



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

CUANTIFICACIÓN VOLUMÉTRICA DE CAVINGS A PARTIR DE  
MODELAMIENTO GEOMECÁNICO UTILIZANDO UN SOFTWARE,  
APLICADO A UN CASO COLOMBIANO

RENATO GUTIÉRREZ ESCOBAR

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

2013

CUANTIFICACIÓN VOLUMÉTRICA DE CAVINGS A PARTIR DE  
MODELAMIENTO GEOMECÁNICO UTILIZANDO UN SOFTWARE,  
APLICADO A UN CASO COLOMBIANO

RENATO GUTIÉRREZ ESCOBAR

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos

Director

ZULY H. CALDERON CARRILLO

Ingeniera de Petróleos

Codirector

YAIR A. QUINTERO PEÑA

Ingeniero de Petróleos

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

2013

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a Dios por su infinita ayuda, a mi familia por ser modelo a seguir y por impulsarme a cumplir mis sueños y todos mis amigos por esos momentos de esparcimiento y de estudio.

Especial agradecimiento a todos los miembros del Grupo Investigación de Estabilidad de Pozo por ayudarme a desarrollar mi tesis de pregrado.

Agradecerle también a todas las personas que hacen parte de la Universidad Industrial de Santander por aportar su granito de arena para cumplir este sueño

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicarle esta tesis a todas esas personas que quieren hacer algo que nadie ha hecho antes, ya que esa es mi motivación para investigar y estudiar.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
ANTECEDENTES.....	15
1. CAVINGS.....	19
1.1 DEFINICIÓN .....	19
1.2 MEDICIÓN DE LOS CAVINGS EN CAMPO.....	20
1.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE POZO BASADO EN CAVINGS.....	21
1.4 CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE CAVINGS .....	22
1.5 FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN DE CAVINGS.....	25
1.6 INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LA PRODUCCIÓN DE CAVINGS .....	26
1.7 INESTABILIDADES DEL POZO QUE PRODUCEN CAVINGS .....	27
1.8 MODOS DE FALLA PRODUCTORES DE CAVINGS .....	29
2. CRITERIO DE FALLA Y MODELO CONSTITUTIVO DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL .....	32
2.1 MODELO DE PLASTICIDAD DE MOHR-COULOMB .....	32
2.1.1 Criterio de Mohr-Coulomb.....	32
2.1.2 Descomposición de la tasa de deformación .....	34
2.1.3 Comportamiento elástico .....	34
2.1.4 Comportamiento de cedencia .....	35
2.1.5 Regla de flujo.....	36
3. DISEÑO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UN POZO PERFORADO .....	39
3.1 MÓDULO DE PARTES.....	40
3.1.1. Característica Base .....	40
3.1.2. Copia de una parte.....	40
3.1.3. Espacio de Modelado de la Parte.....	41
3.1.4. Tipos de Partes para Abaqus/Estándar y Explícito.....	41
3.2 MÓDULO DE PROPIEDADES .....	42
3.2.1. Secciones.....	42
3.2.2. Definición del Modelo de Plasticidad de Mohr-Coulomb.....	43
3.3 MÓDULO DE ENSAMBLAJE .....	44
3.3.1. Copia Dependiente de las Partes .....	44

3.3.2.	Copia Independiente de las Partes .....	44
3.4	MÓDULO DE PASOS .....	45
3.4.1.	Paso Inicial.....	45
3.4.2.	Pasos del Análisis .....	45
3.4.3.	Análisis de Perturbación Lineal .....	45
3.4.4.	Análisis General.....	45
3.4.5.	Solicitud de Salida .....	49
3.5	MÓDULO DE CARGA .....	51
3.5.1.	Condiciones de frontera.....	52
3.5.2.	Condiciones de carga .....	53
3.5.3.	Condiciones de campos predefinidos .....	54
3.6	MÓDULO DE ENMALLADO .....	55
3.6.1.	Semillas .....	56
3.6.2.	Elementos Finitos.....	57
3.6.3	Técnicas de enmallado.....	60
3.6.4.	Algoritmo de Enmallado .....	63
3.7	MÓDULO DE TRABAJO .....	63
4.	VALIDAR EL MODELO CREADO.....	64
4.1	APROXIMACIÓN PROPUESTA DEL VOLUMEN ANALÍTICO DE CAVINGS.....	65
4.2	VOLUMEN DE CAVINGS USANDO UN MODELO DE SIMULACIÓN .....	67
4.2.1	Modelo de simulación.....	68
4.2.2	Etapas de la simulación.....	70
4.2.3	Ejemplo de Aplicación.....	71
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	72
4.3.1	Resultados del paso Estático de la simulación.....	72
4.3.2	Calibración del modelo de simulación .....	73
4.3.3	Validación de la simulación.....	76
4.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ANALÍTICOS CON LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	77
5.	CONCLUSIONES.....	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagen de los cavings .....	20
Figura 2: Imagen de un caving angular.....	22
Figura 3: Imagen de un Caving Blocoso o Tabular .....	23
Figura 4: Imagen de un Caving Blocoso o Tabular .....	23
Figura 5: Imagen de un Caving Astiloso o Splintered .....	24
Figura 6: Imagen de un Caving Astiloso o Splintered .....	24
Figura 7: Imagen de un Caving Retrabajado .....	25
Figura 8: Imagen de un KeySeat .....	27
Figura 9: Imagen de un BreakOut.....	28
Figura 10: Imagen de un WashOut.....	29
Figura 11: Imagen de un BreakOut Ancho.....	29
Figura 12: Imagen de un BreakOut Angosto.....	30
Figura 13: Imagen de un KnockOut Somero.....	30
Figura 14: Imagen de un KnockOut Profundo.....	31
Figura 15: Imagen de una falla tensil por exfoliación .....	31
Figura 16: Criterio de Mohr-Coulomb.....	33
Figura 17: Modelo de Mohr-Coulomb en el plano deviatórico.....	34
Figura 18: Modelo de Mohr-Coulomb en el plano deviatórico para varios ángulos de fricción. ....	36
Figura 19: Potencial de flujo de Menétrey & William en el plano deviatórico .....	38
Figura 20: Parte desarrollada para el modelo de simulación .....	42
Figura 21: Tipos de familias de los elementos finitos.....	57
Figura 22: Convención de grados de libertad en Abaqus .....	58
Figura 23: Tipos de elementos de acuerdo al orden de interpolación.....	59
Figura 24: Puntos de integración para elementos de integración total lineal y cuadrático .....	60
Figura 25: Puntos de integración para elementos de integración reducida lineal y cuadrático .....	60
Figura 26: Técnica de enmallado estructurado.....	61
Figura 27: Técnica de enmallado de barrido.....	61
Figura 28: Técnica de enmallado libre .....	62
Figura 29: Técnica de enmallado de base hacia arriba .....	62
Figura 30: Algoritmo de enmallado de eje medio y de avance frontal.....	63
Figura 31: Aproximación del área de derrumbe al área de un triángulo .....	66
Figura 32: Aproximación del volumen del prisma al volumen de cavings .....	67

Figura 33: Esquema del modelo de simulación .....	69
Figura 34: Zoom en la cara del pozo .....	69
Figura 35: Condiciones de frontera del modelo .....	70
Figura 36: Resumen de los parámetros de entrada del modelo .....	72
Figura 37: Deformación elástica en dirección X.....	73
Figura 38: Esfuerzo radial vs radio del pozo .....	75
Figura 39: Esfuerzo tangencial vs radio del pozo .....	75
Figura 40: Esfuerzo axial vs radio del pozo .....	76
Figura 41: Magnitud de las deformaciones plásticas .....	77
Figura 42: Comparación de los volúmenes de cavings.....	78

**TITULO: CUANTIFICACIÓN VOLUMÉTRICA DE CAVINGS A PARTIR DE MODELAMIENTO GEOMECÁNICO UTILIZANDO UN SOFTWARE APLICADO A UN CASO COLOMBIANO\***

**AUTOR: RENATO GUTIERREZ ESCOBAR\*\***

**PALABRAS CLAVES:** Cavings, Geomecanica, Abaqus, Estabilidad De Pozo, Simulación, elementos finitos

**RESUMEN**

Muchos de los problemas ocasionados durante la perforación de pozos, tales como atascamiento de la tubería, mala limpieza del pozo, desvíos (sidetracks) e incluso el abandono de pozos, son generados por fenómenos manifestados en la cara del pozo, tales como Break-out, Wash-out y Key-seat ; los cuales dan origen a una serie de derrumbes dentro de los pozos, conocidos como cavings, que al acumularse generan los problemas anteriormente mencionados y cuyos efectos aumentan los tiempos no productivos.

Actualmente, el volumen de cavings es utilizado como señal de alerta de inestabilidades de pozos durante el monitoreo en tiempo real, ya que de acuerdo a su clasificación morfológica y volumen producido representan un tipo de alteración en la cara del pozo y su criticidad respectivamente. Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, el objetivo principal de esta investigación es proponer un nuevo enfoque en la estimación de volúmenes de cavings, y así tomar medidas correctivas en tiempo real y adicionalmente poder simular la criticidad del problema mediante la predicción del volumen de los cavings y las profundidades a las cuales se presentarían los derrumbes en la cara de pozo, de manera que se tomen las precauciones necesarias y se logren mitigar los tiempos no productivos durante la perforación.

En este nuevo enfoque, se realizará una simulación de un pozo perforado con el método de elementos finitos con el software Abaqus, en el cual se evaluará un criterio de falla y un modelo constitutivo del material a cada celda de la malla de simulación, considerando las propiedades mecánicas de la roca, la presión del lodo y el estado de esfuerzos in-situ, con el fin de cuantificar el volumen de las celdas que fallaron en la simulación y reproducir el volumen de derrumbes o cavings de la pared del pozo que se generaría durante la perforación.

---

\* Cuantificación Volumétrica De Cavings A Partir De Modelamiento Geomecánico Utilizando Un Software Aplicado A Un Caso Colombiano

\*\* Facultad de Ingeniería Físico-Química, Escuela De Ingeniería De Petróleos, Director: Zuly H. Calderón Carrillo, Codirector: Yair A. Quintero Peña

**TITLE: VOLUMETRIC QUANTIFICATION OF CAVINGS THROUGH GEOMECHANICAL MODELING USING A SOFTWARE APPLIED TO A COLOMBIAN CASE\***

**AUTHOR: RENATO GUTIÉRREZ ESCOBAR\*\***

**KEYWORDS:** Cavings, Geomechanics, Abaqus, Wellbore Stability, Simulation, Finite Elements

**ABSTRACT**

Most of the problems caused during drilling wells, such as pipe sticking, poor wellbore cleaning, sidetracks and wellbore lost, they are generated by phenomena manifested in wellbore wall, such as Break-out and Wash-out, which give origin to some slides of the wellbore wall known as cavings, when they accumulate cause the above problems and whose effects increase the non productive time.

Currently, the cavings volumes are used as warning signal of wellbore instabilities during real time monitoring, since according to its morphological classification and produced volume represent kind of wellbore wall damage and its critical nature respectively. considering above aspects, the main aim of this research is to propose a new approach in cavings volumes estimation, in order to identify the kind of failure present in wellbore and thus take corrective actions in real time besides it can simulate the most critical aspect of the problem predicting the cavings volumes and depth which they come from to prevent them and mitigate the non productive time during wellbore drilling.

This new approach, it will carry out a simulation of drilled wellbore using the finite elements method in which will assess a failure criterion and a material constitutive model to each cell of the simulation mesh, considering rocks mechanical properties, mud weight and in situ stress state, in order to quantify the cells volume that failed in the simulation and reproduce the cavings volume of wellbore wall that it would produce during drilling.

It proposes an analytical approach in order to validate the results of the simulation, it consist of to approximate the cavings volume to the volume of a triangular prism, calculating it by using geomechanics parameters such as in situ stresses, break-out angle and its width, mud weight and pore pressure. All these geomechanics parameters were obtained from wellbore logs.

---

\* Volumetric quantification of cavings through geomechanical modeling using a software applied to a colombian case

\*\* Faculty Of Physic-Quemical Engineering. Petroleum Engineering School. Director: Zuly H. Calderón Carrillo, Codirector: Yair A. Quintero Peña

## INTRODUCCIÓN

Esta investigación se realiza con el fin de predecir el volumen de cavings que se generará durante la perforación, el cual es muy importante conocer para determinar a qué profundidades se va a tener un mayor volumen de cavings, además de saber donde tengo que variar los parámetros de perforación (tasa de penetración, Galonaje, Densidad de lodo, Peso sobre la broca) para prevenir atascamiento de la tubería, mala limpieza del pozo y formación de inestabilidades del pozo (Breakout, Washout y Keyseat ) que van a repercutir en un aumento de los tiempos no productivos y por lo tanto un mayor presupuesto para la perforación del pozo.

El desarrollo de un modelo de simulación utilizando un software de elementos finitos que permita conocer el volumen de cavings generados durante la perforación es necesario, ya que la industria hoy en día no cuenta con esta herramienta que ofrece ventajas económicas enormes debido a que se podría esperar un aumento en la producción de cavings a una profundidad predicha por la simulación, por lo tanto se podrían aplicar correctivos como aumentar o disminuir la densidad del lodo, variar el ángulo de ataque o definir hasta que profundidades sentar casing para minimizar el problema . Actualmente el problema de los cavings se monitorea en tiempo real, es decir, se lleva un control sobre el volumen de cavings, en el cual, si se llega a reportar un incremento repentino de dicho volumen, este indica la presencia una formación inestable por lo tanto son una señal de alerta de inestabilidades de pozo provocando toma de correctivos inmediatamente, con el fin de reducir la tasa de cavings y posteriormente los tiempos no productivos.

Con este trabajo se evitaría la toma de acciones correctivas en tiempo real, es decir, con premura o al afán que podrían conllevar a problemas peores que el inicial, ya que se conocería de antemano la profundidad del pozo a la cual ocurriría la anomalía y de cuanto sería el aumento de volumen de cavings para que la

acciones que se tomen en ese momento sean tomadas con tiempo y seleccionando las más adecuadas.

Teniendo en cuenta todo lo antes dicho, se pretende realizar una simulación de los fenómenos productores de cavings mediante la utilización del software Abaqus, aplicando el criterio de falla de Mohr-Coulomb y un modelo constitutivo de comportamiento del material elasto-plástico a cada celda de la malla, para determinar si el material está fallando al estado de esfuerzos sometido en la simulación.

Después de determinar si la roca falla o no, se contabilizará mediante la malla de simulación el volumen de las celdas que fallaron para obtener una aproximación del volumen de cavings que se compara con el volumen de cavings obtenidos a través de la aproximación analítica propuesta, con el fin de reproducir la cantidad de derrumbe presentado durante la perforación del pozo y lograr una predicción de los derrumbes que se generarían en pozos que se perforen en esa zona posteriormente.

El modelo de simulación es en tres dimensiones, el cual permite determinar el volumen de cavings generado en la corrida, utilizando los datos requeridos por el criterio de falla y por el modelo constitutivo del material, los cuales son suministrados por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) de un pozo colombiano perforado por Ecopetrol que presentó problemas con la tasa de cavings, esto con el fin de que el modelo de simulación reproduzca el mismo volumen de cavings generado por el pozo perforado por Ecopetrol.

El modelo de simulación no va a tener en cuenta el flujo de fluidos a través de la formación hacia el pozo, ni micro-facturas o planos de estratificación del material, sólo va a ser definido por un material sin intercalaciones con otro, no se permitirá

que el lodo de perforación penetre las paredes del pozo y la forma del modelo será un cilindro hueco.

## ANTECEDENTES

A continuación se presenta una recopilación cronológica de los aspectos más importantes encontrados en la literatura, que tienen influencia en el desarrollo de esta tesis.

- En 1898 Ernest Gustav Kirsh desarrolló la solución analítica de los esfuerzos en la cara del pozo para un material lineal elástico.
- En 1955 Biot formuló la teoría de la poro-elasticidad anisotrópica.
- En 1957 Hubbert and Willis aplicaron las ecuaciones de Kirsh para predecir la estabilidad de un pozo vertical sujeto a un estado de esfuerzos no-hidrostático y una presión del lodo en la cara del pozo constante.
- En 1968 Fairhurst derivó una solución para la distribución de esfuerzos alrededor de un pozo inclinado incluyendo los esfuerzos inducidos por el anti-plano de corte.
- En 1979 Bradley, W.B. desarrolló la solución analítica de los esfuerzos efectivos en la pared del pozo para un pozo inclinado.
- En 1982 Risnes. R., Bratli. R. K., and Horsrud. P. estudiaron teóricamente los esfuerzos en una arena pobremente consolidada alrededor de un pozo cilíndrico y presentaron una solución analítica que describe la extensión de la zona plástica en un pozo abierto durante la depleción del yacimiento.

- En 1983 Bratli. R. K. presentó la solución poro-elástica para un campo de esfuerzos no-hidrostático en un pozo vertical y una geometría de deformación como plano de deformación.
- En 1987 Santarelli and Brown incluyeron los módulos elásticos dependientes de los esfuerzos en el análisis de estabilidad de pozo, usando una variación de la ley de potencia para el modulo de Young como función de los esfuerzos confinantes para un pozo vertical.
- En 1987 Aadnoy and Chenevert desarrollaron un modelo semianalítico considerando la anisotropía de la roca en análisis de estabilidad de pozos inclinados.
- En 1988 Roegiers and Detournay proporcionaron una expresión para los esfuerzos, desplazamientos y la iniciación de fractura.
- En 1988 Detournay and Cheng proporcionaron la solución completa poroelástica dependiente del tiempo y considerando deformación plana para pozo vertical.
- En 1991 Kwong and Kaiser usaron un modelo de elementos finitos 2D para estudiar los Breakouts en rocas con resistencia anisotrópica y debilidad local.
- En 1993 Cheng. H., and M.B. Dusseault desarrollaron un estudio de elementos finitos 2D totalmente acoplado con enfoque a la deformación y difusión de la presión en la cara del pozo.
- En 1993 Mody and Hale presentaron un modelo que acopla el efecto mecánico y químico de los fluidos de perforación al interactuar con los shales.

- En 1994 Sherwood and Bailey modificaron la teoría lineal de biot de la poro-elasticidad para el hinchamiento de shale alrededor de un pozo cilíndrico en el caso de una situación eje-simétrica del plano de deformación.
- En 1994 Cui, Abousleiman and Cheng presentaron una solución analítica poroelástica para pozos inclinados dependiente del tiempo y bajo la suposición de deformación plana.
- En 1994 Gupta and Zaman presentaron un análisis de estabilidad de pozo para un medio isotrópico transverso.
- En 1996 Abousleiman et al. desarrollaron la solución poro-visco-elástica para pozos y problemas de cilindros.
- En 1997 Cui et al. Derivaron una solución analítica para pozos inclinados perforados en medios isotrópicos aplicando el concepto de plano generalizado de deformación.
- En 1998 Li et al. Presentaron un modelo totalmente acoplado termo-poro-mecánico
- En 1998 Zervos, A., P. Papanastasiou, and J. Cook desarrollaron un estudio de elementos finitos para un pozo inclinado.
- En 2000 Ekbote et al. desarrollaron la solución analítica acoplado la solución termo-químico-poro-elástica y un análisis de un pozo en el software PBORE-3D
- En 2003 Zhang et al. Presentaron una solución numérica de formulaciones poro-elástica de doble porosidad que acopla deformaciones solidas

con flujo de fluidos en sistemas de fracturas y matriz de yacimientos naturalmente fracturados

- En 2006 Zhang, J., W.B. Standifird, K. Adesina, and G. Keaney desarrollaron la solución analítica de los esfuerzos efectivos en la pared del pozo para un pozo inclinado considerando la presión de poro y la interacción de los fluidos de perforación.
- En 2006 Aura María Roa Prada en la Universidad Industrial de Santander de Colombia identificó y clasificó los cavings de algunas formaciones del piedemonte llanero y los relacionaron así con su modo de falla debido a la inestabilidad del pozo.
- En 2007 Peter Schutjens y Boris N. Kuvshinov calcularon los esfuerzos vertical, horizontal máximo y mínimo efectivos en la cara del pozo utilizando un modelo constitutivo poroelástico teniendo en cuenta también la transformación de los esfuerzos en la cara del pozo con diferentes grados de inclinación utilizando el criterio de falla compresiva de Mohr-Coulomb.
- En 2008 Luz Yamile Ordoñez Suarez en la Universidad Industrial de Santander desarrolló un tratamiento estadístico a los datos de campo basado en la geoestadística, utilizando semivariogramas y métodos de estimación como Krigin-lineal para elaborar unos mapas en el software Petrel y así predecir el volumen de cavings en algunas formaciones del piedemonte llanero.
- En 2010 R. Chatterjee Y M. Mukhopadhyay presentaron dos modelos numéricos en dos dimensiones para simular el efecto de un pozo circular sobre un masa de roca, utilizando un criterio de falla de Von Misses con el fin de investigar el efecto de la presión hidrostática de los fluidos dentro del pozo durante la

perforación. Se utiliza el método de los elementos finitos en el software ANSYS para simular el estado de esfuerzos en la cara del pozo.

- En 2011 Lee M., Eckert, A. Y Nygaard, R. realizaron una sensibilización de los parámetros de discretización y las condiciones de frontera como tamaño del modelo, tipo de elementos finitos y densidad de malla simulando la reorganización de esfuerzos en la cara del pozo durante la perforación, para calcular la ventana segura del lodo utilizando el software ABAQUS. Tomando como base un material lineal elástico, isotrópico y homogéneo.

## 1. CAVINGS

En este capítulo se pretende describir las características más importantes de los cavings, ya que se debe entender todo lo que conlleva su formación y desarrollo para simular la producción de los mismos durante el proceso de perforación. Se describirán aspectos de los cavings como su clasificación morfológica, modos de falla que los producen, y tipos de litologías más propensas a producirlos, esto con el fin de identificar las variables críticas que se deben tener en cuenta en la simulación y así lograr una predicción adecuada del volumen de cavings generados en la perforación, permitiendo la elaboración de contingencias o acciones correctivas para disminuir los tiempos no productivos y posteriormente mitigar las pérdidas de dinero durante la perforación.

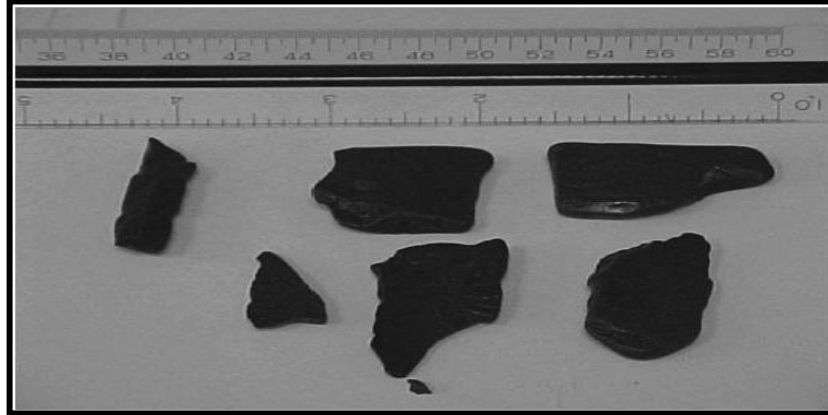
### 1.1 DEFINICIÓN

Han sido definidos como cualquier fragmento de roca producto de la inestabilidad de un pozo que llega a superficie por medio de los fluidos de perforación cuyas dimensiones varían de milímetros a 1-2 cm o en raras ocasiones hasta 10 cm<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Ordoñez Suarez, Luz Yamile. Predicción de volúmenes de cavings por medio de métodos geoestadísticos con aplicación a la zona del piedemonte llanero. Trabajo de grado Ingeniera de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2008.

Figura 1: Imagen de los cavings



Fuente: Imaging Unstable Wellbores While Drilling; S. Edwards, SPE, B. Matsutsuyu, and S. Willson, SPE, BP America.

## 1.2 MEDICIÓN DE LOS CAVINGS EN CAMPO

Esta medición se realiza a través de la tasa de cavings que es una medida del tiempo requerido para llenar una bandeja de capacidad conocida, y se calcula de la siguiente manera: se coloca una bandeja por rumba o zaranda con una capacidad de 6 galones (0,14286bbbl) y se toma el tiempo requerido para llenarla, donde la tasa corresponde al valor real de cuttings, después se calcula el valor teórico de cuttings mediante las dimensiones del pozo, posteriormente la resta entre el valor teórico y el valor real será el volumen de cavings<sup>2</sup>.

$$\text{Volumen de Cavings} = \text{Volumen Real Cuttings} - \text{Volumen Teórico Cuttings}$$

*Volumen Teórico Cuttings*

$$= 0.00097 \times 2 \times \text{Diámetro Broca} \times \text{Intervalo Perforado}$$

<sup>2</sup> Roa Prada, Aura María. Análisis, causas y caracterización de cavings aplicado a la estabilidad de pozos: dos casos en el piedemonte llanero. Trabajo de grado Geóloga. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2006.

Si este valor es negativo se debe a que la limpieza del hueco es ineficiente y está quedando material dentro del pozo. En este análisis se debe tener en cuenta el tipo de operación que se esté ejecutando en el pozo a la hora de calcular la tasa de cavings, porque ésta es relativamente mayor cuando se está haciendo limpieza del hueco en comparación a cuando se está perforando.

### 1.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE POZO BASADO EN CAVINGS

El análisis en tiempo real de estabilidad del pozo se basa en la utilización de cavings como herramienta principal de detección de los posibles mecanismos de falla del pozo, su objetivo es minimizar y/o prevenir problemas que tengan lugar durante la perforación de pozos.

Los cavings sirven para estudiar la estabilidad del pozo en tiempo real y así tomar acciones inmediatas con el fin de corregir y controlar cualquier evento indeseado durante la perforación, el análisis de cavings en un monitoreo en tiempo real se hace de la siguiente manera:

- Se revisa el volumen de cavings en función del tiempo.
- Se categorizan los cavings de acuerdo a su morfología y mecanismo de falla.
- Reportar un incremento repentino en la tasa de Cavings.

La importancia en la interpretación de cavings radica en:

- Son una señal de alerta de inestabilidad de pozo.
- Indican cuales formaciones son inestables y el posible mecanismo de falla.
- Reducen los factores tiempo y costos ya que permiten aplicar correctivos inmediatamente.

#### 1.4 CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE CAVINGS<sup>3</sup>

- **Cavings Angulares:** Presentan formas irregulares y textura de superficie rugosa donde sus caras son curvas con estructuras desiguales y sus superficies se interceptan en ángulos agudos ( $<90^{\circ}$ ), su presencia indica concentración de esfuerzos en el pozo que exceden la resistencia compresiva de la formación dando lugar a fallas por cizalla. Cada una de las nuevas superficies generadas se convierte en superficies nuevas de fractura. Son consecuencias de los Breakouts.

Figura 2: Imagen de un caving angular



Fuente: Ordoñez Suarez, Luz Yamile. Predicción de volúmenes de cavings por medio de métodos geoestadísticos con aplicación a la zona del piedemonte llanero. Trabajo de grado Ingeniera de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2008.

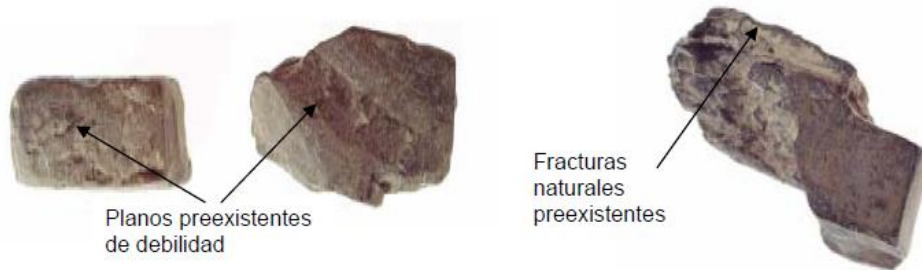
- **Cavings Blocosos o Tabulares:** Exhiben superficies planas y paralelas, son el resultado de planos preexistentes de debilidad como lo son la estratificación y las fracturas naturales e indican la estabilidad tectónica o estructural que posiblemente por presión se desestabiliza la zona. En el caso de fracturas naturales, la presión del fluido en el anular excede el mínimo esfuerzo horizontal, resultando en la invasión del lodo en la red de fracturas cercana a la cara del pozo resultando en una desestabilización severa de la zona debido al movimiento de los bloques de roca, originando rápidamente altas tasas de cavings

---

<sup>3</sup> I.D.R. Bradford, Schlumberger Cambridge Research, et al. When rocks mechanics met drilling: effective implementation of real time wellbore stability control, SPE 59121, February 2000.

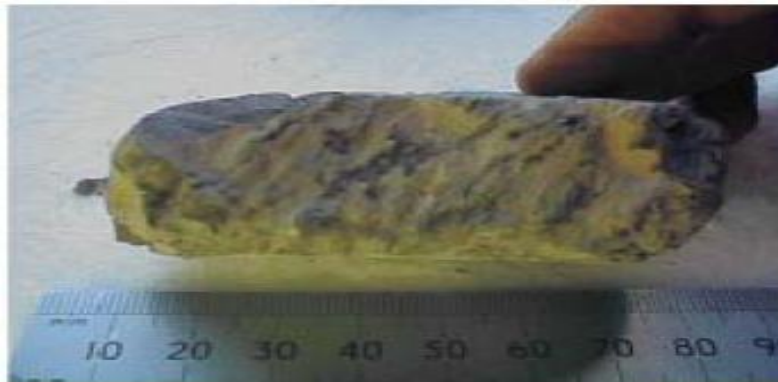
los cuales tienen la siguiente característica, que las capas si existen, no serán paralelas a las caras de los cavings. Ahora, en el caso de planos de debilidad la combinación de bajo peso del lodo y un eje del pozo que esté aproximadamente a 15 grados de la dirección de las capas, puede inducir fallas masivas a lo largo de los planos de debilidad y estos cavings tienen la característica de tener caras planas y paralelas a la dirección de las capas.

Figura 3: Imagen de un Caving Blocoso o Tabular



Fuente: Ordoñez Suarez, Luz Yamile. Predicción de volúmenes de cavings por medio de métodos geoestadísticos con aplicación a la zona del piedemonte llanero. Trabajo de grado Ingeniera de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2008.

Figura 4: Imagen de un Caving Blocoso o Tabular



Fuente: Roa Prada, Aura María. Análisis, causas y caracterización de cavings aplicado a la estabilidad de pozos: dos casos en el piedemonte llanero. Trabajo de grado Geóloga. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2006

- **Cavings Astillosos o Splintered:** Tienen una morfología elongada son laminados y cóncavos. Muestran dos superficies cercanamente paralelas que pueden exhibir estructura tipo pluma. Son el resultado de zonas sobrepresionadas perforadas en condiciones de sobrebalance (overbalance) y se encuentran relacionados con el astillamiento de la pared del pozo debido a fallas tensiles ocurridas paralelamente a la pared del pozo. Este tipo de litología se da comúnmente en los shales.

Figura 5: Imagen de un Caving Astilloso o Splintered



Fuente: Ordoñez Suarez, Luz Yamile. Predicción de volúmenes de cavings por medio de métodos geoestadísticos con aplicación a la zona del piedemonte llanero. Trabajo de grado Ingeniera de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2008.

Figura 6: Imagen de un Caving Astilloso o Splintered



Fuente: Roa Prada, Aura María. Análisis, causas y caracterización de cavings aplicado a la estabilidad de pozos: dos casos en el piedemonte llanero. Trabajo de grado Geóloga. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2006

- Cavings Retrabajados: Presentan tamaños menores a 1 cm y bordes suaves casi redondeados. Si domina esta clase de cavings se recomienda realizar circulación para mejorar la limpieza del pozo.

Figura 7: Imagen de un Caving Retrabajado



Fuente: S. Edwards, B. Matsutsuyu, & S. Willson, Imaging Unstable Wellbores While Drilling. SPE, BP America, SPE 79846-PA, 2004.

### 1.5 FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN DE CAVINGS

- El ángulo de ataque (orientación del pozo con respecto a la estratificación) es un factor importante en el análisis, ya que cuando la inclinación del pozo se aparta de la estratificación normal, la estabilidad generalmente decrece<sup>4</sup>.
- Zonas lodosas aumentan la producción de cavings debido a su reacción química al entrar en contacto con el fluido de perforación, desestabilizando dichas zonas.
- A mayor densidad del lodo menor producción de cavings por que la presión de la columna hidrostática mantiene las paredes del pozo.
- A mayor galonaje mayor producción de cavings debido a que el galonaje es la tasa de bombeo y al aumentar ésta, aumenta la fricción entre fluido-formación, causando un efecto parecido a la erosión.

---

<sup>4</sup> Zoback, Mark D. Reservoir Geomechanics, Department of Geophysics, Stanford University, Cambridge University Press, 2007.

- Al incrementar el peso sobre la broca disminuye el volumen de cavings, debido a que las vibraciones disminuyen.
- Al aumentar la ROP aumenta el volumen de cavings debido a que si se perfora un mayor número de pies en un día no da lugar a que las paredes de la formación se estabilicen o a que se reorganicen los esfuerzos.

#### 1.6 INFLUENCIA LITOLÓGICA EN LA PRODUCCIÓN DE CAVINGS<sup>5</sup>

- Formaciones o estratos con litologías de grano fino como las lodolitas (arcillas y limos): Son litologías potencialmente más inestables que las demás y ampliamente estudiadas por el sin número de problemas que causan y se ha concluido que los shales tienden a producir cavings tipo astilloso cuando se les perfora.
- Niveles de materia orgánica interestratificada: Influyen la producción de cavings debido a sus condiciones particulares de origen (pantanos, condiciones de baja energía en medios anóxicos) lo cual genera diferencia en las propiedades (porosidad, cementación, composición, etc) con las formaciones adyacentes.
- Presencia de zonas con material volcánico: Se ha encontrado que material rocoso con presencia de ceniza, niveles de lapilli o cualquier fragmento piroplástico (tobas) o material poco consolidado (tefras) y/o altamente fracturado propicia el aumento en la rata de cavings.
- Cuerpos salinos y diapiros: Empíricamente se ha encontrado que estas zonas conocidas como zonas de ripios que son causadas de manera natural debido al cambio de los esfuerzos en el subsuelo y que también están asociados a fallas influyen en la producción de cavings. Se han hechos las siguientes observaciones que la sal influencia los esfuerzos alrededor de los diapiros, el emplazamiento del cuerpo genera fracturamiento y si existen shales rodeando estos diapiros es probable que estén sobrepresionados.

---

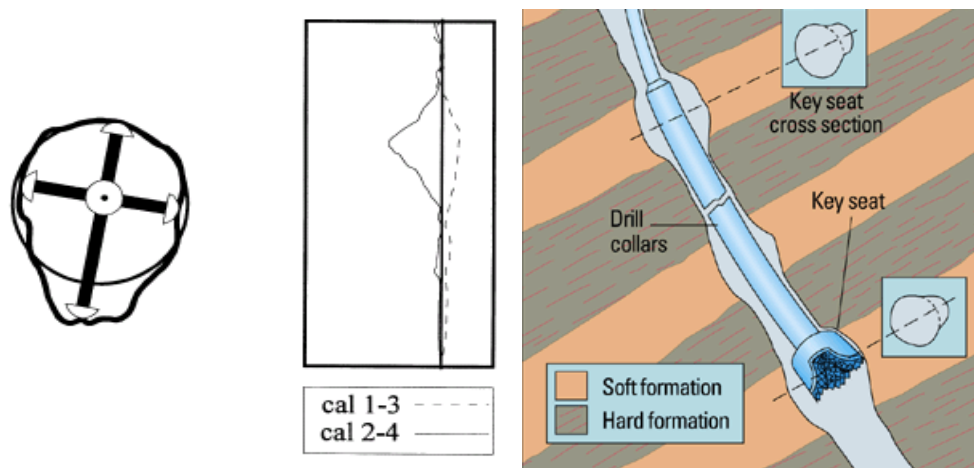
<sup>5</sup> ORDOÑEZ. Op. Cit., p. 22

- Zonas asociadas a calizas: La importancia de estas radica en considerar el alto fracturamiento que pueden presentar, así como las mineralizaciones que podrían afectar la estabilidad de la zona y así aumentar la producción de cavings cuando se les perfora.

### 1.7 INESTABILIDADES DEL POZO QUE PRODUCEN CAVINGS<sup>6</sup>

- Key-Seat: Generalmente causan ensanchamientos asimétricos del pozo y son causados por la tubería de revestimiento. Se identifican utilizando el registro caliper de 4 brazos en un pozo inclinado, si el azimut de la elongación coincide con el azimut del pozo, también se identifica porque el caliper reporta un diámetro más pequeño que el tamaño de la broca, ya que ocurre una descentralización de la herramienta pero se debe conocer bien la litología para descartar reducción del diámetro del pozo por hinchamiento de arcillas.

Figura 8: Imagen de un KeySeat

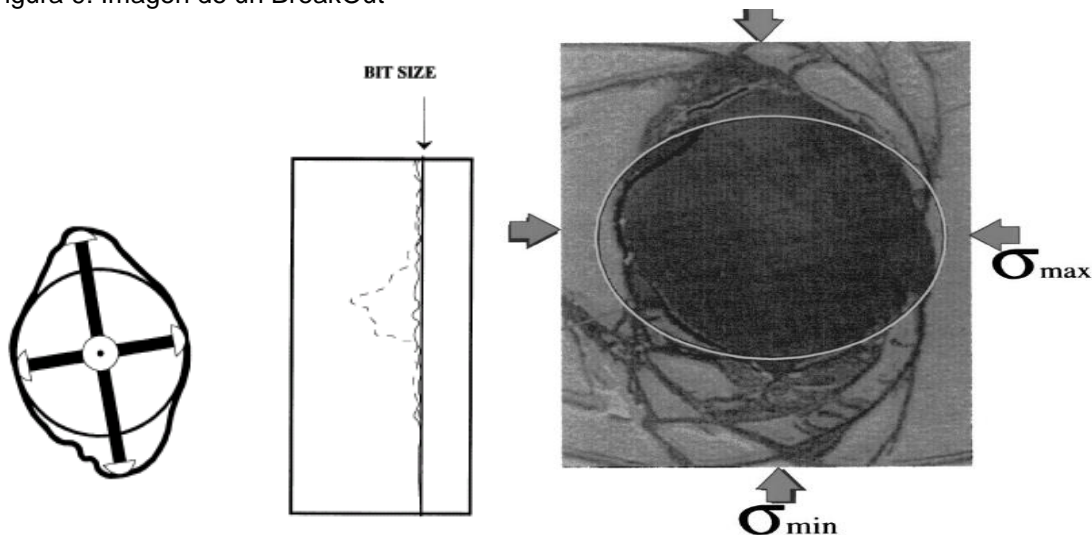


Fuente: Syarifuddin N. & Busono I. Regional stress alignments in the Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia: a contribution from a borehole breakout study.1999.

<sup>6</sup> Syarifuddin N. & Busono I. Regional stress alignments in the Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia: a contribution from a borehole breakout study.1999.

- **Break-out:** Se forman en lados opuestos del pozo debido a fallas compresivas en la región del esfuerzo mínimo tangencial cuando la resistencia compresiva de la roca es excedida. En un pozo vertical la zona de falla está centrada en el azimut del esfuerzo mínimo horizontal, en pozos inclinados la ubicación del breakout es una función compleja de la orientación del pozo, de las orientaciones y magnitudes de los esfuerzos in-situ. Se pueden identificar mediante el registro caliper, el cual cuando encuentra un breakout detiene la rotación de uno de sus brazos en la zona de ensanchamiento, por lo tanto uno de los brazos del caliper se desplazara a través de la elongación mientras que el otro brazo se desplaza a través de la zona no deformada.

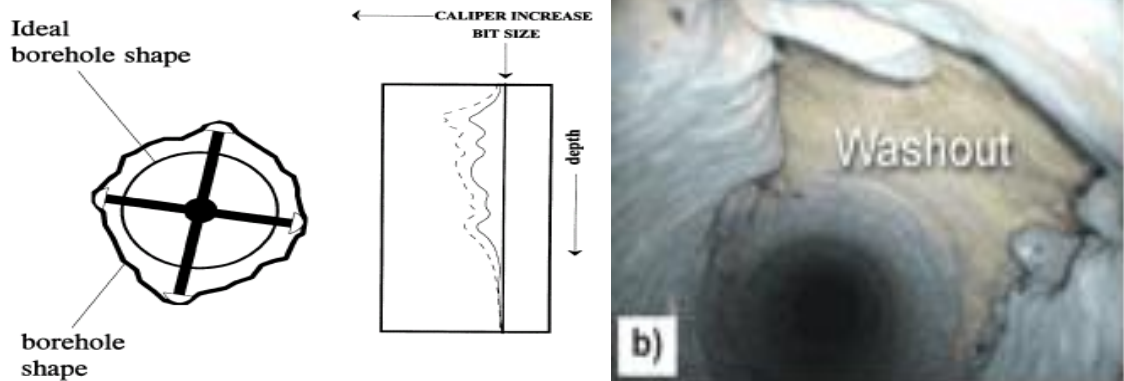
Figura 9: Imagen de un BreakOut



Fuente: Syarifuddin N. & Busono I. Regional stress alignments in the Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia: a contribution from a borehole breakout study.1999.

- **Wash-out:** Ocurren cuando los breakouts llegan a ser tan amplios que la superficie intacta del hueco no es suficiente para mantener la integridad del pozo generando un ensanchamiento de todo el hueco, es decir, en los 360 grados. Se identifican mediante el registro caliper de 4 brazos si dos brazos reportan un diámetro mayor al tamaño de la broca.

Figura 10: Imagen de un WashOut

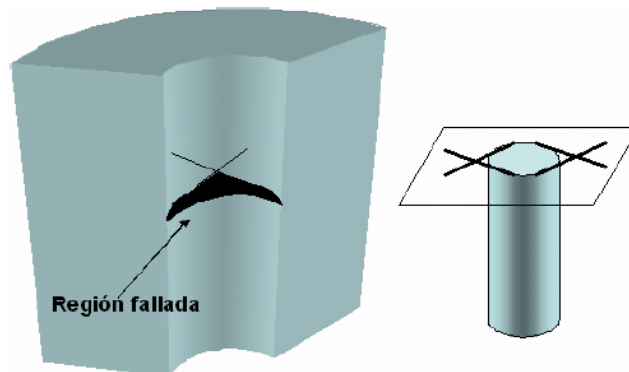


Fuente: Syarifuddin N. & Busono I. Regional stress alignments in the Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia: a contribution from a borehole breakout study.1999.

### 1.8 MODOS DE FALLA PRODUCTORES DE CAVINGS<sup>7</sup>

- Breakout Ancho:  $\sigma_{\theta} > \sigma_z > \sigma_r$  . Se debe a que el peso del lodo de perforación es demasiado bajo para mantener las paredes del pozo, lo cual trae como consecuencia un colapso del pozo. Esta falla se caracteriza por ser ancha, ángulos de falla entre 30 y 60° generalmente y por lo tanto poco profunda. Se presenta en un plano radial-tangencial, y su orientación está en dirección del esfuerzo radial.

Figura 11: Imagen de un BreakOut Ancho

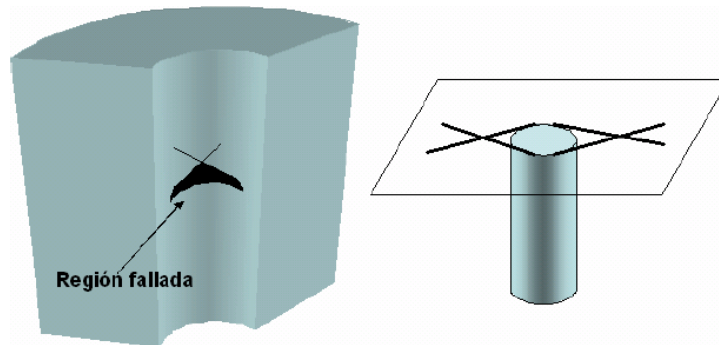


Fuente: Osorio, Gildardo. Memorias Curso de Geomecánica. Universidad Surcolombiana. Neiva, Marzo 29,30 y 31 2006.

<sup>7</sup> Osorio, Gildardo. Memorias Curso de Geomecánica. Universidad Surcolombiana. Neiva, Marzo, 2006

- Breakout Angosto:  $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$  . Esta falla ocurre a pesos de lodo altos, es una falla con la misma característica que la de breakout ancho (en cuanto que causa ovalización del pozo), pero los ángulos de falla son menores a  $30^\circ$ , por lo cual son fallas profundas comparadas con las de breakout ancho. Se presenta en un plano radial-tangencial y su orientación está en la dirección del esfuerzo radial

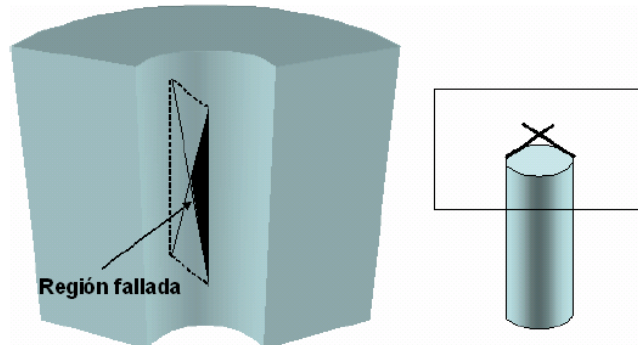
Figura 12: Imagen de un BreakOut Angosto



Fuente: Osorio, Gildardo. Memorias Curso de Geomecánica. Universidad Surcolombiana. Neiva, Marzo 29,30 y 31 2006

- Knock-out somero:  $\sigma_z > \sigma_\theta > \sigma_r$  . Causada por pesos de lodo bajos, los ángulos de falla son grandes por lo cual la falla es de poca penetración o es poco profunda y puede ser confundida con una fractura vertical. Se presenta en un plano radial-axial, y su orientación está en dirección del esfuerzo radial.

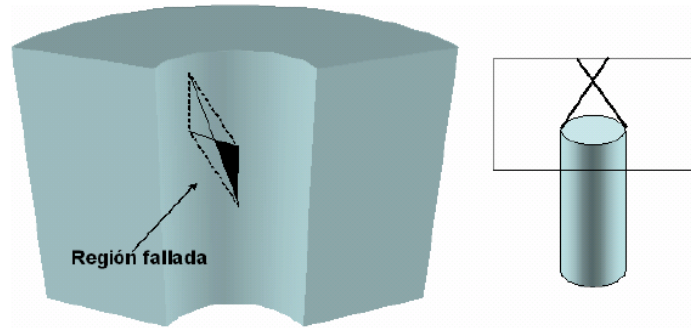
Figura 13: Imagen de un KnockOut Somero



Fuente: Osorio, Gildardo. Memorias Curso de Geomecánica. Universidad Surcolombiana. Neiva, Marzo 29,30 y 31 2006.

- Knock-out Profundo:  $\sigma_r > \sigma_\theta > \sigma_z$  . Es causada por pesos de lodo altos, y los ángulos de falla son pequeños, por lo cual la falla es profunda. Se presenta en un plano radial-axial y su orientación está en dirección del esfuerzo radial.

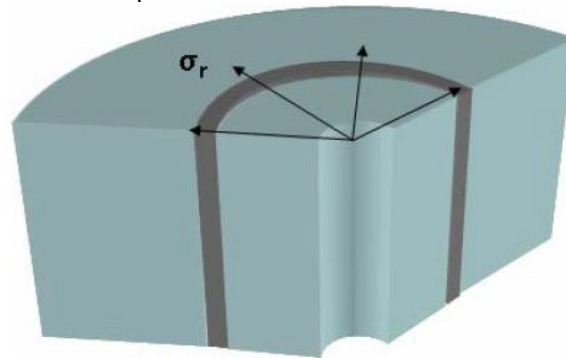
Figura 14: Imagen de un KnockOut Profundo



Fuente: Osorio, Gildardo. Memorias Curso de Geomecánica. Universidad Surcolombiana. Neiva, Marzo 29,30 y 31 2006.

- Tensil por exfoliación:  $\sigma_\theta > \sigma_r$  y  $\sigma_r > -T_o$  . La falla de exfoliación no ocurre exactamente en la cara del pozo sino a una pequeña distancia de esta. Se presenta para presiones de lodo de perforación más bajas que la presión de poro de la formación.

Figura 15: Imagen de una falla tensil por exfoliación



Fuente: Osorio, Gildardo. Memorias Curso de Geomecánica. Universidad Surcolombiana. Neiva, Marzo 29,30 y 31 2006.

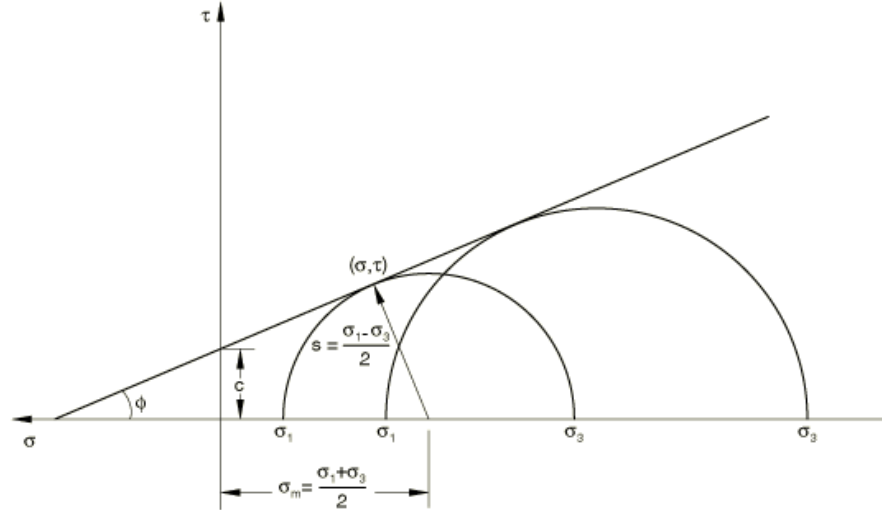
## 2. CRITERIO DE FALLA Y MODELO CONSTITUTIVO DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL

En este capítulo se pretende describir el modelo constitutivo del material y el criterio de falla que se utilizarán en la simulación, con el fin de determinar los elementos finitos que fallan de acuerdo al criterio de falla y posteriormente cuantificar el volumen total de los elementos fallados, calculándose el volumen de cavings obtenidos por la simulación para compararlo con el volumen obtenido por una aproximación analítica propuesta y validar el modelo de simulación. Toda la teoría descrita en este capítulo se extrajo de los manuales del software Abaqus, con el fin de entender el funcionamiento del modelo constitutivo del material y el criterio de falla en el software.

### 2.1 MODELO DE PLASTICIDAD DE MOHR-COULOMB

2.1.1 Criterio de Mohr-Coulomb: El criterio de resistencia o de falla de Mohr-Coulomb, asume que la falla es controlada por el máximo esfuerzo de corte y que esa falla depende del esfuerzo normal. Esto se representa graficando el círculo de Mohr para el estado de esfuerzos en la falla en términos de los esfuerzos principales máximo y mínimo. La línea de falla de Mohr-Coulomb es la mejor línea recta que toca estos círculos de Mohr.

Figura 16: Criterio de Mohr-Coulomb



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

El criterio es escrito así:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $\sigma$  es el esfuerzo normal (negativo en compresión),  $c$  es la cohesión del material, y  $\phi$  es el ángulo de fricción del material.

Del círculo de Mohr se tiene que:

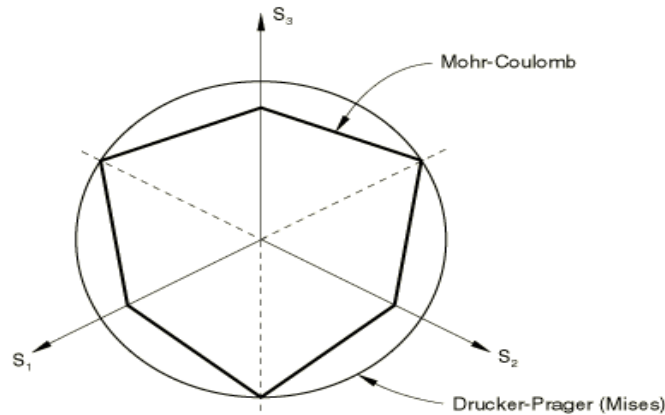
$$\tau = S \cos \phi = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi$$

$$\sigma = \sigma_m - S \sin \phi = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \phi$$

Donde  $S$  es el máximo esfuerzo de corte (la mitad de la diferencia entre los esfuerzos principales máximo y mínimo) y  $\sigma_m$  es el esfuerzo normal (el promedio de los esfuerzos principales máximo y mínimo).

El criterio de Mohr-Coulomb asume que la falla es independiente del valor del esfuerzo principal intermedio. Este modelo de falla tiene vértices en el plano de esfuerzos deviatorícos.

Figura 17: Modelo de Mohr-Coulomb en el plano deviatoríco



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

El modelo constitutivo descrito aquí, es una extensión del clásico criterio de falla de Mohr-Coulomb. Es un modelo elasto-plástico que usa una función de cedencia de la forma de Mohr-Coulomb; esta función de cedencia incluye endurecimiento/reblandecimiento isotrópico de cohesión. Sin embargo, el modelo usa un potencial de flujo que tienen una forma hiperbólica en el plano de esfuerzo meridional y no tiene vértices en el espacio del esfuerzo deviatoríco.

Este potencial de flujo es por lo tanto liso o suave y proporciona una definición única de la dirección de flujo plástico.

### 2.1.2 Descomposición de la tasa de deformación

$$d \epsilon = d \epsilon^{el} + d \epsilon^{pl}$$

Donde  $d \epsilon$  es la tasa de deformación total,  $d \epsilon^{el}$  es la tasa de deformación elástica, y  $d \epsilon^{pl}$  es la tasa de deformación inelástica (plástica)

### 2.1.3 Comportamiento elástico: El comportamiento elástico es modelado como lineal e isotrópico.

2.1.4 Comportamiento de cedencia: El criterio de Mohr-Coulomb escrito anteriormente en términos de los esfuerzos principales máximo y mínimo, se puede escribir para estados de esfuerzos generales en términos de los tres invariantes de esfuerzos que son:

✓ El esfuerzo de presión equivalente:

$$p = -\frac{1}{3} \text{traza} (\sigma)$$

✓ El esfuerzo equivalente de Mises:

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} (\mathbf{S} : \mathbf{S})}$$

Donde  $\mathbf{S}$  es el esfuerzo deviatorico

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} + p\mathbf{I}$$

✓ El tercer invariante del esfuerzo deviatorico:

$$r = \left(\frac{9}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S} : \mathbf{S}\right)^{\frac{1}{3}}$$

La superficie de cedencia de Mohr-Coulomb se escribe así:

$$F = R_{mc}q - p \tan \phi - c = 0$$

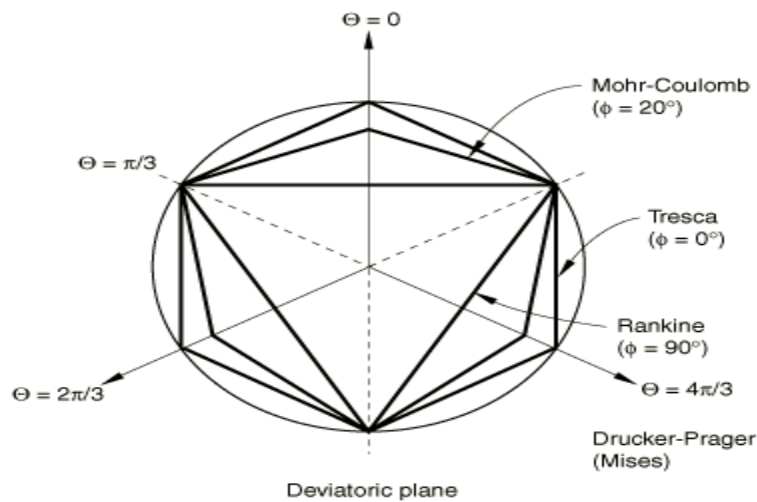
$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \phi} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \tan \phi$$

$$\cos (3\theta) = \left(\frac{r}{q}\right)^3$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de fricción del material en el plano del esfuerzo meridional,  $c$  representa la evolución de la cohesión del material en la forma de endurecimiento isotrópico (o reblandecimiento);  $R_{mc}$  es la medida del esfuerzo deviatorico de Mohr-Coulomb y  $\theta$  es el ángulo polar deviatorico definida por la ecuación de Chen & Han escrita anteriormente.

El ángulo de fricción del material  $\phi$ , también controla la forma de la superficie de cedencia en el plano deviatorico. El rango de valores del ángulo de fricción es de  $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ . En el caso de  $\phi = 0^\circ$ , el modelo de Mohr-Coulomb se reduce al modelo de Tresca presión-independiente con una sección deviatorica hexagonal perfecta. En el caso de  $\phi = 90^\circ$ , el modelo de Mohr-Coulomb se reduce al modelo de Rankine “tensión-cutoff” con una sección deviatorica triangular.

Figura 18: Modelo de Mohr-Coulomb en el plano deviatorico para varios ángulos de fricción.



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user’s manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

2.1.5 Regla de flujo: El potencial de flujo se asume, así que:

$$d \epsilon^{pl} = \frac{d \bar{\epsilon}^{pl}}{g} \frac{\partial G}{\partial \sigma}$$

Donde  $g$  puede ser escrito como:

$$g = \frac{1}{c} \sigma : \frac{\partial G}{\partial \sigma}$$

Y  $G$  es el potencial de flujo, elegido como una función hiperbólica en el plano de esfuerzo meridional y una función elíptica suave en el plano de esfuerzo deviatorico:

$$G = \sqrt{(\epsilon c|_0 \tan \varphi)^2 + (R_{MW} q)^2} - p \tan \varphi$$

Donde  $\varphi$  es el ángulo de dilatación medido en el plano  $p - R_{MW}$  a presión de confinamiento alta;  $c|_0 = c|_{\epsilon p|_0}$  es el esfuerzo de cedencia de cohesión inicial, y  $\epsilon$  es el parámetro de excentricidad, que define la tasa a la cual la función se aproxima a la asíntota (el potencial de flujo tiende a una línea recta a medida que la excentricidad tiende a cero). Este potencial de flujo, el cual es continuo y suave en el plano de esfuerzo meridional, asegura que la dirección de flujo sea definida únicamente en este plano. La función se aproxima asintóticamente a un potencial de flujo lineal a altos esfuerzos de presión confinante e intercepta el eje de presión hidrostática a  $90^\circ$ .

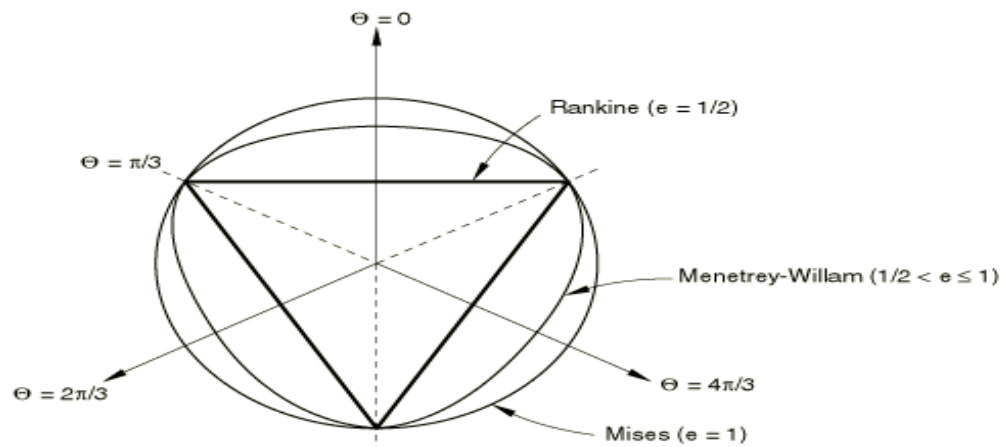
El potencial de flujo también es continuo y suave en el plano de esfuerzo deviatorico (el plano  $\pi$ ); se adopta la función elíptica deviatorica usada por Menétrey y William (1995):

$$R_{MW} = \frac{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + (2e - 1)^2}{2(1 - e^2) \cos \theta + (2e - 1) \sqrt{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + 5e^2 - 4e}} R_{mc}$$

$$R_{mc} = \frac{3 - \sin \phi}{6 \cos \phi}$$

Donde  $\theta$  es el ángulo polar deviatórico,  $e$  es un parámetro que describe la “desviación de la redondez” de la sección deviatórica en términos de la razón entre el esfuerzo de corte a lo largo del meridiano de extensión ( $\theta = 0$ ) y el esfuerzo de corte a lo largo del meridiano de compresión ( $\theta = \pi/3$ ). La función elíptica tiene el valor de  $R_{MW} = R_{mc}/e$  a lo largo del meridiano de extensión y tiene el valor de  $R_{MW} = R_{mc}$  a lo largo del meridiano de compresión; esto asegura que el potencial de flujo se ajuste a la superficie de cedencia en la compresión triaxial y la extensión en el plano deviatórico determinando que  $e$  esta definido apropiadamente.

Figura 19: Potencial de flujo de Menétréy & William en el plano deviatórico



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user’s manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

De forma predeterminada, el parámetro de desviación de la redondez  $e$ , depende del ángulo de fricción  $\phi$  que es calculado ajustando el potencial de flujo con la superficie de cedencia en tensión y compresión triaxial en plano deviatórico.

$$e = \frac{3 - \text{sen}\phi}{3 + \text{sen}\phi}$$

Alternativamente,  $e$  puede ser considerado también que sea un parámetro independiente del material; en este caso el usuario del software puede proporcionar su valor directamente. La convexidad y suavidad de la función elíptica requiere que  $0,5 < e \leq 1$ . El límite superior  $e = 1$ , lleva a  $R_{MW} = R_{mc}$  lo cual describe el círculo Mises en el plano deviatorico. El límite inferior  $e = 0,5$ , lleva a que  $R_{MW} = 2R_{mc} \cos\theta$  y describiría el triángulo de Rankine en el plano deviatorico (Este caso limite no está permitido dentro del modelo de Mohr-Coulomb descrito aquí).

El flujo en el plano del esfuerzo meridional puede ser aproximadamente asociado cuando el ángulo de fricción  $\phi$  y el ángulo de dilatación  $\varphi$ , son iguales y el parámetro de excentricidad  $e$ , es muy pequeño; sin embargo, el flujo en este plano es en general no-asociado. El flujo en el plano del esfuerzo deviatorico es siempre no-asociado. Por lo tanto, el uso de este modelo de Mohr-Coulomb generalmente requiere la solución de ecuaciones asimétricas.

### 3. DISEÑO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UN POZO PERFORADO

El diseño del modelo de simulación de un pozo perforado en el software ABAQUS, se realiza de acuerdo a los módulos que contiene y cuya aplicación de cada uno se realiza en un orden lógico que lo estipula el software, sin embargo no es obligatorio seguir el orden de aplicación ni muchos menos utilizar todos los módulos.

Para el diseño del modelo de simulación que se presenta en esta tesis se utilizaron los módulos que se explican posteriormente en este capítulo, en el cual se va a definir las características que se aplicaron de cada módulo. Toda la teoría descrita en este capítulo se basó en los manuales del software Abaqus, con el fin de mostrar las características tenidas en cuenta a través de cada uno de los módulos en el modelo de simulación, para reproducir el fenómeno de producción de cavings durante el proceso de perforación de un pozo petrolero.

### 3.1 MODULO DE PARTES

Las partes son los bloques constructores de los modelos y se crean con la herramientas existentes en el módulo, tomando el nombre de Parte Nativa y tiene una representación basada en características, es decir, una característica es una pieza significativa de diseño que permite ser construida y modificada. Las partes son construidas de una lista de características y parámetros que definen la geometría de cada característica donde esta información es usada por Abaqus para definir la parte entera.

3.1.1. Característica Base: Es la primera característica que se crea cuando se construye una parte, la cual se describe especificando la forma o topología básica de la característica y el tipo, que indica el método para generar la característica base.

Los diferentes tipos de característica base son:

- ✓ Planar: Se dibuja la característica en un plano de dibujo 2D.
- ✓ Extrusión: Se dibuja el perfil de la característica y luego lo extruye o alarga a través de una distancia específica.
- ✓ Revolución: Se dibuja el perfil de la característica y luego lo revoluciona por un ángulo específico alrededor de un eje.
- ✓ Barrido: Se dibujan dos configuraciones: una trayectoria de barrido y un perfil de barrido. El perfil es luego barrido a lo largo de la trayectoria para crear la característica.

La característica base a utilizar será tipo extrusión debido a lo explicado anteriormente

3.1.2. Copia de una parte: Es la representación de la parte original para poder aplicarle cargas e interacciones.

### 3.1.3. Espacio de Modelado de la Parte

- 3D: Se integra la parte en un sistema de coordenadas X-Y-Z donde puede contener cualquier característica y se modela con elementos 3D.
- Planar (2D): Se integra la parte en un plano X-Y, ésta solo puede contener características en 2D y se modelan con elementos 2D.
- Ejesimétrica: Se integra la parte en el plano X-Y con el eje Y indicando el eje de revolución, contiene características planares y se modela solo con elementos ejesimétricos.

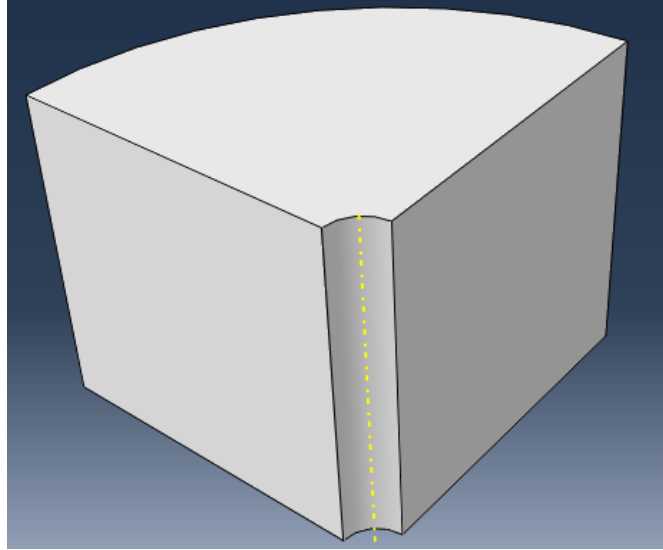
El espacio de modelado de la simulación será 3D dado que es uno de los objetivos planteados en esta tesis.

### 3.1.4. Tipos de Partes para Abaqus/Estándar y Explícito

- Deformable: Se le permite deformación de la parte cuando esté sometida bajo una carga.
- Rígida Discreta: La parte se asume rígida para usar en análisis de contacto con el fin de modelar cuerpos que no se pueden deformar.
- Rígida Analítica: Se diferencia de la rígida discreta en que la forma sólo puede tener un conjunto de líneas, arcos y parábolas.
- Euleriana: Son partes cuyo material puede fluir a través de los límites del elemento rígido, es decir, el material se deforma por dentro no por fuera.

El tipo de parte que se utilizará en el modelo de simulación será Deformable ya que se necesita que el cuerpo modelado se deforme para encontrar los elementos que fallan al deformarse excesivamente.

Figura 20: Parte desarrollada para el modelo de simulación



### 3.2 MÓDULO DE PROPIEDADES

En este módulo se pueden desarrollar las siguientes tareas: definir materiales, crear y asignar secciones, orientaciones, definir capas compuestas e inercia en una parte. Se le puede asignar propiedades de una parte o región de una parte, mediante la creación de una sección y asignándosela a la parte. Muchas veces las secciones hacen referencia a materiales que se definen. Un único material se le puede asignar a varias secciones.

3.2.1. Secciones: Una sección contiene información acerca de las propiedades de una parte o una región de una parte y la información que se requiera para definir la sección depende del tipo de región que se vaya a tratar. La mayoría de las secciones se refieren al nombre del material. Cuando se asigna una sección a una parte, Abaqus/Cae automáticamente asigna esa sección a cada copia de la parte y como resultado el elemento del enmallado tendrá las propiedades de esa sección. Se puede asignar una única sección a varias regiones del modelo.

Tipos de secciones:

- Secciones Sólidas: Define las propiedades de las secciones de regiones sólidas 2D,3D y ejesimétrica
- Sección Sólida Homogénea: Consiste de un nombre de material donde si es para 3D, se especifica el espesor del plano de esfuerzos o del plano de deformaciones.
- Sección de Plano de Deformación Generalizado: Consiste de un nombre del material, espesor y ángulos de las cuñas. Este tipo sólo se asigna para regiones planares 2D.
- Secciones Sólidas Compuestas: Consiste de capas de materiales. Para cada capa de material se debe especificar un nombre del material, espesor y orientación.

La sección a utilizar en el modelo de simulación es sólida homogénea en 3D debido a que el cuerpo modelado es una roca asumida como homogénea.

3.2.2. Definición del Modelo de Plasticidad de Mohr-Coulomb: Desde la caja de diálogo de edición del material, seleccionar plasticidad y luego plasticidad de Mohr-Coulomb. Posteriormente seleccionar la pestaña de plasticidad y la de cohesión para definir:

- La excentricidad deviatórica, " $e$ ", ya sea calculándola del ángulo de fricción o digitando su valor directamente.
- La excentricidad Meridional, " $\epsilon$ ", digitando su valor directamente.
- El ángulo de fricción, " $\phi$ ", a altas presiones de confinamiento en el plano  $p - R_{mc}q$ . Ingresar su valor en grados.
- El ángulo de dilatación, " $\varphi$ ", a altas presiones de confinamiento en el plano  $p - R_{mw}q$ . Ingresar su valor en grados.
- El esfuerzo de cedencia de cohesión, " $C$ ".
- La deformación plástica absoluta, el valor absoluto de la correspondiente deformación plástica. (El primer valor ingresado debe ser siempre cero).

### 3.3 MÓDULO DE ENSAMBLAJE

Los modelos contienen solamente un ensamble, el cual está compuesto de ejemplos de las partes del modelo. Cuando se crea una parte existe en su propio sistema de coordenadas independientes de las otras partes del modelo, por lo tanto en este módulo se crean copias de las partes y se posicionan relacionando unos respecto con otros en un sistema global de coordenadas. Una copia mantiene su asociación con su parte original. Si la geometría de una parte cambia, Abaqus/Cae actualiza automáticamente todas las copias de las partes para que reflejen estos cambios. No se puede editar la geometría de una copia de una parte directamente se debe hacer en el módulo de partes.

3.3.1. Copia Dependiente de las Partes: Es sólo un indicador de la parte original, ésta comparte la geometría y la malla de la parte original, por lo tanto se puede enmallar la parte original y no su copia directamente. Sin embargo, a la copia se le puede añadir sets, aplicar cargas, condiciones de frontera y definir las asignaciones de la sección conectora directamente debido a que no modifican la geometría de la copia dependiente de la parte. No se le puede cambiar los atributos de la malla (semillas, controles y tipo de elemento finito) de una copia de la parte individual directamente, se pueden cambiar a la parte original de la cual la copia fue derivada y Abaqus/Cae aplicará estos cambios a todas las copias de la parte original donde los cambios sólo se podrán ver en el módulo de enmallado. Su ventaja radica en su bajo consumo de memoria.

3.3.2. Copia Independiente de las Partes: Es una copia de la geometría de la parte original, se puede enmallar directamente y casi todas las operaciones se pueden hacer directamente. Su desventaja radica en que se debe enmallar cada copia independiente de la parte individualmente.

Para el modelo de simulación se utilizará una copia independiente de la parte, ya que el modelo sólo requiere una copia y las operaciones se podrían realizar directamente.

### 3.4 MÓDULO DE PASOS

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

Un modelo Abaqus/Cae usa dos tipos de pasos:

3.4.1. Paso Inicial: Abaqus lo crea automáticamente, no puede ser editado, y es el que permite definir las condiciones de frontera, campos predefinidos, e interacciones que se aplican al comienzo del análisis.

3.4.2. Pasos del Análisis: Estos están asociados con un procedimiento específico que define el tipo de análisis que se desarrolla durante el paso tales como análisis de esfuerzos estáticos o análisis de transferencia de calor. No hay límite en el número de pasos.

Un modelo Abaqus/Cae usa los siguientes tipos de análisis o procedimientos:

3.4.3. Análisis de Perturbación Lineal: Este proporciona una respuesta lineal del modelo acerca del estado alcanzado al final del último paso.

3.4.4. Análisis General: Este define eventos secuenciales donde el estado del modelo al final de un paso general proporciona el estado inicial para el comienzo del siguiente paso general. La respuesta puede ser lineal o no-lineal.

Tipos de procedimientos de análisis general:

- Análisis de Esfuerzos Efectivos para un Medio Poroso Lleno de Fluido: En este se puede realizar un análisis acoplado de difusión de fluido

poroso/esfuerzos que permite modelar el flujo de fluidos de una sola fase parcial o totalmente saturado a través del medio poroso.

- Análisis Esfuerzo/Desplazamiento, Estático, Transitorio con Respuesta del Material Dependiente del Tiempo: Se puede usar un análisis de esfuerzos quasi-estático para analizar problemas con respuesta del material dependiente del tiempo (creep, hinchamiento, viscoelasticidad y viscoelasticidad de dos capas).
  - Procedimiento Dinámico Totalmente Acoplado Térmico-Esfuerzo usando Integración Explícita: Se debe configurar un análisis totalmente de temperatura-desplazamiento cuando los análisis de esfuerzos dependen de la distribución de temperatura y la distribución temperatura depende la solución de esfuerzos. Para estos casos las soluciones térmicas y mecánicas se obtienen simultáneamente y no secuencialmente
  - Procedimiento de Campo Geoestático de Esfuerzos: Este permite verificar que el campo geoestático de esfuerzos está en equilibrio con las cargas aplicadas y las condiciones de frontera sin producir deformaciones. Permite iterar, y si es necesario obtener el equilibrio o se le puede permitir a Abaqus calcular el equilibrio automáticamente para casos en el cual el estado inicial de esfuerzos no se conoce.
- ✓ Este tipo de procedimiento es usualmente el primer paso de un análisis geotécnico seguido por un procedimiento de análisis acoplado de difusión de fluido poroso/esfuerzos.
  - ✓ Considera el grado de libertad de presión de poro cuando se usan los elementos de presión de poro y el grado de libertad de temperatura cuando se usan elementos de acople temperatura-presión de poro.
  - ✓ Puede ser lineal o no lineal

Este procedimiento puede establecer el equilibrio para dos casos:

✓ Establecer el equilibrio cuando se conoce aproximadamente el estado inicial de esfuerzos: Este procedimiento requiere que los esfuerzos iniciales estén cerca del estado de equilibrio, si no los desplazamientos para alcanzar el equilibrio podrían ser grandes. Si los esfuerzos dados como condiciones iniciales están lejos del equilibrio bajo carga geoestática el proceso de iteración podría fallar.

✓ Establecer el equilibrio cuando el estado de esfuerzos inicial es desconocido: Para obtener el equilibrio en este caso, Abaqus calcula automáticamente el equilibrio correspondiente a la configuración inicial, permitiendo pequeños desplazamientos dentro de las tolerancias especificadas por el usuario (la tolerancia predeterminada es  $10^{-5}$ ). El procedimiento está limitado para cierto tipo de elementos y materiales y está destinado para usarse en análisis en los cuales la respuesta del material es principalmente elástica, es decir, deformaciones inelásticas pequeñas. El procedimiento está soportado para análisis lineales y no lineales geoméricamente pero en un paso geoméricamente lineal es mejor.

Limitaciones del análisis geoestático:

✓ Asegurarse que la tolerancia de desplazamiento sea más grande que los desplazamientos del análisis

✓ Se puede usar en un análisis de reinicio solamente si ha sido usado en análisis anteriores

• Equilibrio vertical en un medio poroso: El estado de equilibrio incluye componentes vertical y horizontal de los esfuerzos. Se asume que el fluido poroso está en equilibrio hidrostático durante el procedimiento geoestático así que:

$$\frac{\partial \mu_w}{\partial z} = -\gamma_w \text{ Donde } \gamma_w \text{ es el peso específico del fluido poroso}$$

El fluido poroso no está en equilibrio hidrostático si hay un flujo en estado estable significativo del fluido poroso a través del medio, en ese caso se debe desarrollar un análisis en estado estable acoplado difusión de fluido poroso/esfuerzo para establecer las condiciones iniciales para cualquier cálculo transitorio subsecuente. Si se toma  $\gamma_w$  independiente de  $z$  (el cual es el caso de un fluido levemente incompresible), la ecuación anterior se integra para definir:

$$\mu_w = \gamma_w(z_w^0 - z)$$

Donde

$z_w^0$  = Es la altura de la superficie freática, en la cual  $\mu_w = 0$  y por encima de la cual  $\mu_w < 0$  y el fluido poroso es sólo parcialmente saturada.

Se asume que los esfuerzos de corte no son significativos  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ , por lo que el equilibrio en la dirección vertical es:

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho * g + (s * n^0 * \gamma_w) \text{ Donde}$$

$\rho$  = Densidad del material sólido poroso seco (masa seca por unidad de volumen)

$g$  = Aceleración de la gravedad

$n^0$  = Porosidad inicial del material

$s$  = Saturación  $0 \leq s \leq 1$

Como la porosidad es la relación del volumen poroso con el volumen total y la relación de vacío es la relación del volumen poroso con el volumen sólido,  $n^0$ (porosidad) es definido de la relación inicial de vacío así:

$$n^0 = \frac{e^0}{1 + e^0}$$

Abaqus requiere el valor inicial del esfuerzo efectivo  $\bar{\sigma}$ , dado como condición inicial se define así:

$$\bar{\sigma} = \sigma + s * \mu_w * I \quad \text{Donde } \sigma = \text{Esfuerzo total}, I = \text{Matriz Unitaria}$$

Combinando esta definición con la ecuación de equilibrio en la dirección Z y la de equilibrio hidrostático en el fluido poroso se tiene que:

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{zz}}{\partial z} = \rho * g - \gamma_w \left( s * (1 - n^0) - \frac{\partial s}{\partial z} (z_1^0 - z) \right) \quad \text{si } z < z_1^0$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{zz}}{\partial z} = \rho * g \quad \text{si } z_1^0 \leq z$$

Otra vez asumiendo que  $\gamma_w$  es independiente de Z.  $z_1^0$  Es la posición de la superficie que separa el suelo seco del suelo parcialmente saturado. El suelo se asume seco ( $s=0$ ) para  $z_1^0 \leq z$ , parcialmente saturado para  $Z_w^0 < z < z_1^0$  y totalmente saturado para  $z \leq Z_w^0$  con ( $s=1$ ).

- Equilibrio Horizontal en un Medio Poroso: En muchas aplicaciones en geotecnia hay esfuerzo horizontal, causado típicamente por la acción tectónica. Si el fluido poroso está bajo equilibrio hidrostático y  $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ , el equilibrio en las direcciones horizontales requiere que los componentes horizontales del esfuerzo efectivo no varíen con la posición horizontal:  $\bar{\sigma}_h(z)$ , solamente donde  $\bar{\sigma}_h$  es cualquier componente horizontal del esfuerzo efectivo.

3.4.5. Solicitud de Salida: Permite seleccionar las variables de todos los datos calculados durante el análisis que serán escritos a la base de datos de salida. Una solicitud de salida tiene la siguiente información:

- Las variables o componentes de las variables de interés.
- La región del modelo y los puntos de integración de los cuales los valores son escritos a la base de datos de salida.
- La razón o la frecuencia a la cual las variables o componentes de las variables son escritas a la base de datos de salida.

Abaqus/Cae selecciona de forma predeterminada las variables, los nodos o puntos de integración de todo el modelo y la razón o frecuencia a la cual van a ser escritas en la base de datos de salida, todo esto se puede editar.

Tipos de solicitud de salida:

- ✓ Field Output Request: Este genera el campo de salida de datos que están espacialmente distribuidas sobre todo el modelo o sobre una porción de él. Abaqus escribe cada componente de las variables seleccionadas a la base de datos de salida.
- ✓ History Output Request: Este genera la historia de salida de datos en puntos específicos en el modelo, se puede especificar los componentes individuales de las variables que Abaqus escribirá a la base de datos de salida.

De este módulo de partes se utilizará en el paso inicial los campos predefinidos de presión de poro, saturación y de esfuerzos in-situ y para el paso de análisis se seleccionará el procedimiento geostático de esfuerzos para encontrar el equilibrio de esfuerzos.

El tipo de solicitud de salida será Field Output Request, en el cual se va a solicitar que se escriba en el archivo de base de datos de salida las siguientes variables:

- ✓ IVOL: Volumen de los Puntos de Integración
- ✓ EVOL: Volumen de los Elementos Finitos
- ✓ Esfuerzo Principal Máximo

- ✓ Esfuerzo Principal Mínimo
- ✓ Esfuerzo Vertical
- ✓ Esfuerzos S11, S22 y S33
- ✓ E: Deformación Total
- ✓ AC YIELD (Actively Yielding): Si la magnitud de esta variable es cero no hay flujo plástico en el material representando que no está fallando y si es 1 hay flujo plástico representando que el material está fallando. Si el esfuerzo es mayor que el esfuerzo inicial de cedencia, entonces  $AC\ YIELD=1$  y se dice que el material está fallando.
- ✓ PE (Deformación Plástica): Este indicador representa todos los componentes de deformación plástica.
- ✓ PEEQ (Deformación Plástica Equivalente): Este identificador también proporciona una bandera SI/NO es decir, 1/0 respectivamente, diciendo si el material está cediendo actualmente o no.
- ✓ PEMAG: Magnitud de la Deformación Plástica.

Todas estas variables de salida serán solicitadas sobre todo el modelo, incluyendo la cara del pozo que sería el área de interés para cuantificar el volumen de cavings que se podrían presentar en la perforación de dicho pozo.

### 3.5 MÓDULO DE CARGA

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

3.5.1. Condiciones de frontera: Se tienen los siguientes tipos de condiciones de frontera:

- Simetría/Antisimetría/Encastre:
  - XSYMM: Simetría alrededor de un plano  $X=\text{constante}$ , implica que los grados de libertad  $1,5,6=0$ .
  - YSYMM: Simetría alrededor de un plano  $Y=\text{constante}$ , implica que los grados de libertad  $2,4,6=0$ .
  - ZSYMM: Simetría alrededor de un plano  $Z=\text{constante}$ , implica que los grados de libertad  $3,4,5=0$ .
  - XASYMM: Antisimetría alrededor de un plano  $X=\text{constante}$ , implica que los grados de libertad  $2,3,4=0$ .
  - YASYMM: Antisimetría alrededor de un plano  $Y=\text{constante}$ , implica que los grados de libertad  $1,3,5=0$ .
  - ZASYMM: Antisimetría alrededor de un plano  $Z=\text{constante}$ , implica que los grados de libertad  $1,2,6=0$ .
  - PINNED: Tipo broche, implica que los grados de libertad  $1,2,3=0$ .
  - ENCASTRE: Totalmente empotrado, implica que los grados de libertad  $1,2,3,4,5,6=0$ .
  
- Entrada/Salida de Fluido: En este se especifica las condiciones de flujo en un lugar particular de la superficie del modelo, especificando la presión o la velocidad en la entrada o la salida.
  
- Pared-Fluido: Se tiene los siguientes tipos:
  - Sin deslizamiento: Se crea una superficie donde el fluido se adhiere a la pared sin deslizamiento y sin penetración.
  - Corte: Se crea una pared con deslizamiento donde el fluido no se adhiere a la pared pero no puede penetrarla.

- Infiltración: Se crea una infiltración en la pared donde el fluido puede penetrar la superficie mientras se mantiene la condición de no-desplazamiento.
- Presión de Poro: Se crea para especificar la presión de poro por exceso o total en un medio poroso. Si no existe carga de gravedad en el modelo se especifica la presión de poro por exceso pero si existe se especifica la presión de poro total.

Se crearán dos condiciones una para el fondo del modelo de simulación y otra para los límites o bordes del modelo.

- a) Fondo: La condición de frontera utilizada es la de Encastre.
- b) Borde: La condición de frontera utilizada es la de Encastre.

3.5.2. Condiciones de carga: Se tienen los siguientes tipos:

- Fuerza concentrada: Se puede aplicar a un vértice o a un nodo, puede tener una distribución uniforme sobre toda la región o la carga variaría espacialmente en el modelo.
- Presión: Se puede crear para definir una presión sobre una superficie, puede tener las siguientes distribuciones:
  - Uniforme: Define una presión uniformemente distribuida sobre la superficie. Se especifica la magnitud como fuerza por unidad de área.
  - Fuerza total: Define una presión uniformemente distribuida sobre la superficie. Se especifica la magnitud total de la fuerza aplicada a la superficie en vez de fuerza por unidad de área.
  - Hidrostática: Define una presión hidrostática aplicada a la superficie. Se puede especificar la magnitud, la altura a la cual la presión es cero en la

coordenada vertical o una presión con una altura de referencia a la cual la presión tiene la magnitud especificada.

- Definida por el usuario: Se define la magnitud de la carga mediante una subrutina.
  
- Presión en tubería: Este tipo de carga establece la presión interna o externa de una tubería o un codo, donde si se seleccionó presión interna se debe especificar el diámetro interno de la tubería o si se seleccionó presión externa se debe especificar el diámetro externo de la tubería. La distribución de esta carga puede ser uniforme, hidrostática o definido por el usuario mediante una subrutina.
  
- Flujo de fluido poroso concentrado: Define un flujo de fluido poroso concentrado en un vértice o nodo en análisis de suelos.
  
- Flujo de fluido poroso superficial: Define las velocidades del flujo de fluido poroso normal a las superficies en análisis de suelos.

En el modelo de simulación se utilizará las cargas de presión uniforme para especificar el efecto del lodo de perforación en la cara del pozo

3.5.3. Condiciones de campos predefinidos: Se tienen los siguientes tipos:

- Elementos inicialmente abiertos para flujo de fluidos tangencial: Como su nombre lo indica permite que el fluido circule tangencialmente a los elementos finitos.
  
- Presión de poro inicial en un medio poroso: Se define para los nodos de la malla en un análisis acoplado de esfuerzos/difusión de fluido poroso, donde puede ser definido directamente como función dependiente de la elevación (presión de poro variando linealmente con la coordenada vertical) o constante en todo el modelo.

- Relación de vacío inicial en un medio poroso: Se define en los nodos de un medio poroso y puede ser especificado como función dependiente de la elevación, constante en todo el modelo o mediante interpolación de un análisis anterior.
- Saturación inicial para un medio poroso: Se puede definir para los elementos finitos y para los nodos en un análisis acoplado de esfuerzos/difusión de fluido poroso. La saturación es definida como la relación del volumen del fluido mojante con el volumen de vacíos.
- Campo de esfuerzos iniciales: Se pueden definir directamente, usando un archivo de salida de un análisis anterior o a través de una subrutina. Los valores de esfuerzos dados directamente serán aplicados uniformemente sobre el elemento. En este se definen los dos componentes de esfuerzos efectivos horizontales y el efectivo vertical.
- Campo de esfuerzos iniciales dependiente de la elevación: Este se puede definir cuando un estado de esfuerzos geoestático es predeterminado para un conjunto de elemento particular, donde el esfuerzo en la dirección vertical varía linealmente con su coordenada vertical.

En el modelo de simulación se utilizarán los campos predefinidos de saturación inicial, relación de vacío inicial, estado de esfuerzos efectivos iniciales geoestáticos.

### 3.6 MÓDULO DE ENMALLADO

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

- Asignar los atributos de la malla y fijar los controles de la misma: Se especifica las características de la malla como densidad, forma y tipo de elemento.

- Generar la malla: Se especifica la técnica de enmallado, la cual determina el nivel de control que se tendrá sobre la malla.
- Refinar la malla: Se especifican las semillas, se divide el modelo complejos en varias regiones más simples para obtener mejor calidad de la malla.
- Optimizar la malla: Se pueden asignar reglas de reenmallado a las regiones del modelo para permitir un sucesivo refinamiento de la malla de acuerdo a los resultados del análisis.
- Verificar la malla: Se verifica la calidad de la malla la cual influye significativamente en la precisión y exactitud de los resultados del análisis.

Los atributos del enmallado de un modelo son las semillas, técnicas de enmallado, algoritmo de enmallado y tipos de elementos finitos.

3.6.1. Semillas: Son marcadores que se ponen a lo largo de las aristas o bordes de una región para especificar la densidad de malla en el interior de la región y a lo largo de los límites de la misma. Abaqus/Cae genera mallas que se ajusten a las semillas lo más fielmente posible.

Cuando se restringe el número de semillas se especifica a su vez el número de elementos a lo largo del borde, y en menor medida, las posiciones precisas de los nodos.

Abaqus/Cae usa los siguientes métodos para controlar la distribución de las semillas:

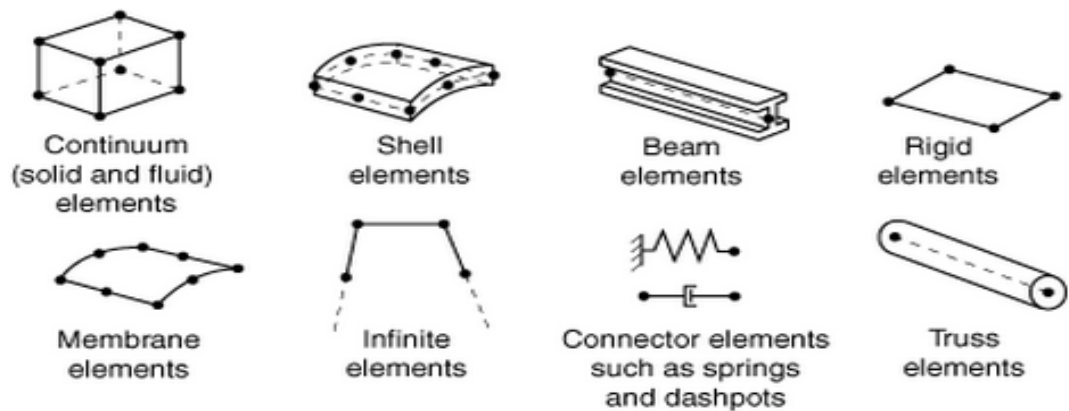
- Posicionar las semillas uniformemente a lo largo de todos los bordes de una parte o copia de la parte.
- Posicionar las semillas uniformemente a lo largo de un borde.
- Posicionar las semillas con una predisposición tal que la densidad de la malla aumente hacia un extremo del borde.
- Posicionar las semillas con una predisposición tal que la densidad de la malla aumente desde cada extremo hacia el centro del borde.

- Posicionar las semillas con una predisposición tal que la densidad de la malla aumente desde el centro hacia cada extremo del borde.

3.6.2. Elementos Finitos: Estos son los componentes fundamentales de un modelo en Abaqus. Los elementos finitos son deformables mientras que los cuerpos se mueven a través del espacio sin cambiar la forma. La ventaja del cuerpo rígido es que es descrito completamente por hasta 6 grados de libertad para un nodo de referencia y los elementos deformables tienen muchos más grados de libertad. Los elementos finitos se caracterizan por:

3.6.2.1. Familia: La diferencia principal entre cada una de las familias es el tipo de geometría que cada familia asume, en la siguiente figura se muestran algunas de la familias de elementos finitos que se utilizan en los análisis de esfuerzos:

Figura 21: Tipos de familias de los elementos finitos



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

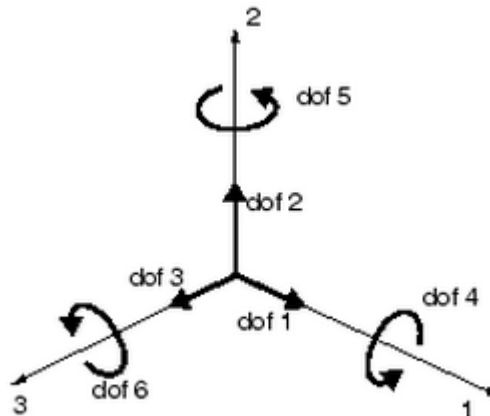
La primera letra del nombre de un elemento finito indica la familia a la cual pertenece el elemento, por ejemplo C3D8I es un elemento continuo.

3.6.2.2. Grados de libertad: Son las variables fundamentales calculadas durante el análisis, la cantidad y tipo de grado de libertad varían de acuerdo a la

familia seleccionada. En Abaqus se utiliza la siguiente convención para los grados de libertad:

- 1= Traslación en la dirección 1
- 2= Traslación en la dirección 2
- 3= Traslación en la dirección 3
- 4= Rotación en la dirección 1
- 5= Rotación en la dirección 2
- 6= Rotación en la dirección 3
- 7=Pandeo en los elementos de vigas en la sección abierta
- 8= Presión acústica, presión de poro o hidrostática del fluido
- 9=Potencial eléctrico
- 11=Temperatura para elementos continuos en el primer punto a través del espesor de las vigas o armazones
- 12=Temperatura en otros puntos a través del espesor de vigas y armazones.

Figura 22: Convención de grados de libertad en Abaqus

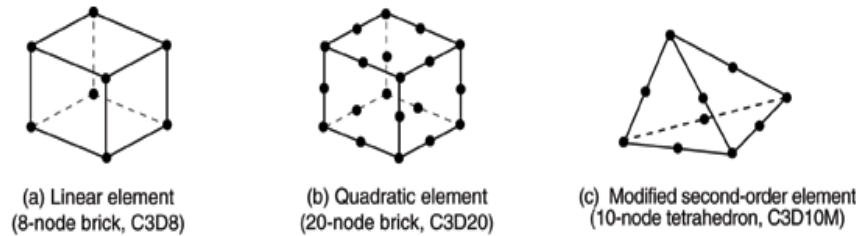


Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

3.6.2.3. Orden de interpolación: El orden de interpolación es determinado por el número de nodos usados en el elemento seleccionado.

- Orden de Interpolación lineal: Los elementos tienen nodos solamente en las esquinas
- Orden de Interpolación Cuadrático: Los elementos tienen nodos en las esquinas y en las mitades de los bordes.
- Orden de interpolación modificado: Los elementos tienen nodos en las esquinas y en las mitades de los bordes.

Figura 23: Tipos de elementos de acuerdo al orden de interpolación



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

3.6.2.4. Formulación: La formulación de un elemento se refiere a la teoría matemática usada para definir el comportamiento del elemento.

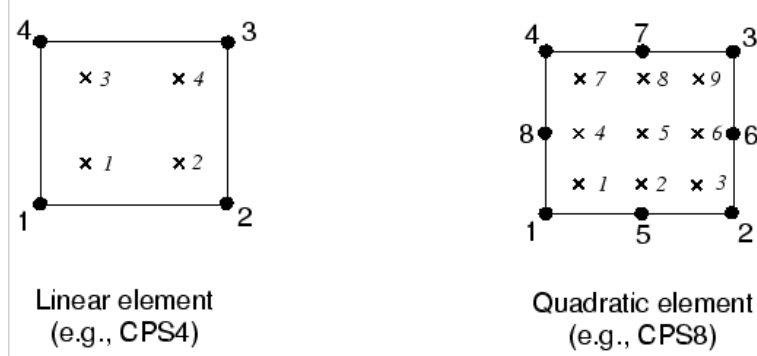
- Formulación Lagrangiana: En la descripción del comportamiento, el elemento se deforma con el material.
- Formulación Euleriana: En la descripción de los elementos, estos están fijos en el espacio a medida que material fluye a través de ellos.

3.6.2.5. Integración: Se tienen dos tipos :

- Integración Total: La expresión integración total se refiere al número de puntos de Gauss requeridos para integrar los términos del polinomio en una matriz de rigidez de los elementos exactamente cuando el elemento tienen una forma regular. Para los elementos hexaédricos y cuadriláteros, una forma regular significa que los bordes son rectos y se encuentran en ángulos rectos y que cualquier nodo de los bordes está en el punto central del borde. Los elementos lineales de integración total usan dos puntos de integración en cada dirección

mientras que los cuadráticos de integración total usan tres puntos de integración en cada dirección.

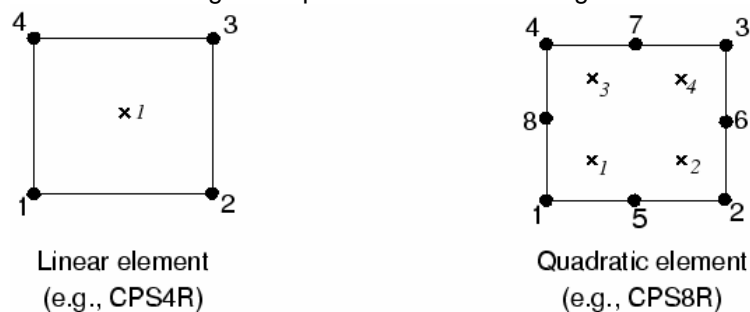
Figura 24: Puntos de integración para elementos de integración total lineal y cuadrático



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

- Integración Reducida: Solamente los elementos hexaédricos y cuadriláteros pueden usar este tipo de integración. La integración reducida usa un punto de integración menos en cada dirección comparándolo con la integración total.

Figura 25: Puntos de integración para elementos de integración reducida lineal y cuadrático



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

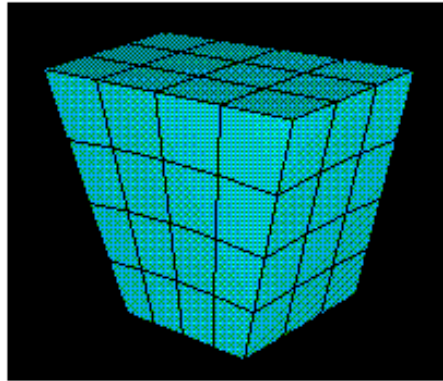
### 3.6.3 Técnicas de enmallado

3.6.3.1. Enmallado de tope hacia abajo: Esta depende de la geometría de la parte para definir los límites externos de la malla, se ajusta fielmente a la geometría (la malla resultante conforma exactamente la geometría original)

generando mallas de alta calidad en geometrías complejas. Este contiene las siguientes técnicas de enmallado:

- Enmallado Estructurado: Este proporciona el mayor control sobre la malla debido a que aplica patrones de malla preestablecidos a topologías de modelo particulares.

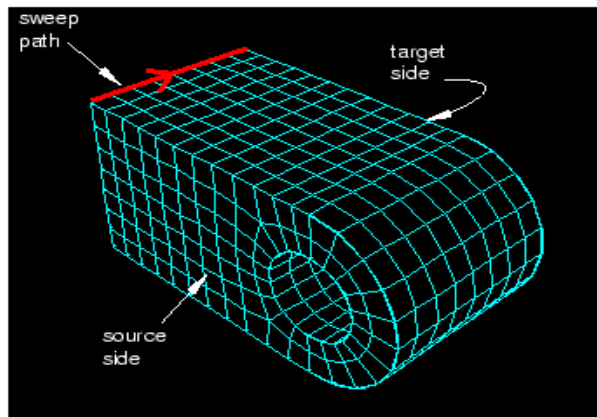
Figura 26: Técnica de enmallado estructurado



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

- Enmallado de Barrido: En este se crea la malla mediante la generación interna de la misma desde una arista o cara para luego barrer la malla a lo largo de una trayectoria de barrido.

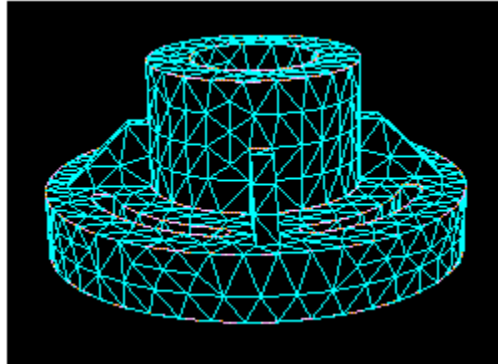
Figura 27: Técnica de enmallado de barrido



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

- **Enmallado Libre:** Esta es la técnica más flexible, no usa patrones de malla preestablecidos y se puede aplicar a casi cualquier modelo pero es en el que menor control de la malla se tiene.

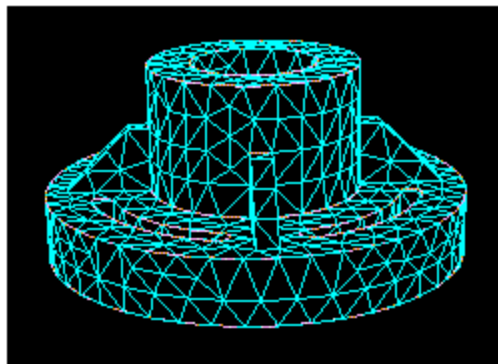
Figura 28: Técnica de enmallado libre



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

3.6.3.2. **Enmallado de base hacia arriba:** Este usa la geometría de la parte como guía para los límites externos de la malla, pero ésta no necesariamente conforma la geometría. Este es adecuado para modelar regiones de formas complejas pero de debe decidir si la malla resultante es una aproximación adecuada de la geometría original.

Figura 29: Técnica de enmallado de base hacia arriba



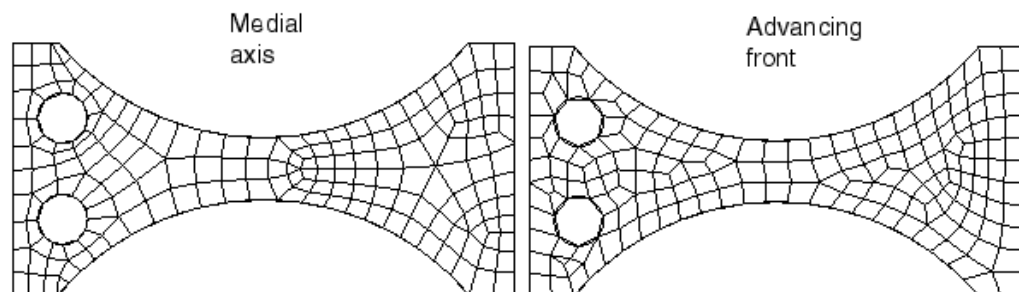
Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

3.6.4. Algoritmo de Enmallado: Estos son esquemas de enmallado que Abaqus usa para generar una malla, cuando se usa, se enmalla una superficie con elementos cuadriláteros o donde dominan estos, cuando se usa la técnica de enmallado libre o cuando se enmalla con hexaedros usando la técnica de enmallado de barrido. Se tienen dos tipos de algoritmos:

3.6.4.1 Algoritmo de Eje Medio: Este método descompone la región a enmallar en un grupo de regiones más simples, luego usa la técnica de enmallado estructurado para llenar cada región con elementos.

3.6.4.2 Algoritmo de Avance Frontal: Este genera elementos cuadriláteros en los bordes de la región y continúa generando estos elementos a medida que se mueve sistemáticamente hacia el interior de la región. Estos elementos generados siguen siempre las semillas fielmente de mallas hexaédricas y cuadriláteras.

Figura 30: Algoritmo de enmallado de eje medio y de avance frontal



Fuente: Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

### 3.7 MÓDULO DE TRABAJO

Una vez se haya finalizado todas las tareas que se incluyen en la definición de un modelo (tales como definir la geometría del modelo, asignar las propiedades de la sección y definir las condiciones iniciales y de frontera y el enmallado del mismo), se usa el módulo de trabajo para analizar el modelo. Este módulo permite crear un trabajo, enviarlo para su análisis y monitorear su progreso. Si se quiere se pueden crear varios modelos, trabajos, correr y monitorear los trabajos simultáneamente. En este módulo se puede crear el archivo plano de entrada del análisis del

modelo, permitiendo revisar y editar el archivo de entrada antes de enviarlo a analizar.

Se puede crear y enviar a análisis un trabajo basado en un archivo de entrada existente, en vez de enviar a análisis un modelo en Abaqus/CAE; por ejemplo si se ha creado un archivo de entrada sin utilizar Abaqus/CAE, pero se quiere correr el análisis, monitorear su progreso y revisar los resultados en Abaqus/CAE.

El análisis de un modelo envuelve los siguientes pasos:

- Crear y configurar un trabajo de análisis
- Escribir el archivo de entrada
- Enviar el trabajo para análisis

El módulo de trabajo permite realizar las siguientes acciones:

- Escribir un archivo de entrada para el modelo que se va a enviar a analizar
- Desarrollar una revisión de los datos del modelo
- Enviar un trabajo para análisis
- Continuar el completamiento de un análisis después de llevar a cabo una revisión de los datos
- Monitorear el análisis a medida que este progrese
- Revisar los resultados de un trabajo
- Abortar o matar un trabajo que está actualmente corriendo

#### 4. VALIDAR EL MODELO CREADO

En este capítulo se realizará la validación del modelo de simulación comparando el volumen de cavings obtenido en la simulación, con el obtenido a través de una aproximación analítica propuesta. Para ambos casos se utilizaron los mismos datos ilustrados de la zona a simular y se asume que el volumen obtenido por ambas metodologías es generado por un único modo de falla denominado

Breakout ancho. A continuación se muestra la metodología utilizada para estimar los volúmenes de cavings por simulación y a través de la aproximación analítica propuesta.

#### 4.1 APROXIMACIÓN PROPUESTA DEL VOLUMEN ANALÍTICO DE CAVINGS

Para el cálculo de este volumen, se tienen todos los datos de entrada del modelo geomecánico mencionados anteriormente, además del registro caliper, el cual determina el fallamiento de la roca si el diámetro del pozo no coincide con el diámetro de la broca, posteriormente se propuso una aproximación analítica para determinar el volumen de cavings de la siguiente forma: se asume que todo el volumen de derrumbe se generó por el modo de falla de Break-out ancho, por lo tanto, partiendo de la ecuación de Kirsch<sup>8</sup> se calcula el ángulo del Break-out, seguidamente se calcula el ancho del Break-out, luego se propone asumir que el área de derrumbe en la cara del pozo es igual al área de un triángulo y asumir también, que el volumen del derrumbe generado en la perforación es igual al volumen de un prisma triangular, y de esta forma determinar el volumen de cavings teórico con la aproximación geométrica propuesta, en función del ancho del Break-out, el diámetro de la broca, el registro caliper, y la profundidad de la falla.

El procedimiento de cálculo utilizado es el siguiente:

Se propone la siguiente aproximación para calcular el volumen de cavings teórico partiendo de la definición de Kirsch para calcular el esfuerzo máximo horizontal en función del ángulo del Break-out ( $\theta_b$ )<sup>9</sup>

$$\sigma_H = \frac{UCS + P_W + P_P - \sigma_h(1 - 2 \cos 2\theta_b)}{(1 + 2 \cos 2\theta_b)}$$

<sup>8</sup> Fjaer, E. and Holt, R.M. et al.: Petroleum Related Rock Mechanics, second edition, Elsevier 2008

<sup>9</sup> Zoback, Mark D. Reservoir Geomechanics, Department of Geophysics, Stanford University, Cambridge University Press, 2007.

Despejando el ángulo del Break-out se obtiene:

$$2\theta_b = \cos^{-1} \left( \frac{UCS + P_W + P_P - \sigma_h - \sigma_H}{2\sigma_h - 2\sigma_H} \right)$$

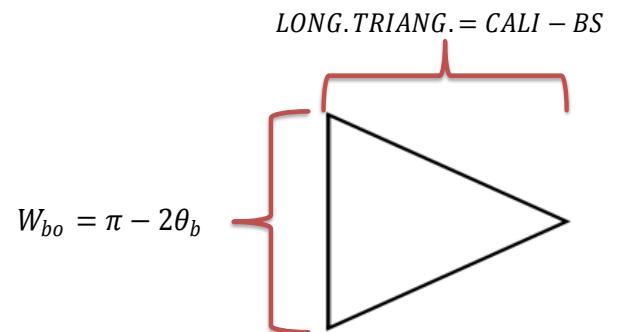
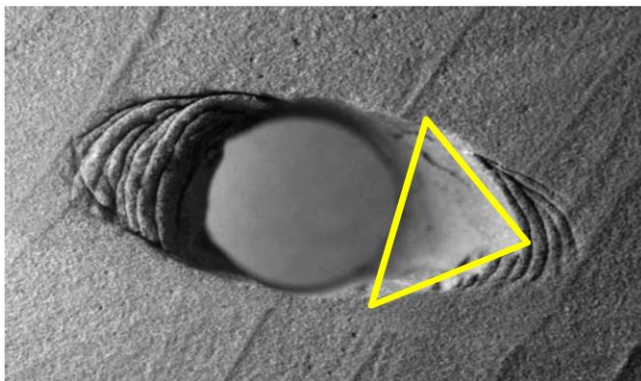
A partir del ángulo del Break-out se calcula el ancho del Break-out, ya que este último es la base del triángulo que permite calcular el volumen de cavings como se explica más adelante:

$$W_{bo} = \pi - 2\theta_b$$

Para obtener el volumen analítico de cavings se hacen dos suposiciones:

La primera suposición asume que el área de derrumbe en la cara del pozo es igual al área de un triángulo, como se observa en la ilustración 32, la figura de la izquierda muestra el ajuste del triángulo en amarillo a la forma del Break-out, y en la figura de la derecha se muestra la representación de el triángulo en términos geomecánicos.

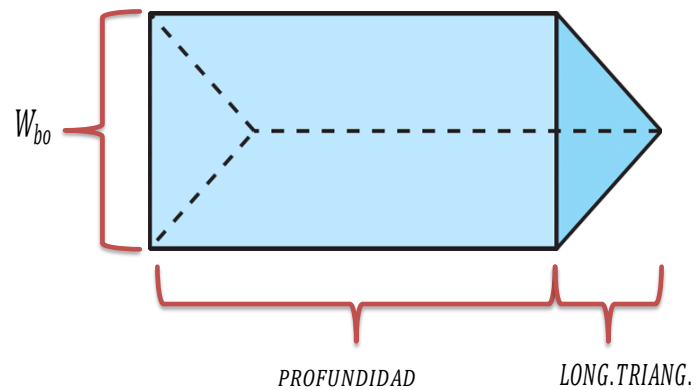
Figura 31: Aproximación del área de derrumbe al área de un triángulo



Fuente: Fjaer, E. and Holt, R.M. et al.: *Petroleum Related Rock Mechanics*, second edition, Elsevier 2008

La segunda suposición asume que la figura geométrica que representa de mejor forma el volumen de cavings, es un prisma triangular, donde el volumen de cavings es igual al volumen del prisma triangular, como se observa en la ilustración 33. El volumen del prisma triangular en términos geomecánicos, se puede definir de la siguiente manera:

Figura 32: Aproximación del volumen del prisma al volumen de cavings



Donde la aproximación propuesta para el volumen de cavings teórico se define así:

$$VOL. CAVINGS = \left\{ \frac{[W_{bo} * (CALI - BS)]}{2} \right\} * H$$

Después de este procedimiento se comparará este volumen de cavings teórico con el obtenido en la simulación, utilizando el software Abaqus.

#### 4.2 VOLUMEN DE CAVINGS USANDO UN MODELO DE SIMULACIÓN

Para el cálculo de este volumen, se utilizó el software Abaqus suministrándole los parámetros de entrada de un modelo geomecánico, se asume que sólo se presenta modo de falla de Break-out ancho en todo el pozo, luego se diseña el modelo de simulación de la siguiente forma: se crea un perfil 2D de un cuadrado con un círculo hueco en el centro, luego se extruye el perfil convirtiéndolo a 3D y se le asignan las propiedades digitadas como parámetros de entrada.

Posteriormente se crea el enmallado del modelo definiendo el tipo de elemento finito, y la densidad de la malla, luego se llevan a cabo los pasos del análisis del modelo en los cuales, primero se encuentra un equilibrio geostático asegurando que el modelo se encuentre en equilibrio con el estado de esfuerzos in situ y con las condiciones de frontera sin producir deformaciones, simulando el estado de la roca antes de la perforación. Segundo, se obtiene la distribución del estado de esfuerzos durante la perforación a través del equilibrio estático implicando que el modelo se deforme hasta encontrar el equilibrio con el estado de esfuerzos, la presión del lodo de perforación y las condiciones de frontera; y por último, se evalúa el criterio de falla de Mohr-Coulomb<sup>10</sup> al correr la simulación para determinar cuáles celdas de la malla de simulación fallaron, posteriormente el software Abaqus etiqueta cada elemento finito asignándole un número y a través de la función EVOL se solicita en un reporte el volumen de cada elemento finito, luego de identificarse los elementos que fallaron se suma el volumen de estos determinándose el volumen de cavings obtenido por la simulación.

A continuación se describe el modelo de simulación aplicado para cuantificar el volumen de cavings:

4.2.1 Modelo de simulación: El modelo de simulación es el caso de una perforación de un pozo de petróleo de 0,31 m ( $12 \frac{1}{4}$  ") de diámetro en 3D (tres dimensiones) de una capa de roca a una profundidad de 2622 m, sólo se simuló 11 m para disminuir el costo computacional como se muestra en la ilustración 34 y posteriormente se multiplicó por 10 para alcanzar el espesor total de la capa de roca de 110 m, asumiendo que los 110 m se comportan igual que el modelo simulado. En la ilustración 35 se muestra el zoom de la malla de elementos finitos en 3D, el enmallado del pozo es más fino (0,1 m) hasta 3 veces la cara (1m) del pozo con respecto al resto del modelo (2 m), esto con el fin de tener mayor precisión en los resultados obtenidos de esta zona y también porque a partir de

---

<sup>10</sup> Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

esta distancia (1 m después de la cara de pozo) los esfuerzos inducidos por la perforación son los mismos que los esfuerzos in-situ<sup>11,12</sup>.

Figura 333: Esquema del modelo de simulación

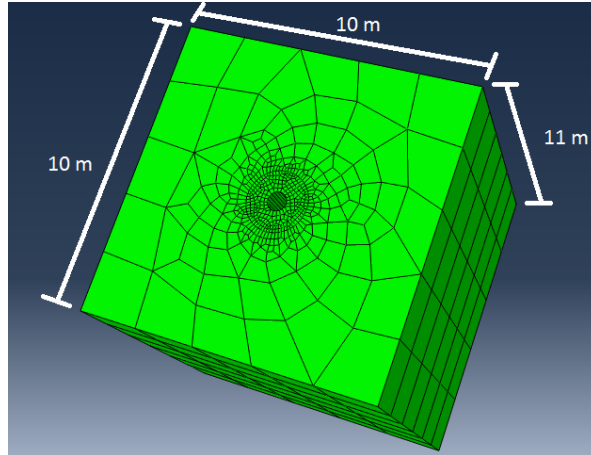
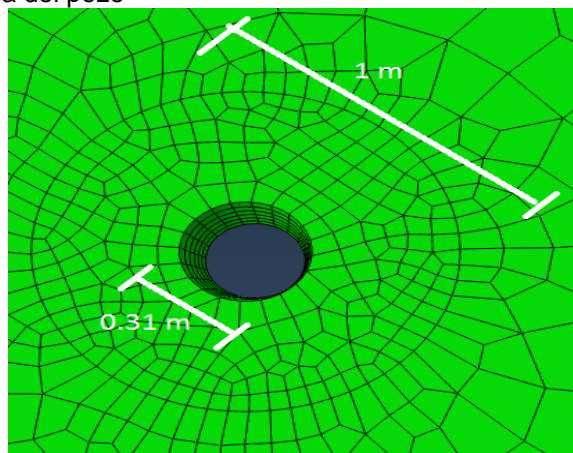


Figura 344: Zoom en la cara del pozo



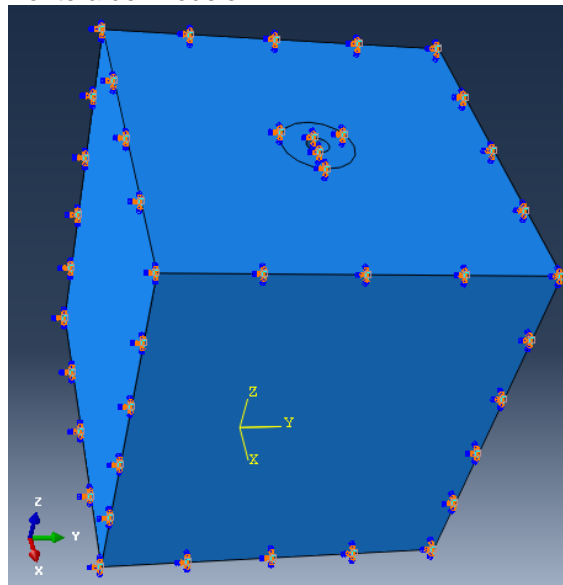
La condición de frontera utilizada en la simulación sobre todo el modelo es encastre, este limita o restringe desplazamientos y rotaciones en las direcciones

<sup>11</sup> Lenin A. Mora G. y Darwin O. Villadiego A.: Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de las teorías elástica y poroelástica: aplicación al piedemonte colombiano, Tesis de la Universidad Industrial de Santander.

<sup>12</sup> Schutjens, Peter. and Kuvshinov Boris. : “On the wellbore stress change caused by drawdown and depletion: an analytical model for a vertical well in a thin reservoir”, 2010.

X, Y, Z<sup>13,14</sup>, como se muestra en la Figura 35.

Figura 355: Condiciones de frontera del modelo



4.2.2 Etapas de la simulación: La simulación fue dividida en tres etapas o steps<sup>15,16</sup>. En la primera etapa se incluyeron las condiciones iniciales, es decir, los parámetros de entrada, las condiciones de frontera y el estado inicial de los esfuerzos in-situ. La segunda etapa se refiere al uso de la función Geoestático de Abaqus, lo cual permite verificar que el campo de esfuerzos esté en equilibrio con las cargas aplicadas y las condiciones de frontera sin producir deformaciones. La tercera etapa es denominada como Estático en la cual se quita la condición de frontera de encastre en la cara de pozo y se incluye la presión del lodo; posteriormente, se itera para simular el proceso de perforación y encontrar la distribución de los esfuerzos en todo el modelo durante este proceso. Finalmente,

<sup>13</sup> Eckert, A. and Nygaard, R. Mesh optimization for finite element models of wellbore stress analysis. Missouri University of Science and Technology. ARMA 11-356. 2011

<sup>14</sup> Chatterjee R.. and Mukhopadhyay, M..: "Numerical modeling of stress around a wellbore", Indian school of mines. SPE 80489. 2004.

<sup>15</sup> Mackay, Freddy.: Análisis Geomecánico en la Perforación y Cementación de Pozos de Petróleo en Zonas de Sal, Tesis de doctorado de PUC. 2011.

<sup>16</sup> Botelho, Fabrício: Análisis numérico del comportamiento mecánico de sal en pozos de petróleo, Tesis de maestría PUC, 2008

se comparan los resultados obtenidos en la simulación con la aproximación analítica propuesta del volumen de cavings.

La metodología termina con la comparación del volumen de cavings teórico y el volumen de cavings obtenido por la simulación, con el fin de predecir el volumen de derrumbe presentado durante la perforación.

4.2.3 Ejemplo de Aplicación: Con el fin de aplicar la metodología se utilizará un ejemplo real con datos de un campo colombiano. Para el montaje del modelo geomecánico se tienen en cuenta parámetros de resistencia y propiedades mecánicas de las rocas, tal y como: cohesión, ángulo de fricción interna, módulo de Young, relación de Poisson, permeabilidad y porosidad; considerando un pozo perforado ubicado en una zona de estudio, de igual manera el modelo geomecánico también incluye la presión de poro, presión del lodo y el estado de esfuerzos in situ. Todos estos datos permiten evaluar por medio del criterio de falla de Mohr-Coulomb<sup>17</sup> el estado de la roca a condiciones específicas, con el fin de determinar si se produce falla en la roca y que volumen podría generarse, con lo cual se estimaría un volumen de cavings o derrumbes en la cara del pozo por el fallamiento de la roca. La causa de los derrumbes en la cara del pozo se le atribuye al modo de falla de Break-out ancho<sup>18</sup>, para determinar el volumen de cavings tanto de forma analítica como por simulación.

Para efecto de cálculo, se utilizó una densidad de roca de  $2100 \text{ Kg/m}^3$ , el resto de los datos del modelo de simulación están resumidos en la ilustración 31.

Se digitaron los esfuerzos efectivos, es decir, el esfuerzo total menos la presión de poro; se consideró que el esfuerzo horizontal máximo actúa en dirección X, el esfuerzo horizontal mínimo en dirección Y, y el esfuerzo vertical en dirección Z,

---

<sup>17</sup> Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011

<sup>18</sup> Osorio, Gildardo. Memorias Curso de Geomecánica. Universidad Surcolombiana. Neiva, Marzo 29,30 y 31 2006.

estos son los datos de entrada para determinar el volumen de cavings tanto analíticamente como por simulación.

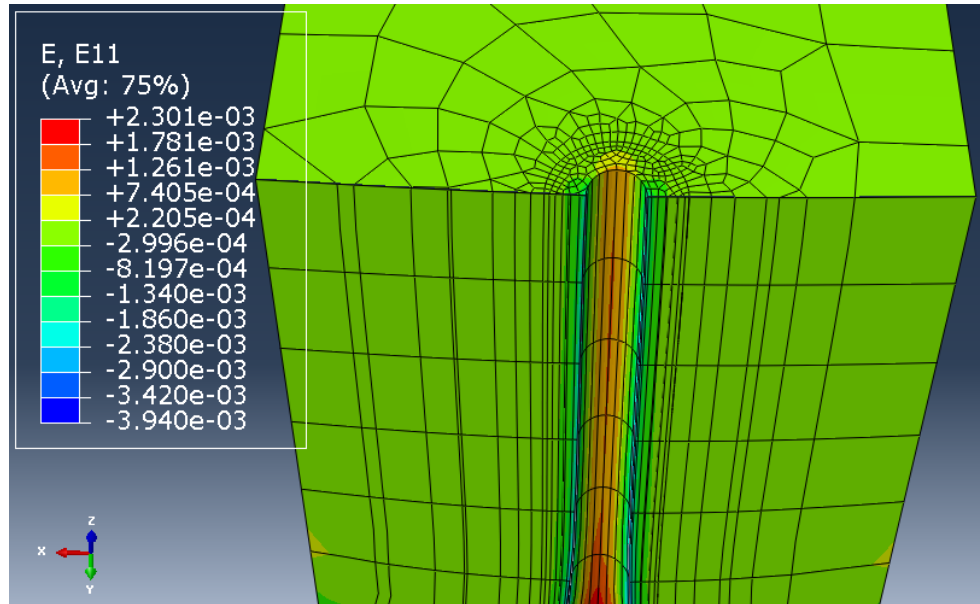
Figura 366: Resumen de los parámetros de entrada del modelo

DATOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN	
PROPIEDAD	MAGNITUD
Volumen modelo [m <sup>3</sup> ]	1100
Radio pozo [m]	0.31
Presión del lodo [MPa]	48
Módulo de Young [MPa]	13793
Relación Poisson	0.2678
Cohesión [MPa]	4.39
AFI	31.6
Porosidad	0.26
$\sigma_H$ [MPa]	60.986
$\sigma_h$ [MPa]	55.919
$\sigma_v$ [MPa]	62.548

### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.3.1 Resultados del paso Estático de la simulación: En este paso como se mencionó anteriormente, se simula el proceso de perforación cuyos resultados obtenidos en Abaqus se comparan con la aproximación analítica propuesta, por lo tanto en la Figura 37 se observa que en dirección del esfuerzo mínimo horizontal se tienen magnitudes mayores de la deformación elástica, es decir en dirección X, lo cual coincide con las características de un breakout (ocurre en dirección del esfuerzo mínimo horizontal). Los signos negativos en las magnitudes de las deformaciones elásticas corresponden a aquellas provocadas por esfuerzos compresivos, mientras que los signos positivos corresponden a deformaciones provocadas por esfuerzos tensiles.

Figura 37: Deformación elástica en dirección X



4.3.2 Calibración del modelo de simulación: La calibración del modelo de simulación se realiza utilizando las ecuaciones de Kirsch para calcular los esfuerzos radial, axial y tangencial de forma analítica y se comparan con los esfuerzos obtenidos mediante la simulación.

Si es un hueco cilíndrico en una placa densa, homogénea, isotrópica y elástica lineal sujeta a dos esfuerzos principales ortogonales las siguientes ecuaciones describen la distribución de los esfuerzos elásticos alrededor de un pozo perforado a lo largo del eje vertical en el sistema de coordenadas cilíndricas<sup>19</sup>:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 - \frac{R_w^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} - 4 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) + P_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 + \frac{R_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) - P_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

<sup>19</sup> ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics, Department of Geophysics, Stanford University, Cambridge University Press, 2007

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R_w^2}{r^2} \cos(2\theta)$$

Donde:

$\sigma_r$  = Esfuerzo Radial

$\sigma_\theta$  = Esfuerzo Tangencial

$\sigma_z$  = Esfuerzo Axial

$\sigma_H$  = Esfuerzo Máximo Horizontal

$\sigma_h$  = Esfuerzo Mínimo Horizontal

$r$  = Radio De Análisis

$R_w$  = Radio Del Pozo

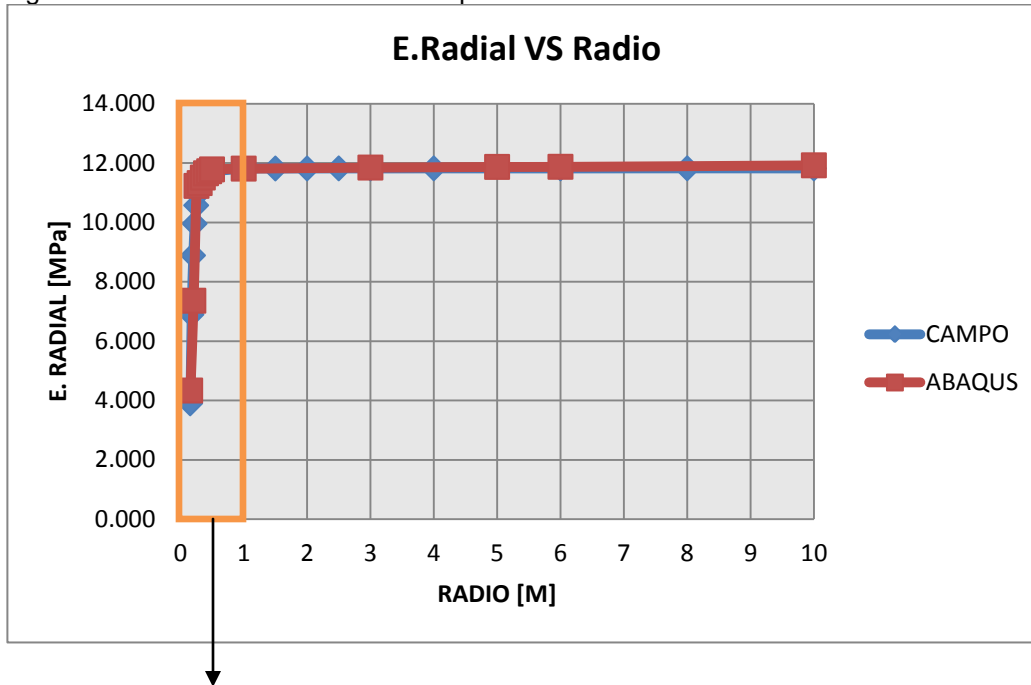
$P_w$  = Presión Del Lodo

$\nu$  = Relación De Poisson

$\theta$  = Es el ángulo entre la dirección del  $\sigma_\theta$  y la dirección del  $\sigma_{Hmax}$

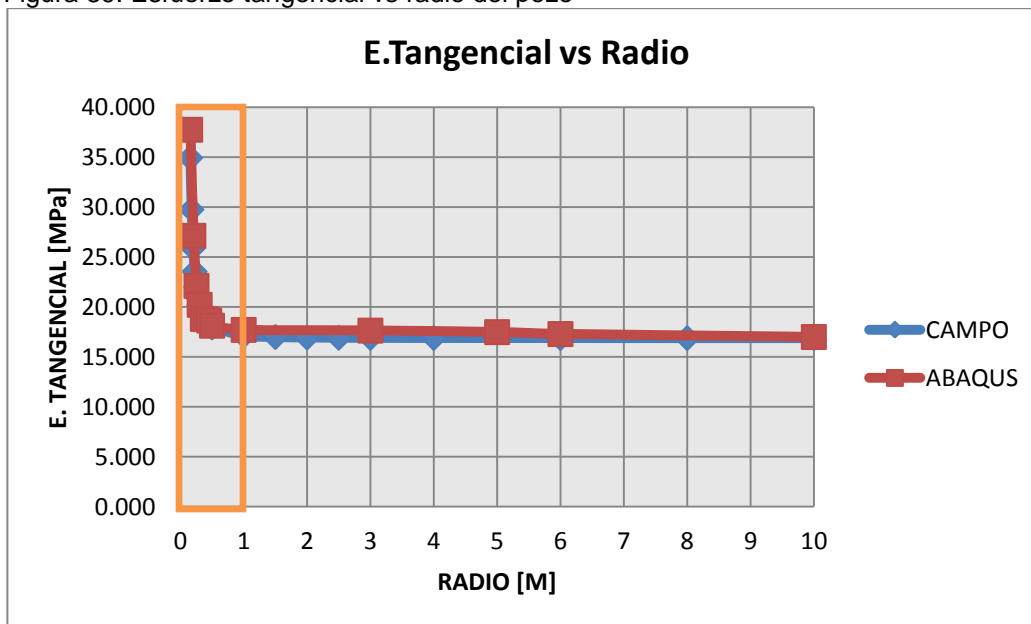
Se comparan los esfuerzos obtenidos analíticamente con los obtenidos de la simulación, como se observa en las ilustraciones 38, 39, y 40. Se logra un buen ajuste entre ambas metodologías.

Figura 38: Esfuerzo radial vs radio del pozo



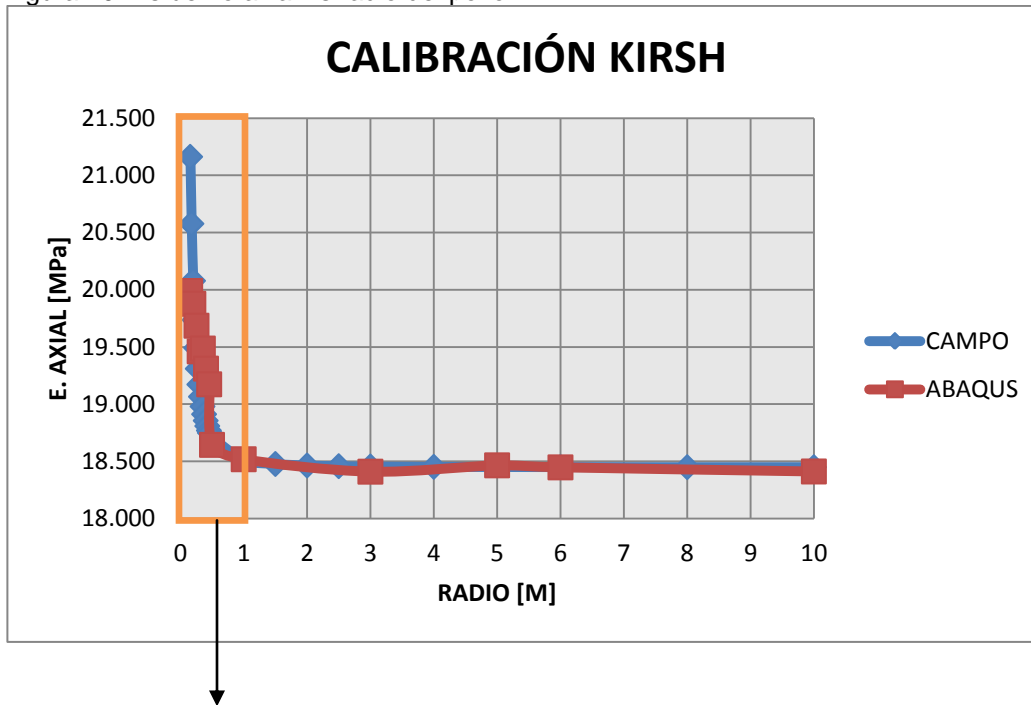
En esta región subrayada se observa que la variación de los esfuerzos se da hasta más o menos 3 veces el radio del pozo (1 m), y para radios de análisis mayores a este los esfuerzos son constantes tomando el valor del esfuerzo mínimo horizontal efectivo.

Figura 39: Esfuerzo tangencial vs radio del pozo



En esta región subrayada se observa que la variación de los esfuerzos se da hasta más o menos 3 veces el radio del pozo (1 m), y para radios de análisis mayores a este los esfuerzos son constantes tomando el valor del esfuerzo máximo horizontal efectivo.

Figura 40: Esfuerzo axial vs radio del pozo

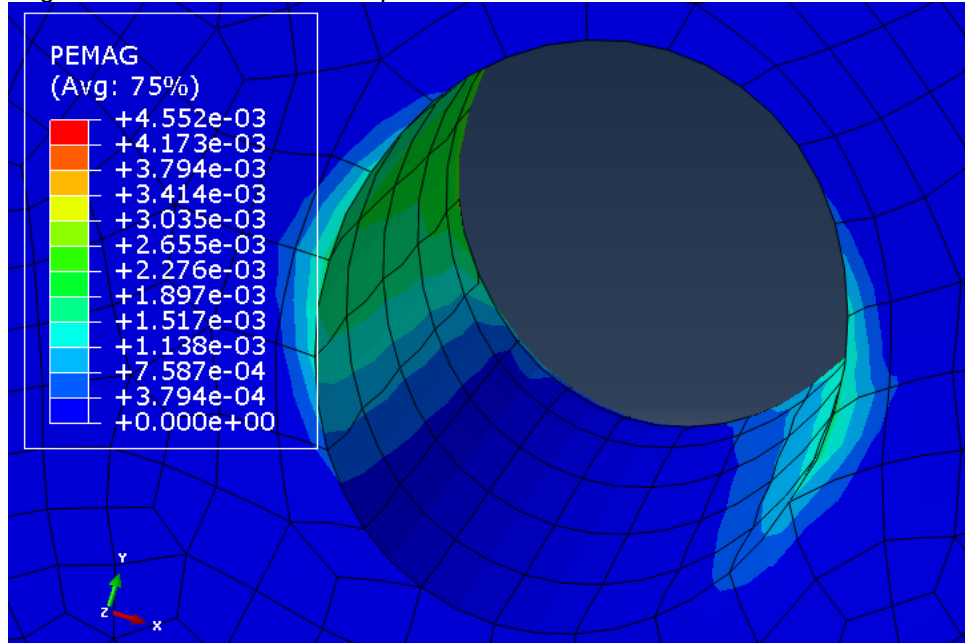


En esta región subrayada se observa que la variación de los esfuerzos se da hasta más o menos 3 veces el radio del pozo (1 m), y para radios de análisis mayores a este los esfuerzos son constantes tomando el valor del esfuerzo vertical efectivo.

4.3.3 Validación de la simulación: Para la validación de la simulación se compara el volumen de cavings obtenido en la simulación con el valor de la aproximación del volumen teórico de cavings. En la Figura 41 se muestra el identificador PEMAG (magnitud de las deformaciones plásticas) que tiene el software Abaqus, el cual determina el fallamiento del elemento finito, si su magnitud es diferente de cero y si no falla su magnitud es cero. Como se observa en la figura, en la cara del pozo se ve la forma del Breakout indicando en las zonas de color diferente al

azul que el material falló, lo que concuerda con los datos del pozo en estudio que afirman que toda la profundidad de formación simulada presenta derrumbes y que el modo de falla presentado es el de Break-out ancho.

Figura 41: Magnitud de las deformaciones plásticas



#### 4.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ANALÍTICOS CON LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

El volumen de cavings analítico se obtuvo con la aproximación propuesta anteriormente a profundidades pie a pie, ya que se contaba con todos los parámetros necesarios para evaluar el fallamiento de la roca y obtener su volumen. Posteriormente, se compara con el volumen de cavings obtenido de la simulación mediante la cuantificación del número de elementos finitos cuyo material falló según el criterio de Mohr-Coulomb y haciendo una sumatoria del volumen de cada uno de estos elementos finitos. Los resultados muestran un gran ajuste entre los volúmenes comparados, como se observa en la Figura 42 y en la ecuación del cálculo del error.

Figura 42: Comparación de los volúmenes de cavings

Volumen de cavings	Magnitud
<b>Teórico [m<sup>3</sup>]</b>	75.69
<b>Abaqus [m<sup>3</sup>]</b>	54.93

$$\% \text{ Error} = \frac{75.69 - 54.93}{75.69} * 100 = 27\%$$

Logrando este ajuste, se podría predecir el volumen de cavings que se generaría en la perforación de un pozo en la misma zona donde se realiza el estudio, permitiendo reducir los tiempos no productivos que se presentarían por el atascamiento de la tubería provocado por el volumen de cavings, lo cual repercute directamente en una reducción significativa en el dinero invertido durante la perforación.

## 5. CONCLUSIONES

- Se desarrolló una aproximación analítica para calcular el volumen de cavings teórico en función de parámetros geomecánicos conocidos, sin usar registros de imagen, la cual permite determinar el ancho del breakout y posteriormente cuantificar el volumen de cavings generado.
- Se logró reproducir en un modelo de simulación el modo de falla breakout ancho presentado en un pozo perforado, el cual es el mecanismo productor del volumen de cavings para el caso de estudio, permitiendo así predecir el fenómeno de inestabilidad de pozo, lo cual permite tomar medidas correctivas para mitigarlo o prevenirlo.
- Para la calibración del modelo se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Kirsh, comparando los esfuerzos radial, tangencial y axial obtenidos a través de estas ecuaciones con los esfuerzos  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  y  $S_{33}$  de la simulación en dirección del esfuerzo mínimo horizontal, resultando en un buen ajuste entre ambas metodologías.
- Se validó el modelo de simulación desarrollado en el software Abaqus, mediante la comparación del volumen de cavings obtenido en la simulación con el obtenido usando una aproximación analítica propuesta, y como resultado se logra un buen ajuste entre ambas metodologías

## RECOMENDACIONES

- Comparar los resultados obtenidos en esta investigación con un registro de imágenes de la falla del pozo, el cual permite obtener de manera directa el ancho del breakout y su profundidad, y al contar con el reporte diario de la tasa de cavings en campo, se lograría tener datos más fiables para la validación de la simulación.
- Para obtener los esfuerzos radial, tangencial y axial de la simulación es importante tener en cuenta los puntos de integración más cercanos a la zona de análisis, para obtener resultados más precisos puesto que si se tienen en cuenta los resultados por elementos, estos son promedios de todos los puntos de integración añadiendo errores a los datos extraídos.
- Simular un modelo que incluya todas las litologías de la columna estratigráfica para reproducir el derrumbamiento de la pared del pozo de forma más real incluyendo también la interacción existente en la interfase de las diferentes litologías.
- Utilizar la técnica de submodelamiento y subrutinas con el fin de que a la simulación se le pueda añadir efectos transitorios y más específicos, con el fin de hacer la simulación más real.

## BIBLIOGRAFÍA

Abaqus documentation 6.11, abaqus analysis user's manual, Dassault systemes Simulia. 2011.

Botelho, Fabrício: Análisis numérico del comportamiento mecánico de sal en pozos de petróleo, Tesis de maestría PUC, 2008.

Bradford I.D.R. When rocks mechanics met drilling: effective implementation of real time wellbore stability control, SPE 59121, February 2000.

Chatterjee R. and Mukhopadhyay M.. Numerical modeling of stress around a wellbore.SPE 80489.

Edwards S. Matsutsuyu B. & S. Willson, Imaging Unstable Wellbores While Drilling. SPE, BP America, SPE 79846-PA, 2004.

Eckert, A. & Nygaard, R. Mesh optimization for finite element models of wellbore stress analysis. Missouri University of Science and Technology.ARMA 11-356. 2011.

Fjaer, E. & Holt, R.M. et al.: Petroleum Related Rock Mechanics, second edition, Elsevier. 2008.

Li S. & Purdy C. Maximum horizontal stress and wellbore stability while drilling: modeling and case study. 2012.

Mackay, Freddy.: Análisis Geomecánico en la Perforación y Cementación de Pozos de Petróleo en Zonas de Sal, Tesis de doctorado de PUC. 2011.

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

Okland, D. and Cook, J.M.: "Bedding-Related Borehole Instability in High Angle Wells," paper SPE/ISRM 47285 presented at the 1998 SPE/ISRM Eurock, Trondheim, Norway, 8–10 July.

Ordoñez Suarez, Luz Yamile. Predicción de volúmenes de cavings por medio de métodos geoestadísticos con aplicación a la zona del piedemonte llanero. Trabajo de grado Ingeniera de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2008.

Osorio, Gildardo. Memorias Curso de Geomecánica. Universidad Surcolombiana. Neiva, Marzo 29,30 y 31 2006.

Roa Prada, Aura María. Análisis, causas y caracterización de cavings aplicado a la estabilidad de pozos: dos casos en el piedemonte llanero. Trabajo de grado Geóloga. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Ingeniería Físico-Química, 2006.

Santarelli, F.J. et al.: "Mechanisms of Borehole Instability in Heavily Fractured Rock Media," Intl. J. of Rock Mechanical Mining Science and Geochemistry (1992) 29, 457.

Schutjens Peter, Boris N. Kuvshinov. On the wellbore stress change caused by drawdown and depletion: an analytical model for a vertical well in a thin reservoir

Syarifuddin N. & Busono I. Regional stress alignments in the Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia: a contribution from a borehole breakout study.1999.

Zoback, Mark D. Reservoir Geomechanics, Department of Geophysics, Stanford University, Cambridge University Press, 2007.