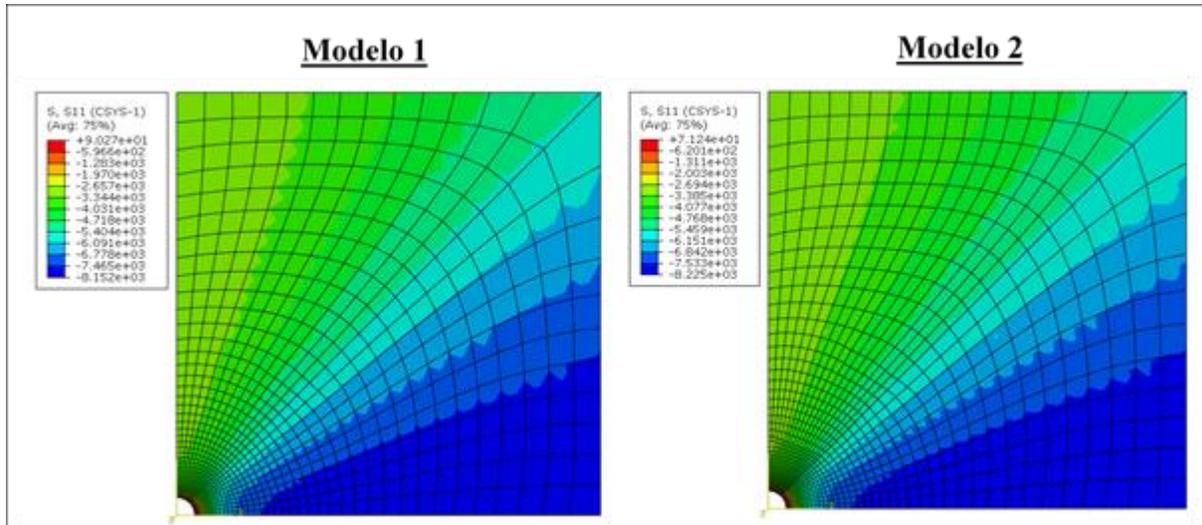


Figura 53. Esfuerzos radiales utilizando elementos de segundo orden

En la figura 54 se aprecia que entre ambos esfuerzos máximos existe una diferencia de 0.78%. En función de los resultados obtenidos entre los modelos de primer y segundo orden se puede concluir que las diferencias entre ambos resultados son prácticamente nulas, por lo que el utilizar elementos de primer orden generan resultados confiables.

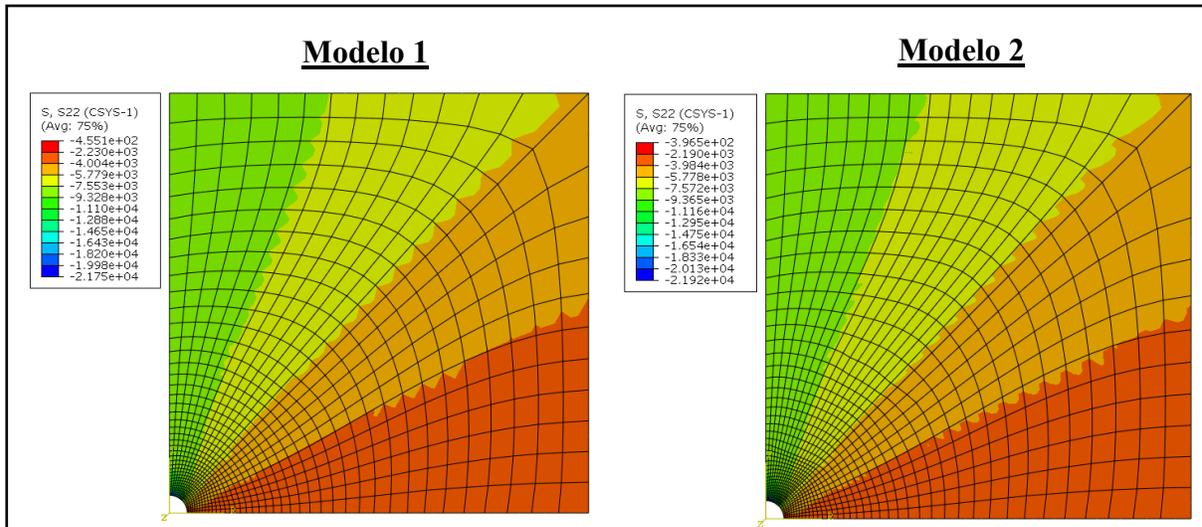


Figura 54. Esfuerzos tangenciales utilizando elementos de primer orden

En las siguientes figuras se grafican las ecuaciones de Kirsch, los valores de esfuerzos radiales y tangenciales para los modelos 1, 2 para  $\theta$  igual  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; es decir en dirección “X” y “Y” respectivamente. Se puede notar la total correspondencia en los resultados, lo que valida que ambas metodologías generan resultados similares.

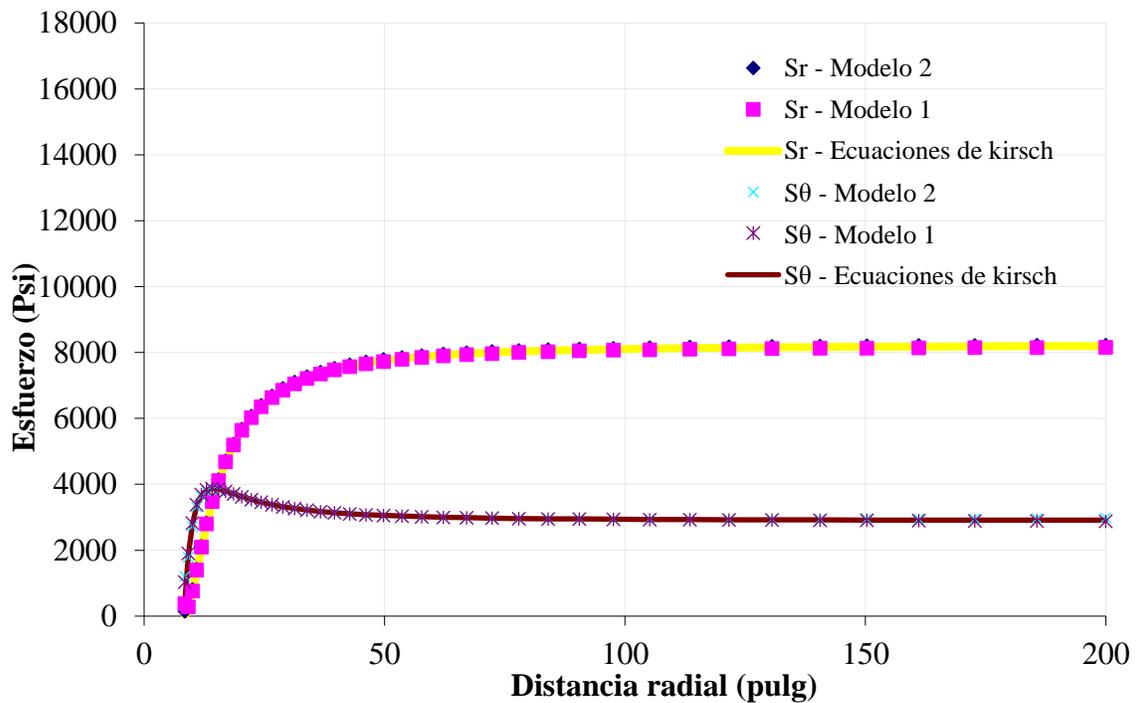


Figura 55. Valores de esfuerzos radiales, tangenciales y ecuaciones de Kirsch para modelos 1 y 2 en dirección “X” ( $\theta = 0^\circ$ ).

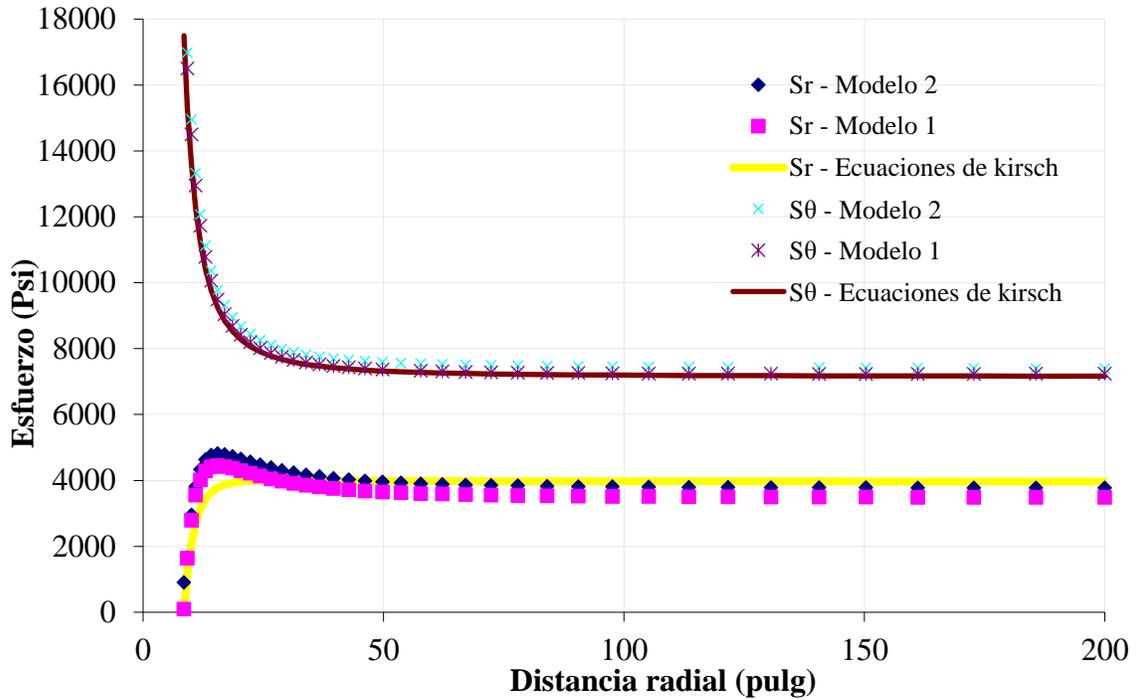


Figura 56. Valores de esfuerzos radiales, tangenciales y ecuaciones de Kirsch para modelos 1 y 2 en dirección “Y” ( $\theta = 90^\circ$  grados).

### 6. Simulación de las fallas tipo breakout y exfoliación en un modelo 3D

Inicialmente se procede a la construcción y optimización de un modelo 3D para la simulación de breakouts, tomando como referencia la geometría, elementos y malla evaluadas en los modelos 1 y 2. Los datos utilizados se consolidan en la siguiente tabla.

Tabla 18. Datos modelo breakout 3D (Fuentes: García, 2006; Zoback, 2007; Zamora, 2016).

Parámetro	Valor
Radio hoyo	8,5 pulg
Longitud sección cuadrada	200 pulg
Módulo de Young	3E+7 psi
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidad	0,09 Lbs/in <sup>3</sup>
S11 = $\sigma_{Hmax}$	8224 psi
S22 = $\sigma_{hmin}$	2900 psi
S33 = $\sigma_v$	10600 psi

La malla se realizó con elementos hexaédricos de 8 nodos con integración completa (C3D8). Está compuesta por 55800 elementos, el mallado se realizó mediante la técnica de barrido (sweep) usando un algoritmo de eje medio para minimizar transiciones, ver figura 57 y 58. En principio para la optimización del modelo se trabajó sin plasticidad (Mohr Coulomb).

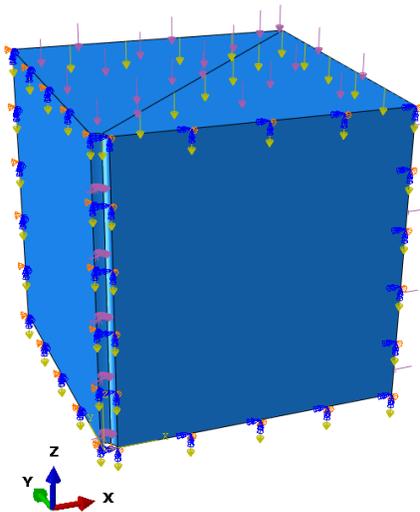
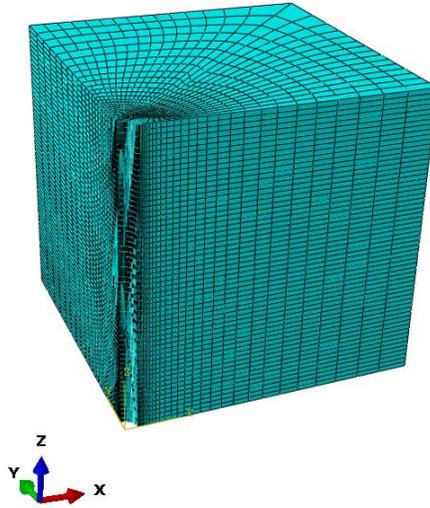


Figura 57. Cargas y condiciones de frontera modelo 3D



*Figura 58. Mallado modelo 3D*

Los resultados obtenidos revelaron algunas consideraciones de importancia. La primera es que a pesar de ser un modelo en 3D y que a diferencia del modelo plano se aplicó la sobrecarga (S33), los resultados obtenidos en esfuerzo radial y tangencial son similares a dicho modelo plano (modelo 1), ver figuras 59 y 60.

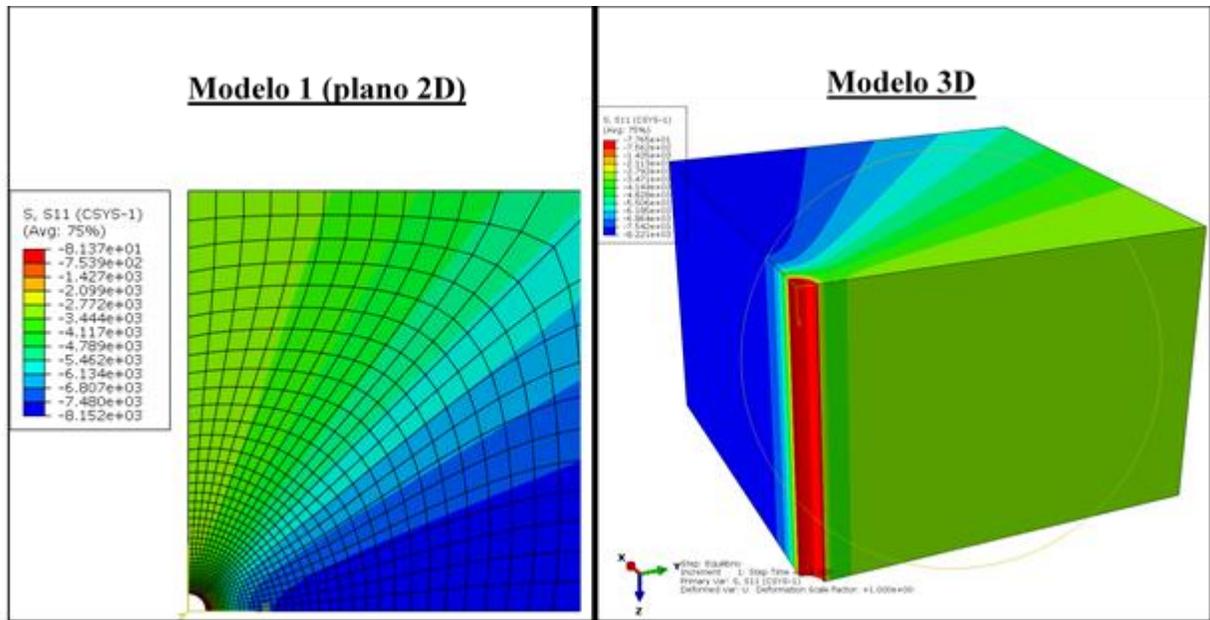


Figura 59. Comparación esfuerzos radiales modelo plano y 3D

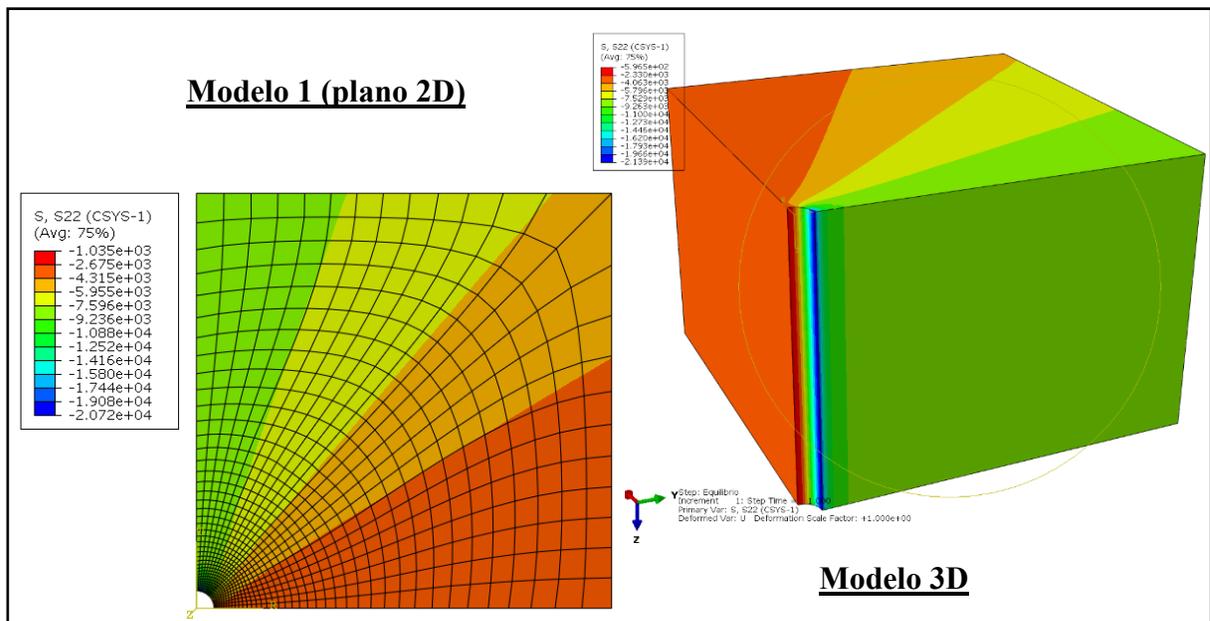


Figura 60. Comparación esfuerzos tangenciales modelo plano y 3D

Analizando los resultados de las deformaciones longitudinales se puede concluir que no existen variaciones en las deformaciones en dirección Z, y por ende variaciones en los esfuerzos en la misma dirección generando infinitos estados de deformación plana en dirección longitudinal.

Adicionalmente cuando se graficaron los resultados, ver figura 61, se observó la similitud en los valores de esfuerzos con los obtenidos en el modelo 2D en deformación plana (modelo 1). Esto lleva a concluir que para los casos de carga planteados los resultados obtenidos en un modelo 2D son similares a los de un modelo 3D, razón por la cual se podría optimizar el modelo de breakout utilizando un modelo 2D.

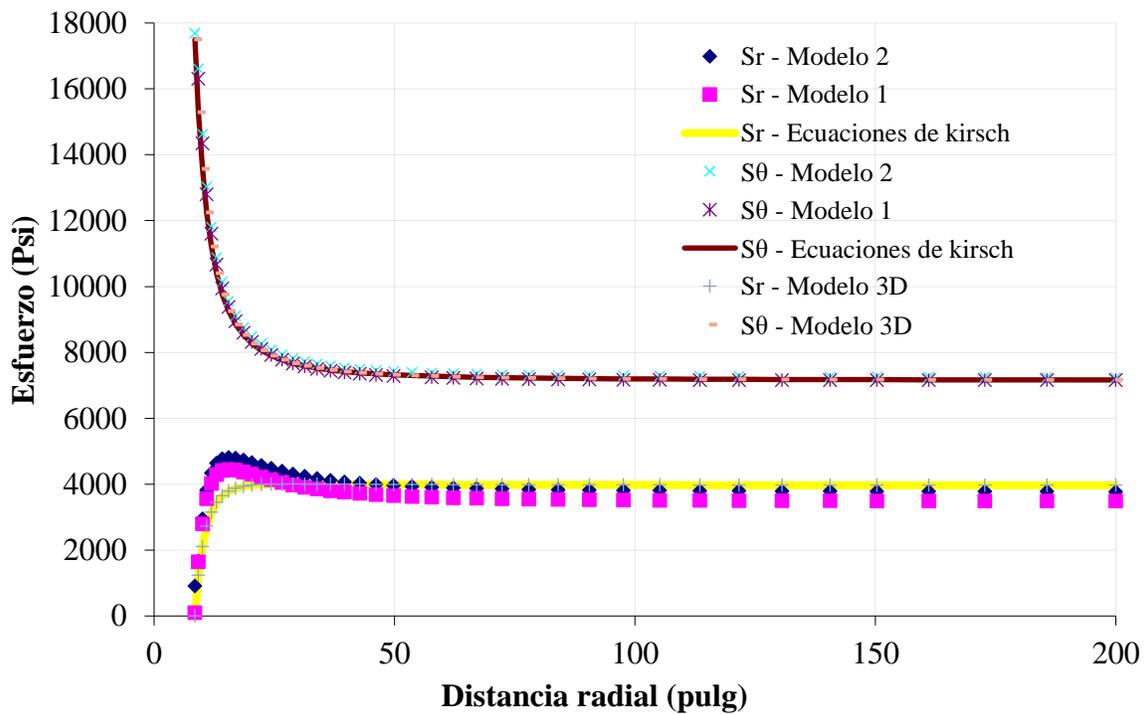


Figura 61. Valores de esfuerzos radiales, tangenciales y ecuaciones de Kirsch para modelo 3D en dirección "Y" ( $\theta = 90^\circ$  grados).

Lo anteriormente mencionado se puede verificar de forma teórica analizando las ecuaciones de Kirsch, las cuales no tienen dependencia con el esfuerzo de sobrecarga. Lo que indica que para representar o modelar dicho comportamiento no es necesario utilizar la dimensión longitudinal.

### 6.1. Análisis condiciones de esfuerzos que generan las fallas tipo breakout

Luego de optimizar el modelo a usar para simular los breakouts, se establece utilizar un modelo en deformación plana generalizada, lineal de 4 nodos y 3 grados de libertad por nodo con integración completa. Los elementos en deformación plana generalizada permiten colocar cargas perpendiculares al plano del elemento, dicha carga se aplica en un nodo de referencia, lo cual permite incluir la sobrecarga en la simulación. La malla utilizada es similar a la que se ha venido utilizando en los casos planos ver figura 62.

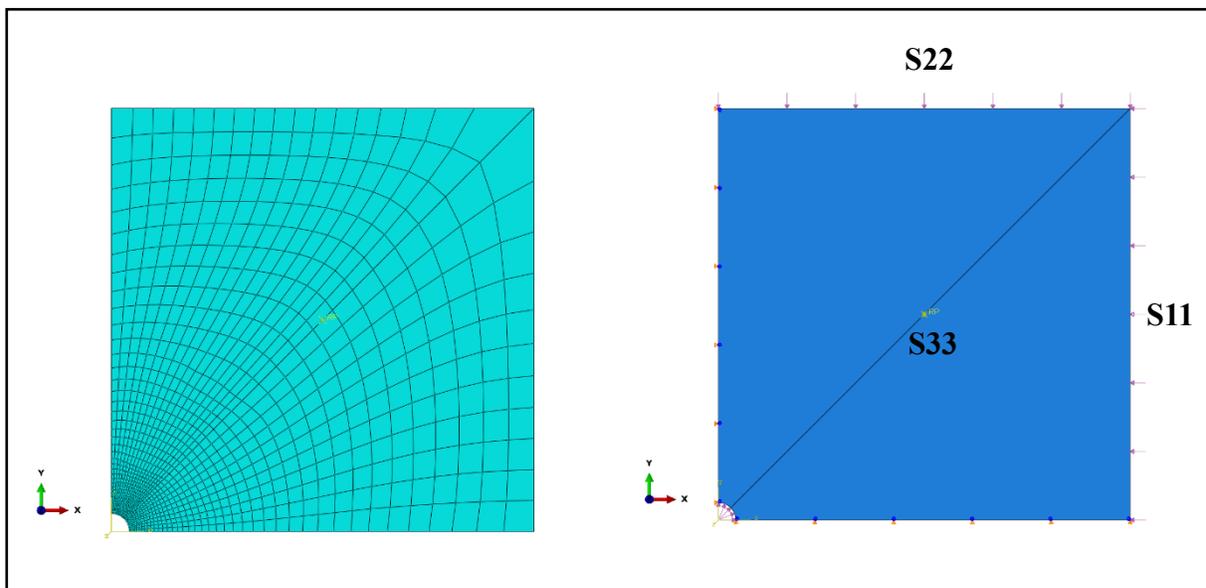


Figura 62. Modelo Breakout

Para cumplir con los objetivos planteados de estudiar la posible ocurrencia de breakouts en diferentes estados de carga, se plantea realizar simulaciones de un pozo perforado de 8.5 pulg de radio, con y sin presión de lodo, bajo los tres diferentes regímenes de esfuerzos, normal, transcurrente e inverso. Esto se realizará variando los valores de los esfuerzos in situ acorde con la tabla 19, Estas simulaciones se realizarán con y sin presión de lodo, por lo cual se presentaron 6 corridas.

Tabla 19. Regímenes de esfuerzos (Fuente: García, 2006)

Régimen	S33 (psi)	S11 (psi)	S22 (psi)
Normal	10600	8224	2900
Transcurrente	8224	10600	2900
Inverso	2900	10600	8224

En las siguientes figuras se aprecia el comportamiento de los diferentes esfuerzos para cada caso.

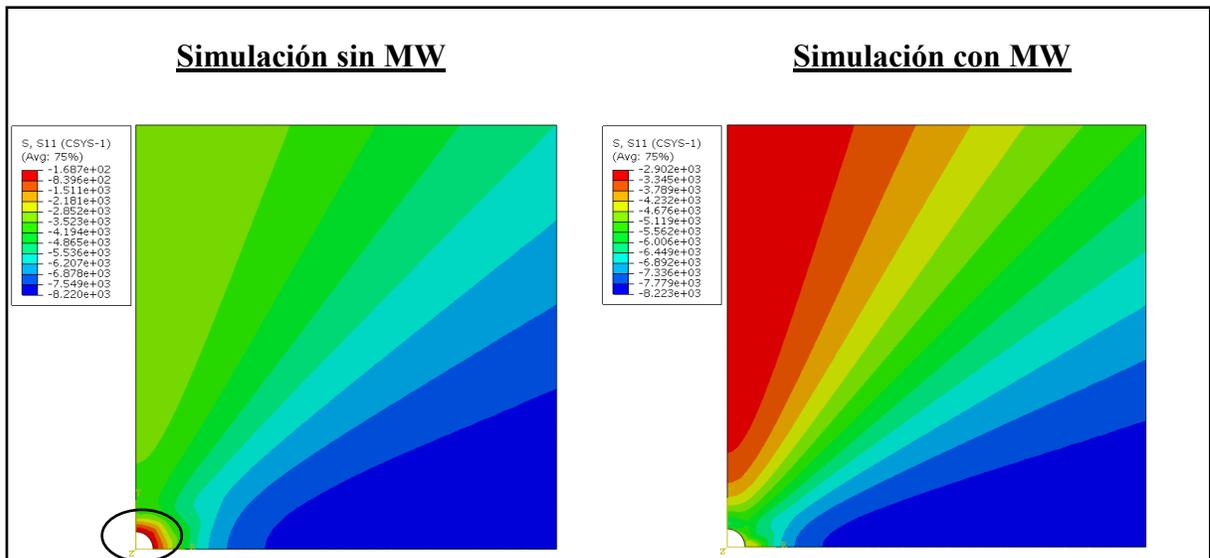


Figura 63. Esfuerzo radial régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$

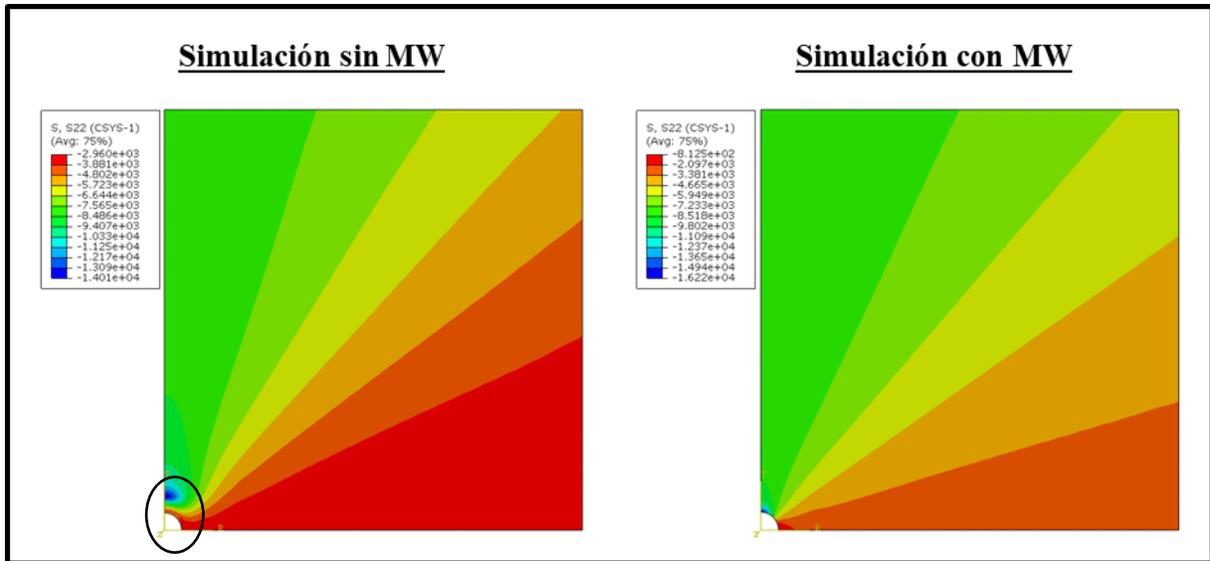


Figura 64. Esfuerzo tangencial régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$

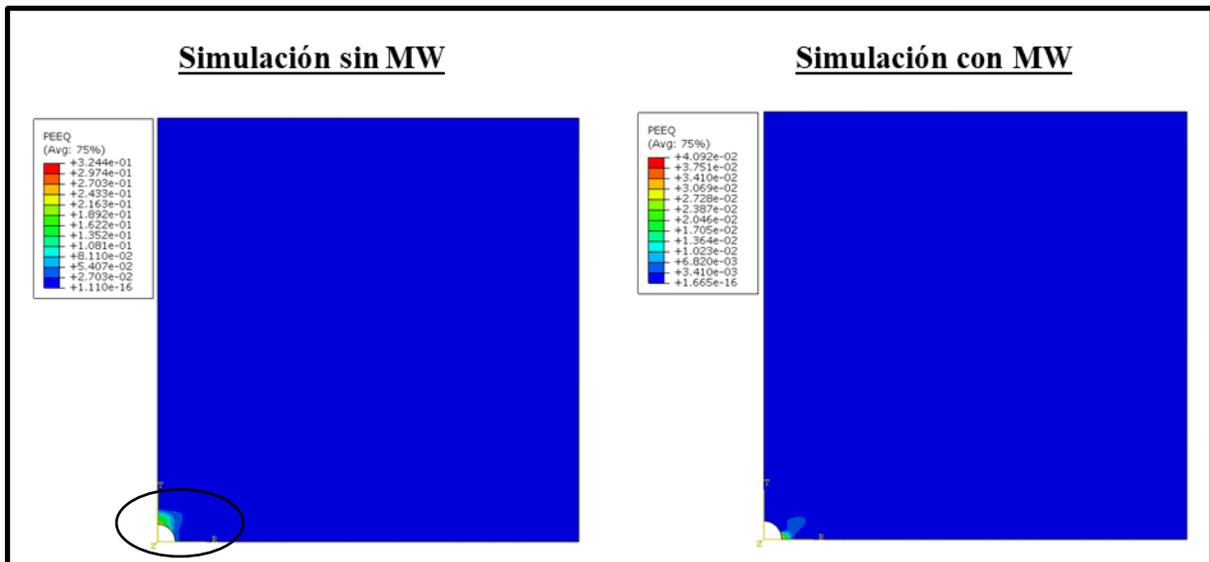


Figura 65. Deformación plástica equivalente régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$

En el régimen normal se puede apreciar la siguiente relación  $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ , razón por la cual el modo de falla observado en la vecindad del pozo corresponde a un breakout.

En las figuras 63 y 64 se aprecia que el régimen de esfuerzos en la pared del pozo presenta la siguiente relación  $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ , indicando que el modo de falla que actúa en la vecindad del pozo corresponde a un breakout. Como es de esperarse se observó un breakout más ancho en el modelo sin presión de lodo, así como una mayor concentración de esfuerzos y deformación plástica, pero en este caso para obtener condiciones de equilibrio se requiere una presión de lodo cercana a la presión de la formación.

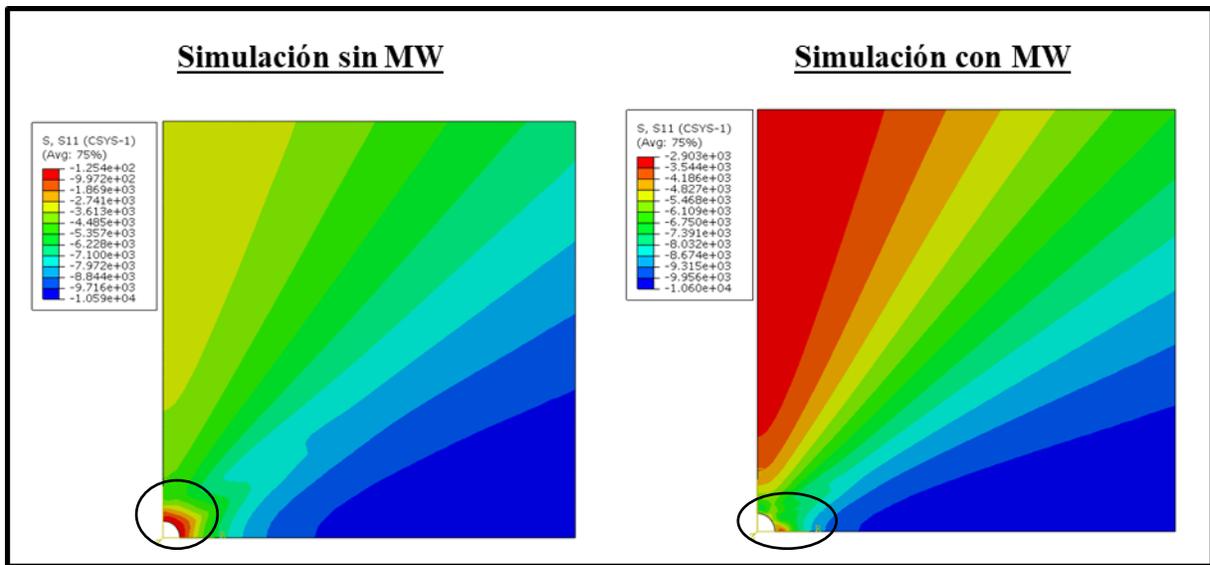


Figura 66. Esfuerzo radial régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$

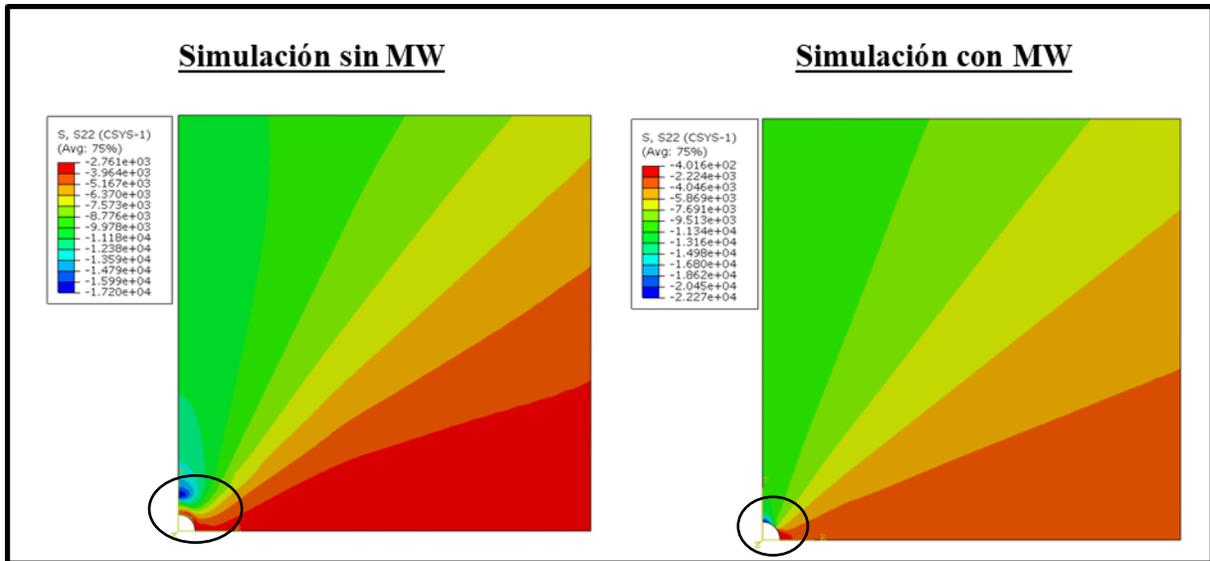


Figura 67. Esfuerzo tangencial régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$

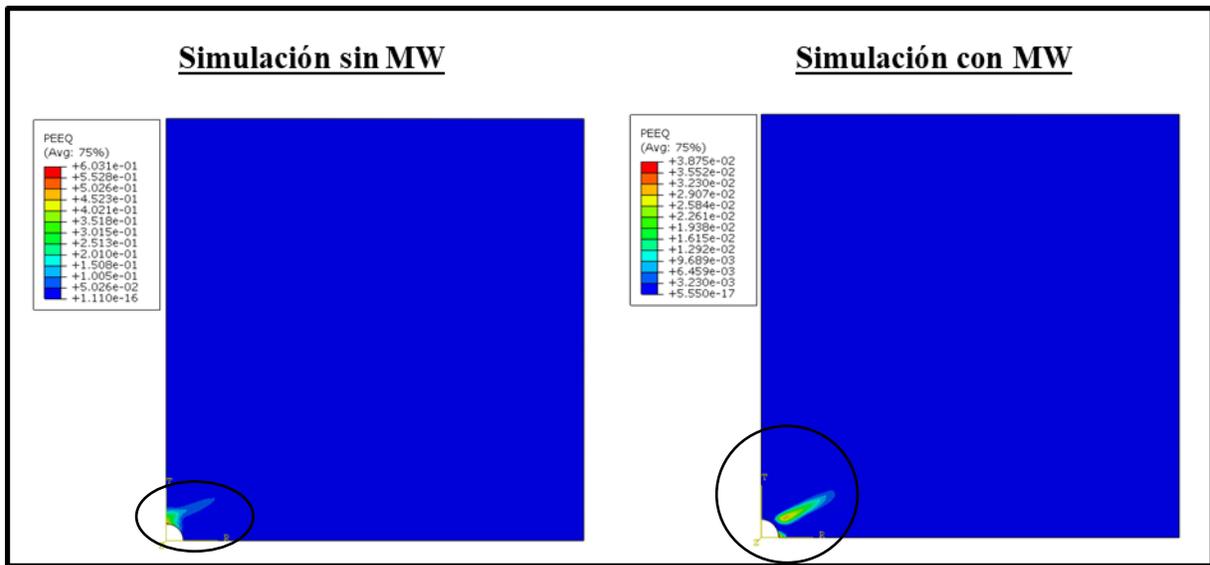


Figura 68. Deformación plástica equivalente régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$

En las figuras 66 y 67 se aprecia que el régimen de esfuerzos en la pared del pozo mantiene la misma relación de falla por breakout  $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ . Debido a que en este régimen la anisotropía de esfuerzos horizontales principales es mayor que respecto al régimen anterior,

se requiere una presión de lodo un 10% mayor que la presión de la formación para alcanzar el equilibrio.

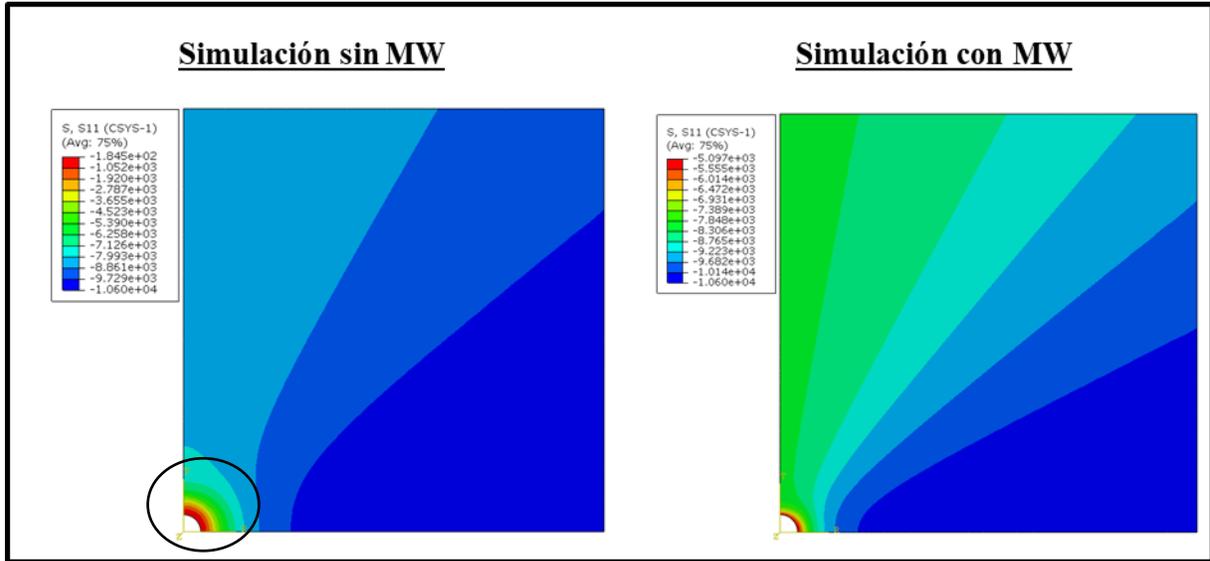


Figura 69. Esfuerzo radial régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$

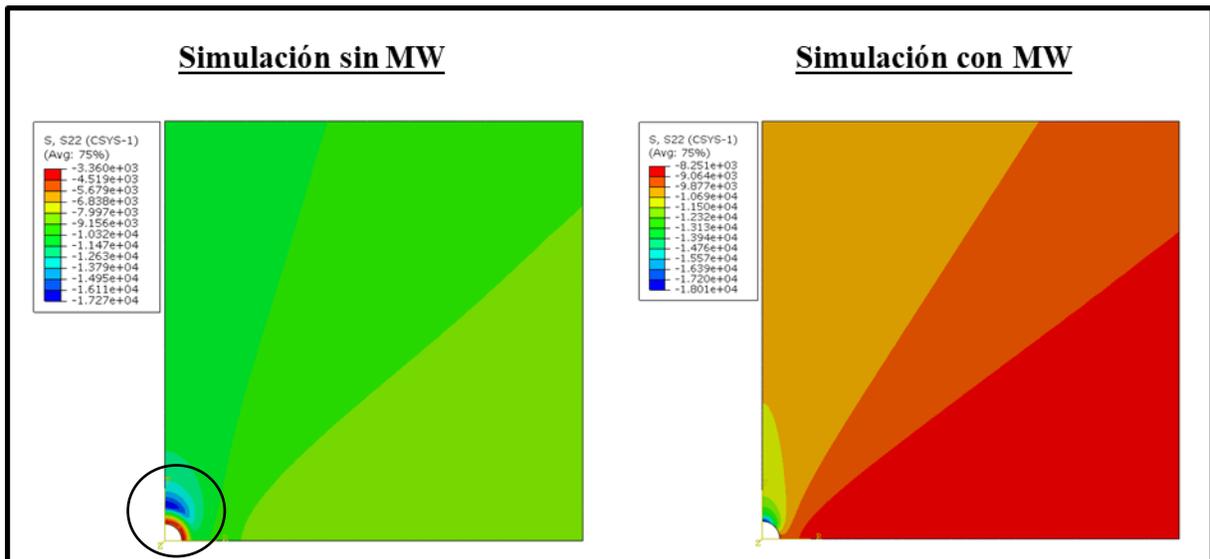


Figura 70. Esfuerzo tangencial régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$

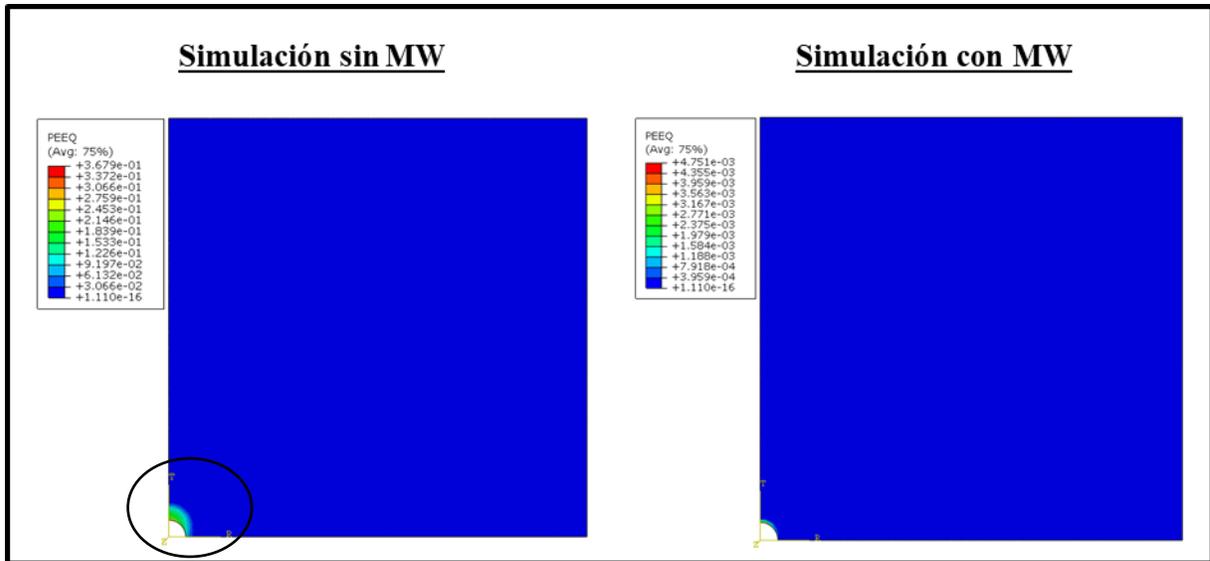


Figura 71. Deformación plástica equivalente régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$

Los análisis de las fallas por breakout para los regímenes normal, transcurrente e inverso mostraron que siempre se origina por la relación de esfuerzos  $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ , en dirección al esfuerzo mínimo debido a la mayor concentración de esfuerzos que sufre la roca en esta dirección, ocasionando ruptura en la roca a 180° de la cara del pozo en un plano radial tangencial.

## 6.2. Análisis condiciones de esfuerzos que generan las fallas tipo exfoliación

El modelo utilizado para estudiar el fenómeno de exfoliación es similar al usado para breakout 3D. Según las predicciones teóricas el modo de falla por exfoliación se origina cuando  $\sigma_r < \sigma_\theta$  y  $\sigma_r - P_p < T_o$ , siendo  $T_o$  la resistencia a la Tensión de la lutita. Los parámetros utilizados en este modelo se consolidan en la tabla 20. De igual manera los esfuerzos in situ variaran acorde con la tabla 19.

*Tabla 20. Datos modelo exfoliación 3D (Fuentes: García, 2006; Zoback, 2007; Zamora, 2016)*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Profundidad	10000 ft
Gradiente $P_p$	0.435 psi/ft
Módulo de Young	3E+7 psi
P. Lodo	4900 psi
Resistencia a la tensión	300 psi
UCS	3000 psi

En las siguientes figuras se aprecia el comportamiento de los diferentes esfuerzos para cada caso, analizando condiciones en balance, sobre balance y bajo balance respectivamente.

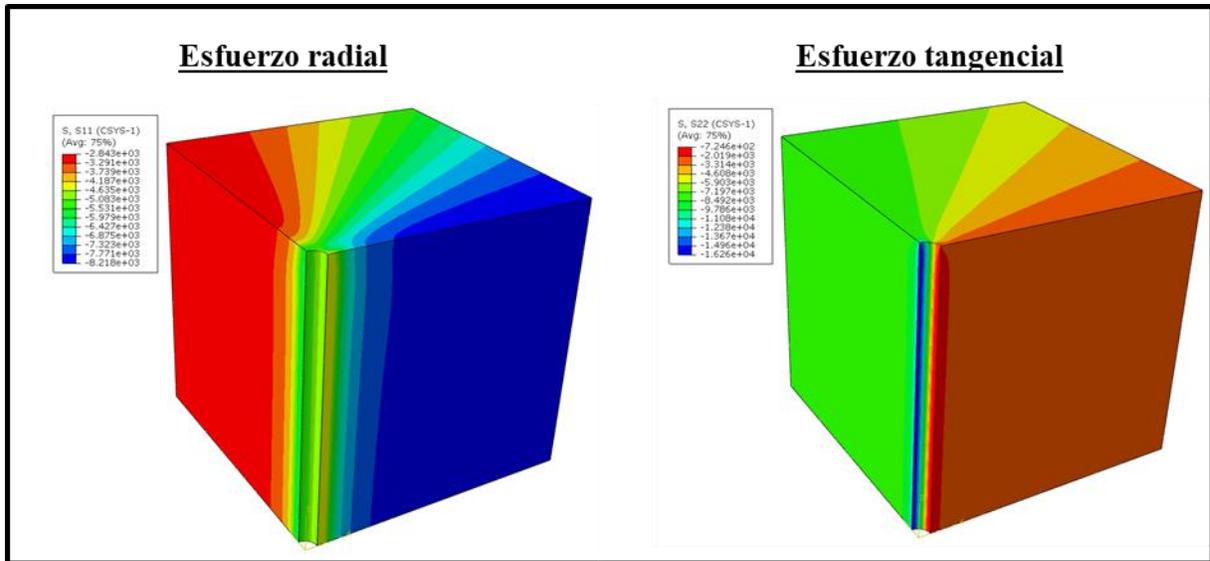


Figura 72. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen normal en condición de balance

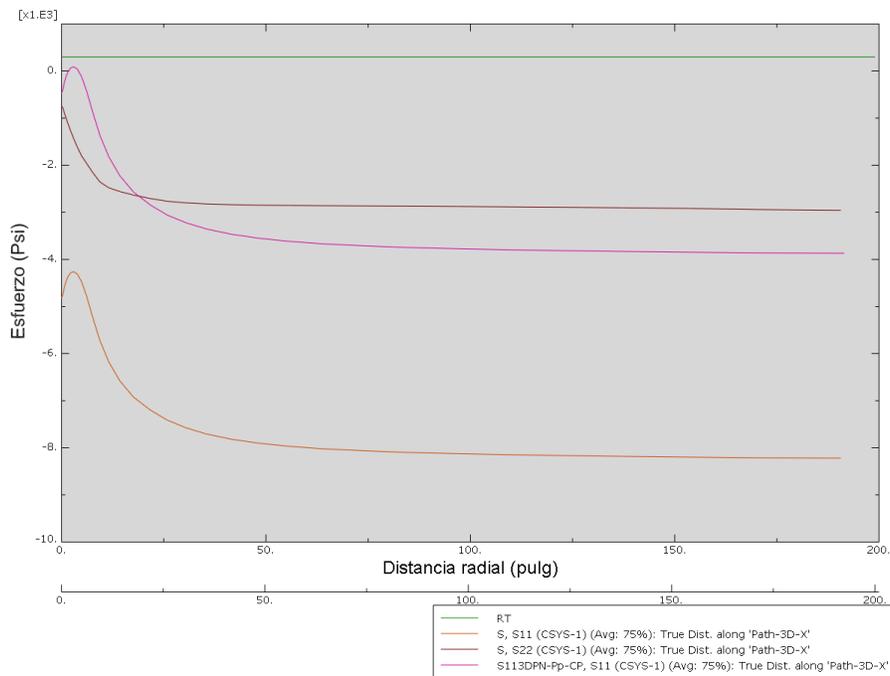


Figura 73. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición de balance

En la figura 73 se muestra la distribución de esfuerzos radiales (S11) y tangenciales (S22) a través del eje X (dirección del esfuerzo horizontal máximo), así como la curva S11-Pp y el valor de resistencia a la tensión (Rt). En este caso no se observa fallas en dirección X. En la figura 74 se grafica la distribución de esfuerzos en dirección del eje Y (dirección del esfuerzo horizontal mínimo) observando falla por tensión radial (Exfoliación).

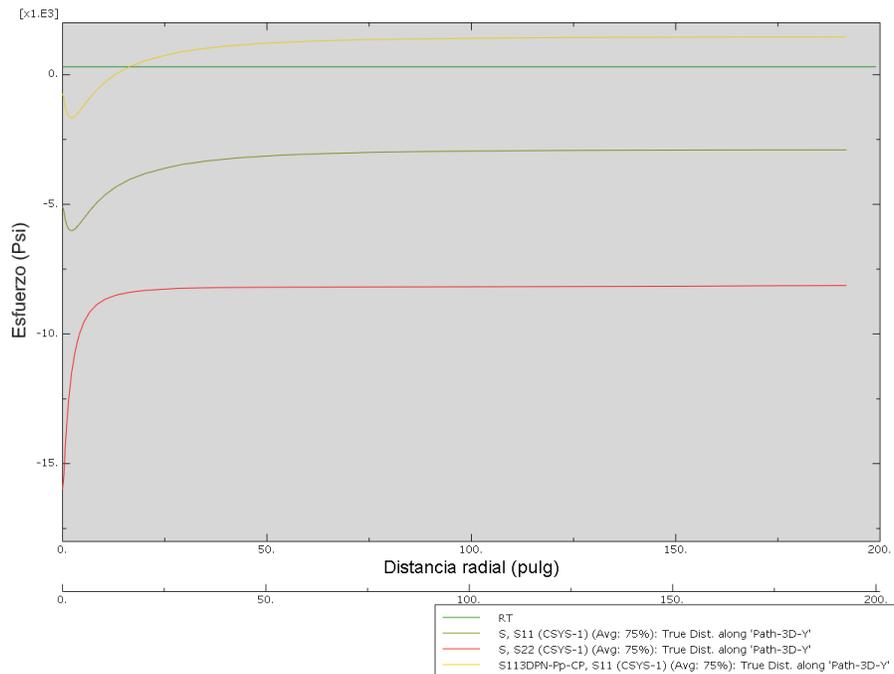


Figura 74. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición de balance

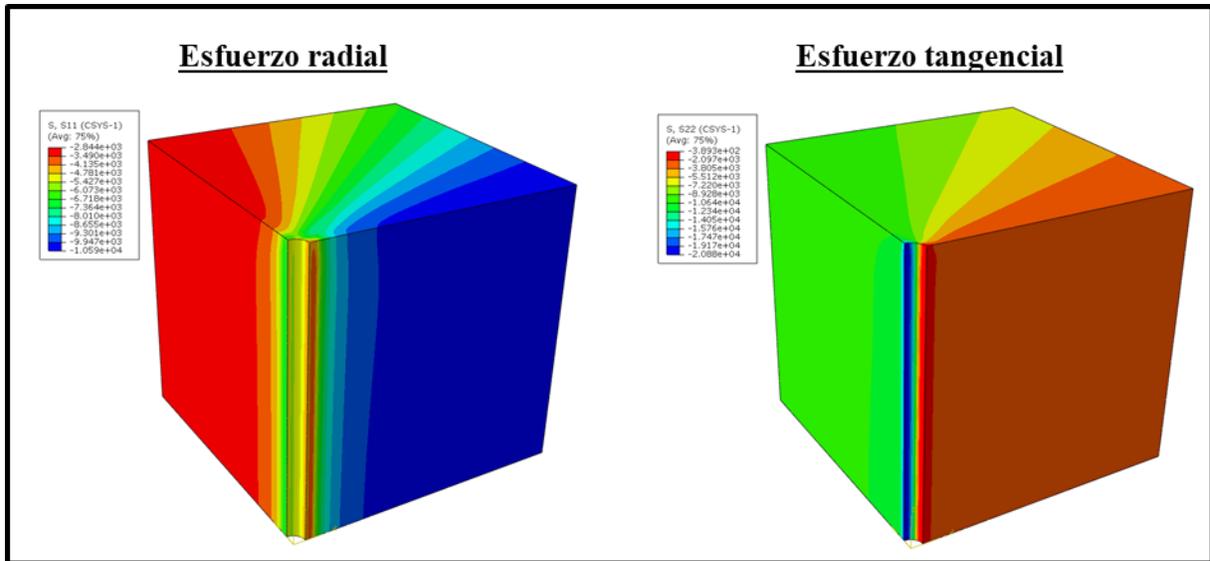


Figura 75. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen en condición de balance

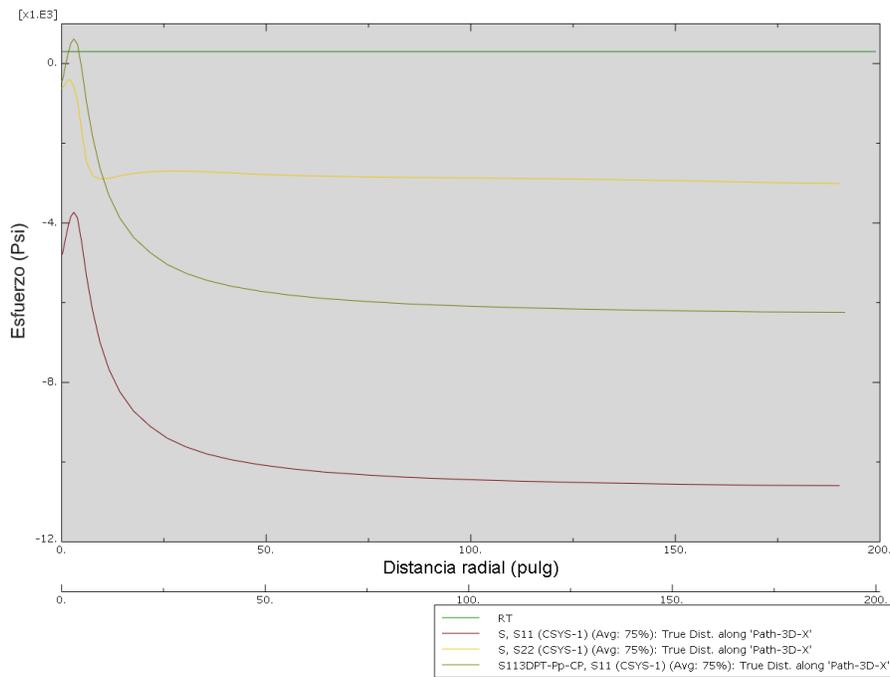
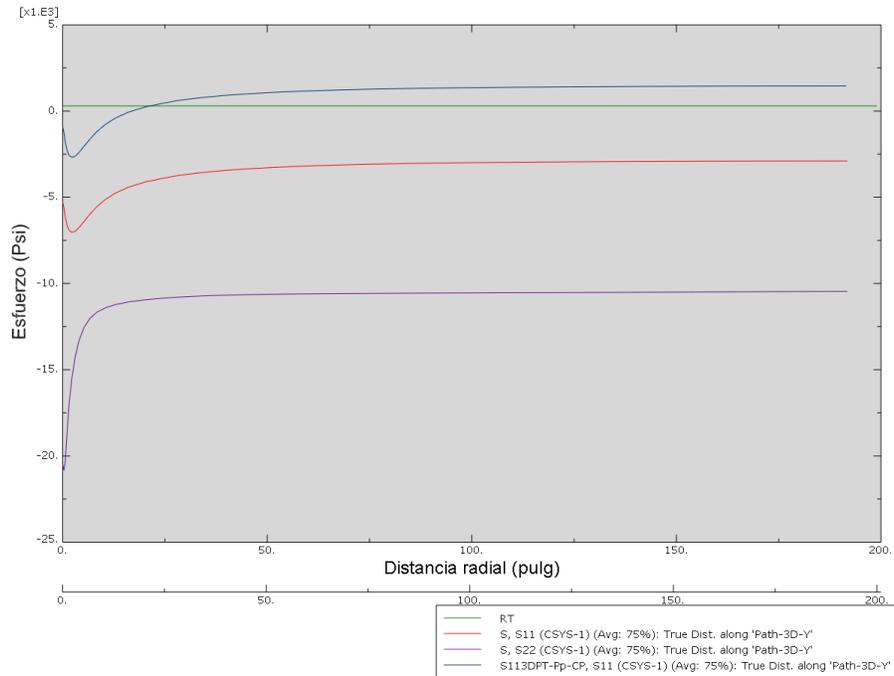


Figura 76. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición de balance

En la figura 76 la roca falla por tensión radial (exfoliación) en dirección del esfuerzo horizontal máximo. De igual forma en la figura 77 se muestra la misma distribución de esfuerzos, pero en dirección del eje Y (esfuerzo mínimo) con presencia de falla por exfoliación.



*Figura 77. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición de balance*

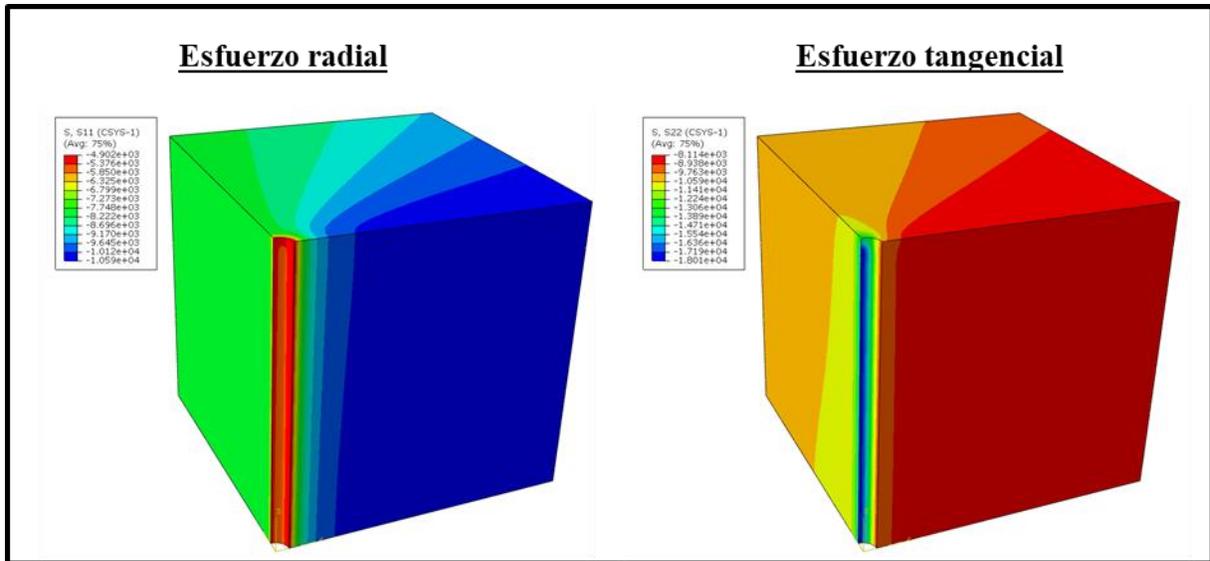


Figura 78. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen inverso en condición de balance

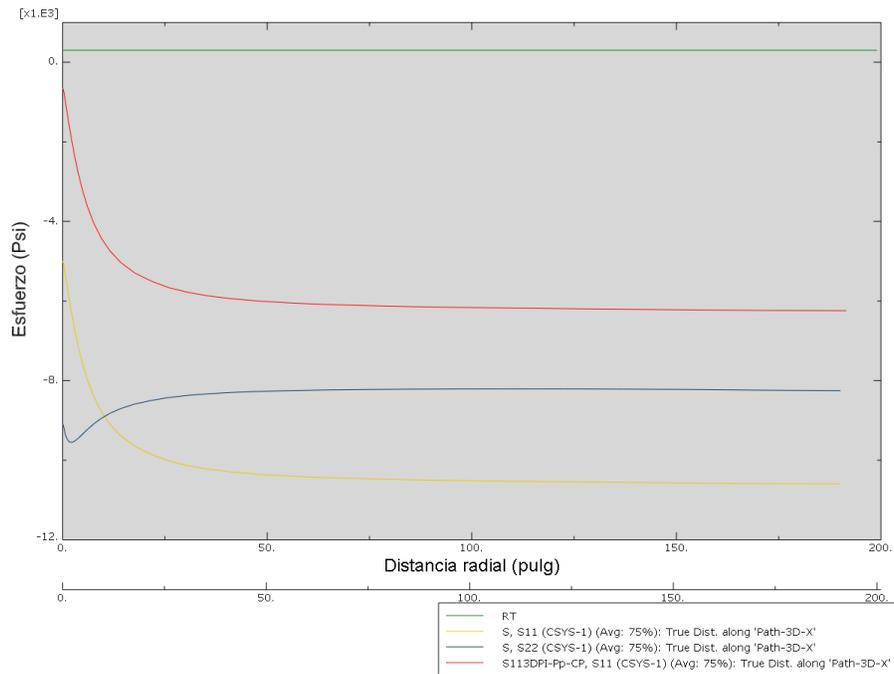
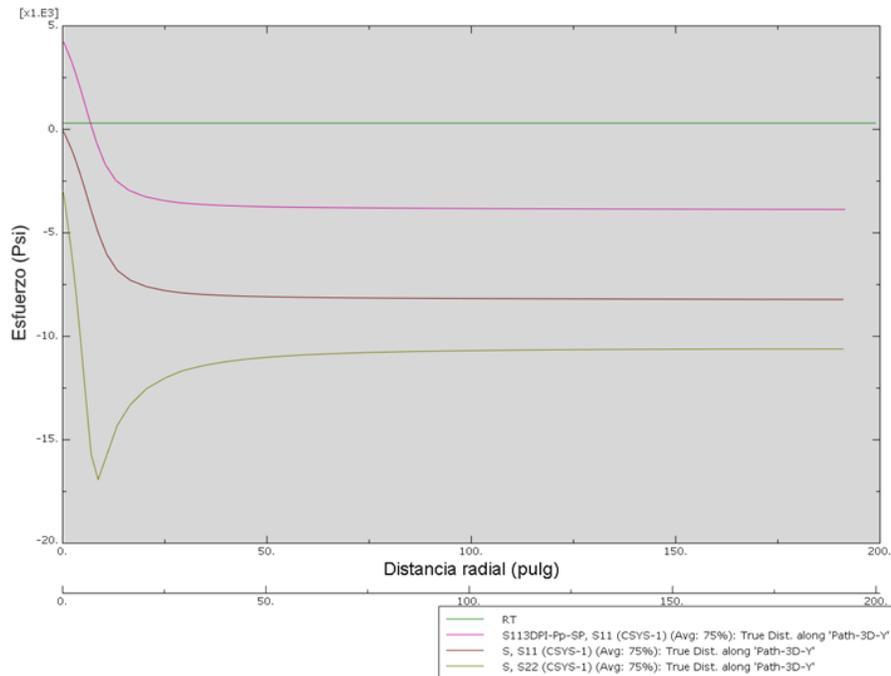


Figura 79. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición de balance



*Figura 80. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición de balance*

En la figura 79 no hay presencia de fallas por tensión en dirección del esfuerzo horizontal máximo, en la figura 80 se puede notar que la roca falla por tensión radial (exfoliación) en dirección del esfuerzo mínimo.

Como conclusión se tiene que los análisis de fallas por exfoliación para los regímenes normal, transcurrente e inverso en condiciones de balance, presentan fallas por tensión radial tipo exfoliación en dirección del esfuerzo mínimo.

A continuación, se presentan el comportamiento de los esfuerzos analizando los tres regímenes en condición overbalance.

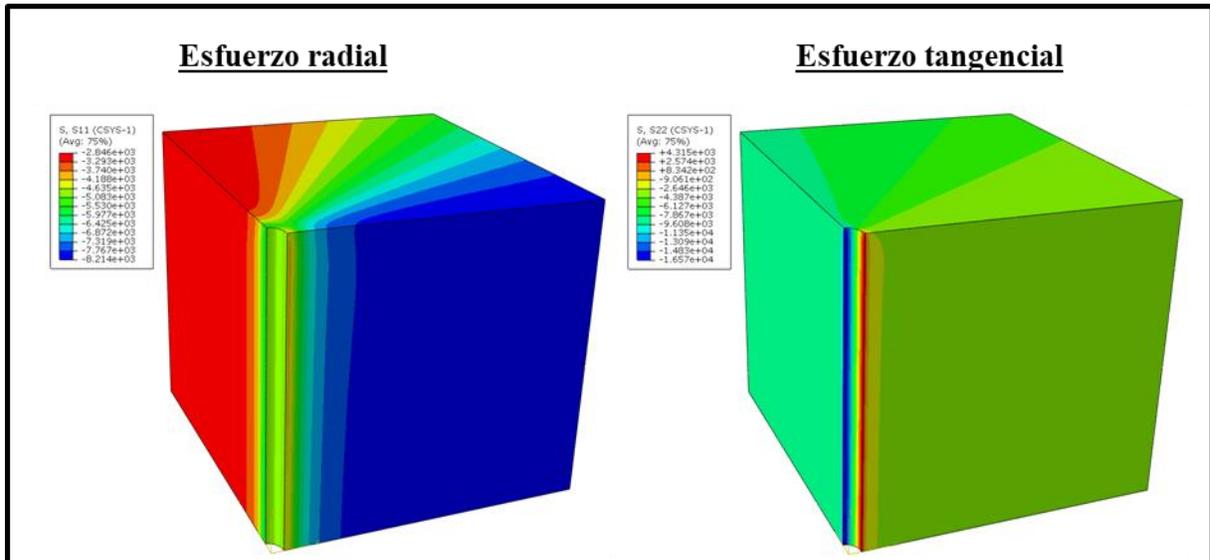


Figura 81. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen normal en condición overbalance

En la figura 82 se puede observar que la falla se da por tensión circunferencial, es decir por fractura en dirección del esfuerzo horizontal máximo. En la figura 83 se presenta una falla por tensión radial en dirección del esfuerzo horizontal mínimo.

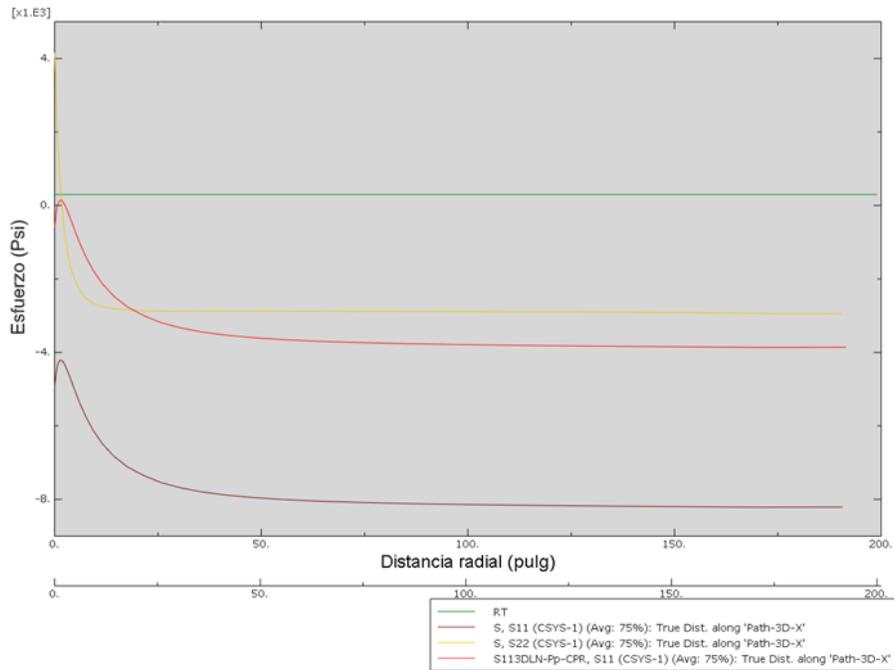


Figura 82. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición overbalance

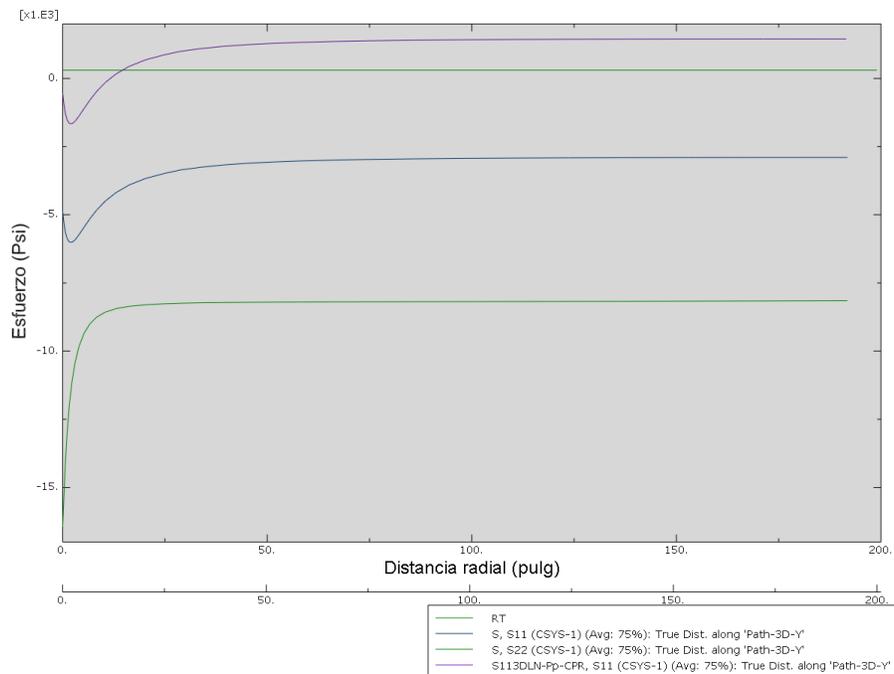


Figura 83. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición overbalance

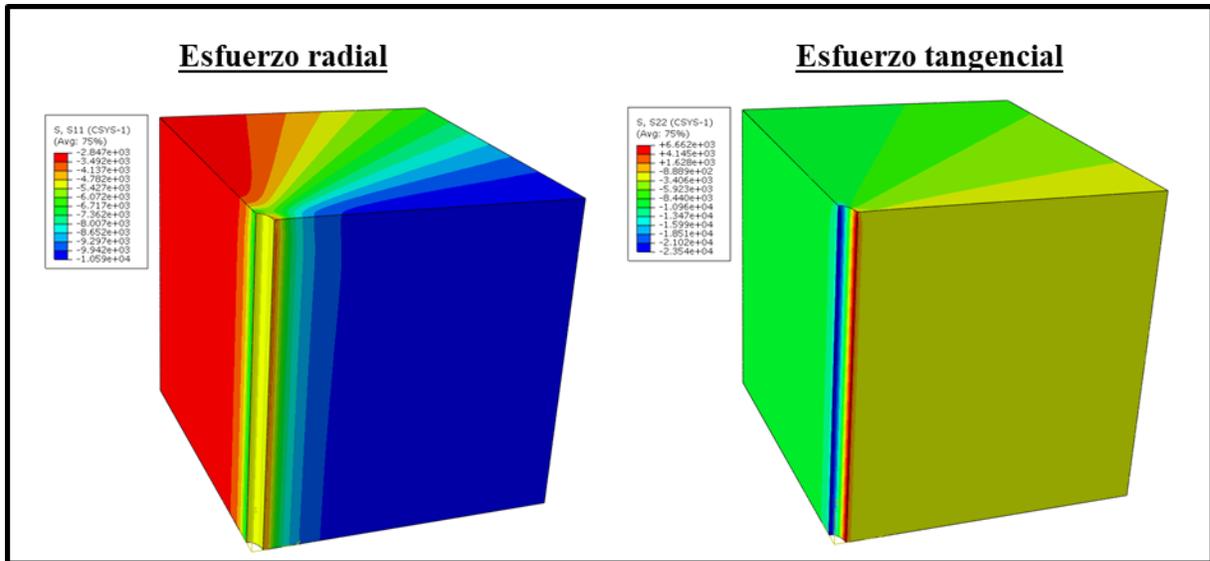


Figura 84. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen transcurrente en condición overbalance

En la figura 85 se observa la presencia de una falla por tensión circunferencial en dirección del esfuerzo horizontal máximo. En la figura 86 se observa fallas por tensión radial en dirección del esfuerzo horizontal mínimo.

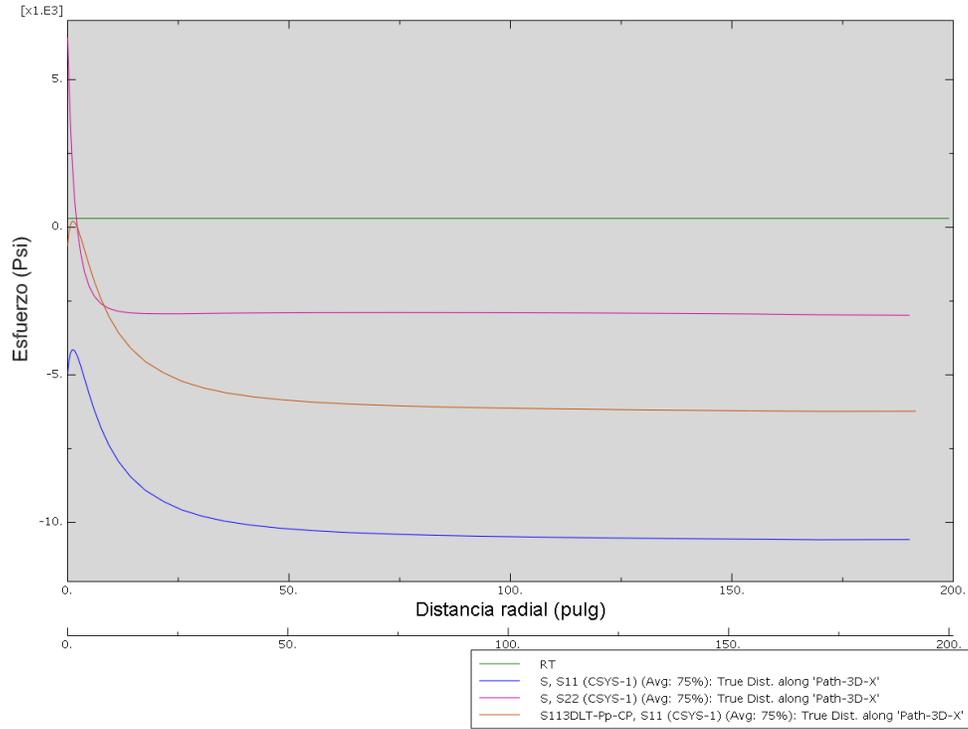


Figura 85. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición overbalance

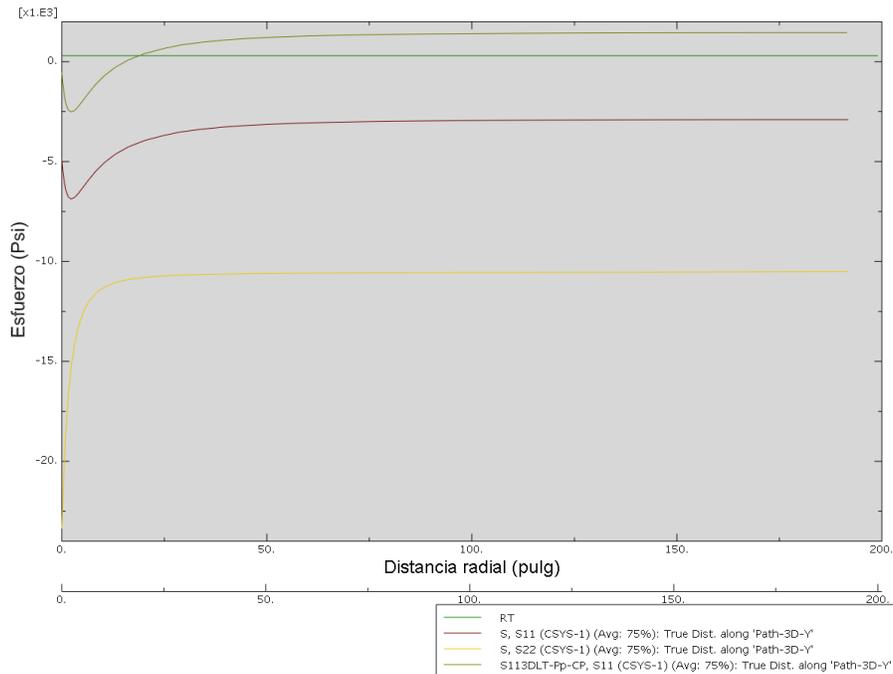


Figura 86. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición overbalance

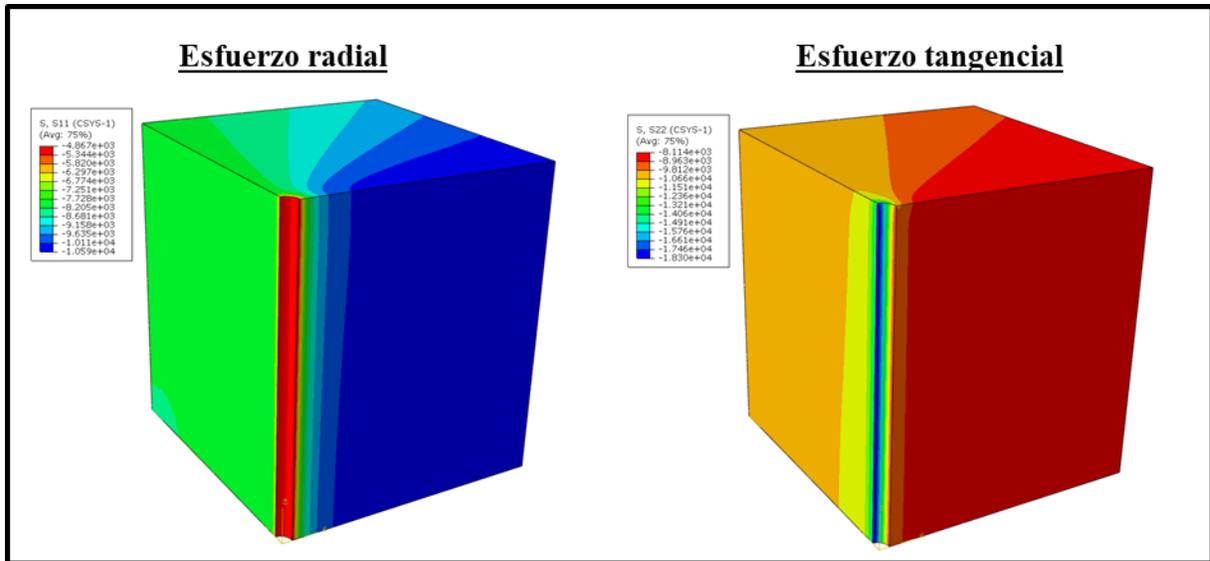


Figura 87. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen inverso en condición overbalance

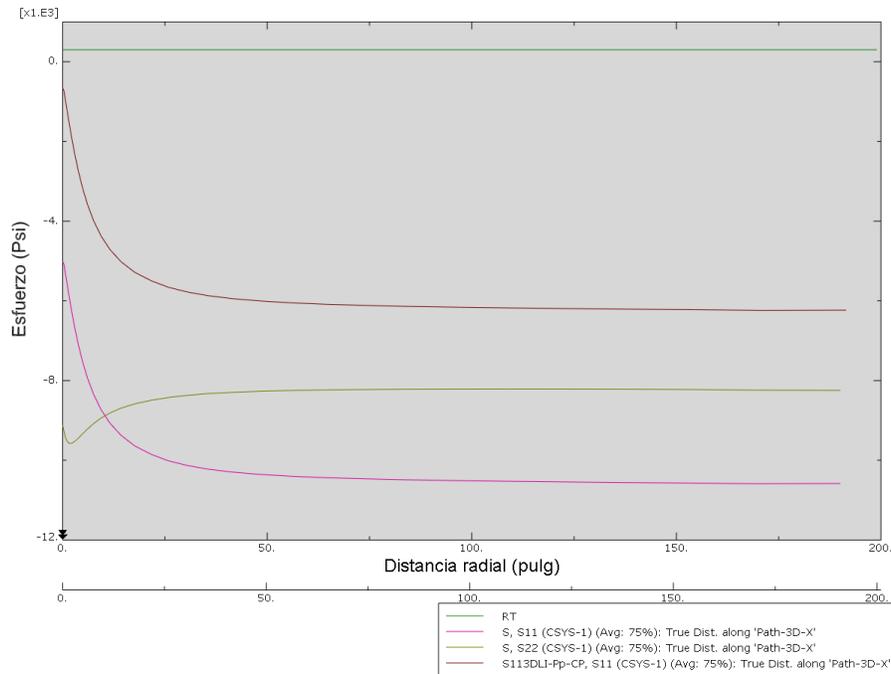
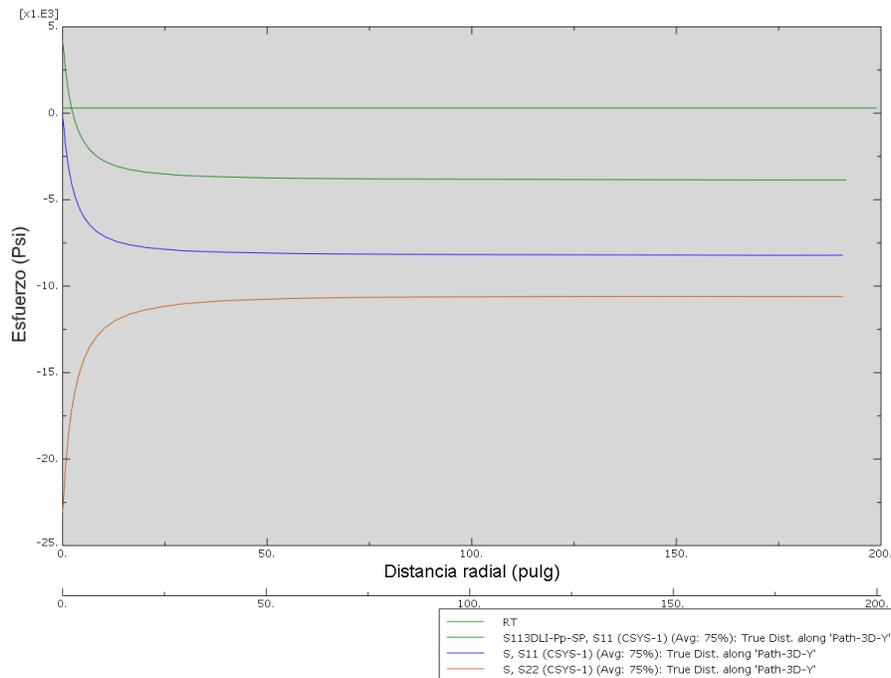


Figura 88. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición overbalance

En las figuras 88 y 89 se puede observar que el sistema solo presenta fallas por tensión radial en dirección del esfuerzo mínimo.



*Figura 89. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición overbalance*

Como conclusión se tiene que en condiciones extremas es posible tener fallas por exfoliación y fracturamiento (tensión circunferencial) simultáneamente en dirección de los esfuerzos mínimo y máximo respectivamente si se perfora en condiciones overbalance para los regímenes normal y transcurrente. En el régimen inverso solo se presentan fallas por tensión radial (exfoliación) en dirección del esfuerzo mínimo.

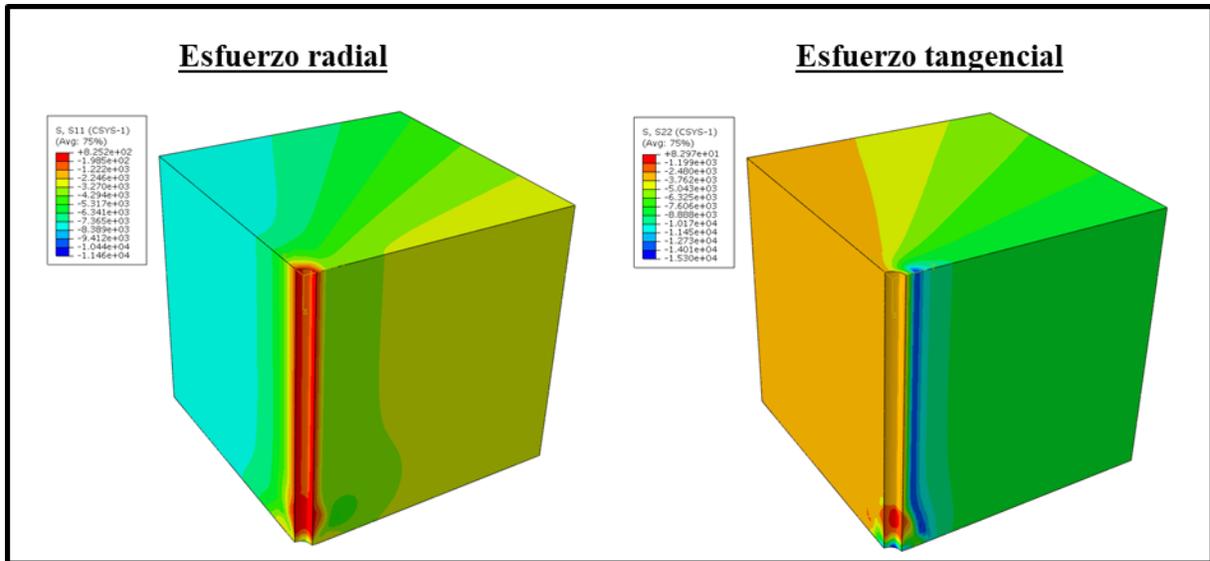


Figura 90. Esfuerzos  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  modelo exfoliación régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$  en condición underbalance

En las figuras 91 y 92 se observa que el sistema falla por tensión radial o exfoliación simultáneamente en dirección de ambos esfuerzos principales.

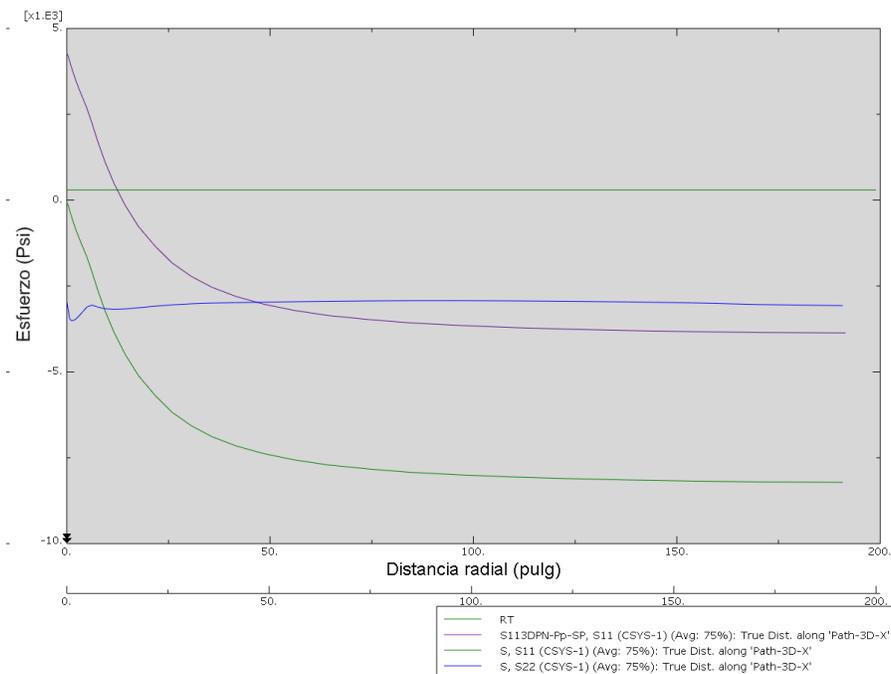


Figura 91. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición underbalance

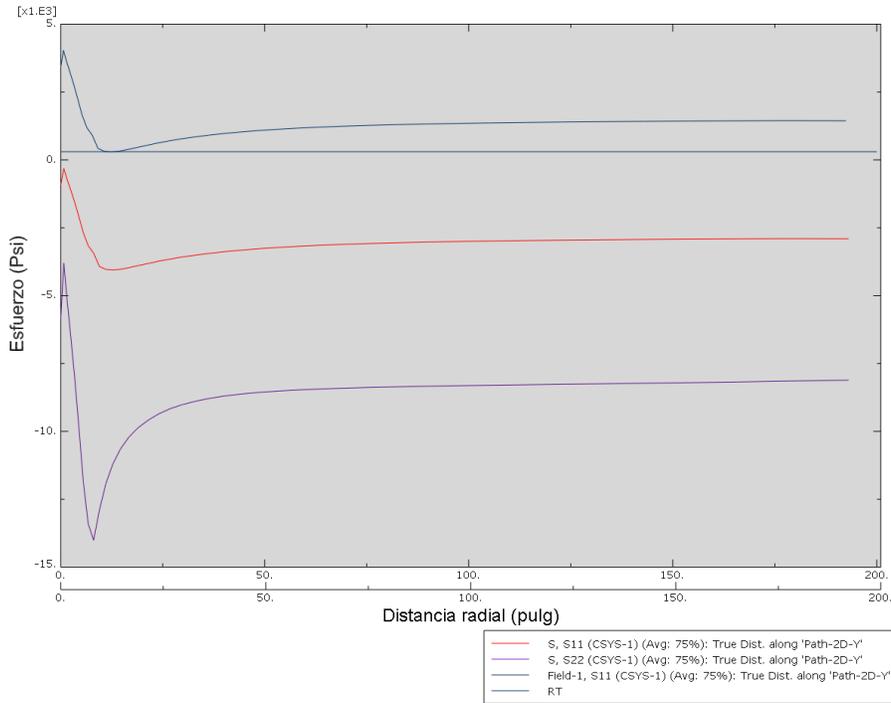


Figura 92. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen normal  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ , en condición underbalance

Transcurrente

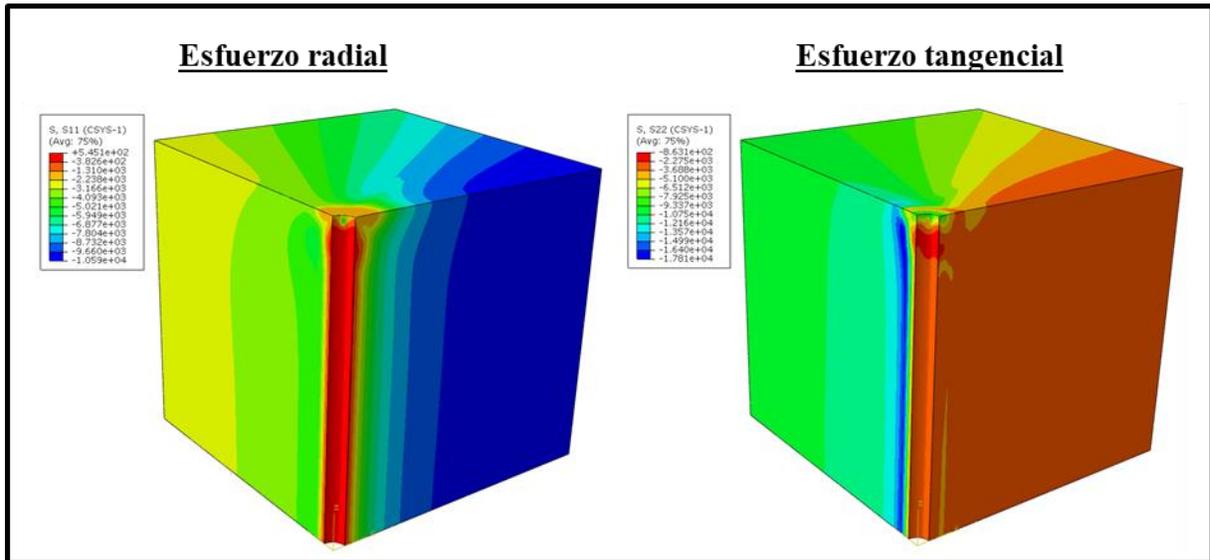


Figura 93. Esfuerzos radial y tangencial modelo exfoliación régimen transcurrente en condición underbalance

En las figuras 94 y 95 se observa un comportamiento similar al régimen normal debido a que el sistema falla por tensión radial o exfoliación en dirección de ambos esfuerzos principales.

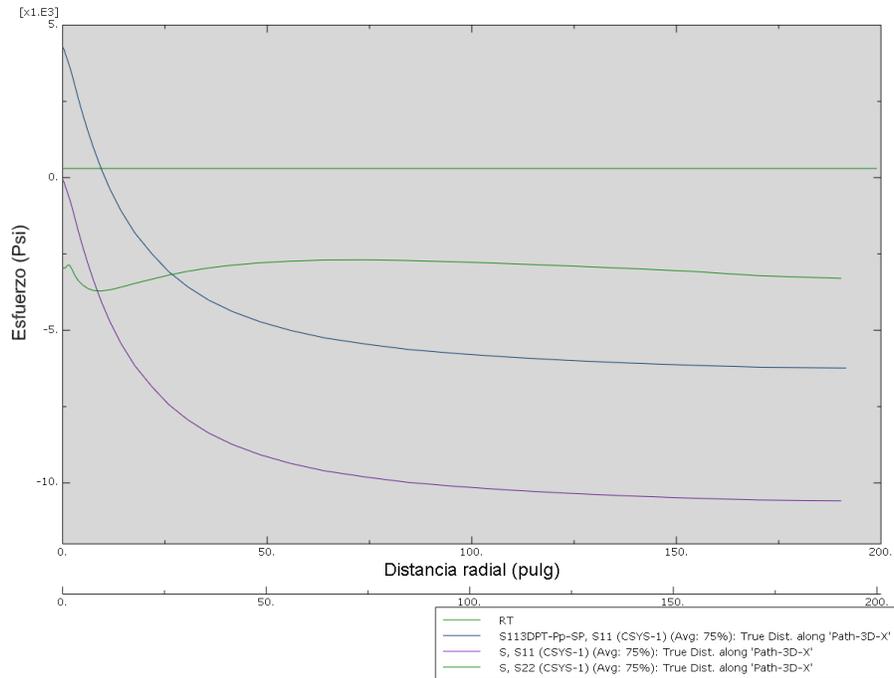


Figura 94. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición underbalance

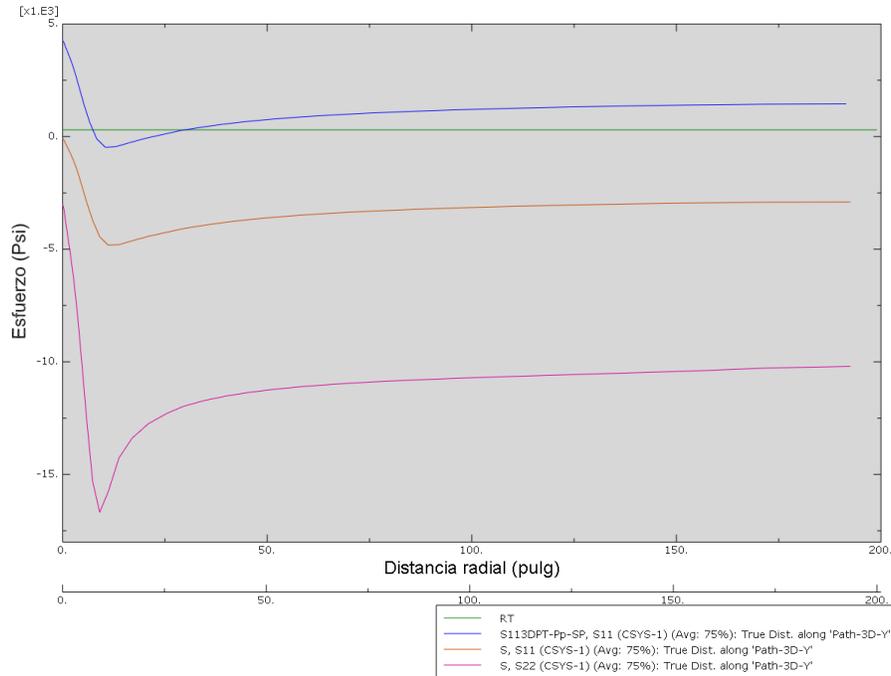


Figura 95. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen transcurrente  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , en condición underbalance

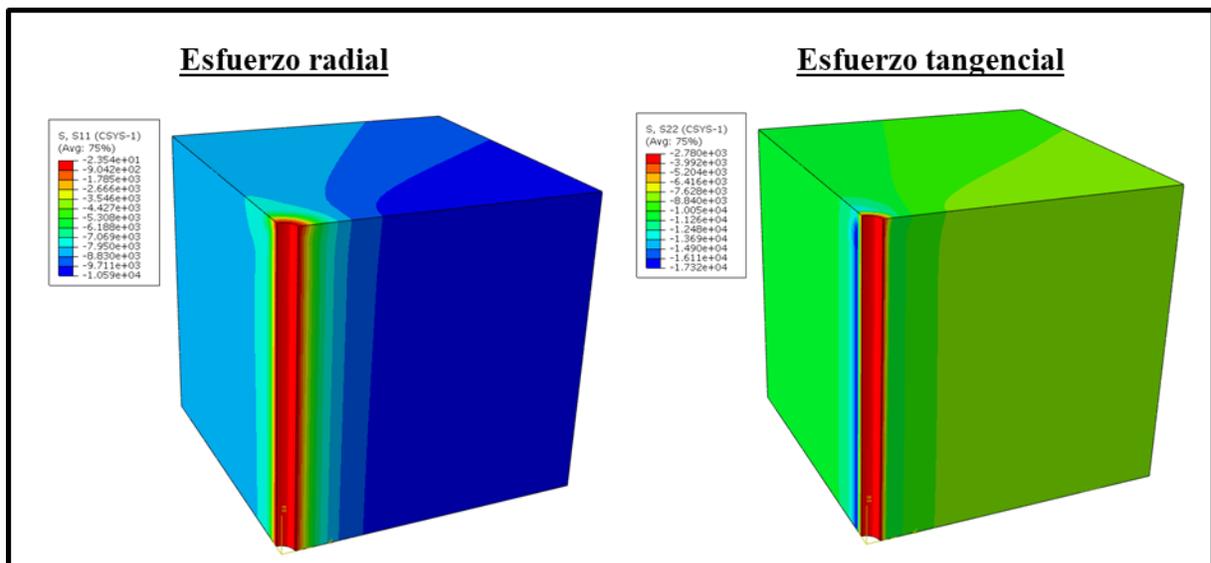


Figura 96. Esfuerzos radial y tangencial modelo exfoliación régimen inverso en condición underbalance

El análisis para el régimen inverso en condición underbalance muestra que la roca falla por tensión radial (exfoliación) tanto en dirección del esfuerzo horizontal máximo como en el mínimo.

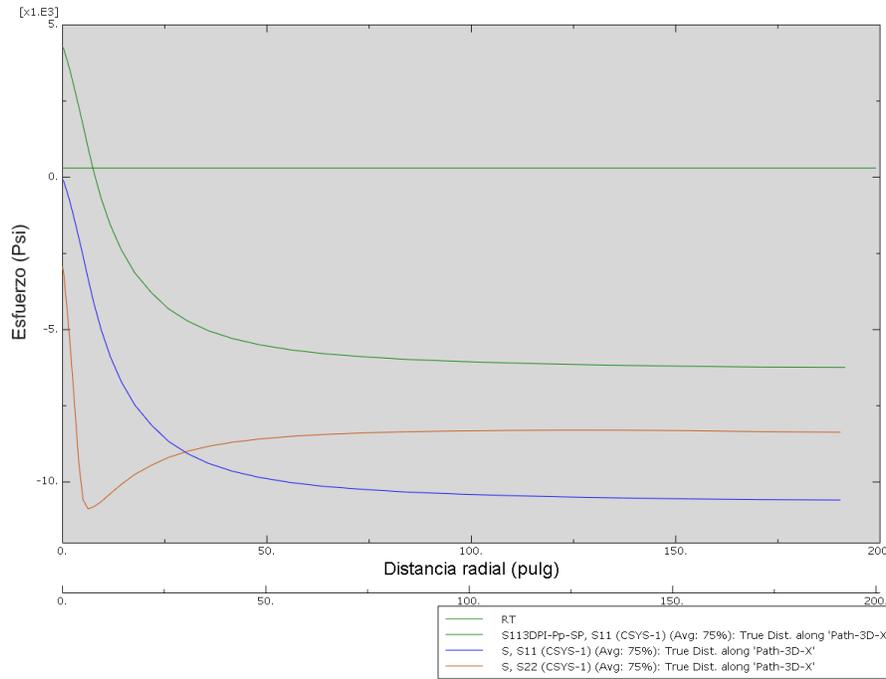
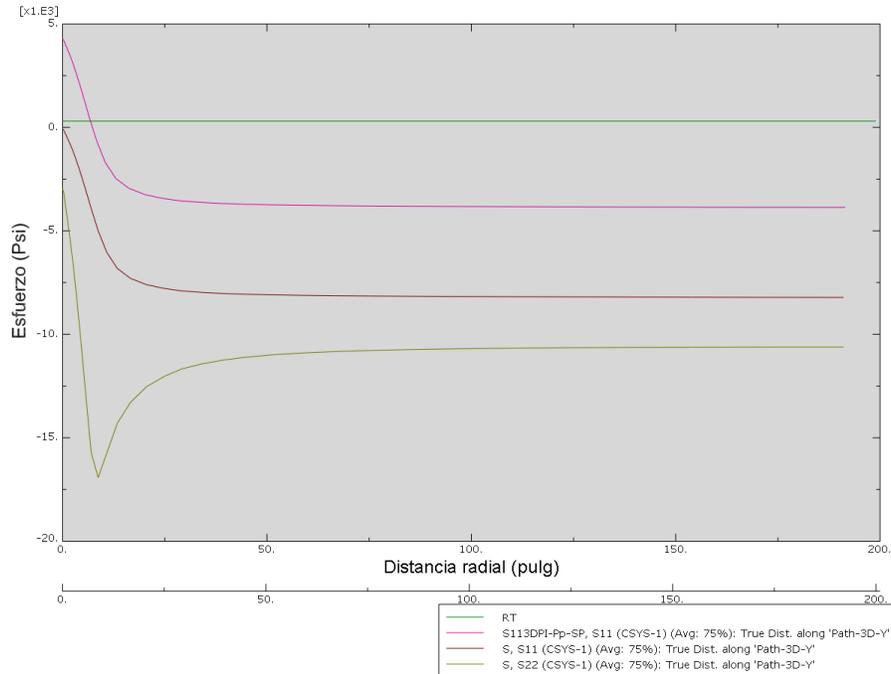


Figura 97. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo máximo régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición underbalance



*Figura 98. Distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en dirección del esfuerzo mínimo régimen inverso  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ , en condición underbalance*

Como conclusión se tiene que las fallas por exfoliación para los regímenes normal, transcurrente e inverso en condiciones underbalance se originan por la tensión radial en la roca y se presentan simultáneamente en dirección de los esfuerzo máximo y mínimo.

## 7. Análisis deformación y correlación con morfología de cavings

Para correlacionar la morfología de los cavings con los mecanismos de falla analizados se seleccionaron los nodos más cercanos a la cara del pozo, ver figura 99, de ahí la importancia de establecer un buen mallado, con el objetivo de tener la cantidad suficiente de puntos en 2 o 3 radios de distancia cerca la cara del pozo, cuidando de no pasar el límite del post-procesador para no consumir más recursos de los necesarios por el computador.

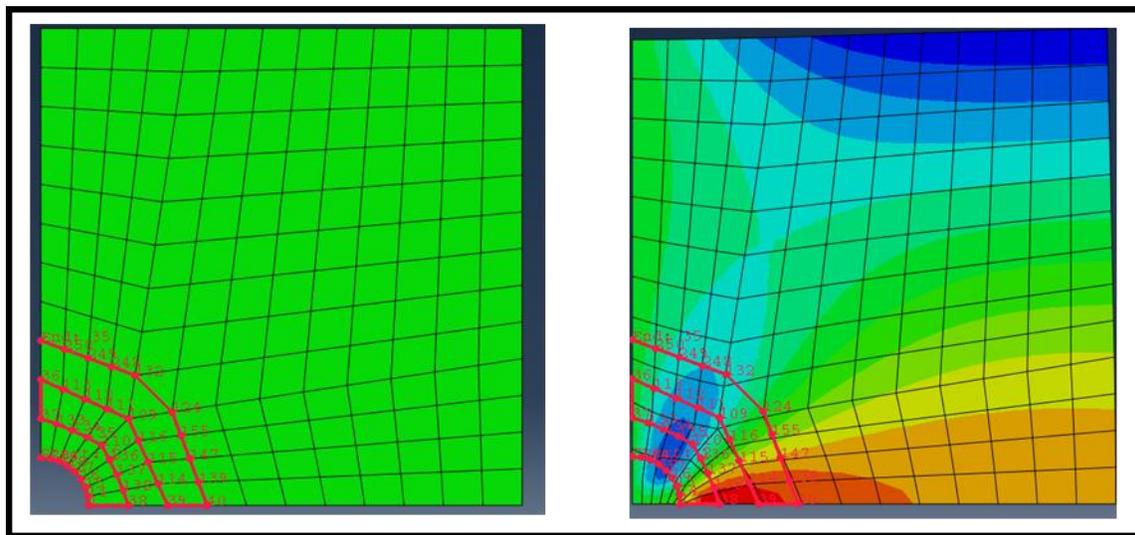
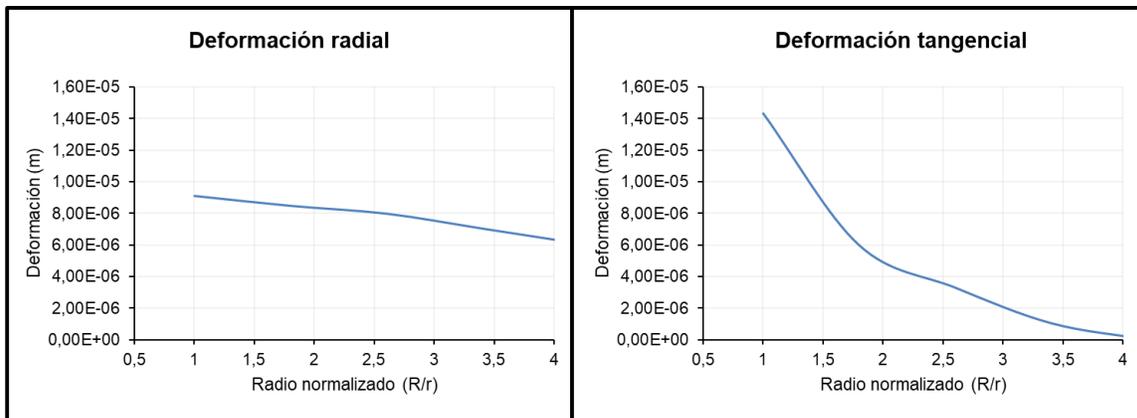


Figura 99. Análisis de deformación nodal para correlación con la morfología de cavings

A continuación, en la figura 100, se observa el perfil geométrico de la deformación de la cara del pozo, en la gráfica de deformación tangencial se puede apreciar una tendencia a generar cavidades angulosas que correlacionarían con los cavings angulares. El siguiente paso fue reducir los espacios entre los puntos de integración, para esto se procedió a desarrollar un mallado más fino cerca de la cara del pozo y así obtener una mejor resolución de la deformación.



*Figura 100. Análisis de nodo para su correlación con la morfología de cavings*

Para las fallas por exfoliación realizar este proceso es más complejo y no se puede obtener una conclusión aclaratoria debido a la pérdida de nodos e información adicional no deseada cuando se remueven elementos completos de la geometría con deformación plástica en el modelo, razón por la cual se recomienda realizar este análisis en un software de elementos discretos.

## 8. Conclusiones

A través de la metodología MICMAC se estableció que las variables más representativas a utilizar en el modelo numérico y experimental para realizar los respectivos análisis elástico y plástico de los modos de falla breakout y exfoliación son, presión de poro, cohesión de la roca, esfuerzos in situ, presión de lodo, ángulo de fricción interna, módulo de Young, módulo de Poisson y densidad.

Los resultados obtenidos en el laboratorio se tomaron como aproximación y comparación de los análisis numéricos realizados. Se corroboró el comportamiento de las fallas por cizalla en los ensayos de resistencia a la compresión realizados en las muestras convencionales con planos de falla a 45° y desarrollo de fracturas extensionales como resultado de la compresión de la muestra. De igual forma se corroboró las fallas por cizalla en los cilindros de pared gruesa, con roturas tipo breakout generadas en dirección del esfuerzo mínimo y a 180° en la cara interna del cilindro, producto de alto diferencial entre los esfuerzos radial y tangencial ( $\sigma_{\theta} \gg \sigma_r$ ).

El mayor contenido de arcilla en las muestras afectó principalmente el comportamiento plástico y la resistencia a la deformación de la roca. Registrándose valores de Young un 10% más bajo en las muestras con bentonita al 3%.

Se representó en Abaqus un modelo elástico y otro plástico para el análisis de fallas tipo breakout y exfoliación en 2D y 3D, con errores de 1%, 3% y 0.5% respecto a los cálculos de

esfuerzos radial, tangencial y axial obtenidos con las ecuaciones de Kirsch respectivamente, de igual forma se observó la convergencia de los esfuerzos ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ) con los esfuerzos in situ a 6 radios de distancia de la cara del pozo. En el modelo plástico se corroboró la estabilidad y equilibrio de la simulación durante el paso geostático con deformaciones del orden de  $10e-18$  mm, valor muy pequeño que puede ser considerado un cero computacional, resultado acorde antes de la alteración del estado de esfuerzos durante la perforación.

Los análisis de las fallas por breakout para los regímenes normal, transcurrente e inverso mostraron que siempre se origina por la relación de esfuerzos  $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ , en dirección al esfuerzo mínimo debido a la mayor concentración de esfuerzos que sufre la roca en esta dirección, ocasionando ruptura en la roca a  $180^\circ$  de la cara del pozo en un plano radial tangencial.

Los análisis de fallas por exfoliación para los regímenes normal, transcurrente e inverso en condiciones underbalance, registraron que las fallas de este tipo son por tensión radial y se presentan simultáneamente en dirección de los esfuerzo máximo y mínimo. En condiciones de balance las fallas por exfoliación para los tres regímenes se presentan en dirección del esfuerzo mínimo por tensión radial, aunque de menor severidad que el caso anterior. Esta fractura se genera adentro de la formación.

En un caso extremo es posible tener fallas por exfoliación y fracturamiento (tensión circunferencial) simultáneamente en dirección de los esfuerzos mínimo y máximo respectivamente si se perfora en condiciones overbalance para los regímenes normal y transcurrente. En el régimen inverso solo presenta fallas por tensión radial (exfoliación).

Se comprobó que las fallas tipo breakout esta relacionadas con la morfología de derrumbes angulares, para esto se analizó el perfil geométrico de los resultados de deformación obtenidos en la simulación observando una tendencia a formarse cavidades angulosas. Para las fallas por exfoliación realizar este proceso es más complejo y no se puede obtener una conclusión aclaratoria debido a la perdida de nodos e información adicional no deseada cuando se remueven elementos completos de la geometría con deformación plástica en el modelo, razón por la cual se recomienda realizar este análisis en un software de elementos discretos.

## **9. Recomendaciones**

Se recomienda realizar ensayos triaxiales aplicando las variaciones de esfuerzos planteadas en el diseño experimental para analizar los modos de falla breakout y exfoliación.

Se recomienda reproducir estos modelos en software de elementos discretos debido a las limitantes de los softwares de análisis de elementos finitos para analizar de una forma efectiva la perdida de material en la cara del pozo y la correlación de esta con la morfología de los cavings.

Se recomienda asegurar una adecuada compactación de las lechadas de cemento durante su preparación debido a la heterogeneidad obtenida en las muestras evidenciada en las

diferentes pruebas de caracterización mecánica realizadas (pruebas índices, pruebas petrofísicas y caracterización de granulometría). Esto significo descartar 8 muestras que corresponden al 20% del set total, un valor alto si se tiene en cuenta el tiempo invertido en el proceso de preparación.

## 10. Referencias bibliográficas

- Aadnoy, B., Hareland, G., Kustamsi, A., De Freitas, T., and Hayes, J. (2009, January 1). Borehole failure related to bedding plane. *American Rock Mechanics Association*.
- Aadnoy, B. S. and Looyeh, R. (2011). Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design. Firsts edition. *Oxford: Elsevier*.
- Abaqus Documentation 6.11. (2011). Abaqus analysis user's manual. *Dassault systemes Simulia*.
- Alsayed, M.I. (2002). Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (39), 355–366p.
- Al-Tahini, A. M., Ashraf, M., Abousleiman, Y. N., and Younane, N. (2008, January 1). Insights into borehole deformation and relationship between wellbore induced stresses, breakouts, and in-situ stresses. *American Rock Mechanics Association*.
- Barton, C.A., Zoback, M.D., and Burns, K.L. (1988). In Situ Stress Orientation and Magnitude at the Fenton Geothermal Site, New Mexico, Determined from Wellbore Breakouts. *J Geophys. Res. Let.* (15), 467-470.
- Bell, J.S. and Gough, D.I. (1983). The use of borehole breakouts in the study of crustal stress. Washington, D.C.: National Academy Press.

Bois, A.-P., and Vu, M.-H. (2014, August 18). Toward an Objective Method of Determining in Situ Stress from Wellbore Features. *American Rock Mechanics Association*.

Brace, W.F. (1961). Dependence of fracture strength of rocks on grain size. *Bulletin of Mineral Industries Experimental Station. Penn. State University*, No. (76), 99–103.

Bradford, I. D. R., Aldred, W. A., Cook, J. M., Elewaut, E. F. M., Fuller, J. A., Kristiansen, T. G., and Walsgrove, T. R. (2000, January 1). When Rock Mechanics Met Drilling: Effective Implementation of Real-Time Wellbore Stability Control. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/59121-MS.

Brudy, M. and Zoback, M.D. (1993). Compressive and tensile failure of boreholes arbitrarily inclined to principal stress axes: Application to the KTB boreholes, Germany. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, January*. Abstr. (30), 1035- 1038p.

Cadman, J. (1969). The origin of exfoliation joints in granitic rocks. Ph.D. thesis. University of California, Berkeley, U.S.A.

Cao, W., Deng, J., Yu, B., Tan, Q., Liu, W., Li, Y., and Gao, J. (2016, June 26). A Revised Method of In-Situ Stress Determination from Drilling-Induced Fractures: A Case Study of High Temperature and Low Permeability Formation Drilling. *American Rock Mechanics Association*.

Cely B, Alexandra V. (Diciembre de 1999). Metodología de los escenarios para estudios prospectivos. *Revista Ingeniería e investigación* No. 44. Colombia.

Chen, X., Tan, C. P., and Haberfield, C. M. (1996, January 1). Wellbore Stability Analysis Guidelines for Practical Well Design. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/36972-MS. 630p.

Detournay, E. and Roegiers, J.C. (1986). "Well bore breakouts and in situ stress" by Mark D. Zoback, Daniel Moos, Larry Mastin, and Roger N. Anderson. *J. Geophys. Res.* 91, No. (B14), 14,161-14,162.

Dodson, J. (January 2009). Technologies needed to meet deepwater business needs. *En Offshore Magazine*.

Erarslan, N., Williams, D. J., and Shokouhi, A. (2013, January 1). Tensile Fracturing of Anisotropic Brisbane Phyllite. *International Society for Rock Mechanics*.

Fjaer E, Holt R.M, and Horsrud A.M. (2008). Petroleum Related Rock Mechanics. Second edition published 2008. Elsevier. Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam.

Garcia, M. A. (2006). "Determinacion de la orientacion y magnitud del esfuerzo maximo horizontal a partir del modelamiento de Breakouts en la zona del piedemonte llanero colombiano". Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Germanovich, L. N., Roegiers, J.C., and Dyskin, A. V. (1994, January 1). A model for borehole breakouts in brittle rocks. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/28072-MS. 362 p.

Gilbert, G.K. (1904). Domes and dome structures of the high Sierra. *Geological Society of America Bulletin* (15), 29-36.

Guo, Q., Cook, J., Way, P., Ji, L., and Friedheim, J. (2014, March 4). A Comprehensive Experimental Study on Wellbore Strengthening. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/167957-MS.

Guzmán, F., De Azevedo, V., Rabello, G., Bloch, M., and Vargas, E. (2010, January 1). Breakouts: Physical, Numerical and Analytical Modeling. *En Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/131656-MS.

Haimson, B., and Herrick, C. (1986, September 1). Borehole breakouts--A new tool for estimating in situ stress, in Stephansson, O., ed., Rock stress and rock stress measurements. *International symposium on rock stress and rock stress measurements*. Stockholm, Sweden.

Hedayat, A., Pyrak-Nolte, L., and Boet, A. (2014, August 18). Geophysical Investigation of Shear Failure along Cohesive-Frictional Rock Discontinuities. *American Rock Mechanics Association*.

Hoek, E. (1964.) Fracture of anisotropic rock. *J. S. Afr. Inst. Min. & Metall*, 64(10), 501–18.

Holman, W. (1976). The origin of sheeting joints. A hypothesis. (Ph.D. thesis). University of California, Los Angeles, U.S.A.

Holzhausen, G. (1989). Origin of sheet fracture, 1. Morphology and boundary conditions. *Engineering Geology*, (27), 225-78.

Jaeger, J., Cook, N. and Zimmerman, R. (Ed.). (2007). Fundamentals of rock mechanics. Malden, USA: Blackwell Publishing.

Johnson, R. (1970). *Physical Processes in Geology*. Freeman and Company, San Francisco, USA.

Kanagawa, S., and Lewy, R. (2008, January 1). Sabed-Core Uniáxial Compresión Test for Standing Borehole Breakout in Racks. *American Rock Mechanics Association*.

Karimi, M. (2013, October 22). Drill-Cuttings Analysis for Real-Time Problem Diagnosis and Drilling Performance Optimization. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/165919-MS.

Lee, M., Eckert, A. and Nygaard, R. (2011, June). Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis. ARMA. In 45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium held. San Francisco, USA.

Maiz, S., Rossi, R., Bambill, D. (2004). Efectos de la ortotropía sobre el factor de concentración de tensiones: extensión del problema de Kirsch, ENIEF 2004, *Mecánica Computacional*, (23), 673-92.

Ong, S.H. and Roegiers, J.C. (1993). Influence of anisotropies in borehole. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* (30), 1069-1075.

Ostadhassan, M., Jabbari, H., Zamiran, S., Osouli, A., Oster, B., and Lentz, N. . (2014, October 21). Wellbore Instability of Inclined Wells in Highly Layered Rocks — Bakken Case Study. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/171026-MS.

Peska, P. H. S. W., and Zoback, M. D. (1995, January 1). Observations of borehole breakouts and tensile wall-fractures in deviated boreholes: A technique to constrain in situ stress and rock strength. *American Rock Mechanics Association*.

Sánchez, M., and Troyani, N. (2003). “Factor Teórico de Concentración de esfuerzos en piezas cortas de materiales anisotrópicos”, ENIEF 2003, *Mecánica Computacional*, Vol. (22), 2135-2144.

Shamir, G. and Zoback, M.D. (1992). Stress orientation profile to 3.5 km depth near the San Andreas fault at Cajon Pass, California. *J. Geophys. Res.* 97, No. (B4), 5059-5080.

Shahri, M. P. (2015, September 28). Quantification of Wellbore Strengthening Mechanisms: Comprehensive Parametric Analysis. *Society of Petroleum Engineers*. doi: 10.2118/174770-MS.

Susca, A., Bambill D. V., and Rossit C. A. (2007). “Análisis de la concentración de tensiones en placas ortótropas con orificio circular sometidas simultáneamente a cargas normales y tangenciales”, ENIEF 2007, *Mecánica Computacional*, Vol. (26), 386-405.

Tianshou, M., T., Chen, P., Yang, C., and Zhao, J. (2015, November). Wellbore stability analysis and well path optimization based on the breakout width model and Mogi–Coulomb criterion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume (135).

Walton, G., Kalenchuk, K. S., Hume, C. D., and Diederichs, M. S. (2015, November 13). Borehole Breakout Analysis to Determine the In-Situ Stress State in Hard Rock. *American Rock Mechanics Association*.

White, W.S. (1946). Rock-bursts in the granite quarries at Barre, Vermont. En U.S. *Geological Survey, Circular*, (13)..

Yu, H. S. (2009). Cavity expansion methods in geomechanics. Kluwer Academic Publishers.

Zamora, Y. (Brasil 2016). Comportamento da Frente de Escavação de Túneis Rasos. Universidade de Brasília. Faculdade de tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Zhong, H., Qiu, Z., Chen, G., Huang, W., Dong, B., Zhang, D., and Tong, S. (2015, October 20). Improving the Wellbore Stability While Drilling Long Open Hole Shale Intervals in Tahe Oil Field. *Society of Petroleum Engineers*. doi: 10.2118/176165-MS.

Zimmerman, R. W. (2010, Jun 15). Some Rock Mechanics Issues in Petroleum Engineering. *International Society for Rock Mechanics*.

Zoback, M.D., Moos, D., And Mastin, L. (1985). Well bore breakouts and in situ stress. *J. Geophys. Res.* 90, No. (B7), 5523-5530.

Zoback, M.D. (2007). Reservoir Geomechanics. First edition. United Kingdom at the University Press, Cambridge.