

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN POZOS DE PETRÓLEO VERTICALES
USANDO ELEMENTOS FINITOS.**

**OCTAVIO DE JESÚS BONETT AVENDAÑO
YEISON FERNANDO VILLAMIL FRANCO**

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

2013

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN POZOS DE PETRÓLEO VERTICALES
USANDO ELEMENTOS FINITOS.**

**OCTAVIO DE JESÚS BONETT AVENDAÑO
YEISON FERNANDO VILLAMIL FRANCO**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

DIRECTOR

Esp. César Augusto Pineda Gómez

Docente UIS

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

2013

DEDICATORIA

A Dios, en primera medida agradecerle a Él, quien me ha dado todo y la guía para lograr las cosas que me propongo.

De igual forma a mi mamá, la MAU, a mi papá que con su terquedad me apoyó a mantenerme siempre firme en esta travesía.

Agradecerle al Ingeniero César Pineda puesto que sin él la verdad nunca hubiese empezado a estudiar esta carrera.

Al ingeniero Fernando Calvete y todo el Cartel, quienes me han dado su apoyo y conocimientos para avanzar como persona.

Por último a todas aquellas personas que intervinieron de alguna y otra forma en este proceso, ya sea haciéndome el almuerzo o simplemente sacando una copia para los famosos laboratorios de física. A todos muchas gracias.

Le dedico este logro a mi abuela Ani, gracias vultico de huesos tu ñeco sigue adelante."

OCTAVIO BONETT.

DEDICATORIA

A Dios, en primera instancia, por darme la vida, y por ser el guía para que todas estas cosas y todos mis sueños se hagan realidad.

A mi padre Fernando, por ayudarme y ser mi compañía cada día en todo este tiempo de carrera y mi bastón para seguir luchando por lo que quiero.

A mi madre Rubiela por ser siempre mi mejor amiga y estar siempre pendiente de mi, en todas las cosas, por sus oraciones y por siempre creer que las cosas las iba a lograr, gracias madre.

Al ingeniero Cesar Pineda, por su incondicional apoyo.

A mi novia Cinthya Arias por ser mi compañía, desde que nos conocimos y estar siempre pendiente de todas las cosas que sucedían en mi vida.

A toda mi familia por confiar en mí y ser parte de todas las locuras y procesos desde niño.

A mis amigos Jóvenes en Plenitud a cada uno de ellos, gracias por su apoyo incondicional.

YEISON VILLAMIL.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos por contribuir de manera directa a mi formación profesional.

Al Ingeniero Cesar Pineda, por su apoyo incondicional, y sus buenas palabras a cada momento, para aconsejarnos y lograr todas las cosas de una mejor manera.

Al Ingeniero Reinel Corzo, por su tiempo y apoyo y por estar siempre pendiente de todo el proceso del proyecto.

A todos nuestros compañeros de la Universidad Industrial de Santander, con los cuales se pudo compartir todo este tiempo, aprendiendo de ellos y haciendo bonitas amistades.

CONTENIDO

INTRODUCCION	20
CAPITULO I: GENERALIDADES DE LA GEOMECANICA EN RELACIÓN CON POZOS VERTICALES	22
1.1. ESTABILIDAD DE POZO	22
1.2. GEOMECÁNICA	24
1.3. CONSTRUCCION DEL MODELO GEOMECÁNICO	24
1.4. DESCOMPOSICION DE ESFUERZOS	25
1.5. ELASTICIDAD.....	29
1.6. ANÁLISIS DE ESFUERZOS	29
1.6.1. Esfuerzos principales	29
1.6.2. Circulo de Mohr	30
1.7. ANÁLISIS DE DEFORMACION	32
1.8. POROELASTICIDAD.....	35
1.8.1. Concepto de esfuerzo efectivo	36
1.9. PROPIEDADES MECANICAS DE LA ROCA.....	36
1.9.1. Relación de Poisson	38
1.9.2. Módulo de corte.....	38
1.9.3. Módulo de Young	39
1.9.4. Resistencia de la roca.....	40
1.9.5. Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)	40
1.9.6. Resistencia a la tensión T_o	40
1.9.7. Cohesión S_o	41
1.10. ESTABILIDAD: ANTES DEL POZO	41
1.10.1. Condiciones in situ antes de realizar el pozo.	41
1.10.2. Presión de poro (P_o)	42
1.10.3. Esfuerzos terrestres in situ.....	43
1.10.3.1. Esfuerzo debido al manto de recubrimiento (S_v):	43
1.10.3.2. Esfuerzo horizontal S_h , SH :.....	44
1.10.3.3. Esfuerzos efectivos:	44
1.10.3.4. Esfuerzo efectivo debido al manto de recubrimiento:	45

1.10.3.5. Esfuerzo efectivo horizontal σ_h, σ_H :	45
1.10.4. Resistencia de las rocas	46
1.10.4.1. Esfuerzo cortante y ruptura cortante o por cizallamiento:	47
1.10.4.2. Falla por tensión:	50
1.11. ESTABILIDAD: DESPUES DEL POZO	50
1.11.1. Estado de esfuerzo cerca al pozo	50
1.11.2. Esfuerzo tangencial (σ_θ)	51
1.11.3. Esfuerzo axial (σ_z)	52
1.11.4. Esfuerzo radial (σ_r)	53
1.11.5. Estabilidad mecánica	53
1.11.6. Dirección e inclinación del hueco:	56
CAPITULO II: CRITERIOS CONSIDERADOS EN LA ESTABILIDAD DE POZO.	58
2.1. CRITERIOS DE LOS MODELOS DE ESTABILIDAD DE POZO	58
2.1.1. Criterio de falla	58
2.1.2. Criterio de falla por tensión	58
2.1.3. Criterio de falla por compresión:	59
2.2. CRITERIOS DE ROTURA Y CLASIFICACIONES GEOMECANICAS	59
2.2.1. Definición de criterio de rotura general	59
2.2.2. Criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb	61
2.3. ELEMENTOS AXISIMÉTRICOS	63
2.3.1. Simetría axial	63
2.3.2. Aproximación del campo de desplazamientos.	66
2.3.3. Aproximación de las ecuaciones cinemáticas	67
2.3.4. Aproximación de las ecuaciones constitutivas.	67
2.3.5. Calculo de matriz de rigidez	68
CAPITULO III: GENERALIDADES SOBRE LOS PARAMETROS PARA REALIZAR UN ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	69
3.1. Esfuerzos in situ	69
3.2. Esfuerzo vertical	70
3.3. Esfuerzos horizontal mínimo.	70
3.4. Esfuerzo horizontal máximo.	71

3.5. Presión de poro.....	73
3.6. Propiedades de resistencia del material.....	73
3.6.1. Cohesión (S_o)	73
3.6.2. Angulo de fricción, ϕ	74
3.6.3. Resistencia a la tensión (T_o)	74
3.7. Propiedades elásticas de la roca de formación.....	75
3.8. Constantes elásticas.....	75
3.9.4. Geometría del pozo:	75
CAPITULO IV: CARACTERISTICAS DEL SOFTWARE MODELAMIENTO: ABAQUS.....	76
4.1. Descripción y validación del software ABAQUS.....	76
4.2. Definición de un modelo en ABAQUS.....	76
4.2.1. Data del modelo:	77
4.2.2. Historia de data:.....	78
4.3. Validación para usar el programa ABAQUS	79
CAPITULO V: METODOLOGIA DE TRABAJO PARA UN POZO VERTICAL	83
5.1. Metodología.....	83
5.1.1. Criterios Iniciales:	83
5.1.3. Selección del intervalo a modelar:	84
5.1.4. Caracterización del perfil:.....	85
5.1.5. Perfil a modelar.....	86
CAPITULO VI: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD APLICADO A UN POZO DE PETROLEO VERTICAL USANDO SOFTWARE EN UN CASO ESPECIFICO COLOMBIANO	88
6.1. Aproximación numérica/analítica a la solución del problema de estabilidad de pozo.	88
6.2. Modelo computacional.....	88
6.3. Soluciones analíticas y numéricas.....	89
6.4. Definición del modelo.....	89
6.4.1. Geometría del modelo para el análisis de un escenario de pozo vertical:	89
6.4.2. Definición del equilibrio del modelo:	90
6.4.3. Modelos matemáticos generales para la estabilidad de pozo:	91

6.4.4. Análisis de desplazamiento de esfuerzos en elasticidad:	92
6.5. Tasa de deformación	93
6.6. Métodos de solución usando ABAQUS	93
CAPITULO VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS	96
7.1. Estabilidad para un pozo vertical.	96
7.2. Estabilidad antes de la perforación.	96
7.2.1. Tramo del shale	96
7.2.2. Tramo de Arena Sucia.	97
7.2.3 Tramo de Arena Limpia.	98
7.3. Estabilidad después de la perforación (simulación).	99
7.4. Análisis de los datos numéricos de la simulación.	101
7.4.1. Comparación datos de la simulación con el modelo analítico.	105
7.4.2. Interpretación para los cambios de esfuerzos.....	108
7.4.3. Criterio Mohr-Coulomb (Después de la perforación)	109
7.4.4. Interpretación de los criterios Mohr-Coulomb, para cada tramo en el caso base.	111
7.5. Antes y después de la Simulación, criterio Mohr-coulomb.	112
7.5.1. Interpretación de los criterios Mohr-Coulomb, para cada tramo, antes y después de la perforación.	113
7.6. Cuadro comparativo de tendencia en un plano x-y para cada tramo y criterios de estabilidad.	114
7.6.1. Valores, Antes de la perforación, Modelo Analítico y después de la perforación.	114
7.6.2. Análisis Comparativo, criterios de estabilidad.....	115
VIII. CONCLUSIONES	117
IX. LECCIONES APRENDIDAS	119
X. RECOMENDACIONES.....	120
BIBLIOGRAFIA.....	121
NOMENCLATURA.....	124
ANEXOS	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Especificación del estado de esfuerzo en un punto O, en un sistema de coordenadas x, y, z a) Superficie perpendicular al eje x. b) Superficie perpendicular al eje y. c) Superficie perpendicular al eje z.	27
Figura 2: Especificación del estado de esfuerzos en un plano X-Y.	27
Figura 3. Transformación del tensor de esfuerzos en “elipsoide de esfuerzos de Lamé.	28
Figura 4. Esfuerzos principales.	31
Figura 5. Esquema círculo de Mor-Coulomb, comparado con el estado de esfuerzos de una placa.	32
Figura 6. Tipos de deformaciones.	34
Figura 7. Representación de una Constante Elástica que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.	39
Figura 8. Modulo de Young.	40
Figura 9. Esfuerzo debido al manto de recubrimiento	44
Figura 10. Resistencia de las rocas	47
Figura 11. Esfuerzo cortante y ruptura cortante o por cizallamiento	48
Figura 12. Esfuerzo de corte	49
Figura 13. Esfuerzo por tensión	50
Figura 14. Esfuerzos y sistemas de coordenadas	51
Figura 15. Componentes de esfuerzo	52
Figura 16. Estabilidad mecánica	54
Figura 17. Causas de la falla por tracción	55
Figura 18. Falla tensil debida a esfuerzo de zuncho negativa	55
Figura 19. Inclinación y dirección del hueco.	57
Figura 20. Cambio en el estado de esfuerzo en la pared del pozo	57
Figura 21. Representación del criterio de rotura en términos bidimensionales,	60
Figura 22. Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial.	62
Figura 23. Problema axisimétrico con respecto a un eje, la situación en todos los semiplanos Π	64
Figura 24. Elemento axisimétrico, Geometría,	65
Figura 25. Elemento axisimétrico, Corte.	66
Figura 26. Diferencial de volumen $d\Omega$,	66
Figura 27. Diagrama genérico de una prueba ELOT,	71
Figura 28. Módulos cargados en un archivo de entrada para ABAQUS	77
Figura 29. Elementos usados para la validación del programa ABAQUS con la solución de Kirsch.	80

Figura 30. Variación de las tensiones tangenciales y radiales (Kirsch vs. ABAQUS) para el análisis elástico.....	81
Figura 31. Perfil geológico del pozo,	86
Figura 32. Representación de las tramas empleadas para la descripción del tramo empleado en la investigación.	87
Figura 33. Reacciones cargadas en la simulación para comprobar equilibrio...91	
Figura 34. Representación envolvente Morh-Coulomb para el tramo del shale.	97
Figura 35. Representación envolvente Morh-Coulomb para el tramo de Arena Sucia.	98
Figura 36. Representación envolvente Morh-Coulomb para el tramo de Arena Limpia.....	99
Figura 37. Perfil del comportamiento del cambio de esfuerzos, en el tramo de shale.....	99
Figura 38. Perfil del comportamiento del cambio de esfuerzos, en el tramo de arena sucia.	100
Figura 39. Perfil del comportamiento del cambio de esfuerzos, en el tramo de arena limpia.	100
Figura 40. Perfil del comportamiento general del cambio de esfuerzos al realizar la perforación.	101
Figura 41. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X, en el tramo del shale. (True Distance).....	101
Figura 42. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y, en el tramo del shale. (True Distance).....	102
Figura 43. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X, en el tramo de arena sucia. (True Distance)	102
Figura 44. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y, en el tramo de arena sucia.....	103
Figura 45. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X, en el tramo de arena limpia. (True Distance)	103
Figura 46. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y, en el tramo de arena limpia. (True Distance)	104
Figura 47. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X con el modelo analítico, en el tramo de shale. (True Distance)	105
Figura 48. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y con el modelo analítico, en el tramo de shale. (True Distance)	106
Figura 49. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X con el modelo analítico, en el tramo de la arena sucia. (True Distance)	106
Figura 50. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y con el modelo analítico, en el tramo de la arena sucia. (True Distance)	107
Figura 51. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X con el modelo analítico, en el tramo de la arena limpia. (True Distance)	107

Figura 52. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y con el modelo analítico, en el tramo de la arena limpia. (True Distance)	108
Figura 53. Representación envolvente Mohr-Coulomb para el tramo del shale, después del drilling (Perforación).	110
Figura 54. Representación envolvente Mohr-Coulomb para el tramo de arena sucia, después del drilling (Perforación).....	110
Figura 55. Representación envolvente Mohr-Coulomb para el tramo de arena limpia, después del drilling (Perforación).....	111
Figura 56. Esquema comparativo del comportamiento de los esfuerzos efectivos compresivos según el criterio Mohr-Coulomb, para el tramo del Shale.	112
Figura 57. Esquema comparativo del comportamiento de los esfuerzos efectivos compresivos según el criterio Mohr-Coulomb, para el tramo de la arena sucia.	112
Figura 58. Esquema comparativo del comportamiento de los esfuerzos efectivos compresivos según el criterio Mohr-Coulomb, para el tramo de arena limpia.	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de información para la construcción de un análisis o modelo geomecánico.	26
Tabla 2. Valores de Esfuerzos Efectivos para el tramo de Shale	114
Tabla 3. Valores de esfuerzos efectivos para el tramo de arena sucia.....	114
Tabla 4. Valores de esfuerzo efectivos para el tramo de arena limpia.	115

LISTA DE ANEXOS

Anexos A. Solución elástica lineal.	126
Anexos B. Modulo de Corte.	127
Anexos C. Representación de varios estados de esfuerzos del círculo de Mohr-Coulomb.....	128
Anexos D. Distribución de esfuerzos elástica lineal.....	131

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN POZOS DE PETRÓLEO VERTICALES USANDO ELEMENTOS FINITOS*.

AUTORES: OCTAVIO DE JESÚS BONETT AVENDAÑO, YEISON FERNANDO VILLAMIL FRANCO**

PALABRAS CLAVES: Geomecánica, estabilidad de pozo, criterio Mohr-Coulomb, esfuerzos, ABAQUS, elementos finitos.

DESCRIPCIÓN: Los problemas de estabilidad de pozos son comunes a la hora de realizar un proyecto de perforación, en donde los parámetros esenciales que intervienen, son los esfuerzos in-situ, propiedades mecánicas de la roca, propiedades elásticas, entre otros.

La remoción de la roca durante la perforación puede causar cambios en los estados estáticos iniciales o sobre los esfuerzos in-situ, lo cual da como resultado, una redistribución de los esfuerzos, excediendo los esfuerzos compresivos efectivos y ocasionando así, una inestabilidad que en nuestro caso significa, que el material falle por compresión, aunque no siempre existirá fallas por compresión, fallas por tensión son ocasionadas por inestabilidad química.

Esta tesis describe un análisis general de un diseño de pozo vertical ubicado en la cuenca del valle medio del Magdalena, el cual se complementa con un estudio de estabilidad según el criterio Mohr-Coulomb, mediante el cual se pueda concluir si el escenario en investigación cumple el criterio a no fallar por compresión.

Para el caso de nuestro estudio, se realizó un modelamiento, teniendo como parámetro importante la redistribución de esfuerzos después de una perforación (Simulación). El modelo de elementos finitos fue ejecutado utilizando un software comercial, ABAQUS, realizando un análisis de redistribución de esfuerzos compresivos efectivos.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas .Escuela de Ingeniería de Petróleos. PINEDA GOMEZ, Cesar Augusto.

ABSTRACT

TITLE: STABILITY ANALYSIS OF VERTICAL OIL WELLS USING FINITE ELEMENT.*

AUTHORS: OCTAVIO DE JESUS BONETT AVENDAÑO, YEISON FERNANDO VILLAMIL FRANCO**

KEY WORDS: Geomechanics, wellbore stability, Mohr- Coulomb criterion, stress, ABAQUS, finite elements.

DESCRIPTION: Wellbore stability problems are common factors when it is necessary to perform a drilling project in which the essential parameters that are involved into the project could change the investigation case, for example: in-situ stress, deformation or some others.

The removal of rock during the drilling could provoke some changes into the initial static states or into the in-situ stress, which results in a re-distribution of the stresses exceeding the effective compressive stress, therefore this causes an instability that in our case means that the material experiences a compressive failure.

This project describes a general analysis of a vertical wellbore design of a certain case in a specific Colombian oil field, which is supplemented with a feasibility study based on the Mohr-Coulomb criterion, whereby it will be possible to conclude if it is viable or not, according to the stability of the well in that specific case, the drilling of that one.

For the case study was realized a precise model, taking in count the stresses as the essential parameters for the study of the scenario. The model of finite element was executed using the commercial software, ABAQUS, performing an analysis of the re-distribution of the effective compressive Stress.

* Degree project

** Physics-chemistry Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. PINEDA GOMEZ, Cesar Augusto.

INTRODUCCION

La noción de estabilidad es aquella idea que hace referencia a la permanencia de las características de un elemento o una situación a través del tiempo, de su condición y de su estabilidad y constancia. En los estudios de estabilidad de pozos (petrolíferos) el concepto básico de éstos, no difiere de la afirmación antes mencionada; sin embargo, éstos no solo son limitados para conocer las características estables dentro del proceso estudiado, sino que también logra visualizar cambios en aquellas características del estudio que no presenten un comportamiento idéntico a través del mismo. Este tipo de análisis como cualquier otro en ingeniería o en las ciencias aplicadas, logra obtener un cúmulo de información útil para los ingenieros, con la finalidad de tener una proyección del comportamiento del pozo bajo diferentes situaciones modeladas y/o simuladas.

Los proyectos de estabilidad de pozos verticales más utilizados y desarrollados hasta el momento son aquellos que se han generado a partir de mallas radiales, ya sea con barridos radiales o de algún otro tipo, por tanto, las referencias teóricas en su gran mayoría se han desarrollado con base a este tipo de modelamiento, sin embargo, con el desarrollo de la tecnología y de nuevos software para la simulación de fenómenos, ha traído consigo la posibilidad de desplegar nuevos modelos computacionales bajo el uso de herramientas que anteriormente eran muy difíciles de implementar por las limitaciones de cálculo.

Nuestro proyecto de estudio se centra en la estabilidad de la configuración de un pozo vertical en tres diferentes litologías (shale, arena sucia y arena limpia). Es por ello que ante el inminente cambio de las características iniciales del futuro pozo se lleva a cabo el estudio basado en el modelamiento de una malla de elementos finitos del tipo axisimétricos, buscando con ello, una mayor comprensión del papel que juegan los esfuerzos en la estabilidad de este pozo y las posibles recomendaciones o soluciones a problemas presentes en el desarrollo de la simulación.

Debido a la practicidad que presenta el método de elementos finitos (MEF) en estructuras continuas como las de tipo losa, pantalla o en nuestro análisis de estudio, (pozo petrolero en perforación), éste será el método de preferencia que se desarrollará en el estudio de estabilidad.

Mediante la investigación, se pretende analizar el cambio de los esfuerzos máximos y mínimos que experimentarán las tres litologías antes mencionadas, además de tener en cuenta dichas magnitudes de esfuerzos para evaluar mediante el criterio de falla compresible (Criterio de Mohr- Coulomb) el estado en el que las tres rocas finalizan al terminar la simulación, es decir, si las tres litologías presentan o no fallas por compresión. Además, esta investigación contribuye con un modelamiento de manera distinta, utilizando un barrido volumétrico con elementos axisimétricos en un software comercial (ABAQUS) incentivando la innovación en el planteamiento de problemas ya antes tratados con otro tipo de modelos, posibilitando con ello la comparación de un nuevo planteamiento respecto al ya establecido como el que hasta el momento es el más eficiente.

A manera de generar una idea de la estructura del siguiente análisis, es posible decir que en primera instancia, dentro del libro se encontrarán todas las bases teóricas necesarias para la correcta comprensión de la teoría de estabilidad de pozo; y el criterio a tener en cuenta en la investigación base del estudio: criterio de Mohr-Coulomb, así como los parámetros y elementos utilizados para definir la simulación, tales como los elementos finitos y los axisimétricos. También encontrarán la definición del modelo, a partir del cual se simulará el caso base y consecuentemente sus resultados. Por último, la interpretación de los autores respecto a los datos obtenidos de la simulación del caso base y sus posteriores conclusiones.

CAPITULO I: GENERALIDADES DE LA GEOMECANICA EN RELACIÓN CON POZOS VERTICALES

1.1. ESTABILIDAD DE POZO

La misión de la estabilidad de pozo es doble:

1. Minimizar la "curva de aprendizaje" en el desarrollo de nuevos yacimientos para que así los costos óptimos se obtengan desde el principio.
2. Identificar los problemas potenciales de perforación durante la fase de planificación, también de modo que la prevención y fase operativa puedan ser desarrollados para minimizar los costos asociados con problemas de estabilidad del pozo¹.

La estabilidad del pozo es un mecanismo que sirve para la prevención de fallas o deformación plástica de la roca alrededor del pozo debido a la tensión mecánica o desequilibrio químico.

Antes de perforar, los esfuerzos mecánicos en la formación, son menores que la resistencia de la roca. La acción química también es equilibrada y se desarrolla a una velocidad relativamente baja en el tiempo geológico (millones de años). Las rocas en este estado de equilibrio o cerca del equilibrio son estables.

Después de la perforación, la roca que rodea el pozo se somete a cambios de tensión, compresión y cargas de corte, ya que se retira la roca que forma el núcleo del pozo. Las reacciones químicas también ocurren con la exposición de la roca con el fluido.

El esfuerzo excesivo de la roca puede hacer colapsar el hueco y por consiguiente atascar tubería (hole-squeezing) en formaciones móviles y produce problemas como huecos reducidos y pegado de tuberías. Los

¹ AMOCO. 1996. *Wellbore stability. Drilling handbook*. s.l. : Amoco production company, 1996.

derrumbes de la formación complican la limpieza de un hueco, aumenta los costos en lodos y cementación².

Se estiman costos anuales que exceden los 2 billones de dólares, como consecuencia de colapsos de pozos, sidetracks, pérdida de herramientas y abandono de pozos antes de alcanzar la zona de interés.

Los problemas de inestabilidad aparecen no sólo en pozos desviados (y/o horizontales) sino incluso en pozos verticales. Estos problemas se acentúan aún más cuando:

- ✓ Se perfora bajo condiciones de altas presiones y temperatura (HP/HT).
- ✓ Existe interacción química entre el fluido de perforación y la roca de formación.
- ✓ Se perforan pozos profundos en áreas geológicamente complejas y aún más en zonas tectónicamente activas.

Los problemas de inestabilidad de pozo más frecuentemente presentados durante la perforación y algunas de sus consecuencias se listan en seguida:

- ✓ Ensanchamiento del pozo.
- ✓ Reducción del tamaño del pozo debido al flujo plástico de la roca dentro del pozo (generalmente en formaciones de shale).
- ✓ Pérdida de circulación.
- ✓ Exceso de torques y altas presiones de bombeo en la perforación.
- ✓ Daño del pozo inducidos por los esfuerzos.
- ✓ Fallas de pozo inducidas por la perforación.
- ✓ Pega de tubería.
- ✓ Consolidación.
- ✓ Dificultades en la toma de registros.
- ✓ Side-tracking.
- ✓ Problemas de washouts o zonas de lavado.
- ✓ Pobre cementación con sus respectivos problemas³.

² AMOCO. 1996. *Wellbore stability. Drilling handbook*. s.l. : Amoco production company, 1996.

1.2. GEOMECÁNICA

Es una disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas de formación (Sánchez y Vásquez, 1999). También es definida como la disciplina técnica que se dedica al diagnóstico, el modelado y el control de la deformación de las rocas.

La geomecánica tiene su origen en la ingeniería civil, en el estudio de suelos y rocas como materiales fundamentales en la construcción de obras tales como: presas, túneles, vías, etc. Sus aplicaciones posteriormente se extendieron para fines mineros; en la construcción de túneles en minería subterránea y estabilidad de taludes en minería a cielo abierto.

La geomecánica del petróleo es la rama de la ingeniería que trata con las propiedades mecánicas y el comportamiento de las formaciones geológicas, las cuales tienen gran influencia en la exploración, perforación y producción de petróleo y gas. Esta permite el estudio de fenómenos a escala de yacimiento tales como: evolución de fallas y fracturas en el tiempo geológico, compactación y subsidencia causada por la producción de fluidos, fallamiento inducido y sismicidad. También incluye fenómenos a escala de pozo, tales como la estabilidad de pozo durante la perforación, fracturamiento hidráulico, interacción formación / casing durante la producción, producción de arena

1.3. CONSTRUCCION DEL MODELO GEOMECÁNICO

Antes de iniciar el análisis de estabilidad, realizar un modelo es el corazón de cualquier estudio geomecánico y, por tanto, el grado de exactitud de todos los resultados posteriores. Como mínimo, un modelo de geomecánico comprende la determinación de las propiedades elásticas, resistencia de la roca, la presión de poro, y las magnitudes y orientaciones de los esfuerzos principales. La

³ AMOCO. 1996. *Wellbore stability. Drilling handbook*. s.l. : Amoco production company, 1996.

selección de las correlaciones y las técnicas para la evaluación de las propiedades geomecánicas, resistencia de la roca y esfuerzos in situ.

Cuando se decide llevar a cabo un análisis o un modelo geomecánico, el modo de obtener la información está resumida en la tabla 1. Las fuentes de información están más que todo basadas en imágenes de pozo, registros, reportes de perforación y pruebas de laboratorio. Se debe tener en cuenta que hay tres tipos de información específica que son de suma importancia para realizar un análisis geomecánico. **Tabla 1.**

- Estado de esfuerzos.
- Propiedades mecánicas de la roca.
- Parámetros elásticos.
- Parámetros de resistencia de la roca.
- Presión de poro.

1.4. DESCOMPOSICION DE ESFUERZOS

El tensor tensión de Cauchy viene dado por una matriz simétrica de la ecuación, cuyas componentes son:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_{YY} & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_{ZZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{YX} & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ \tau_{ZX} & \tau_{ZY} & \sigma_Z \end{pmatrix} \quad \text{Ecu. 1}$$

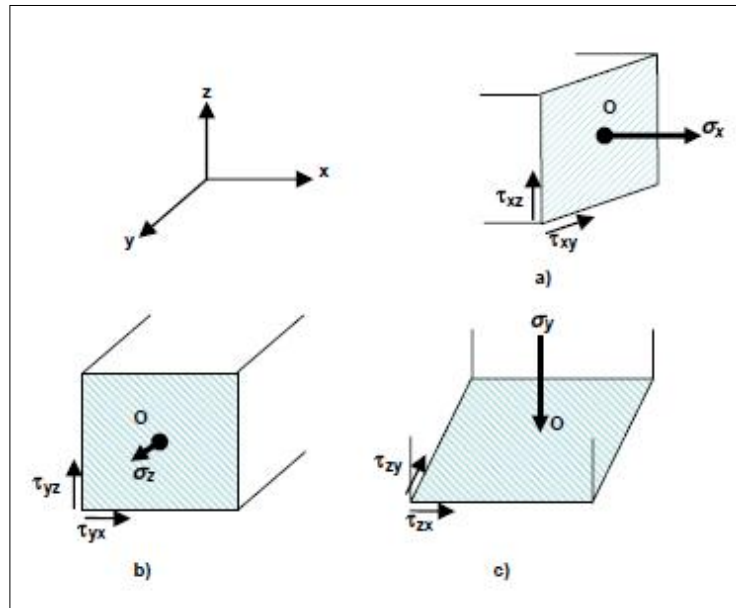
En general, un estado de esfuerzo puede ser representado por una figura geométrica (Ver figura 1), que es la superficie tridimensional que se obtendría uniendo todos los extremos de los vectores esfuerzo que actúan sobre un punto en un instante dado.

Tabla 1. Fuentes de información para la construcción de un análisis o modelo geomecánico.

Propiedades	Fuente (registros)	Otras fuentes
Estratigrafía	Registros Gamma Ray, density, resistivos, velocidad sónica compresional (V_p)	Cuttings, cavings, secuencia estratigráfica.
Presión de poro (P_p)	V_p resistivos Logs sísmicos Parámetros de poro	Intervalo de velocidad obtenido de datos sísmicos, pruebas de toda la formación, reportes diarios de perforación.
Esfuerzo vertical σ_H	Bulk density, logs	Ripios de formación
Dirección de los esfuerzos	Caliper orientado, imágenes de pozo, anisotropía de velocidad orientada	Mapas estructurales, datos sísmicos 3D
Mínimo esfuerzo horizontal (σ_h)	V_p y velocidad sónica shear (v_s)	P_p , pruebas leakoff, pruebas leakoff extendidas, microfract, pruebas de rata de inyección.
Máximo esfuerzo horizontal (σ_H)	Imágenes de pozo	P_p , σ_h , resistencia de las rocas, base de datos, modelamiento de los esfuerzos de pozo.
Parámetros elásticos; modulo de Young (E), modulo de rigidez (G), relación de Poisson (ν)	v_p y v_s , bulk density	Base de datos, pruebas de corazones en laboratorio, cavings
Parámetros de resistencia de la roca (UCS-resistencia compresiva no confinada), ángulo de fricción (ϕ)	v_p y v_s , bulk density	Base de datos, en laboratorio, cavings
Mecanismos de falla	imágenes de pozo, caliper de varios brazos orientados	Reportes diarios de perforación, cavings

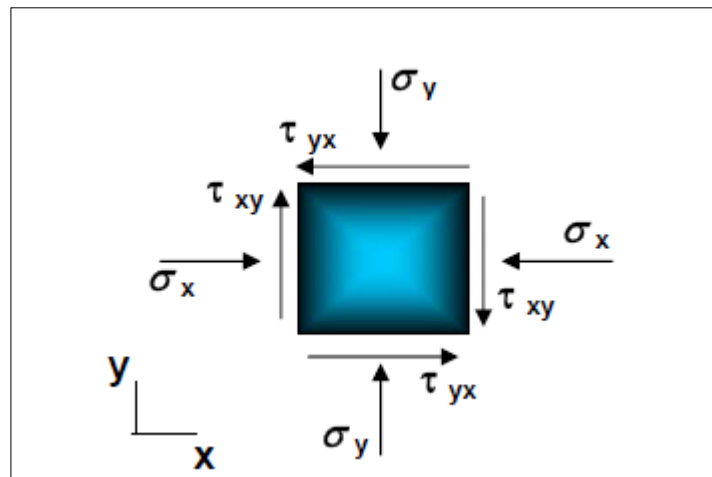
Fuente: Artículo oilfield review, Otoño 2003

Figura 1. Especificación del estado de esfuerzo en un punto O, en un sistema de coordenadas x, y, z a) Superficie perpendicular al eje x. b) Superficie perpendicular al eje y. c) Superficie perpendicular al eje z.



Fuente: Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de las teorías elástica y poroelástica: aplicación al piedemonte colombiano, Lenin Mora, Darwin Villadiego, 2005

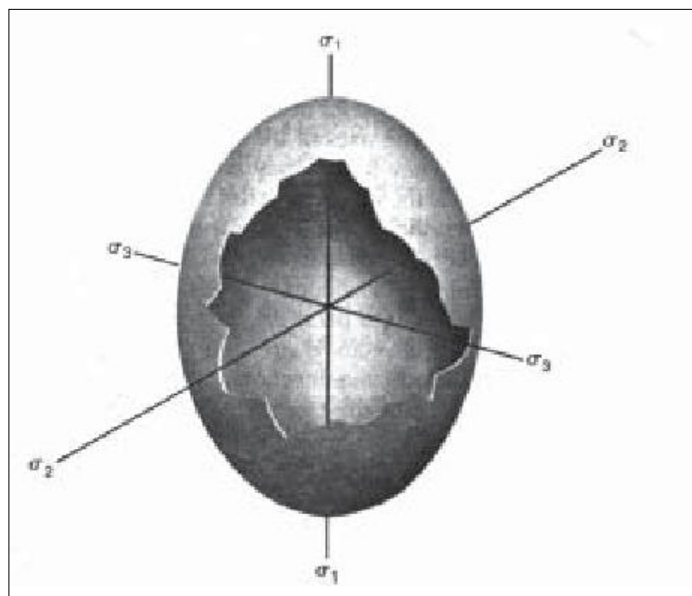
Figura 2: Especificación del estado de esfuerzos en un plano X-Y.



Fuente: Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de las teorías elástica y poroelástica: aplicación al piedemonte colombiano, Lenin Mora, Darwin Villadiego-UIS, 2005.

Cada elipsoide de esfuerzo (figura 3) tiene tres ejes perpendiculares entre sí, llamados esfuerzos principales, y las direcciones según las cuales actúan se denominan direcciones principales. Uno de ellos es el mayor de todos los esfuerzos de ese estado particular, otro es el menor, y el tercero es un esfuerzo de valor intermedio entre los anteriores que actúa según una dirección perpendicular a los dos. Se denotan como $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ de forma que σ_1 es mayor que σ_2 y así mismo este último es mayor que σ_3 . Una propiedad importante de los esfuerzos principales es que son siempre esfuerzos normales, es decir, son perpendiculares al plano sobre el que actúan. Por tanto, los tres planos perpendiculares entre sí que contienen a los ejes del elipsoide son aquellos sobre los que actúan los esfuerzos principales y se llaman planos principales del elipsoide de esfuerzo.

Figura 3. Transformación del tensor de esfuerzos en “elipsoide de esfuerzos de Lamé.



Fuente: José Ramón Martínez Catalán-Universidad de Salamanca, 2002

1.5. ELASTICIDAD

La importancia de predecir el comportamiento de los materiales (y/o rocas) cuando son sometidos a cargas, ha conllevado a la formulación de diversas teorías para dicho fin. Estas teorías toman el material rocoso como un material continuo que se encuentra sujeto a un set de fuerzas externas para modelar su comportamiento, entre éstas teorías se pueden mencionar la elástica, plástica, visco elásticas entre otras.

La elasticidad se define como la característica que presentan los materiales para resistirse a deformaciones y recobrar su estado inicial al desaparecer el efecto de las fuerzas que las producen (Maury, 1987).

Para el modelamiento de la teoría elástica se toma un material continuo (en el cual cada una de sus partes está constituida del mismo material y existe una variación gradual en sus propiedades), en otras palabras, el objeto de estudio se puede considerar como un material sólido.

Los tipos de respuestas que puede presentar el material en la teoría elástica pueden ser lineal o no-lineal; esta clasificación obedece a la relación que se presenta entre la fuerza externa aplicada y deformación causada al material (ϵ). Cuando los cambios en las fuerzas son suficientemente pequeños, la respuesta es por lo general lineal.

La manera como se relacionan los esfuerzos y deformaciones en un material en particular es llamado comportamiento constitutivo del material, luego se puede hablar del comportamiento constitutivo de materiales elásticos, poro-elásticos, plásticos, entre otros.

1.6. ANÁLISIS DE ESFUERZOS

1.6.1. Esfuerzos principales

Para una orientación especial del eje de coordenadas, el tensor de esfuerzos tiene una forma particularmente simple. Considerando que el triangulo de la

figura 4 está en reposo y no hay fuerzas que actúen sobre él. La cancelación de las fuerzas implica:

$$\sigma = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad \text{Ecu. 2}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad \text{Ecu. 3}$$

Escogiendo un adecuado valor de θ , es posible obtener un $\tau = 0$. De las ecuaciones anteriores se ve que esto sucede cuando:

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad \text{Ecu. 4}$$

La ecuación anterior tiene dos soluciones, θ_1 y θ_2 . Las dos soluciones corresponden a las dos direcciones para las cuales el esfuerzo de corte τ desaparece. Estas dos direcciones son llamadas ejes principales de esfuerzo.

Los correspondientes esfuerzos normales σ_1 y σ_2 son llamados esfuerzos principales, y son hallados introduciendo los valores de θ_1 y θ_2 respectivamente dentro de la ecuación (**esfuerzo principal**)

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\tau^2_{xy} + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2} \quad \text{Ecu. 5}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{\tau^2_{xy} + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2} \quad \text{Ecu. 6}$$

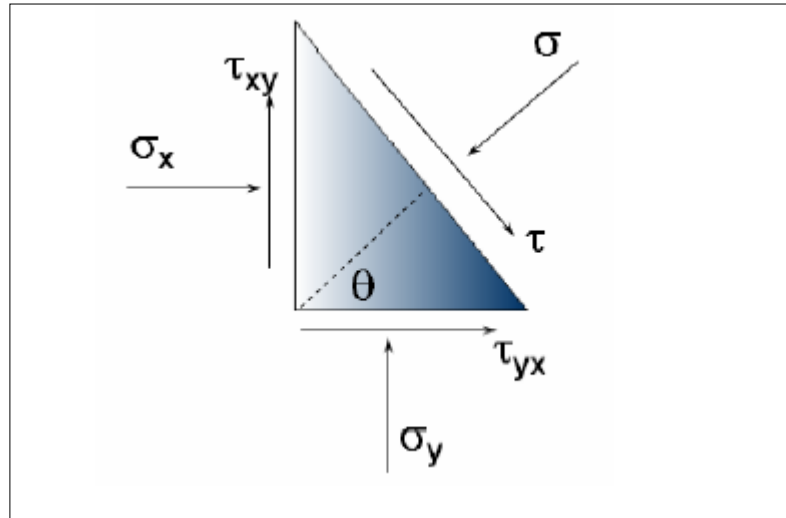
Es conveniente escoger una notación tal que $\sigma_1 > \sigma_2$

1.6.2. Circulo de Mohr

Es usualmente conveniente re-orientar el sistema de coordenadas de tal manera que, el eje x sea el paralelo al primer eje principal y el eje y paralelo al

otro. Entonces los esfuerzos normal σ y de corte τ en la dirección θ relativa al eje x se convierten⁴:

Figura 4. Esfuerzos principales.



Fuente: Tomados de análisis de estabilidad de pozo utilizando el software PBORE; Cesar Augusto Gómez, Rafael Bolívar-UIS, 2010

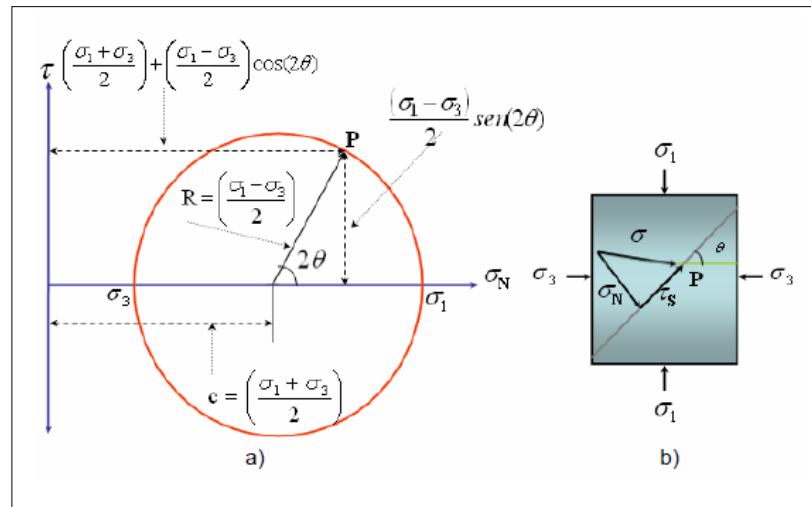
$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Ecu. 7}$$

$$\tau = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta \quad \text{Ecu. 8}$$

Graficando los correspondientes valores de σ y τ en cualquier dirección θ figura 5, corresponde a punto sobre el círculo de Mohr. Se puede ver a) que el mayor valor absoluto del esfuerzo de corte es $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ y ocurre para $\theta = \pi/4(45^\circ)$ y $\theta = 3\pi/4(135^\circ)$. El círculo de Mohr es una herramienta muy útil en el análisis de las condiciones de fractura de la roca.

⁴ Da Fontoura, S. "Rock Mechanics Principles and Petroleum Engineering Application". Asistencia Técnica 2002.

Figura 5. Esquema círculo de Mor-Coulomb, comparado con el estado de esfuerzos de una placa.



Fuente: Tomados de análisis de estabilidad de pozo utilizando el software PBORE; Cesar Augusto Gómez, Rafael Bolívar-UIS, 2010

1.7. ANÁLISIS DE DEFORMACION

Considerando que la posición inicial de una partícula específica dentro de una muestra es x, y, z , y que después de la acción de una fuerza externa, la posición de esta partícula cambia. Denotando el cambio en la dirección x por u , el cambio en la dirección y por v y el cambio en la dirección z por w . Las cantidades $u, v, y w$ son llamadas los desplazamientos de la partícula. La nueva posición de la partícula inicialmente en $x, y, y z$ se convierte en:

$$x' = x - u \quad \text{Ecu. 9}$$

$$y' = y - v \quad \text{Ecu. 10}$$

$$z' = z - w \quad \text{Ecu. 11}$$

Si los desplazamientos $u, v, y w$, son constantes, es decir, son los mismos para todas las partículas en el mismo plano, entonces el desplazamiento del cuerpo fue exclusivamente una translación. Otra forma simple de desplazamiento es la rotación de un cuerpo rígido. Para una pequeña

rotación denotada por \vec{w} , donde la magnitud $|\vec{w}|$, da el ángulo de rotación mientras la dirección de \vec{w} da el eje de rotación, la nueva posición para la partícula será:

$$\vec{r}' = \vec{r} + \vec{w} * (\vec{r} - \vec{r}_o) \quad \text{Ecu. 12}$$

Donde $\vec{r} = (x, y, z)$ y $\vec{r}' = (x', y', z')$. El vector \vec{r}_o es el centro de rotación, a través del cual el eje de rotación gira. Si la posición relativa de las partículas dentro de la muestra son cambiadas, tal que la nueva posición no puede ser obtenida simplemente por traslación rígida o rotación de la muestra, se dice que ocurrió deformación.

La deformación⁵ es definida como la compresión (positiva) o extensión (negativa) resultado de la aplicación de fuerzas externas, divididas por la dimensión original. Dos tipos de deformación pueden ser reconocidas: homogéneas y heterogéneas. Cuando toda parte de un cuerpo es expuesta a una deformación del mismo tipo y magnitud en alguna dirección del desplazamiento, la deformación es considerada homogénea. La deformación es heterogénea si no es igual en todo el cuerpo. La deformación resultante de aplicaciones extendidas de grandes esfuerzos y altas temperaturas es descrita como finita. Sin embargo, si la deformación resulta de la aplicación de un incremento de esfuerzos puede ser tratada matemáticamente, por lo tanto esta es definida como una deformación infinitesimal. La deformación es responsable en el cuerpo por el desplazamiento y la rotación.

La deformación de corte (Γ), se define como el cambio angular en un ángulo recto en un punto en un cuerpo y es relacionado al desplazamiento en las direcciones x, y, y z. En la Figura 6, se observa un ejemplo de una muestra deformada. El desplazamiento relacionado al punto O y P no es igual y está definido por⁷:

$$\varepsilon = \frac{L-L'}{L} \quad \text{Ecu. 13}$$

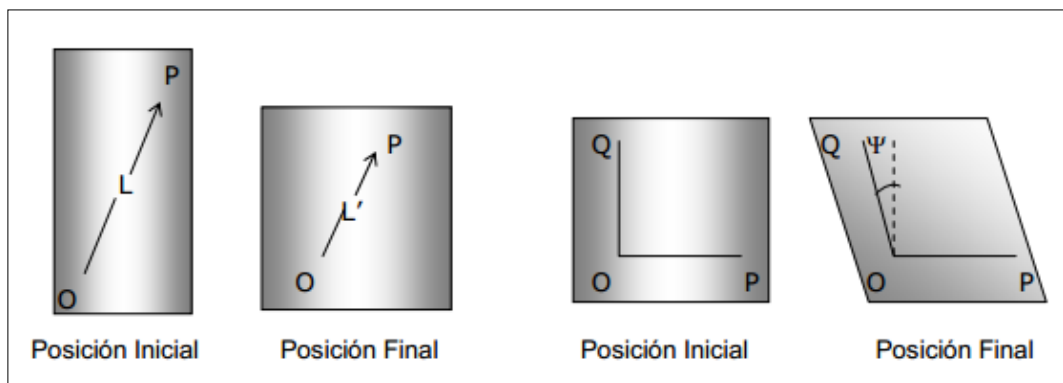
⁵ Abousleiman, Y., Ekbote, S.L., Cui, L., Mody, F., Roegiers, J. C., Zaman, M., "Time-Dependent Coupled Processes in Wellbore Design and Stability: PBORE 3D" Artículo SPE paper 56759. 1999

El cual es llamado la elongación correspondiente al punto O en la dirección OP. Otro tipo de deformación que puede ocurrir puede ser expresado por el cambio (Γ) del ángulo entre las dos direcciones ortogonales principales. La cantidad:

$$\Gamma = \frac{1}{2} \tan \Psi \quad \text{Ecu. 14}$$

Es llamada la deformación de corte correspondiente al punto O en la dirección OP.

Figura 6. Tipos de deformaciones.



Fuente: Tomado de análisis de estabilidad de pozo utilizando el software PBORE; Cesar Augusto Gómez, Rafael Bolívar-UIS, 2010.

Para deformaciones en dos dimensiones, la elongación en x , en la dirección x , está dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Ecu. 15}$$

Si las deformaciones son pequeñas, encontramos que la deformación de corte correspondiente a la dirección x :

$$\Gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \text{Ecu. 16}$$

Para dar una completa descripción del estado de deformación en un punto dentro de un cuerpo tridimensional, se debe especificar la elongación y la deformación de corte correspondiente a los tres ejes:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x & \Gamma_{xy} & \Gamma_{xz} \\ \Gamma_{yx} & \varepsilon_y & \Gamma_{yz} \\ \Gamma_z & \Gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad \text{Ecu. 17}$$

Además se puede definir la deformación volumétrica:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad \text{Ecu. 18}$$

Que simboliza la disminución relativa en volumen. Esta deformación volumétrica es independiente del eje coordenado escogido y por lo tanto es una deformación invariante. Similarmente a los esfuerzos invariantes, para las deformaciones se tiene:

$$J_2 = -(\varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x) + \Gamma_{xy}^2 + \Gamma_{yz}^2 + \Gamma_{zx}^2 \quad \text{Ecu. 19}$$

$$J_3 = \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z + 2\Gamma_{xy} \Gamma_{yz} \Gamma_{zx} - \varepsilon_y \Gamma_{zx}^2 - \varepsilon_z \Gamma_{xy}^2 \quad \text{Ecu. 20}$$

También llamados deformaciones invariantes.

1.8. POROELASTICIDAD

Hasta este momento se ha tratado la teoría elástica lineal, ésta, para su modelamiento utiliza un material completamente sólido (Maury, 1987); por otra parte, las rocas como objeto de nuestro estudio e interés, son materiales compuestos (por una parte sólida y una parte vacía, que por lo general está ocupada con fluidos), por lo cual, es importante el estudio de una teoría como la poroelástica que tiene en cuenta las características mencionadas, debido a que se ha demostrado que el comportamiento de la roca depende en gran parte del material no sólido, (espacio poroso y fluidos contenidos en él).

El análisis elástico lineal está basado en las suposiciones de deformación plana, Hubert y Willis, (1957). Las cuales han sido extensivamente aplicadas en la ingeniería de petróleos. Más sin embargo, como se mencionó, la formación que circunda el pozo es por lo general permeable y presenta fluidos en su espacio poroso. El campo de presión de poro cerca del pozo es perturbado debido a la perforación de este último. La difusión del fluido permite una redistribución dependiente del tiempo de los esfuerzos totales y efectivos. Estos efectos son acoplados en la teoría de poroelasticidad de Biot (Biot 1941; Detounary y Cheng, 1993).

1.8.1. Concepto de esfuerzo efectivo

El concepto de esfuerzo efectivo⁶ fue introducido por Terzaghi en 1923 para mecánica de suelos, Terzaghi argumentó que:

1. Incrementar la presión hidrostática externa produce el mismo cambio de volumen del material que reduciendo la presión de poro con la misma cantidad.
2. La resistencia de corte depende sólo de la diferencia entre el esfuerzo normal y la presión de poro.

Estos argumentos conducen a una ley de esfuerzo efectivo⁷ con $\alpha = 0$. (esto es la constante de BIOT).

$$\alpha = \frac{c}{M} = 1 - \frac{Kf_r}{K_s} \quad \text{Ecu. 21}$$

1.9. PROPIEDADES MECANICAS DE LA ROCA

Convencionalmente, las propiedades mecánicas de la roca se obtienen mediante la realización de una serie de ensayos de compresión triaxial sobre

⁶ Charlez, P.A.: Rock Mechanics Theoretical Fundamentals, Volumen 1, Ediciones Technip, Paris (1991).

⁷ CONTRERAS VARGAS, Sayda Katerin. Tesis de grado: Interpretación ambiental e historia de subsidencia del pozo Pivijay-1, Valle Inferior del Magdalena. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2006.

muestras del núcleo. Sin embargo, las pruebas de laboratorio sólo proporcionan propiedades de un núcleo a profundidades discretas a lo largo del pozo pero es necesario usar herramientas de registros eléctricos para calibrar puntos mejor y derivar así las propiedades. Además, debido a los altos costos asociados con recuperaciones, manejo y conservación de núcleos éstos a menudo no están disponibles.

El uso de los registros para predecir las propiedades mecánicas de las formaciones, se convierte en la manera más técnica-económica para generar perfiles continuos.

El método más utilizado para calcular las propiedades mecánicas se basa en las relaciones que expresan las propiedades en función de las velocidades sísmicas. Estos perfiles acústicos, se refiere a las propiedades mecánicas y dinámicas, difieren de las propiedades derivadas de laboratorio, que muestran las propiedades de forma estática. La principal causa de esta diferencia se debe a diferentes mecanismos de deformación entre la carga dinámica (baja magnitud de los esfuerzos aplicados, la corta duración de la presión o las ondas sonoras) y la carga estática, (se aplica una elevada magnitud del esfuerzo, la larga duración de la presión aplicada).

Ondas Acústicas⁸: En un laboratorio de forma controlada es posible propagar en una muestra de roca, ondas acústicas como son la onda P de compresión y la onda S de corte, con el objetivo de estudiar el comportamiento de la propiedad elástica de la muestra de roca. La velocidad de propagación de las ondas depende en especial de la densidad y las propiedades elásticas de la roca en estudio.

Onda P: La onda P u onda primaria es denominada así por tener la mayor velocidad de propagación en los materiales elásticos, su comportamiento describe compresiones y dilatamiento alternativamente de la roca, dando lugar

⁸ FIGUEROA, Puerto German Darío, "Automatización del sistema de adquisición de ondas y medición de velocidades acústicas del equipo DT14210-ROP para la estimación de las propiedades mecánicas en rocas". Tesis de grado universidad industrial de Santander. 2009

a un movimiento de las partículas en la dirección de la propagación de la onda, tal como se describe una onda longitudinal.

Onda S: La onda S u onda secundaria exhibe la cualidad de ser una onda lenta, es decir que la velocidad de propagación de la onda es inferior a la onda P. El comportamiento de la onda S en un material elástico, describe la deformación lateral del material en dirección perpendicular a la propagación de la onda, tal como se describe una onda transversal.

Inicialmente conociendo la densidad, las dimensiones geométricas de la muestra de roca y los tiempos de tránsito de las señales acústicas, se establece las velocidades de compresión Dt_p de corte Dt_s .

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad ; \quad V_s = \frac{L}{T_s} \quad \text{Ecu. 22}$$

1.9.1. Relación de Poisson

Se denota con la letra ν y se define como la relación entre las deformaciones laterales y axiales por la acción de un esfuerzo aplicado en la muestra de roca; Para determinar la constante elástica dinámica de la muestra de roca, relación de Poisson, se realiza con la estimación de la velocidad de onda P, velocidad de onda S a través de la muestra de roca. La relación de Poisson se define como (Montmayour y Graves, 1986)

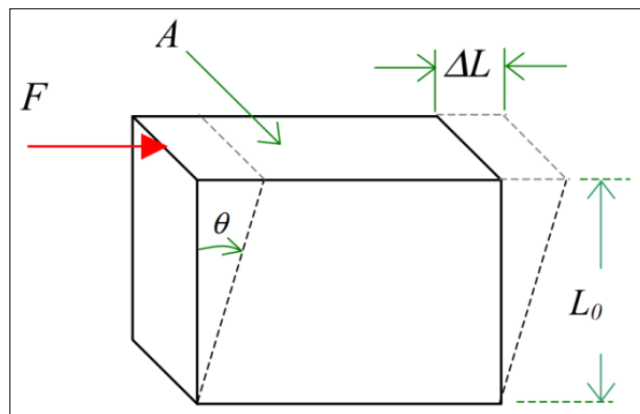
$$\nu = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} = \frac{2 - \left(\frac{Dt_s}{Dt_p}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{Dt_s}{Dt_p}\right)^2\right]} \quad \text{Ecu. 23}$$

1.9.2. Módulo de corte

El módulo de corte mide la resistencia de un material a la deformación de corte. Se calcula mediante la siguiente expresión.

$$G = \frac{\text{Esfuerzo de corte}}{\text{Deformacion de corte}} = \frac{FL_0}{\Delta L/A} \quad \text{Ecu. 24}$$

Figura 7. Representación de una Constante Elástica que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.



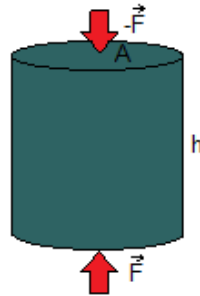
Fuente: Tomado de análisis de estabilidad de pozo utilizando el software PBORE; Cesar Augusto Gómez, Rafael Bolívar-UIS, 2010.

1.9.3. Módulo de Young

Se denota con la letra E y se define como la relación entre el esfuerzo aplicado $\sigma = F/A$ y la deformación del material elástico, este se obtiene con la estimación de la velocidad de onda P, velocidad de onda S a través de la muestra de roca y datos específicos de la probeta a ensayar, como se observa en la figura 8.

$$E = \frac{\sigma}{|\varepsilon|} = 2G(1 + \nu) \quad \text{Ecu. 25}$$

Figura 8. Modulo de Young.



Fuente: Autores

1.9.4. Resistencia de la roca

Son propiedades mecánicas que definen la capacidad de la roca para resistir acciones externas o internas que implican la aplicación de fuerzas sobre el mismo, entre estas están:

- Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)
- Resistencia a la tensión T_o .
- Cohesión S_o .

1.9.5. Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

Es un esfuerzo (uniaxial) normal requerido para ocasionar que falle una muestra de roca sometida a una carga:

$$UCS = 253.09 * V_p^2 - 3045.78 \quad \text{Ecu. 26}$$

V_p = Velocidad de la onda P.

1.9.6. Resistencia a la tensión T_o

Es el esfuerzo tensil requerido para ocasionar que una muestra de roca falle por tensión, la relación entre T_o y UCS :

$$T_o = 0.1 * UCS \quad \text{Ecu. 27}$$

1.9.7. Cohesión S_o

Es la fuerza que mantiene juntos los granos de una roca. La relación entre S_o y UCS :

$$S_o = \frac{UCS}{2 \cdot \tan \beta} \quad \text{Ecu. 28}$$

Para obtener beta: $\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$

Donde φ es el ángulo interno de fricción, se obtuvo de (Chang and Zoback 2003)

$$\varphi = 18.532(V_p^{0.5148}) \quad \text{Ecu. 29}$$

1.10. ESTABILIDAD: ANTES DEL POZO

1.10.1. Condiciones in situ antes de realizar el pozo.

Una gran parte del dinero que conlleva a desarrollar un campo, es gastado en la perforación de pozos⁹, lo que indica la importancia de disminuir los costos tanto en operaciones de perforación, como en el número de pozos perforados. Los problemas de estabilidad durante la perforación causan dificultades sustanciales en todo el mundo. Estos se encuentran casi siempre en las capas rocosas de arcilla por encima del yacimiento, dando como resultado pérdidas de tiempo y algunas veces en pérdidas del equipo. En zonas tectónicamente activas, las operaciones empeoran si el pozo es direccional, por lo tanto, es necesario entender el comportamiento de las rocas para minimizar los problemas durante la perforación.

⁹ AMOCO. 1996. *Wellbore stability. Drilling handbook*. s.l. : Amoco production company, 1996

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

- Grandes variaciones en los esfuerzos de la roca, y mediciones de los esfuerzos in-situ no sistemáticas.
- Grandes variaciones en las propiedades del material de la formación. Altos costos de corazonamientos y cantidades limitadas de material para pruebas de mecánica de rocas.
- Muchas fuerzas actuando 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 este modelo. Entonces, si se utilizan algunas consideraciones ideales, un análisis de estabilidad, puede proporcionar algunas guías, las cuales posteriormente pueden ser asociadas a algunas condiciones prácticas.

1.10.2. Presión de poro (P_o)

La presión de poro, también llamada presión de formación, es aquella que ejercen los fluidos confinados en el espacio poroso sobre la matriz de la roca. Puede ser de dos tipos: normal, cuando la presión es igual a la presión hidrostática que ejerce una columna de fluido, propio de la formación; y anormal. Si la presión de formación excede a la presión hidrostática, se le denomina anormalmente alta, o sobre-presión, o simplemente presión anormal; pero si es menor que la normal, entonces se le llama presión de formación anormalmente baja o subnormal.

1.10.3. Esfuerzos terrestres in situ

Antes de perforar, las rocas de superficie son expuestas a un equilibrio o cercano a un ambiente de esfuerzos balanceados. Naturalmente ocurren esfuerzos en sitio que son llamados esfuerzos in situ.

Las fuerzas internas se distribuyen de forma continua en el volumen del cuerpo material, es decir, la distribución de tensiones en el cuerpo se expresa como una función continua por partes de las coordenadas espaciales y el tiempo.

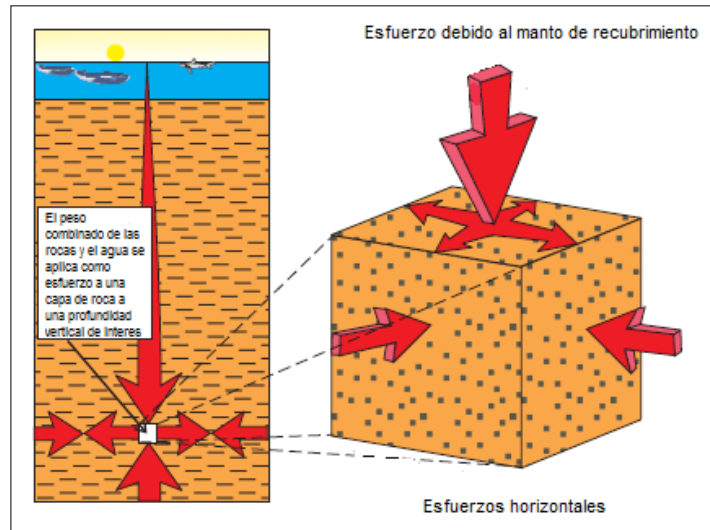
$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta A} \right) \quad \text{Ecu. 30}$$

Los esfuerzos in situ son normalmente compresivos debido al peso de la sobrecarga. Por esta razón, en mecánica de rocas los esfuerzos compresivos tienden a ser positivos.

1.10.3.1. Esfuerzo debido al manto de recubrimiento (S_v):

El esfuerzo debido al manto de recubrimiento es la presión ejercida sobre una formación a una profundidad determinada, debido al peso total de las rocas y fluidos que están por encima de esa profundidad (figura 9).

Figura 9. Esfuerzo debido al manto de recubrimiento



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

La mayoría de las formaciones se forman a partir de una historia de sedimentación geológica por compactación. Las formaciones pueden variar significativamente desde la superficie de la tierra hasta una profundidad de interés. Una shale superficial será más porosa y menos densa que los shales a grandes profundidades.

1.10.3.2. Esfuerzo horizontal S_h , S_H :

En muchas áreas de perforación, los esfuerzos horizontales son iguales. Al perforar cerca de estructuras masivas, tales como minas de sal o en zonas tectónicas, los esfuerzos horizontales serán diferentes y se describen como un mínimo (S_h) y un máximo (S_H).

1.10.3.3. Esfuerzos efectivos:

La matriz de la roca no puede soportar con toda la sobrecarga y esfuerzo horizontal. Parte de la carga es soportada por el fluido en el poro (presión de poros).

El esfuerzo neto es el esfuerzo efectivo soportado por la matriz de la roca. El esfuerzo efectivo es utilizado en mecánica de rocas para determinar la estabilidad del pozo.

1.10.3.4. Esfuerzo efectivo debido al manto de recubrimiento:

La presión de aire en las llantas de un carro son las que soporta su peso, igualmente el fluido alojado en un poro de la matriz es capaz de soportar parte de la carga de toda la formación.

La matriz de la roca ayuda con una porción del esfuerzo total de sobrecarga.

Esfuerzo efectivo vertical = Esfuerzo total vertical – Presion de poro

$$\sigma_v = S_v - P_o \quad \text{Ecu. 31}$$

1.10.3.5. Esfuerzo efectivo horizontal σ_h, σ_H :

Del mismo modo, se puede determinar el esfuerzo horizontal efectivo. Por lo general, los esfuerzos horizontales son iguales y el esfuerzo horizontal efectivo es igual al esfuerzo efectivo vertical por un factor litológico. El factor de litológico (k) es igual a 1 para los líquidos, pero es menor a 1 para materiales más rígido, como por ejemplo las formaciones rocosas.

$$\sigma_h = \sigma_H = k * \sigma_v \quad \text{Ecu. 32}$$

En áreas tectónicas activas, el esfuerzo horizontal no es igual. El esfuerzo horizontal máximo será mayor o menor dependiendo de los movimientos tectónicos, debido a los esfuerzos tectónicos adicionales, t_h y t_H . En esas áreas, los esfuerzos efectivos horizontales son referidos a un valor máximo y mínimo.

$$\sigma_h = k * \sigma_v + t_h * \sigma_H = k * \sigma_v + t_H \quad \text{Ecu. 33}$$

En ambientes tectónicos extremos, t_H puede ser suficiente para hacer que el esfuerzo horizontal sea mayor que el esfuerzo vertical.

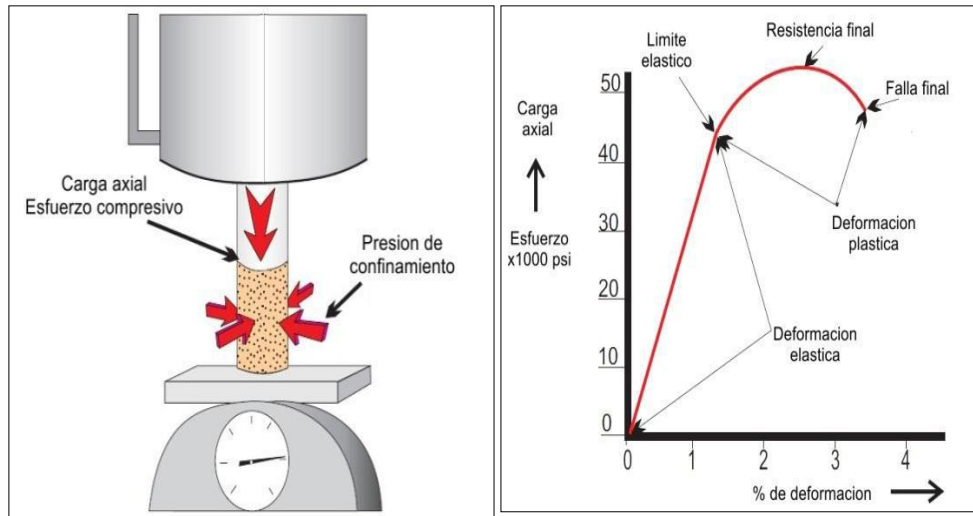
1.10.4. Resistencia de las rocas

La mecánica de rocas es el estudio del comportamiento mecánico de las rocas en el subsuelo.

Las muestras de núcleos (removidas de condiciones in situ) suelen ser probado bajo compresión con un equipo de laboratorio especializado. Para simular mejor las condiciones in situ, las muestras de núcleo probado tambadas son sometidas a una presión de confinamiento (esfuerzo). La roca responde a al esfuerzo debido al cambio en el volumen o forma (deformación) o ambos. El cambio en el volumen de roca o la forma debido a la tensión aplicada es llamado tensión.

Cuando las rocas son sometidas a compresión (+) o tensión (-), el esfuerzo puede pasar por tres fases de deformación de tensión. En la deformación elástica, la roca se deforma cuando se aplica un esfuerzo y luego al ceder esfuerzo, esta regresa a su forma original. En la deformación elástica, la tensión es proporcional al esfuerzo (Ley de Hooke) (figura 10)

Figura 10. Resistencia de las rocas



Fuente: Tomada y modificada, AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

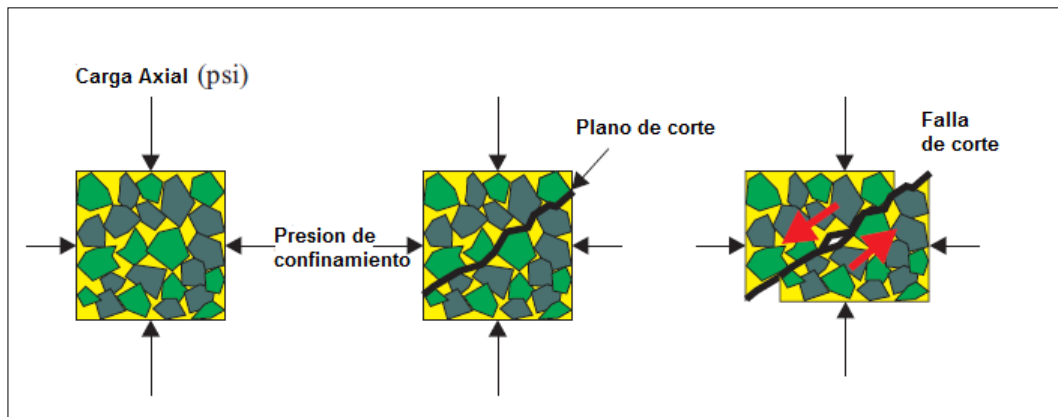
Cuando el esfuerzo aplicado alcanza el límite elástico, la roca comienza a exhibir deformación plástica. En la deformación plástica, la roca parcialmente sólo vuelve a su forma original cuando se alivia el esfuerzo. Si se continúa aplicando esfuerzo, se desarrollarán fracturas y la roca fallará (falla final).

Las rocas pueden fallar de manera frágil, por lo general bajo un bajo esfuerzo de confinamiento, o de una manera dúctil con un mayor esfuerzo de confinamiento.

1.10.4.1. Esfuerzo cortante y ruptura cortante o por cizallamiento:

Normalmente las rocas fallan bajo compresión; es más fácil deslizar un grano sobre otro que aplastarlos (figura 11).

Figura 11. Esfuerzo cortante y ruptura cortante o por cizallamiento



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

La alta presión de confinamiento resiste al deslizamiento sobre el plano de corte y la roca parece ser más fuerte. Si la presión de confinamiento y de la carga axial fuese igual, no habría ningún esfuerzo de corte en la roca y no habrá falla de corte.

Esfuerzos iguales prometen estabilidad y esfuerzos desiguales prometen esfuerzo de corte y posiblemente una ruptura cortante

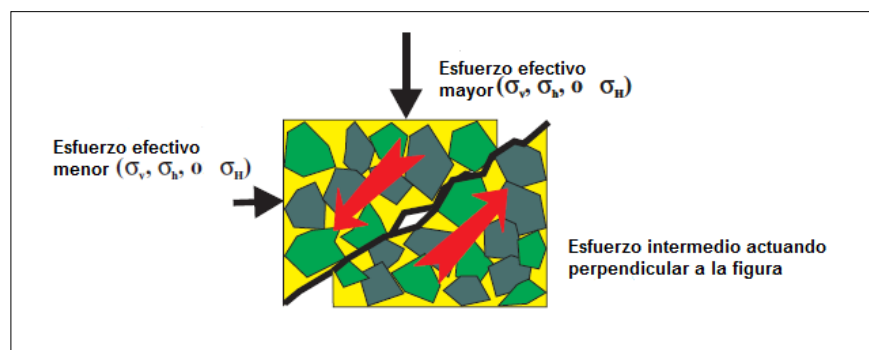
No es posible reproducir con precisión los efectos de la presión de poro en la resistencia de la roca al probar muestras de núcleos de campo. En condiciones reales de perforación, la presión de poro ejerce una fuerza que tiende a empujar los granos de la roca hacia afuera. Esta es la razón por la que se utilizan los esfuerzos efectivos en la mecánica de rocas cuando se aplica a los estudios de estabilidad del pozo.

La mecánica de rocas utiliza modelos de falla para predicciones de estabilidad de pozo. Uno de estos modelos toma en cuenta los tres esfuerzos efectivos para calcular el esfuerzo cortante resultante. El esfuerzo efectivo "medio" es utilizado por este modelo para describir el estado de esfuerzo de la roca.

$$\text{Esfuerzo efectivo medio} = \frac{\sigma_v + \sigma_h + \sigma_H}{3} \quad \text{Ecu. 34}$$

El modelo de falla utilizado por (Mohr-Coulomb) deja de lado los esfuerzos medios y solo considera los esfuerzos efectivos mayores y menores. El mayor esfuerzo de corte en una roca se produce bajo el plano de dos dimensiones y consiste en dos esfuerzos, uno mayor y otro menor. El esfuerzo más grande al menos podría ser cualquiera de los tres, dependiendo del ambiente in situ y de las condiciones del pozo.

Figura 12. Esfuerzo de corte



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

El esfuerzo de corte que falla una roca debe superar la resistencia de cohesión, S_o (Unión de los granos), y una resistencia friccional entre los granos ($\mu\sigma$). La resistencia friccional entre los granos es producto del coeficiente de fricción (μ) y el esfuerzo efectivo de compresión (σ).

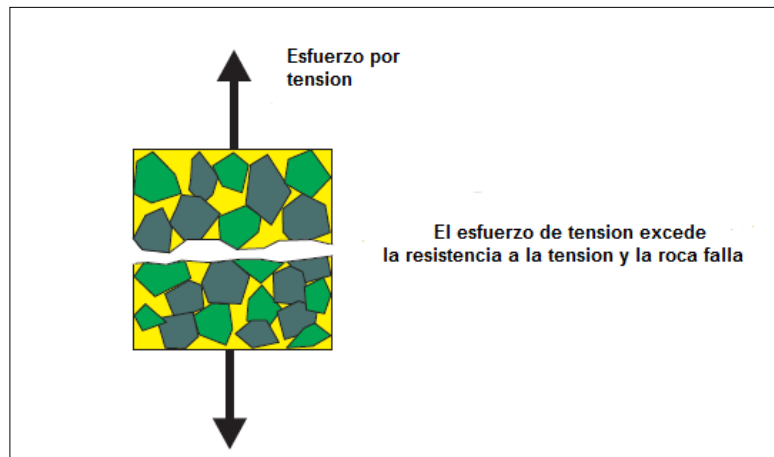
La resistencia al corte es definida como el esfuerzo de corte a la que la roca falla. El coeficiente de fricción es también expresado en términos del ángulo interno de fricción (φ)

La resistencia cohesiva (S_o) y el ángulo interno de fricción (φ) Se obtienen realizando ensayos de compresión en muestras de núcleos (o puede estimarse a partir de registros eléctricos) desde el campo. Es necesario realizar muchas pruebas de núcleos para determinar estos valores.

1.10.4.2. Falla por tensión:

Las fallas por tensión resultan de los esfuerzos contrarios que tienden a tirar la roca (esfuerzo por tensión). Las rocas muestran una baja resistencia a la tensión (figura 13).

Figura 13. Esfuerzo por tensión



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

1.11. ESTABILIDAD: DESPUES DEL POZO

1.11.1. Estado de esfuerzo cerca al pozo

Antes de perforar, el esfuerzo de las rocas es descrito por los esfuerzos in situ; esfuerzo efectivo de sobrecarga, esfuerzo mínimo horizontal y esfuerzo efectivo horizontal máximo. Esos esfuerzos se designan de siguiente forma ($\sigma_v, \sigma_h, \sigma_H$).

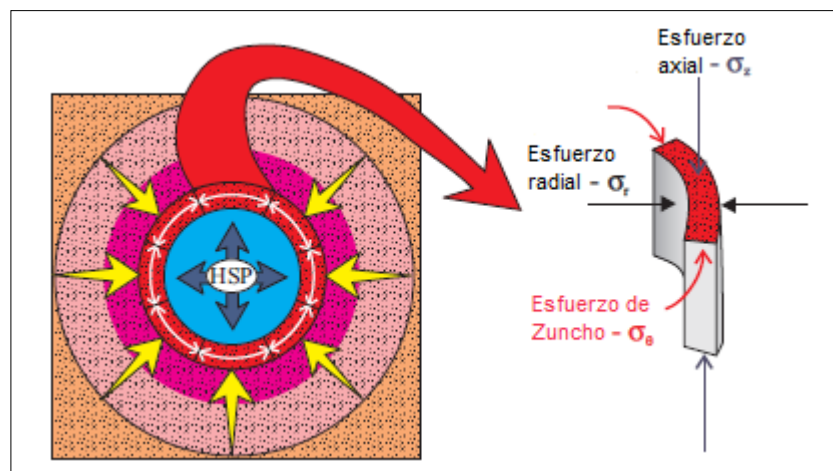
A medida que el hueco se perfora, es eliminado el apoyo prestado por la roca y reemplazado por la presión hidrostática. Este cambio altera los esfuerzos in situ.

El esfuerzo en cualquier punto cercano al pozo puede ser descrito en termino de: un esfuerzo radial que actúa a lo largo del radio del pozo; esfuerzo

tangencial que actúa alrededor de la circunferencia del pozo (tangencial); un esfuerzo axial actuando paralelo a la trayectoria del pozo. Estos esfuerzos se designan de siguiente forma ($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$). Adicionalmente las componentes de los esfuerzos de corte son: ($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$) (figura 14).

Cada uno de estos esfuerzos son perpendiculares y por conveniencia matemática, en el hueco se usa un sistema de coordenadas.

Figura 14. Esfuerzos y sistemas de coordenadas



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

1.11.2. Esfuerzo tangencial (σ_θ)

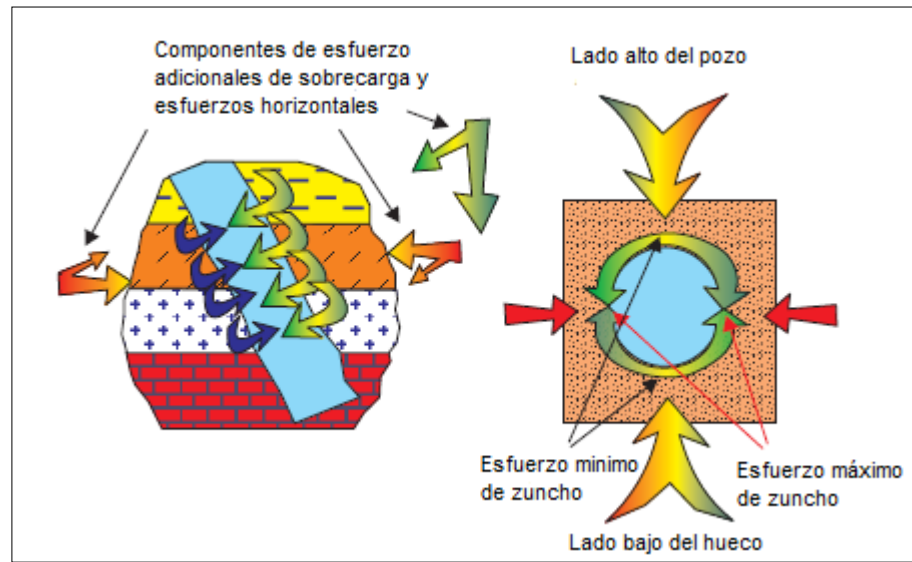
El esfuerzo tangencial depende de: la presión de pozo (P_w), la magnitud y orientación de la tensión in-situ, la presión de poro, dirección e inclinación del hueco. La presión de pozo (P_w) es directamente proporcional a (peso del lodo/ECD).

$$\sigma_\theta = [\text{insitu\¶metro de pozo}] - p_w - p \quad \text{Ecu. 35}$$

Para un pozo vertical con igual tensión horizontal, el esfuerzo tangencial depende del peso de la columna de lodo y de la magnitud de los esfuerzos horizontales que están igualmente distribuidos alrededor del pozo.

Lo mismo ocurre cuando se perfora un pozo vertical a condiciones in-situ con esfuerzos horizontales desiguales. El esfuerzo tangencial es máximo a los lados del pozo y perpendicular a la tensión horizontal máxima.

Figura 15. Componentes de esfuerzo



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

1.11.3. Esfuerzo axial (σ_z)

El esfuerzo axial se orienta por la trayectoria del pozo y puede ser distribuido desigualmente alrededor del pozo. el esfuerzo axial depende de: magnitud y orientación de la tensión in-situ; presión de poro, inclinación y dirección del hueco. El esfuerzo axial no es directamente afectado por el peso de la columna de lodo.

Para un pozo vertical con esfuerzos horizontales iguales ($S_h = S_H$), los esfuerzos axiales horizontales y verticales son iguales. El esfuerzo axial en

pozos desviados es la resolución de los esfuerzos horizontales y de sobrecarga.

1.11.4. Esfuerzo radial (σ_r)

El esfuerzo radial es una diferencia de presión entre el pozo y la presión de poro y actúa a lo largo del radio del pozo.

Dado que las presiones de pozo y de poros se derivan de la presión del fluido que actúa por igual en todas las direcciones, esta diferencia de presión actúa perpendicular a la pared del pozo, a lo largo del radio del agujero.

Esfuerzo radial = Presion de pozo – Presion de poro

$$\sigma_r = p_w - p$$

Ecua. 36

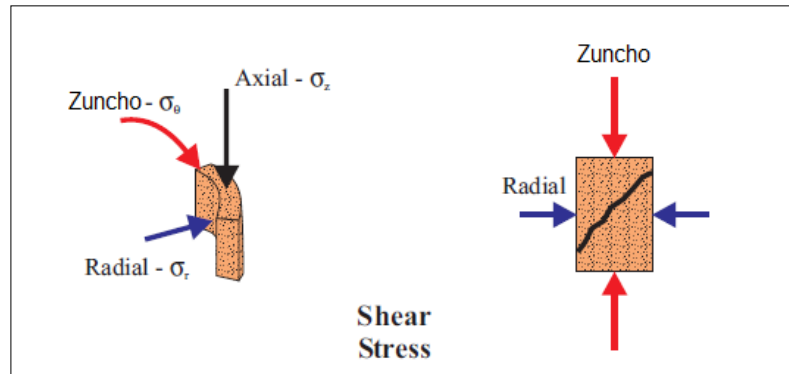
1.11.5. Estabilidad mecánica¹⁰

Los esfuerzos tangencial (σ_θ), radial (σ_r) y axial (σ_z) cerca al pozo describen estado de esfuerzo en la roca. La estabilidad mecánica es la administración de esos esfuerzos y del mismo modo prevenir fallas en las rocas por tensión o corte.

Normalmente, los esfuerzos son de compresión y crean esfuerzo cortante en la roca. Cuanto más iguales sean los esfuerzos, más estable es la roca (figura 16).

¹⁰ AMOCO. 1996. *Wellbore stability. Drilling handbook*. s.l. : Amoco production company, 1996.

Figura 16. Estabilidad mecánica



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

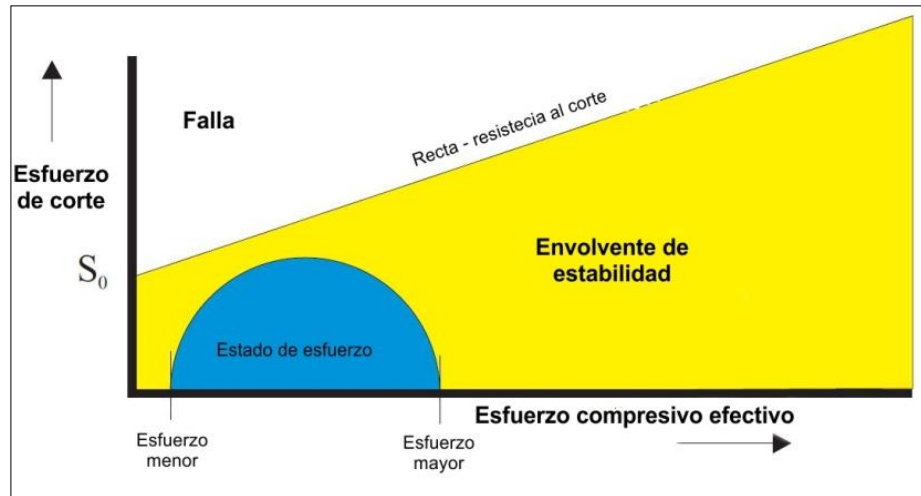
Como se muestra en la figura 16, El esfuerzo radial es la resistencia al corte causado por el esfuerzo tangencial.

Los esfuerzos tangencial, axial y radial se pueden calcular indicándose de mayor a menor por un semicírculo de estado de esfuerzo en un diagrama de estabilidad.

Una falla cortante aparece si el estado de esfuerzo queda fuera de la envolvente de estabilidad (figura 17). La falla por tracción se produce si el estado de esfuerzo cae a la izquierda del eje del esfuerzo de corte y excede la resistencia tensil de la roca.¹¹

¹¹ AMOCO. 1996. *Wellbore stability. Drilling handbook*. s.l. : Amoco production company, 1996.

Figura 17. Causas de la falla por tracción

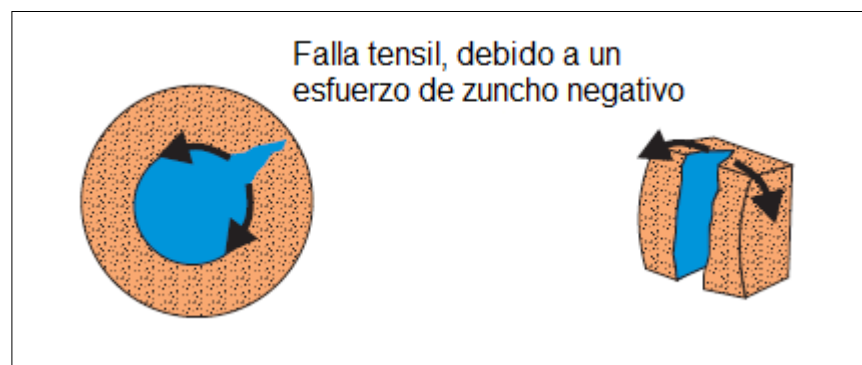


Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

Siempre los esfuerzos tangencial o la radial se convierten en tracción (negativa), la roca es propensa a fallar bajo tensión (figura 18).

Muchos eventos de equipo no programados son debidos a la perdida de circulación causados por fallas por tracción

Figura 18. Falla tensil debida a esfuerzo de zuncho negativa



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

La estabilidad mecánica se logra controlando los parámetros que afectan los esfuerzos tangencial, axial y radial.

Parámetros controlables:

- ✓ MW/ECD (peso molecular / densidad de circulación equivalente)
- ✓ Torta de lodo filtrante
- ✓ Trayecto del pozo - Inclinación y Azimut
- ✓ Perforación / practica de carreras
- ✓ Parámetros controlables
- ✓ Condiciones poco in Situ
- ✓ Formaciones adversas
- ✓ Trayectoria limitada del pozo

La estabilidad mecánica del pozo también se ve afectado por la interacción del fluido de perforación con la formación. La inestabilidad química eventualmente da como resultado una falla mecánica de la roca sea cortante o de tensión.

El tiempo también es una consideración importante. Los lodos de perforación son expuestos a lo largo de toda la formación, se incrementa la presión de poro cerca a la cara del pozo y el apoyo que pierde la roca es prestado por la columna de lodo.

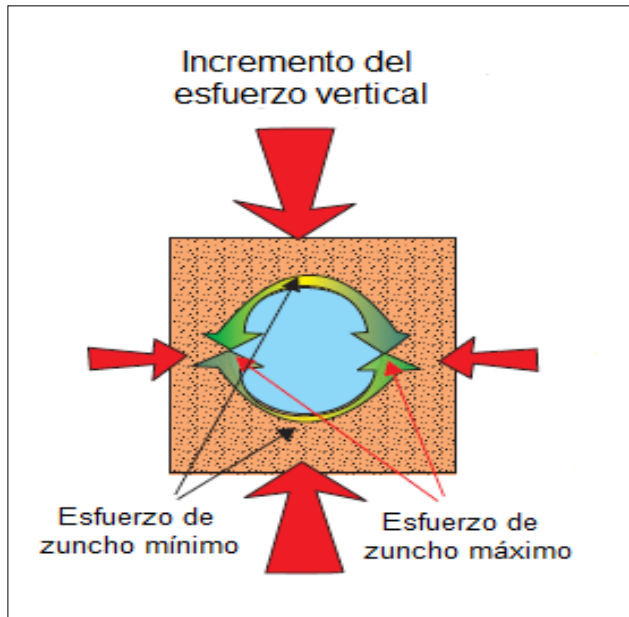
1.11.6. Dirección e inclinación del hueco:

La dirección e inclinación del pozo afectan en gran medida a la estabilidad del pozo. La distribución desigual de los esfuerzos tangencial y radial alrededor de la circunferencia del pozo tiende a hacer el pozo menos estable.

La perforación de un pozo horizontal hace que la distribución los esfuerzos radiales y tangencial alrededor del pozo cambien.

Antes de perforar verticalmente, en el pozo el esfuerzo tangencial se distribuye por igual. A medida que aumenta el ángulo a la horizontal, el esfuerzo tangencial decrece en la parte alta y baja del pozo, pero el zunchado aumenta en gran medida en los lados perpendiculares (figura 19).

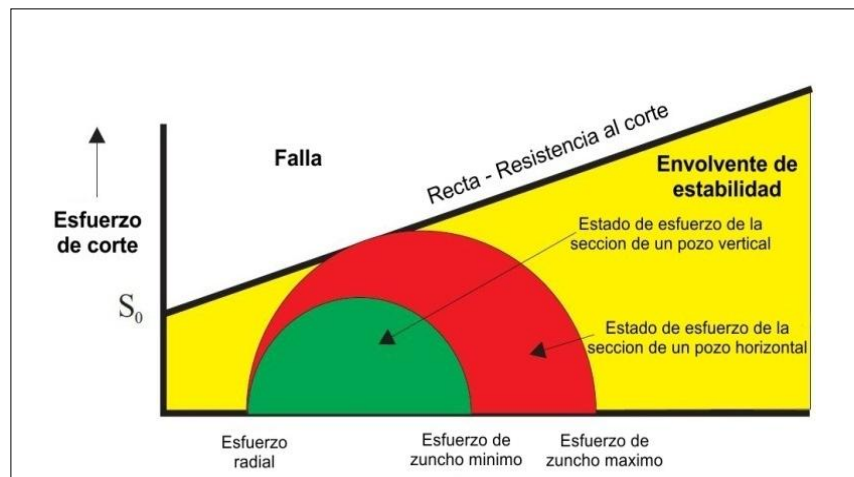
Figura 19. Inclinación y dirección del hueco



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

En la figura 20, se muestra el cambio del estado de esfuerzo en la pared del pozo. El esfuerzo radial se mantiene fijo, pero el incremento del esfuerzo tangencial incrementa el estado de esfuerzo.

Figura 20. Cambio en el estado de esfuerzo en la pared del pozo



Fuente: Tomado y modificado de AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.

CAPITULO II: CRITERIOS CONSIDERADOS EN LA ESTABILIDAD DE POZO.

2.1. CRITERIOS DE LOS MODELOS DE ESTABILIDAD DE POZO

2.1.1. Criterio de falla

Elegir adecuadamente el criterio de falla es tan importante como la correcta selección del modelo constitutivo. El tipo más simple de criterio se basa en el supuesto de que el sistema permanece estable mecánicamente hasta una cierta tensión o hasta cuando se logra un valor de falla (Charlez 1997b). Por ejemplo, en un análisis puramente elástico, los esfuerzos se comparan con un criterio de máxima resistencia, normalmente se define en términos de esfuerzos principales. Sin embargo, se considera impropio el hecho de que la falla del sistema dependa de un solo punto localizado. Por otro lado, cuando las propiedades plásticas de la roca se tienen en cuenta, el comportamiento de la roca se caracteriza por un criterio de rendimiento. En este caso, los esfuerzos plásticos se desarrollan una vez que el estado de esfuerzo alcanza el criterio de rendimiento en lugar de en un punto de máxima resistencia.

2.1.2. Criterio de falla por tensión

Según McLean y Addis (1990b), la falla por tensión en un pozo inicia cuando el esfuerzo efectivo mínimo σ'_{min} en la pared del pozo es mayor que la resistencia a la tensión de la formación σ_t . La falla ocurre cuando:

$$\sigma_t < \sigma'_{min} \quad \text{Ecu. 37}$$

Se propone que una vez que ocurre la falla por tensión en la pared del pozo, el criterio para evaluar si la fractura debida a la tensión se propagará hacia el interior de la formación está dado por la siguiente relación:

$$P_w \geq \sigma_{min} \quad \text{Ecu. 38}$$

2.1.3. Criterio de falla por compresión:

En contraste con la sencillez del criterio de falla por tensión, el criterio de falla por compresión requiere más análisis. Existen numerosos criterios de falla propuestos para predecir la falla de la roca bajo compresión. Uno de los criterios conocidos es el criterio Mohr-Coulomb. Este criterio se puede expresar en términos de esfuerzos principales de la siguiente manera:

$$\sigma_{max} - P_o = \frac{1+\sin f}{1-\sin f}(\sigma_{min} - P_o) + \frac{ac \cos f}{1-\sin f} \quad \text{Ecu. 39}$$

2.2. CRITERIOS DE ROTURA Y CLASIFICACIONES GEOMECHANICAS

2.2.1. Definición de criterio de rotura general

Existen dos formas para definir el comportamiento de una roca en rotura: mediante el estado de tensiones o mediante el de deformaciones. Normalmente se utiliza la primera (González Vallejo, 2002). De esta forma, se toma como resistencia de la roca la máxima tensión que ésta puede soportar.

Para cualquier punto del macizo el tensor de tensiones viene definido por seis componentes, tres componentes normales, y tres componentes tangenciales, $\sigma_{xi}, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}, \tau_{xyi}, \tau_{yzi}, \tau_{xzi}$, en un sistema de coordenadas (x, y, z). Dependiendo de la magnitud y dirección de las seis componentes del tensor, se obtienen las tres tensiones principales, $\sigma_{1i}, \sigma_{2i}, \sigma_{3i}$, donde σ_{1i} es la tensión mayor, σ_{2i} la tensión intermedia y σ_{3i} la tensión menor.

En el caso de un material isótropo (material que presenta las mismas característica físicas en cualquier dirección), cualquier dirección es dirección principal, con lo que las tres tensiones principales se representan $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. En este caso se define como criterio de rotura a la superficie f , que delimita en el espacio de tensiones principales $(\sigma_{1i}, \sigma_{2i}, \sigma_{3i})$, un cierto dominio que llamamos dominio elástico viene expresado por la siguiente ecuación:

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

Ecu. 40

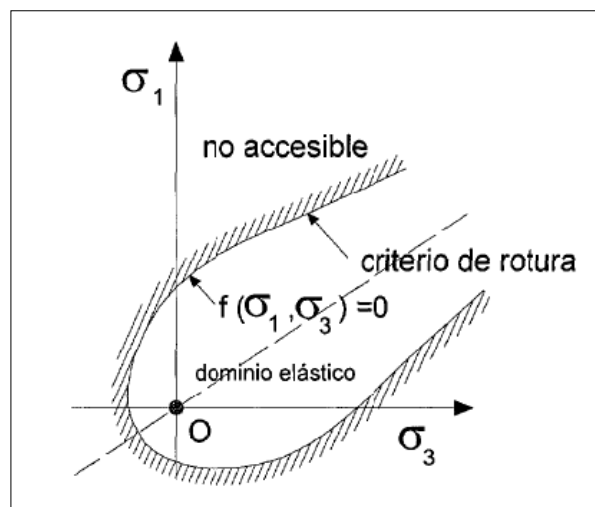
En general, los equipos utilizados para la obtención de resultados experimentales nos dan datos sobre las tensiones principales, si a esto le añadimos que la tensión intermedia (σ_2) se suele ignorar, el criterio de rotura se define bidimensionalmente en función de la tensión mayor (σ_1), y la tensión menor (σ_3), como:

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

Ecu. 41

f Es la superficie que limita el dominio elástico del material, en el espacio bidimensional de tensiones principales, y la ecuación que describe esta superficie de fluencia es el criterio de rotura (figura 21).

Figura 21. Representación del criterio de rotura en términos bidimensionales,



Fuente: Modificada según Melentijevic, 2005.

Los puntos representados encima del dominio elástico ($f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$) están en situación de rotura, por el contrario, los puntos del macizo con estado tensional en el interior del dominio elástico no están en rotura, sino que están en estado elástico. Los puntos del exterior del dominio elástico son puntos tensionales

inaccesibles, es decir no se pueden obtener dichas tensiones para el macizo en cuestión.

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

2.2.2. Criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb, introducido por primera vez por Coulomb en el año 1773, inicialmente pensado para el estudio en suelos, es un criterio de rotura lineal. Esto significa, tal y como se ha indicado anteriormente, que la ecuación que define la superficie de fluencia es una ecuación lineal.

Aunque el comportamiento de la roca en un ensayo triaxial no concuerda con un modelo lineal, Mohr-Coulomb se sigue utilizando mucho por su sencillez y comodidad.

Generalmente para el caso del criterio de Mohr-Coulomb, se define el criterio de rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. En este caso la superficie de fluencia es de la forma $\tau = f(\sigma)$. La expresión matemática de dicha ecuación es:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad \text{Ecu. 42}$$

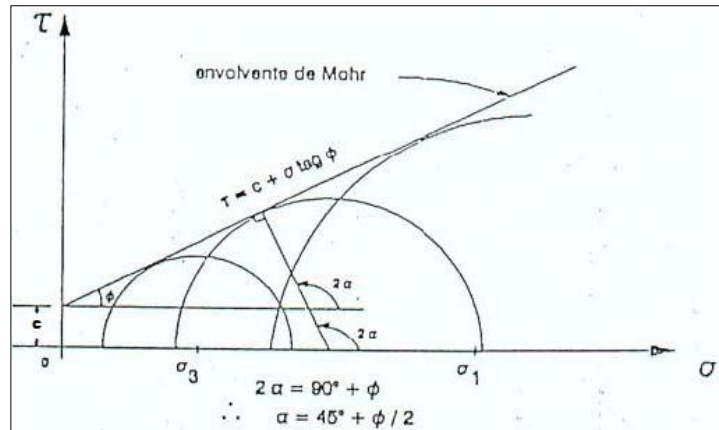
Donde:

- ✓ c = Es la cohesión, una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.
- ✓ ϕ = Es el ángulo de fricción
- ✓ τ = Es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura
- ✓ σ_n = Es la tensión normal que actúa en el plano de rotura

A continuación en la figura 22, se representa el criterio de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. Se puede apreciar que la ecuación

de la superficie de rotura es la ecuación de la recta tangente a todos los círculos de falla.

Figura 22. Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial.



Fuente: Modificada según Melentijevic, 2005.

En este caso, el dominio elástico viene representado por la envolvente de Mohr. Por lo tanto, los puntos del macizo con estado tensional por debajo de dicha envolvente están en un estado elástico mientras que los que se sitúan encima se encuentran en rotura. La zona de estados tensionales inaccesibles para este macizo es aquella que se encuentra por encima de la envolvente de Mohr.

Aunque anteriormente se ha dicho que es usual describir el criterio de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones tangencial y normal, éste también se expresa en el espacio de tensiones principales de la forma.

$$\sigma_1 = N_\phi \sigma_3 + 2c\sqrt{N_\phi} \quad \text{Ecu. 43}$$

Donde

$$N_\phi = \tan^2 \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right] \quad \text{Ecu. 44}$$

Donde c y ϕ vuelven a ser la cohesión y el ángulo de fricción respectivamente.

2.3. ELEMENTOS AXISIMÉTRICOS

2.3.1. Simetría axial

La simetría axial (también llamada rotacional o radial o cilíndrica) es la simetría alrededor de un eje, de modo que un sistema tiene simetría axial o axisimetría cuando todos los semiplanos tomados a partir de cierta mediatriz y conteniéndolo presentan idénticas características. También puede decirse que es una isometría indirecta e involutiva.¹²

Dada una recta e se llama simetría axial de eje e al movimiento que transforma a un punto P en otro punto P' verificando que:

- ✓ El segmento PP' es perpendicular a e .
- ✓ Los puntos P y P' equidistan del eje.

Dicho de otra forma el eje e es la mediatriz del segmento PP'

La simetría axial no solo se presenta entre un objeto y su reflexión, porque muchas figuras que mediante una línea pueden partirse en dos secciones que son simétricas con respecto a la línea. Estos objetos tienen uno (o más) ejes de simetría.

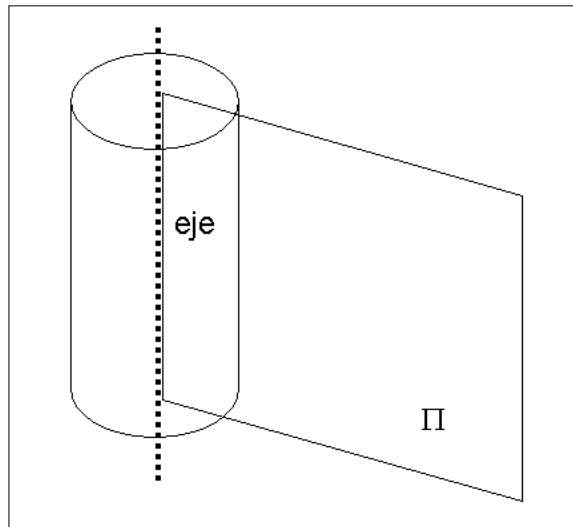
La simetría axial se da cuando los puntos de una figura coinciden con los puntos de otra, al tomar como referencia una línea que se conoce con el nombre de eje de simetría. En la simetría axial se da el mismo fenómeno que en una imagen reflejada en el espejo.

A los puntos que pertenecen a la figura simétrica se les llama puntos homólogos, es decir, A' es homólogo de A , B' es homólogo de B , y C' es homólogo de C . Además, las distancias existentes entre los puntos de la figura original son iguales que las distancias entre los puntos de la figura simétrica. En este caso: La simetría axial se puede dar también en un objeto con respecto de uno o más ejes de simetría.

¹² Girbau, J: Geometría diferencial, relatividad, Ed.Universidad Autónoma de Barcelona.

Si se doblara la figura sobre el eje de simetría trazado, se podría observar con toda claridad que los puntos de las partes opuestas coinciden, es decir, ambas partes son congruentes.

Figura 23. Problema axisimétrico con respecto a un eje, la situación en todos los semiplanos Π .



Fuente: Tomado de Girbau, J: Geometría diferencial relativa, Ed Universidad Autónoma de Barcelona, 2011.

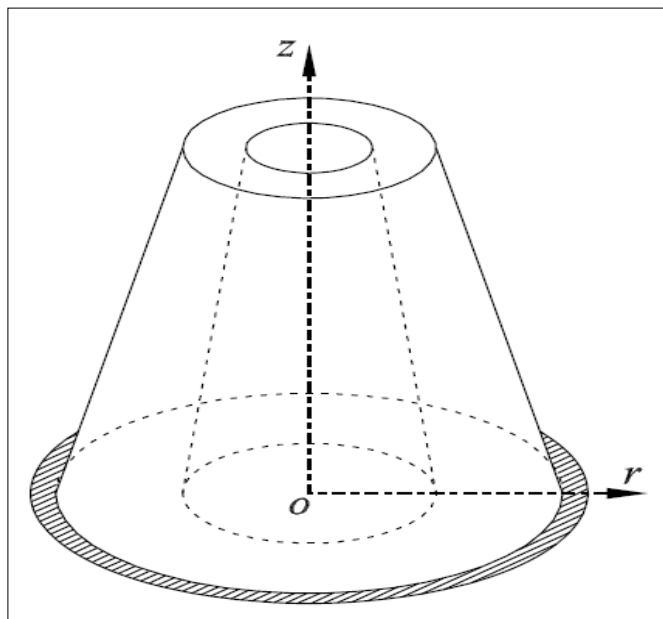
Los elementos axisimétricos introducidos en la serie de Fourier en las funciones de interpolación para describir el cambio de desplazamientos de la circunferencia. Por lo tanto los elementos, puede aplicarse a cualquier tipo de análisis, incluyendo análisis geométricas no lineales y pueden soportar cualquier modo de carga y de deformación.

La axisimetría de modelos con elementos finitos puede ser utilizada para representar estructuras tridimensionales, mostrando una simetría alrededor de un eje central de rotación. Para elementos convencionales axisimétricos son aceptables para modelar una estructura, la geometría del cuerpo, cargas, condiciones límites y propiedades de materiales. Los tipos comunes de elementos elásticos axisimétricos, incluye dos y tres arandelas de nodos, tres y seis triángulos de nodo, cuatro y ocho cuadriláteros de nodos. Estructuras

comúnmente modeladas usando elementos elásticos axisimétricos son paredes gruesas a altas presiones, masas sometidas a cargas circulares, y volantes en inercia que gira a velocidades angulares constantes.¹³

Sea la estructura axisimétrica con ejes r y z mostrado en la figura, al cual están asociados dos desplazamientos y fuerzas por nodo¹⁴.(Figura 24)

Figura 24. Elemento axisimétrico, Geometría,

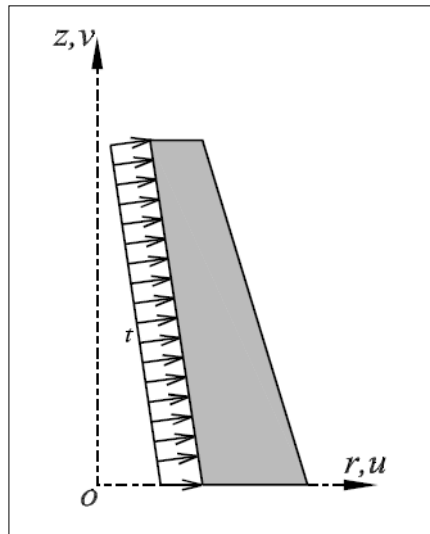


Fuente: Tomado y modificado de GJL; UAM, 2011.

¹³ Numerical Integration in the axisymmetric finite element formulation; J.D. Clayton, J.J. Rencis

¹⁴ Girbau, J: Geometria diferencial, relatividad, Ed.Universidad Autonoma de Barcelona

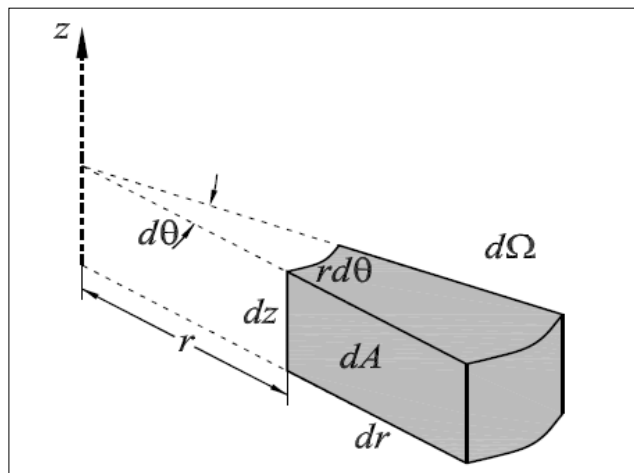
Figura 25. Elemento axisimétrico, Corte.



Fuente: Tomado y modificado de GJL; UAM, 2011.

Para la formulación de elementos axisimétricos se considera un elemento diferencial como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Diferencial de volumen $d\Omega$,



Fuente: Tomado y modificado de GJL; UAM.

2.3.2. Aproximación del campo de desplazamientos.

El campo de desplazamientos se aproxima:

$$u(r, z) = \begin{Bmatrix} u(r, z) \\ v(r, z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & \dots & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & \dots & 0 & N_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{r1} \\ d_{z1} \\ \vdots \\ d_{rn} \\ d_{zn} \end{Bmatrix} \quad \text{Ecu. 45}$$

2.3.3. Aproximación de las ecuaciones cinemáticas

Las ecuaciones cinemáticas son:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \quad \varepsilon_z = \frac{dv}{dz}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}; \quad \gamma_{rz} = \frac{dv}{dz} + \frac{du}{dr} \quad \text{Ecu. 46}$$

En forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1}{r} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad \text{Ecu. 47}$$

Se sustituye la ecuación de aproximación de campos de desplazamientos en la forma matricial de aproximación cinemática.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{,r} & 0 \\ 0 & N_{,z} \\ N/r & 0 \\ N_{,z} & N_{,r} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{r1} \\ d_{z1} \\ \vdots \\ d_{rn} \\ d_{zn} \end{Bmatrix} \quad \text{Ecu. 48}$$

2.3.4. Aproximación de las ecuaciones constitutivas.

En el caso de elementos en 2D la ecuación constitutiva:

$$\sigma = C\varepsilon \quad \text{Ecu. 49}$$

La matriz constitutiva C se define como:

$$C = d_1 \begin{bmatrix} 1 & d_2 & d_2 & 0 \\ d_2 & 1 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ecua. 50}$$

Donde d_1 , d_2 y d_3 son los correspondientes al estado de deformación plana.

2.3.5. Calculo de matriz de rigidez

La matriz de rigideces se calcula como:

$$K = \int_{\Omega} B^T C B d\Omega \quad \text{Ecua. 51}$$

Si el diferencial de volumen es $d\Omega = r d\theta dr dz$, se tiene:

$$K = \int_0^{2\pi} \left[\int_A B^T C B r dr dz \right] d\theta = 2\pi \int_A B^T C B r dr dz \quad \text{Ecua. 52}$$

Para formulaciones de elementos axisimétricos en coordenadas naturales la diferencial de área será: $dr dz = |J| d\xi d\eta$, por lo que la ecuación anterior:

$$K = 2\pi \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T C B N_i r_i |J| d\xi d\eta; \quad N_i r_i = r_m \quad \text{Ecua. 53}$$

Donde r_m se define como:

$$r_m = \frac{r_1 + r_2 + \dots}{\text{Núm.de nodos}} \quad \text{Ecua. 54}$$

CAPITULO III: GENERALIDADES SOBRE LOS PARAMETROS PARA REALIZAR UN ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Para llevar a cabo un análisis de estabilidad se requiere la determinación de algunos parámetros no manejables y pueden ser agrupados de la siguiente manera:

- ✓ Esfuerzos in situ.
- ✓ Presión de poro.
- ✓ Parámetros elásticos de la roca de formación.
- ✓ Parámetros de resistencia de la roca de formación.
- ✓ Parámetros petrofísicos de la roca de formación.
- ✓ Geometría de pozo (Manejable)
- ✓ Historia de pozo (Manejable)

Estos parámetros son necesarios para alimentar la herramienta, con el propósito de validarla con información de pozos ya perforados o para predecir las mejores condiciones que deberían ser seleccionadas para perforar un pozo.

3.1. Esfuerzos in situ

Estos esfuerzos corresponden al estado existente en la formación antes de la perforación, son denominados tradicionalmente como esfuerzos principal vertical o litostático, horizontal máximo y horizontal mínimo. Existen diversos factores que pueden conducir a que la premisa anterior no sea válida, como por ejemplo, la actividad tectónica, heterogeneidades, fracturas y factores ambientales. Estos esfuerzos son dependientes de la litología, de la profundidad, eventos geológicos que hayan ocurrido en la cuenca, entre otros.

Técnicamente, los esfuerzos in situ no son propiedades mecánicas de la roca de formación pero influyen los parámetros elásticos y de resistencia; el nivel de esfuerzos in situ determina si una roca está críticamente cargada o no.

Se requiere conocer tanto la magnitud como la orientación de los esfuerzos in situ para realizar un análisis de estabilidad de pozo. Para este propósito existen diversos métodos que permiten conocer el tensor de esfuerzos in situ, entre los métodos más conocidos están:

Métodos indirectos:

- ✓ Flujo direccional.
- ✓ Breakouts en pozos.
- ✓ Pérdida de lodo.

Métodos directos.

- ✓ Pruebas de Leak Off (LOT)
- ✓ Pruebas de mini-fractura (mini frac)
- ✓ Pruebas de integridad.
- ✓ Registros de densidad.

3.2. Esfuerzo vertical

Este esfuerzo se define como el peso de sobrecarga de los estratos suprayacentes a la profundidad de interés. Se determina generalmente como la integral del producto de la profundidad y la gravedad específica de la masa de roca:

$$\sigma_z = \int_0^z \rho(z)gdz \quad \text{Ecu. 55}$$

El gradiente de este esfuerzo es generalmente 1 psi/ft; en una cuenca de régimen pasivo este es el esfuerzo principal in situ máximo. Este gradiente de sobrecarga se determina generalmente a partir de registros de densidad.

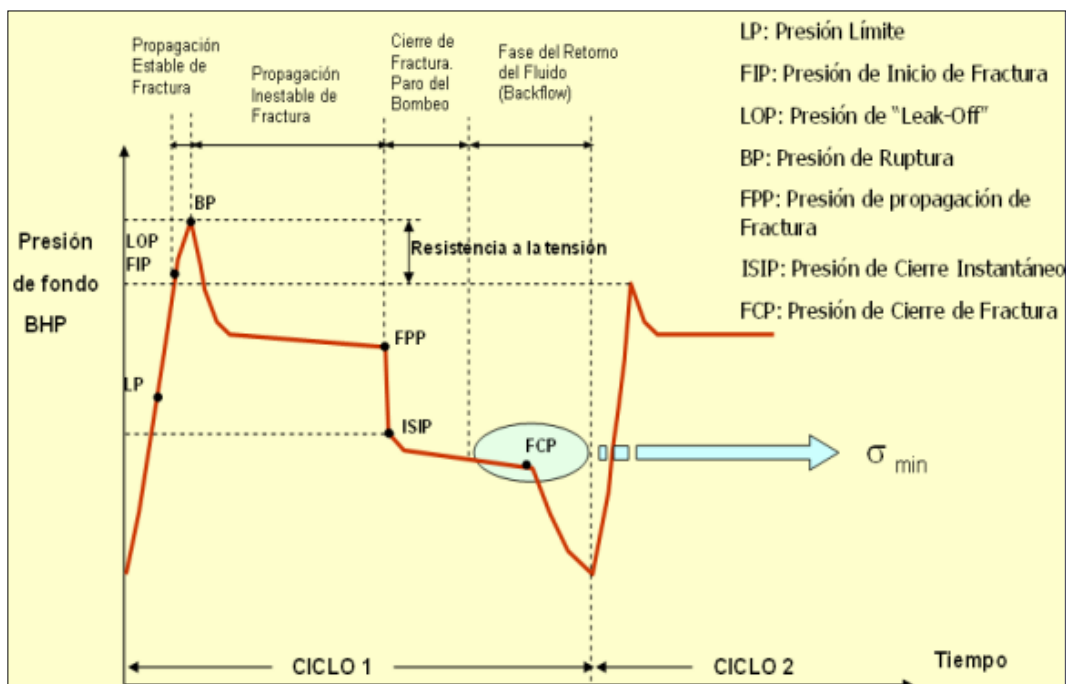
3.3. Esfuerzos horizontal mínimo.

La magnitud de este esfuerzo puede ser determinado de pruebas directas como el fracturamiento hidráulico, Pruebas Leak-Off (LOT, se registra en rocas

porosas), MiniFract, entre otras, mediante la determinación del gradiente de fractura para una formación. La figura presenta un esquema general de las variables involucradas en la determinación del esfuerzo mínimo.

Por otro lado, las fallas compresivas como los breakouts (Babcock 1978. Gough y Bell, 1982) pueden ser detectadas por herramientas como el dipmeter (cáliper de 4 brazos) y registros de imágenes (tanto sónicos como eléctricos) indican la dirección de los esfuerzos tanto horizontal máximo como el mínimo. La mayoría de los Breakouts tienen mayor ocurrencia en shales y carbonatos que en areniscas.

Figura 27. Diagrama genérico de una prueba ELOT,



Fuente: Tomado y modificado de Cabera, 2003

3.4. Esfuerzo horizontal máximo.

No existen métodos directos para determinar este esfuerzo. Entre los métodos indirectos se encuentran el análisis de la curva deformación diferencial (DSCA) y la prueba de recuperación de deformación inelástica (ARS). Los registros de

imágenes son una tecnología moderna que permite determinar la magnitud y dirección de este esfuerzo a partir de las fallas presentadas en el pozo como las de Breakout y/o fracturas de tensión inducidas (Zoback, 1982).

La ecuación 55 presentada a continuación es aplicable para pozos verticales (y para pozos con menos de 10° de inclinación), esto se debe a que su deducción parte de la ecuación 55 (Kirsch y Bradley), la cual es exclusivamente para pozos verticales. Lo anterior es importante resaltarlo debido a la gran ponderación que tienen los esfuerzos in situ en los análisis de estabilidad.

$$\sigma_H = \frac{C_o + P_w + P_o - \sigma_h(1 - 2 \cos 2\theta_b)}{(1 + 2 \cos 2\theta_b)} \quad \text{Ecu. 56}$$

$$C_o = \sigma_\theta = \sigma_h + \sigma_H + 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta_b - 2P_o - \Delta P \quad \text{Ecu. 57}$$

Para la aplicación de la Ec. 57 a se requiere conocer la resistencia compresiva uniaxial C_o , la magnitud del esfuerzo mínimo horizontal σ_h , y el ancho del ángulo de falla del Breakout θ_b .

Este esfuerzo (horizontal máximo) puede ser determinado también de Fracturas de tensión inducidas (Zoback and Haimson, 1982 Plumb and Hickman, 1985), las cuales son aberturas verticales que aparecen en las paredes del pozo, separadas 180° una de la otra. Se producen como resultado de la concentración de esfuerzos alrededor del pozo durante la perforación los cuales exceden la resistencia tensil de la roca (Moos y Zoback, 1990).

$$\sigma_H = 3\sigma_h + T_o - P_w - P_o \quad \text{Ecu. 58}$$

Para calcular la magnitud del esfuerzo horizontal máximo a partir de las fallas inducidas de tensión se requiere conocer: la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo y la resistencia tensil de la roca de formación. Como se explicó para el caso de determinación del esfuerzo horizontal máximo a partir de breakouts, esta ecuación (5.35) es aplicable igualmente para pozos verticales y para pozos con inclinaciones menores de 10°, la cual es aplicable exclusivamente para pozos verticales.

3.5. Presión de poro.

La presión de poro es un parámetro de mucha importancia en el planeamiento de la perforación de un pozo. Puede ser determinada mediante técnicas directas o indirectas:

Directas como: las pruebas RFT, DST, MAT, Buldup, el exponente d y exponente d corregido; ecuación modificada de Eaton (1975), la cual involucra parámetros de perforación: Medidas Indirectas como: los registros sínicos, de resistividad y densidad.

El gradiente de presión de poro normal P_{on} , está dado para la densidad del agua salada en 0.465 psi/ft y el gradiente para una columna de agua dulce en 0.4333 psi/ft.

3.6. Propiedades de resistencia del material.

Estas propiedades son usadas en los criterios de falla compresivos y tensil para determinar el momento en que se producirá la falla bajo unas condiciones dadas. La resistencia del material depende de la interacción de factores extrínsecos e intrínsecos. Entre los factores extrínsecos se encuentran: el estado de esfuerzos, tasa de deformación, la temperatura, entre otros. Mientras que entre los factores intrínsecos están dados por: la porosidad, tamaño de grano, la mineralogía, el tipo de cemento, entre otros (Osorio, 2000).

La resistencia in situ es difícil de determinar o medir por lo que se han desarrollado correlaciones semi-empíricas como:

3.6.1. Cohesión (S_o)

Este parámetro es medido en laboratorio mediante pruebas triaxiales, de información de registros Acústico. Este parámetro puede ser calculado por las siguientes correlaciones propuestas por Schlumberger y Àmoco respectivamente.

$$S_o = 5,48 \times 10^{21} \rho^2 V_p^4 \left(\frac{1+v}{1-v} \right)^2 (1 - 2v)(1 + 0,78V_{Sh}) \quad \text{Ecu. 59}$$

Donde S_o está dada en MPa, ρ es la densidad de la matriz de roca en kg/m^3 , V_p es la velocidad de onda compresional en m/s, v es la relación de poisson.

$$S_o = 5 \frac{(V_p - 1)}{\sqrt{V_p}} \quad \text{Ecu. 60}$$

Donde S_o esta en MPa y V_p en km/s.

Las ecuaciones de resistencia del material son usadas preferiblemente para arena y shale respectivamente.

3.6.2. Angulo de fricción, ϕ

Este permite representar en algunos modelos geomecánicos el aumento de la resistencia del material a la cizalla. Se determina en laboratorio de pruebas triaxiales, de información de registros se puede calcular como se muestra en las ecuaciones (5.39) y (5.40) propuestas por Àmoco.

$$\phi = \arcsen \left(\frac{V_p - 1}{V_p + 1} \right) \quad \text{Ecu. 61}$$

$$\phi = 0,0002848 \text{Exp} \left(\frac{0,7086V_p}{0,3048} \right) + 23,14 \quad \text{Ecu. 62}$$

3.6.3. Resistencia a la tensión (T_o)

Se define como el máximo esfuerzo de tensión que soporta la roca antes de fallar, ésta es utilizada en el criterio de falla tensil. La siguiente expresión permite calcularla si se conoce la resistencia compresiva uniaxial.

$$T_o = \frac{1}{12} C_o = 0,8333 UCS \quad \text{Ecu. 63}$$

3.7. Propiedades elásticas de la roca de formación.

Las técnicas sugeridas para determinar las constantes elásticas son dadas por la ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas). Estas propiedades pueden ser medidas directamente de muestras de rocas (núcleos de corazones) o por métodos indirectos: de registros como el sónico, densidad o por medio de velocidades acústicas (resultando las llamadas constantes dinámicas).

Las constantes mecánicas requeridas dependerán de la teoría seleccionada para el análisis de estabilidad.

3.8. Constantes elásticas.

Se requieren sólo dos constantes para caracterizar el comportamiento de un medio elástico lineal. Entre éstas está el módulo de Young, la relación de Poisson, el módulo de Corte, el módulo volumétrico y las constantes de Lamé. De métodos directos como las pruebas de laboratorio se obtienen gráficas de donde es posible determinar los parámetros mencionados.

De información de registros, estos parámetros pueden ser determinados de las siguientes correlaciones:

$$G = \rho V_s^2 \quad \text{Ecua. 64}$$

$$\lambda = \rho V_p^2 - 2\rho V_s^2 \quad \text{Ecua. 65}$$

Donde G y λ son los parámetros de Lamé.

3.9.4. Geometría del pozo:

Esta categoría se refiere al diámetro del pozo, que se requiere para calcular el tiempo adimensional, la consolidación entre otros parámetros. También son incluidos aquí el TVD, MD, azimut e inclinación.

CAPITULO IV: CARACTERISTICAS DEL SOFTWARE MODELAMIENTO: ABAQUS.

4.1. Descripción y validación del software ABAQUS

ABAQUS es un programa destinado a resolver problemas de ciencias e ingeniería y está basado en el método de los elementos finitos. El programa puede resolver casi todo tipo de problemas, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales. ABAQUS posee una extensa librería de elementos finitos que permite modelar virtualmente cualquier geometría, así como su extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran mayoría de materiales, permitiendo su aplicabilidad en distintas áreas de ingeniería.

El método de los elementos finitos supone que el comportamiento mecánico de un continuo, está conformado por un número finito de partes o elementos. Sobre estas partes o elementos son consideradas las propiedades del material y las relaciones constitutivas, donde a su vez, estos elementos se encuentran conectados entre si por un número discreto de puntos llamados nodos, localizados en sus contornos.

ABAQUS presenta una extensa librería de elementos finitos, que proporciona una poderosa herramienta para la solución de una gran variedad de problemas. En este capítulo se describen las características más resaltantes de cada uno de los elementos de la librería.

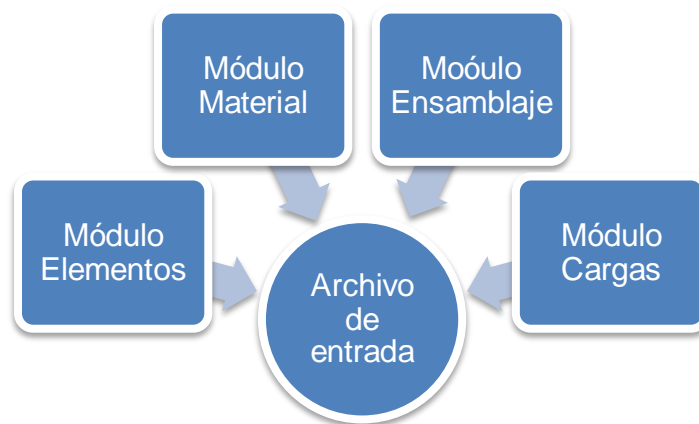
4.2. Definición de un modelo en ABAQUS.

ARCHIVO DE ENTRADA: Un archivo de entrada es un archivo de datos, que puede ser creado usando un editor de texto o un preprocesador gráfico tal como ABAQUS/Cae. El archivo de entrada consiste en una serie de líneas que contienen opciones (palabras claves), líneas de datos y líneas de comentarios. La gran mayoría de los archivos de entrada contienen la misma estructura

básica, por lo tanto, en los siguientes párrafos se describen las partes que definen un modelo de elementos finitos:

1. Un archivo de entrada debe comenzar con la opción **Heading*, la cual es usada para definir el título del modelo a analizar. Cualquier número de líneas pueden ser usadas para definir el título, y este aparecerá como título en los archivos de salidas.
2. Después del título, el archivo de entrada contiene una sección de datos del modelo para definir: nodos, elementos, propiedades de los materiales, condiciones iniciales, etc. El modelo puede ser organizado dentro de un ensamblaje de las partes instadas, es decir utilizando Abaqus/Cae, de esta manera el preprocesador grafico escribe el archivo de entrada.
3. Finalmente, el archivo contiene una historia de datos que definen el tipo de análisis, cargas y salidas requeridas.

Figura 28. Módulos cargados en un archivo de entrada para ABAQUS



Fuente: ABAQUS programa de elementos finitos, Maylett Y. Uzcátegui Flores.

4.2.1. Data del modelo:

Los datos del modelo definen los nodos, elementos, propiedades, tipo de elemento finito o de usuario a usar, condiciones iniciales, etc. La siguiente data debe ser incluida de forma obligatoria dentro del archivo de entrada:

1. Geometría: La geometría del modelo es definida por los elementos y sus nodos.
2. Propiedades de los Materiales: Las propiedades de los materiales deben estar asociadas a los elementos y dependen del tipo de elemento finito o de usuario a utilizar.

✓ **Como datos opcionales se tiene:**

1. Partes y un ensamblaje: La geometría de un modelo puede ser definida a través del modulo Partes de ABAQUS/Cae, las cuales son ensambladas unas respecto a las otras.
2. Condiciones iniciales: Se pueden especificar condiciones iniciales no nulas de esfuerzos, deformaciones, temperatura o velocidad.
3. Condiciones de borde: Condiciones de borde que son impuestas, tales como condiciones de simetría, desplazamiento o rotaciones.
4. Interacciones: Contacto y otras interacciones entre las partes pueden ser definidas.
5. Definición de Amplitud: Curvas de amplitud pueden ser definidas para casos en los que se tiene cargas que dependen del tiempo o condiciones de contorno.
6. Continuación del análisis: Es posible usarlos resultados de un análisis previo y continuar el análisis con un nuevo modelo o historia de datos.

4.2.2. Historia de data:

El propósito de un análisis es predecir la respuesta de un modelo sometido a una carga externa. En el presente programa el análisis de elementos finitos está basado en el concepto de steps, el cual es descrito en la historia de datos del archivo de entrada. A través de los Steps se introducen cambios en las condiciones de contorno, en las cargas o el tipo de análisis, es importante destacar que no existe límite en el número de steps dentro de un análisis.

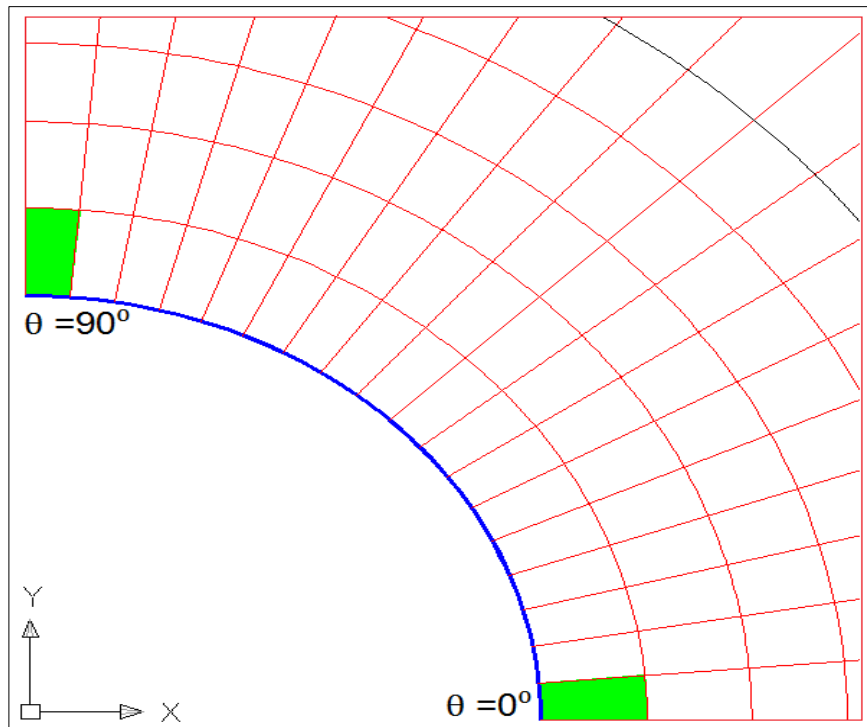
El estado de la estructura al final de un Step provee las condiciones iniciales para el próximo paso del análisis, obteniéndose fácilmente simulaciones consecutivas de condiciones de cargas para un modelo; por ejemplo, se puede obtener la respuesta dinámica de una estructura luego de ser sometida a cargas estáticas iniciales. Finalmente, para considerar la historia de datos se debe incluir en el archivo de entrada el tipo de análisis:

1. Tipo de respuesta: Esta opción permite definir el tipo de análisis que se va a utilizar, debe estar escrita inmediatamente después de la palabra Step.

4.3. Validación para usar el programa ABAQUS

Para realizar la validación de la respuesta elástica del programa Abaqus, se utilizaron las formulaciones elásticas de Kirsch (1898). Consideramos que no había o existían deformaciones a lo largo del eje del pozo, esto quiere decir, que se adoptó la hipótesis de un estado plano de deformaciones. De esta manera, para este caso de validación del programa Abaqus, fue utilizada la solución elástica utilizando la formulación de Kirsch e los elementos analizados son los que se encuentran localizados en la pared del pozo a un ángulo de 0° e 90° , ver Figura 29.

Figura 29. Elementos usados para la validación del programa ABAQUS con la solución de Kirsch



Fuente: (Consuegra, 2011).

Kirsch (1898) consideró una placa con un orificio de radio 'r' la cual estaba sometida a un estado de tensiones e propuso una solución para la distribución de las tensiones a lo largo de la placa, en términos de tensión radial y tangencial, respectivamente (Goodman, 1989):

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right)\cos(2\theta)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta)$$

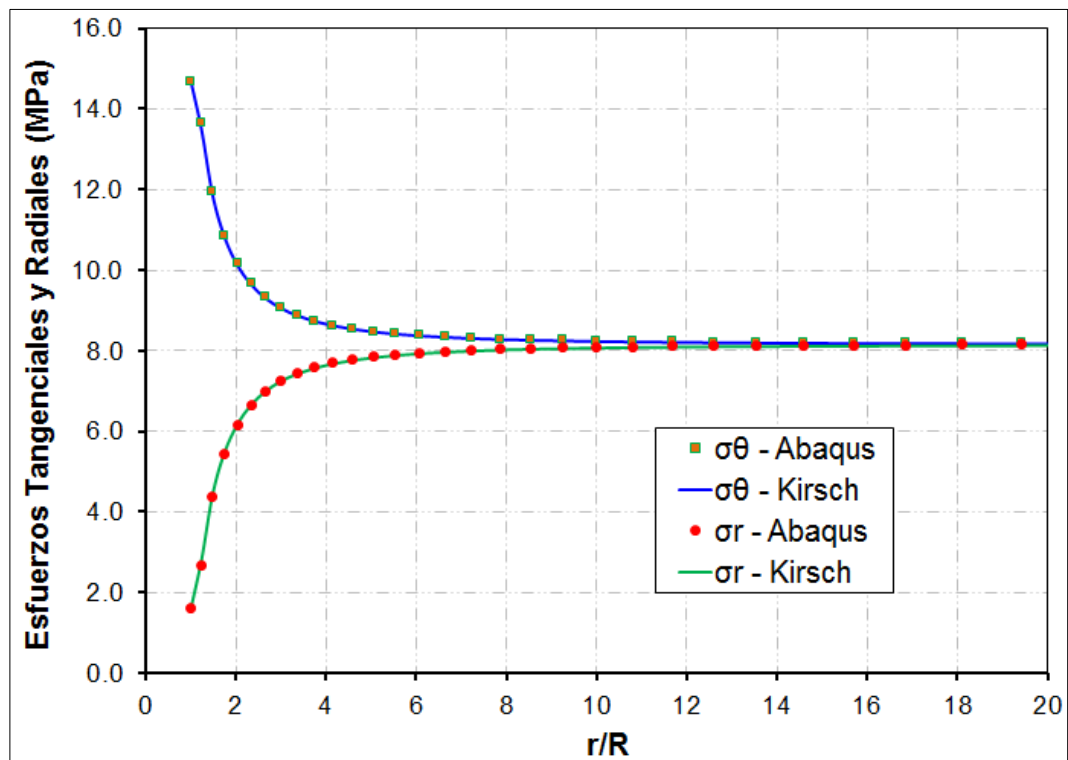
Donde:

- ✓ σ_r : Tensión normal efectiva en la dirección radial.
- ✓ σ_θ : Tensión normal efectiva en la dirección tangencial.

- ✓ σ_x : Tensión “*in situ*” en la dirección x.
- ✓ σ_y : Tensión “*in situ*” en la dirección y.
- ✓ a : Radio del pozo.
- ✓ r : Distancia a partir del eje del pozo.
- ✓ θ : Angulo medido en el sentido anti-horario del plano x-y a partir del eje 'x'.

Una simulación fue realizada para verificar la variación de las tensiones radiales y tangenciales, sin considerar el peso de lodo. La figura 30 muestra los resultados.

Figura 30. Variación de las tensiones tangenciales y radiales (Kirsch vs. ABAQUS) para el análisis elástico.



Fuente: (Consuegra, 2011).

En este caso la simulación fue realizada con un estado isotrópico de tensiones $\sigma_x = \sigma_y = 8.15$ MPa y el peso del lodo no fue considerado.

En la figura se puede observar que los valores de las tensiones tangenciales y radiales usando la formulación de Kirsch coinciden con los valores obtenidos usando el programa ABAQUS. Después de la validación de las ecuaciones de Kirsch con el programa ABAQUS, este puede ser utilizado para realizar la modelación numérica de un pozo vertical utilizando elementos axisimétricos.

CAPITULO V: METODOLOGIA DE TRABAJO PARA UN POZO VERTICAL

La metodología y el diseño estarán aplicados a un pozo de una formación colombiana específica, situado en la cuenca del valle medio del Magdalena, donde se perforo como una campaña de perforación exploratoria para el año 2011, situado en la jurisdicción del municipio el Playón, en el departamento de Santander.

5.1. Metodología.

La metodología propuesta para la investigación que nos ocupa, es tomar datos de pozo base en territorio Colombiano, un caso específico para explicar la aplicación de una perforación, teniendo en cuenta datos de yacimientos tomados, en pruebas de registros, y analizar la variación de los cambios que se generan en los esfuerzos, al aplicar una fuerza externa sobre la formación.

5.1.1. Criterios Iniciales: Tomando el caso base de nuestro pozo en investigación en un campo Colombiano en el municipio del Playón.

Para la realización del cambio de distribución de esfuerzos en nuestro caso en estudio, se tomaron como base algunos datos iniciales de pozo, para la realización de las simulaciones siguientes, en el software en uso ABAQUS.

Los datos iniciales tomados para nuestra investigación en estudio fueron.

- 1) Ensayos triaxiales para diferentes presiones; en las datas los ensayos determinados por estas son: Módulo de Young, Módulo de Poisson y Cohesión
- 2) Ensayos UCS.
- 3) Propiedades elásticas de la roca.
- 4) Compresibilidad (La compresibilidad se determino pada todo el datum, ya que a cada profundidad, esta variable no fue determinada por las pruebas suministradas y se determinaron con la correlación de Newman)

- 5) Porosidad efectiva.
- 6) Resistencia a la compresión.
- 7) Presión de poro, (General)
- 8) Columna geológica (comportamiento y correlacionamiento)
- 9) Esfuerzo horizontal mínimo y máximo y esfuerzo vertical.

Los ensayos triaxiales tomados tienen la finalidad de mostrar parámetros de subsuelo y la relación esfuerzos deformación a través del esfuerzo de la determinación del esfuerzo cortante que nos dará un valor claro del efecto del cambio de distribución de esfuerzos alrededor del tramo a elegir.

Teniendo en cuenta los anteriores datos para realizar nuestra investigación , los datos dinámicos como porosidad efectiva, presión de poro y resistencia a la compresión se toman como base, para correlacionar con el Datum (Profundidad). Y seleccionar nuestro tramo más óptimo para nuestro estudio.

5.1.3. Selección del intervalo a modelar: Las opciones de un pozo vertical para realizar un corte axisimétrico y ver la distribución del cambio en los esfuerzos in situ, utilizando elementos finitos da como resultado seleccionar un tramo donde se evidencie el cambio en el tipo de roca de la formación, tomando como base el perfil geológico generado, después de una toma de registros, dan como resultado la siguiente selección:

1. Se toma una profundidad base, donde exista en el perfil geológico exista una variación en el tipo de roca, nuestro caso base se toma a una profundidad de 10130 Ft a 10163 Ft, correspondientes a la formación colorado y formación la mugrosa.
2. Realizada la selección de profundidad a la cual se evidencia la variación del tipo de roca, teniendo en cuenta el volumen de shale se realiza la debida identificación de cada tipo de roca.

5.1.4. Caracterización del perfil: Realizada la debida selección de la profundidad a la cual existe una variación del tipo de roca, procedemos a realizar la planificación total del modelo, para la clasificación para cada tipo de roca, se realizo un sondeo, y se observó a cada profundidad la variación en las propiedades, medida en registros (V_{shale}), nos da una indicación del tramo más optimo a seleccionar.

1. Se define la zona a trabajar entre 10130 Ft a 10163 Ft (3087,6 m a 3097,7m).
2. Teniendo en cuenta el volumen de shale (V_{shale}), tomado de registros, definimos la variación para cada tramo, con esto lograr la diferenciación del tipo de roca, debido a que una variación del volumen de shale (V_{shale}), nos puede dar una indicación base, del tipo de roca. A continuación mostraremos la clasificación para dar la óptima definición de cada variable de tipo de roca.

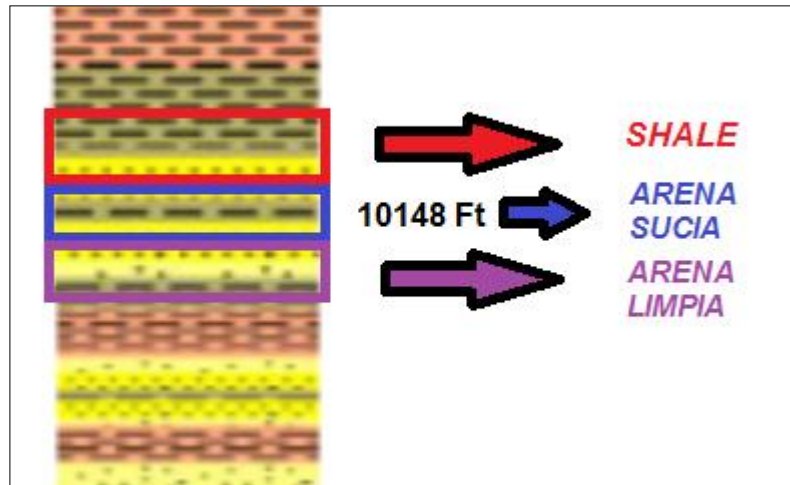
$$0,60 < V_{shale} \leq 1 \quad \text{Caso base} \implies \text{SHALE}$$

$$0,25 < V_{shale} \leq 0,6 \quad \text{Caso base} \implies \text{ARENA SUCIA}$$

$$0,0 < V_{shale} \leq 0,25 \quad \text{Caso base} \implies \text{ARENA LIMPIA}$$

3. Tomando los casos bases de la investigación y la debida clasificación para cada tipo de roca, la definición del tramo a cada profundidad es la siguiente (figura 31).

Figura 31. Perfil geológico del pozo,



Fuente: Tomado y modificado del ICP-Ecopetrol (2010).

4. Realizada la clasificación, se procede a realizar la data geomecánica del pozo para cada profundidad a la cual se encuentra cada tipo de roca (Shale, Arena Sucia, y Arena limpita).

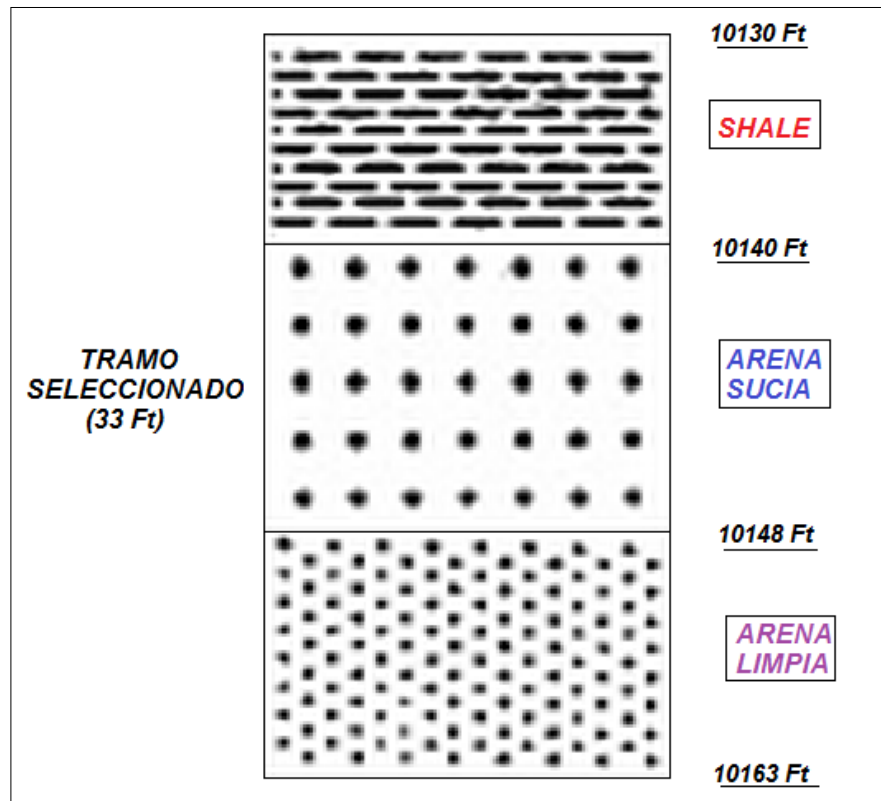
5.1.5. Perfil a modelar.

Una vez definido los tramos a cada profundidad, donde se evidencia la variación del tipo de roca para cada tramo, se define el diseño del caso en estudio.

El pozo seleccionado con un datum de 14000 Ft, se escogió el tramo comprendido entre 10130 Ft a 10163 Ft, el tramo seleccionado para el caso, está comprendido en dos partes de formaciones, tomadas como el caso base (Formación colorado y formación la mugrosa) para cada profundidad que varía en 0,5 Ft cada una, se hace la clasificación de cada data geomecánica comprendida, para el caso en investigación, tales como, V_{shale} , Modulo de Poisson , Resistencia a la compresión, Modulo de Young (Dinamico y estacionario), UCS (Unconfined compressive strength), Presión de poro, Esfuerzo vertical (S_v), Esfuerzo horizontal mínimo (S_{hmin}), Esfuerzo horizontal

máximo ($S_{Hmáx}$) y peso del lodo, el tramo seleccionado en el cual se encuentra shale debido a que el V_{shale} , está entre 0,6 y 1 es; 10130 Ft a 10140 Ft, el tramo seleccionado y en el cual se encuentra arena sucia debido a que el V_{shale} , esta 0,25 y 0,6 es; 10140,5 Ft a 10148 Ft y el tramo seleccionado y en el cual se encuentra arena limpia debido a que el V_{shale} , está entre 0 y 0,25 es; 10148 Ft a 10163 Ft entre comprendido de la siguiente manera (figura 32).

Figura 32. Representación de las tramas empleadas para la descripción del tramo empleado en la investigación.



Fuente: Autores.

CAPITULO VI: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD APLICADO A UN POZO DE PETROLEO VERTICAL USANDO SOFTWARE EN UN CASO ESPECIFICO COLOMBIANO

6.1. Aproximación numérica/analítica a la solución del problema de estabilidad de pozo.

Al examinar las condiciones en que se encuentra el estudio de la estabilidad de pozo, se concluye que la tendencia actual hacia el análisis de este problema es mediante la implementación de soluciones numéricas usando elementos axisimétricos. Las técnicas de elementos finitos han demostrado ser confiables en áreas y de análisis de las estructuras. Como resultado, el estudio ha centrado su atención en utilizar la teoría de elementos finitos de problemas de modelización geomecánica y recientemente en el análisis de la estabilidad del pozo. Este capítulo sirve de apoyo a la decisión de utilizar software comercial de elementos finitos para darle un fin último a la investigación realizando una simulación numérica. La segunda parte importante de este capítulo muestra la representación matemática de los fenómenos físicos que se han centrado en la investigación.

6.2. Modelo computacional.

Teniendo en cuenta que los modelos matemáticos son herramienta viable para prever el comportamiento de las rocas en ausencia de información suficiente, se desarrolla un modelo computacional, con la necesidad de contar con paquetes informáticos con el fin de simular problemas de mecánica de rocas. Estos paquetes informáticos aumentan la capacidad de analizar detalles geológicos y aporta en la construcción de modelos apropiados para el análisis de estos. Un fácil acceso a las computadoras de alto rendimiento proporciona al modelador de una herramienta importante.

6.3. Soluciones analíticas y numéricas.

Los principales aspectos para tener en cuenta y que apoyan la decisión de utilizar métodos numéricos se basan en las necesidades de la investigación que apoyan la simulación numérica. La selección de un modelo constitutivo no es arbitraria. Como muchos de los investigadores mencionan en la estabilidad del pozo, en sentido estricto, siempre habrá la necesidad de comparar las predicciones del modelo con los datos de laboratorio y calibrar el modelo, si es posible. ABAQUS versión 6.9.3, es un software de elementos finitos equipado para manejar diferentes modelos constitutivos, representar el comportamiento del material, y como tal, fue elegido como el software comercial de elementos finitos para llevar a cabo esta investigación.

Después de la redistribución de esfuerzos la solución elástica lineal se describe con las siguientes ecuaciones, y los esfuerzos efectivos alrededor del pozo en un vertical pues ser obtenidos de la siguiente manera.

$$\sigma'_{rr} = \frac{(\sigma_H + \sigma_h + 2P_p)}{2} \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 - \frac{4R_w^2}{r^2} + \frac{3R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + (P_m - P_p) \frac{R_w^2}{r^2} \quad \text{Ecu. 64}$$

$$\sigma'_{\theta\theta} = \frac{(\sigma_H + \sigma_h - 2P_p)}{2} \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 + \frac{3R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - (P_m - P_p) \frac{R_w^2}{r^2} \quad \text{Ecu. 65}$$

$$\sigma'_z = \sigma_v - P_p - \nu \frac{2R_w^2}{r^2} (\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \quad \text{Ecu. 66}$$

Esfuerzo efectivo radial, tangencial y vertical respectivamente.

6.4. Definición del modelo.

6.4.1. Geometría del modelo para el análisis de un escenario de pozo vertical: Para el caso objeto de investigación, se escoge un modelo 2-D para realizar los cálculos de análisis de estabilidad usando elementos axisimétricos. Convenientemente los cálculos se facilitan usando el pre-procesador ABAQUS/CAE para la simulación de la estabilidad de un pozo vertical. Las dimensiones y características del modelo son las siguientes: el diámetro del pozo o mainbore es de $9 \frac{5}{8}$ pulgadas (0,244475 m), y un radio de pozo 4,8125

pulgadas (0,1222375 m) el pozo tiene una profundidad de 14000 Ft, y el tramo seleccionado para el caso en estudio, son los siguientes, se trabaja con una región rectangular de ejes simétricos 4,878 por 12 metros, (ancho-largo), constituido por 598 nodos; la clasificación para cada región según el tipo de roca es: SHALE, ARENA SUCIA Y ARENA LIMPIA; una región rectangular 4,878 por 4 metros con las siguientes propiedades mecánicas:

$$\text{SHALE} \implies \left\{ \begin{array}{l} E = 16,17 \times 10^9 \text{ Pa} \\ \vartheta = 0,27 \\ \bar{K} = 1,447 \times 10^{-10} \text{ m/s} \end{array} \right.$$

$$\text{ARENA SUCIA} = \text{SAND A} \implies \left\{ \begin{array}{l} E = 21,51 \times 10^9 \text{ Pa} \\ \vartheta = 0,25 \\ \bar{K} = 7,715 \times 10^{-10} \text{ m/s} \end{array} \right.$$

$$\text{ARENA LIMPIA} = \text{SAND B} \implies \left\{ \begin{array}{l} E = 24,68 \times 10^9 \text{ Pa} \\ \vartheta = 0,20 \\ \bar{K} = 9,644 \times 10^{-9} \text{ m/s} \end{array} \right.$$

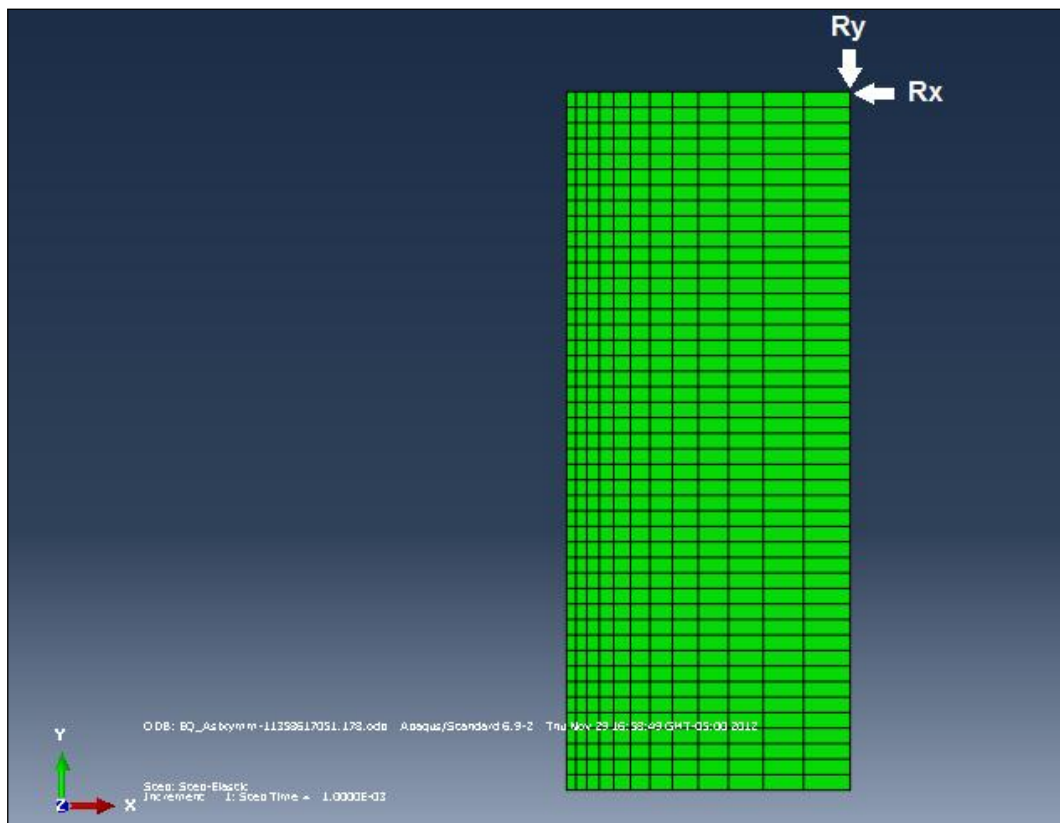
- ✓ E= Modulo de Young
- ✓ ϑ =Modulo de Poisson
- ✓ \bar{K} =Conductividad Hidráulica

6.4.2. Definición del equilibrio del modelo: Generado el modelo de la investigación, se procede a comprobar el equilibrio de éste, para que a la hora de realizar la simulación en nuestro pre-procesador ABAQUS versión 6.9.3, no se registren errores que son comunes, cuando no existe un equilibrio absoluto en modelos de simulación.

Debido a errores que se presentaron a la hora de demostrar el equilibrio de la región rectangular, el modelo está definido con condiciones iniciales (σ_v , σ_h , σ_H , Presión de poro), se corrió la primera simulación, generando reacciones, después de haberse impuesto para cada nodo reacciones pertinentes (R_x , R_y), estas son las que se generan después de la corrida, se guarda el archivo de reacciones para cargarlo a la nueva corrida para comprobar el equilibrio del modelo en investigación y se puede observar algo valioso para comprobar el equilibrio, en cada nodo después de cada reacción se observa una sumatoria

de fuerzas igual a 0 ($\sum F = 0$), las fuerzas que se establecen para definir el equilibrio del modelo son deformación ($\epsilon=0$), desplazamientos ($\varphi=0$) y presión de poro ($P_p=CTE$), representado en la figura observada, de la respectiva corrida de simulación para comprobar el equilibrio (figura 33: las reacciones se cargan para cada elemento).

Figura 33. Reacciones cargadas en la simulación para comprobar equilibrio.



Fuente: Tomado de simulaciones realizadas en Software comercial ABAQUS, Autores

6.4.3. Modelos matemáticos generales para la estabilidad de pozo: Se presentaran algunas ecuaciones que se rigen para analizar el caso de la investigación y supuestos que dará óptimos resultados, acá se calcularan la distribución de tensiones y deformaciones en torno al pozo. Análisis de tensión convencional es totalmente junto con las ecuaciones de flujo de fluidos para intentar soluciones simultáneas para la tensión / desplazamiento.

SUPUESTOS: Hipótesis generales de la investigación.

- ✓ Se acepta que el modelo representa la formación (roca).
- ✓ La formación es homogénea.
- ✓ El eje de coordenadas globales, son paralelos a los esfuerzos principales in situ.
- ✓ No hay transferencia de masa y la temperatura es igual (Se desprecian).
- ✓ Se toma una material isotrópica en un estado de deformación plana.

6.4.4. Análisis de desplazamiento de esfuerzos en elasticidad: El caso más sencillo de analizar es considerar una formación rocosa, que se comporta de acuerdo con la teoría de la elasticidad lineal.

Como resultado de la investigación se desprecia la porosidad, dando como resultado las suposiciones, para hacer el análisis de ecuaciones más sencillas:

1. El comportamiento de la roca, se modela con un material perfectamente elástico, **2.** La porosidad no se tiene en cuenta en la investigación, para que no ocurran procesos de difusión.

Dado estas suposiciones, los términos para la ecuación en investigación se reducen a lo siguiente.

$$(\lambda + G)\nabla\nabla.U + G\nabla^2U + F_k = 0 \quad \text{Ecu. 67}$$

Donde las constantes de los materiales son las siguientes:

$$A = (\lambda + G) \quad \text{Ecu. 68}$$

$$B = G$$

$$C = 0$$

6.5. Tasa de deformación

Un análisis del software de Multi step drilling analysis (MSDA) tiene el propósito simular el primero de estos efectos, la deformación de la materia en función de la tiempo, llamado tasa de deformación. Para ello, en lugar de considerar que el pozo se perfora instantáneamente, MSDA considera que el proceso de perforación se lleva bajo pasos secuenciales. Esta condición da al modelo la oportunidad de actuar en función del tiempo. Cada paso en el análisis se divide en varios incrementos. El usuario define el tiempo total de cada paso y sugiere el incremento para cada paso. Luego ABAQUS controla los incrementos de tiempo en forma automática durante cada paso para obtener la solución en el menor tiempo computacional posible. Estos incrementos de tiempo dependerán de la severidad de la respuesta no lineal para cada problema en particular.

6.6. Métodos de solución usando ABAQUS

ABAQUS es un programa destinado a resolver problemas de ciencias e ingeniería y está basado en el método de los elementos finitos. El programa puede resolver casi todo tipo de problemas relacionados con el análisis de estructuras, desde un simple análisis lineal de un pozo vertical hasta simulaciones complejas no lineales de diferentes configuraciones de pozos. ABAQUS posee una extensa librería de elementos finitos que permite modelar virtualmente cualquier geometría, así como su extensa lista de modelos que simulan el comportamiento de una gran mayoría de materiales, permitiendo su aplicabilidad en distintas áreas de ingeniería.

Hibbitt, Karlsson, y Sorensen (1998)¹⁵ dan una completa descripción de la formulación mediante un análisis de elementos finitos por deformación - esfuerzo. Esta sección sólo describe lo básico de la formulación. EL equilibrio en términos del principio del trabajo virtual es definido de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

¹⁵ Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc. Abaqus Theory Manual Version, 5.8 USA (1998)

$$\int_V \sigma : \delta D dV = \int_V f \cdot \delta v dV + \int_S t \cdot \delta v dS \quad \text{Ecu. 69}$$

Para un medio poroso, las fuerzas del cuerpo incluyen el peso total del líquido contenido, f_w .

$$f_w = (S_w \varphi + \varphi_t) \rho_w g \quad \text{Ecu. 70}$$

El término $(S_w + \varphi_t)$ de la anterior ecuación incluye la fracción de agua que es libre de moverse por el medio poroso, $S_w \varphi$, más el volumen de agua irreducible por unidad de volumen total, φ_t . S_w es la saturación de agua que es libre de moverse, $S_w = V_w/V_p$. φ es la porosidad, $\varphi = V_p/V_b$. ρ_w es la densidad del agua y g es la aceleración de la gravedad.

Debido a que I^N representa las fuerzas internas y P^N representa las fuerzas externas, la ecuación de trabajo virtual puede ser modificada de la siguiente forma:

$$I^N = P^N \quad \text{Ecu. 71}$$

Donde I^N y P^N son respectivamente:

$$I^N = \int_V \sigma : \delta D dV \quad \text{Ecu. 72}$$

$$P^N = \int_V f \cdot \delta v dV + \int_S t \cdot \delta v dS \quad \text{Ecu. 73}$$

Cuando la anterior es discretizada en términos de la velocidad virtual de campo δv y la tasa de deformación δD , el sistema de ecuaciones resultante para un análisis de elementos finitos. Pueden ser expresados de la siguiente forma:

$$F^N(x^N) = 0 \quad \text{Ecu. 74}$$

F^N Es un componente de fuerza asociado a la actual aproximación de para un sistema de N ecuaciones con N incógnitas.

Para problemas no lineales, ABAQUS usa el método numérico de Newton para resolver el sistema de ecuaciones resultante para un análisis de elementos finitos no lineal de equilibrio. El método de Newton asume que después de la iteración $i+1$, se obtiene como solución una aproximación x_{i+1}^N . La diferencia entre esta solución y la solución con la iteración i se expresa en el término dx_{i+1}^N . En esta etapa, la solución aproximada es entonces.

$$x_{i+1}^N = x_i^N + dx_{i+1}^N \quad \text{Ecu. 75}$$

La convergencia del método de Newton se logra garantizando que todas las entradas de F_i^N (fuerzas residuales) y dx_{i+1}^N sean suficientemente pequeños.

CAPITULO VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo se ocupa de analizar la estabilidad de una configuración de un pozo vertical, usando elementos finitos. Con el fin de presentar los resultados de una manera ordenada, estas secciones también se divide en dos secciones: la respuesta antes de realizar la perforación y después de realizarla en la simulación. En esta sección se analizara la estabilidad de pozo, teniendo en cuenta el criterio Mohr-Coulomb, y teniendo en cuenta la sensibilidad que este criterio de puede brindar. Se presentan una serie de figuras para analizar y discutir la distribución de los esfuerzos alrededor del pozo.

7.1. Estabilidad para un pozo vertical.

Se toma como base el criterio de rotura lineal Mohr-Coulomb para definir el comportamiento de la roca, representado así en el espacio de tensiones normal y tangencial, se utiliza por su sencillez y comodidad, la expresión matemática es:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad \text{Ecu. 76}$$

En este caso, el dominio elástico viene representado por la envolvente de Mohr-Coulomb, los puntos con estado tensional por debajo de dicha envolvente están en un estado elástico mientras que las que se sitúan encima se encuentra en rotura. La zona de estado tensional, es la que se encuentra por encima de la envolvente de Mohr-Coulomb

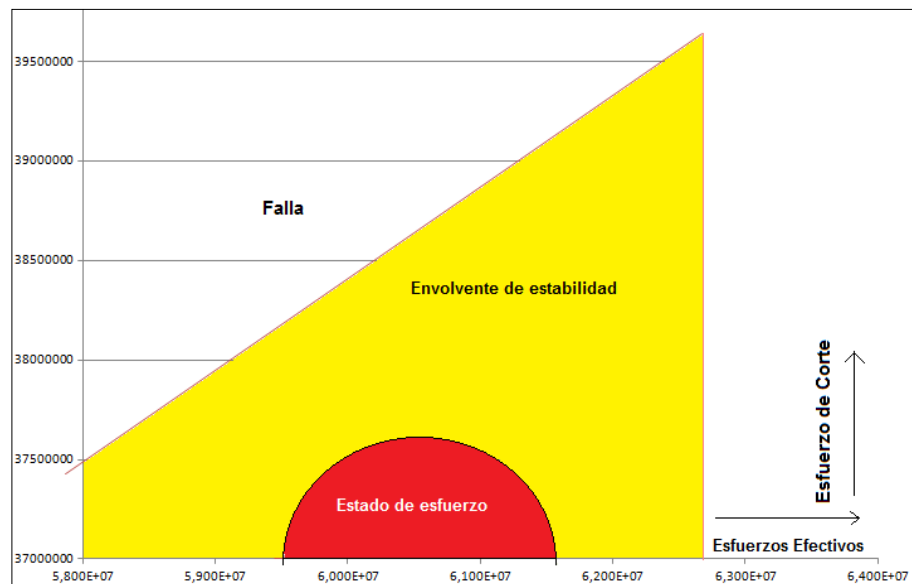
7.2. Estabilidad antes de la perforación.

7.2.1. Tramo del shale

En el estado inicial, antes de realizar la perforación (Drilling-Simulación), en el tramo de shale se observa que la envolvente de Mohr, que define la zona en

estado tensional y la zona en estados elástico, se encuentra por encima del círculo que representan el ensayo triaxial que me da los valores de esfuerzos normal mínimo y máximo ($\sigma_{mín}, \sigma_{máx}$), esto da como resultado que el comportamiento de la roca se encuentra en la zona de estando elástico y por tanto, se encuentra dentro de la envolvente de estabilidad y no existirá falla sobre esta. El valor C (Cohesión) es el corte con el eje Y.

Figura 34. Representación envolvente Morh-Coulomb para el tramo del shale.

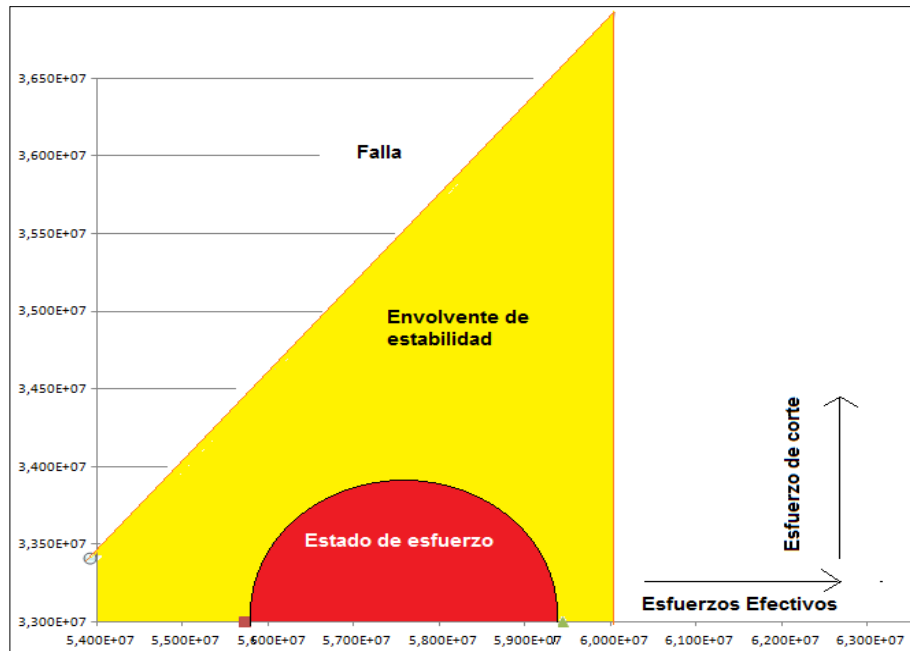


Fuente: Autores.

7.2.2. Tramo de Arena Sucia.

En el estado inicial, antes de realizar la perforación (Drilling), para el tramo de Arena Sucia, se observa en la envolvente de Morh se encuentra por encima del círculo que representa las pruebas realizadas que da los valores de esfuerzos normal mínimo y máximo (Esfuerzos efectivos) ($\sigma_{mín}, \sigma_{máx}$), esto nos arroja como resultado que el comportamiento de la roca se encuentre en la zona elástica, dentro de la envolvente de estabilidad, sin que ocurra falla en ella.

Figura 35. Representación envolvente Morh-Coulomb para el tramo de Arena Sucia.

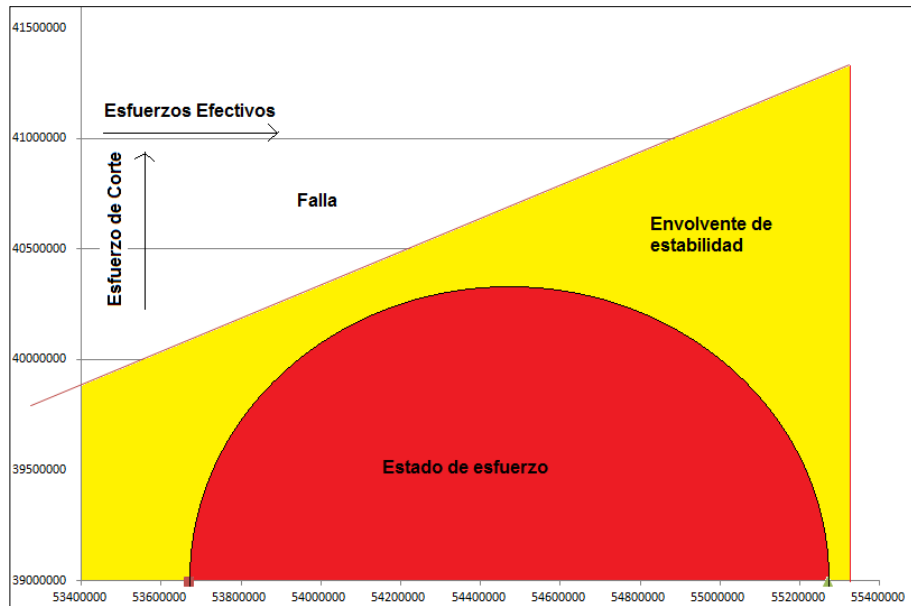


Fuente: Autores.

7.2.3 Tramo de Arena Limpia.

En el estado inicial, antes de realizar la perforación (Drilling), para el tramo de Arena Limpia, se observa en la envolvente de Morh que se encuentra por encima del círculo que representa el ensayo triaxial que da los valores de esfuerzos normal mínimo y máximo (Esfuerzos efectivos) ($\sigma_{mín}$, $\sigma_{máx}$), esto da como resultado que el comportamiento de la roca se encuentre en la zona elástica, dentro de la envolvente de estabilidad, sin que ocurra falla en ella.

Figura 36. Representación envolvente Morh-Coulomb para el tramo de Arena Limpia.

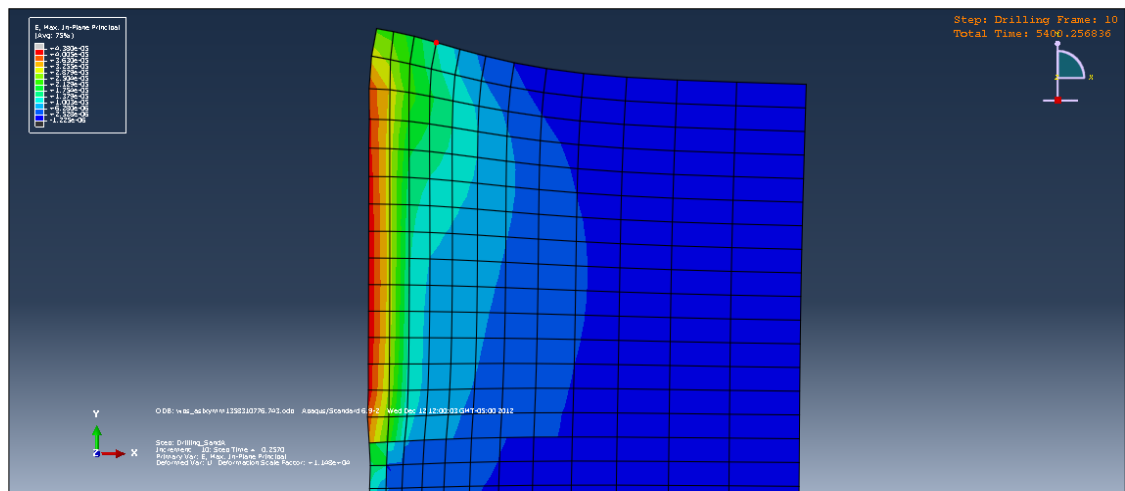


Fuente: Autores.

7.3. Estabilidad después de la perforación (simulación).

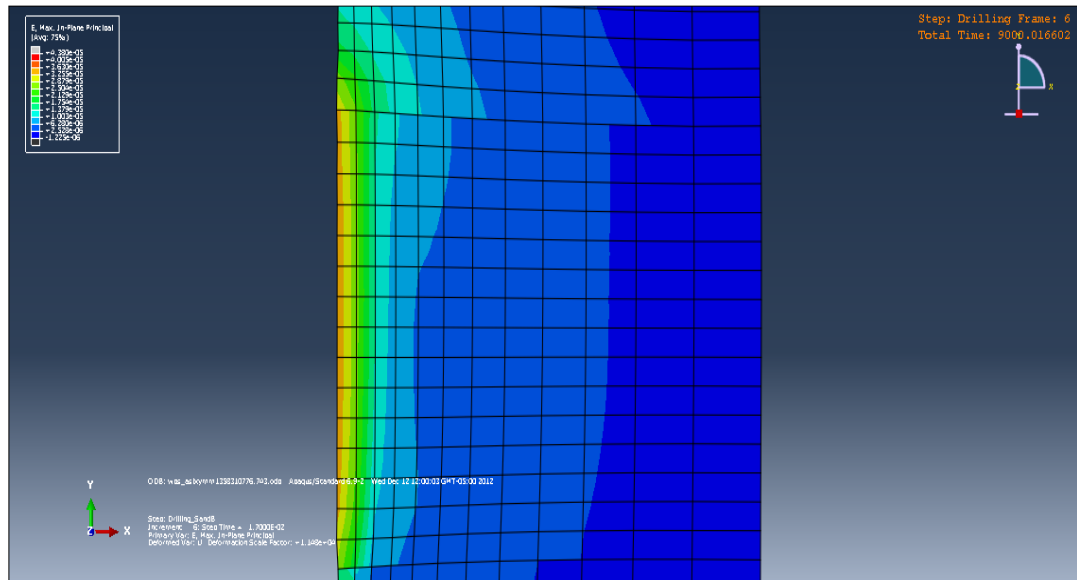
A continuación se observarán esquemas de las animaciones generadas por ABAQUS para la redistribución de esfuerzos al realizar una simulación (perforación).

Figura 37. Perfil del comportamiento del cambio de esfuerzos, en el tramo de shale.



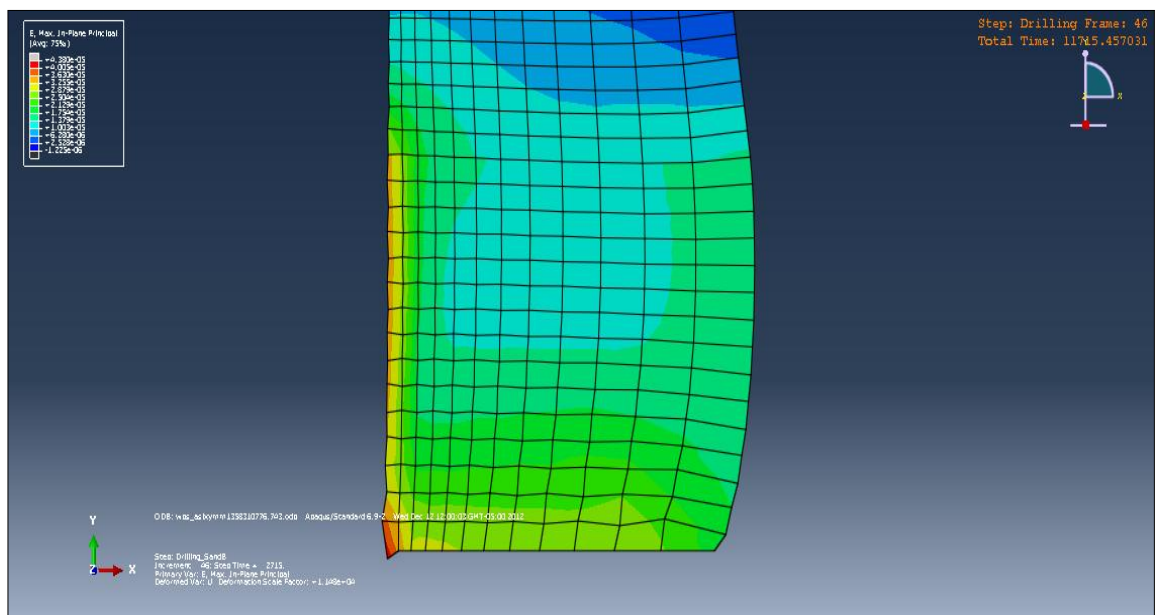
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS; Autores

Figura 38. Perfil del comportamiento del cambio de esfuerzos, en el tramo de arena sucia.



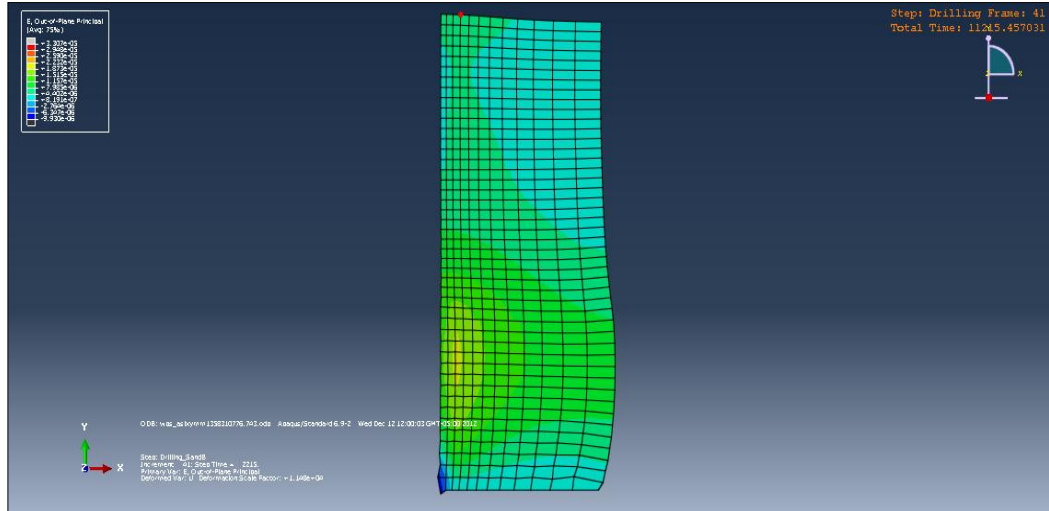
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS.

Figura 39. Perfil del comportamiento del cambio de esfuerzos, en el tramo de arena limpia.



Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS.

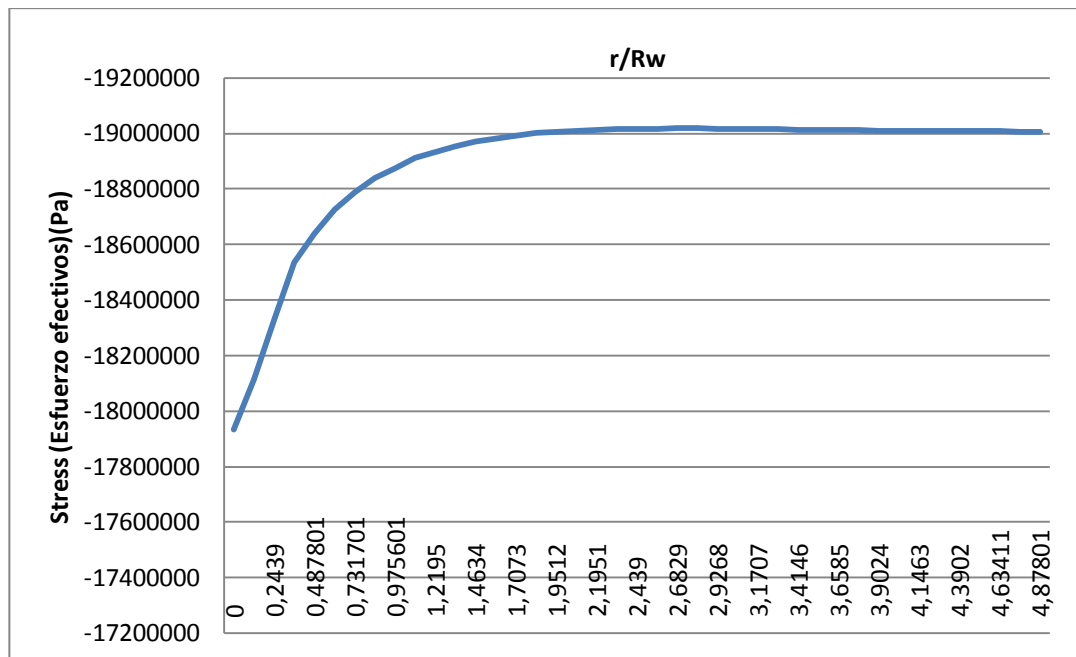
Figura 40. Perfil del comportamiento general del cambio de esfuerzos al realizar la perforación.



Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS

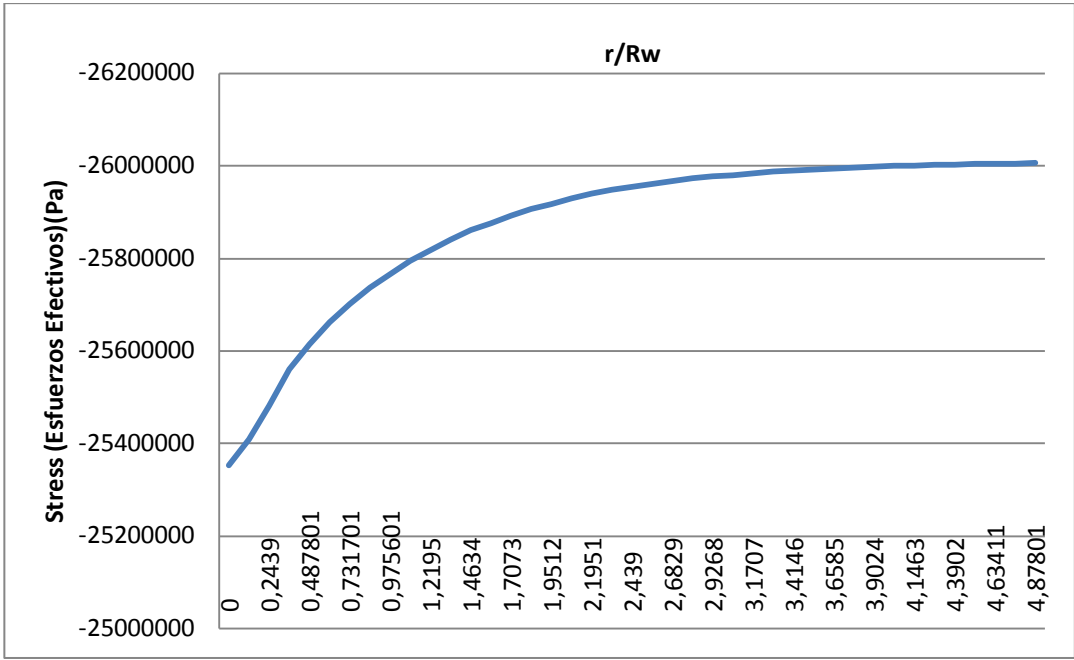
7.4. Análisis de los datos numéricos de la simulación.

Figura 41. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X, en el tramo del shale. (True Distance)



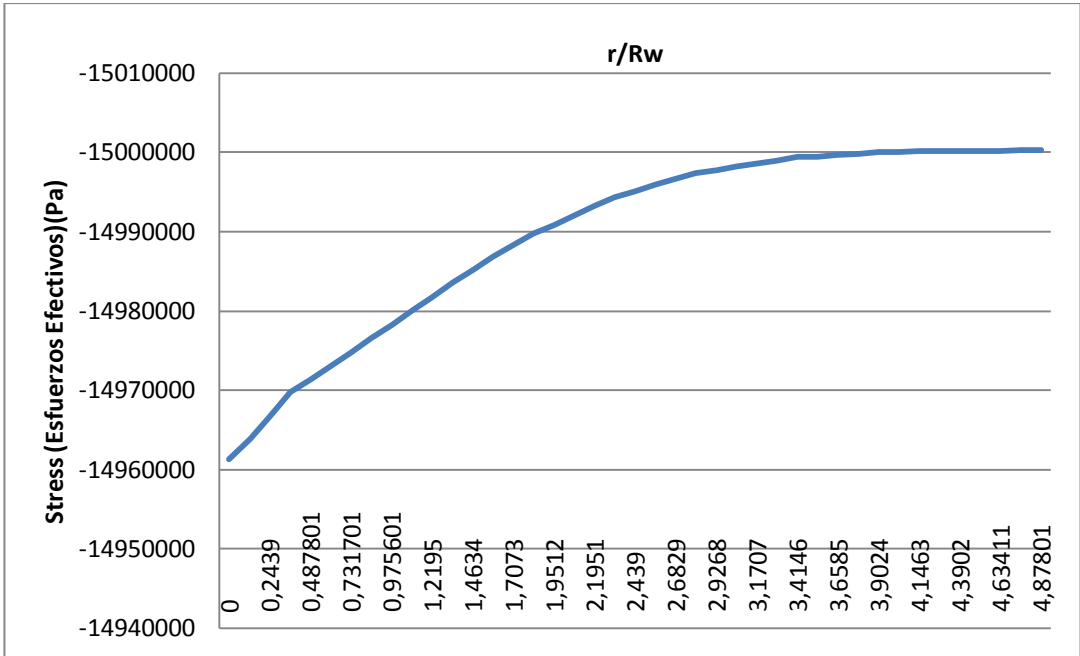
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS; Autores.

Figura 42. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y, en el tramo del shale. (True Distance)



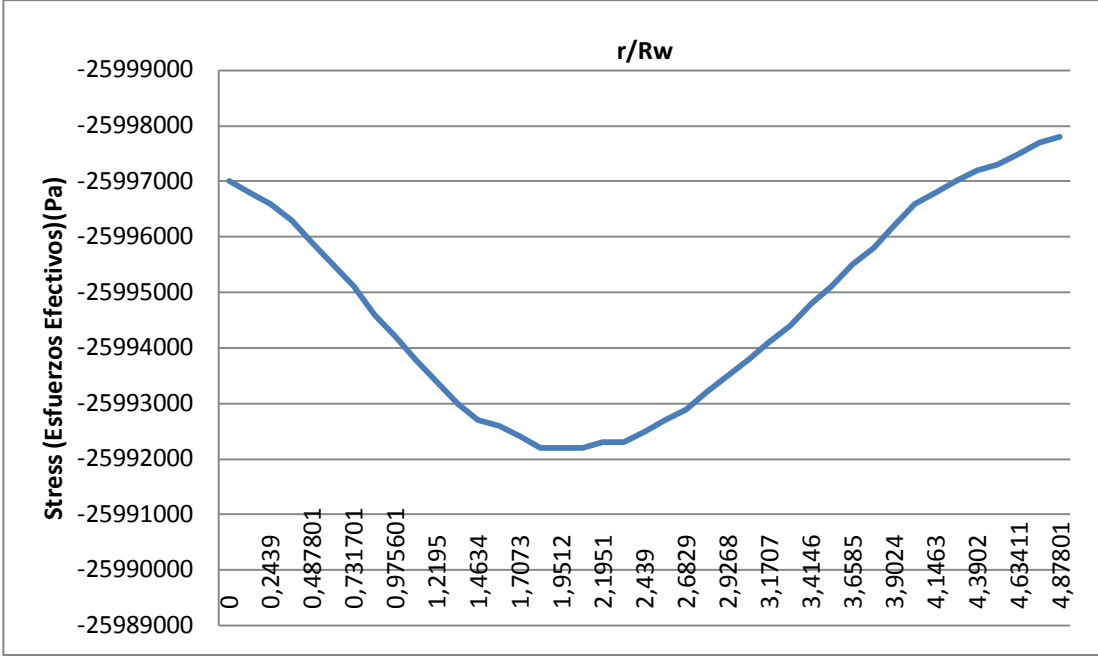
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS; Autores.

Figura 43. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X, en el tramo de arena sucia. (True Distance)



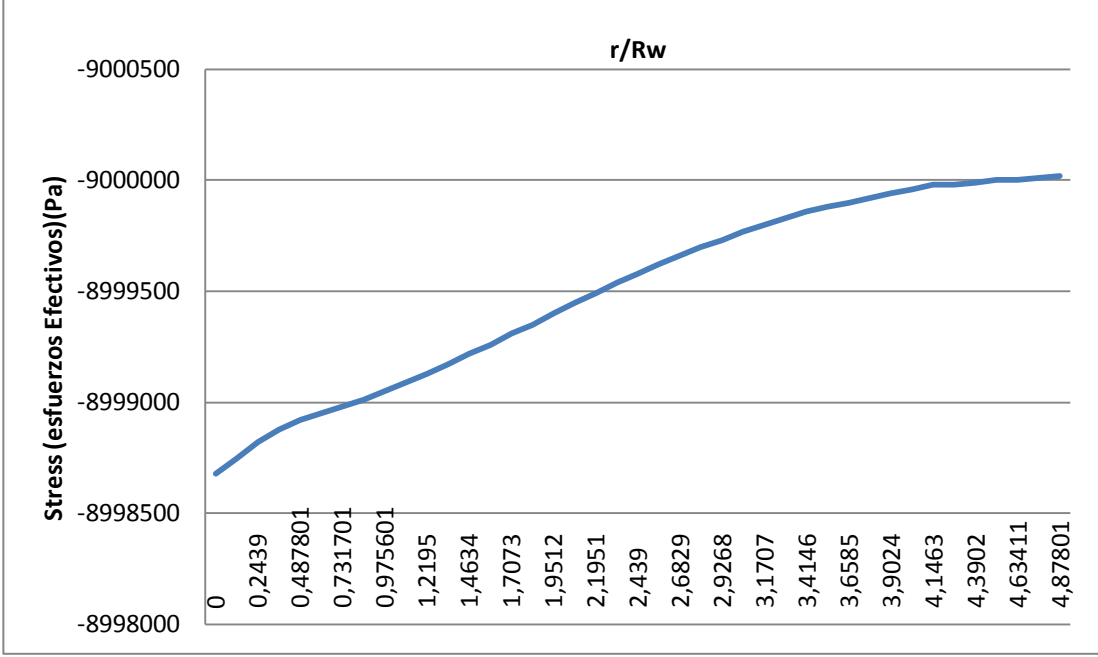
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS; Autores.

Figura 44. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y, en el tramo de arena sucia.



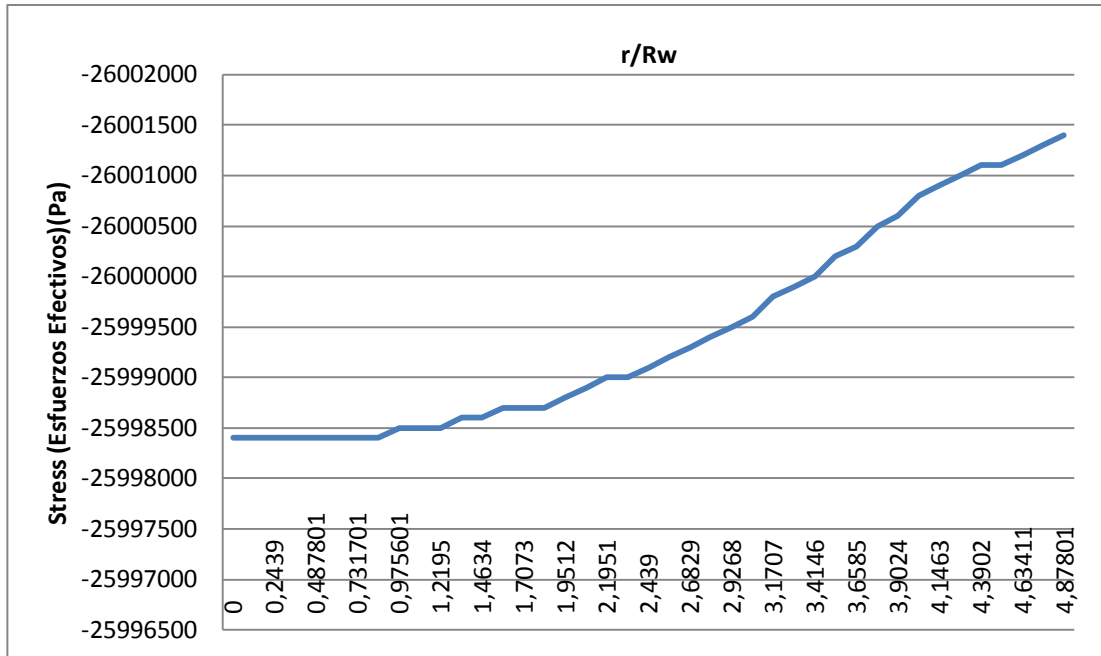
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS; Autores.

Figura 45. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X, en el tramo de arena limpia. (True Distance)



Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS; Autores.

Figura 46. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a los largo del eje Y, en el tramo de arena limpia. (True Distance)

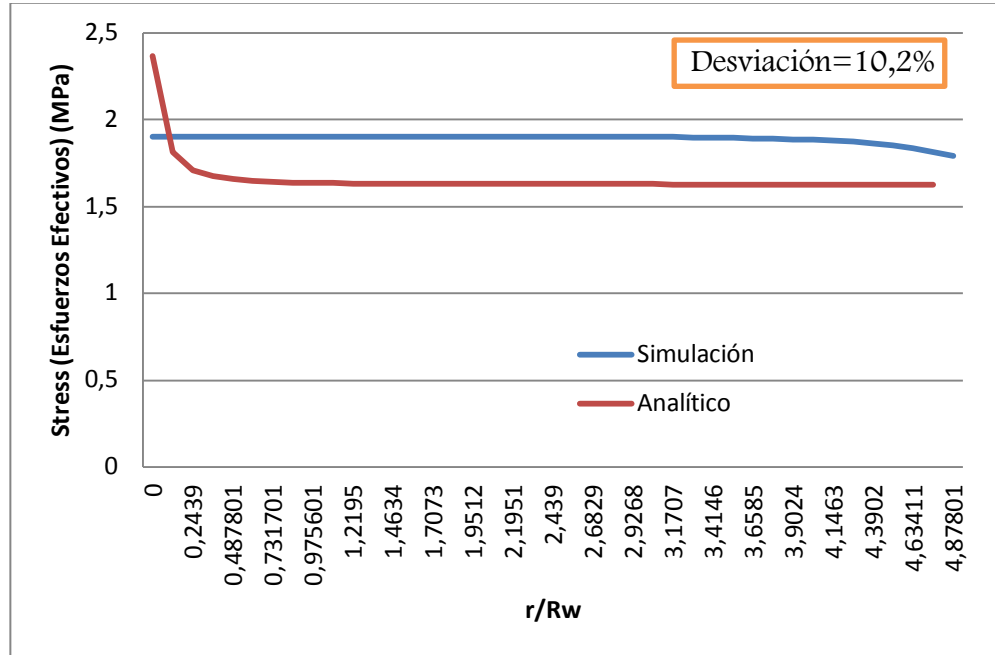


Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS; Autores

Los valores de los esfuerzo efectivos están es unidades internacionales (Pascuales) y los valores del eje son negativos debido a que el software comercial ABAQUS, da valores negativos por compresión por default, pero los valores se pasan al eje positivo.

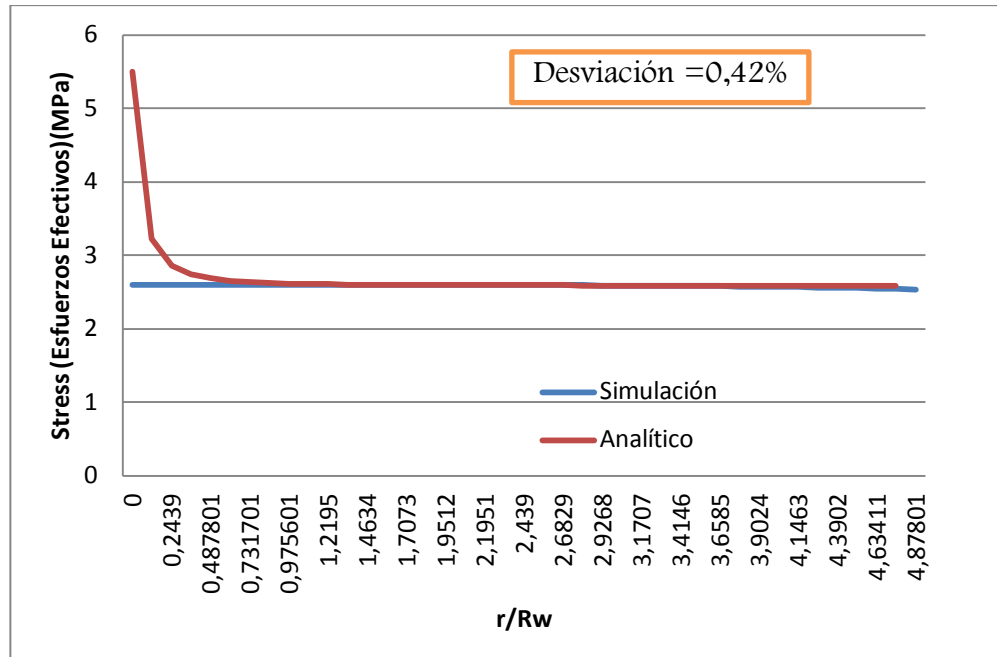
7.4.1. Comparación datos de la simulación con el modelo analítico.

Figura 47. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X con el modelo analítico, en el tramo de shale. (True Distance)



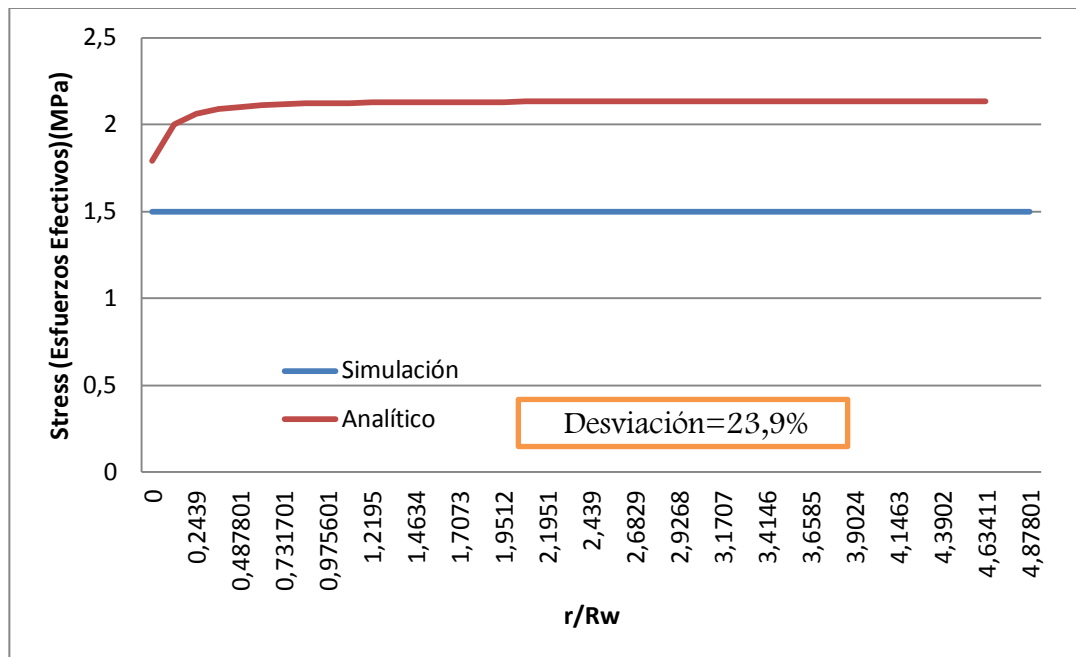
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS y modelo analítico; Autores

Figura 48. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y con el modelo analítico, en el tramo de shale. (True Distance)



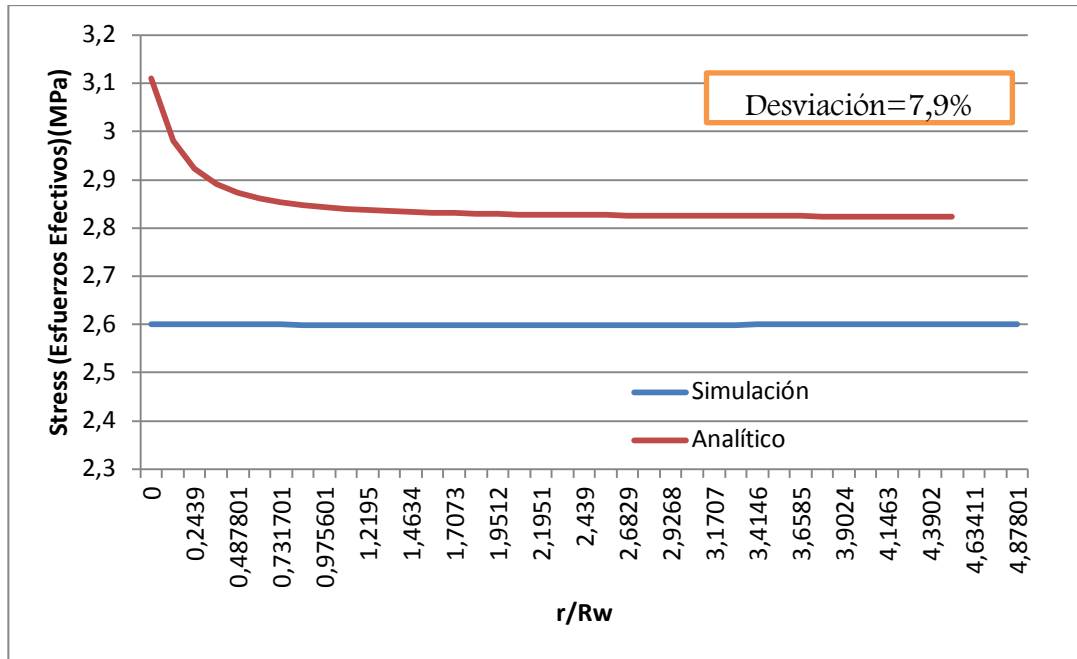
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS y modelo analítico; Autores.

Figura 49. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X con el modelo analítico, en el tramo de la arena sucia. (True Distance)



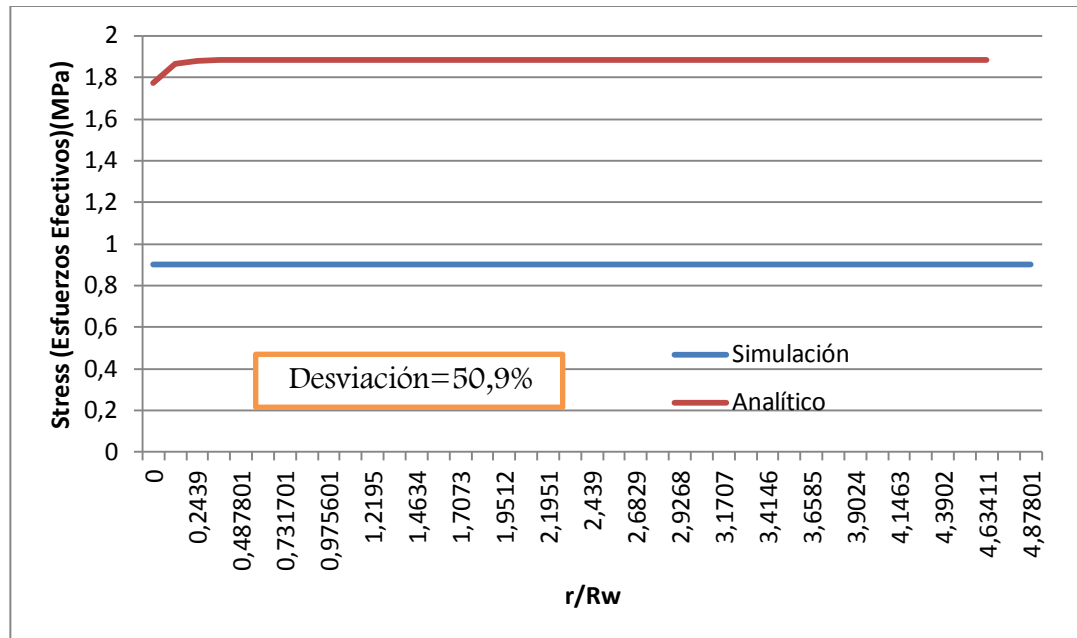
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS y modelo analítico; Autores.

Figura 50. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y con el modelo analítico, en el tramo de la arena sucia. (True Distance)



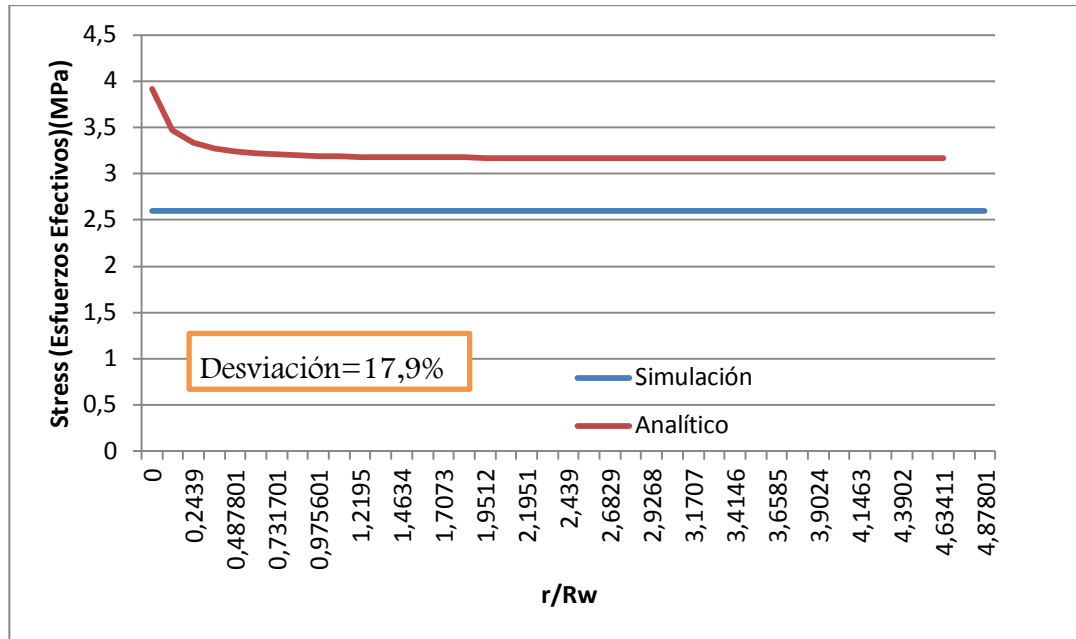
Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS y modelo analítico; Autores.

Figura 51. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje X con el modelo analítico, en el tramo de la arena limpia. (True Distance)



Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS y modelo analítico; Autores.

Figura 52. Comportamiento de los esfuerzos efectivos a lo largo del eje Y con el modelo analítico, en el tramo de la arena limpia. (True Distance)



Fuente: Tomado, simulación en software comercial ABAQUS y modelo analítico; Autores.

7.4.2. Interpretación para los cambios de esfuerzos.

Es posible observar que en las graficas 41, 43 y 45 para cada tramo el comportamiento del esfuerzo contra la distancia en X las graficas 42, 44 y 46 para cada tramo el comportamiento del esfuerzo contra la distancia en Y. Para los tres tipos de rocas, exceptuando la grafica del comportamiento del esfuerzo contra la distancia en Y para el tramo de la arena sucia; una tendencia inicialmente lineal a disminuir el esfuerzo hasta llegar a un punto en donde dicha tendencia desaparece y empieza a estabilizar el valor del esfuerzo, por consiguiente, a mantenerse a partir de dicha lectura de distancia. La tendencia a disminuir es bien marcada para todas las gráficas y, se hace la salvedad, que, para el tramo de la arena limpia, dicha estabilidad del valor no se alcanza; sin embargo, la disminución del valor o la pendiente de esta disminución es menor para la arena limpia que en las demás rocas. También se puede decir que las magnitudes manejadas para los esfuerzos en cada uno

de los tipos de roca son bastante diferentes, pasando de valores muy altos en el shale, hasta los valores más bajos en la arena limpia.

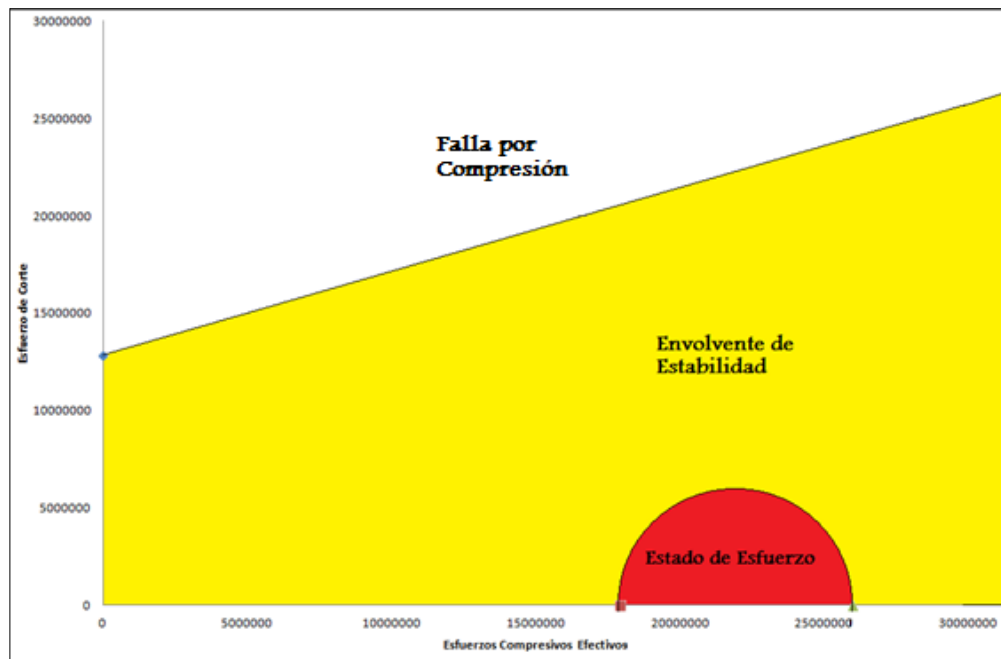
Para el caso de la grafica 44 de la arena sucia de el comportamiento del esfuerzo contra la distancia en Y, se evidencia un comportamiento sinusoidal, pero partiendo de un valor máximo bajando en forma de campana hasta subir nuevamente el valor del esfuerzo, sobrepasando el valor inicial y no evidenciando alguna intención de estabilizar el valor; como dicho comportamiento debe ser replicado por cada uno de los elementos finitos de ese tramo, es posible decir, que todo el comportamiento a lo largo de dicho eje se mantendrá dentro de uno sinusoidal sin estabilizar un valor.

Se agrega que el comportamiento de dichas gráficas es semejante a las del estudio hecho en el paper (*Mesh optimization for finite element models of wellbore stress analysis; Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, USA, Lee, M and Eckert, A. and Nygaard, R.*) y se toma este mismo como base para la validación de los resultados y la coherencia de los mismos respecto a la simulación.

7.4.3. Criterio Mohr-Coulomb (Después de la perforación)

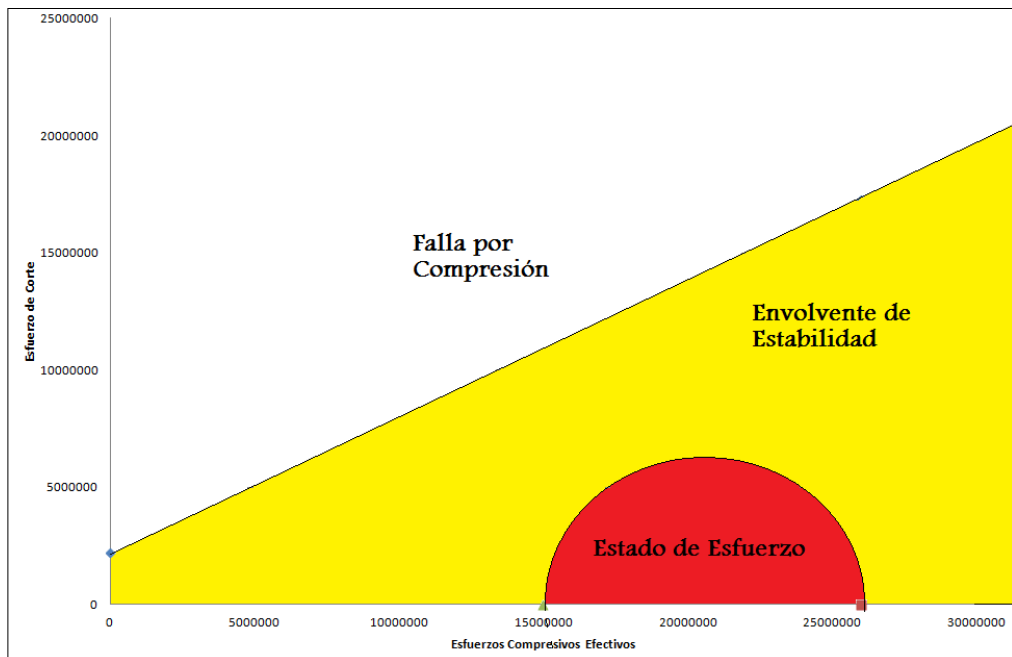
Teniendo como base, cohesión y ángulo de fricción, se realiza la línea de tendencia que representara la función de fluencia, que representara la envolvente de estabilidad, que es la misma realizada antes de realizar la simulación, y con este criterio se dibuja la semicircunferencia con los cambios de esfuerzos compresivos efectivos.

Figura 53. Representación envolvente Mohr-Coulomb para el tramo del shale, después del drilling (Perforación).



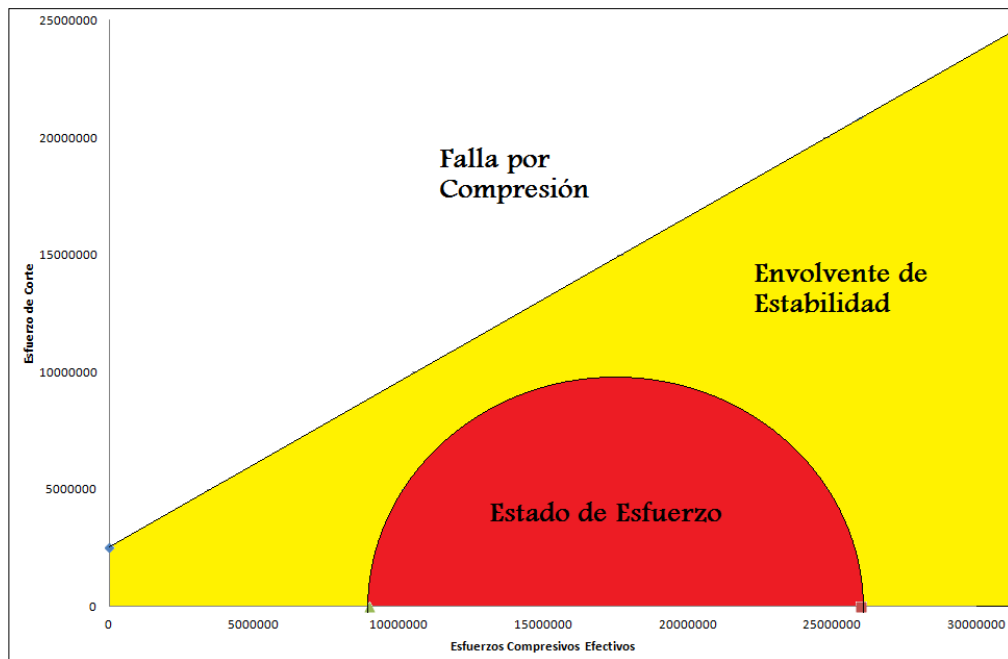
Fuente: Autores.

Figura 54. Representación envolvente Mohr-Coulomb para el tramo de arena sucia, después del drilling (Perforación).



Fuente: Autores.

Figura 55. Representación envolvente Mohr-Coulomb para el tramo de arena limpia, después del drilling (Perforación)



Fuente: Autores.

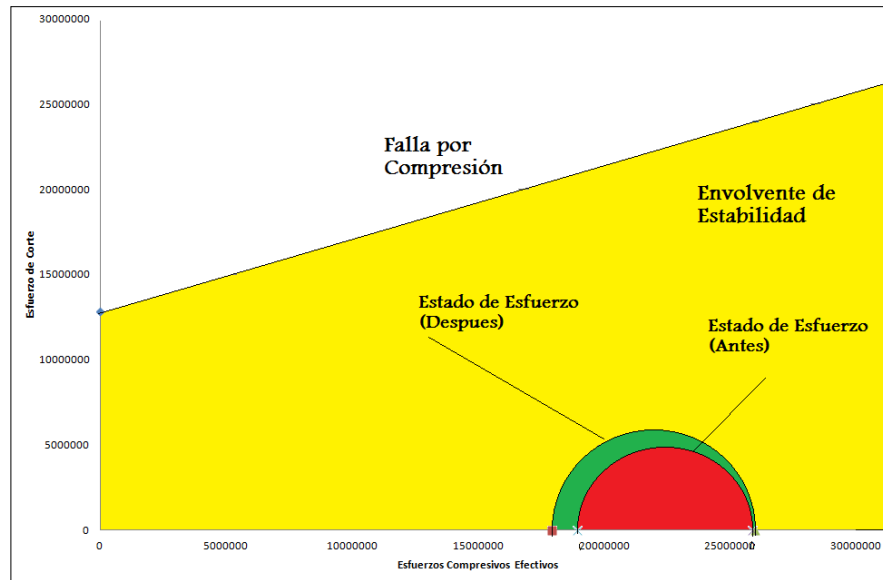
7.4.4. Interpretación de los criterios Mohr-Coulomb, para cada tramo en el caso base.

Teniendo los resultados numéricos obtenidos por la simulación realizada, se sensibiliza de nuevo con el criterio Mohr-Coulomb, para representar gráficamente, el comportamiento del material en estudio.

En las figuras 53 (tramo de Shale), 54 (tramo de arena sucia) y 55 (tramo arena limpia) Para los tramo, se obtuvieron esfuerzos compresivos efectivos máximos y mínimos, que se dan como pauta, para generar la semicircunferencia. Se obtiene la circunferencia dentro de la envolvente de estabilidad, dando como resultado que el material sigue comportándose elásticamente dentro de la superficie de fluencia.

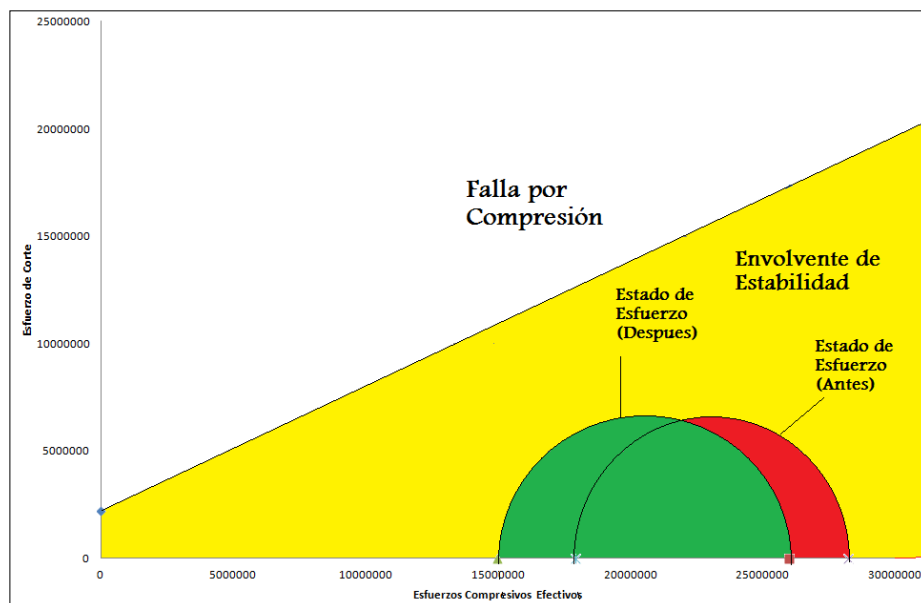
7.5. Antes y después de la Simulación, criterio Mohr-coulomb.

Figura 56. Esquema comparativo del comportamiento de los esfuerzos efectivos compresivos según el criterio Mohr-Coulomb, para el tramo del Shale.



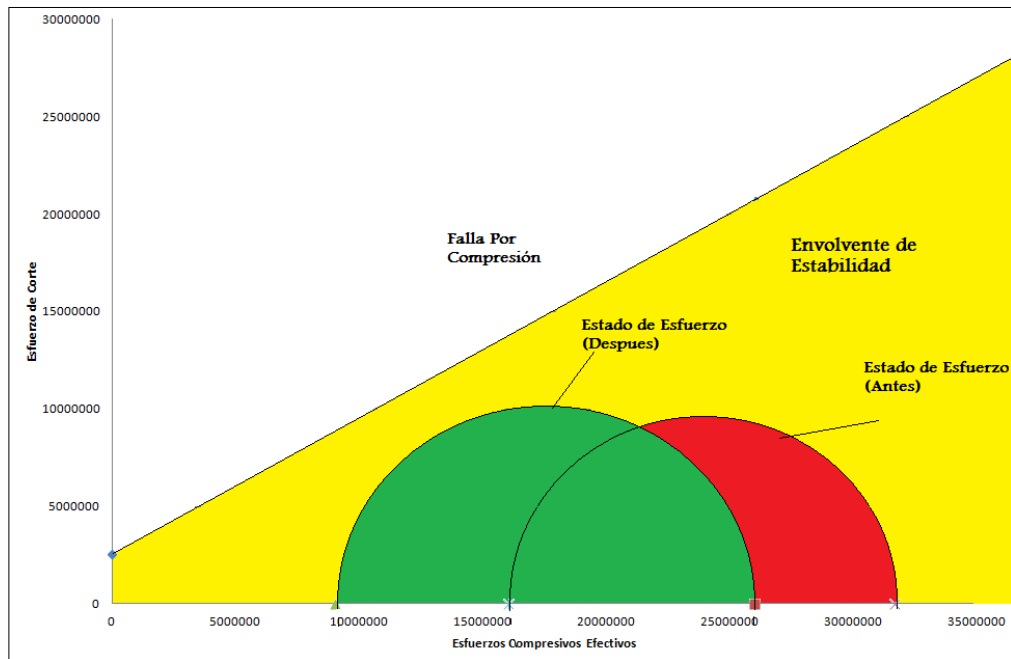
Fuente: Autores.

Figura 57. Esquema comparativo del comportamiento de los esfuerzos efectivos compresivos según el criterio Mohr-Coulomb, para el tramo de la arena sucia.



Fuente: Autores.

Figura 58. Esquema comparativo del comportamiento de los esfuerzos efectivos compresivos según el criterio Mohr-Coulomb, para el tramo de arena limpia.



Fuente: Autores.

7.5.1. Interpretación de los criterios Mohr-Coulomb, para cada tramo, antes y después de la perforación.

Las figura 56 (tramo de shale), 57 (tramo de arena sucia), 58 (arena de arena limpia), muestra esquemas comparativos de un antes y después de la perforación (simulación), de los criterios Mohr-Coulomb; se observa un distanciamiento (Sin escala), que muestra el cambio y redistribución de los esfuerzos debido a la compresión generada al existir una fuerza externa (Perforación-Simulación), y da como resultado, que siga existiendo un comportamiento elástico del material, ya que las dos semicircunferencias generadas, se encuentran dentro de la superficie de fluencia.

Los esfuerzos compresivos efectivos para después (Perforación), son negativos, pero se muestran en una escala positiva, para mostrar esquemáticamente el criterio en estudio.

7.6. Cuadro comparativo de tendencia en un plano x-y para cada tramo y criterios de estabilidad.

7.6.1. Valores, Antes de la perforación, Modelo Analítico y después de la perforación.

Tabla 2. Valores de Esfuerzos Efectivos para el tramo de Shale

	ESFUERZOS EFECTIVOS SHALE		
	Antes	Analítico	Simulación
Esfuerzo Máximo (Pa)	25882472,7	25896740	26005800
Esfuerzo Mínimo (Pa)	18925433,3	16274700,6	17933300

	ESFUERZOS EFECTIVOS SHALE		
	Antes	Analítico	Simulación
Esfuerzo Máximo (PSI)	3753,93381	3756,00311	3771,82092
Esfuerzo Mínimo (PSI)	2744,90095	2360,44483	2601,00424

Tabla 3. Valores de esfuerzos efectivos para el tramo de arena sucia.

	ESFUERZOS EFECTIVOS ARENA SUCIA		
	Antes	Analítico	Simulación
Esfuerzo Máximo (Pa)	28221822,5	28236075,68	25997800
Esfuerzo Mínimo (Pa)	17930585,3	19639762,3	14961300

	ESFUERZOS EFECTIVOS ARENA SUCIA		
	Antes	Analítico	Simulación
Esfuerzo Máximo (PSI)	4093,22768	4095,29493	3770,66062
Esfuerzo Mínimo (PSI)	2600,61051	2848,50558	2169,95225

Tabla 4. Valores de esfuerzo efectivos para el tramo de arena limpia.

	ESFUERZOS EFECTIVOS ARENA LIMPIA		
	Antes	Analítico	Simulación
Esfuerzo Máximo (Pa)	31665665,1	31680699	26001400
Esfuerzo Mínimo (Pa)	16017970,9	18338802	8998680

	ESFUERZOS EFECTIVOS ARENA SUCIA		
	Antes	Analítico	Simulación
Esfuerzo Máximo (PSI)	4592,71463	4594,89511	3771,18275
Esfuerzo Mínimo (PSI)	2323,20922	2659,81731	1305,14768

7.6.2. Análisis Comparativo, criterios de estabilidad.

Tipo de Roca	Sistema en equilibrio	Modelamiento	Modelo analítico
Shale	<ul style="list-style-type: none"> -Los estados de esfuerzos para el sistema en equilibrio y para la simulación presentan el mismo comportamiento. -La diferencia radica en los valores de los Esfuerzos máximos y mínimos. 		<ul style="list-style-type: none"> -Los valores del modelo analítico y la simulación son similares. - La simulación es representativa para esta roca debido a la similitud en los valores
Arena Sucia	<ul style="list-style-type: none"> -Los estados de esfuerzos para el sistema en equilibrio y para la simulación presentan el mismo comportamiento. - Los valores máximos y mínimos de los esfuerzos disminuyen en proporciones similares. 		<ul style="list-style-type: none"> -Los valores del modelo analítico y la simulación son similares. - La desviación de la simulación es 23, 9 y 7,9%:

Tipo de Roca	Sistema en equilibrio	Modelamiento	Modelo analítico
Arena Limpia	<ul style="list-style-type: none"> - El estado de esfuerzo para la simulación es mucho más grande que para el estado en equilibrio. - Los valores de esfuerzos máximos y mínimo difieren en gran proporción respecto del estado en equilibrio y la simulación. 		<p>-Los valores del modelo analítico y la simulación tiene una mayor desviación</p>

VIII. CONCLUSIONES

1. El uso de software comercial ABAQUS que se basa en la teoría de elementos finitos, constituye una herramienta fundamental para el análisis geomecánico de pozos verticales y también en lo que respecta a los parámetros de diseño y variables tenidas en cuenta a la hora de la simulación. ABAQUS está equipado para manejar las fuentes de no linealidad que afectan a las respuestas de los esfuerzos y deformación de la roca.
2. Se implementó la herramienta ABAQUS, y se planteó el criterio de Mohr-Coulomb, para identificar las zonas dentro de la superficie de fluencia para cada tipo de roca (shale, arena sucia y arena limpia) con esto representar la estabilidad del material.
3. Del análisis de estabilidad y análisis de resultados, se da como conclusión que los parámetros bases dominantes en la investigación, son los cambios de los esfuerzos compresivos efectivos con respecto a la distancia medida de cada tramo.
4. Dentro del análisis de sensibilidad para el criterio Mohr-Coulomb realizado antes de realizar las simulaciones, en estado estático, se observa el material de todo el caso base de la investigación dentro de la envolvente de estabilidad, con lo cual se determina, que se encuentra en la superficie de fluencia y el material se comporta elásticamente.
5. Según el criterio Mohr-Coulomb el cual fue tomado como base para la investigación, se concluye que el shale y la arena sucia, muestran una mayor resistencia a fallar por compresión respecto a la arena limpia.
6. Respecto al criterio base del proyecto de investigación, criterio de Mohr-Coulomb, se determina que, para un antes y un después de la simulación, el material del caso base se sigue comportando elásticamente.
7. Los valores numéricos del modelo analítico son similares a los valores iniciales tenidos a la hora de realizar la data geomecánica, como resultado se evidencia que el modelo analítico tendrá un

comportamiento análogo al estado estático, antes de realizar la simulación (perforación).

8. Teniendo en cuenta los resultados y el análisis de las graficas obtenidas a partir de la herramienta implementada ABAQUS en el caso base de la investigación, es posible concluir que de los tres tipos de roca (shale, arena sucia, arena limpia), quien presenta mayor estado de esfuerzos compresivos efectivos.
9. Como resultado del análisis comparativo realizado de las gráficas de Stress (esfuerzos compresivos efectivos) Vs r/R_w (distancia), se puede inferir, que de los tres tipos de roca estudiados (shale, arena sucia y arena limpia) las dos primeras presentan una menor disminución de la magnitud de esfuerzos compresivos efectivos.
10. Basado en el análisis integrado de los resultados obtenidos de la herramienta implementada ABAQUS, principalmente del perfil de esfuerzos, generado a partir de la misma, es posible afirmar que la arena limpia es la que soporta una menor magnitud de esfuerzos compresivos además de disminuir en mayor medida estos esfuerzos con la distancia, a través de todo el tramo de ésta.

IX. LECCIONES APRENDIDAS

1. La simulación que más se ajusta para el modelo analítico de Kirsch es usando una placa plana con enmallado radial y un barrido de la misma forma, sin embargo en el modelo planteado se emplea los elementos axisimétricos con un barrido volumétrico respecto a un eje de simetría. Dicha diferencia en los modelos implica que:
 - Limita la visualización de los cambios significativos de las propiedades tales como: esfuerzos máximos y mínimos durante el barrido volumétrico.
 - Se generan desviaciones entre los valores del modelo analítico y la simulación.
 - El comportamiento para la arena limpia no sea el esperado (se presenta una expansión).
2. En la construcción del modelo se tiene un material isotrópico (Las propiedades no varían en los 360 grados) debido a esto no se observan variaciones significativas en las magnitudes de los esfuerzos.
3. El software empleado contaba con una licencia limitada de tipo estudiantil esto implica que:
 - Se limite la refinación de la malla del modelo.
 - No sea posible utilizar todos los parámetros de modelado del software como por ejemplo los STEPS.
 - Las tres herramientas que constituyen el simulador a pesar de ser complementarias estas no trabajan conjuntamente.
4. El uso del software comercial (ABAQUS) respecto a otros implica que:
 - El uso del sistema internacional para el manejo de los parámetros
 - El manejo de cada una de las Keywords particulares del software debido a que su uso es multipropósito.

X. RECOMENDACIONES

1. La información necesaria para un análisis de estabilidad (ensayos triaxiales para diferentes presiones, ensayos UCS, propiedades elásticas de la roca, perfil geológico, compresibilidad), debe tener una alta confiabilidad para que de igual manera los resultados de la perforación obtenidos a partir de la simulación lo sean, así que se requiere que se tenga un mayor estudio.
2. Se recomienda respecto a la herramienta en uso, ABAQUS, definir los parámetros y las reacciones necesarias, con el fin de comprobar el equilibrio de la mejor manera. Debido a limitantes presentes en la versión usada se generan steps para cada paso.
3. Tener cuidado a la hora de realizar una simulación en la herramienta ABAQUS; ya que dependiendo de los criterios y de la versión usada, sea comercial o estudiantil, el puede restringirse para ciertos enfoques.
4. Utilizar la versión extendida del software comercial con el fin de obtener un mejor modelamiento para que la comparación del modelo analítico y la simulación sea representativa.

BIBLIOGRAFIA

1. AMOCO. 1996. Wellbore stability. Drilling handbook. s.l.
2. CHARLEZ, P.A.: "The impact of Constitutive Laws on Wellbore Stability: A General Review," Artículo SPE 28058 JPT Drilling & Completion, (Junio 1997b), 119-127.
3. CHARLEZ, P.A.: Rock Mechanics Petroleum Applications, Volumen 2, Editions Technip, Paris, (1997a).
4. CHARLEZ, P.A.: Rock Mechanics Theoretical Fundamentals, Volumen 1, Ediciones Technip, Paris (1991).
5. CHEN, X., TAN, C. P. Y HABERFIELD, C.M.: "Wellbore Stability Analysis Guidelines for Practical Well Design". Artículo SPE 36972. 1996.
6. DA FONTOURA, S. "Rock Mechanics Principles and Petroleum Engineering Application". Asistencia Técnica 2002.
7. DEILY, F.H. Y OWENS, T. C.: "Stress around a Wellbore". Artículo SPE 2557. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. 1969.
8. FONSECA, C.: "Chemical-Mechanical Modeling of Wellbore Instability in shales," Ph.D. disertación, Universidad de Texas at Austin, Austin, Texas. 1998.
9. GÓMEZ VANEGAS, CÉSAR AUGUSTO y SANTAMARÍA BOLÍVAR, RAFAEL, "Análisis De Estabilidad De Pozo Utilizando El Software PBORE", Tesis de grado,. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2004.
10. H. KARADENIZ.: "An Axi-Symmetric Finite Element For Analyses of Soil-Structure And Fluid-Structure Interactions". Dep. of Civil Engineering, Delft University of Technology Delft, The Netherlands. 2004.
11. HIBBITT, KARLSSON, & SORENSEN, Inc.: Abaqus/manual estándar de usuario versión 6.1, U.S.A., (2000a).
12. J.D. CLAYTON, J.J. RENCIS, "Short Communication; Numerical integration in the axisymmetric finite element formulation", 1999.

13. LEE, M, ECKERT, A. AND NYGAARD, R.: "Mesh optimization for finite element models of wellbore stress analysis", Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, USA, ARMA 11-356, 2011.
14. LOPEZ, CESAR; QUINTERO, YAIR.: "Desarrollo de una herramienta software mediante el uso de diferencias finitas para analizar la inestabilidad de pozos, aplicando la teoría elástica. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 2007.
15. MCLEAN, M. R. Y ADDIS, M. A.: "Wellbore stability analysis: A review of current methods of analysis and their field application". Artículo SPE 19941. 1990.
16. MCLEAN, M.R. AND ADDIS, M.A.: "Wellbore Stability: The Effect of Strength Criteria on Mud Weight Recommendations," Artículo SPE 20405 Presentado en el 65a Conferencia y Exposición técnica anual de la de la SPE held en New Orleans, LA, (Septiembre 1990b), 9-17.
17. PALACIOS JINNA Y HERNÁNDEZ GUSTAVO: "Implementación de la teoría poroelástica, en el análisis de la estabilidad de pozos mediante el desarrollo de una herramienta Software, aplicando el método de diferencias finitas". Universidad Industrial de Santander, 2008.
18. RONDAL FERNANDO Y BASTIDAS URIEL: "Estudio experimental y por análisis de elementos finitos del factor de concentrador de esfuerzo producido por un agujero en una placa plana", Universidad Nacional de Colombia, Dyna, noviembre, año/vol. 69, numero 137.
19. SÁNCHEZ M Y VÁSQUEZ A. Introducción a la Geomecánica Petrolera. Caracas Venezuela. 1997.
20. TORRES, M.E., GONZALEZ, A.J., Last, N.C. "In-Situ Stress State Eastern Cordillera Colombia" SPE 81074 Colombia National University-Schlumberger DCS Santa Fe de Bogotá: National University, BP Exploration, 2003.
21. VILLADIEGO, D.; MORA, L.: "Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de teorías elásticas y poroelásticas: aplicación al piedemonte Colombiano. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 2005.

22. WANG, H.F.: Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology, Princeton University Press, New Jersey, U.S.A. (2000).
23. X. CHEN, C:P TAN; C.M HABERFIELD "A Comprehensive Practical Approach For Wellbore Instability Management" SPE 48898. 1998.
24. YEW, C., CHENEVERT, M., WANG, C., OSLSANYA, S., "Wellbore Stress Distribution Produced by Moisture Adsorption". Artículo SPE 19536.

NOMENCLATURA

σ = Tensor de tension.

σ_{prom} =Esfuerzo promedio (Invariantes de esfuerzo).

$[S]$ =Esfuerzos deviatoricos.

σ, τ =Esfuerzos principales.

x', y', z' = Desplazamientos de deformación.

\vec{r}' =Ángulo de rotación.

(Γ) =Deformación de corte.

ε =Elongación para la deformación.

ε_v =Deformación Volumétrica.

J =Esfuerzos Invariantes.

α =Constante de BIOT.

V_p = Velocidad de onda P.

V_s = Velocidad de onda S.

Dt_p = Velocidad de compresión.

Dt_s = Velocidad de corte.

ϑ = Módulo de Poisson.

G =Módulo de Corte.

E = Módulo de Young.

UCS = Resistencia a la compresión uniaxial.

T_o = Resistencia a la tensión.

S_o = Cohesión.

φ = Ángulo de fricción.

P_o = Presión de poro.

S_v = Esfuerzos debido al manto de recubrimiento.

S_h, S_H = Esfuerzos horizontales.

σ_v = Esfuerzos efectivos verticales.

σ_h, σ_H = Esfuerzos efectivos horizontales.

σ_z = Esfuerzo axial.

σ_r = Esfuerzo radial.

σ_t = Tensión de la deformación.

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo efectivo máximo.

σ_{oct}, τ_{oct} = Esfuerzos de corte octohedrales.

$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ = Dominio elástico.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Tensiones principales.

GSI = Geological strength index.

D = Factor de alteración del criterio de rotura H&B.

RMR = Rating mass rock.

RQD = ndice de calidad de las rocas.

$u(r, z)$ = Campo de desplazamientos.

ε_r = Ecuaciones cinemáticas.

k = Matriz de rigidez.

λ = Constante elástica.

σ_θ = Tensión tangencial.

a = Radio del pozo.

r = Distancia a partir de cada eje.

V_{shale} = Volumen de shale.

ANEXOS

Anexos A. Solución elástica lineal.

Describe la concentración radial y tangencial de los esfuerzos alrededor del pozo, esta solución fue primero derivada por Kirsch en 1898 y extendida por Zhang, para un valor de presión de poro y presión de fluido. Asumiendo una constante de Biot's de 1, los esfuerzos efectivos alrededor del pozo vertical son obtenido de la siguiente manera; radial, tangencial y vertical.

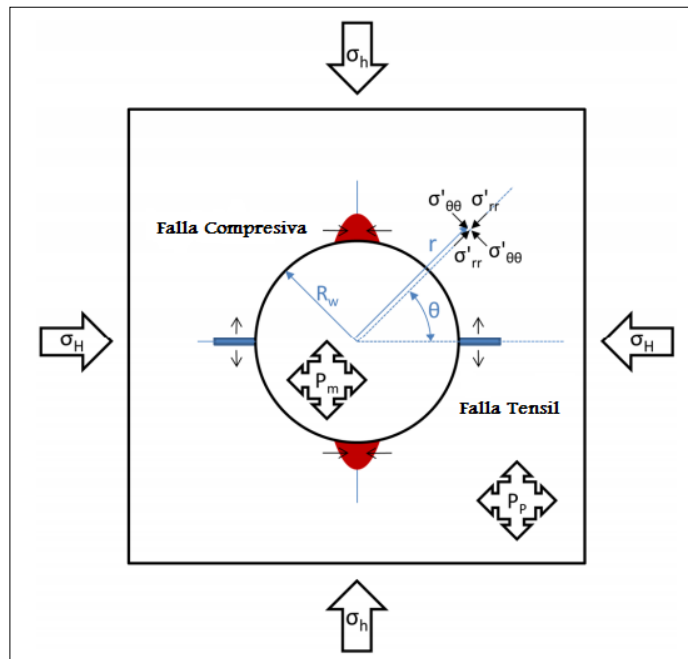
$$\sigma'_{rr} = \frac{(\sigma_H + \sigma_h + 2P_p)}{2} \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 - \frac{4R_w^2}{r^2} + \frac{3R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + (P_m - P_p) \frac{R_w^2}{r^2}$$

Ecu. A-1

$$\sigma'_{\theta\theta} = \frac{(\sigma_H + \sigma_h - 2P_p)}{2} \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 + \frac{3R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - (P_m - P_p) \frac{R_w^2}{r^2}$$

Ecu. A-2

Figura A-1. Estado de esfuerzos de un pozo vertical



Fuente: Mesh optimization for finite element models of wellbore stress analysis; Lee M and Eckert, A, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, USA, 2011.

Anexos B. Modulo de Corte.

Si se considera una trayectoria de carga tal que $\sigma_x = -\sigma_y = \sigma$, σ_z , se tiene un estado conocido como cizalladura pura, el módulo resultante de una prueba bajo este estado de esfuerzos se denomina módulo de corte o de rigidez.

$$E\gamma_{xy} = 2E\Gamma_{xy} = 2(1 + \nu)\tau_{xy} \quad \text{Ecu. B-1}$$

$$E\gamma_{yz} = 2E\Gamma_{yz} = 2(1 + \nu)\tau_{yz} \quad \text{Ecu. B-2}$$

$$E\gamma_{zx} = 2E\Gamma_{zx} = 2(1 + \nu)\tau_{zx} \quad \text{Ecu. B-3}$$

Estas ecuaciones se convierten en:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{Ecu. B-4}$$

Tabla B-1. Relaciones de constantes Elásticas.

$E = 3K(1 - 2\nu)$	$K = \frac{1 + \nu}{3\nu} \lambda$	$\frac{\lambda}{\lambda + G} = 2\nu$
$E = 2G(1 + \nu)$	$K = \frac{2}{3} G \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu}$	$\frac{G}{\lambda + G} = 1 - 2\nu$
$E = \frac{9KG}{3K + G}$	$K = \lambda + \frac{2}{3} G$	$\frac{\lambda + 2G}{\lambda + G} = 2(1 - \nu)$
$E = \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G} G$	$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$	$\frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G} = 2(1 + \nu)$
$E = \frac{\lambda}{\nu} (1 + \nu)(1 - 2\nu)$	$\frac{\lambda}{G} = \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$	$\frac{3\lambda + 4G}{\lambda + G} = 2(2 - \nu)$

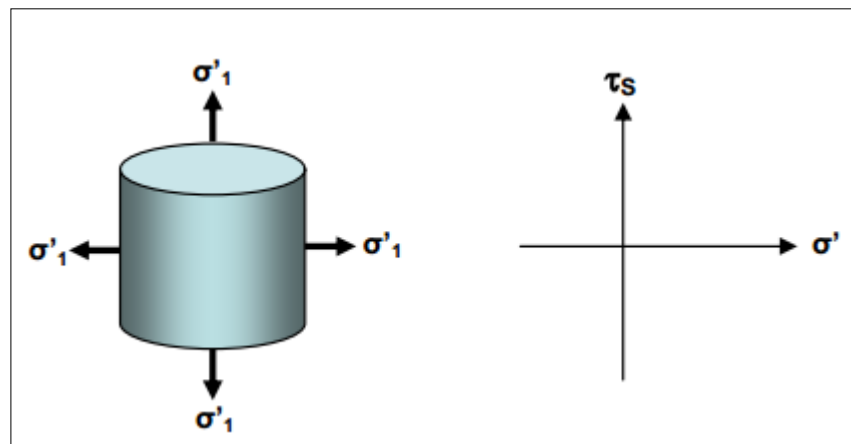
Fuente: "Petroleum related Rock Mechanics". FJÆR, E. et al.

Anexos C. Representación de varios estados de esfuerzos del círculo de Mohr-Coulomb.

Un material puede estar sometido a un determinado estado de esfuerzos, es decir, a cierta distribución de esfuerzos, que en un momento dado pueden ocasionar la falla del mismo. Los estados de esfuerzos a los que puede estar sometido un material, en función de los esfuerzos principales y representados en el círculo de Mohr son.

1) Tensión hidrostática.

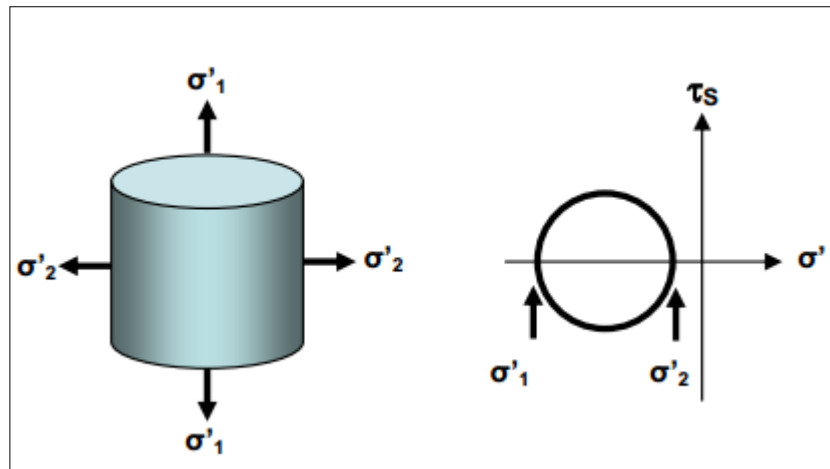
Figura C-1. Material sometido a Tensión Hidrostática.



Fuente: Tomado de análisis de Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de las teorías elástica y poroelástica: aplicación al Piedemonte Colombiano; Lenin Mora y Dairo Villadiego-UIS, 2011

2) Tensión en general.

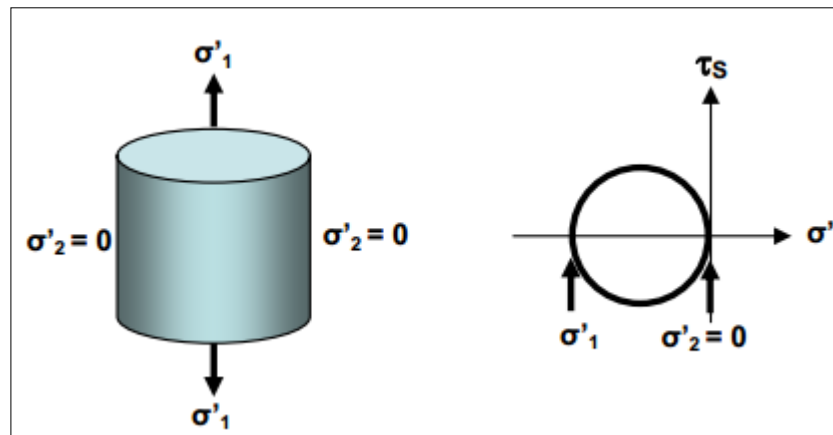
Figura C-2. Material sometido a Tensión en general.



Fuente: Tomado de análisis de Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de las teorías elástica y poroelástica: aplicación al Piedemonte Colombiano; Lenin Mora y Dairo Villadiego-UIS, 2011

3) Tension Uniaxial.

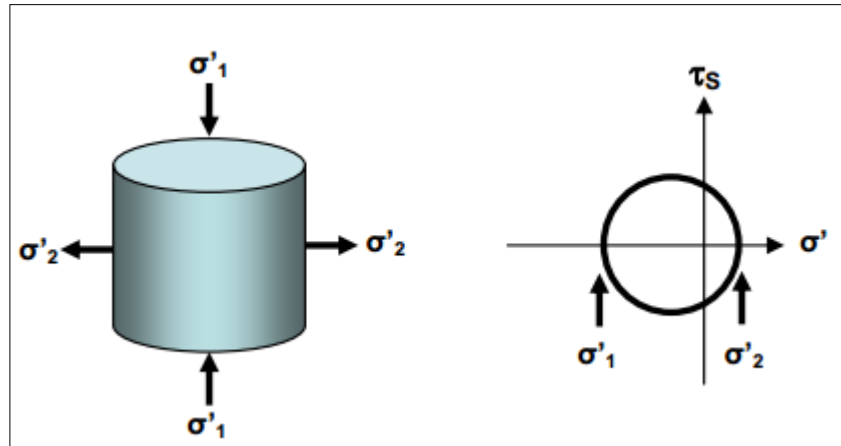
Figura C-3. Material sometido a Tensión Uniaxial.



Fuente: Tomado de análisis de Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de las teorías elástica y poroelástica: aplicación al Piedemonte Colombiano; Lenin Mora y Dairo Villadiego-UIS, 2011

4) Tensión y compresión.

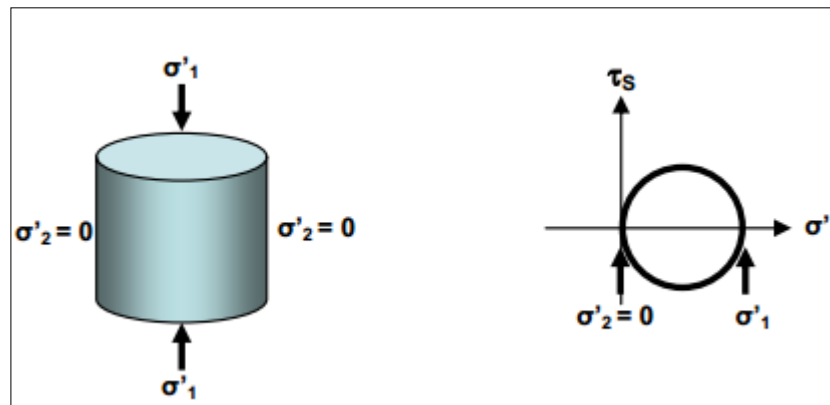
Figura C-4. Material sometido a Tensión y Compresión.



Fuente: Tomado de análisis de Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de las teorías elástica y poroelástica: aplicación al Piedemonte Colombiano; Lenin Mora y Dairo Villadiego-UIS, 2011

5) Compresión Uniaxial.

Figura C-5. Material sometido a Compresión Uniaxial



Fuente: Tomado de análisis de Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de las teorías elástica y poroelástica: aplicación al Piedemonte Colombiano; Lenin Mora y Dairo Villadiego-UIS, 2011

Anexos D. Distribución de esfuerzos elástica lineal.

Las distribuciones de esfuerzos en la cara del pozo ($r = R$) se reducen a las ecuaciones siguientes. Estas ecuaciones tratan de predecir la perturbación que causa la perforación del pozo y la manera cómo estarán dispuestos los esfuerzos en la cara del pozo después de la perforación, luego se hace necesario determinar si esta nueva configuración de esfuerzos causará fallas o problemas de inestabilidad, lo cual ocurrirá si es excedida la resistencia tensil o compresiva de la roca de formación.

$$\sigma_r = P_w \quad \text{Ecu. D-1}$$

$$\sigma_\theta = (S_x + S_y - P_w) - 2(S_x - S_y) \cos 2\theta - 4S_{xy} \sin 2\theta \quad \text{Ecu. D-2}$$

$$\sigma_z = S_{zz} - 2\nu(S_x - S_y) \cos 2\theta - 4\nu S_{xy} \sin 2\theta \quad \text{Ecu. D-3}$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0 \quad \text{Ecu. D-4}$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-S_{xy} \sin \theta + S_{yz} \cos \theta) \quad \text{Ecu. D-5}$$

Los criterios de falla están en función de los esfuerzos principales por lo tanto es necesario expresar las componentes de las distribuciones de esfuerzos de las ecuaciones anteriores en estos, estas ecuaciones son reescritas por conveniencia de la siguiente manera:

$$\sigma_a = P_w \quad \text{Ecu. D-6}$$

$$\sigma_b = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \quad \text{Ecu. D-7}$$

$$\sigma_c = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \quad \text{Ecu. D-8}$$

De donde infiere que el esfuerzo radial ($\sigma_r = \sigma_a$) es un esfuerzo principal, debido que no existen componentes de corte en el plano perpendicular a él. Sin embargo no se conoce a priori cual es el esfuerzo principal máximo, mínimo e intermedio para utilizar los criterios de falla, de allí los subíndices a, b y c.