

ANÁLISIS DEL EFECTO DEL ÁNGULO DE ATAQUE DE PERFORACIÓN EN LA
ESTABILIDAD GEOMECÁNICA DE FORMACIONES NATURALMENTE
FRACTURADAS UTILIZANDO UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

HERNAN DARIO MANTILLA HERNANDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRIA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA

2015

|

ANÁLISIS DEL EFECTO DEL ÁNGULO DE ATAQUE DE PERFORACIÓN EN LA
ESTABILIDAD GEOMECÁNICA DE FORMACIONES NATURALMENTE
FRACTURADAS UTILIZANDO UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

HERNAN DARIO MANTILLA HERNANDEZ

Trabajo de grado para optar al título de Maestría en Geotecnia

DIRECTOR

M. Sc. Jose Miguel Benjumea Royero - Docente UIS

CODIRECTOR

Ph. D Henry Arias

Líder Grupo Central de Tecnologías de Perforación Ecopetrol S.A.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

MAESTRIA EN GEOTECNIA

BUCARAMANGA

2015

|

Dedicatoria

A mi esposa, por su constante motivación y fuerza, incondicional apoyo con amor, motor de vida.

A mis padres y hermana por su ilimitado apoyo y corazón.

Agradecimientos

A Jenny Carvajal y Alexander Martínez por la invitación a asumir este gran reto académico y personal.

A Henry Arias por su apoyo técnico, personal y confianza constante en el desarrollo de este largo proyecto académico y personal.

Hernan Dario Mantilla

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	14
1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO	15
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. GENERALIDADES	16
2.1 GEOMECÁNICA Y ESTABILIDAD DE POZO DURANTE LA PERFORACIÓN ..	16
2.2 ÁNGULO DE ATAQUE E INESTABILIDAD EN FORMACIONES FRACTURADAS	26
2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y SU APLICACIÓN EN LA SIMULACIÓN	32
3. ANTECEDENTES	38
4. MODELO DE SIMULACIÓN - SOFTWARE ABAQUS®.....	41
4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO.....	41
4.2 ASIGNACIÓN DE MATERIALES EN EL MODELO.....	45
4.3 ASIGNACIÓN DE GEOMETRÍAS E INSTANCIAS.....	46
4.4 CONDICIONES DE FRONTERA Y CARGAS APLICADAS	48
4.5 MALLA Y TIPOS DE ELEMENTOS.....	52
4.6 PASOS DEL MODELO Y CREACIÓN DEL TRABAJO PRE ANÁLISIS.....	59
5. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN..	61
6. RELACIÓN E INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ATAQUE EN LA ESTABILIDAD GEOMECÁNICA DEL POZO.....	87
6.1 RELACIONES DE ESFUERZOS.....	87
6.2 RELACIONES DE DEFORMACIÓN.....	91
6.3 RELACIONES DE FALLA O DAÑO.....	93
6.4 INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ATAQUE EN LA ESTABILIDAD DEL POZO ...	96
7. CONCLUSIONES	98

|

8. RECOMENDACIONES	99
REFERENCIAS	100

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 01. Sistema coordenado cilíndrico para un pozo desviado.	18
Ilustración 02. Modo de falla de Ovalización de pozo (Breakout)	19
Ilustración 03. Modo de falla compresivo Tórica	19
Ilustración 04. Modo de falla compresiva de elongación	20
Ilustración 05. Modo de falla compresiva helicoidal	20
Ilustración 06. Modo de falla tensil (fracturamiento hidráulico)	20
Ilustración 07. Criterio de falla de Mohr Coulumb	22
Ilustración 08. Distribución del esfuerzo elástico con dos presiones de pozo	23
Ilustración 09. Grafica del análisis de estabilidad tipo de un pozo desviado	25
Ilustración 10. Representación del ángulo de ataque.	27
Ilustración 11. Planos de falla en formaciones laminadas	28
Ilustración 12. Criterios de falla para una roca con laminaciones o fracturas.	29
Ilustración 13. Falla de la roca por capa, el ángulo de operación es mínimo.	30
Ilustración 14. Falla por capa	30
Ilustración 15. Falla por roca.	31
Ilustración 16. Diagrama esquemático del modelamiento matemático de un problema.	33
Ilustración 17. Esquema general de la implementación de computacional del método de elementos finitos.	35
Ilustración 18. Ejemplo de MEF para la perforación de un pozo	39
Ilustración 19. Forma primitiva rectangular para modelo de simulación	42
Ilustración 20. Bloque rectangular de roca, fracturas horizontales y cilindro ideal de pozo.	43
Ilustración 21. Bloque rectangular de roca, fracturas horizontales y cilindro ideal de pozo inclinado 30° respecto los planos de debilidad. Modelo caso 30°	44
Ilustración 22. Bloque rectangular de roca, fracturas horizontales y cilindro ideal de pozo inclinado 50° respecto los planos de debilidad. Modelo caso 50°	44
Ilustración 23. Asignación de geometría roca en la Ilustración primitiva, líneas rojas	47
Ilustración 24. Asignación de geometría pozo en la Ilustración primitiva, líneas rojas	47
Ilustración 25. Asignación de geometría fracturas en la Ilustración primitiva, líneas rojas	48
Ilustración 26. Restricción de movimiento en el eje X, caras externas del bloque primitivo paralelas al eje x	48
Ilustración 27. Restricción de movimiento en el eje Y, caras externas del bloque primitivo paralelas al eje Y	49
Ilustración 28. Restricción de movimiento en el eje Z, caras externas del bloque primitivo paralelas al eje Z	49

Ilustración 29. Carga aplicada en el eje X, esfuerzo horizontal mínimo	51
Ilustración 30. Carga aplicada en el eje Y, esfuerzo horizontal máximo	51
Ilustración 31. Carga aplicada en el eje Z, esfuerzo vertical	51
Ilustración 32. Carga aplicada en la cara del pozo, efecto del fluido de perforación.	52
Ilustración 33. En mallado general del bloque primitivo	54
Ilustración 34. Enmallado en la zona alrededor del cilindro o pozo.	54
Ilustración 35. Enmallado modelo 30°	55
Ilustración 36. Detalle al pozo en el enmallado modelo 30°	56
Ilustración 37. Enmallado modelo 50°	56
Ilustración 38. Distribución nodal del elemento C3D8	57
Ilustración 39. Condiciones in situ de esfuerzos, eje X.	62
Ilustración 40. Condiciones in situ de esfuerzos, eje Y.	62
Ilustración 41. Condiciones in situ de esfuerzos, eje Z.	63
Ilustración 42. Condiciones in situ de esfuerzos de corte.	63
Ilustración 43. Distribución de esfuerzos después de perforado el pozo	64
Ilustración 44. Detalle de la redistribución de esfuerzos en la cara del pozo	65
Ilustración 45. Distribución de deformación en la cara del pozo	66
Ilustración 46. Detalle de la distribución de deformación en la cara del pozo	66
Ilustración 47. Límite de afectación de deformación en la cara del pozo.	67
Ilustración 48. Distribución del Desplazamiento alrededor de la cara del pozo.	68
Ilustración 49. Estado de esfuerzo in situ en el eje X	69
Ilustración 50. Estado de esfuerzo in situ en el eje Y	69
Ilustración 51. Estado de esfuerzo in situ en el eje Z	70
Ilustración 52. Estado de esfuerzo cortante in situ	70
Ilustración 53. Distribución de esfuerzos después de perforado el pozo ángulo 0° con fracturas	71
Ilustración 54. Detalle de distribución de esfuerzos modelo 0° con fracturas	72
Ilustración 55. Distribución de esfuerzos expresado con coeficiente R en fracturas modelo 0°	73
Ilustración 56. Detalle de la distribución de esfuerzos expresado con coeficiente R en fracturas modelo 0°	74
Ilustración 57. Distribución de esfuerzo de falla en elemento cohesivo modelo 0°	74
Ilustración 58. Estado de deformación modelo 0° con fracturas	75
Ilustración 59. Detalle del estado de deformación modelo 0° con fracturas	75
Ilustración 60. Desplazamientos totales modelo 0° con fracturas	76
Ilustración 61. Estado de esfuerzos in situ dirección X modelo 30° sin y con fracturas	77
Ilustración 62. Estado de esfuerzos in situ dirección Y modelo 30° sin fracturas	77
Ilustración 63. Estado de esfuerzos insitu dirección Z modelo 30° sin fracturas	78
Ilustración 64. Distribución de esfuerzo modelo 30°	78

Ilustración 65. Distribución de esfuerzos en las fracturas expresadas por relación R modelo 30°	79
Ilustración 66. Distribución de esfuerzo de falla en elemento cohesivo modelo 30°	79
Ilustración 67. Estado de deformación modelo 30°	80
Ilustración 68. Deformación en la fractura modelo 30°	81
Ilustración 69. Cavings generados en la pared del hueco durante la perforación	82
Ilustración 70. Estado de esfuerzos in situ en dirección X para el modelo 50°.	82
Ilustración 71. Estado de esfuerzos in situ en dirección Y para el modelo 50°.	83
Ilustración 72. Estado de esfuerzos in situ en dirección Z para el modelo 50°.	83
Ilustración 73. Estado de esfuerzos modelo 50° posterior a la perforación	84
Ilustración 74. Estado de esfuerzos en las fracturas modelo 50°	84
Ilustración 75. Distribución de esfuerzo de falla en elemento cohesivo modelo 50°	85
Ilustración 76. Estado de deformación modelo 50°	85
Ilustración 77. Estado de deformación en fractura modelo 50°	86
Ilustración 78. Detalle de la distribución y orientación de esfuerzos en la cara del pozo.	88
Ilustración 79. Relación de esfuerzos de la roca en función de la inclinación	90
Ilustración 80. Relación de deformación de la roca en función de la inclinación	92
Ilustración 81. Relación de daño o falla en los elementos de la fractura	94
Ilustración 82. Esfuerzos de falla en los elementos de la fractura	94
Ilustración 83. Tamaño de elementos fallados en la fractura modelo a 30°	95
Ilustración 84. Tamaño de elementos fallados en la fractura modelo a 50°	95
Ilustración 85. Tamaño de daño en los elementos fracturas.	96

|

LISTA DE TABLAS

Tabla 01. Propiedades material roca del modelo	45
Tabla 02. Propiedades material fractura del modelo	46
Tabla 03. Magnitudes de esfuerzos in situ.	50
Tabla 04. Cantidad de nodos y elementos en cada modelo	55
Tabla 05. Propiedades de la fractura o elemento cohesivo	59
Tabla 06. Relación de esfuerzos en roca de los modelos	89
Tabla 07. Relación de deformación en roca de los modelos	91
Tabla 08. Relación de deformación en la fractura de los modelos	93
Tabla 09. Distancias de falla en las fracturas	96

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DEL EFECTO DEL ÁNGULO DE ATAQUE DE PERFORACIÓN EN LA ESTABILIDAD GEOMECÁNICA DE FORMACIONES NATURALMENTE FRACTURADAS UTILIZANDO UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS*

AUTOR: HERNÁN DARÍO MANTILLA HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVES: ÁNGULO DE ATAQUE, ESTABILIDAD GEOEMECÁNICA, PERFORACIÓN, ELEMENTOS FINITOS.

La perforación direccional de pozos de hidrocarburos en campos con formaciones fracturadas o laminadas se ha convertido en un reto para la industria del petróleo debido a la alta complejidad de las operaciones. Por tanto, la geomecánica de perforación, disciplina de la ingeniería competente para el análisis de dichos efectos, cumple un papel importante en la planeación y cálculos de ingeniería previos a la construcción de un pozo, permitiendo determinar una inestabilidad aceptable de la formación de roca asociada a la inclinación del pozo e inclinación de las fracturas naturales o laminaciones. En este trabajo se pretende analizar el efecto del ángulo de ataque de perforación en la estabilidad geomecánica de formaciones con fracturas naturales o con laminaciones, empleando un modelo de elementos finitos y el software de simulación Abaqus®. El análisis de los modelos de simulación, realizado en tres inclinaciones de perforación diferentes, permitió establecer relaciones, directas e indirectas entre el ángulo de ataque y la estabilidad del pozo. Se relacionaron variables de análisis como los esfuerzos compresivos y de corte, las deformaciones y la falla en las fracturas de la roca durante la perforación. Los resultados muestran que a mayores inclinaciones de perforación mayor puede llegar a ser la inestabilidad del pozo.

*Trabajo de grado

** Facultad: Ingenierías físico-mecánicas. Escuela: Ingeniería civil. Director: Jose Miguel Benjumea. Codirector: Henry Arias

ABSTRACT

Title: ANALYSIS OF THE DRILLING OF ATTACK ANGLE EFFECT ON THE STABILITY GEOMECHANICS OF NATURALLY FRACTURED FORMATIONS USING A FINITE ELEMENT MODEL*

KEYWORDS: ATTACK ANGLE, WELLBORE STABILITY, DRILLING, FINITE ELEMENTS METHOD.**

Directional drilling in fractured formations fields has become a challenge to the petroleum industry due to complexity of operations. Therefore, the drilling geomechanics plays an important role in planning and engineering calculations prior to the construction of a wellbore, this allow to determine an unstable rock formation associated to the well inclination and inclination of natural fractures. This paper aims to analyze the effect of the attack angle of drilling in the geomechanics stability formations of natural fractures, using a finite element model. The analysis of simulation models in three different inclinations drilling allowed to us establishes relationships between the angle of attack and wellbore stability. The analysis related variables as efforts deformation and failure of rock fractures during drilling. The results show that higher inclinations of perforation may become higher the wellbore instability.

*Master Thesis

** Facultad: Ingenierías físico-mecánicas. Escuela: Ingeniería civil. Director: Jose Miguel Benjumea. Codirector: Henry Arias

INTRODUCCION

Durante la perforación de pozos de hidrocarburos se atraviesan diversos tipos de roca y formaciones litológicas, entre ellas las naturalmente fracturadas. Este tipo de formaciones contienen alteraciones naturales llamadas fracturas, las cuales representan un reto operacional importante durante la perforación debida a sus características de superficies con baja o nula cohesión entre ellas. Lo anterior origina un desplazamiento y separación de superficies inminente, es decir condiciones de inestabilidad al ser alteradas mecánicamente con la broca de corte, generando esto derrumbes y caídas de fragmentos de roca dentro del pozo, que posteriormente ocasionan problemas operacionales durante la perforación como empaquetamientos de la sarta de perforación o pérdidas de circulación. Ahora bien, si el efecto de perforar este tipo de formaciones genera inestabilidad en el pozo, es de mayor importancia

analizar la intensidad de la inestabilidad de la cara del pozo, en función de la orientación y ángulo con la cual se perforan dichas fracturas naturales; este ángulo es llamado ángulo de ataque.

Con el fin de inferir posibles problemas operacionales durante la perforación de pozos inclinados con formaciones fracturadas, este trabajo de grado simula la perforación de un pozo en una formación con fracturas naturales, adicionalmente se analiza el efecto del ángulo de ataque en la inestabilidad del pozo, para inferir los posibles problemas operacionales durante la perforación.

En este documento se presentan las generalidades de la Geomecánica en la perforación, definiciones de ángulo de ataque, la estabilidad de pozo durante la perforación y de la simulación con elementos finitos. Adicionalmente se registran los resultados de los modelos de simulación su validación con datos de operaciones en pozo y los análisis de correlación para establecer finalmente la influencia del ángulo de ataque y de las orientaciones de la fractura en la estabilidad Geomecánica del pozo.

1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

- Altos tiempos no programados durante la perforación de pozos con formaciones fracturadas naturalmente asociados a problemas de inestabilidad en el hueco generando costos adicionales a los planeados.
- Desconocimiento del efecto del ángulo de ataque en la estabilidad del pozo.

1.2 OBJETIVO GENERAL

- Analizar el efecto del ángulo de ataque de perforación en la estabilidad Geomecánica de formaciones con fracturas naturales empleando un modelo de elementos finitos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular el comportamiento Geomecánico de un pozo durante la perforación de formaciones con fracturas naturales empleando el software de elementos finitos Abaqus®.
- Validar y evaluar los resultados obtenidos de las simulaciones con la información presente en bibliografía y eventos de perforación en pozos ya perforados.
- Evaluar la influencia del ángulo de ataque para tres inclinaciones diferentes en la estabilidad Geomecánica del pozo

2. GENERALIDADES

2.1 GEOMECÁNICA Y ESTABILIDAD DE POZO DURANTE LA PERFORACIÓN

En un proyecto de desarrollo de hidrocarburos gran parte de dinero se emplea en la perforación de los pozos, lo cual indica la importancia de disminuir costos en las operaciones de perforación. Los problemas de inestabilidad en determinados casos causan las mayores pérdidas de dinero y tiempo^{8, 19}. Estos problemas se encuentran casi siempre en las formaciones de arcilla por encima del yacimiento, dando como resultado pérdidas de tiempo y algunas veces en pérdidas del equipo. En zonas tectónicamente activas, las dificultades operacionales empeoran si el pozo es direccional o de alto ángulo, por lo tanto, es necesario entender el comportamiento de las rocas para minimizar los inconvenientes durante la perforación.

La evaluación de la estabilidad de pozo representa un problema clásico de la mecánica de rocas y de la geomecánica: la predicción de la respuesta deformacional de una roca a una carga mecánica aplicada. Algunas circunstancias espaciales que hacen la evaluación de la estabilidad un problema particular son:

- Grandes variaciones en los esfuerzos de las formaciones, y mediciones de los esfuerzos in-situ no sistemáticas y de poca exactitud.
- Grandes variaciones en las propiedades de la formación, anisotropía de propiedades.
- Altos costos de corazonamientos y cantidades limitadas de material para pruebas de mecánica de rocas.
- Diversos fenómenos físicos presentes sobre la formación alrededor del pozo: química del lodo, redistribución de esfuerzos, cambios en temperatura, etc.

Esto demuestra que la realidad no puede ser descrita exactamente por un modelo, sin preocuparse que tan complicado sea. Entonces, si se utilizan algunas consideraciones

|

ideales, un análisis de estabilidad, puede proporcionar guías, las cuales posteriormente pueden ser asociadas a algunas condiciones prácticas.

Idealmente un modelo matemático debería cubrir todos los aspectos que podría afectar la estabilidad, tal como la presión del pozo, la temperatura, el tiempo, la química del lodo, etc. Tal modelo, sin embargo, no está disponible hoy día, y difícilmente aparecerá en un futuro cercano hasta que todos los mecanismos no sean lo suficientemente conocidos.

El objeto del análisis de la estabilidad de pozo es conocer el potencial de inestabilidad del pozo, calculando, entre otros aspectos, el estado de redistribución de esfuerzos y comparándolo con un criterio de falla seleccionado. Para entender los problemas de falla de pozo, deben ser conocidos los factores mecánicos que afectan la estabilidad del pozo. Principalmente: los esfuerzos in situ, la presión de poro y el criterio de falla de la roca. Estos datos no siempre están disponibles y su nivel de incertidumbre en ocasiones es alto, por lo que es de vital importancia una evaluación crítica de estos factores.

Las formaciones a ciertas profundidades están sujetas a esfuerzos compresivos, verticales y horizontales. De acuerdo a las magnitudes relativas entre el esfuerzo vertical, esfuerzo horizontal máximo y esfuerzo horizontal mínimo, respectivamente $\sigma_v, \sigma_H, \sigma_h$.

Los problemas de estabilidad pueden aparecer en pozos verticales y pozos desviados. Estos problemas son generalmente más severos en pozos desviados y de mayor inclinación, cuando la distribución de esfuerzos es menos favorable. El esfuerzo vertical va a tener una componente que aumenta en direccional normal al pozo cuando la inclinación aumenta y cuando la ventana segura del lodo disminuye. Estos efectos de desviación se aplican a zonas de gradientes de esfuerzos normales. Si el componente tectónico está presente, la situación debe de ser lo contrario, es decir, el aumento de la desviación es más favorable por lo menos a una dirección dada de azimut.

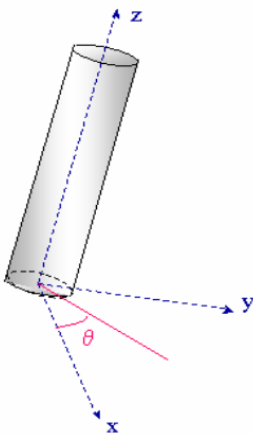
|

La trayectoria de pozo más favorable podría ser aquella donde la redistribución de esfuerzos en el pozo sea lo más uniforme posible, de ahí la importancia de conocer la distribución de los esfuerzos alrededor del pozo.

El modelo de la distribución de esfuerzos para un pozo inclinado asume que el pozo es desviado con respecto a las direcciones de los esfuerzos in-situ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$. Mientras que la orientación del pozo está definida por dos ángulos, la inclinación del pozo y el azimut.

Para poder analizar los esfuerzos en la roca que rodea el pozo, es conveniente expresarlos en coordenadas cilíndricas. La Ilustración 01 muestra el sistema de coordenadas cilíndricas en un punto P identificados con $r, \theta, y z$. Los esfuerzos se denotan como $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, T_{rz}$ y $T_{\theta z}$. El termino σ_r es llamado esfuerzo radial, σ_θ esfuerzo tangencial y σ_z esfuerzo axial. Teniendo los esfuerzos en el sistema de coordenadas local, se pueden transformar a coordenadas cilíndricas utilizando la solución general elástica lineal, donde se supone una roca isotrópica en todas las direcciones y un comportamiento elástico lineal a través del tiempo (Aadnov,1987).

Ilustración 01. Sistema coordenado cilíndrico para un pozo desviado.



Fuente: Gomez Vanegas C.

|

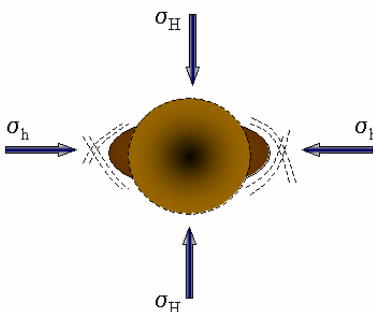
Aplicando el análisis de los esfuerzos principales distribuidos en la cara del pozo se pueden entonces hallar expresiones matemáticas que relacionan los esfuerzos principales con los esfuerzos en coordenadas cilíndricas para así aplicar un criterio de falla y encontrar un punto de la roca alrededor del pozo donde se presentará algún tipo de inestabilidad.

Cuando una muestra de un sólido es expuesta a grandes esfuerzos, algún tipo de falla puede ocurrir. Cuando este esfuerzo es mitigado el sólido retorna a su estado original. El modo de la falla depende del estado de esfuerzos, el tipo de material y la geometría de la muestra. También es importante la historia de esfuerzo sobre el material. Los modos de falla son una respuesta de la roca a las nuevas condiciones inducidas durante el proceso de perforación. Existen mecanismos de falla compresiva y de tensión, correspondientes al régimen de esfuerzos resultante de esa alteración. Los modos de falla compresivos más importantes son la ovalización del pozo (breakout), falla tórica, falla de elongación, y falla helicoidal. Dentro de los modos de falla de tensión, se destacan la falla de exfoliación y el fracturamiento hidráulico.

Se presentan a continuación algunos de los modelos de falla en la cara del pozo y el régimen de esfuerzos que los provoca.

Ilustración 02. Modo de falla de Ovalización de pozo (Breakout)

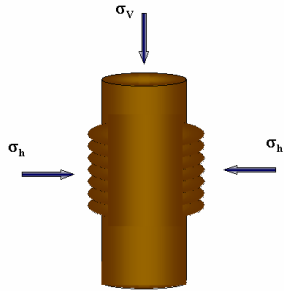
Ocurre cuando, $\sigma_{\theta} > \sigma_r > \sigma_z$



Fuente: Gomez Vanegas C.

Ilustración 03. Modo de falla compresivo Tórica

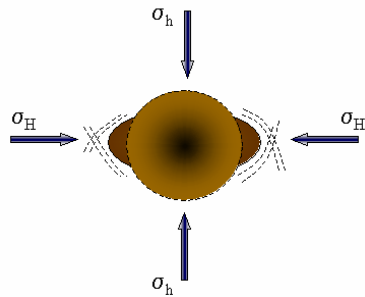
Ocurre cuando $\sigma_z > \sigma_{\theta} > \sigma_r$



Fuente: Gomez Vanegas C.

Ilustración 04. Modo de falla compresiva de elongación

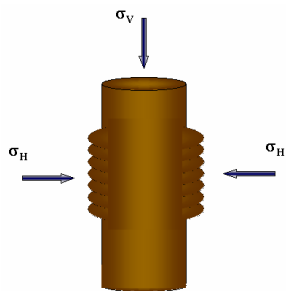
Ocurre cuando $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$



Fuente: Gomez Vanegas C.

Ilustración 05. Modo de falla compresiva helicoidal

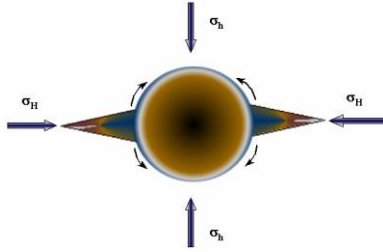
Ocurre cuando $\sigma_z > \sigma_r > \sigma_\theta$



Fuente: Gomez Vanegas C.

Ilustración 06. Modo de falla tensil (fracturamiento hidráulico)

Ocurre cuando $\sigma_r > \sigma_\theta$ y $\sigma_\theta > T_0$



Las fallas compresivas generalmente producen aumento del diámetro del pozo causado por fallas quebradizas y derrumbes de la pared del pozo. Esto ocasiona problemas durante la cementación y dificultades en la lectura e interpretación de los registros eléctricos que se adquieren en el pozo. Normalmente ocurre en rocas quebradizas o con fracturas naturales y el aumento en el diámetro del pozo es debido a la erosión (hidráulica o mecánica) en rocas pobremente cementadas (débiles).

En en rocas tipo shales débiles (plástico) arcillolitas y formaciones de sal o domos salinos tiene lugar la reducción del diámetro del pozo. Algunas formaciones de yeso pueden también presentar este tipo de comportamiento. Este fenómeno requiere de un “reaming” o repasado del hueco (operación de restauración del diámetro del pozo también llamado repasado del hueco), o se tendrá como resultado una pega de tubería.

Las fallas de tensión o fracturamiento hidráulico se pueden reconocer por las pérdidas de circulación del fluido de perforación o lodo de perforación. Esta puede reducir la presión hidráulica en el pozo y causar el influjo de los fluidos de las rocas en la formación. En el peor de los casos resulta en un reventón del pozo o pérdida de control de los fluidos que ingresan desde la roca al pozo.

Entre los diferentes criterios de falla por cizalladura se tiene:

Criterio de falla de Mohr-Coulomb

La falla de corte ocurre cuando el esfuerzo de corte a lo largo de algún plano en la muestra es demasiado grande. Mohr asume que la falla puede ser descrita por:

$$\tau = f(\sigma) \quad (\text{Ecuación 01})$$

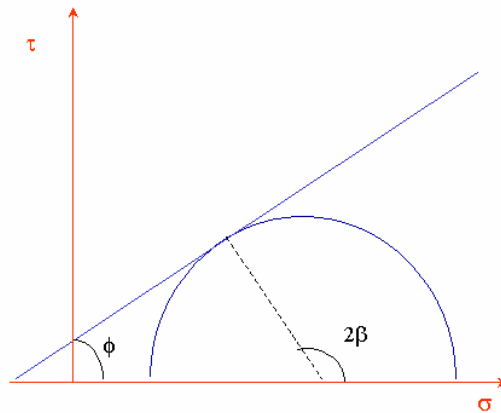
|

Donde σ es el esfuerzo normal a través de un plano y T es el esfuerzo de corte a lo largo del plano. En el plano $\tau - \sigma$ la ecuación 01 describe alguna curva que separa la región segura de la región de falla. Si se asumen que σ_1 y el círculo formado por la conexión de σ_1 y σ_3 se aumenta, eventualmente el círculo de Mohr tocaría la línea de envolvente de falla. Por tanto la falla de cizalladura definida por Mohr depende solamente de los esfuerzos principales normales mínimo y máximo. El criterio de falla asume una función lineal de tipo:

$$\tau = S_0 + \mu\sigma \quad (\text{Ecuación 02})$$

Donde S_0 es la cohesión del material y μ es el coeficiente de fricción. Este término es claramente una analogía de un deslizamiento ordinaria de un cuerpo sobre una superficie, primera aproximación (Ley de Amonton). En la Ilustración 07 se observa el criterio de falla de Mohr Coulumb y el círculo de Mohr que toca la envolvente de falla

Ilustración 07. Criterio de falla de Mohr Coulumb



También se muestra el ángulo 2β , que da un punto de coincidencia del círculo de Mohr y la línea de falla. La máxima variación posible de ϕ es de 0 a 90 (en la realidad física este valor es mucho menor, máximo de 45 grados y comúnmente 30 grados). El ángulo β , que da la orientación del plano de falla, varía entre 45 y 90, ya que es el ángulo para que el criterio de falla se cumpla.

Se puede concluir que un criterio de resistencia expresado en términos del esfuerzo máximo σ_1 y mínimo σ_3 es adecuado para el propósito de la estabilidad de pozo.

Aunque el esfuerzo principal intermedio pueda influenciar de alguna manera, el efecto es relativamente pequeño para la exactitud a la resistencia en el fondo del pozo y para determinar los esfuerzos in-situ.

Conocidos los esfuerzos, la distribución en la cara del pozo y sus magnitudes, es ahora importante establecer los valores de esfuerzos dentro del pozo ejercidos por el fluido de perforación principalmente. Es así como se genera el concepto de “ventana segura de lodo”. Esta ventana segura de lodo corresponde a la densidad del fluido o gradiente de densidad de fluido que a una profundidad determinada ejercerá la presión suficiente para evitar el daño o la falla en la cara del pozo y una presión menor que llegue a fracturar la roca permitiendo que se perfora de forma segura, sin inestabilidad y sin pérdidas de fluido hacia la formación.

Para ilustrar el principio de cálculo de la densidad de lodo para prevenir el colapso del pozo se considera un pozo vertical con esfuerzos horizontales iguales $\sigma_H = \sigma_h$, y se emplea el criterio de falla de Mohr-Coulomb. Además se conoce que los esfuerzos dependen de la presión del pozo de la siguiente manera:

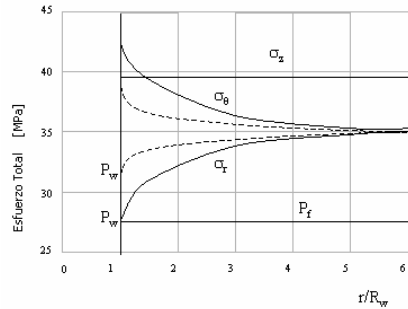
$$\sigma_r = p_w$$

$$\sigma_\theta = 2\sigma_h - p_w \quad (\text{Ecuación 03})$$

$$\sigma_z = \sigma_v$$

Observando la ecuación 03 no es fácil identificar cual componente del esfuerzo es el mayor y cuál es el más pequeño. Por lo tanto deben evaluarse diferentes posibilidades. Una distribución típica de esfuerzos es mostrada en la Ilustración 08. En un caso (línea continua) el esfuerzo tangencial es el mayor, mientras el esfuerzo radial es el menor en el pozo. Cuando se aumenta la presión en el pozo, se incrementa el esfuerzo radial, mientras el esfuerzo tangencial disminuye. Una situación con una presión de pozo más alta es ilustrada con las líneas punteadas en la Ilustración 08.

Ilustración 08. Distribución del esfuerzo elástico con dos presiones de pozo



Fuente: Rock Mechanics Principles and Petroleum Engineering Applications” Da Fontoura, Sergio

El esfuerzo vertical se convertirá en el mayor, ya que no es afectado por la presión del pozo. La situación requiere la más alta presión de pozo para determinar la presión de pozo necesaria. Esto requiere que en gran magnitud dependa de los esfuerzos in situ. Entonces, se asume que la presión de poro no es afectada por la presión de pozo, es decir, que no hay comunicación de fluido entre el pozo y la formación. Se debe que enfatizar que se está tratando con situaciones ideales. Se puede mencionar además, que si la presión del pozo es considerablemente mayor que la presión de poro, los cambios ocasionarán que la presión de poro comience a aumentar (penetración). Si la presión de poro se incrementa, la presión de pozo requerida para mantener la estabilidad también se incrementará.

Para un pozo desviado, los esfuerzos principales deben ser calculados de los esfuerzos normales y los esfuerzos de corte. Otra alternativa es calcular los invariantes, dependiendo de qué criterio de falla esté siendo usado. Este procedimiento matemático es más conveniente hacerlo iterativamente por medio de programas analíticos, o en el caso de esta tesis, emplear las soluciones por medio de métodos numéricos y elementos finitos.

En el caso análogo a la determinación del peso de lodo mínimo para evitar inestabilidad, se tiene el peso de lodo máximo para evitar la fractura de la roca. Este límite superior de densidad de lodo, es el máximo peso de lodo antes de que ocurra una falla por tensión en la cara del pozo, llamada también fracturamiento. El fracturamiento tomará lugar cuando el esfuerzo principal efectivo mínimo se convierta

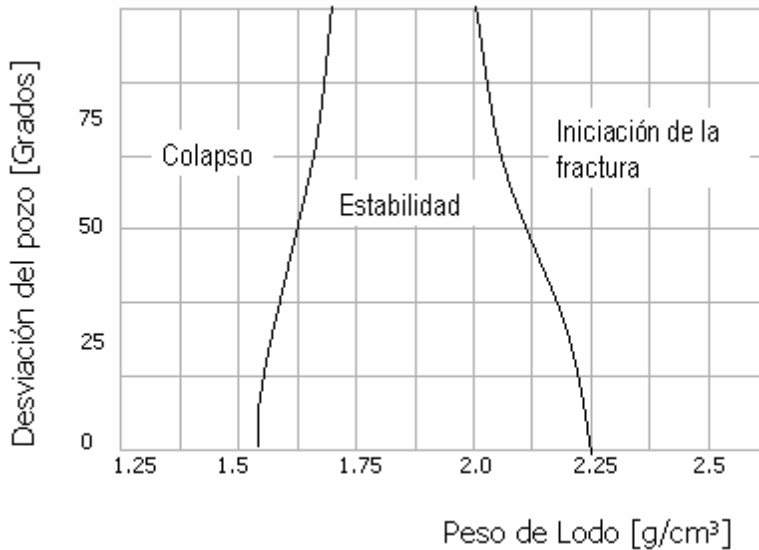
|

en una tensión igual a la resistencia por tensión de la roca. Se expresa en la ecuación siguiente

$$\sigma_3 + \tau_o \leq 0 \quad \text{Ecuación 04}$$

Una buena aproximación para el cálculo es igualar la resistencia a la tensión a cero, valor en el cual siempre habrá fracturas e imperfecciones en la pared del pozo. Para el caso de un pozo desviado se tiene que la presión de iniciación de fractura puede ser menor que en un pozo vertical, si el esfuerzo horizontal es menor que el esfuerzo vertical. La Ilustración 09 muestra el peso de lodo requerido como una función de la desviación del pozo, donde el fracturamiento es calculado asumiendo una situación de impermeabilidad.

Ilustración 09. Grafica del análisis de estabilidad tipo de un pozo desviado



La zona segura de lodo es restringida a medida que se incrementa la inclinación del pozo debido a un componente mayor del esfuerzo vertical normal en el eje del pozo cuando se incrementa la inclinación lo cual incrementará el esfuerzo en una dirección y lo reduce en la dirección normal a éste. Debe aclararse que esto aplica cuando el esfuerzo vertical es el mayor, si el esfuerzo horizontal es el mayor, el rango de estabilidad aumentará con la inclinación en la dirección del esfuerzo horizontal. Si los esfuerzos horizontales no son iguales, el rango de estabilidad dependerá tanto de la

|

inclinación como de la dirección del azimut. Dada una roca elástica isotrópica, la dirección más favorable con respecto a la estabilidad del pozo siempre será paralela a la dirección del esfuerzo principal mayor lo cual debería ilustrar la importancia del conocimiento de los esfuerzos in situ como de la información de resistencia. Esta restricción de la ventana segura de lodo en un pozo desviado es más severa cuando se perforan formaciones con fracturas naturales, caso de estudio de este trabajo.

Adicional a las densidades del lodo que permitan establecer una ventana segura de lodo, existen diversos factores que en la práctica influyen en la estabilidad del pozo. Algunos de estos factores son: la litología de la formación, los esfuerzos in situ, la presión de poro, las propiedades de la roca, las propiedades del lodo de perforación, los efectos dependientes del tiempo (consolidación, derrumbes), los efectos de temperatura y aspectos operacionales.

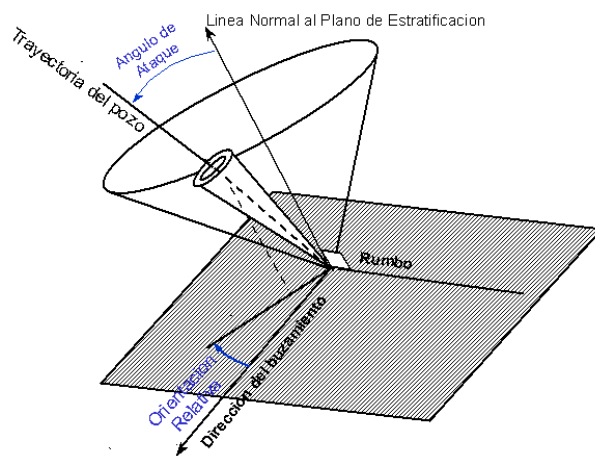
2.2 ÁNGULO DE ATAQUE E INESTABILIDAD EN FORMACIONES FRACTURADAS

Para contextualizar la definición de ángulo de ataque se debe primero tener claridad sobre el concepto de ángulo de operación y ángulo de perforación del pozo. El ángulo de operación está relacionado con la resistencia de una formación laminada o fracturada, este ángulo se define como el ángulo comprendido entre los planos de buzamiento y el esfuerzo máximo principal presente en la formación. Este parámetro denotado por la letra β requiere ser conocido para determinar la resistencia de la roca y poder establecer las condiciones de falla de la misma, en la medida de brindar un análisis más detallado y con menor incertidumbre. El ángulo de perforación se define como el ángulo de inclinación del pozo con el cual se va a perforar en determinado momento del tiempo.

El ángulo de ataque se define como el ángulo formado entre la inclinación del pozo y la normal de los planos de estratificación. Por tanto un pozo perforado perpendicular a los

planos de estratificación formarían un ángulo de ataque de 0 grados. Mientras que un pozo perforado paralelo a los planos de estratificación formarían un ángulo de ataque de 90 grados. La Ilustración 10 muestra la representación y definición de ángulo de ataque.

Ilustración 10. Representación del ángulo de ataque.



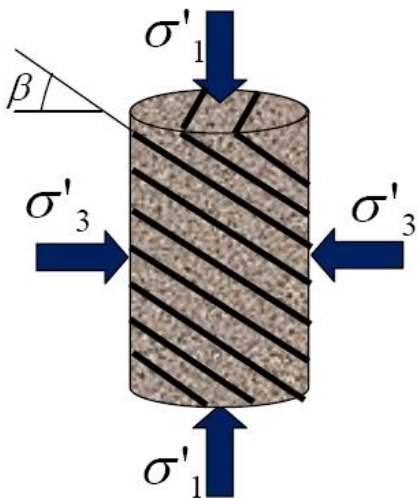
Los pozos perforados en formaciones laminadas o fracturas como shale están catalogados como pozos de mayor inestabilidad comparados con los que se perforan en formaciones homogéneas. Esto se presenta debido a que en las formaciones fracturadas la falla puede ocurrir a lo largo del plano de fractura o a través de los planos de debilidad.

Para el entendimiento del modelo de falla de las formaciones laminadas se emplea el modelo de resistencia compresiva de formaciones laminadas establecido por Zhang². Este modelo establece que bajo condiciones de pruebas de resistencia triaxial, la presión de poro en las muestras de shale es cero y los esfuerzos totales corresponden a los esfuerzos efectivos. Cuando se realiza una prueba de compresión triaxial, la

|

muestra está sometida a una carga de esfuerzos como se muestra en la Ilustración 11 donde el ángulo entre el esfuerzo mínimo y el plano de buzamiento se conoce como ángulo de operación. Dependiendo de dicho ángulo, existen dos opciones para que la roca falle, o a lo largo de los planos de buzamiento o a través de ellos.

Ilustración 11. Planos de falla en formaciones laminadas



Si la muestra falla a través de los planos de buzamiento, la resistencia se define como resistencia normal. Pero si la roca falla a lo largo de los planos su resistencia es definida como resistencia del plano de capa en ese ángulo de operación.

De acuerdo al criterio de falla de Mohr Coulomb la resistencia normal puede ser calculada empleando la siguiente relación:

$$\sigma_{1n} = \sigma_3 + 2(C_o + \mu\sigma_3)(\sqrt{(1 + \mu^2)} + \mu) \quad (\text{Ecuación 05})$$

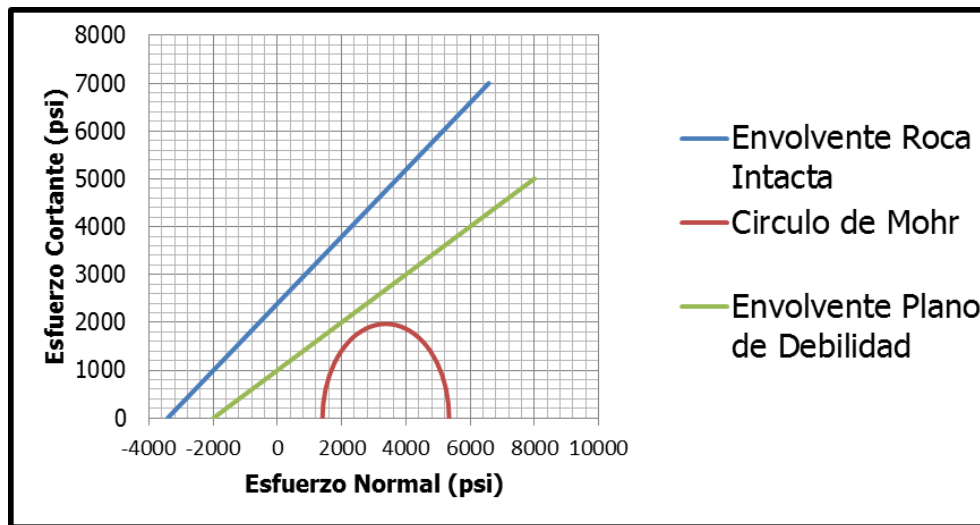
De forma similar la resistencia del plano del plano de la capa puede ser calculada empleando la relación:

$$\sigma_{lb} = \sigma_3 + \frac{2(C_{ow} + \mu_w\sigma_3)}{(1 - \tan\beta\mu_w)\text{sen}(2\beta)} \quad (\text{Ecuación 06})$$

|

En donde β es el ángulo de operación C_o y C_w son la cohesión de la roca y de la capa respectivamente, μ y μ_w son los coeficientes de fricción interna de la roca y de la capa, respectivamente. Teniendo en cuenta este tipo de anisotropía, al graficar el esfuerzo de corte con respecto al esfuerzo normal, se tendrán dos líneas de falla, en donde, dependiendo de las propiedades mecánicas de la formación y su condición de esfuerzos, se puede presentar cualquier modo de falla, ya sea a lo largo, o a través de las capas. Este comportamiento es mostrado en la Ilustración 12, en donde se tienen las dos líneas de falla para los respectivos criterios, dependiendo de la condiciones de esfuerzos se tendrá un ángulo de falla específico, y según la posición de éste en el círculo de Mohr, se dará uno de los dos tipos de falla, por roca o por capa.

Ilustración 12. Criterios de falla para una roca con laminaciones o fracturas.

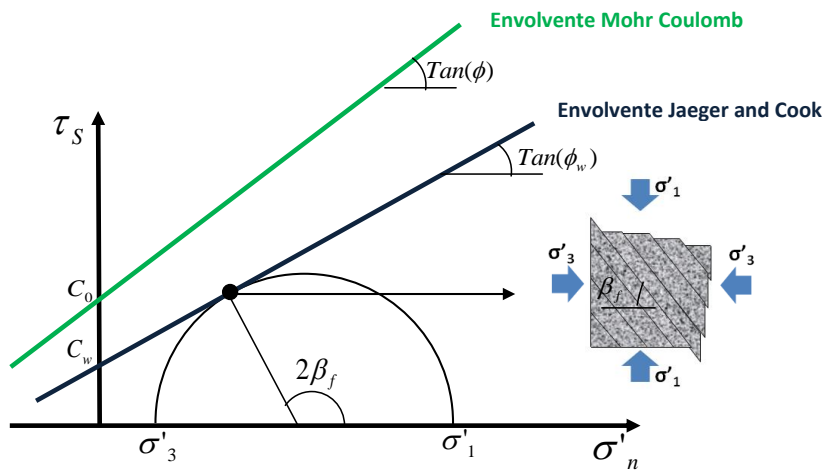


Graficando las dos envolventes de falla junto con el círculo de Mohr, la falla se puede dar de acuerdo a los siguientes casos:

Primer caso. Que el ángulo de operación (β) sea exactamente igual a $\beta_f = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_w}{2}$. En este caso la falla en roca ocurre por el deslizamiento de las capas.

|

Ilustración 13. Falla de la roca por capa, el ángulo de operación es mínimo.

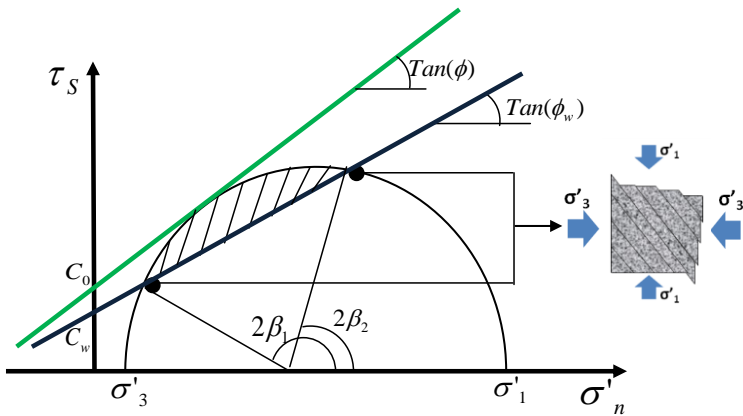


Fuente: V. Juan D. Análisis de los Efectos en la Desviación de Pozo y el Buzamiento de las Capas en la Ventana de Lodo.

Caso 2:

Este caso se presenta cuando el ángulo de operación, β , es diferente al valor mínimo (β_f). Además se debe cumplir que β tenga un valor tal que se encuentre dentro del rango de los dos puntos de intersección de los dos criterios de falla, entonces el círculo de Mohr tiene la oportunidad de atravesar la envolvente de falla azul hasta que se encuentre con su respectivo ángulo β . Aquí el tipo de falla que ocurre también es por deslizamiento de las capas.

Ilustración 14. Falla por capa



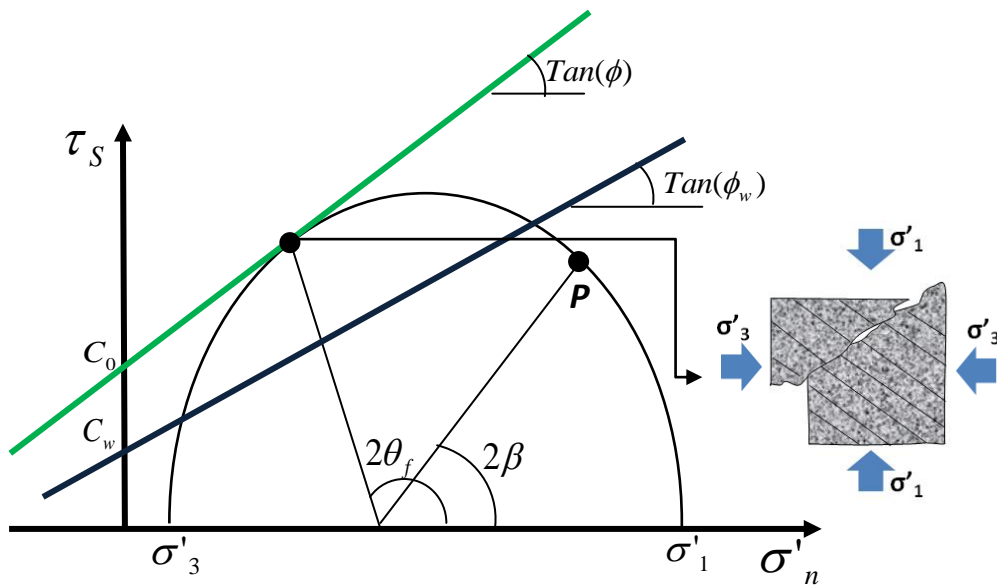
Fuente: V. Juan D. Análisis de los Efectos en la Desviación de Pozo y el Buzamiento de las Capas en la Ventana de Lodo.

Caso 3

Para este caso el ángulo de operación no se encuentra dentro del rango de la intercepción de los dos criterios de falla o puede que si se encuentre, pero existe un punto en el círculo de Mohr que primero toca su respectiva envolvente de falla (línea verde) antes de que el ángulo β toque también su respectiva envolvente (línea azul), por tanto la falla ocurre a través de la roca.

Ilustración 15. Falla por roca.

|



2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y SU APLICACIÓN EN LA SIMULACIÓN

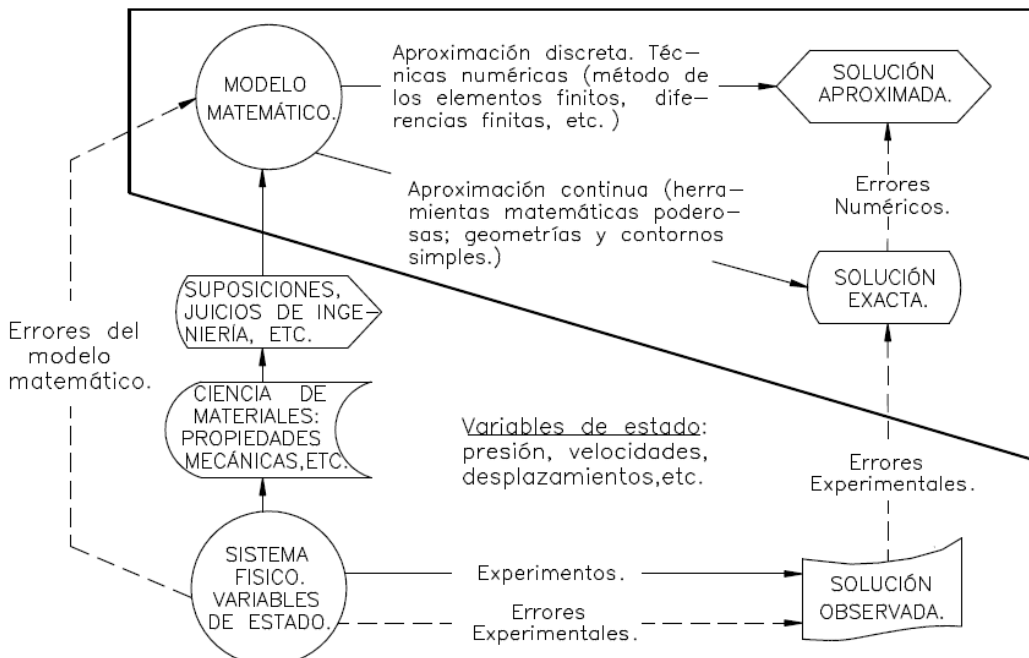
El método de elementos finitos es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería que involucran un alto grado de complejidad en su desarrollo matemático. Estos problemas, comúnmente involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales, por lo que generalmente no es posible obtener alguna solución analítica directamente de expresiones matemáticas. Entre las áreas de la ingeniería en las que el uso de métodos de elementos finitos es aplicado para la solución de problemas se destacan; el análisis estructuras o de medio continuo, problemas de transferencia de calor, flujo de fluidos y transporte de masa.

Los métodos de los elementos finitos, de diferencias finitas, de volumen de control (bien sea basado en diferencias finitas o elementos finitos) y de contorno, son algunos, entre una gran gama de métodos numéricos que se han venido desarrollando y usando exitosamente en la solución de muchos problemas en distintas áreas de la ciencia e ingeniería. Todos estos métodos constituyen una muy poderosa herramienta matemática, pero no dejan de ser métodos aproximados, teniendo por lo tanto un

especial cuidado en su utilización, ya que la calidad de las soluciones que se obtengan depende de varios factores, entre los cuales se pueden destacar la distribución de la discretización espacial de la región en estudio, el tipo de discretización en el tiempo en los problemas no permanentes, la aplicación apropiada de las condiciones de contorno, la correcta inclusión en el modelo de las propiedades físicas de los materiales que intervienen en el problema, etc. El correcto posicionamiento de estos aspectos requiere del sentido común y alguna experiencia del analista, independientemente del método seleccionado.

Visto globalmente, la solución numérica de un problema dado se puede esquematizar tal como se muestra en la Ilustración 16. El sistema real del problema a resolver, se transforma en un modelo matemático, mediante la inclusión de los principios físicos y de conservación que rigen el mismo, la ciencia de los materiales, hipótesis consideradas, etc., asociados al problema a resolver.

Ilustración 16. Diagrama esquemático del modelamiento matemático de un problema.



Fuente: conceptos básicos de MEF. J, A, Pizarro

|

Una vez logrado el modelo matemático y antes de obtener la solución aproximada deseada, dicho modelo debe ser verificado, cotejando su respuesta en situaciones más restringidas, de las cuales se puede conocer la solución exacta, bien sea mediante métodos exactos de solución, o vía métodos experimentales. Sólo después de esta etapa de prueba, el modelo matemático propuesto podrá ser discretizado, a través de alguna técnica numérica, para finalmente obtener la solución aproximada deseada, mediante la solución numérica del modelo ya discreto.

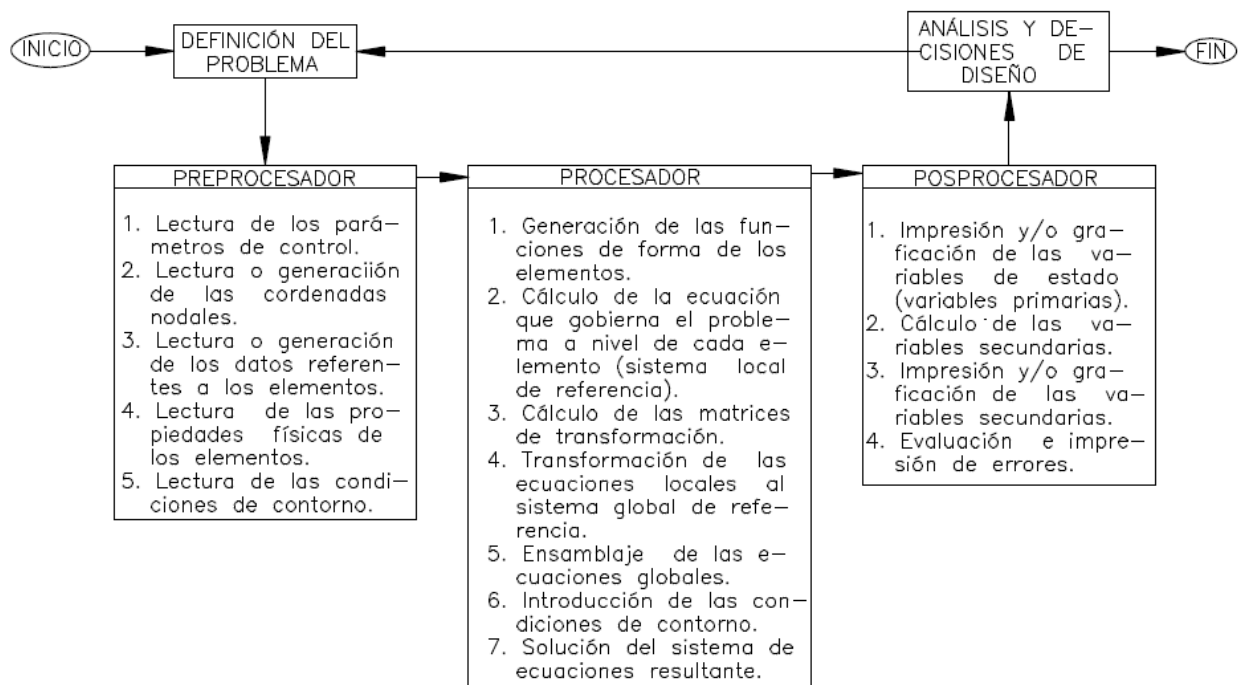
Entre las técnicas numéricas ya mencionadas, una de las que más se ha destacado desde hace aproximadamente cuarenta años, tanto por su capacidad para modelar dominios irregulares, condiciones de contorno, no-linealidades (geométricas y/o mecánicas), y/o sistemas de cargas complejos (características éstas que aparecen en la gran mayoría de los problemas de interés práctico), como por la facilidad en la selección del mecanismo de aproximación de las variables involucradas en un problema específico, es el Método de los Elementos Finitos (MEF).

Las etapas que se pueden identificar en el uso del MEF, independiente de la naturaleza física del problema a tratar son:

- Definición del problema y su dominio.
- Discretización del dominio.
- Identificación de la(s) variable(s) de estado.
- Formulación del problema.
- Establecimiento de los sistemas de referencia.
- Construcción de las funciones de aproximación de los elementos.
- Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento.
- Transformación de coordenadas.
- Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos.
- Introducción de las condiciones de contorno.
- Solución del conjunto de ecuaciones simultáneas resultante.
- Interpretación de los resultados.

La implementación computacional de los pasos descritos anteriormente se realiza, en forma general, mediante tres unidades básicas: el pre-procesador, el procesador, y el postprocesador. Las funciones principales de estas unidades son, respectivamente, entrada y/o generación de los parámetros del problema, ensamblaje y resolución del sistema de ecuaciones e impresión grafica de la solución. El éxito de cualquier programa computacional de elementos finitos depende de la eficiencia de cada una de las tres unidades mencionadas. En la Ilustración 17 se resume las operaciones que se realizan en dichas unidades.

Ilustración 17. Esquema general de la implementación de computacional del método de elementos finitos.



El método de elementos finitos consiste en el reemplazo de un conjunto de ecuaciones diferenciales, por un conjunto equivalente, pero aproximado, de ecuaciones algebraicas, donde cada una de las variables es evaluada en los puntos nodales. En la evaluación de estas ecuaciones algebraicas pueden usarse diferentes tipos de aproximaciones, y los métodos de elementos finitos se clasifican, usualmente, de acuerdo al método usado. Desafortunadamente, no existe un método en particular que

|

sea apropiado para todos los tipos de problemas encontrados en la realidad, de tal modo que deben examinarse diferentes métodos para poder seleccionar el más conveniente para un problema dado.

Uno de los métodos es el método directo, del cual se desarrolló inicialmente junto con MEF, al inicio de la década de los años cincuenta, a partir del llamado método directo asociado al cálculo estructural, el cual fue ampliamente usado en la solución de diversos problemas estructurales relacionados con la industria aeronáutica. Mediante este método se analizaron elementos estructurales reticulares. Las relaciones entre los desplazamientos y las fuerzas que los originan, se expresaron mediante un conjunto de ecuaciones, dando origen a lo que se dio en llamar matriz de rigidez de cada elemento estructural, y se desarrollaron técnicas para realizar el ensamblaje de estas matrices en una matriz global, que expresara el comportamiento de toda la estructura en estudio. Prácticamente, todos los parámetros empleados en esta aproximación pueden interpretarse mediante principios físicos. Desafortunadamente, este método es difícil de aplicar en problemas bidimensionales y tridimensionales, los cuales son, precisamente, los casos donde el MEF es más útil. Esta limitación es por lo tanto muy severa y reduce, drásticamente, su rango de aplicación.

Otro método comúnmente conocido es el método variacional, el cual está relacionado con un ente matemático llamado funcional. El funcional asociado a un problema dado, puede obtenerse bien sea a partir de alguna expresión de energía (usualmente este es el caso en los problemas de la mecánica de los sólidos), o desde un problema de valor de contorno. Una vez obtenido el funcional asociado a un problema dado, el método variacional consiste en minimizar el valor del funcional con respecto a cada uno de los valores nodales de las variables del problema. Entre las ventajas de este método se incluye la familiaridad de las técnicas de energía (en problemas de la mecánica de los sólidos), y su fácil extensión a problemas bidimensionales y tridimensionales. Entre las desventajas, se incluye la inexistencia del funcional para cierta clase de problemas (por ejemplo, los relacionados con el flujo de fluidos viscoelásticos), y la dificultad de determinarlo, aun cuando exista, para otros problemas. La inexistencia del funcional para algunos problemas, obliga a que se deba recurrir a otros métodos.

|

En la solución de los problemas asociados a la mecánica de los sólidos se pueden emplear diferentes modelos de elementos finitos, los cuales dependen del principio variacional utilizado y del tipo de comportamiento localizado de las variables sobre cada elemento. Los tres principios variacionales más frecuentemente utilizados son: el principio de mínima energía potencial, el principio de mínima energía complementaria y el principio de Reissner. Las variables involucradas en un problema dado dictaminan el principio variacional a usarse. Cuando se utiliza el principio de mínima energía potencial, se debe asumir la forma de los desplazamientos en el interior de cada elemento. Por este motivo, este modelo recibe el nombre de modelo de elementos finitos de desplazamientos, o modelo compatible. Cuando se usa el principio de mínima energía complementaria, se supone la forma del campo de esfuerzos y por este motivo a este modelo se le conoce con el nombre de modelo de elementos finitos de las fuerzas, o modelo de equilibrio. El principio de Reissner permite el desarrollo de los llamados modelo de elementos finitos híbridos y del modelo mixto. En estos modelos se adoptan, simultáneamente, los campos de desplazamientos y de esfuerzos. Para un problema en particular, un principio puede ser más apropiado que otro pero, debido a su fácil implementación, el modelo compatible es el más ampliamente usado, motivo por el cual constituye la base de la mayoría de los programas computacionales comerciales en el área de la ingeniería.

3. ANTECEDENTES

Durante la perforación de pozos se presentan diversos tipos de problemas operacionales que conllevan a la pérdida de tiempo y dinero. Estos problemas, en ocasiones, son relacionados a inestabilidad en la pared del pozo y a selecciones no acertadas de las densidades de fluido empleadas para la perforación. Esta inestabilidad de pozo puede concluir en un hueco colapsado y generar problemas severos como empaquetamientos de tubería y posteriores “sidetrack” o desviaciones del pozo no planeadas. Por tanto es de gran importancia conocer las propiedades mecánicas de las rocas a perforar así como el estado de esfuerzos en el pozo durante su perforación. Esta combinación y análisis de entorno se realiza mediante la elaboración de un modelo geomecánico que permita establecer dichas relaciones entre variables.⁸

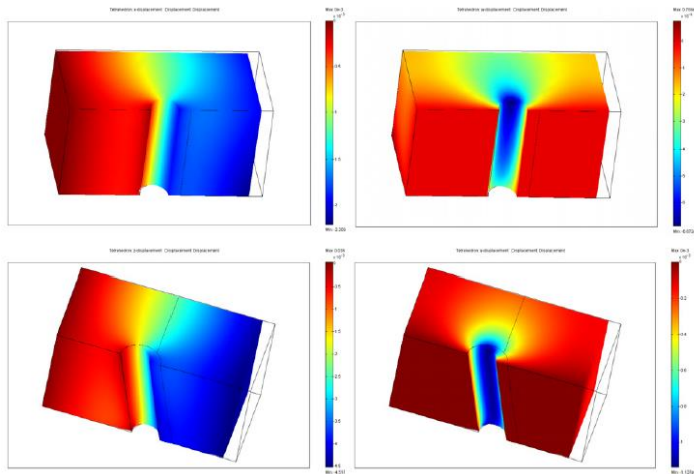
Adicionalmente en los análisis geomecánicos, se incluyen las relaciones de las diferentes variables con la inclinación del pozo y como ésta afecta el estado de esfuerzos en la cara del pozo. En conclusión, la inclinación del pozo es un factor importante en la determinación de los estados de esfuerzos en la cara del pozo y a su vez este estado de esfuerzos determina la estabilidad en el hueco y los controles que se deben realizar con la densidad del lodo de perforación para mitigar futuros problemas. Ahora bien, si se tiene un pozo inclinado y adicionalmente se están perforando formaciones con fracturas o planos de debilidad, el cambio en el estado de esfuerzos en la cara del pozo es drástico y significativo cambiando por completo el análisis o modelo geomecánico que se pueda generar de un pozo no desviado y perforado en formación sin fracturas.⁹ En la perforación de pozos inclinados en formaciones fracturadas se identifican problemas como la alta frecuencia de pegas de tuberías. Estos incidentes ocurren por lo general en pozos de alto ángulo o pozos horizontales, durante viajes de tubería y adicionalmente estos problemas no se asocian a una dirección particular de orientación de los pozos^{3,6,21}

Una de las alternativas para el análisis de este fenómeno de inestabilidad en la cara del pozo durante la perforación de formaciones laminadas o fracturadas es el análisis mediante la simulación empleando herramientas software de métodos de elementos

|

finitos ^{4,5}. Este tipo de estudios con un MEF, simplifica el análisis matemático de las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de esfuerzos y deformaciones en la cara del pozo perforado desviado en formaciones fracturadas o con planos de debilidad. En la Ilustración 18 se puede observar una representación gráfica de un MEF para la perforación de un pozo con formaciones laminadas.

Ilustración 18. Ejemplo de MEF para la perforación de un pozo



Fuente: “3D FEM simulations of layered rocks using orthotropic elastic symmetry”

Se encuentran en las publicaciones alternativas de solución y análisis del fenómeno de perforación de pozos inclinados en formaciones fracturadas o laminadas, desde estudios aplicados a formaciones de roca específicas¹¹, hasta estudios aplicados a campos de perforación con diferentes formaciones de rocas laminadas⁹.

Algunos de estos trabajos de investigación muestran el desarrollo de un modelo matemático de análisis de esfuerzos y deformaciones en la formación de roca fracturada mientras ésta se perfora⁴, adicionalmente correlacionan estos cambios de esfuerzos con los efectos y problemas operacionales durante la perforación de un pozo o varios pozos en un campo específico a desarrollar reservas de hidrocarburos. Otras publicaciones^{5,6} no desarrollan un modelo matemático propio, si no que parten de teorías generales de análisis de esfuerzos en la cara del pozo o de trabajos analíticos de otros autores.

|

Finalmente todas las publicaciones resaltan el efecto causado por las fracturas en la perforación de pozos inclinados en formaciones laminadas y como estas juegan un papel importante en la distribución de esfuerzos en la cara del pozo que pueda generar efectos contraproducentes en la estabilidad geomecánica del pozo.

Algunas de las conclusiones de estos trabajos coinciden en ciertas limitantes de los modelos FEM para el análisis del efecto de perforación en formaciones laminadas. Por ejemplo, presentan la limitante de simular las rocas como materiales isotrópicos y homogéneos, y como este tipo de asunción puede llegar a sobre estimar los esfuerzos en la roca⁴. Todas las publicaciones concluyen que al perforar formaciones laminadas existe un efecto adicional en la distribución de esfuerzos en la cara del pozo, que según las propiedades de la roca y condiciones de esfuerzos in situ, puede llegar a ser tan severo que los problemas operacionales asociados a la inestabilidad del pozo pueden incrementarse exponencialmente llevando a pérdidas de pozos durante la perforación por inestabilidad.

4. MODELO DE SIMULACIÓN - SOFTWARE ABAQUS®

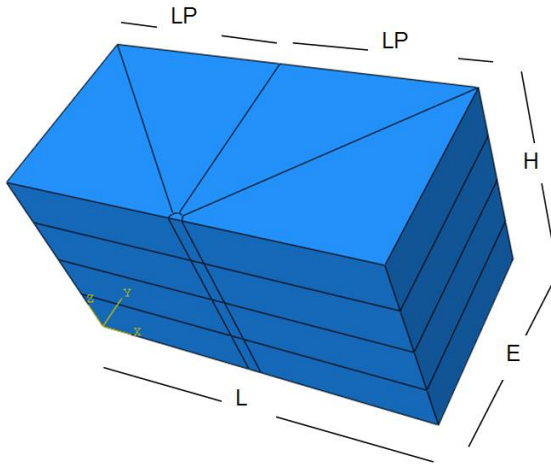
El modelo de simulación que se muestra a continuación pretende representar la perforación de un pozo inclinado en formaciones fracturadas y su comportamiento geomecánico, (relaciones de esfuerzos, deformaciones, orientaciones de esfuerzos y magnitudes) para determinar mediante relaciones de esfuerzo, deformación y criterios de falla la posible inestabilidad del pozo durante la perforación. Este modelo de simulación permitirá evaluar la influencia o efecto del ángulo de ataque en la estabilidad del pozo para tres casos de estudio de perforación del pozo en inclinaciones diferentes. Un modelo inicial con la perforación del pozo vertical, seguida por una perforación con el pozo inclinado 30 grados y un caso final con el pozo inclinado a 50 grados. Cada uno de los casos a modelar se realizó inicialmente sin la presencia de fracturas seguido por el caso con fracturas para un total de 6 modelos de simulación. Estos tres ángulos permitirán establecer una relación y efecto del ángulo de ataque en la distribución de esfuerzos en el pozo y así correlacionarla con la falla o inestabilidad de la cara del pozo. A continuación se presenta el paso a paso y detalle en cada una de las instancias de elaboración de los modelos de simulación empleando la herramienta software Abaqus®

4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO

La geometría del pozo seleccionada para la simulación corresponde a un pozo de 21.5cm (8.5in) de diámetro perforado en un intervalo de profundidad desde 3200m hasta 3230m (10500ft a 1600ft) en una formación de roca laminada. Ésta geometría corresponde a un caso real de perforación de un pozo en la cuenca del valle medio del Magdalena. Para recrear estas condiciones de perforación del pozo real se elaboró una geometría axisimétrica en 3 dimensiones con forma primitiva rectangular. La perforación del pozo se simula con una condición ideal de geometría cilíndrica en la parte central del rectángulo primitivo en la sección axisimétrica. La Ilustración 19 muestra la forma primitiva en 3 dimensiones y el cilindro simulando el pozo.

|

Ilustración 19. Forma primitiva rectangular para modelo de simulación



Las dimensiones para la Ilustración 3D primitiva de construcción son:

L=6m, 19.68ft

LP=3m, 9.84ft

H=3.48m, 11.4ft

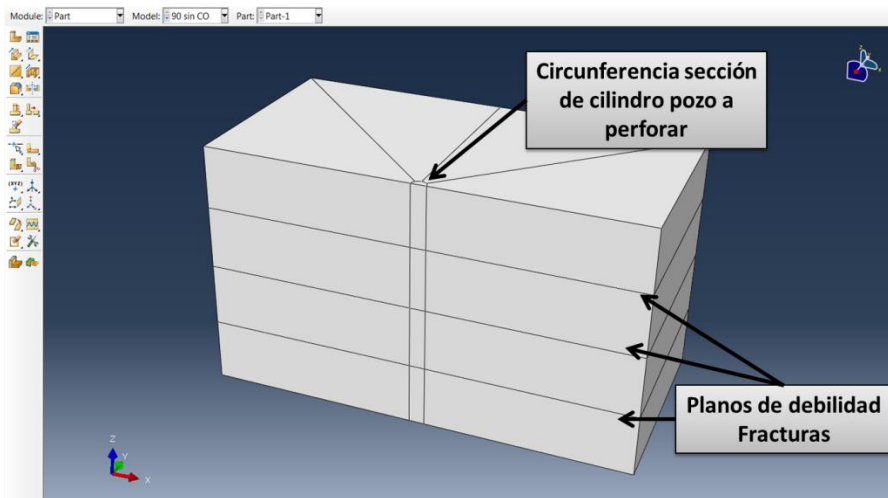
E=3m, 9.84ft

Esta Ilustración rectangular representa una sección de roca en el subsuelo previa a ser perforada, es el volumen de control para el modelo de simulación. Las dimensiones seleccionadas corresponden a un valor mínimo en magnitud de 10 veces la dimensión de interés, que para este caso corresponde a 10 veces el diámetro del pozo. La zona de interés para el análisis del modelo es el hueco perforado, el pozo y la zona circundante a este. Varios autores y sus publicaciones recomiendan esta premisa de emplear una dimensión de 10 veces la magnitud de la zona de estudio en el modelo a simular^{4, 5}. Estas publicaciones argumentan que aproximadamente a 3 o 4 veces la magnitud de la zona de análisis (diámetro del pozo) se observa una convergencia de los resultados de deformación y esfuerzos, de manera tal que después de la 4 vez en magnitud el efecto deformacional se hace nulo.

Adicional en la Ilustración rectangular 3D primitiva, se agregaron las zonas o planos que simulan las fracturas en la formación. Estas fracturas se representan en un plano

horizontal separadas entre sí un distancia de 0.87m (2.85ft) y equidistantemente distribuidas en la altura total del bloque de roca. En la Ilustración 20 se observa la parte o bloque primitivo del modelo junto con las fracturas o planos de debilidad y la sección circular del pozo.

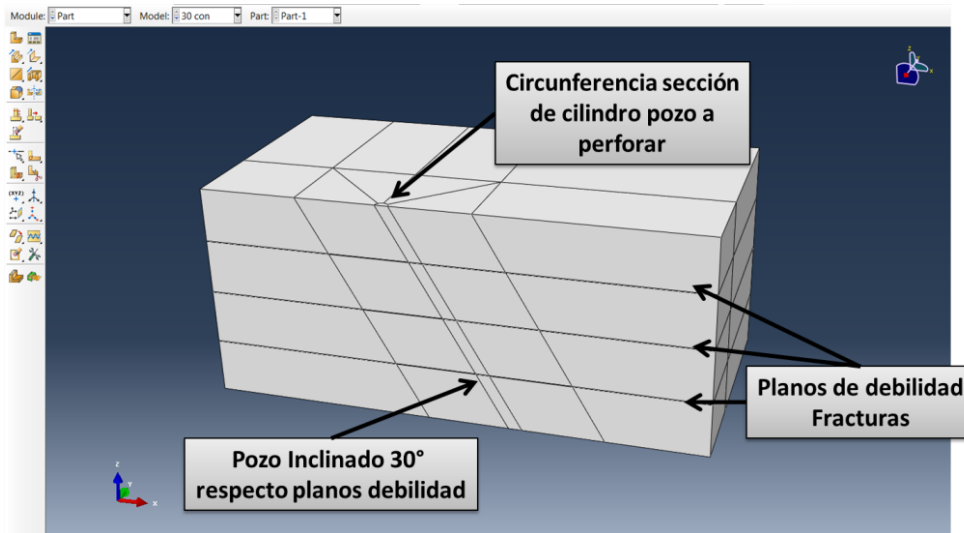
Ilustración 20. Bloque rectangular de roca, fracturas horizontales y cilindro ideal de pozo.



Esta geometría o dimensionamiento de modelo corresponde al primer caso de estudio, el pozo perforado vertical formando un ángulo de ataque de cero grados respecto a las fracturas o planos de debilidad.

Para el dimensionamiento de los modelos del pozo perforado a 30 grados y 50 grados se empleó el mismo principio de un bloque con dimensiones 10 veces mayores al diámetro del pozo. Dada la inclinación del pozo, para el caso de 50 grados, el ancho del bloque resulta mayor que el de cero grados y treinta grados respectivamente. En la Ilustración 21 se observa la Ilustración base para el modelo de 30 grados

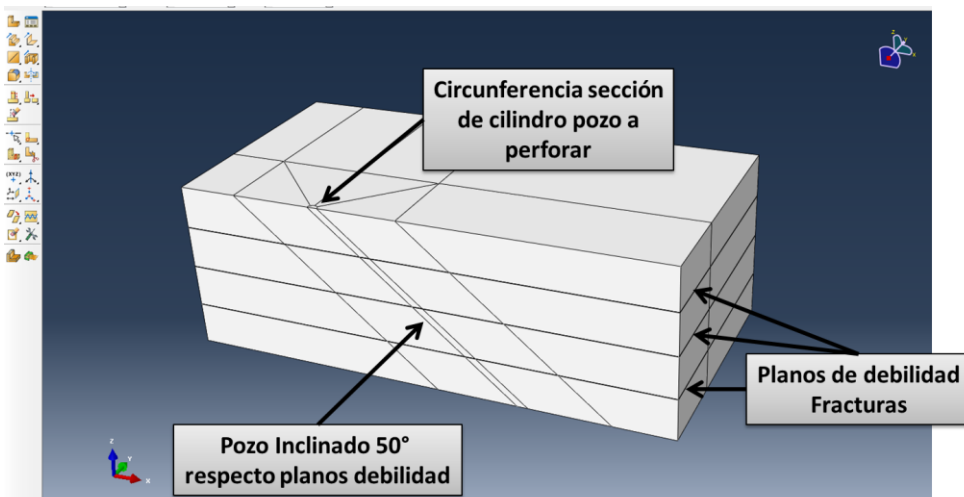
Ilustración 21. Bloque rectangular de roca, fracturas horizontales y cilindro ideal de pozo inclinado 30° respecto los planos de debilidad. Modelo caso 30°



En la Ilustración 22 se observa Ilustración base para el modelo de 50 grados.

Para el caso del modelo con el pozo inclinado 50° se tiene la Ilustración 22.

Ilustración 22. Bloque rectangular de roca, fracturas horizontales y cilindro ideal de pozo inclinado 50° respecto los planos de debilidad. Modelo caso 50°



4.2 ASIGNACIÓN DE MATERIALES EN EL MODELO

En la construcción del modelo se emplearon, de forma general dos materiales; la roca y la fractura. Cada uno de estos materiales con características propias según el modelo y las condiciones ideales que se quieran simular en la perforación del pozo.

Para el caso de la roca se empleó un tipo de material elástico e isotrópico, con propiedades de densidad, módulo de elasticidad y relación de Poisson. Este tipo de material seleccionado permite modelar de forma aceptable el comportamiento de las rocas. El modelo constitutivo elástico isotrópico tiene validez demostrada en publicaciones para simular el comportamiento conservador de las rocas o un medio poroso. Adicionalmente el modelo constitutivo seleccionado aplica para el tipo de elemento seleccionado en el enmallado del modelo. Este tipo de elemento se explicará más adelante en la sección de enmallado del modelo¹⁷. Las propiedades asignadas a la roca en la simulación corresponden a propiedades de una formación colombiana de un campo ubicado en el valle medio del magdalena. Las magnitudes de dichas propiedades fueron obtenidas de los modelo geomecánicos del campo y de algunas pruebas de laboratorio de mecánica de rocas en muestras de corazones de la formación en mención. Las propiedades empleadas se relacionan en la tabla 01 a continuación.

Densidad	2300 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (Young)	2.64E7 kPa
Relación de Poisson	0.3

Tabla 01. Propiedades material roca del modelo

Para el caso de las fracturas se emplearon propiedades correspondientes al tipo de elemento que permite modelar el comportamiento físico de la fractura o plano de debilidad. El tipo de elemento usado para las fracturas será explicado más adelante. Dado que no se cuenta con una caracterización de pruebas de laboratorio para las propiedades mecánicas de las fracturas, se emplearon las mismas propiedades mecánicas de la roca circundante a la fractura. Adicionalmente, el modelo constitutivo

|

de las fracturas contempla un criterio de falla, por tanto se incorpora a las propiedades o condiciones asociadas a la falla del material, en este caso se empleó el criterio de falla de Morh Coulumb, asignando valores de cohesión y ángulo de fricción interna para las fracturas. En la tabla 02 se presentan las propiedades del material asignado a las fracturas.

Densidad	2300 kg/m ³
Módulo de Elasticidad	2.64E7 kPa
Relación de Poisson	0.3
Cohesión	0
Angulo de Fricción interna	25

Tabla 02. Propiedades material fractura del modelo

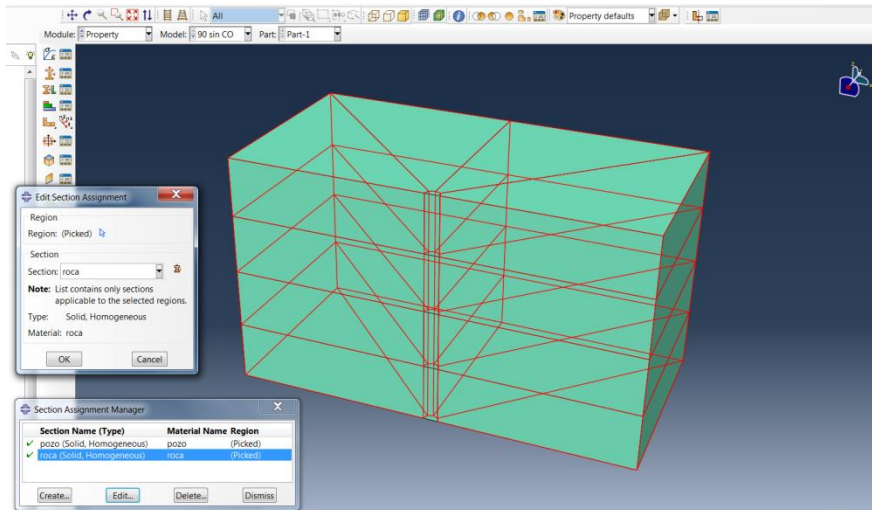
Los valores de cohesión y ángulo de fricción interna asignados corresponden a un escenario poco conservador para las propiedades de una fractura, es decir, se está contemplando el peor escenario posible en la perforación, en la cual la resistencia de la roca depende de la resistencia o propiedades de la fractura, en este caso una cohesión de 0 y un ángulo de fricción interna 25 son propiedades de menor competencia que la roca intacta. Este escenario contemplado en el modelo permitirá obtener las peores condiciones posibles que se puedan encontrar durante la perforación. Cabe resaltar que estas propiedades asignadas a la roca y a la fractura son modificables en el modelo y se podrá elaborar un estudio adicional y detallado del comportamiento de perforación del pozo en otro escenario más conservador con propiedades mecánicas de fractura probablemente calibradas con pruebas de laboratorio.

4.3 ASIGNACIÓN DE GEOMETRÍAS E INSTANCIAS

Para el desarrollo del modelo en el software Abaqus® y facilidad en las operaciones de simulación se debe asignar en la geometría base las instancias o secciones de cada material. Este es un procedimiento de relacionamiento entre la geometría del modelo y las operaciones a realizar posteriormente en el modelamiento. Para el modelo se

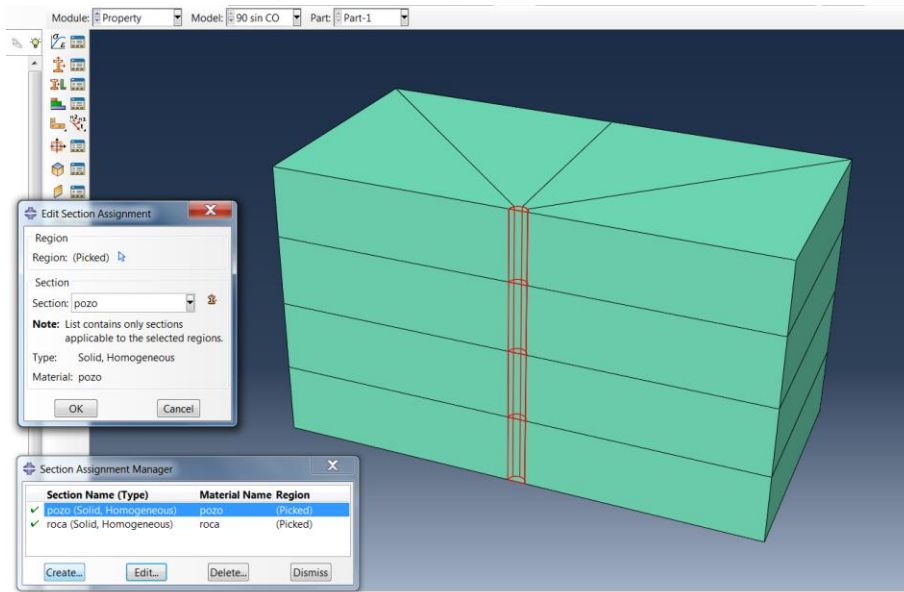
asignaron 3 instancias diferentes, las fracturas, roca y pozo. A continuación en las Ilustraciones 23, 24, 25 se observan las asignaciones de la geometría roca, pozo y fracturas.

Ilustración 23. Asignación de geometría roca en la Ilustración primitiva, líneas rojas



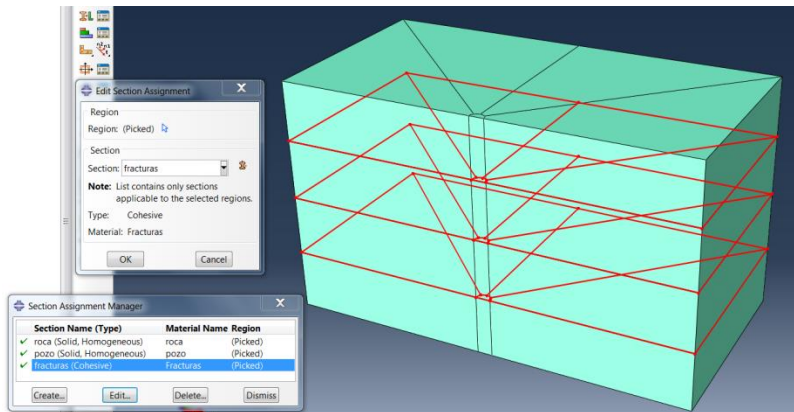
Fuente: el autor

Ilustración 24. Asignación de geometría pozo en la Ilustración primitiva, líneas rojas



Fuente: el autor

Ilustración 25. Asignación de geometría fracturas en la Ilustración primitiva, líneas rojas



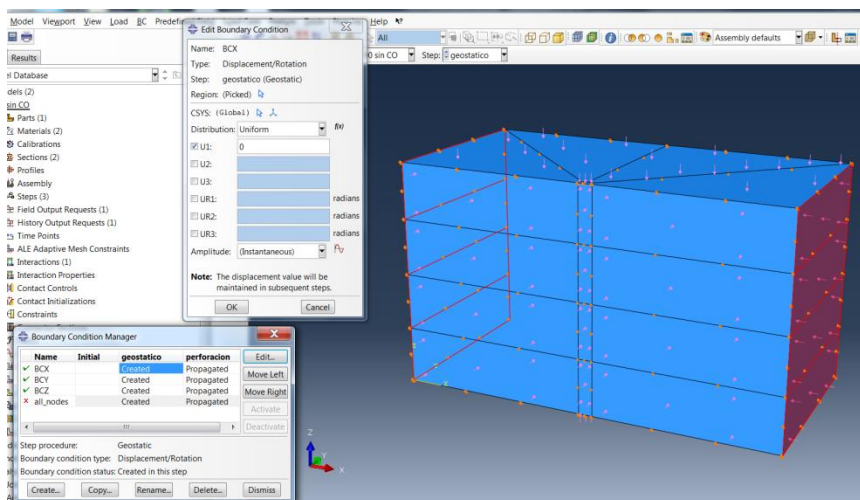
Fuente: el autor

4.4 CONDICIONES DE FRONTERA Y CARGAS APLICADAS

Para simular las condiciones de perforación en el bloque 3D primitivo se generaron las siguientes condiciones de frontera y de cargas en el modelo.

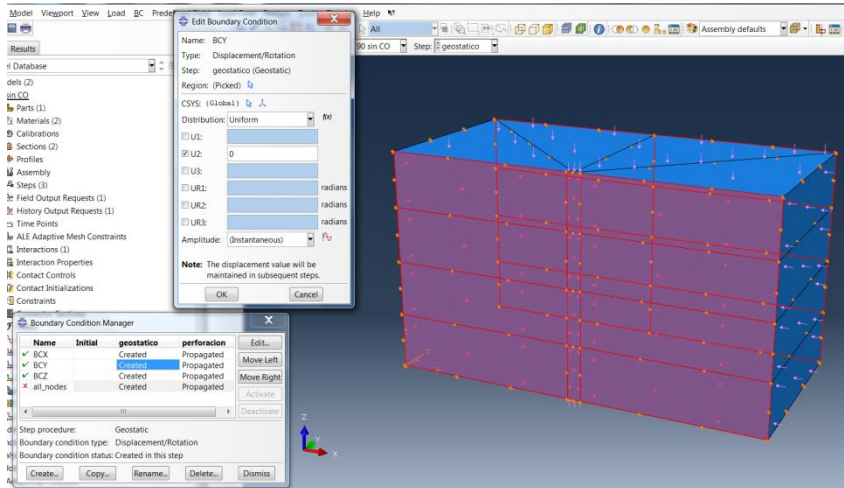
Restricciones de movimiento en los ejes x, y, z en las caras externas del bloque según cada eje ortogonal como se muestra en las Ilustraciones 26, 27, 28. La sección coloreada roja, corresponde a la cara externa del bloque donde se aplica la restricción de movimiento en su eje paralelo al correspondiente ortogonal.

Ilustración 26. Restricción de movimiento en el eje X, caras externas del bloque primitivo paralelas al eje x



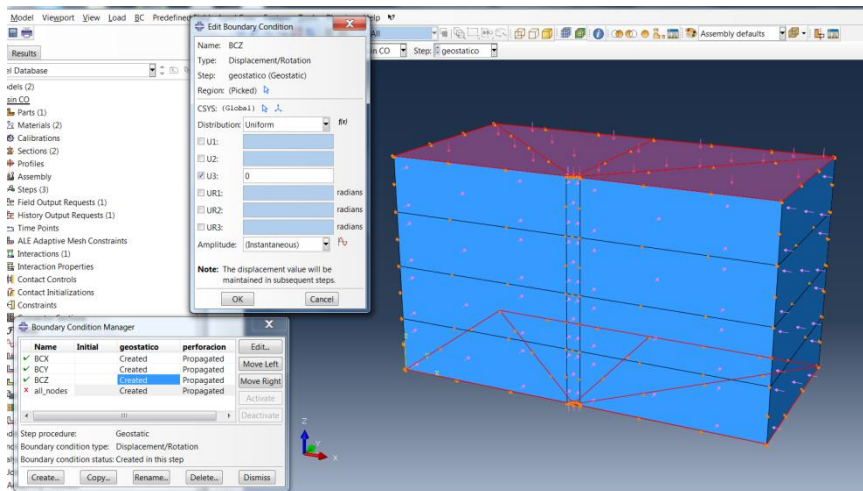
Fuente: el autor

Ilustración 27. Restricción de movimiento en el eje Y, caras externas del bloque primitivo paralelas al eje Y



Fuente: el autor

Ilustración 28. Restricción de movimiento en el eje Z, caras externas del bloque primitivo paralelas al eje Z



Fuente: el autor

Estas restricciones simulan el comportamiento físico del subsuelo a la profundidad determinada en este estudio. En condiciones ideales, a una escala del estudio en cuestión, 10m de largo, el subsuelo circundante al pozo a perforar se encuentra en

|

equilibrio estático sin movimientos y con una condiciones de esfuerzos estáticos y en equilibrio, por tanto se restringen los movimientos en las caras externas del bloque simulando el efecto físico de equilibrio de movimiento y cargas en el subsuelo.

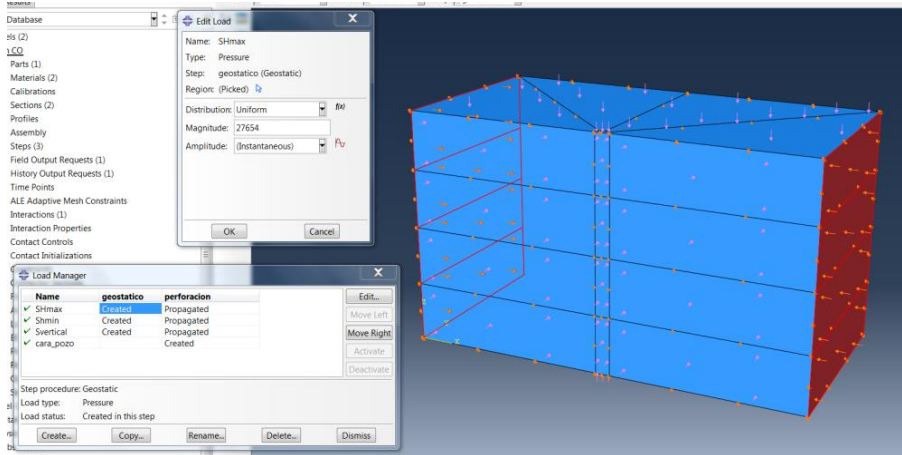
Para el estado de cargas in situ, o cargas estáticas en fondo, se emplearon condiciones en el modelo similares a las restricciones de contorno. Se aplica entonces una carga uniforme y constante en cada una de las caras del bloque primitivo, según la dirección, y asignación de cargas, la cara externa del bloque y el esfuerzo a representar. Se tiene para el modelo, carga en el eje X equivalente al esfuerzo horizontal mínimo, carga en el eje Y esfuerzo horizontal máximo y carga en el eje Z esfuerzo vertical. Cada uno de estos esfuerzos corresponde a los esfuerzos principales in situ del modelo y de las condiciones reales de un pozo perforado según las condiciones geométricas mencionadas anteriormente en el ítem de dimensionamiento geométrico. Los esfuerzos aplicados en las caras del bloque corresponden a esfuerzos efectivos. En la tabla 03 se presentan las magnitudes empleadas en la carga de esfuerzos.

Esfuerzo Vertical (kPa)	Esfuerzo Horizontal Máximo (kPa)	Esfuerzo Horizontal mínimo (kPa)
76000	80400	70900

Tabla 03. Magnitudes de esfuerzos in situ.

Se puede observar en las Ilustraciones 29, 30, y 31 las condiciones de cargas respectivas en color rojo.

Ilustración 29. Carga aplicada en el eje X, esfuerzo horizontal mínimo



Fuente: el autor

Ilustración 30. Carga aplicada en el eje Y, esfuerzo horizontal máximo

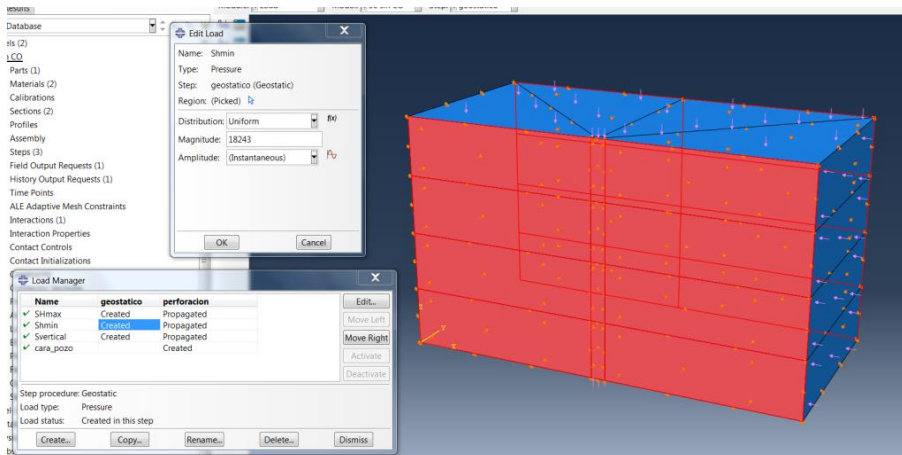
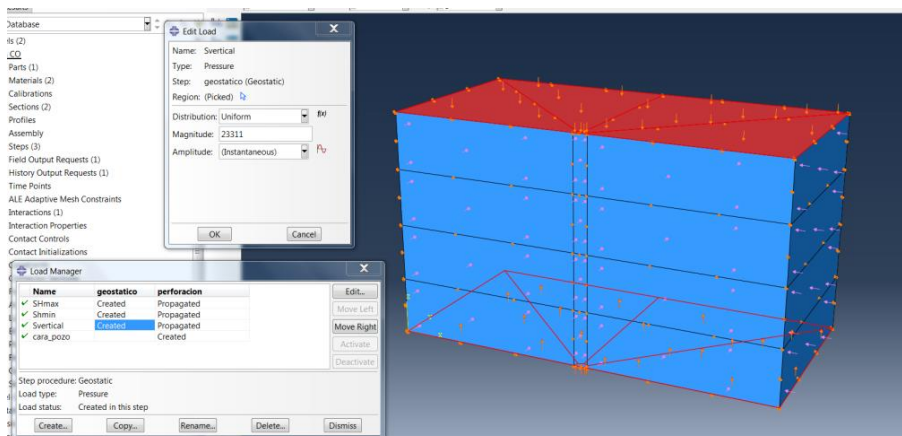


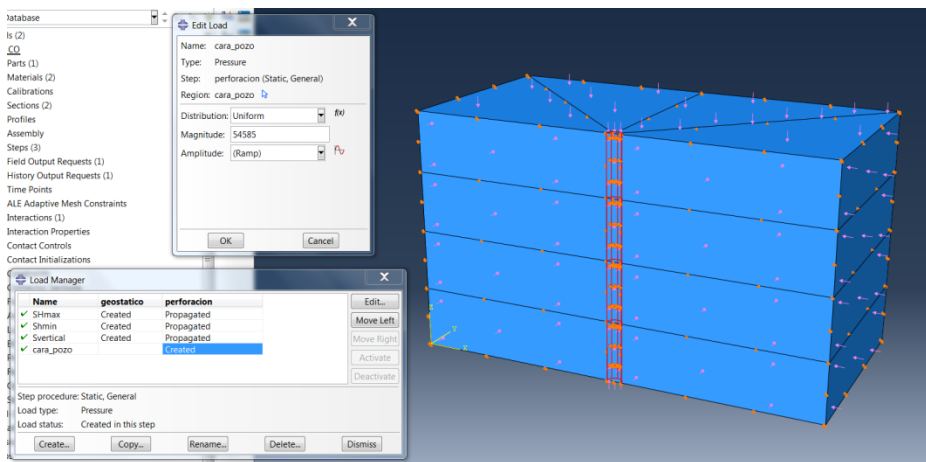
Ilustración 31. Carga aplicada en el eje Z, esfuerzo vertical



Fuente: el autor

Adicional a los esfuerzos in situ o de equilibrio, se tiene el esfuerzo ejercido por el fluido de perforación en la cara del pozo, este esfuerzo se simula aplicando una carga uniforme y contante en la cara del pozo, o zona semi cilíndrica del modelo geométrico. La magnitud empleada corresponde a la presión hidrostática del fluido a la profundidad del caso. Para este modelo la presión aplicada es de 54600kPa. En la Ilustración 32 se observa la carga aplicada en la cara externa del pozo en color rojo.

Ilustración 32. Carga aplicada en la cara del pozo, efecto del fluido de perforación.



Fuente: el autor

4.5 MALLA Y TIPOS DE ELEMENTOS

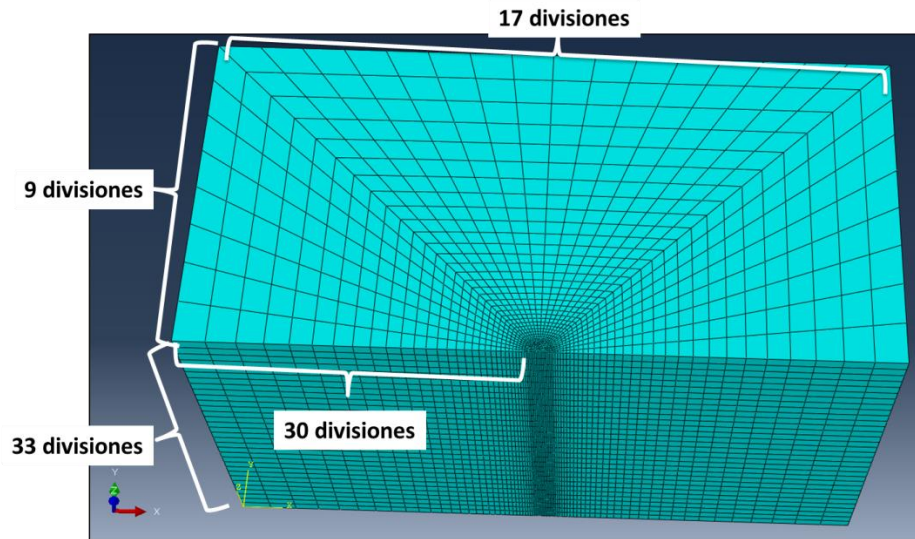
Una vez se cuenta con la geometría del modelo, generación de instancias o relaciones y condiciones de frontera, se procede a establecer el enmallado del modelo. El enmallado del modelo fue realizado con la herramienta propia del software Abaqus® que permite seleccionar tipo de malla, geometría y arreglo de la misma junto a la selección de los tipos de elementos a usar. La generación del enmallado en el software Abaqus® se realiza netamente a partir de condiciones o principios geométricos, es

|

decir, se divide la forma primitiva en n cantidad de separaciones o divisiones y se establece la malla, adicionalmente se establece la posición de cada una de estas divisiones, seleccionadas manualmente o automáticamente por el programa según los requerimientos del usuario. Inicialmente se empleó una división de 50 partes o divisiones en el lado frontal del bloque, donde se encuentra ubicado el medio cilindro simulando el pozo en la dirección x , 20 divisiones en el lado paralelo opuesto y 9 divisiones en el lado lateral paralelo al eje Y . Se evaluó dicho enmallado de forma satisfactoria, el análisis computacional no presentó errores y se pudo establecer una primera evaluación de los resultados de esfuerzo y deformación circundantes al pozo o geometría a evaluar. Sin embargo se evidenció que el gasto computacional para resolver el modelo era muy alto, tiempo de análisis muy alto, por tanto se disminuyó la cantidad de divisiones y por ende la cantidad de nodos en el modelo. Este segundo enmallado consta 30 partes o divisiones en el lado frontal del bloque, donde se encuentra ubicado el medio cilindro simulando el pozo en la dirección x , 16 divisiones en el lado paralelo opuesto y 9 divisiones en el lado lateral paralelo al eje Y . Adicional al número de divisiones que se seleccionaron para cada lado de la geometría, se seleccionó el nivel de cercanía o longitud de cada división en un lado determinado. Todas las divisiones se seleccionaron sus longitudes de manera tal que fuesen menores en las cercanías al pozo, es decir, en los contornos al área de análisis de este modelo. Es así como se observa una densidad mayor de divisiones y por tanto de nodos en las zonas contiguas al pozo y en la geometría de la cara del pozo principalmente donde se concentran la mayor densidad de divisiones y de nodos. Las diferencias en los resultados, de los dos tipos de enmallado en cuanto a esfuerzos y deformaciones, no variaron significativamente, la variación fue del orden de 0.01mm en deformación para el primera caso de análisis comparado con el segundo arreglo de malla, mientras los esfuerzos variaron del orden de 10Pa entre el primer tipo de enmallado y el segundo de menor densidad de nodos. El segundo enmallado empleado muestra convergencia de los resultados deformacionales y de esfuerzos, en el capítulo de validación del modelo se pueden observar los resultados del orden de lo esperado según pruebas de laboratorio y situaciones físicas del pozo durante perforación, por tanto se mantuvo el segundo enmallado seleccionado. En la ilustración 33 se muestra

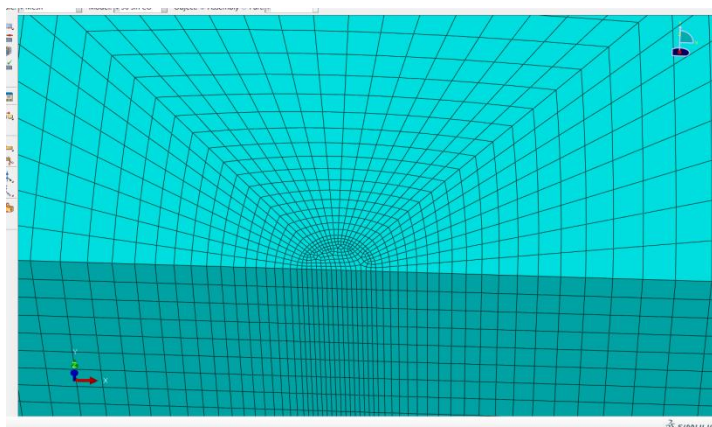
el enmallado del modelo de 0° de inclinación del pozo, la misma metodología se empleó para enmallar los modelos inclinados a 30° y 50°.

Ilustración 33. En mallado general del bloque primitivo



Adicional al enmallado seleccionado para cada lado del bloque, se empleó un enmallado y divisiones con mayor detalle en el cilindro que simula el pozo. En la sección recta del cilindro se emplearon 17 divisiones, mientras en la sección circular del mismo un total de 33 divisiones. En esta ocasión todas las divisiones del mismo tamaño y equidistantes con las divisiones externas en las caras del bloque de manera que convergen en el centro del bloque en la cara circunferencial del cilindro. En la Ilustración 34 se observa el detalle del enmallado en la zona alrededor del pozo.

Ilustración 34. Enmallado en la zona alrededor del cilindro o pozo.



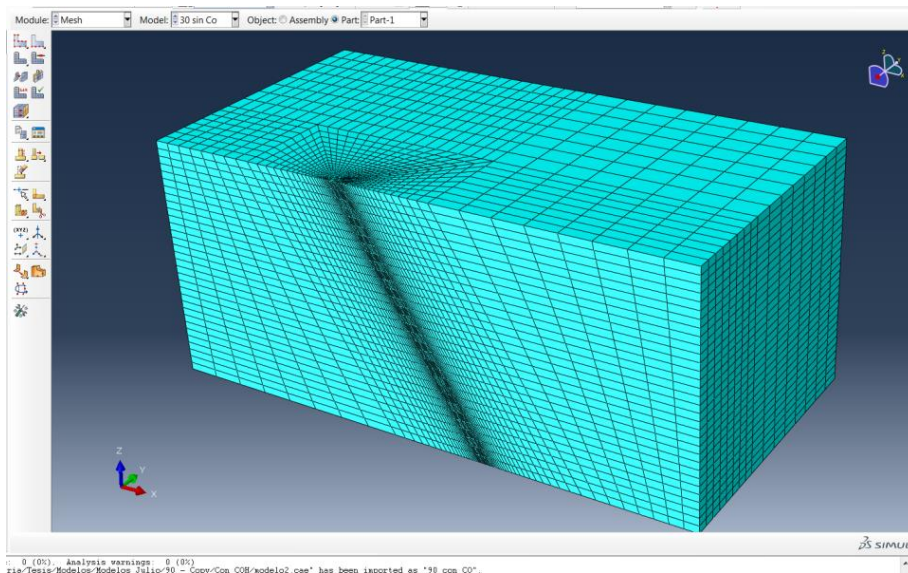
Finalizado el proceso de enmallado se tiene en la tabla 04 el resumen del total de nodos y elementos resultantes para cada modelo de este trabajo.

	Número de nodos	Número de Elementos
Modelo 0°	42696	39585
Modelo 30°	45680	42000
Modelo 50°	45576	41895

Tabla 04. Cantidad de nodos y elementos en cada modelo

En la Ilustración 35 se muestra el arreglo final de malla para el modelo de 30° de inclinación.

Ilustración 35. Enmallado modelo 30°



Fuente: el autor

Ilustración 36. Detalle al pozo en el enmallado modelo 30°

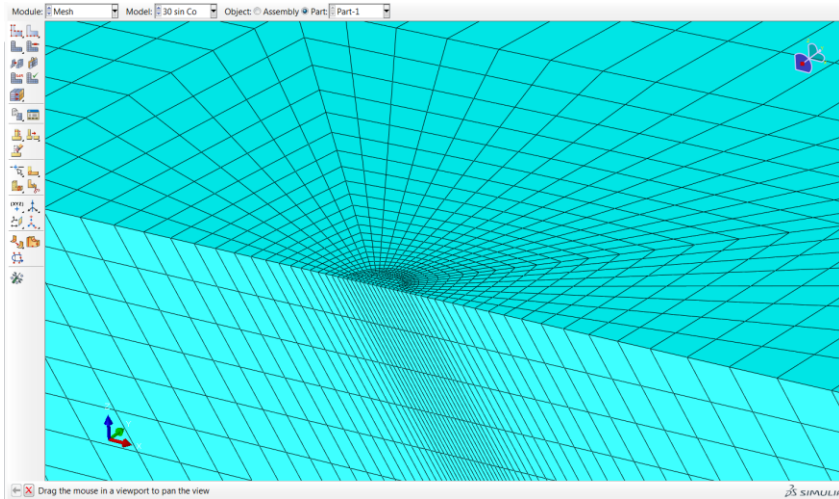
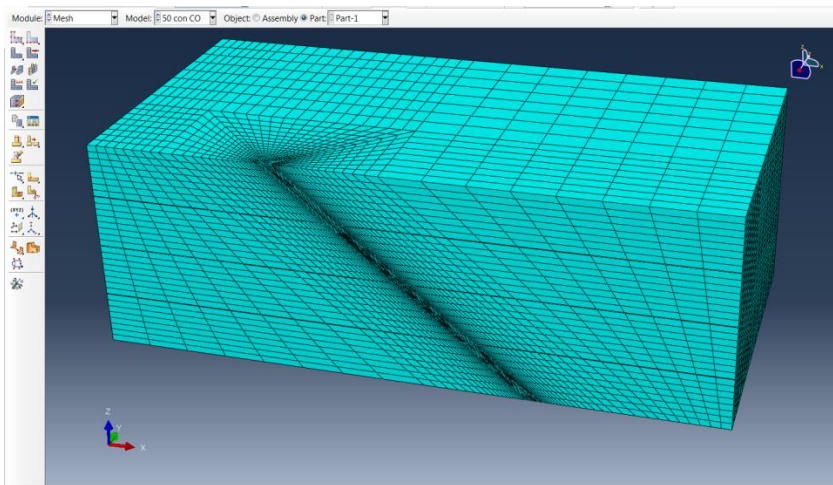


Ilustración 37. Enmallado modelo 50°

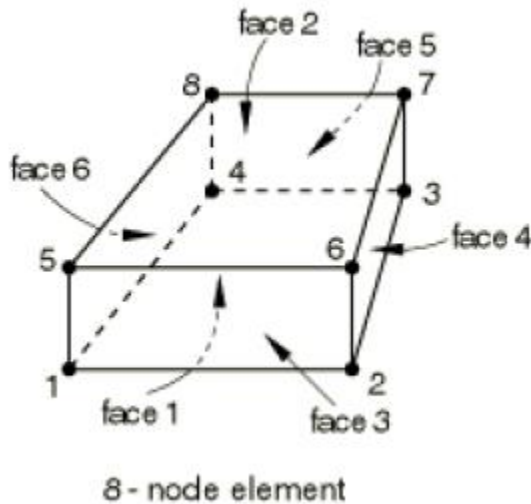


Definido el arreglo de la malla, sus nodos y elementos se procede a seleccionar el tipo de elementos para el análisis de elementos finitos. Para todos los modelos se emplearon los mismos tipos de elementos, para la roca se emplearon elementos C3D8 y para las fracturas o planos de debilidad elementos COH3D8. Los elementos C3D8 son elementos tipo sólidos, en cada nodo existen tres grados de libertad, correspondientes a las tres traslaciones de un problema tridimensional ¹¹. Se emplearon elementos lineales y cuadráticos los cuales demandan menos gasto

|

computacional y son ampliamente usados en análisis de suelos y rocas. En la Ilustración 38 se observa la distribución nodal del elemento.

Ilustración 38. Distribución nodal del elemento C3D8



Fuente: manual referencia Abaqus

El elemento tipo cohesivo COH3D8 incorporado en el software abaqus permite representar el comportamiento físico de juntas adheridas, interfaces de unión y fracturas en rocas. La respuesta del elemento dependerá de la aplicación específica y las consideraciones del estado de esfuerzos inicial planteado en el modelo¹¹. En esencia es un elemento que permite modelar el efecto físico de tracción y separación entre dos medios, en este caso, entre dos elementos. A este elemento se le puede asignar cualquier material previamente definido y por tanto contar con las propiedades y tipo de análisis del material. Para el caso de este modelo, a los elementos cohesivos se les asignó el mismo tipo de material empleado para representar el material Roca, por tanto se emplean las características de este material, modelo de elasticidad, relación de Poisson y comportamiento elástico isotrópico.

Para lograr el objetivo de este trabajo donde es de vital importancia conocer el comportamiento del estado de esfuerzos en el pozo en función de la inclinación del pozo y las fracturas, se adicionó un análisis de comportamiento de falla para el elemento cohesivo que representa la fractura, con esto es posible incorporar un

|

mecanismo de falla al análisis deformacional y de esfuerzos en las fracturas. El criterio de falla seleccionado para incorporarle al elemento cohesivo fue el criterio de Morh Coulomb. Con esta incorporación se tiene entonces un elemento cohesivo con un modelo constitutivo elástico isotrópico con límite a la resistencia según el criterio de falla de Morh Coulomb. Este tipo de adición al elemento cohesivo nativo del software se ha empleado en varias publicaciones con un excelente ajuste en los modelos de simulación^{13, 14, 15}. Las características adicionales que incorpora el elemento son la cohesión y el ángulo de fricción interna complementados con los coeficientes de rigidez normal y cortante k_n y k_s respectivamente los cuales son determinados en función del espesor del elemento fractura a partir de las relaciones que se muestran en las ecuaciones 07 y 08

$$k_n = \frac{E}{t} \quad (\text{Ecuación 07})$$

Donde t es el espesor de influencia de la fractura y E es el módulo de Young de la roca circundante

El coeficiente de rigidez tangencial es definido por:

$$k_s = \frac{G}{t} \quad (\text{Ecuación 08})$$

Donde G es el módulo cortante de la de la roca contigua, siendo:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (\text{Ecuación 09})$$

El tamaño o la geometría seleccionada para el elemento cohesivo se determina a partir del cálculo sugerido por Bazant Z.P. en su trabajo¹⁶, donde define el tamaño o espesor del elemento como e , el cual está en función del modelo de elasticidad del material, la energía específica de fractura, y la resistencia a la tensión. Dicha relación se observa en la ecuación 10 y ecuación 11.

$$e = 0.08 * L_{ch} \quad (\text{Ecuación 10})$$

|

Donde L_{ch} es la longitud característica del material, dada por:

$$L_{ch} = EG_f/f^2 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde E representa el módulo de elasticidad, G_f la energía de fractura y f la resistencia a la tensión. Empleando las propiedades descritas para el material roca en el capítulo anterior se tiene un cálculo de 8mm de espesor para el elemento cohesivo. Cabe resaltar que según Goodman, R. E., Taylor¹³ la dependencia principal del comportamiento deformacional y de esfuerzos del elemento cohesivo o de la fractura es en función de las propiedades de falla del elemento, es decir, de la cohesión y del ángulo de fricción interna y no es dependiente del espesor del elemento. En la tabla 05 se presentan las magnitudes de propiedades empleadas en los elementos cohesivos

	Módulo de elasticidad E (kPa)	Coefficiente de Poisson $\nu(-)$	Cohesión c (kPa)	Angulo de fricción ϕ (°)
Roca	2.64E+07	0.305		
Fractura natural	2.64E+07	0.305	0	25

Tabla 05. Propiedades de la fractura o elemento cohesivo

4.6 PASOS DEL MODELO Y CREACIÓN DEL TRABAJO PRE ANÁLISIS

En el procedimiento de elaboración del modelo de Abaqus es importante establecer pasos o secuencias de análisis. Este procedimiento se refiere a la asignación de momentos (tiempos) en el pre análisis del modelo^{17,18}. Se generaron entonces para este modelo de simulación dos pasos definidos como, Geoestático y Perforación. En el primer paso, Geoestático, se asignan las condiciones de frontera y de carga descritas en los capítulos anteriores, este paso genera la simulación del estado de esfuerzos in

|

situ y de equilibrio estático en el bloque de roca. El paso posterior, Perforación, simula el tiempo en el cual se perfora el pozo y por tanto se retira el material perforado del bloque de roca primitivo. Para la simulación de esta operación de perforación, en el modelo la asignación de Pozo (ver capítulo asignación de geometrías) se retira del modelo, permitiendo que los esfuerzos se liberen y se genera el nuevo estado de esfuerzos circundante a la cara del pozo como efecto de la retirada de material en el bloque homogéneo de roca. Los dos pasos se ejecutan uno después del otro, inicialmente el Geoestático y posteriormente el de Perforación. Finalmente el trabajo del modelo se ejecuta en estos dos pasos y se finaliza con el análisis del mismo.

Descritos cada uno de los componentes del modelo de simulación (pasos del modelo, mallas y tipos de elementos, condiciones de frontera y cargas aplicadas, asignación de geometrías e instancias, asignación de materiales y dimensionamiento) se cuenta entonces con el modelo base para la simulación del comportamiento geomecánico de un pozo durante la perforación de formaciones laminadas o fracturadas. Los modelos inclinados emplean el mismo principio y concepto descrito en los capítulos anteriores con la diferencia solamente de la geometría del modelo base.

5. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN

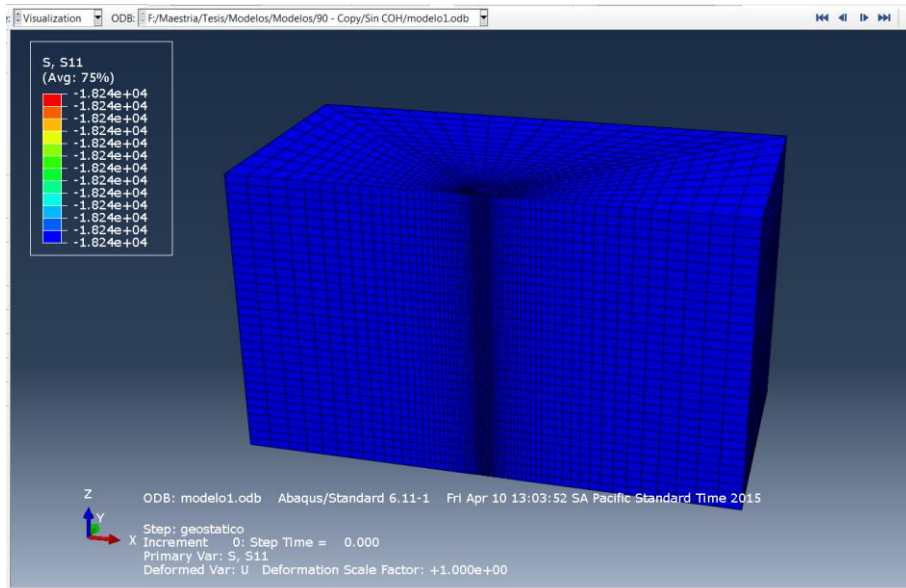
La validación de los resultados de los modelos planteados en el capítulo anterior se realiza mediante un análisis y comparación de diferentes alternativas de solución y verificando un ajuste con el caso real de perforación del pozo. Se validan los resultados evaluando conceptualmente el comportamiento de distribución de esfuerzos y deformaciones para cada uno de los modelos, siendo este paso acompañado de la comparación con los resultados de trabajos en publicaciones científicas y libros de geomecánica de perforación¹, a partir de los cual se podrá evaluar si el modelo de simulación numérica representa un comportamiento conceptual del fenómeno físico de perforación del pozo. Otra forma de validación consiste en comparar los resultados de esfuerzos y falla del modelo numérico con resultados obtenidos con otras herramientas de análisis analíticas como la desarrollada en el trabajo de investigación de Fernandez W¹⁹. Finalmente se pueden validar los resultados de simulación de los modelos con los datos operacionales o eventos operacionales ocurridos durante la perforación real del pozo y se verifica si los resultados de la simulación ajustan con la realidad del pozo. Estas diferentes formas de validación se convierten entonces en el fundamento para posteriormente hacer un análisis de los resultados y establecer la influencia del ángulo de ataque de perforación y de las orientaciones de las fracturas en la estabilidad geomecánica del pozo.

En la validación de los modelos se pretende verificar que los resultados de las simulaciones representen una realidad física típica en el comportamiento geomecánico de la perforación del pozo. Este comportamiento típico en el pozo perforado con o sin fracturas es ampliamente estudiado y descrito en libros y publicaciones^{20, 1, 4,5.}

El primer modelo a validar es de la perforación del pozo vertical con ángulo de ataque de cero grados (0°) sin fracturas. La primera validación del modelo corresponde a verificar si el estado de esfuerzos in situ es correcto y consecuente con las cargas aplicadas, previo a la perforación del pozo. Para verificarlo, se evalúan los esfuerzos de todo el bloque primitivo antes de hacer la simulación de perforación. En las imágenes

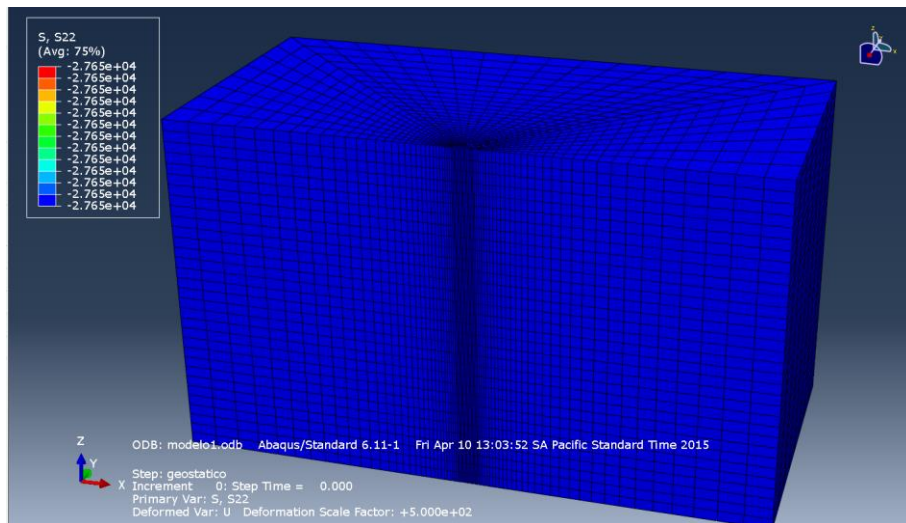
39, 40, 41 se observa el bloque primitivo sometido a los esfuerzos in situ en cada uno de sus ejes, X Y Z previa a la perforación del pozo.

Ilustración 39. Condiciones in situ de esfuerzos, eje X.



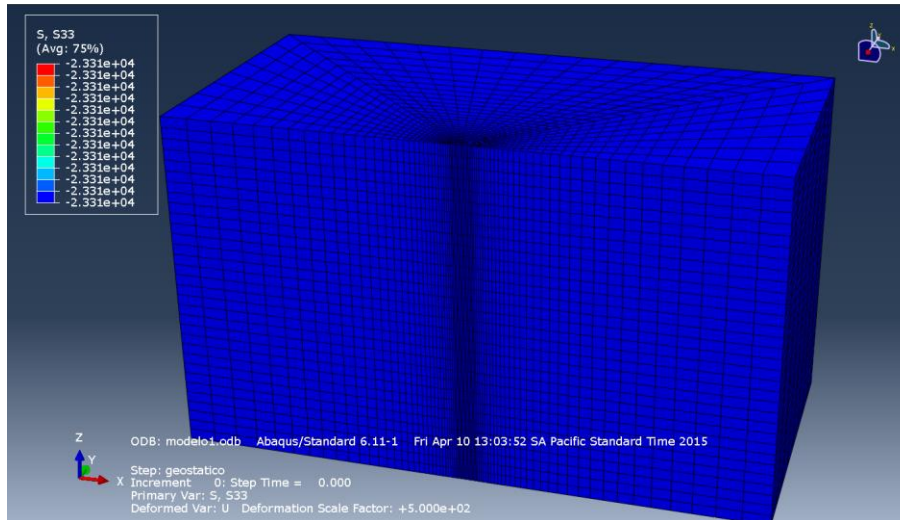
Fuente: el autor

Ilustración 40. Condiciones in situ de esfuerzos, eje Y.



Fuente: el autor

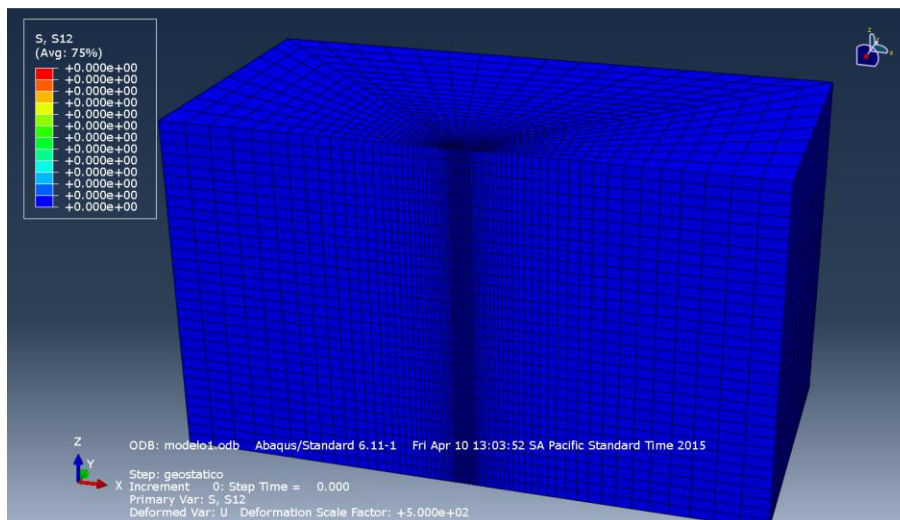
Ilustración 41. Condiciones in situ de esfuerzos, eje Z.



Fuente: el autor

Nótese en las imágenes que la magnitud de los esfuerzos corresponde a valores negativos, es decir, esfuerzos de compresión. Se emplea la nomenclatura de esfuerzos de compresión con magnitudes negativas y esfuerzos de tensión con magnitudes positivas. Adicionalmente se verifica que los esfuerzos cortantes internos sean cero como se puede observar en la ilustración 42.

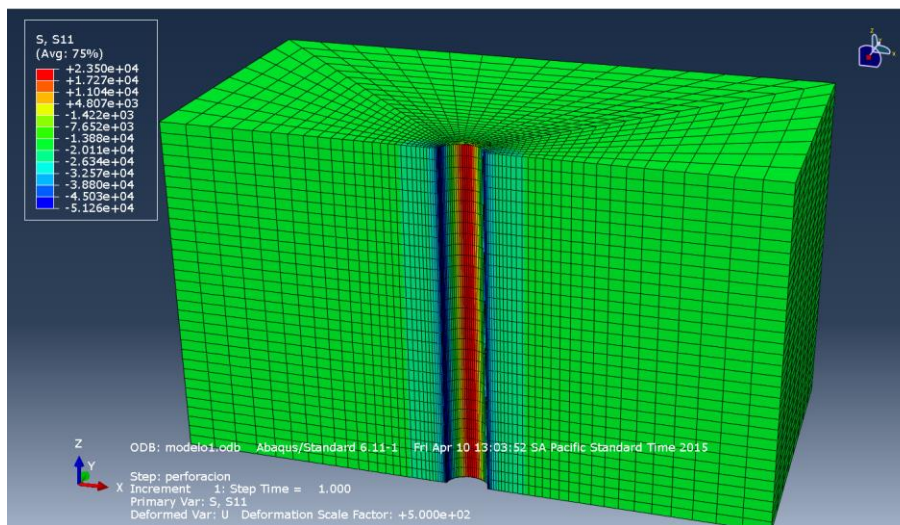
Ilustración 42. Condiciones in situ de esfuerzos de corte.



Fuente: el autor

Una vez iniciados los esfuerzos in situ se procede a retirar el material del pozo simulando la perforación del mismo y evaluando la redistribución de esfuerzos y sus magnitudes. Para el caso de régimen de esfuerzos contemplado en estos modelos donde el esfuerzo horizontal máximo es el esfuerzo mayor, seguido por el esfuerzo vertical y siendo el esfuerzo horizontal mínimo el de menor magnitud, se presenta una ovalización del hueco debido al esfuerzo mayor horizontal. Este fenómeno conlleva a generar una zona de esfuerzos de tensión y otra de compresión en la cara del pozo y se puede observar en la Ilustración 43 donde se evidencia la distribución de esfuerzos esperada según la teoría y artículos de conceptos básicos.^{20, 1, 4,5.}

Ilustración 43. Distribución de esfuerzos después de perforado el pozo

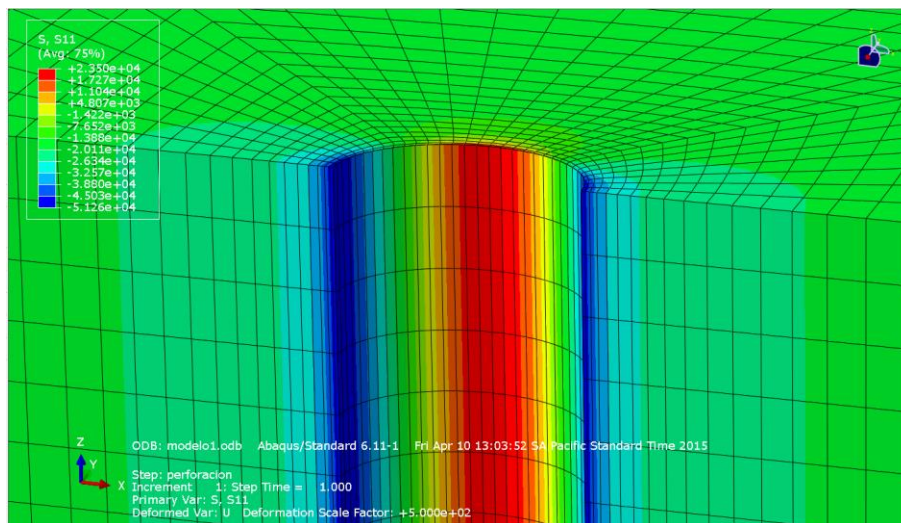


Fuente: el autor

Se observan entonces las dos zonas mencionadas, zona de esfuerzos a compresión (color azul) y zona de esfuerzos a tensión (color rojo), ambas en la cara del pozo, mientras la zona de color verde mantiene una magnitud de esfuerzo igual a las condiciones in situ, es decir, no se ve afectada por la perforación del pozo validando esto la selección de la geometría del pozo y su enmallado. La zona de esfuerzos a tensión generan en el pozo fallas o daño por tensión, mientras en la zona donde se concentran los esfuerzos de compresión se generan fallas por cortante también

llamadas Breakout. La redistribución de esfuerzos y las deformaciones del bloque primitivo de roca solo se ven afectadas en la región cercana al pozo, es decir, la afectación en los esfuerzos por la perforación del pozo tiene un límite de afectación y dicho límite se logra identificar en el modelo, simulando esto el comportamiento físico real durante la perforación. En la Ilustración 44 se observa un detalle de la zona de afectación de esfuerzos alrededor de la cara del pozo. Se identifica cuando el esfuerzo permanece constante y continúa igual hasta los extremos del bloque donde la afectación es nula. De igual forma se identifican las zonas de esfuerzo de tensión y compresión.

Ilustración 44. Detalle de la redistribución de esfuerzos en la cara del pozo

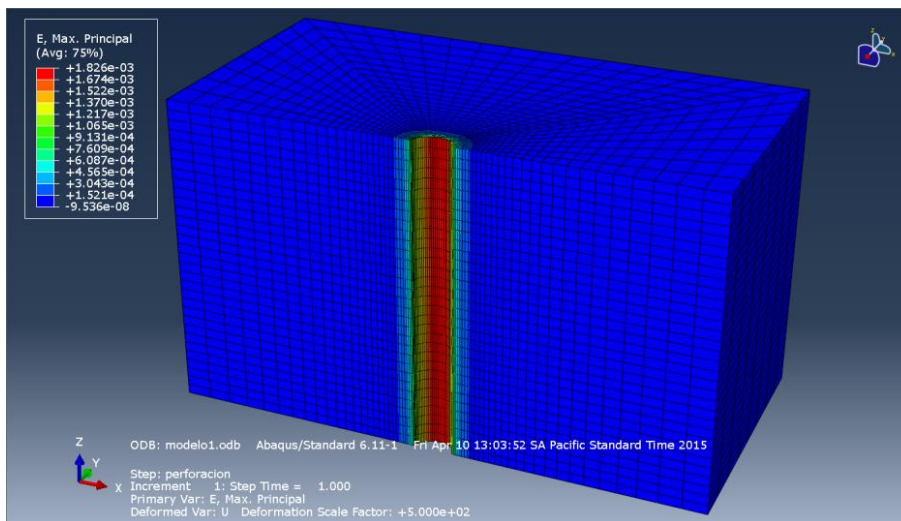


Fuente: el autor

Similar a la validación o verificación de comportamiento de redistribución de esfuerzos se puede analizar el comportamiento de las deformaciones y desplazamientos en el modelo. El análisis de deformación en la cara del pozo permite establecer si las magnitudes evidenciadas en el modelo se encuentran en el orden de deformaciones esperadas para la formación de roca simulada. Esta comparación de deformaciones se puede realizar con datos de pruebas de laboratorio en las cuales se miden directamente las deformaciones axiales y circunferenciales a las muestras de roca para posteriormente compararlas con las deformaciones evidenciadas en el modelo de simulación. Las ilustración 45 y 46 muestran el comportamiento de deformación en la

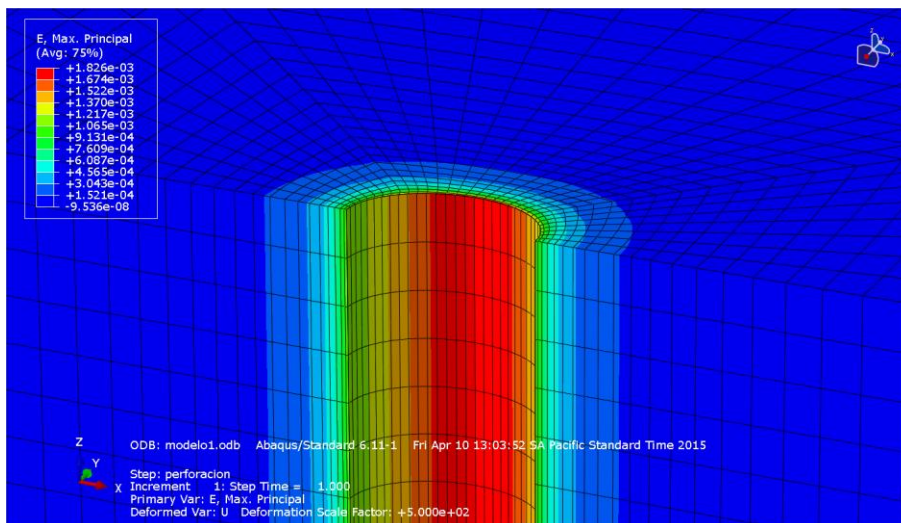
cara del pozo, en donde se puede observar una mayor deformación de la cara del pozo en el sector donde se concentran los esfuerzos de tensión. Las deformaciones, resultado del modelo, se encuentran en el orden de las medidas durante las pruebas de laboratorio, del orden de $2E-3$. Cabe resaltar que la comparación directa entre los valores numéricos y valores de laboratorio no es posible realizarla, dada las diferencias en las magnitudes y direcciones de los esfuerzos en las pruebas de laboratorio y en el modelo de simulación.

Ilustración 45. Distribución de deformación en la cara del pozo



Fuente: el autor

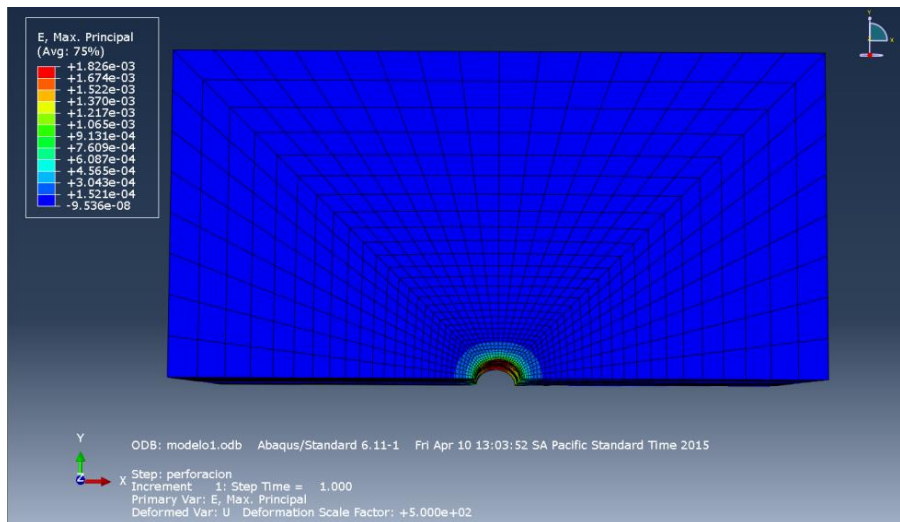
Ilustración 46. Detalle de la distribución de deformación en la cara del pozo



Fuente: el autor

El análisis de deformación en la cara del pozo permite también validar el tamaño del bloque primitivo y la malla asignada. El efecto de la deformación en la cara del pozo tiene un límite, el cual muestra hasta donde se ve afectada la cara del pozo por deformaciones. Después de este límite la deformación de la roca es cero ya que los esfuerzos están en equilibrio y no se tiene afectación alguna. En la Ilustración 47 se observa el límite de afectación de deformación en la cara del pozo y como el resto de geometría del bloque primitivo no se ve afectado por la deformación, validando esto el modelo y la realidad física simulada.

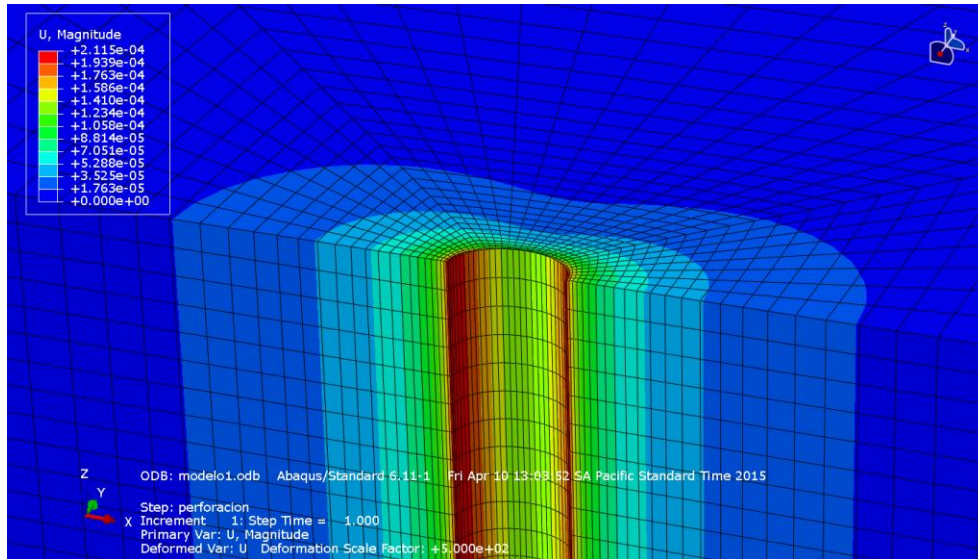
Ilustración 47. Límite de afectación de deformación en la cara del pozo.



El desplazamiento total generado en la cara del pozo permite, al igual que la deformación, establecer si el modelo se comporta acorde a la realidad física. Para esto, se pueden comparar las magnitudes de desplazamiento del modelo, con los desplazamientos soportados por muestras de roca ensayada en laboratorio antes de la falla. En este caso se tienen desplazamiento totales en la cara del pozo del orden de 0.2mm, valores del orden de los registrado en pruebas de laboratorio del orden de 0.17mm antes de la falla. Adicionalmente se correlaciona la zona de mayor desplazamiento con el sector de concentración de esfuerzos de compresión y de posible falla por compresión. La roca en términos generales, soporta mayores desplazamientos bajo cargas por compresión que las soportadas por cargas a tensión.

En la Ilustración 48 se presenta el campo de desplazamiento alrededor de la cara del pozo.

Ilustración 48. Distribución del Desplazamiento alrededor de la cara del pozo.

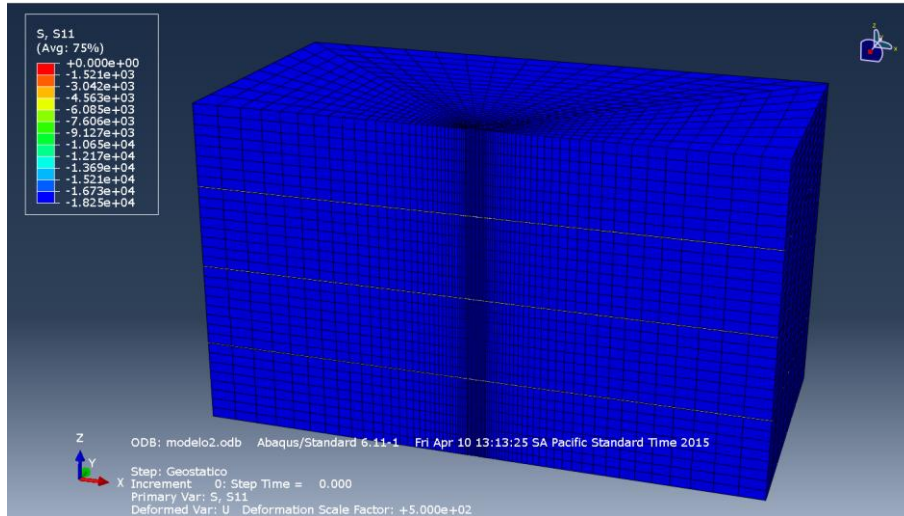


Fuente: el autor

Al igual que el análisis de deformación, se puede observar en la Ilustración 48 el límite de afectación del desplazamiento en la cara del pozo. El color azul profundo y constante se ve en el bloque primitivo lejano al pozo, mostrando una convergencia de desplazamiento sin afectación alguna.

El segundo modelo a validar es el de la perforación del pozo vertical con ángulo de ataque cero (0°) y presencia de fracturas. La primera validación del modelo corresponde a verificar si el estado de esfuerzos in situ es correcto y consecuente con las cargas aplicadas, previo a la perforación del pozo, similar a la validación realizada en el modelo de 0° sin fracturas. Para verificarlo, se evalúan los esfuerzos de todo el bloque primitivo antes de hacer la simulación de perforación. En las Ilustraciones 49, 50, 51 se observa el bloque primitivo sometido a los esfuerzos in situ en cada uno de sus ejes, x y z previa a la perforación del pozo.

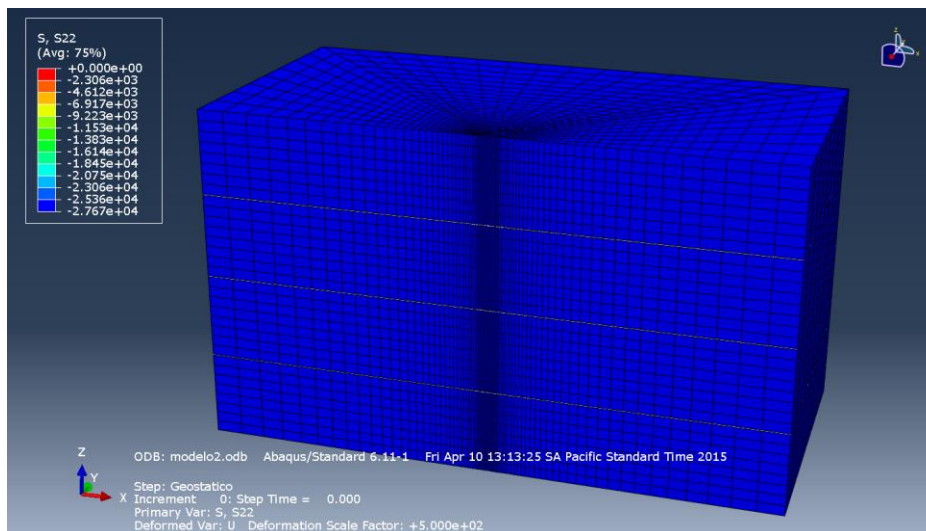
Ilustración 49. Estado de esfuerzo in situ en el eje X



Fuente: el autor

Se observa en la Ilustración la magnitud del esfuerzo en el eje x, esfuerzo horizontal mínimo, color azul, $-1.82E4$ kPa.

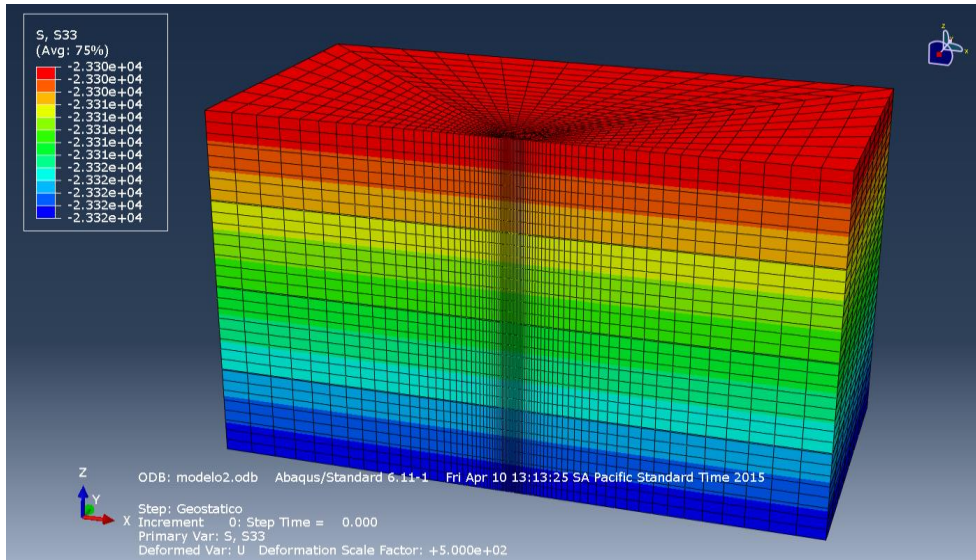
Ilustración 50. Estado de esfuerzo in situ en el eje Y



Fuente: el autor

Se observa en la Ilustración la magnitud del esfuerzo en el eje y, esfuerzo horizontal máximo, color azul, $-2.76E4$ kPa.

Ilustración 51. Estado de esfuerzo in situ en el eje Z

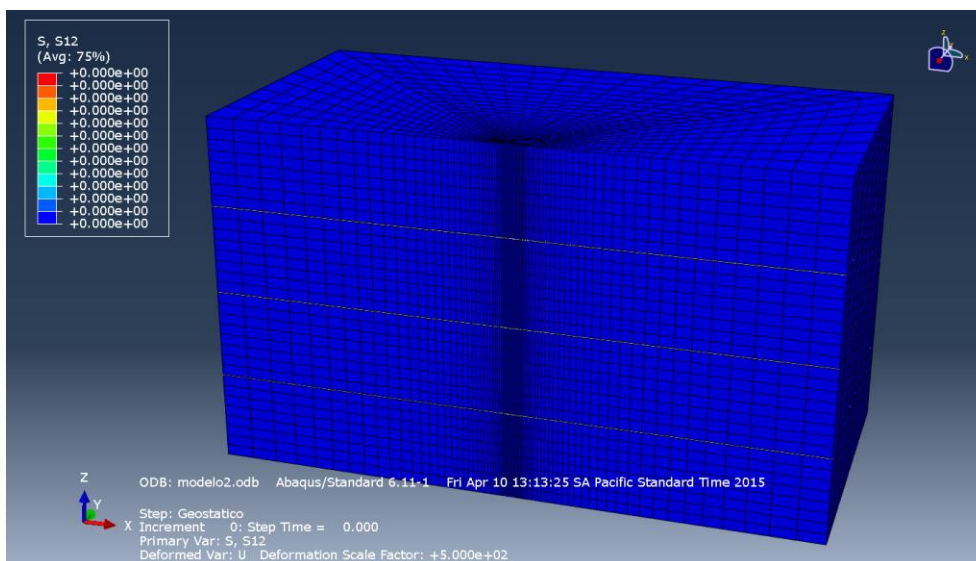


Fuente: el autor

Se observa en la Ilustración la magnitud del esfuerzo en el eje z, esfuerzo vertical, -2.33E4 kPa.

Adicionalmente se verifica que los esfuerzos cortantes internos sean cero como se puede observar en la ilustración 52.

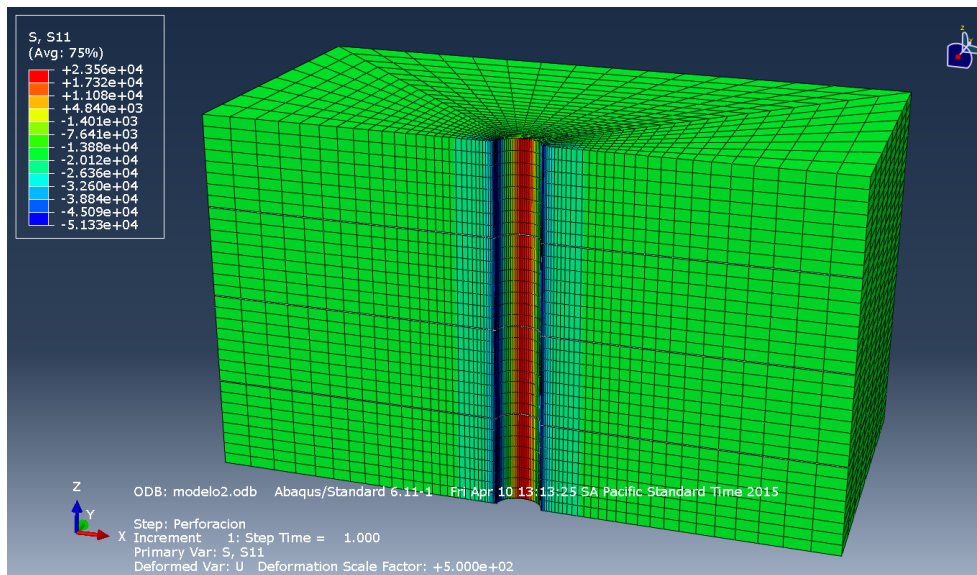
Ilustración 52. Estado de esfuerzo cortante in situ



Fuente: el autor

Una vez iniciados los esfuerzos in situ se procede a retirar el material del pozo simulando la perforación del mismo y evaluando la redistribución de esfuerzos y sus magnitudes. Para el caso de régimen de esfuerzos contemplado en estos modelos, se presenta una ovalización del hueco debido al esfuerzo mayor horizontal, presentándose una zona de esfuerzos de tensión y otra de compresión en la cara del pozo. Este fenómeno se puede observar en la Ilustración 53 donde se evidencia la distribución de esfuerzos esperada según la teoría y artículos de conceptos básicos.^{20, 1, 4,5.}

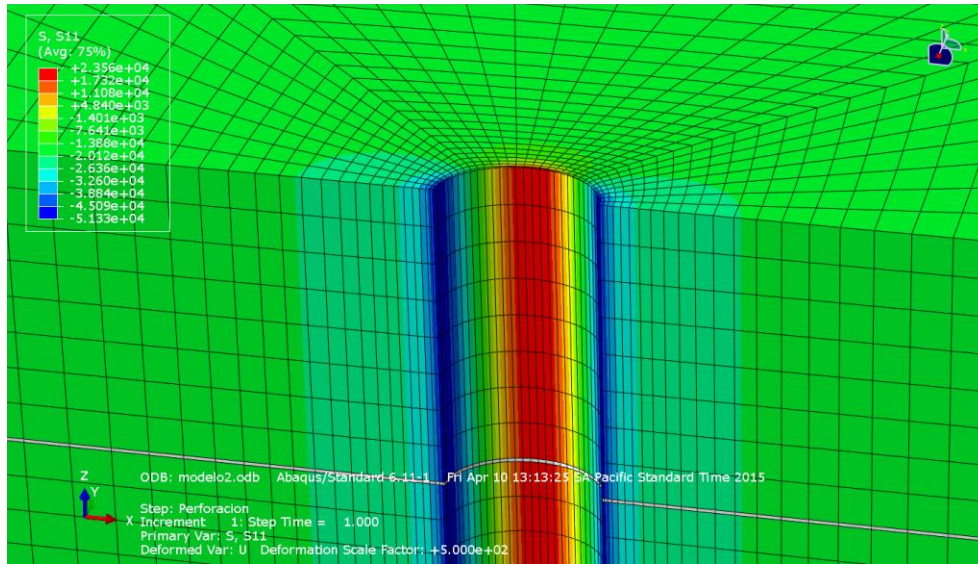
Ilustración 53. Distribución de esfuerzos después de perforado el pozo ángulo 0° con fracturas



Fuente: el autor

Similar al modelo anterior sin fracturas, la distribución de esfuerzos es consecuente con el comportamiento esperado: zonas de compresión en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo y zonas de tensión en la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Se observa en la Ilustración 54 el detalle de los esfuerzos y sus magnitudes.

Ilustración 54. Detalle de distribución de esfuerzos modelo 0° con fracturas



Fuente: el autor

Para el caso de los modelos con fracturas o planos de debilidad es importante realizar un análisis y validación adicional. Los elementos cohesivos seleccionados para simular las fracturas permiten establecer condiciones de falla, es decir, establecer cuando el elemento falla o supera la resistencia de la envolvente de falla del criterio seleccionado, en este caso Mohr-Coulomb. Para determinar esta relación de falla se emplean dos indicadores en el modelo. El primero es la relación de activación de falla, descrito en la ecuación 12

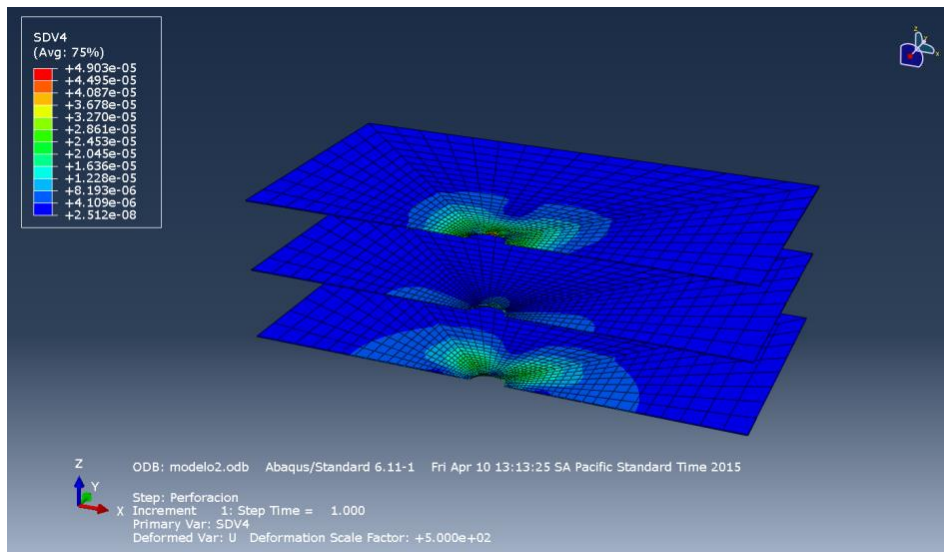
$$R = \frac{\tau_s}{\tau_{slip}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde τ_s es el esfuerzo de cizalla y τ_{slip} el esfuerzo de deslizamiento. Por tanto el valor R puede variar entre 0 y 1, donde 1 representa la falla del elemento. La convención para este valor R dentro del modelo de simulación será llamado SDV4.

El segundo indicador de falla o deformación plástica del elemento cohesivo es el esfuerzo de ruptura o de falla en el elemento. Este se denomina con la convención SDV5.

Se presentan entonces a continuación los resultados de esfuerzos y falla en los elementos cohesivos que representan las fracturas. La Ilustración 55 muestra una vista general de los tres planos de debilidad o fracturas incluidas en el modelo y la distribución de esfuerzos expresada con el coeficiente R.

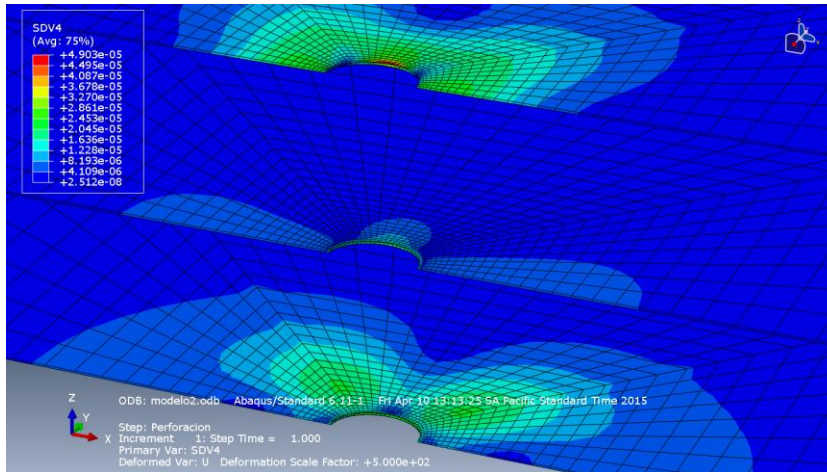
Ilustración 55. Distribución de esfuerzos expresado con coeficiente R en fracturas modelo 0°



Fuente: el autor

En la Ilustración 56 se puede apreciar el detalle de la distribución de esfuerzos en la cara del pozo en cada una de las fracturas simuladas. Se observan algunas zonas de mayor concentración de esfuerzos y posibilidad de falla sin llegar a magnitud igual a 1, indicador de falla en el material. Los valores máximos de R para este caso de fracturas y pozo perforado a cero grado son del orden de 4.9E-5

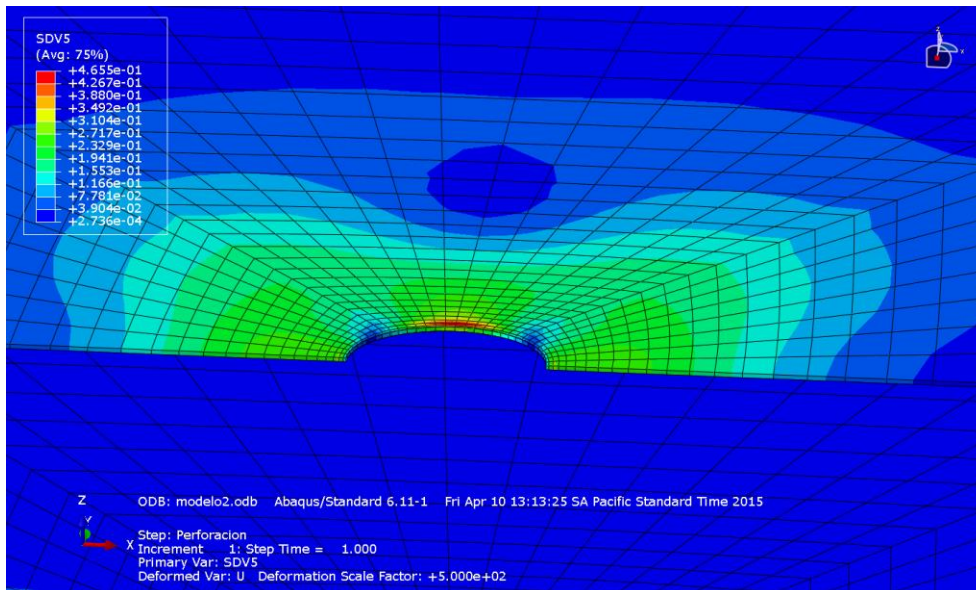
Ilustración 56. Detalle de la distribución de esfuerzos expresado con coeficiente R en fracturas modelo 0°



Fuente: el autor

El segundo indicador de posible falla o estado de esfuerzos es el esfuerzo de falla denominado SDV5. En la Ilustración 57 se observa la magnitud y distribución de dicho esfuerzo.

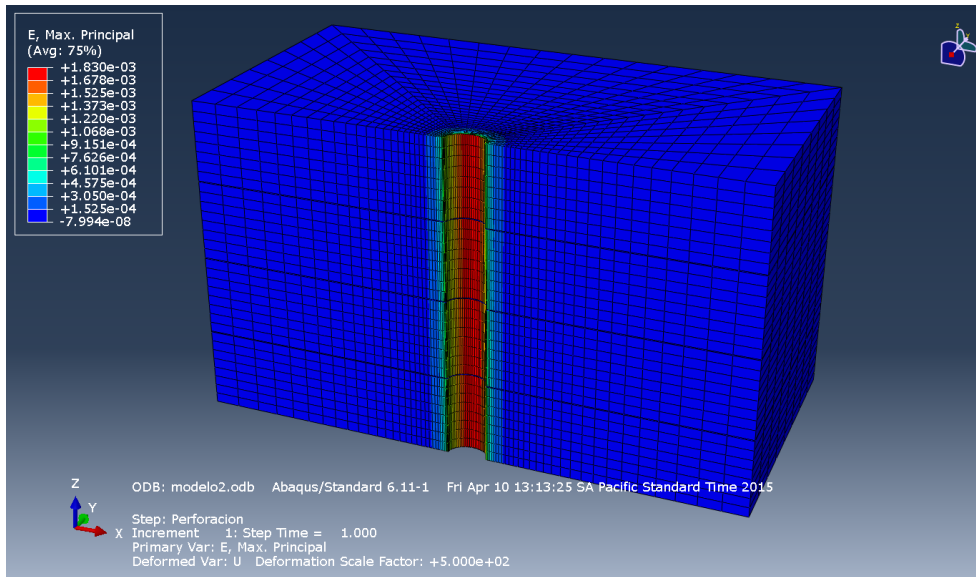
Ilustración 57. Distribución de esfuerzo de falla en elemento cohesivo modelo 0°



Similar al caso sin fracturas se realiza el análisis de deformación en la cara del pozo, lo cual permite establecer si las magnitudes evidenciadas en el modelo se encuentran en

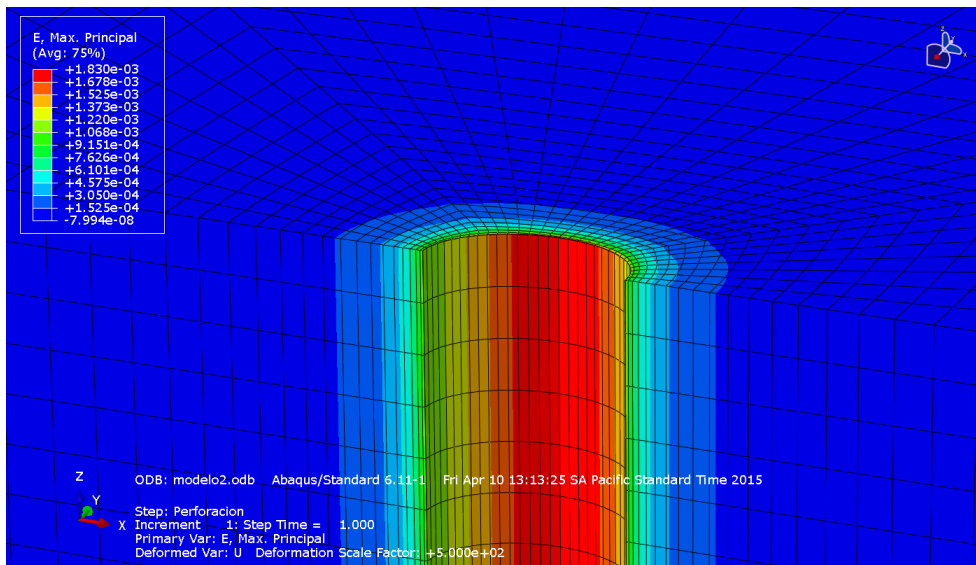
el orden de deformaciones esperadas para la formación de roca simulada. Las Ilustraciones 58 y 59 muestran el comportamiento de deformación en la cara del pozo. Se puede observar una mayor deformación de la cara del pozo en el sector donde se concentran los esfuerzos de tensión.

Ilustración 58. Estado de deformación modelo 0° con fracturas



Fuente: el autor

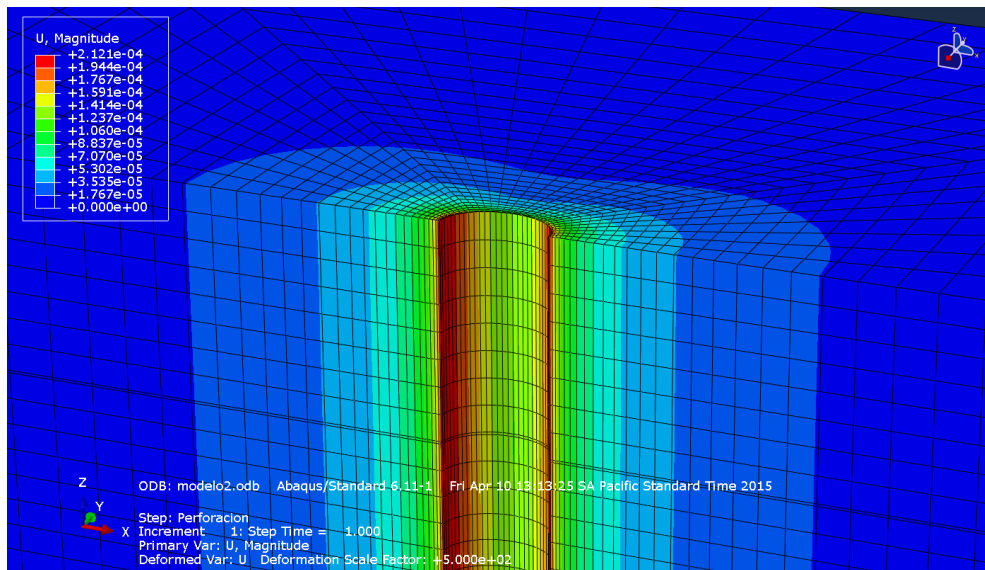
Ilustración 59. Detalle del estado de deformación modelo 0° con fracturas



Fuete: el autor

El desplazamiento total generado en la cara del pozo permite, al igual que la deformación, establecer si el modelo se comporta acorde a la realidad física. Es posible comprar las magnitudes de desplazamiento del modelo, con los desplazamientos soportados por muestras de roca ensayadas en laboratorio antes de la falla, de esta forma correlacionar la realidad física con los resultados del modelo. Para este caso se tienen desplazamiento totales en la cara del pozo del orden de 0.2mm, valores del orden de los registrado en pruebas de laboratorio del orden de 0.17mm antes de la falla. Adicionalmente se correlaciona la zona de mayor desplazamiento con el sector de concentración de esfuerzos de compresión y de posible falla por compresión. La roca en términos generales, soporta mayores desplazamientos bajo cargas por compresión que las soportadas por cargas a tensión. En la Ilustración 60 se presenta el desplazamiento alrededor de la cara del pozo.

Ilustración 60. Desplazamientos totales modelo 0° con fracturas

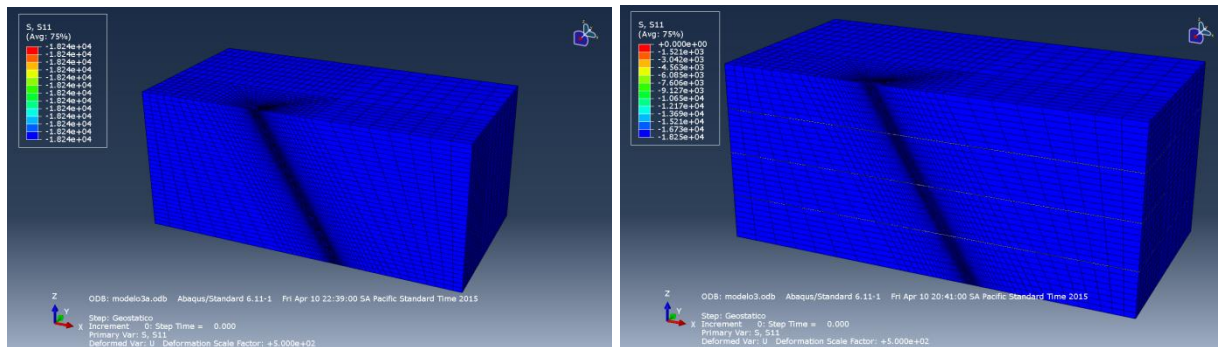


Fuente: el autor

Para la validación de los modelos inclinados a 30° y 50° se emplearon los datos operacionales y eventos de inestabilidad registrados durante la perforación del pozo real. Adicionalmente se pueden correlacionar los comportamientos de algunos modelos similares presentados en artículos científicos ^{4,5}.

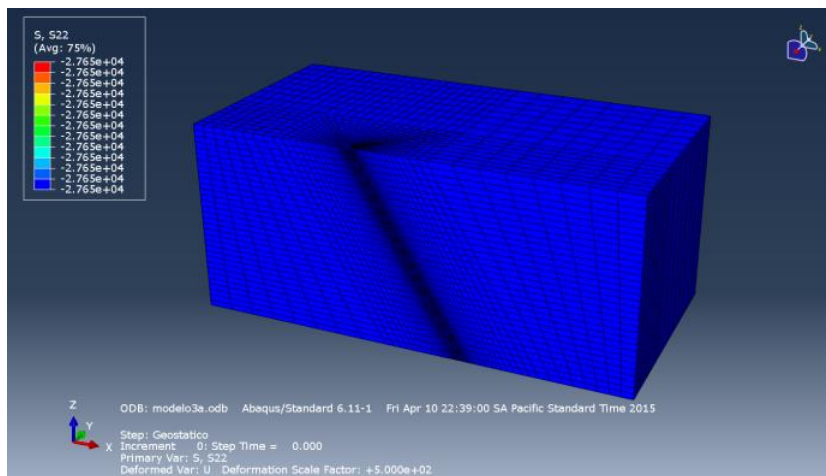
Al igual que el modelo de 0°, los modelos de 30° y 50° se inicializan los esfuerzos in situ verificando que estos sean estables y constantes antes de realizar la perforación del pozo. En las Ilustraciones 61, 62, 63 se puede observar el estado de esfuerzos in situ previo a la perforación del pozo en cada uno de los ejes o direcciones ortogonales x y z para cada una de las situaciones, con y sin fracturas respectivamente.

Ilustración 61. Estado de esfuerzos in situ dirección X modelo 30° sin y con fracturas



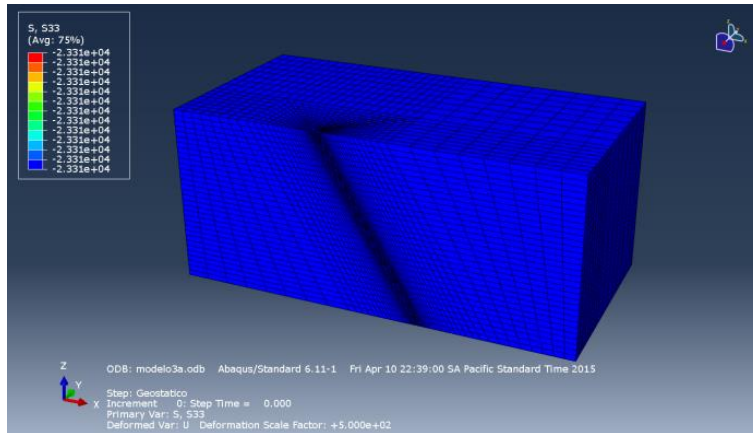
Fuente: el autor

Ilustración 62. Estado de esfuerzos in situ dirección Y modelo 30° sin fracturas



Fuente: el autor

Ilustración 63. Estado de esfuerzos insitu dirección Z modelo 30° sin fracturas

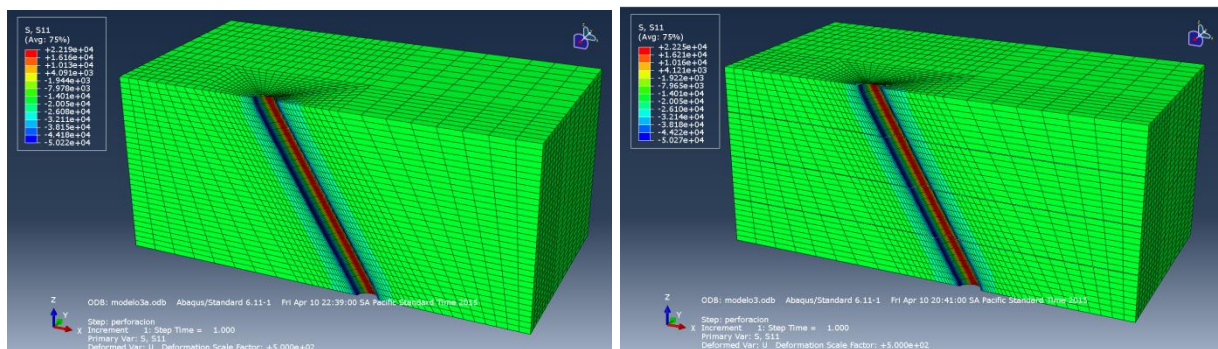


Fuente: el autor

El procedimiento de análisis de resultados para los modelos inclinados resulta similar al mostrado anteriormente para el modelo de inclinación cero grados, es decir se compara el estado de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos después de la perforación con los presentados en las publicaciones y con la data de operaciones buscando correlacionar y validar así el modelo de simulación.

Para el modelo de 30° se tiene entonces una distribución de esfuerzos como se presenta en la Ilustración 64 para el caso sin fracturas y con fracturas respectivamente

Ilustración 64. Distribución de esfuerzo modelo 30°

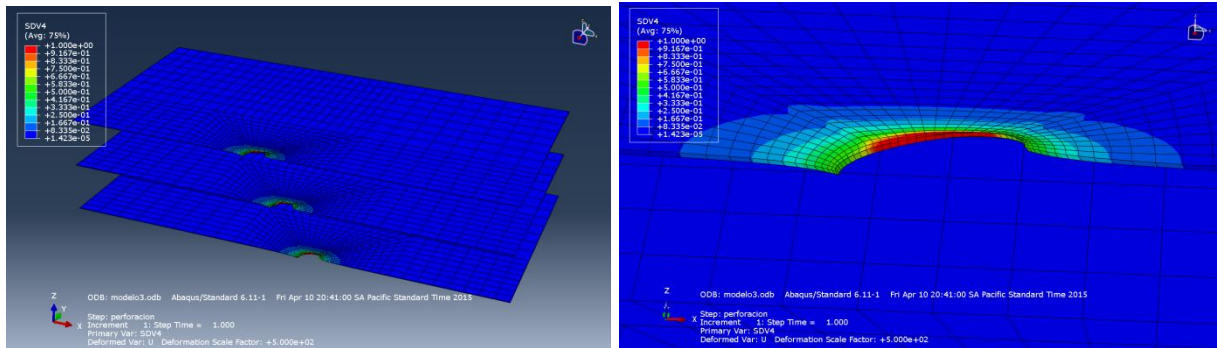


Se mantiene el comportamiento de distribución de esfuerzos de tensión y compresión en la cara del pozo en función del régimen de esfuerzo seleccionado, pero en esta

oportunidad el modelo de 30° muestra valores en magnitud que difieren en 980kPa menos que los valores de esfuerzo presentes en el modelo de la perforación a 0°.

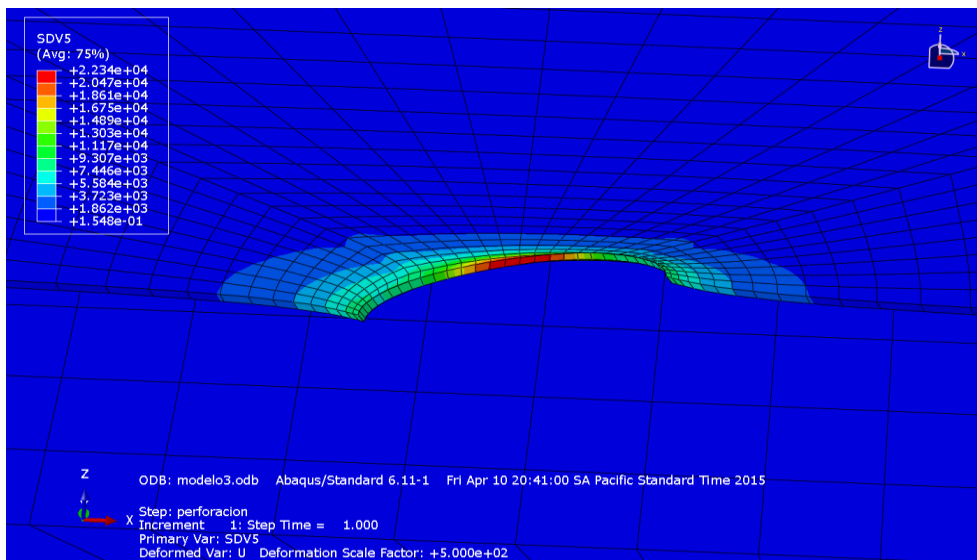
El análisis de esfuerzos en las fracturas se presenta similar al del modelo de 0°. La Ilustración 65 muestra el estado de esfuerzos en las fracturas para el modelo de 30° expresado con el coeficiente R

Ilustración 65. Distribución de esfuerzos en las fracturas expresadas por relación R modelo 30°



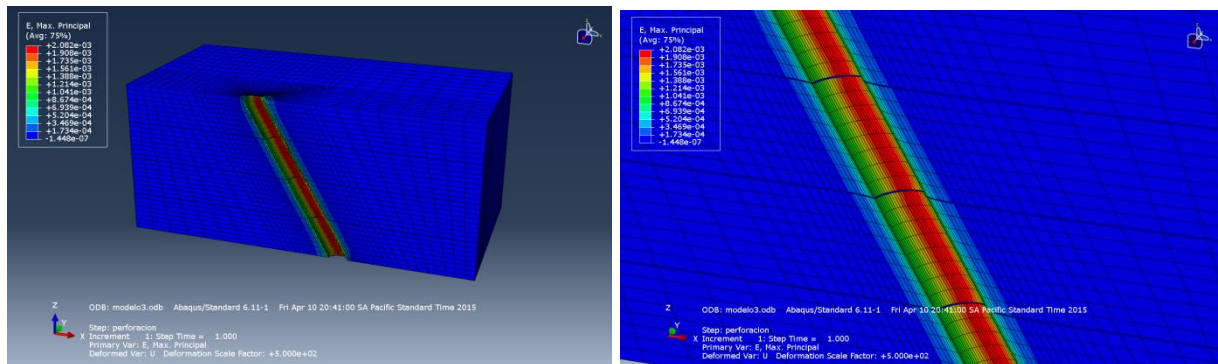
Otro indicador de estado de esfuerzos es el esfuerzo de falla denominado SDV5. En la Ilustración 66 se observa la magnitud y distribución de dicho esfuerzo.

Ilustración 66. Distribución de esfuerzo de falla en elemento cohesivo modelo 30°



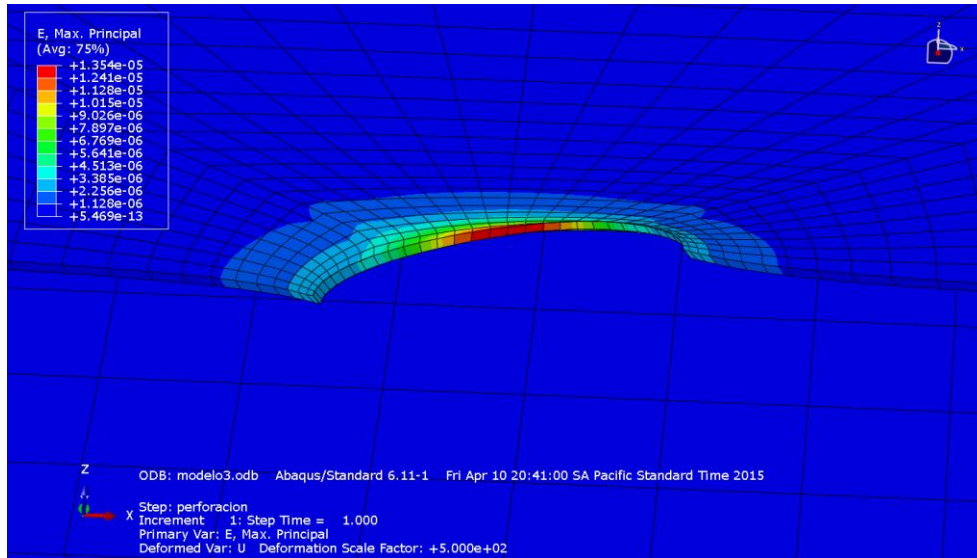
Para el caso de la deformación también se observan cambios entre las magnitudes de los modelos a 0° con fracturas y 30° con fracturas. Mientras el modelo de cero grados presenta deformaciones del orden de 1.83E-3, el modelo a treinta grados presenta deformaciones de 2.08E-3. En la Ilustración 67 se puede observar la deformación del pozo posterior a la perforación.

Ilustración 67. Estado de deformación modelo 30°



Para el caso de la deformación en las fracturas del modelo de 30° se evidencia la concentración de deformación en el sector de la cara del pozo paralela a la dirección del esfuerzo horizontal máximo, evidenciando mayores deformaciones en la zona sometida a tensión que las deformaciones en la zona sometida a compresión. La deformación sufrida en la roca, en la misma zona, resulta mayor a la presente en la fractura. Esto podría explicarse por el tipo de elemento que permite la simulación de la roca y de la fractura, mientras el elemento fractura tiene una menor dimensión, el elemento roca presenta una mayor magnitud. En la Ilustración 68 se puede observar el detalle de la deformación del elemento fractura.

Ilustración 68. Deformación en la fractura modelo 30°



Se observa en las imágenes anteriores de esfuerzos y deformaciones tanto de la roca como de las fracturas, cambios en las magnitudes. Estos cambios están asociados al ángulo de perforación del pozo. Para validar el comportamiento de estos resultados en el modelo de 30° se compararon las tendencias de magnitudes y direcciones de esfuerzos en la cara del pozo con lo presentados en las publicaciones^{4, 5, 22}. Para el caso de los esfuerzos se evidencia una disminución en la magnitud pero sin presentar cambio en la distribución y concentración en las zonas a tensión y compresión, como lo muestra la teoría. En cuanto a las deformaciones se evidencia un incremento en la deformación de la cara del pozo, asociada a la inclinación contra las fracturas, es decir, al ángulo de ataque. De igual forma comparando los índices R del modelo de 30° con el de 0°, se observa un leve aumento de magnitud en el caso a 30° presentándose zonas de falla en el elemento cohesivo de la fractura, entonces, la roca adyacente a la fractura empieza a presentar pequeñas zonas de falla del material. Estas zonas de falla en el material se pueden validar y correlacionar con los caving o derrumbes del pozo generados y evidenciados durante la perforación. Para el caso real del pozo perforado bajo las mismas condiciones del modelo de simulación, se observaron pequeños volúmenes de caving con tamaños y morfologías (forma de los derrumbes) asociados a la falla presente en el modelo de simulación, fallas por break out como se muestra en el capítulo de generalidades. Los volúmenes fueron del orden de 0.8 barriles por hora

|

perforando una sección de 8.5 pulgadas con tamaños de caving que oscilaron entre 5cm y 8cm con formas o morfologías tabulares lo cual es un indicativo de falla en la cara del pozo. Los tamaños evidenciados durante la perforación también se correlacionan con las deformaciones que muestra el modelo, no se pueden relacionar de forma lineal los tamaños de los caving con las deformaciones, pero si se espera que se presente una proporcionalidad, a mayores magnitudes de deformación, mayores tamaños y volúmenes durante la perforación del pozo. En la Ilustración 69 se observan muestras de los caving generados durante la perforación del pozo.

Ilustración 69. Cavings generados en la pared del hueco durante la perforación



Fuente: reporte diario de unidad de geología pozo A1

La metodología de análisis del modelo de 50° no difiere en lo presentado anteriormente en los modelos de 0° y 30°. Se presenta entonces el estado de esfuerzos in situ en el modelo previo a la perforación del pozo según lo contemplado. En las Ilustraciones 70, 71 y 72 se pueden observar los estados de esfuerzos en la dirección X, Y y Z para el modelo sin y con fracturas.

Ilustración 70. Estado de esfuerzos in situ en dirección X para el modelo 50°.

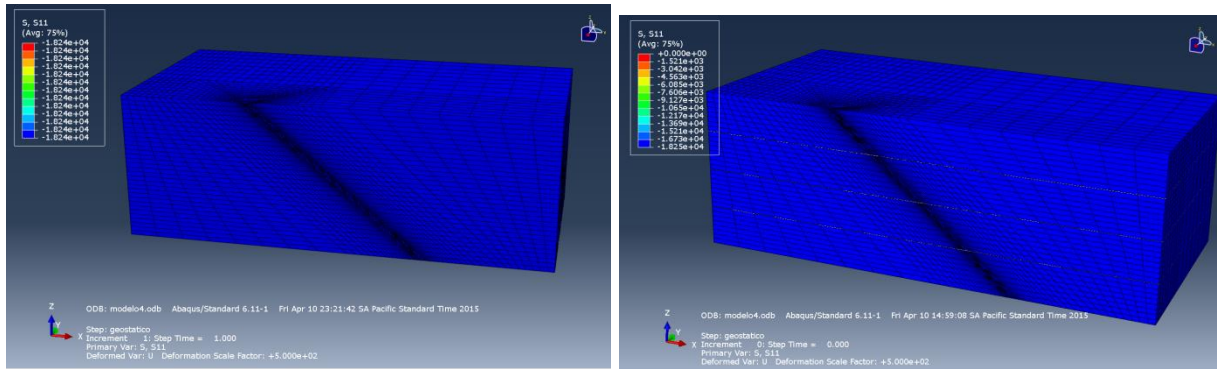


Ilustración 71. Estado de esfuerzos in situ en dirección Y para el modelo 50°.

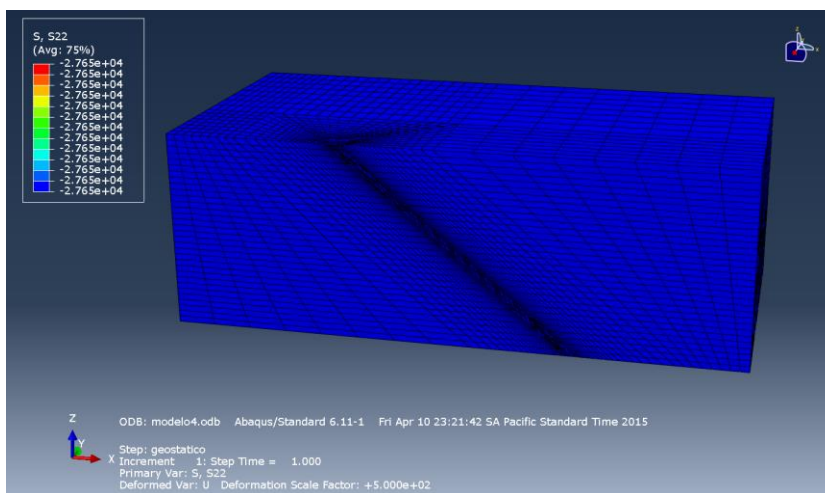
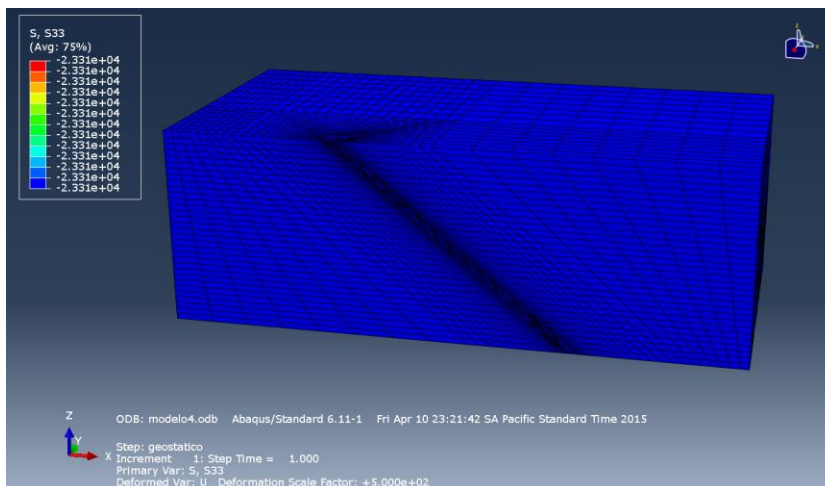
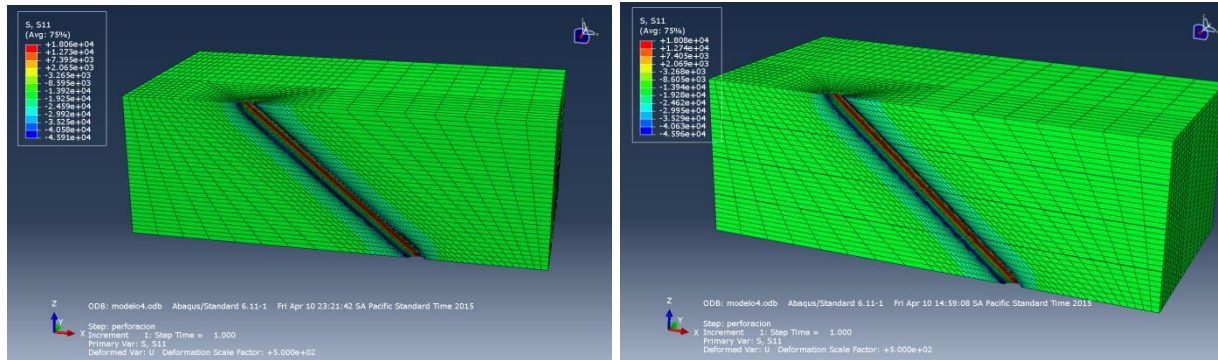


Ilustración 72. Estado de esfuerzos in situ en dirección Z para el modelo 50°.



El estado de esfuerzos posterior a la perforación para el modelo de 50° sin y con fracturas se presenta en la Ilustración 73

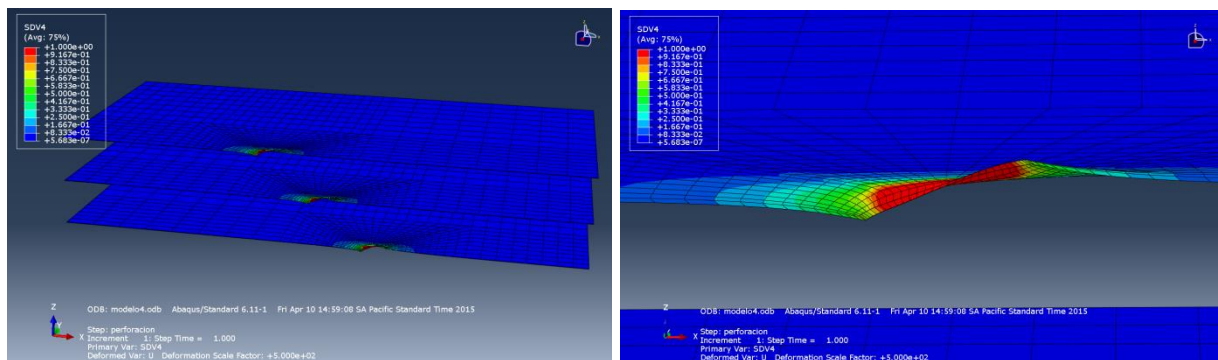
Ilustración 73. Estado de esfuerzos modelo 50° posterior a la perforación



Para este caso se mantiene el comportamiento de distribución de esfuerzos de tensión y compresión en la cara del pozo en función del régimen de esfuerzo seleccionado, pero se obtuvieron valores en magnitud que difieren a los presentes en los modelos de la perforación a 0° y 30°

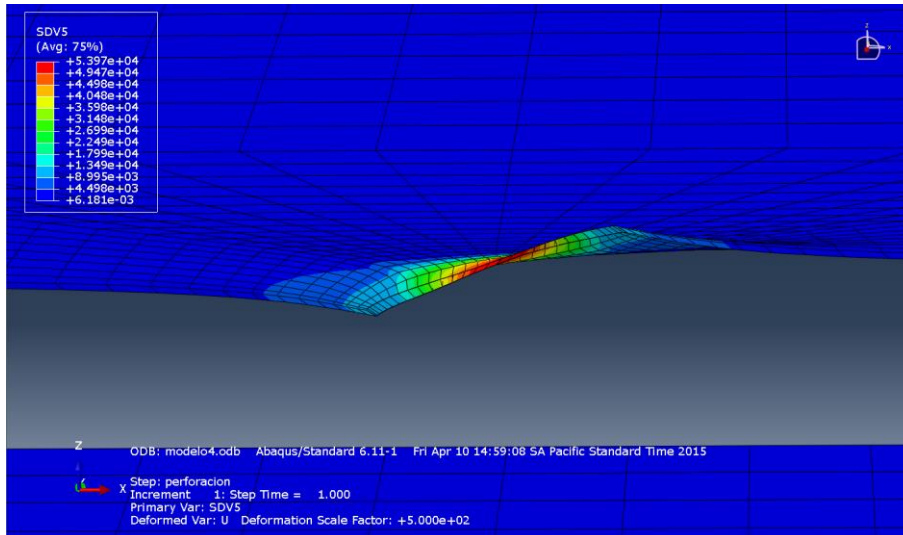
El análisis de esfuerzos en las fracturas se presenta similar al de los modelos de 0° y 30°. La Ilustración 74 muestra el estado de esfuerzos en las fracturas para el modelo de 50°

Ilustración 74. Estado de esfuerzos en las fracturas modelo 50°



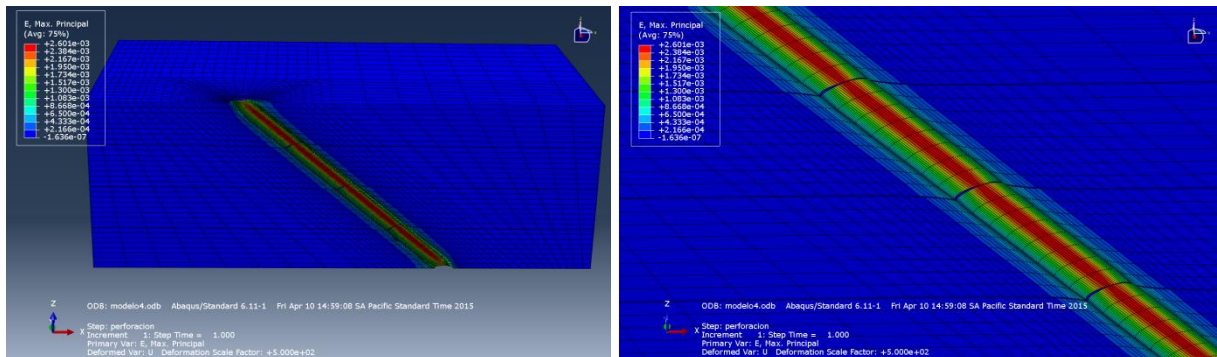
Otro indicador de estado de esfuerzos es el esfuerzo de falla denominado SDV5. En la Ilustración 75 se observa la magnitud y distribución de dicho esfuerzo.

Ilustración 75. Distribución de esfuerzo de falla en elemento cohesivo modelo 50°



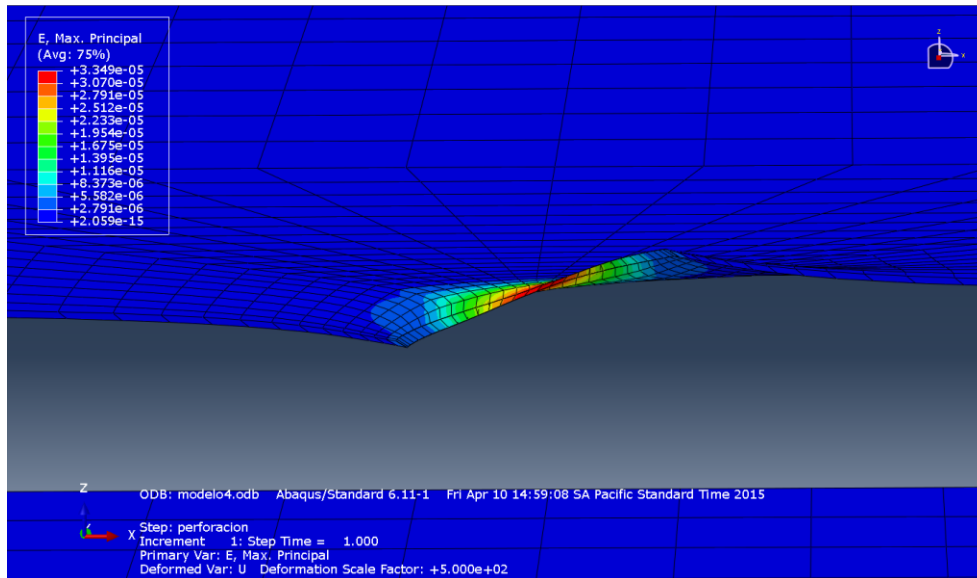
Para el caso de la deformación también se observan cambios entre las magnitudes de los modelos a 0° con fracturas y 30° con fracturas. En la Ilustración 76 se puede observar la deformación del pozo posterior a la perforación en el modelo de 50°.

Ilustración 76. Estado de deformación modelo 50°



Para el caso de la deformación en las fracturas del modelo de 50° se continúa observando la concentración de deformación en el sector de la cara del pozo paralela a la dirección del esfuerzo horizontal máximo, evidenciando mayores deformaciones en la zona sometida a tensión que las deformaciones en la zona sometida a compresión. La deformación sufrida en la roca, en la misma zona, resulta mayor a la presente en la fractura. En la Ilustración 77 se puede observar el detalle de la deformación del elemento fractura.

Ilustración 77. Estado de deformación en fractura modelo 50°



Nuevamente se evidencia un cambio en las magnitudes de esfuerzo, deformación tanto en la roca como en las fracturas comparadas con las magnitudes en los modelos de 30° y 0°. La diferencia de deformación entre el modelo de 30° y el de 50° es del orden del 12%. Estos cambios relacionados directamente con la inclinación del pozo y el ángulo de ataque. La validación del comportamiento deformacional del modelo a 50° se realiza nuevamente con el análisis de eventos ocurridos durante la perforación, como el análisis de los volúmenes de caving y sus morfologías y los parámetros operacionales durante la perforación del pozo. Para el caso del pozo real perforado con un ángulo de ataque de 50° bajo las condiciones de la simulación se presentaron volúmenes de caving del orden de hasta 1.5 barriles por hora y tamaños entre 5cm y 10cm con las mismas morfologías presentes en el caso del modelo a 30°. En esta ocasión durante la perforación del pozo, estos volúmenes mayores de caving se materializaron en un aumento de presión en la tubería y un intento de empaquetamiento durante la perforación. Estas situaciones operacionales que se presentaron durante la perforación del pozo real bajo las condiciones de ángulo de ataque de 50° en una formación fracturada o con planos de debilidad son frecuentes en las operaciones de perforación de pozos^{6, 7, 8, 9.}

6. RELACIÓN E INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ATAQUE EN LA ESTABILIDAD GEOMECÁNICA DEL POZO

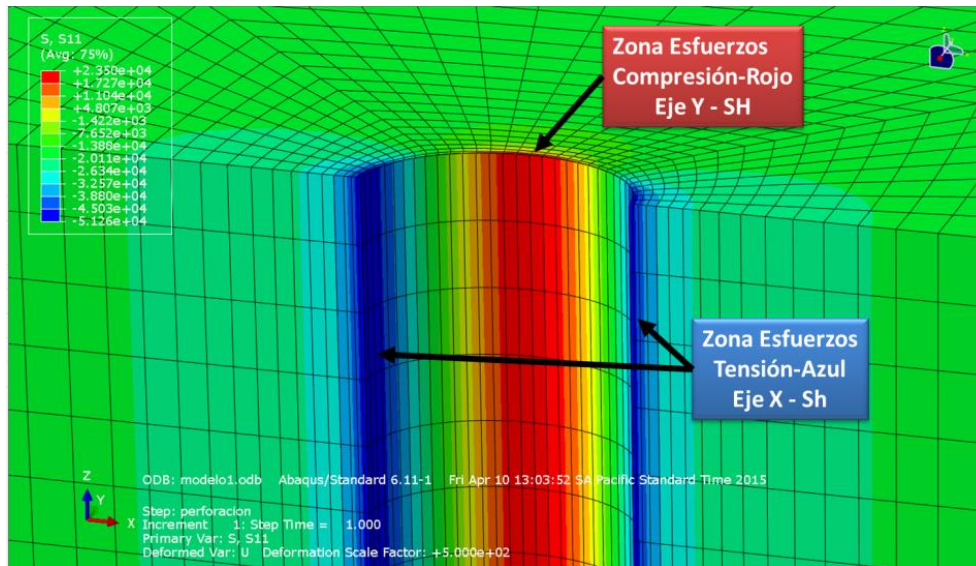
En este capítulo se realiza un análisis y comparación de los resultados de las seis simulaciones de perforación de un pozo en formaciones fracturadas para determinar las relaciones entre perforar el pozo con o sin fracturas naturales y determinar el comportamiento geomecánico en cada uno de los tres escenarios propuestos de simulación con ángulos de ataque a 0° 30° y 50° .

Con el fin de analizar secuencialmente los resultados y establecer relaciones el capítulo se divide en: relación de esfuerzos, relación de deformaciones y daño, y finalmente se determina la influencia del ángulo de ataque en la estabilidad del pozo.

6.1 RELACIONES DE ESFUERZOS

En el análisis de relación de esfuerzos se comparan los esfuerzos en la cara del pozo, sus orientaciones, magnitudes y diferencias entre los modelos para los elementos que representan la roca y para los elementos que representan la fractura. Tal y como se presentó en el capítulo anterior donde se observaba el comportamiento de esfuerzos en la cara del pozo, para el caso de los seis modelos y el estado de esfuerzos represente, en todos los modelos se tiene la misma orientación de los esfuerzos en la cara del pozo. Como se observa en la Ilustración 78, la cual es general para todos los casos analizados, se concentran esfuerzos de tensión en la zona paralela al esfuerzo horizontal máximo identificadas con el color azul, mientras se general zonas de concentración de esfuerzos a compresión en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo identificadas con color rojo.

Ilustración 78. Detalle de la distribución y orientación de esfuerzos en la cara del pozo.



Posterior al análisis de orientación o zonas de concentración de esfuerzos se compararon las magnitudes de los esfuerzos entre los diferentes modelos. La primera relación que se establece es la de esfuerzos entre modelos con fracturas o sin ellas para cada uno de los ángulos analizados. En la tabla 06 se presentan las magnitudes máximas de esfuerzos para cada uno de los modelos simulados. Se tiene entonces que la variación de las magnitudes de los esfuerzos entre los modelos no es significativa en cuanto a magnitud de esfuerzos se refiere. Se observa una diferencia entre los esfuerzos de tensión y compresión. Mientras la variación de los esfuerzos de tensión es casi nula, la variación de los esfuerzos de compresión es levemente mayor, del orden de hasta 100 kPa entre un modelo sin fracturas y el mismo modelo con fracturas. Este comportamiento lleva a concluir que la afectación del estado de esfuerzos no es altamente dependiente de la presencia de fracturas en la roca. Cabe resaltar que este análisis de magnitud aplica para los elementos de roca en el modelo y no para los elementos fracturas del modelo.

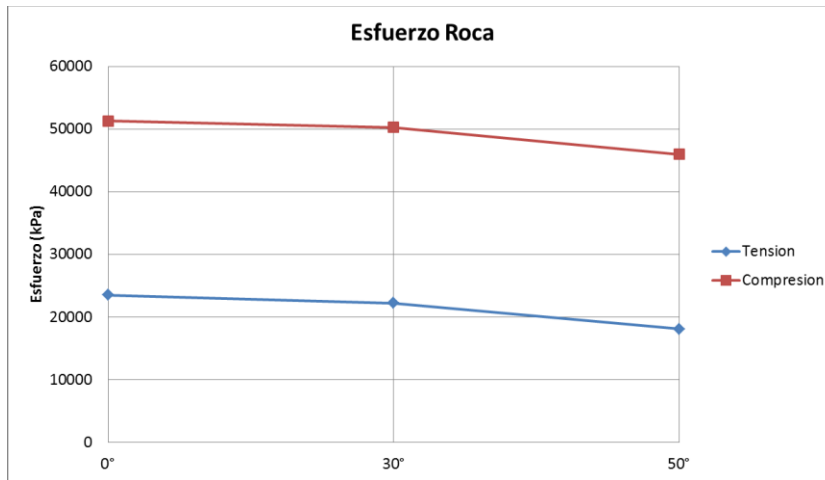
|

Relaciones de Esfuerzos Roca		
Modelo	Esf. Tension (kPa)	Esf. Compresión (kPa)
0° Sin Fracturas	23500	51200
0° Con Fracturas	23500	51300
30° Sin Fracturas	22190	50220
30° Con Fracturas	22250	50270
50° Sin Fracturas	18060	45910
50° Con Fracturas	18080	45960

Tabla 06. Relación de esfuerzos en roca de los modelos

La segunda relación que se establece es la de los esfuerzos en función de la orientación de la perforación y por tanto del ángulo de ataque. Se observa en la tabla 06 una disminución de hasta 5340 kPa entre los esfuerzos a compresión y de 5440 kPa en los esfuerzos a tensión del modelo a 0° y el modelo a 50°. Este comportamiento ocurre en los modelos con y sin fractura en una proporción similar. Estos esfuerzos nuevamente corresponden a la roca y no a la fractura. La disminución de esfuerzos puede estar asociada a una mejor redistribución en la cara del pozo por una mayor área efectiva debida a la inclinación del pozo. Si bien el diámetro del pozo es el mismo para los tres ángulos simulados, el área efectiva de la cara del pozo difiere entre los modelos, siendo el modelo de 50° el de mayor área efectiva en la cara del pozo, por tanto se evidencia una menor magnitud en el esfuerzo. En la Ilustración 79 se puede observar el comportamiento de los esfuerzos, de tensión y compresión de la roca, en función de la inclinación del pozo

Ilustración 79. Relación de esfuerzos de la roca en función de la inclinación



Las relaciones de esfuerzos descritas anteriormente corresponden a los elementos que simulan la roca matriz y no los elementos que simulan las fracturas. Las relaciones de esfuerzos en las fracturas se analizan en el capítulo de relaciones de falla o daño ya que los elementos fractura si cuentan con un análisis de criterio de falla y se pueden establecer zonas de falla de los elementos de la fractura.

Estas relaciones propuestas para el análisis están en función de los objetivos de este trabajo, a saber, determinar la influencia de del ángulo de ataque y las orientaciones de las fracturas en la estabilidad geomecánica del pozo. Se podrían establecer otras relaciones como los desplazamientos en cada uno de los modelos en función de las inclinaciones o escenarios adicionales de estudio con otros estados de esfuerzos in situ. Este tipo de análisis adicionales serán recomendados para trabajos futuros que brinden mayor entendimiento de la perforación de pozos en formaciones fracturadas.

Se concluye a partir de las relaciones anteriores que no existe una diferencia significativa en las magnitudes de los esfuerzos en la cara del pozo para los modelos con o sin la presencia de fracturas a una misma inclinación, mientras que si se evidencia un cambio en la magnitud de los esfuerzos según el ángulo de perforación del pozo.

6.2 RELACIONES DE DEFORMACIÓN

Similar a las relaciones establecidas en el capítulo de esfuerzos se desarrollan las relaciones de deformación. Inicialmente se compararon las magnitudes de las deformaciones entre los diferentes modelos. La primera relación que se establece es la de deformaciones entre modelos con fracturas o sin ellas para cada uno de los ángulos analizados. Se tiene entonces que la variación de las magnitudes de las deformaciones, al igual que las de los esfuerzos entre los modelos no es significativa en cuanto a magnitud se refiere. La variación de deformación es nula entre un modelo sin fracturas y el mismo modelo con fracturas. Este comportamiento lleva a concluir que la afectación del estado de deformación no es altamente dependiente de la presencia de fracturas en la roca. Cabe resaltar que este análisis de magnitud aplica para los elementos de roca en el modelo y no para los elementos fracturas del modelo. En la tabla 07 se presentan las magnitudes máximas de deformación para cada uno de los modelos simulados.

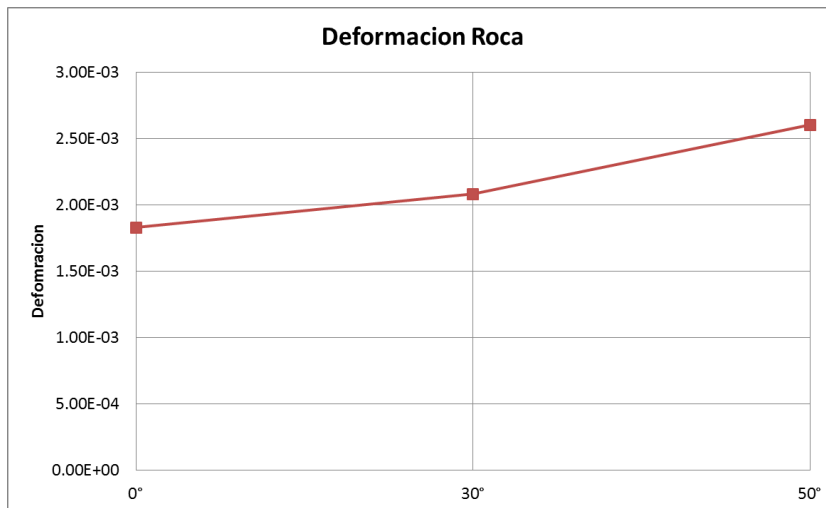
Relaciones deformación Roca	
Modelo	Deformación
0° Sin Fracturas	1.83E-03
0° Con Fracturas	1.83E-03
30° Sin Fracturas	2.08E-03
30° Con Fracturas	2.08E-03
50° Sin Fracturas	2.59E-03
50° Con Fracturas	2.60E-03

Tabla 07. Relación de deformación en roca de los modelos

La segunda relación que se establece es la de deformaciones en función de la orientación de la perforación y por tanto del ángulo de ataque. Se observa en este caso un aumento en la deformación con el incremento del ángulo de ataque. La deformación aumenta hasta $7.7E-4$ entre el modelo a 0° de menor deformación y el modelo de 50° de mayor deformación. Este aumento se observa en los modelos con y sin fractura en una proporción similar. Cabe recordar que estas deformaciones nuevamente

corresponden a la roca y no a la fractura. El aumento en la deformación en función de un ángulo de ataque mayor puede estar relacionado de forma similar a lo presente en los esfuerzos. En la Ilustración 80 se puede observar el comportamiento de la deformación de la roca, en función de la inclinación del pozo.

Ilustración 80. Relación de deformación de la roca en función de la inclinación



Se puede concluir que existe una relación directa entre el aumento de la deformación y el aumento en la inclinación del pozo y ángulo de ataque. A mayor ángulo de ataque mayor será la deformación sufrida en la roca de la pared del pozo. Esta deformación se asocia con el posible daño en la formación, altas deformaciones con llevan a una falla del material dada la naturaleza del mismo, las rocas son en términos generales frágiles y por tanto no soportan altas deformaciones llegando a la falla bajo deformaciones leves del orden de $5E-3$ a $10E-3$ ¹. Este fenómeno también se puede correlacionar en las pruebas de laboratorio realizadas en núcleos de roca, donde las deformaciones máximas para el tipo de roca simulada se encuentran del orden de $7E-3$.

Para el caso de las fracturas también se relaciona la deformación con la inclinación del pozo y el ángulo de ataque. Al igual que el fenómeno presente en la roca, la deformación en las fracturas también aumenta directamente con el aumento del ángulo de ataque. La diferencia en deformación de la fractura llega a ser del orden de $3.2E-5$ entre el modelo a 0° y el modelo a 50° . El efecto de aumento es progresivo entre el modelo de 0° y 30° pero se vuelve más severo entre el ángulo de 30° y 50° . En la tabla

08 se observa la relación de deformación de las fracturas con el ángulo de ataque del pozo.

Deformacion Fractura	
Modelo	Def
0° Con Fracturas	1.459E-06
30° Con Fracturas	1.354E-05
50° Con Fracturas	3.349E-05

Tabla 08. Relación de deformación en la fractura de los modelos

Se evidencia entonces una alta dependencia de la deformación con la inclinación del pozo o con el ángulo de ataque. Si bien las magnitudes de deformación de las fracturas son menores a la presentes en la roca, son correlacionables entre si y presentan la misma tendencia y comportamiento.

Se puede concluir que, al igual que lo sucedido en la roca, existe una relación directa entre el aumento de la deformación en las fracturas y el aumento en la inclinación del pozo y ángulo de ataque. A mayor ángulo de ataque mayor será la deformación sufrida en la fractura. Ésta deformación en la fractura se asocia directamente con el daño en la fractura y por ende en la formación.

6.3 RELACIONES DE FALLA O DAÑO

Para analizar y generar relaciones de daño en los modelos, se emplea como base el parámetro de relación de daño mencionado en los capítulos anteriores, denotado como SDV4. Adicionalmente se emplea el valor de esfuerzo de falla en la fractura llamado SDV5 y el tamaño o geometría del daño presente en la fractura. Se tiene entonces la relación de daño R (o SDV4) para cada uno de los modelos simulados de inclinación como se muestra en la ilustración 81. En el modelo de 0° para las fracturas aún no se presenta daño ya que el valor de R es menor a la unidad, mientras en los modelos de 30° y 50° si se presenta daño o falla en el elemento con un valor de R=1.

De forma similar se presenta el esfuerzo de falla en los elementos de la fractura llamado SDV5. En la Ilustración 82 se presentan los resultados para cada modelo. Es

consecuente el resultado con los resultados de coeficiente R, para el modelo de 0° no se registran esfuerzos de falla mientras para los modelos de 30° y 50° se presentan esfuerzos de falla que aumentan en función del aumento del ángulo de ataque.

Ilustración 81. Relación de daño o falla en los elementos de la fractura

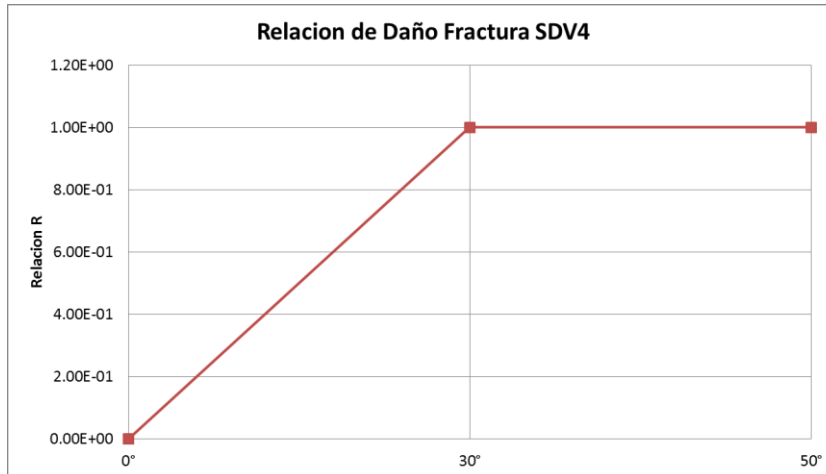
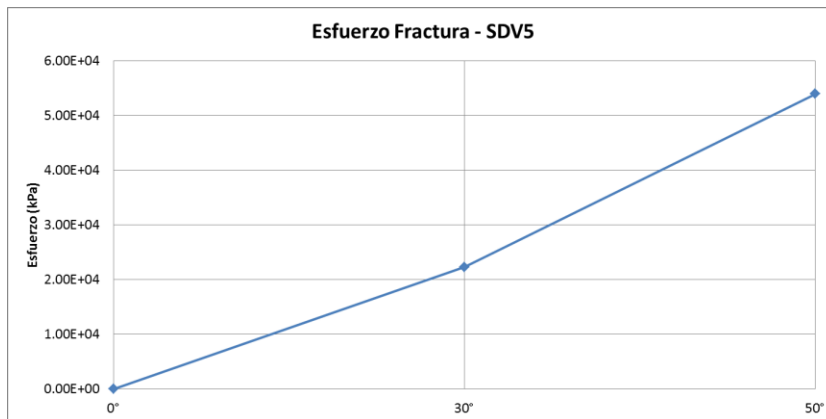


Ilustración 82. Esfuerzos de falla en los elementos de la fractura



El análisis de estos dos factores muestra claramente una alta dependencia con el ángulo de ataque, tanto de la falla en las fracturas como de los esfuerzos de falla en las mismas. A mayor ángulo de ataque, mayor es el esfuerzo de falla en la fractura. Se evidencia igualmente que se presenta falla en los modelos a 30° y 50°. Sin embargo, no es suficiente establecer que la falla ocurre en algunos elementos de la fractura. Para paliar esta situación se emplea el indicador de falla SDV4, el cual permite también identificar el área total fallada en la fractura (zona con valores de $R=1$). Se puede

observar en las imágenes 83 y 84 el tamaño del daño o tamaño de los elementos fallados de la fractura para cada caso a 30° y 50°.

Ilustración 83. Tamaño de elementos fallados en la fractura modelo a 30°

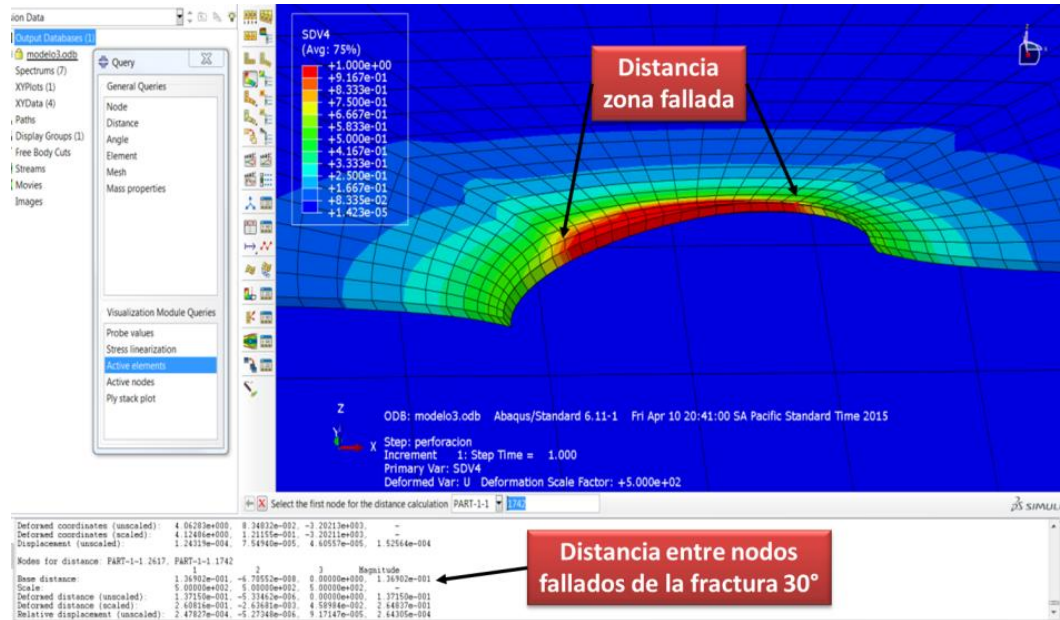
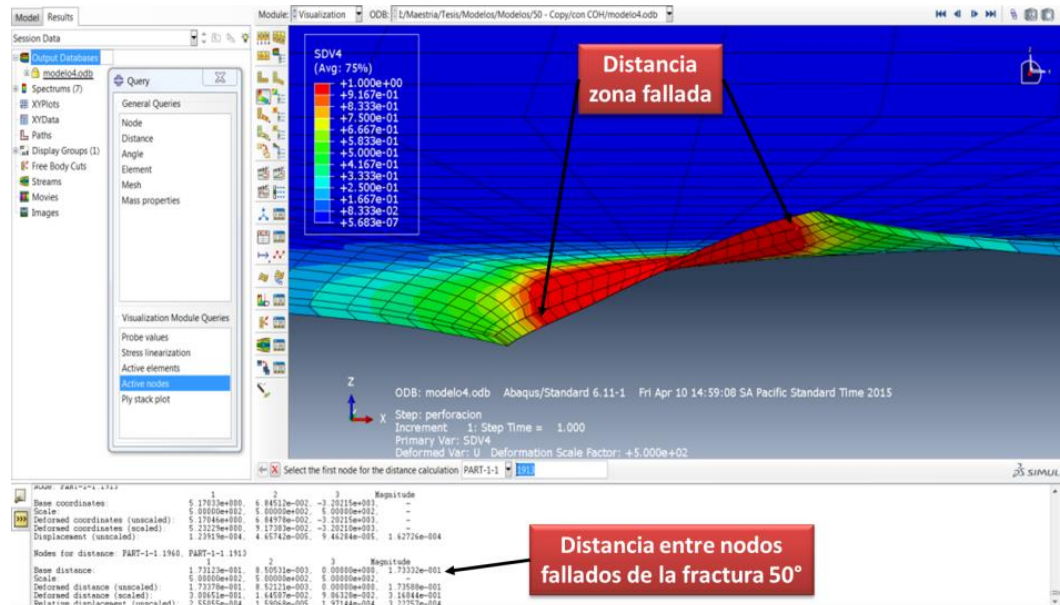


Ilustración 84. Tamaño de elementos fallados en la fractura modelo a 50°



En la tabla 09 se pueden apreciar los tamaños de las zonas falladas en las fracturas para cada uno de los modelos a 30° y 50°.

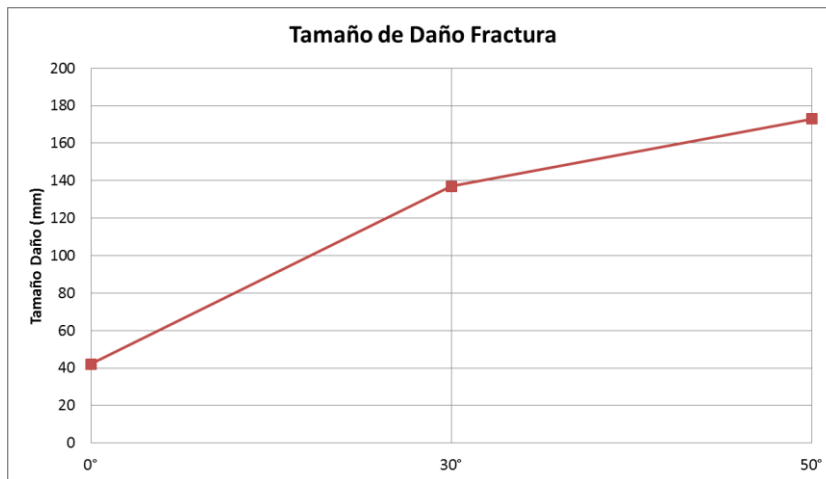
|

Tamaño de daño SDV4	
Modelo	Tamaño Daño (mm)
0° Con Fracturas	42
30° Con Fracturas	137
50° Con Fracturas	173

Tabla 09. Distancias de falla en las fracturas

En la Ilustración 85 se puede observar la relación de los tamaños de elementos fallados de las fracturas para cada uno de los modelos simulados.

Ilustración 85. Tamaño de daño en los elementos fracturas.



Es clara entonces la relación del daño y el tamaño del mismo con la inclinación del pozo. Tanto el daño como el tamaño del daño son directamente proporcionales a la inclinación del pozo o al ángulo de ataque.

6.4 INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ATAQUE EN LA ESTABILIDAD DEL POZO

A partir de los análisis y relaciones establecidas en el capítulo anterior se puede hablar de la influencia del ángulo de ataque en la estabilidad del pozo. Se observa que la inclinación del pozo, el ángulo de ataque y la presencia de fracturas en los modelos

|

modifican el estado de esfuerzos y deformaciones iniciales in situ de la roca. Se identifican relaciones y diferencias a partir del análisis del pozo tipo sin inclinación y sin fracturas con los pozos inclinados y con fracturas. Se puede entonces concluir que existe una influencia del ángulo de ataque en la estabilidad del pozo. Es importante tratar de determinar qué tipo de influencia genera el ángulo de ataque en la estabilidad del pozo. Los modelos de simulación descritos en este trabajo permiten establecer las magnitudes de los parámetros geomecánicos como la deformación, los esfuerzos y la falla del material; es posible entonces establecer comportamientos geomecánicos a partir de esos parámetros. Algunas conclusiones descritas anteriormente permiten establecer ese tipo de afectación o influencia en los parámetros geomecánicos, por ejemplo: se identificó que los esfuerzos disminuyen en proporción al aumento del ángulo de ataque, también que las deformaciones aumentan en función del aumento del ángulo de ataque, los esfuerzos de falla en las fracturas también presentan una tendencia a aumentar con el aumento del ángulo de ataque y finalmente los tamaños de las zonas falladas en los modelos son mayores cuanto mayor es el ángulo de ataque. Estas 4 premisas se relacionan todas con un mayor daño o falla en la cara del pozo, lo que significa una mayor inestabilidad del hueco al ser perforado inclinado y con fracturas y que adicionalmente este daño es proporcional a la inclinación del pozo o al ángulo de ataque con el que se perfora. Esta conclusión se valida y correlaciona de forma directa con los eventos sucedidos en los pozos perforados bajo estas condiciones descritas anteriormente. Los pozos que se perforan inclinados en formaciones fracturas con ángulos de ataque mayores a 30° presentan mayores problemas operacionales asociados a la inestabilidad del pozo. Sin embargo, es importante aclarar que la inestabilidad que se presenta en los pozos no es solo atribuida a la perforación en formaciones laminadas, si no que existen factores adicionales asociados a prácticas operacionales y propiedades del lodo de perforación que podrían acentuar la inestabilidad del pozo o en un mejor escenario mitigar y disminuir el escenario de inestabilidad del pozo.

7. CONCLUSIONES

Los modelos desarrollados permitieron simular el comportamiento geomecánico, relaciones esfuerzo, deformación y falla del pozo durante la perforación en una formación de roca con presencia de fracturas o planos de debilidad empleando el software de elementos finitos Abaqus®

La comparación de los resultados de simulación con los eventos reales de perforación y los casos presentes en la bibliografía permitieron validar las condiciones frontera planteadas para los modelos de simulación de perforación del pozo.

El análisis de los resultados de simulación permitió establecer que existe una relación o influencia del ángulo de ataque en la estabilidad geomecánica del pozo.

Se evidenció una relación directa entre el aumento del ángulo de ataque con el aumento de las deformaciones en la cara del pozo, aumento de los esfuerzos de falla y aumento en el tamaño del daño en la cara del pozo, reflejando estas relaciones una dependencia de los parámetros geomecánicos al ángulo de ataque y a la inclinación del pozo.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar el alcance de este trabajo realizando simulaciones adicionales con diferentes estados de esfuerzos, propiedades de roca y fractura que permitan ampliar el conocimiento del comportamiento geomecánico de un pozo perforado en formaciones fracturas o con presencia de planos de debilidad.

Se recomienda analizar la influencia del cambio de la propiedades mecánicas de la fractura en relación con las propiedades mecánicas de la roca circundante, con el fin de de determinar si la anisotropía de las propiedades mecánicas de la fractura son determinantes en la estabilidad geomecánica del pozo.

REFERENCIAS

Aadnoy, B. Hareland, G. Kustamsi, A. T, de Freitas. Hayes, J. En: Borehole Failure Related to Bedding Plane. American Rock Mechanics Association. 2009.

Abaqus® . Analysis User´s Manual. Volume V. Chapter 29.5. Cohesive Elements

Bazant Z.P. Planas J. En: Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle structures. CRC Press LLC. 1998. 640p.

Day, R. Potts, D. En: Zero thickness interface elements: numerical stability and application. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol. 18, n. 4, pp. 689-708. 2005.

Fernandez W. Modelamiento geomecánico bedding 3D para el diseño de trayectorias y pesos de lodo en pozos con complejidad estructural campo cupiagua. Trabajo de grado. Maestría en Geotecnia: Universidad Industrial de Santander. Facultad ingenierías fisicomecánicas. 2015

FJAER, E. HOLT, R. HORSRUD, A, RAAEN, A. RISNES, R. En: Petroleum related rock mechanics. 3ed. 2008.

Gallant, C. Zhang, J. Christopher, A. Wolfe, J. Talal, Al. Reese, M. En: Wellbore Stability Considerations for Drilling High-Angle Wells Through Finely Laminated Shale: A Case Study From Terra Nova. Society of Petroleum Engineers. 2007.

Goodman, R. Taylor, R. Brekke, T. En: A model for mechanics of jointed rock. Journal of the soil mechanics and foundations division, vol. 94, n. 3, pp. 637-659. 1968.

Jianguo Zhang, B. En: The impact of the shale properties on wellbore stability. Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. 2005. 260 p.

Rueda Cordero, J. De Oliveira, M. De Mesquita Roehl, D. En: Geological fault reactivation with discrete and distributed numerical models. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2013.

Santareli, F. Dahen, J. Baroudi, D. Sliman, H. En: Mechanism of borehole Instability in Heavily Fractured Rock Media. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1992.

Suarez, R. Sundqvist, J. Wesley, M. Sydney, G. En: 3D FEM simulations of layered rocks using orthotropic elastic symmetry and anisotropic strength improve predictions of wellbore failure and in-situ stress. American Rock Mechanics Association. 2004

Willson, S. Zoback, M. Moos, D. En: Drilling in South America : A Wellbore Stability Approach for Complex Geologic Conditions. Society of Petroleum Engineers Inc. 1999

Wu, B. Tan, C. P. En: Effect of Shale Bedding Plane Failure on Wellbore Stability – Example from Analyzing Stuck-Pipe Wells. American Rock Mechanics Association. 2010.

Yamamoto, K. Shioya, Y. Uryu, N. En: Discrete Element Approach for the Wellbore Instability of Laminated and Fissured Rocks. Society of Petroleum Engineers Inc. 2002.

|

Zhou, M. Tang, X. Wu, B. Chee, T. En: Comprehensive Geomechanics Study Helps Mitigate Severe Stuck Pipe Problems in Development Drilling in Bohai Bay, China. International Petroleum Technology Conference. 2009