

**IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LA DISMINUCIÓN DE LA PRESIÓN DE  
PORO EN EL ESTADO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN UNA ROCA  
PRODUCTORA, EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA SOFTWARE DE  
SIMULACIÓN**

**ANNY VANESSA ZAMBRANO LUNA**

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

**2014**

**IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LA DISMINUCIÓN DE LA PRESIÓN DE  
PORO EN EL ESTADO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN UNA ROCA  
PRODUCTORA, EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA SOFTWARE DE  
SIMULACIÓN**

**ANNY VANESSA ZAMBRANO LUNA**

**Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniera de Petróleos**

**Director**

**Ph.D. ZULY CALDERÓN CARRILLO**

**Co-Directores**

**Ing. YAIR ANDRÉS QUINTERO PEÑA**

**Ing. HERNÁN DARIO MANTILLA HERNÁNDEZ**

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

**2014**

## DEDICATORIA

Primero a Dios por darme la oportunidad de compartir tantas cosas maravillosas durante estos años y por permitirme escoger el camino que realmente me hace feliz.

A mi hermosa e incomparable mami, que aunque ahora no está físicamente conmigo, desde el cielo y al ladito de Dios está acompañando cada paso que doy. Gracias por enseñarme a ser una guerrera y gracias por ayudarme a alcanzar este sueño del que siempre hablábamos juntas.

A mi papá y a la maravillosa hermana que me regalaron. Gracias porque siempre tengo a alguien al lado que apoya mis locuras y está pendiente de mis logros y fracasos. Los amo.

A todos mis familiares. Por compartir tantos momentos maravillosos y apoyarme siempre.

Finalmente, a todos mis amigos y compañeros durante estos años de estudio. La mayor bendición, ustedes y tantos momentos compartidos.

## AGRADECIMIENTOS

La autora desea expresar sus más sinceros agradecimientos a:

**Ingeniero Yair Quintero**, porque comprendió mi duro 2013, sin ni siquiera explicarle una palabra y nunca me presiono. Muchas gracias por respetar mi ritmo de trabajo y por creer siempre en el proyecto.

**Ingeniero Carlos Cogollo**, por sus valiosos aportes a lo largo de la investigación y por ser un maravilloso consejero. Gracias por tanto.

**Doctora Zuly Calderón**, por todos sus consejos tanto para la vida como para mi desarrollo profesional, además de los excelentes aportes realizados a éste proyecto.

**Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo**, por permitirme aprender tantas cosas y por compartir tantos momentos inolvidables. Gracias por convertirme en una mejor profesional.

**Universidad Industrial de Santander**, por convertirse en mi segundo hogar y por brindarme tantas cosas. Gracias por ayudarme a cumplir mis sueños.

**Escuela de Ingeniería de Petróleos**, sólo gratitud hacia ustedes por permitirme aprender tanto y enamorarme más de lo que hago ó intento hacer.

A todos mis compañeros de carrera y a todos aquellos maravillosos profesionales que conocí en el camino y que llevo en mi corazón. A mis grandes amigos Iván y Lau, no sé que habría hecho sin su amistad sincera y tantas palabras de aliento. Gracias por tanto.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	18
1. GENERALIDADES .....	21
1.1 Esfuerzo.....	22
1.1.1 Esfuerzos Compresivos .....	23
1.1.2 Esfuerzos Tensionales.....	24
1.1.3 Esfuerzos de Cizalla .....	24
1.2 DEFORMACIÓN .....	25
1.2.1 Deformación Elástica .....	25
1.2.2 Deformación Viscosa .....	27
1.2.3 Deformación Elástico-Viscosa .....	27
1.2.4 Deformación Plástica .....	27
1.2.5 Deformación Frágil.....	27
1.3 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN .....	28
1.4 MÓDULOS DE ELASTICIDAD .....	29
1.4.1 Módulo de Cizalla o de Rigidez (G) .....	30
1.4.2 Módulo de incompresibilidad o de Volumen (K).....	30
1.4.3 Módulo de Young (E) .....	31
1.4.4 Relación de Poisson ( $\nu$ ) .....	32
1.5 LEYES CONSTITUTIVAS.....	32
1.5.1 Material Linealmente Elástico .....	33
1.5.2 Material Poroelástico .....	34

1.5.3 Material Elasto-plástico .....	34
1.5.4 Material Viscoelástico .....	34
1.6 PRESIÓN DE PORO .....	35
2. COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DURANTE LA DEPLECIÓN DE UN YACIMIENTO.....	37
2.1 POROELASTICIDAD Y ESFUERZO EFECTIVO .....	40
2.2 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS ALREDEDOR DE UN POZO .....	42
2.3 EFECTOS DE LA DEPLECIÓN DEL YACIMIENTO.....	46
2.3.1 Cambios de esfuerzos en yacimientos depletados .....	47
2.3.2 Fallas inducidas por la producción.....	51
2.3.3 Rotaciones de esfuerzos asociados con la depleción.....	51
2.3.4 Perforación y fracturamiento hidráulico en yacimientos depletados .....	52
2.3.5 Cambios de porosidad y permeabilidad durante la depleción.....	53
3. GENERALIDADES SOBRE LOS PARÁMETROS PARA SIMULAR GEOMECÁNICAMENTE EN EL SOFTWARE: ABAQUS .....	57
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES .....	59
3.1.1 Capacidades de ABAQUS para simulación geomecánica.....	59
3.1.2 Componentes de un modelo de análisis .....	60
3.1.3 Módulos de trabajo .....	63
3.2 ANÁLISIS UTILIZANDO ABAQUS.....	66
3.2.1 Análisis geostático .....	71
3.2.2 Análisis estático .....	72
3.3 PRINCIPIO DE ESFUERZO EFECTIVO PARA MEDIOS POROSOS .....	73
4. MODELO DE SIMULACIÓN .....	76

4.1 GEOMETRÍA DEL MODELO .....	77
4.2 ESPECIFICACIONES DEL MODELO .....	82
4.3 ANÁLISIS CON ABAQUS .....	89
4.4 CALIBRACIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN.....	93
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	96
5.1 ESFUERZOS EFECTIVOS.....	98
5.1.1 Sensibilidad.....	104
5.2 DEFORMACIONES .....	106
5.2.1 Sensibilidad.....	115
5.3 VARIACIONES GENERADAS .....	117
6. CONCLUSIONES .....	120
7. RECOMENDACIONES.....	122
BIBLIOGRAFÍA.....	123

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Efecto de la compresión. ....	24
Figura 2. Efecto de la tensión. ....	24
Figura 3. Efecto de la cizalla. ....	24
Figura 4. Tipos de esfuerzos y deformaciones. ....	26
Figura 5. Comportamiento elástico. ....	26
Figura 6. Curva esfuerzo deformación. ....	28
Figura 7. Relación esfuerzo longitudinal-deformación longitudinal. ....	31
Figura 8. Ilustración esquemática de un sólido poroso con esfuerzo externo aplicado fuera de una frontera impermeable y presión de poro actuando dentro de los poros. ....	41
Figura 9. Esfuerzos in-situ aplicados sobre la porción de roca productora a simular. ....	43
Figura 10. Distribución de esfuerzos en la cara del pozo. ....	44
Figura 11. Esfuerzos alrededor de un pozo en una formación linealmente elástica. ....	45

Figura 12. Logo de entrada, ABAQUS/CAE. ....	58
Figura 13. Esquema general para simulaciones acopladas utilizando ABAQUS...61	61
Figura 14. Start Session, ABAQUS 6.11.....	61
Figura 15. Esquema general de los componentes de un modelo de análisis. ....	62
Figura 16. Sistema coordenado, ABAQUS 6.11. ....	62
Figura 17. Barra de contexto ó lista de módulos.....	64
Figura 18. Componentes de un modelo en Abaqus.....	68
Figura 19. Tipos de Steps ó Análisis en ABAQUS 6.11.....	70
Figura 20. Porción de roca productora a simular .....	75
Figura 21. Malla circular fina en la región cercana al pozo. El radio del pozo corresponde a $R_w = 0.36$ [ft].....	79
Figura 22. Subdivisión de la región cercana al pozo.....	80
Figura 23. Dimensiones del modelo simulado. ....	81
Figura 24. Esfuerzos calculados en los puntos de integración. ....	81
Figura 25. Criterio de Mohr Coulomb.....	83
Figura 26. Modelo de Mohr-Coulomb en el plano deviatorico.....	84
Figura 27. Condiciones de carga del modelo diseñado. ....	87

Figura 28. Condición límite de desplazamiento. ....	88
Figura 29. Parte diseñada para el modelo de simulación. ....	89
Figura 30. Pasos de análisis en la simulación realizada .....	91
Figura 31. Esquema general de cargas aplicadas. ....	92
Figura 32. Elementos utilizados para la validación con las Ecuaciones de Kirsch. ....	93
Figura 33. Variación del esfuerzo radial vs. Radio desde la cara del pozo. ....	94
Figura 34. Variación del esfuerzo tangencial vs. Radio desde la cara del pozo. ...	94
Figura 35. Variación del esfuerzo axial vs. Radio desde la cara del pozo. ....	95
Figura 36. Configuración y convención de signos de un campo de esfuerzos en coordenadas cilíndricas, $\sigma_{rr} = \sigma_r$ , $\sigma_{zz} = \sigma_a$ y $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_t$ . ....	97
Figura 37. Perfil de $\sigma_r$ . ....	99
Figura 38. Esfuerzo radial efectivo vs. Radio de estudio a $0^\circ$ del $Sh_{max}$ . ....	99
Figura 39. Esfuerzo tangencial efectivo vs. Radio de estudio a $0^\circ$ del $Sh_{max}$ . ...	100
Figura 40. Esfuerzo axial efectivo vs. Radio de estudio a $0^\circ$ del $Sh_{max}$ . ....	100
Figura 41. Variación del esfuerzo radial (Caso base de simulación). ....	101
Figura. 42. Variación del esfuerzo tangencial (Caso base de simulación). ....	101
Figura. 43. Variación del esfuerzo axial (Caso base de simulación). ....	102

Figura 44. Reporte de los datos nodo por nodo (Caso 6: $P_p=725$ [psi]).	103
Figura 45. Diagrama araña para $\sigma_r$ .	104
Figura 46. Diagrama araña para $\sigma_t$ .	105
Figura 47. Diagrama araña para $\sigma_a$ .	105
Figura 48. Deformación para diferentes cantidades de depleción para el campo Z del Golfo de México.	108
Figura 49. Deformación debida a $\sigma_r$ ( $E_r$ ) vs. Radio de estudio a $0^\circ$ del $Sh_{max}$ .	109
Figura 50. Deformación debida a $\sigma_t$ ( $E_t$ ) vs. Radio de estudio a $0^\circ$ del $Sh_{max}$ .	110
Figura 51. Deformación debida a $\sigma_a$ ( $E_a$ ) vs. Radio de estudio a $0^\circ$ del $Sh_{max}$ .	110
Figura 55. Diagrama araña para $E_r$ .	116
Figura 56. Diagrama araña para $E_t$ .	116
Figura 57. Diagrama araña para $E_a$ .	117

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cambios en el esfuerzo horizontal ( $\Delta SHor$ ) producto de la variación de la relación de Poisson, asumiendo un $\Delta Pp=180$ psi.....	48
Tabla 2. Cambios en el esfuerzo horizontal ( $\Delta SHor$ ) producto de la variación de la presión de poro. ....	49
Tabla 3. Unidades de campo, unidades de la simulación realizada.....	63
Tabla 4. Datos de entrada para la simulación propuesta.....	75
Tabla 5. Escenarios de disminución de presión de poro.....	82
Tabla 6. Definición del comportamiento del material. ....	86
Tabla 7. Valores asignados a las cargas. ....	88
Tabla 8. Variación de esfuerzos efectivos (Caso base de Simulación).....	101
Tabla 9. Variación del esfuerzo radial efectivo para los 4 primeros casos de simulación.....	102
Tabla 10. Comparación de la deformación debida a $\sigma$ ( $E_r$ ) para 4 casos de simulación.....	111

Tabla 11. Variación de la deformación (Caso base de Simulación).....	113
Tabla 12. Variación de la deformación debida al esfuerzo efectivo $\sigma_r$ para los 4 primeros casos de simulación.....	114
Tabla 13. Variación de $\sigma_r$ , $\sigma_a$ y $\sigma_t$ a 4 [ft] de la cara del pozo. ....	118
Tabla 14. Variación de $E_r$ , $E_a$ y $E_t$ a 4 [ft] de la cara del pozo.....	118

**TITULO: IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LA DISMINUCIÓN DE LA PRESIÓN DE PORO EN EL ESTADO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN UNA ROCA PRODUCTORA, EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA SOFTWARE DE SIMULACIÓN.\***

**AUTORA: ANNY VANESSA ZAMBRANO LUNA\*\***

**PALABRAS CLAVE: Simulación, Geomecánica, Esfuerzo, Deformación, ABAQUS, Elementos Finitos.**

**RESUMEN.** La simulación geomecánica es considerada una herramienta importante en la industria del petróleo debido a la posibilidad de evaluar efectos geomecánicos en diversos escenarios, situaciones que no pueden ser manejadas por simuladores de yacimientos convencionales y que en el caso de estudio corresponde al nuevo estado de esfuerzos y deformaciones resultado de la depleción del yacimiento, generando redistribución y variación de condiciones geomecánicas fundamentales para la realización de actividades posteriores al proceso de producción y que será considerado como el objetivo a simular. La representación correcta de este fenómeno en un ambiente de simulación, se convierte en un instrumento de especial interés que procura la prevención y el conocimiento de nuevas características geomecánicas, lo que disminuiría el riesgo de las operaciones y el gasto innecesario de dinero.

Pese al impacto en la industria petrolera, para que dichas simulaciones puedan ser realizadas, es importante reconocer que este proceso se encuentra en función de ciertos factores (manejo de la herramienta, apoyo de expertos, conocimiento del fenómeno, método de solución y capacidad computacional, entre otros) y que no se reconoce el proceso de simulación como uno ciento por ciento confiable, pero si una excelente aproximación.

Es por ésta razón que el presente trabajo comienza con un estudio teórico del fenómeno, la identificación de las características básicas para simular geomecánicamente en el software trabajado, el diseño del modelo conceptual de simulación que represente de manera adecuada el efecto de la depleción en una roca productora y el correspondiente análisis de resultados y sensibilidad, con el fin de identificar el efecto de la disminución de la presión de poro en el estado de esfuerzos y deformaciones en una roca productora.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ingeniería Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.  
Directora: Zuly Calderón Carrillo. Codirectores: Yair Andrés Quintero Peña y Hernán Darío Mantilla Hernández.

**TITLE: IDENTIFICATION OF THE EFFECT OF DECREASING PORE PRESSURE IN THE STATE OF STRESS AND STRAIN IN A RESERVOIR ROCK, USING A SOFTWARE SIMULATION TOOL.\***

**AUTHOR: ANNY VANESSA ZAMBRANO LUNA\*\***

**KEYWORDS: Simulation, geomechanics, stress, strain, ABAQUS, finite element.**

**ABSTRACT.** Geomechanics simulation is considered an important tool in the petroleum industry because of the possibility of evaluating geomechanical effects in various scenarios, situations that cannot be handled by simulators conventional reservoirs and in our case corresponds to the new state of stress and strain result depletion of the reservoir, generating redistribution and fundamental change in geomechanical conditions for conducting post-production process and to be considered as the target to simulate. The correct representation of this phenomenon in a simulation environment becomes an instrument of special interest that seeks the prevention and knowledge of new geomechanical features, which reduce the risk of operations and spending unnecessary money.

Despite the impact on the oil industry, that such simulations can be performed, it is important to recognize that this process is based on certain factors (management tools, expert support, knowledge of the phenomenon, solution method and computational capacity, among others) and the simulation process is not recognized as one hundred percent reliable, but if an excellent approximation.

It is for this reason that this paper begins with a theoretical study of the phenomenon, identifying the basic characteristics to simulate the geomechanical software worked, the design of the conceptual simulation model that adequately represents the effect of depletion on a rock and producing corresponding results and sensitivity analysis in order to identify the effect of the decrease in pore pressure in the state of stress and strain in a producing rock.

---

\*Degree Project

\*\*Physical-Chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: Zuly Calderón Carrillo. Codirectores: Yair Andrés Quintero Peña y Hernán Darío Mantilla Hernández

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de la vida de cualquier campo productivo, suceden innumerables eventos que alteran el marco geomecánico existente en el yacimiento. Actividades como la perforación, completamiento y producción provocan cambios en los esfuerzos y por ende en las deformaciones, lo que puede generar altos costos y una afectación de gran potencial en la integridad de los pozos, la producción de arena, porosidad y la permeabilidad de las formaciones; así como la condición geomecánica previa para tratamientos como fracturamiento hidráulico o perforación de pozos en campos maduros, actividades que involucran de manera directa el estado de esfuerzos y deformaciones, ya que su aplicación exitosa depende de ello. La determinación de la variación o nuevo estado de esfuerzos debido a la disminución de la presión de poro constituye un interés general en la geomecánica de yacimientos, debido a la gran influencia que tiene esta nueva condición en cualquier proceso posterior a la producción; diversos estudios se han desarrollado desde hace varios años a través de diferentes pruebas realizadas en campo, arrojando evidencias que indican la existencia de variaciones en la magnitud y orientación de los esfuerzos, resultado de la disminución de la presión de poro del yacimiento a medida que los hidrocarburos son extraídos. La magnitud de esta depleción y por consiguiente su efecto sobre el estado de esfuerzos, depende de la tasa de producción, el grado de la presión de soporte de un acuífero activo, la presencia de una capa de gas en expansión y de las compresibilidades de la roca y los fluidos, entre otros.

Los simuladores de yacimientos a lo largo de su uso como herramienta para establecer una cantidad amplia de escenarios y determinante para evaluar la

incidencia en el comportamiento del flujo de fluidos, han permitido demostrar que la producción de fluidos genera una perturbación local de presión, temporal y espacialmente. En el caso de los simuladores geomecánicos o simuladores con alternativas geomecánicas, se centran en el conocimiento de la evolución del campo de esfuerzos y deformaciones en una gran cantidad de escenarios y buscan brindar mayor confianza en las actividades a realizar, así como lograr predecir posibles comportamientos problemáticos.

La predicción de los cambios de los esfuerzos inducidos en algún momento de la historia de la depleción es necesaria para un análisis de estabilidad de pozo o producción de arena, entre muchos otros aspectos. Si fuera posible conocer los cambios de los esfuerzos a lo largo de la vida productiva de un campo, su distribución y sensibilidad a la disminución de la presión de poro; los operadores podrían predecir los problemas durante la vida productiva de un pozo y evitar el gasto de dinero en operaciones innecesarias o no viables a través de la vida productiva del campo, razón por la cual se hace necesario el desarrollo de pruebas piloto de simulación de este fenómeno y cuya finalidad será la de constituirse como una herramienta que permita visualizar estas variaciones y sea el punto de partida para diferentes procesos de simulación geomecánica a los que quiere apostarle el Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo de la UIS.

Con el fin de lograr lo anterior, en el presente proyecto se entregará un análisis de sensibilidad del estado de esfuerzos y deformaciones ante la disminución de la presión de poro, mediante la simulación de un modelo conceptual de roca productora que permitirá obtener el nuevo estado geomecánico del yacimiento e identificar las características básicas que deben tenerse en cuenta a la hora de simular geomecánicamente en el software trabajado. Así, con este conocimiento adquirido se podrán llevar a cabo simulaciones para proyectos posteriores en el

Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo y se tendrá una buena aproximación de los cambios en el estado de esfuerzos y deformaciones debidos a la producción, lo cual permitirá conocer las nuevas características geomecánicas del yacimiento previas a otros procedimientos como fracturamiento hidráulico o perforación en yacimientos depletados, entre otros.

## 1. GENERALIDADES

La industria del petróleo es a nivel mundial una de las actividades que mayor riesgo presenta debido a la gran cantidad de problemas que pueden suceder durante procesos como perforación y producción, los cuales pueden llevar a la pérdida no sólo de tiempo sino también de toda la inversión.

La geomecánica es la disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas de la formación. Esta disciplina está basada en los conceptos y teorías de mecánica de rocas y mecánica de suelos, que relacionan el comportamiento de la formación bajo los cambios de esfuerzo producto de las operaciones petroleras de perforación, completamiento y producción. Aunque las bases de la geomecánica fueron realizadas a principios de siglo, las aplicaciones petroleras empiezan a tener mayor divulgación al comienzo de la década de los 70 y por tanto se considera una disciplina novedosa para la ingeniería de petróleos<sup>1</sup>. Se centra en el cálculo de algunos factores como lo son la presión de poro, propiedades mecánicas de las diferentes formaciones y estado de esfuerzos, tanto para procesos de perforación o para los relacionados con la producción de los fluidos del yacimiento.

La caída de presión o depleción del yacimiento debido a su producción puede conducir a la compactación del mismo, al movimiento de los estratos de sobrecarga, a una gran variación en el estado de esfuerzos en la cara del pozo y a la subsidencia de la superficie, entre otros fenómenos. Cada uno de ellos resulta

---

<sup>1</sup> VASQUEZ H, Andrés. Introducción a la geomecánica petrolera [online]. Capítulo 1. 2001. Disponible en <URL:<http://www.youblisher.com/p/106315-Introduccion-Geomecanica/>>

en procesos costosos y generan dificultades en el desarrollo normal del proceso de extracción, tanto para las instalaciones de producción como para las instalaciones de superficie. En algunos casos, la extracción de hidrocarburos provoca la formación de nuevas fallas y fracturas o deslizamientos sobre fallas preexistentes.

Como objeto de estudio se tomó la geomecánica aplicada al proceso de producción, contemplando una investigación sobre las variaciones que provoca la disminución de la presión de poro en el estado de esfuerzos; utilizando la simulación geomecánica como la herramienta que permitirá demostrar con cierto grado de certeza, que la producción de fluidos afecta el estado local de esfuerzos, ocasionando una variación no sólo temporal sino también espacial.

## 1.1 ESFUERZO [ $\sigma$ ]

En términos simples, el esfuerzo es definido como una fuerza actuando sobre un área dada y considerado como un tensor que describe la densidad de fuerzas actuando en todas las superficies que pasan a través de un punto dado y representa las fuerzas internas que se aplican sobre un cuerpo deformable<sup>2</sup>.

El concepto de esfuerzo es usado para describir la intensidad de las fuerzas internas establecidas en un cuerpo bajo la influencia de un conjunto de fuerzas de superficie aplicadas. Cuantitativamente, se expresa como una fuerza aplicada por unidad de área. Sin embargo, debe diferenciarse de la presión porque, si bien la

---

<sup>2</sup> ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. Chapter 1. Basic definitions.

presión se expresa como una fuerza por unidad de área, ésta sólo representará una cantidad escalar aplicada en la dirección perpendicular a la superficie en donde se aplica. En cambio, un esfuerzo puede definir el estado de las fuerzas internas aplicadas sobre un punto de un medio continuo, lo que implica que existirán varias componentes, una para cada dirección del sistema coordenado de referencia.

Se define como la fuerza aplicada dividida entre el área transversal inicial del material. El área transversal es el área perpendicular a la línea de acción de la fuerza<sup>3</sup>.

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza axial aplicada}}{\text{Área de sección transversal}} = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

Este parámetro permite comparar la resistencia de dos materiales, ya que establece una base común de referencia. Cabe destacar que la fuerza empleada en la ecuación debe ser perpendicular al área analizada y aplicada en el centroide del área para así obtener un valor de esfuerzo constante que se distribuye uniformemente en el área aplicada.

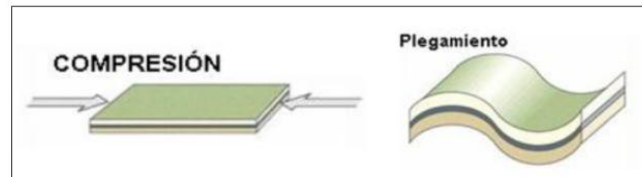
**1.1.1 Esfuerzos Compresivos.** Son fuerzas colineales actuando en sentidos opuestos y convergentes (Figura 1), las cuales acortan un cuerpo; por convención se hará referencia a los mismos mediante el signo negativo (-).

---

<sup>3</sup> E. Fjaer, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen & R. Risnes. Petroleum Related Rock Mechanics. Chapter 1. Second Edition.

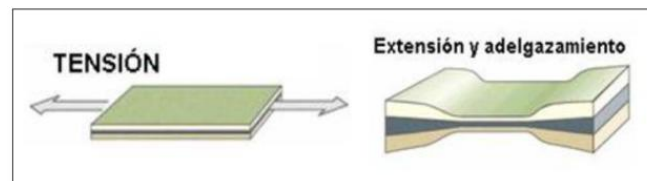
**1.1.2 Esfuerzos Tensionales.** Son fuerzas colineales actuando en sentidos opuestos y divergentes (Figura 2), las cuales alargan y adelgazan un cuerpo; por convención se hará referencia a los mismos mediante el signo positivo (+).

Figura 1. Efecto de la compresión.



Fuente: CARVAJAL, Jenny. Propiedades mecánicas de las rocas. Curso básico de geomecánica.

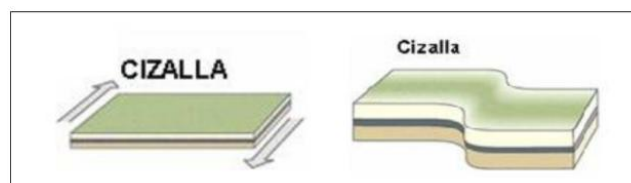
Figura 2. Efecto de la tensión.



Fuente: CARVAJAL, Jenny. Propiedades mecánicas de las rocas. Curso básico de geomecánica.

**1.1.3 Esfuerzos de Cizalla.** Son fuerzas paralelas no colineales actuando en sentidos opuestos (Figura 3); desgarran un cuerpo.

Figura 3. Efecto de la cizalla.



Fuente: CARVAJAL, Jenny. Propiedades mecánicas de las rocas. Curso básico de geomecánica.

## 1.2 DEFORMACIÓN [ $\epsilon$ ]<sup>4</sup>

Se define deformación como cualquier cambio en la posición o en las relaciones geométricas internas sufrido por un cuerpo como consecuencia de la aplicación de un campo de esfuerzos. El cambio en el tamaño o forma de un cuerpo, debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o como la compresión o tensión de un material, resultado de la aplicación de fuerzas externas o esfuerzos, dividida en su dimensión original.









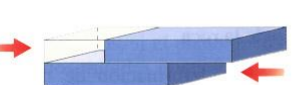
Las deformaciones son causadas por esfuerzos, de forma que ambos conceptos están ligados por una relación de causa-efecto. Aparte de ser conceptos distintos, hay una diferencia en el tratamiento de unos y otros que merece la pena destacar: Los esfuerzos se definen y se analizan para un instante dado, mientras que las deformaciones miden cambios producidos en un intervalo de tiempo y se analizan comparando un estado final con uno inicial. Dependiendo del tipo de esfuerzo aplicado y la manera como la roca reacciona ante el mismo, es posible definir diferentes tipos de deformaciones (Figura 4).

**1.2.1 Deformación Elástica.** Una deformación es elástica o reversible cuando el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación. Se caracteriza por un comportamiento lineal ascendente de la curva de esfuerzo versus deformación, como se muestra en la Figura 5.

---

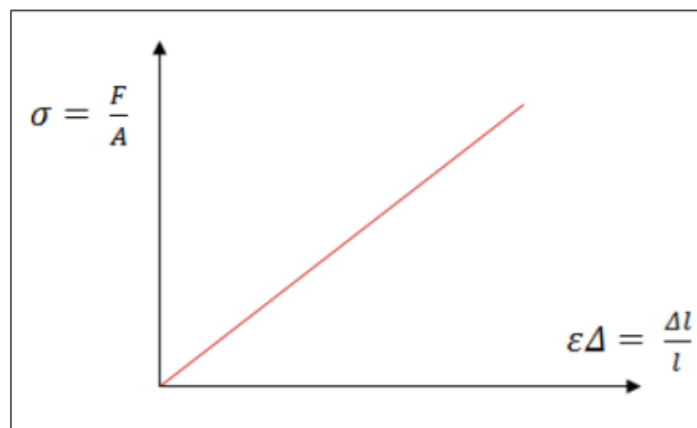
<sup>4</sup> MARTÍNEZ C, José R. Geología Estructural y Dinámica Global. Tema 2, Deformación.

Figura 4. Tipos de esfuerzos y deformaciones.

Tipo de esfuerzo			Tipo de deformación	
Tensión	Compresión	Cizalla		
				Indeforzado
				Ductil
			Frágil	

Fuente: Deformación de la rocas. Disponible en: <http://mundobioblogo4a.blogspot.com/2013/05/la-deformacion-de-las-rocas-las-rocas.html>

Figura 5. Comportamiento elástico.



Fuente: CARVAJAL, Jenny. Propiedades mecánicas de las rocas. Curso básico de geomecánica.

Cuando un material se comporta elásticamente, sus propiedades esfuerzo-deformación pueden ser descritas por dos constantes del material, el módulo de Young y la relación de Poisson. Sin embargo, el material puede exhibir comportamiento plástico con un aumento del estado de esfuerzo.

**1.2.2 Deformación Viscosa.** Se caracteriza por una relación de proporcionalidad directa entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación obtenida. En este caso, la deformación es permanente, es decir, no desaparece si se elimina el esfuerzo.

**1.2.3 Deformación Elástico-Viscosa.** Combina la deformación lineal elástica con la viscosa, cuyo comportamiento no es lineal, sino que su amortiguamiento origina una curvatura al graficar deformación versus esfuerzo.

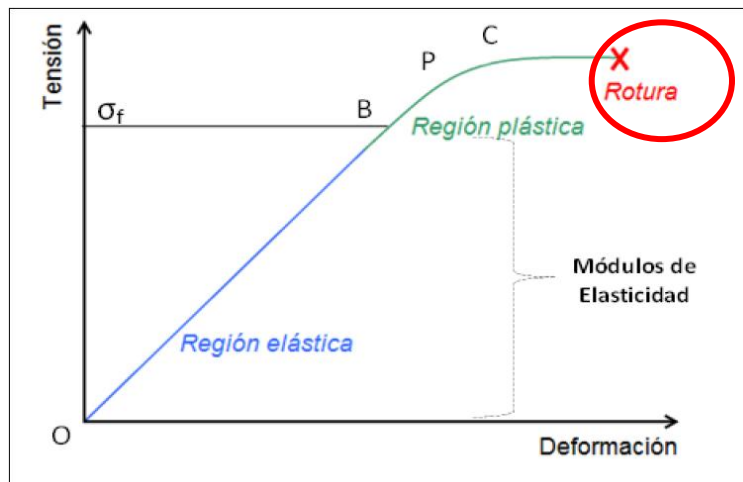
**1.2.4 Deformación Plástica.** Tipo de deformación continua en la que ésta permanece aún cuando el esfuerzo se ha retirado, después de un ciclo de presión.

**1.2.5 Deformación Frágil.** El material se fractura como respuesta al esfuerzo. Al igual que la anterior, también es irreversible.

### 1.3 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN<sup>5</sup>

El criterio de cedencia o punto de cedencia, en el cual ocurre una transición de elástico a dúctil, puede ser considerado como el final de la porción lineal de la curva (punto P). En el rango elástico (OB, lineal o no lineal), si el material es descargado vuelve a su estado original a lo largo de la curva; sin embargo, una vez en el rango plástico (BC), el material sometido a descarga, desde un punto como el B, presenta deformaciones permanentes (punto C). Al recargar el material, en general aparece un comportamiento de histéresis (el camino de carga y descarga no es el mismo) para volver al punto B y se requiere un incremento de carga mayor para inducir mayor deformación (Figura 6).

Figura 6. Curva esfuerzo deformación.



Fuente: LIMA FALCAO, Flávila de Oliveira. Efeitos geomecánicos na simulação de reservatórios de petróleo, Tesis, Rio de Janeiro, 2002.

<sup>5</sup> LIMA FALCAO, Flávila de Oliveira. Efeitos geomecánicos na simulação de reservatórios de petróleo, Tesis, Rio de Janeiro, 2002.

Los puntos importantes del diagrama de esfuerzo deformación (Figura 6) son:

- *Límite de proporcionalidad (Punto P)*. Hasta este punto la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal.
- *Límite de elasticidad (Punto B)*. Valor máximo de la fuerza aplicada sobre un objeto para que su deformación sea elástica, más allá de este límite el material no recupera su forma original al ser descargado, quedando con una deformación permanente.
- *Punto de Cedencia*. Aparece en el diagrama un considerable alargamiento o cedencia sin el correspondiente aumento de carga. Este fenómeno no se observa en los materiales frágiles.
- *Esfuerzo último (Punto C)*. Máxima ordenada del diagrama esfuerzo-deformación.
- *Punto de rotura*. Cuando el material falla.

## 1.4 MÓDULOS DE ELASTICIDAD<sup>6</sup>

La elasticidad se define como la característica que presentan los materiales para resistirse a deformaciones y recobrar su estado inicial al desaparecer el efecto de las fuerzas que las producen (Maury, 1987); en el caso de los módulos elásticos, son expresiones numéricas que relacionan el esfuerzo aplicado a un cuerpo y la deformación, tomando en consideración tanto la dirección del esfuerzo aplicado como la dirección de la deformación. Los módulos elásticos descritos a continuación se definen para materiales homogéneos e isotrópicos.

---

<sup>6</sup> E. Fjaer, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen & R. Risnes. Petroleum Related Rock Mechanics. Chapter 1, Elastic Moduli. Second Edition.

**1.4.1 Módulo de Cizalla o de Rigidez (G).** Corresponde al cambio de forma que le ocurre a un cuerpo elástico cuando se le aplican esfuerzos cortantes. Es la relación entre el esfuerzo y la deformación en un material bajo condiciones de una cizalla simple, por tanto es una medida de la resistencia a esfuerzo de cizalla.

$$G = \frac{\text{Esfuerzo de cizalla}}{\text{Deformación de cizalla}} = \frac{\frac{\Delta F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$\Delta F$ : Fuerza de corte o tangencial

A: Área de la sección

L: Distancia entre planos de corte

$\Delta L$ : Desplazamiento de corte

**1.4.2 Módulo de incompresibilidad o de Volumen (K).** Es la relación entre el esfuerzo y la deformación de un material bajo condiciones de presión hidrostática, es decir, es una medida de incompresibilidad.

$$k = \frac{\text{Esfuerzo de Volumen}}{\text{Deformación de volumen}} = \frac{\Delta P}{\Delta V/V} = \frac{1}{c} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$\Delta P$ : Cambio de presión

V: Volumen

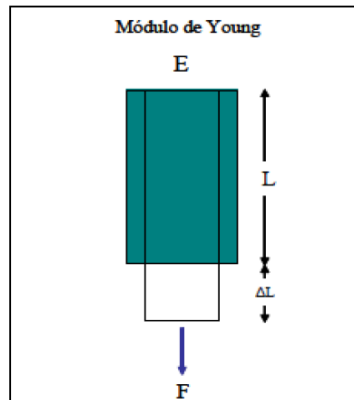
$\Delta V$ : Cambio de volumen

c: Compresibilidad

$\Delta V/V$ : Dilatación

**1.4.3 Módulo de Young (E).** También llamado módulo de elasticidad longitudinal. Es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en que se aplica la fuerza. Es la relación entre el esfuerzo longitudinal y la deformación longitudinal el cual se encuentra sometido a una extensión longitudinal en la dirección axial (Figura 7).

Figura 7. Relación esfuerzo longitudinal-deformación longitudinal.



Fuente: LIMA FALCAO, Flávila de Oliveira. Efeitos geomecanicos na simulação de reservatórios de petróleo, Tesis, Rio de Janeiro, 2002.

$$E = \frac{\text{Esfuerzo longitudinal}}{\text{Deformación longitudinal}} = \frac{\frac{\Delta F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$\frac{\Delta F}{A}$  : Presión o fuerza por unidad de área

$\Delta L$ : Cambio de Longitud

$L$ : Longitud original

**1.4.4 Relación de Poisson ( $\nu$ ).** Es una constante elástica que representa la relación existente entre la deformación lateral y axial. Para un material isotrópico, homogéneo y elástico sometido a compresión uniaxial, la relación de Poisson es definida como el cambio negativo fraccional del ancho del material dividido por el cambio fraccional de longitud (relación entre deformación axial y transversal). La relación de Poisson está directamente relacionada con la velocidad de onda P ( $V_p$ ) y velocidad de onda S ( $V_s$ ), y se puede expresar en estos términos de la siguiente manera:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \left[ \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1 \right]} \quad \text{Ecuación 5}$$

Cabe destacar que la relación de Poisson puede variar teóricamente entre 0 y 0.5, y su valor se aproxima a cero en la presencia de gas y a 0.5 en líquido.

## 1.5 LEYES CONSTITUTIVAS<sup>7</sup>

La manera como se relacionan los esfuerzos y deformaciones en un material en particular es llamado comportamiento constitutivo del material, luego se puede hablar del comportamiento constitutivo de materiales elásticos, poroelásticos, plásticos y muchos más.

---

<sup>7</sup> E. Papaminchos. Constitutive Laws for Geomaterials. En Oil & Gas Science and Technology, Vol. 54 (1999), No. 6, pp. 759-771.

Una ley constitutiva describe la deformación de un material en respuesta a un esfuerzo aplicado, o viceversa. En geomecánica se utilizan diferentes leyes constitutivas para describir el comportamiento de las rocas del subsuelo, que van desde aproximaciones lineales muy sencillas hasta aquellas que tienen en cuenta propiedades no tan fáciles de modelar, como la porosidad de la roca o la resistencia que oponen a la compresión los fluidos que ocupan el espacio poroso.

La literatura sobre leyes constitutivas para geomateriales es rica en modelos. La razón, es que hay una gran variedad de geomateriales con comportamientos poco similares entre sí que tienen que ser descritos apropiadamente, tales como el comportamiento de areniscas, calizas, shale y concreto, entre otros. Adicionalmente a la cantidad de geomateriales, el comportamiento de un material particular puede depender significativamente de la aplicación en cuestión (que sea considerado como una condición límite o una condición de carga), la presión de poro, la escala del problema, los periodos de tiempo involucrados y la temperatura, entre muchos otros.

**1.5.1 Material Linealmente Elástico.** Se considera que la relación existente entre el esfuerzo aplicado y la deformación es linealmente proporcional, así como que su deformación puede ser reversible. Una buena analogía de cómo se comporta un material elástico es un resorte metálico, ya que la elongación o compresión del mismo dependerá linealmente de la fuerza aplicada sobre él. En este caso, no se considera ningún daño ni alteración significativa de la roca como resultado de la aplicación de esfuerzo.

**1.5.2 Material Poroelástico.** La teoría de la poroelasticidad se originó a partir del trabajo de Biot (1941), esta tiene en cuenta el efecto de la presión de poro y el flujo de fluidos en la deformación de la roca, componentes cuyo análisis es crítico cuando la deformación de la cara del pozo es significativa. La principal suposición asociada a esta teoría es que existe un sistema poroso interconectado en la roca, saturado uniformemente de fluido.

**1.5.3 Material Elasto-plástico.** En el caso de un material elasto-plástico, la deformación total será el resultado de la composición de dos tipos de deformación: La deformación elástica y la deformación plástica. Es aquel material que presenta un comportamiento totalmente elástico hasta cuando se alcanza cierto esfuerzo límite (límite de elasticidad), a partir del cual la deformación puede resultar de la combinación de un componente plástico con un componente elástico.

**1.5.4 Material Viscoelástico.** Una roca presenta un comportamiento Viscoelástico cuando la deformación en respuesta a un esfuerzo aplicado también depende de la tasa con la cual el esfuerzo es aplicado. El esfuerzo requerido para que ocurra cierta cantidad de deformación dependerá de la viscosidad aparente de la roca.

En un material poroelástico, la deformación depende del tiempo de difusión de los fluidos que ocupan sus poros durante la aplicación del esfuerzo. Por lo tanto, un material poroelástico es un tipo de material Viscoelástico, donde el carácter viscoso está determinado por los fluidos de la roca.

## 1.6 PRESIÓN DE PORO [ $P_p$ ]<sup>8</sup>

La presión de poro, también llamada presión de formación es aquella que ejercen los fluidos confinados en el espacio poroso sobre la matriz de la roca; se puede calcular utilizando datos de: sísmica, geología regional, registros sísmicos, de resistividad y densidad. Es un parámetro importante en cualquier estudio de mecánica de rocas porosas ó sistemas de rocas llenas de fluidos. El fluido de los poros llevará parte de los esfuerzos totales aplicados al sistema, aliviando parte de la carga a la matriz de la roca. El esfuerzo efectivo tal como se define por Terzaghi es igual al esfuerzo total menos la presión de poro. Este concepto de esfuerzo efectivo fue introducido en mecánica de suelos en 1923 sobre una base empírica y más tarde fue refinado por Biot...véase el numeral 2.1...

Existen evidencias de que las rocas porosas, permeables y saturadas obedecen a una ley de esfuerzo efectivo. Tanto la deformación, dada por la relación esfuerzo-deformación (ecuación constitutiva) y la cedencia o falla de la roca son controladas por los esfuerzos efectivos en lugar de los esfuerzos totales. Por lo tanto, cuando se estudia la estabilidad de pozo durante la perforación, la estabilidad de la roca durante la producción y la compactación y subsidencia, el conocimiento de la presión de poro en diversas formaciones es extremadamente importante.

La presión de poro se desarrollará en una formación saturada a medida que los sedimentos son enterrados. Si la presión del fluido puede escapar y migrar a la superficie a la misma velocidad de la rata de compactación, un gradiente de presión de poro normal se mantiene, dado por el peso de la columna de fluido

---

<sup>8</sup> FJAER, Erling, *et al. Petroleum Related Rock Mechanics*. Second Edition, Elsevier, Amsterdam, 2008.

superior. Existen sin embargo, varios casos donde la presión de poro dentro de una zona tiene un valor diferente de la presión de poro normal esperada. Usualmente la presión de poro en tales casos será mayor que la normal, y la zona será referida como una anormalmente presionada o sobrepresionada. Las presiones de poro altas en un yacimiento podrían hacer el yacimiento más productivo. Por otra parte, las formaciones sobrepresionadas son un riesgo potencial durante la perforación.

Cuando la presión es igual a la presión hidrostática que ejerce una columna de fluido se le denomina presión de poro normal, pero si la presión excede la presión hidrostática, se le denomina anormalmente alta, sobrepresión ó anormal; si esta presión es menor que la normal, entonces se le llama presión de formación anormalmente baja o subnormal. Un gradiente de Pp normal está dado por la densidad del agua salada (agua de mar) y está en el rango típico de 0.447-0.465 [psi/ft].

Cuando los esfuerzos efectivos son incrementados producto de la disminución de la presión de poro ó producción, la roca se vuelve más resistente. Esto es causado por un incremento de la fricción entre los granos mientras que el esfuerzo efectivo se incrementa. Si la presión de poro es incrementada dentro de la roca, el esfuerzo efectivo es reducido y de esta forma la resistencia de la roca es reducida. Es posible pensar que la alta presión de poro separa los granos y de esta forma se disminuye la fricción entre los granos.

## 2. COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DURANTE LA DEPLECIÓN DE UN YACIMIENTO

La caída de presión de un yacimiento puede conducir a la compactación del mismo, al movimiento de los estratos de sobrecarga, al colapso de casing y a la subsidencia de la superficie, entre muchos otros problemas; procesos que pueden resultar significativamente costosos, tanto para las instalaciones de producción como para las instalaciones de superficie<sup>9</sup>.

Los esfuerzos locales en el yacimiento habiendo alcanzado un estado de equilibrio a lo largo del tiempo geológico, son alterados por el proceso de perforación, producción e inyección. Si los cambios de los esfuerzos inducidos por las operaciones de perforación ó producción no se anticipan, los desafíos y costos que implica el manejo de un área prospectiva pueden exceder de manera significativa las expectativas iniciales de un operador. El hecho de ignorar la importancia de la geomecánica puede acarrear consecuencias severas. Inestabilidad del pozo, compresión o cizalladura de la tubería de revestimiento, compactación del yacimiento, subsidencia de la superficie, producción de arena, reactivación de fallas y pérdida de sello del yacimiento, lo que puede en todos los casos, ser una manifestación de cambios en los esfuerzos ejercidos sobre una formación<sup>10</sup>.

Una formación productora de hidrocarburos, contiene fluidos dentro de su estructura sólida (medio poroso), donde se encontrarán dependiendo de la

---

<sup>9</sup> DOORNHOF, Dirk, *et al.* *Compactación y Subsidencia*. En Oilfield Review. Invierno 2006/2007; p. 50-69.

<sup>10</sup> COOK, John, *et al.* *Las Rocas Importan: Realidades de la Geomecánica*. En Oilfield Review. Invierno de 2007/2008; p. 38-59.

profundidad, sometidos a diferentes condiciones de esfuerzos o presiones. El resultado de tener un fluido presurizado en un ambiente sólido es que tanto el fluido como el sólido soportan los esfuerzos sobre el material. Este concepto es el principio del *esfuerzo efectivo*, que establece que el esfuerzo que afecta el comportamiento de un material sólido es el esfuerzo aplicado menos el soporte de la presión del fluido intersticial. Cuando se produce fluido desde un yacimiento, el peso de los estratos de sobrecarga no se reduce pero sí lo hace la presión de poro, lo que incrementa el esfuerzo efectivo vertical que actúa sobre la matriz sólida<sup>11</sup>.

El esfuerzo y la presión de poro están intrínsecamente ligados, debido a que en los espacios porosos de las formaciones, el esfuerzo se transmite a los líquidos o a los gases en forma de presión. La magnitud de la presión aplicada es la misma para todas las direcciones. Si es comprimido, un fluido reacciona ejerciendo una presión equivalente y opuesta hacia afuera. Bajo presión, los fluidos alojados en los poros a menudo absorben parte del esfuerzo impuesto sobre una formación. Por eso, la presión de poro es un componente importante del esfuerzo neto aplicado a un cuerpo rocoso.

Las actividades de perforación y producción afectan el estado de los esfuerzos locales. Los problemas que surgen durante las operaciones de perforación pueden presagiar las dificultades que aparecerán durante la fase de producción. Los cambios en el estado de esfuerzos pueden producir la falla de las rocas y esto causar problemas de inestabilidad del pozo durante la perforación. A su vez, estos cambios pueden conducir posteriormente a problemas de producción de arena, cuando el pozo ya ha sido terminado. Otras actividades llevadas a cabo durante la vida productiva de un campo petrolero pueden generar cambios en la presión de

---

<sup>11</sup> DOORNHOF, Dirk, *et al.* *Compactación y Subsistencia*. En Oilfield Review. Invierno 2006/2007; p. 50-69.

poro y la temperatura, que probablemente modifiquen los esfuerzos que actúan desde mayores distancias al pozo.

El centro de baja presión creado por un pozo para inducir la producción, generará presiones de pozo más bajas que la presión de poro de la formación adyacente, y esta diferencia puede incrementar el riesgo de falla de roca<sup>12</sup>. Con la extracción de los fluidos del yacimiento durante la producción, el peso de los estratos de sobrecarga que soportan los fluidos alojados en los poros debe ser transferido al esqueleto de la roca que rodea el espacio poroso. Los cambios consiguientes en la presión de poro inducirán ajustes en los esfuerzos totales y en los esfuerzos efectivos. Dentro de la roca, el incremento del peso producirá diversos grados de deformación o falla, evidenciados por el deslizamiento y la rotación de los granos, la deformación plástica, la rotura del cemento en los contactos entre los granos o la activación de las fracturas existentes<sup>13</sup>. En una escala más grande, los cambios de los esfuerzos inducidos por las operaciones de producción que actúan sobre el esqueleto de la roca, pueden conducir al aplastamiento de los poros y la compactación del yacimiento.

Los cambios inducidos por las operaciones de producción también pueden afectar la roca, más allá de las áreas productivas de un yacimiento. Incluso en las formaciones, los atributos de los yacimientos, tales como la porosidad y la permeabilidad, pueden variar, generando un proceso irregular de drenaje y agotamiento. A medida que se explota un yacimiento, la roca puede compactarse dejando que las áreas de la formación, contiguas y sin drenar, compensen los cambios producidos en la presión y el desplazamiento de la roca adyacente. Las

---

<sup>12</sup> Cook J, Fuller J y Marsden JR: "Geomechanics Challenges in Gas Storage and Production" presentado en el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas. Rusia, 27 al 29 de junio de 2001.

<sup>13</sup> Sayers CM y Schutjens PMTM: "An Introduction to Reservoir Geomechanics," *The Leading Edge* 26, no. 5 (Mayo de 2007): 597-601.

condiciones estables al momento del inicio de la producción, pueden volverse inestables y fallar a medida que se desarrolla el proceso de producción.

## 2.1 POROELASTICIDAD Y ESFUERZO EFECTIVO<sup>14</sup>

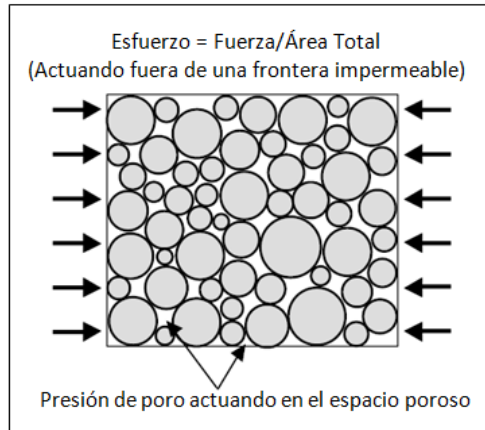
En un sólido elástico poroso saturado con un fluido, la teoría de la poroelasticidad describe el comportamiento constitutivo de la roca. Gran parte de la teoría poroelástica deriva del trabajo de Biot (1962) y se considera también un tema ampliamente tratado por otros autores (Kuempel 1991; Wang 2000).

A esta teoría se le asocian tres suposiciones principales. En primer lugar, hay un sistema poroso interconectado uniformemente saturado con fluido. En segundo lugar, el volumen total del sistema poroso es pequeño comparado con el volumen de la roca como un todo y por último, se considera presión en los poros, el esfuerzo total actuando en el exterior de la roca y los esfuerzos actuando en los granos individuales en términos de valores uniformes promedios. En la Figura 8 es relativamente sencillo observar que los esfuerzos que actúan en los granos individuales resultan de la diferencia entre los esfuerzos normales aplicados externamente y la presión del fluido interna.

---

<sup>14</sup> ZOBACK, Mark D. *Reservoir Geomechanics*. Department of Geophysics, Stanford University. United Kingdom at the University Press, Cambridge, 2007; p. 65.

Figura 8. Ilustración esquemática de un sólido poroso con esfuerzo externo aplicado fuera de una frontera impermeable y presión de poro actuando dentro de los poros.



Fuente: ZOBACK, Mark D. *Reservoir Geomechanics*. Department of Geophysics, Stanford University. United Kingdom at the University Press, Cambridge, 2007; p. 67.

El concepto de esfuerzo efectivo está basado en el trabajo pionero en mecánica de rocas realizado por Terzaghi (1923), quien notó que el comportamiento del suelo (o roca saturada) será controlado por los esfuerzos efectivos, diferencia entre los esfuerzos aplicados externamente y la presión de poro interna. La llamada “Simple” o definición de Terzaghi de esfuerzo efectivo es:

$$\sigma = S - \alpha * Pp \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_s} \quad \text{Ecuación 7}$$

$\sigma$  : Esfuerzo neto o efectivo sobre el material sólido.

$S$  : Esfuerzo aplicado al cuerpo.

$Pp$  : Presión de poro.

$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_s}$  : Constante de Biot.  $\frac{K_b}{K_s}$  :Relación de los módulos de compresibilidad de la roca ( $K_b$ ) y los granos minerales de la roca ( $K_s$ ), en sólidos elásticos isotrópicos.

En los materiales muy porosos y débiles, el módulo de los granos es mucho más grande que el módulo de la roca, de manera que  $\alpha$  es aproximadamente 1 y  $\sigma = S - Pp$ . Tanto  $\sigma$  como  $S$  son tensores, de modo que esta ecuación es válida en las tres direcciones principales<sup>15</sup>.

## 2.2 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS ALREDEDOR DE UN POZO

Para la realización de esta investigación se consideran sólo pozos verticales perforados de manera paralela al esfuerzo principal vertical,  $S_v$ . La formación alrededor de la pared del pozo está sujeta a una concentración de esfuerzos que varía fuertemente con la posición alrededor del mismo y la distancia desde la pared del pozo. La manera como la formación responde a la concentración de esfuerzos es función del campo de esfuerzos y de la resistencia de la roca.

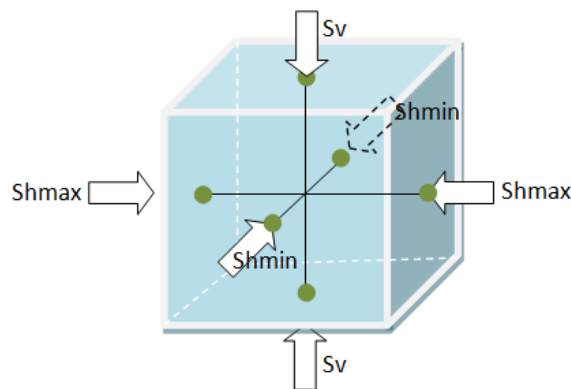
Los esfuerzos in-situ (Figura 9) en los yacimientos después de haber alcanzado un estado de equilibrio a lo largo del tiempo geológico, son alterados por el proceso de perforación, producción e inyección. El esfuerzo vertical ( $S_v$ ) es originado por el peso de los estratos de sobrecarga y los esfuerzos horizontales máximo y mínimo

---

<sup>15</sup> DOORNHOF, Dirk, *et al.* *Compactación y Subsistencia*. Oilfield Review, Invierno de 2006/2007.

( $Sh_{max}$ ,  $Sh_{min}$ ) debidos a la restricción lateral al confinamiento; estos valores, las diferentes condiciones frontera, cargas aplicadas y características de la formación son los datos base a partir de los cuales se calcularán los esfuerzos alrededor del pozo en coordenadas cilíndricas, resultantes de la disminución de la presión de poro o depleción del yacimiento debido a la producción; mediante la simulación de un modelo conceptual de roca productora a través del software comercial ABAQUS.

Figura 9. Esfuerzos in-situ aplicados sobre la porción de roca productora a simular.

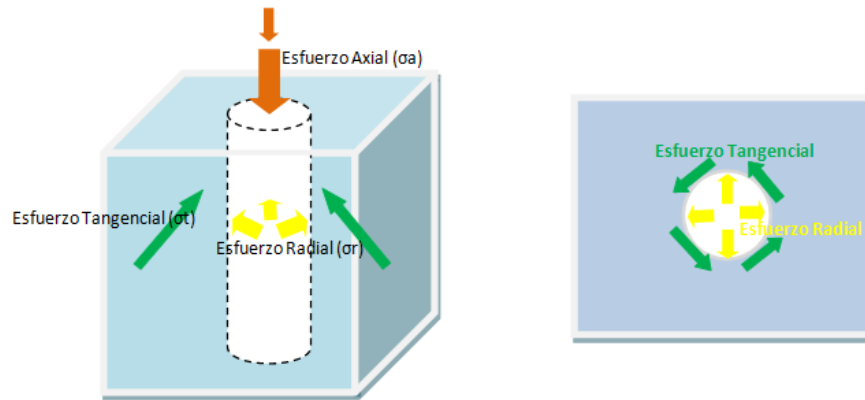


Fuente: OSORIO, Gildardo. Aspectos Geomecánicos de la Estabilidad de Pozos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Diciembre, 2004.

Cuando un pozo es perforado se perturba el equilibrio inicial presente en la roca, está extracción del volumen cilíndrico ocasiona que la pared del pozo deba soportar la carga que anteriormente sostenía el cilindro, perturbando la concentración de esfuerzos existentes y creando esfuerzos radiales, tangenciales y axiales (Figura 10). El efecto del proceso de perforación debe ser tenido en cuenta en el análisis en el momento de producción, está distribución de esfuerzos ocasionados en el primer suceso debe afectar de manera directa las siguientes actividades, para garantizar la modificación de los mismos desde la primera perturbación realizada.

Para examinar los esfuerzos en la formación alrededor del pozo, es conveniente expresar los esfuerzos en coordenadas cilíndricas (*radial, tangencial y axial*) denotados entonces como  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_a$ .

Figura 10. Distribución de esfuerzos en la cara del pozo.



Fuente: OSORIO, Gildardo. Aspectos Geomecánicos de la Estabilidad de Pozos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Diciembre, 2004.

La concentración de esfuerzos alrededor de un pozo vertical perforado de manera paralela al esfuerzo vertical principal,  $S_v$ , en un medio isotrópico y elástico es descrita mediante las ecuaciones de Kirsch (Kirsch 1898; Jaeger and Cook 1979).

$$\sigma_r = \frac{Sh_{max} + Sh_{min}}{2} \left(1 - \frac{Rw^2}{r^2}\right) + \frac{Sh_{max} - Sh_{min}}{2} \left(1 + 3\frac{Rw^4}{r^4} - 4\frac{Rw^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + Pw \frac{Rw^2}{r^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\sigma_t = \frac{Sh_{max} + Sh_{min}}{2} \left(1 + \frac{Rw^2}{r^2}\right) - \frac{Sh_{max} - Sh_{min}}{2} \left(1 - 3\frac{Rw^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - Pw \frac{Rw^2}{r^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\sigma_a = S_v - 2V(Sh_{max} - Sh_{min}) \frac{Rw^2}{r^2} \cos 2\theta \quad \text{Ecuación 10}$$

En la cara del pozo ( $r=R_w$ ) las ecuaciones se simplifican a:

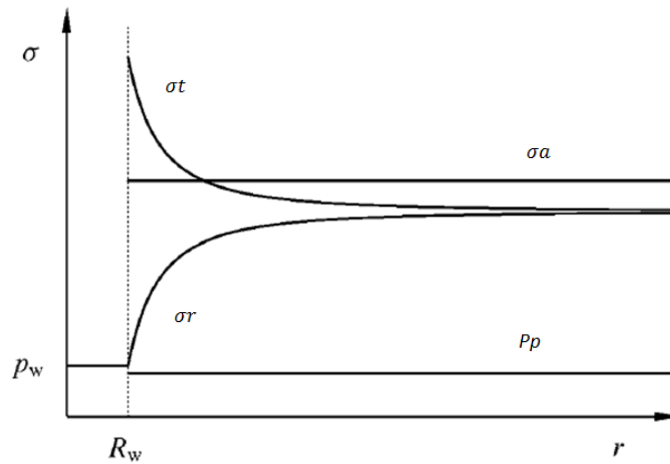
$$\sigma_r = P_w \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\sigma_t = Sh_{max} + Sh_{min} - 2(Sh_{max} - Sh_{min}) \cos 2\theta - P_w \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\sigma_a = S_v - 2V(Sh_{max} - Sh_{min}) \cos 2\theta \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde el ángulo  $\theta$  es medido respecto a la dirección del esfuerzo horizontal máximo,  $P_w$  es el peso del lodo,  $R_w$  y  $r$  corresponden al radio del pozo y al radio de estudio, respectivamente. La Figura 11 representa el comportamiento del esfuerzo radial, tangencial y axial en función del radio de estudio.

Figura 11. Esfuerzos alrededor de un pozo en una formación linealmente elástica.



Fuente: E. Fjaer, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen & R. Risnes. Petroleum Related Rock Mechanics. Chapter 4, Elastic Stresses Around Wells-The General Solution. Second Edition.

Mediante esta solución analítica para los esfuerzos en la cara del pozo, se realizará la calibración del modelo en el momento en el cual se está simulando la perforación, de manera que pueda considerarse como una validación del comportamiento del modelo diseñado.

Para un pozo vertical con igual esfuerzo horizontal, el  $\sigma_t$  depende del peso de la columna de lodo y de la magnitud de los esfuerzos horizontales que están igualmente distribuidos alrededor del pozo. Cuando se perfora un pozo vertical con condiciones in-situ de esfuerzos horizontales diferentes, el  $\sigma_t$  es máximo en uno de los lados del pozo y perpendicular al esfuerzo horizontal máximo. En cuanto a  $\sigma_a$  éste se orienta por la trayectoria del pozo y no es directamente afectado por el peso de la columna del lodo;  $\sigma_r$  es una diferencia de presión entre el pozo y la presión de poro y actúa a lo largo del radio del pozo. Dado que las presiones de pozo y de poro se derivan de la presión del fluido que actúa por igual en todas las direcciones, esta diferencia de presión actúa perpendicular a la pared del pozo, a lo largo del radio del mismo<sup>16</sup>.

## 2.3 EFECTOS DE LA DEPLECIÓN DEL YACIMIENTO<sup>17</sup>

Abordar los problemas asociados con la deformación y los cambios de esfuerzos dentro y en los alrededores de yacimientos depletados es importante debido a varias razones. Las más conocidas son los problemas asociados con colapso de casing y subsidencia de la superficie, las cuales crean problemas sustanciales en algunos yacimientos de aceite y gas debido a la compactación en formaciones débiles. Los significativos cambios de esfuerzos que ocurren en yacimientos muy depletados pueden hacer que la perforación de un nuevo pozo con objetivos a grandes profundidades resulte bastante problemático debido a la necesidad de pesos de lodo más bajos en formaciones depletadas para evitar pérdidas de circulación. La depleción ó disminución de la presión de poro tiene también el

---

<sup>16</sup> AMOCO. 1996. Wellbore Stability. Drilling Handbook.

<sup>17</sup> ZOBACK, Mark D. *Reservoir Geomechanics*. Department of Geophysics, Stanford University. United Kingdom at the University Press, Cambridge, 2007. 505 p.

potencial para inducir fallas, fuera y dentro del yacimiento en algunos ambientes geológicos. Mientras esos problemas son terribles en algunos yacimientos, la depleción puede también tener un impacto beneficioso en el desempeño del yacimiento. Por ejemplo, el fracturamiento hidráulico puede ser más efectivo en yacimientos depletados que en el mismo yacimiento antes de la depleción. En algunos yacimientos débiles, la compactación es un mecanismo efectivo para mejorar la cantidad total de hidrocarburos recuperados, especialmente si los cambios de permeabilidad que acompañan a la compactación no son severos.

**2.3.1 Cambios de esfuerzos en yacimientos depletados.** La teoría de la poroelasticidad puede ser usada para predecir la magnitud de los cambios de esfuerzos debido a la depleción. En un yacimiento isotrópico, poroso y elástico que es infinito en extensión, si a la única fuente de esfuerzo compresivo horizontal se le aplica instantáneamente carga gravitacional, la relación entre el esfuerzo efectivo vertical y el correspondiente esfuerzo efectivo horizontal (asumiendo cero deformación lateral) está dado mediante:

$$S_{Hor} = \left( \frac{\nu}{1 - \nu} \right) (S_v) + \alpha P \left( 1 - \frac{\nu}{1 - \nu} \right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde  $S_{Hor}$  corresponde a  $S_{max}$  y  $S_{min}$  (Lorenz, Teufel *et al.* 1991),  $\alpha$  es el coeficiente de Biot y  $\nu$  es la relación de Poisson. Tomando la derivada de ambos lados respecto a la presión de poro, asumiendo que  $\alpha$  es constante respecto a los cambios en la presión de poro ( $P_p$ ) y simplificando (Ver Brown, Bekins *et al.* 1994) se tiene:

$$\Delta S_{Hor} = \alpha \frac{(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \Delta P_p \quad \text{Ecuación 15}$$

Para tener una idea del cambio de la magnitud de los esfuerzos con la depleción y considerando que  $\alpha$  se asume 1, si se toma el valor de  $\nu=0.25$ , el cambio en el esfuerzo horizontal correspondiente al cambio en la presión de poro es:

$$\Delta S_{Hor} \sim \frac{2}{3} \Delta P_p \quad \text{Ecuación 16}$$

De este modo, las rocas con altas relaciones de Poisson o rocas blandas generarán un menor impacto en los esfuerzos producto de los cambios de presión (Tabla 1). Cabe destacar que la relación de Poisson puede variar teóricamente entre 0 y 0.5, y su valor se aproxima a cero en la presencia de gas y 0.5 en líquido<sup>18</sup>.

Tabla 1. Cambios en el esfuerzo horizontal ( $\Delta S_{Hor}$ ) producto de la variación de la relación de Poisson, asumiendo un  $\Delta P_p=180$  psi.

<b>Relación de Poisson</b>	0	0.25	0.3	0.4	0.5
<b>Coefficiente de Biot</b>	1	1	1	1	1
<b><math>\Delta S_{Hor}</math> [psi]</b>	180	120	102.857	60	0
<b><math>\Delta S_{Hor} \sim</math></b>	$\Delta P_p$	$\frac{2}{3} \Delta P_p$	$\frac{57}{10} \Delta P_p$	$\frac{1}{3} \Delta P_p$	-----

Debido a que la Ecuación 15 ha sido derivada para un yacimiento infinito, horizontal y de espesor finito, no hay cambio en el esfuerzo vertical,  $S_v$ . Usando un modelo de inclusión elíptica de un yacimiento compactado, Segall y Fitzgerald (1996) han demostrado que una vez la relación de extensión lateral - espesor de

<sup>18</sup> E. Fjaer, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen & R. Risnes. *Petroleum Related Rock Mechanics*. Chapter 1, Elastic Moduli.

un yacimiento es mayor que 10:1 (el cual es casi siempre el caso), la Ecuación 15 es casi exactamente correcta, a pesar de la suposición de que el yacimiento es infinito en extensión. Por lo tanto, en yacimientos que son extensos lateralmente respecto a su espesor, los esfuerzos horizontales in-situ disminuirán con la depleción y el esfuerzo vertical permanecerá esencialmente constante con la depleción. En un yacimiento más equi-dimensional, esto debe ser modificado, utilizando la teoría de Rudnicki (1999).

El cambio de la magnitud del esfuerzo horizontal asumiendo las mismas consideraciones para la deducción de la Ecuación 16, según la disminución de la presión de poro (Tabla 2), demuestra que a medida que la disminución de la presión de poro va siendo mayor el diferencial  $\Delta SHor$  se va haciendo más grande, ocasionando que el  $\Delta SHor$  se vea afectado en mayor medida.

Tabla 2. Cambios en el esfuerzo horizontal ( $\Delta SHor$ ) producto de la variación de la presión de poro.

<b>Relación de Poisson</b>	0.25	<b>Presión Inicial [psi]</b>	1450			
<b>Coeficiente de Biot</b>	1	<b><math>\Delta SHor</math> [psi]</b>				
<b><math>\Delta SHor \sim</math></b>	$\frac{2}{3}\Delta Pp$		60	120	290	676.67
		<b>Presión de Poro [ps]</b>	1360	1270	1015	435

Hay algunos aspectos importantes acerca de la Ecuación 15 que deben ser resaltados. Es importante mencionar que mientras la Ecuación 15 tiene alguna aplicación para predecir los cambios de esfuerzo en un yacimiento, esta no debe ser usada para predecir valores de esfuerzos en profundidad. Como ya se ha aludido, esta ecuación es derivada para una formación homogénea, isotrópica y poroelástica lineal. Si la deformación en el yacimiento es inelástica, el análisis anterior no predice de manera correcta la trayectoria del esfuerzo.

Algunas observaciones de campo publicadas en la literatura evidencian la variación de la magnitud de los esfuerzos temporal y espacialmente en todo el yacimiento<sup>19</sup>:

- Hansen y Purcell (1989): Encontraron en el campo South Belridge en California, que no solamente la magnitud sino también la orientación de los esfuerzos principales varía con la profundidad.
- Teufel y Farrell (1990): Efectuaron una serie de mediciones de esfuerzos in-situ en el campo Ekofisk y encontraron que la orientación y magnitud de los esfuerzos principales varían espacialmente a través del yacimiento y temporalmente con la producción y/o inyección de fluidos en el pozo.
- Avasthi, et al. (1991): Encuentran en el campo Mc Elroy, Texas, que la dirección del esfuerzo principal máximo varía con la profundidad y la presión de poro.
- Wright, et al. (1995): Presentan evidencias del cambio en magnitud y rotación de esfuerzos, inducidas por variaciones en la presión de poro, en el campo Lost Hills en California.
- Last y Mc Lean (1995). Charlez, et al. (1998): Presentan evidencias de la variabilidad en orientación y magnitud con la profundidad y el tipo de formación en el campo Cusiana en Colombia.
- Osorio, Chen y Teufel (1999): Reportan que el cambio en la presión de poro debido a los procesos de producción o inyección de fluidos en el yacimiento genera un disturbio en el estado de los esfuerzos efectivos principales.
- Chen y Teufel (2001): Muestran que existe una variación de los esfuerzos horizontales como consecuencia de operaciones de producción y/o inyección.

---

<sup>19</sup> NARANJO, Abel y SOTO, Carlos M. *Efecto de los Parámetros Geomecánicos en el Fracturamiento Hidráulico de Yacimientos de Hidrocarburos sensibles a esfuerzos*. En Boletín de Ciencias de la Tierra. Número 21 (nov. 2007).

**2.3.2 Fallas inducidas por la producción.** Se han realizado una serie de estudios en los cuales tanto la extracción y la inyección de fluidos parece haber inducido fallamiento activo en los yacimientos de petróleo y gas (Grasso 1992). La falla rumbo deslizante dentro de los yacimientos, inducida por la disminución de la presión de poro parece contraria a la relación convencional entre presión de poro, esfuerzo normal efectivo y falla de corte, luego se hace poco probable. Si se espera que  $S_v$  permanezca esencialmente constante durante la depleción de yacimientos lateralmente extensos, la reducción del  $S_{hmin}$  in-situ y la  $P_p$  puede inducir fallamiento normal dentro de un yacimiento si la trayectoria de esfuerzos debida a la depleción excede un valor crítico, el cual puede ser calculado a través de la condición de falla de Coulomb para fallamiento normal.

Respecto a la permeabilidad del yacimiento, es claro que el fallamiento activo en los yacimientos es capaz de aumentar la permeabilidad de la matriz. En este sentido, es muy interesante que a pesar de la compactación del yacimiento que acompañó la depleción del campo Ekofisk antes del uso de mantenimiento de presión, la productividad del yacimiento se mantuviera estable o ligeramente mayor, a pesar de la depleción apreciable (Sulak 1991). De esta observación, es razonable asumir que las fallas de corte activas pueden mejorar la baja permeabilidad de la matriz (Brown 1987) y contrarrestar las reducciones de permeabilidad que acompañan la compactación.

**2.3.3 Rotaciones de esfuerzos asociados con la depleción.** Como se ha argumentado anteriormente, la depleción en un yacimiento lateralmente extenso causaría la disminución de  $S_{hmax}$  y  $S_{hmin}$  en la misma magnitud, asumiendo que el medio es homogéneo e isotrópico. En tales casos no se espera que la depleción esté acompañada por ninguna rotación de esfuerzos. Sin embargo, sobre la base

de mediciones de orientación de esfuerzos en varios campos, se ha argumentado que hay cambios en la orientación de esfuerzos cerca a fallas. Debido a que la falla actúa como una barrera al flujo de fluidos, no se espera que el cambio de esfuerzos sea isotrópico cuando el yacimiento es depletado.

Hay dos razones por las cuales los autores sospechan que la depleción puede ser la causa de rotaciones de esfuerzos aparentes cerca a las fallas. La primera es un caso donde la orientación del esfuerzo horizontal máximo en un yacimiento parece cambiar con el tiempo. Wright, Stewart *et al.* (1994) utilizaron inclinómetros para determinar el azimut de fracturas hidráulicas en la cuenca San Joaquín de California antes y después de una depleción significativa. Ellos reportaron que la orientación de las fracturas hidráulicas cambia con el tiempo. El segundo es un caso de secciones adyacentes del campo de gas Arcabuz-Culebra en el norte de México. Allí, la orientación de los esfuerzos en una sección no depletada del campo es paralela a la dirección de  $S_{hmax}$  de  $\sim N22^{\circ}E$ . En una sección cercana al campo que está depletado, las orientaciones de los esfuerzos parecen seguir las fallas de los límites del yacimiento.

#### **2.3.4 Perforación y fracturamiento hidráulico en yacimientos depletados.**

Como se mencionó, la perforación y el fracturamiento hidráulico son afectados por los cambios de esfuerzos acompañados por la depleción. Cuando existe la necesidad de perforar a través de yacimientos depletados para llegar a formaciones más profundas, una variedad de problemas de perforación podrían ocurrir. A menos que pesos de lodo relativamente bajos sean usados, podría ocurrir fracturamiento hidráulico no intencional y pérdidas de circulación en el yacimiento depletado debido a la disminución del esfuerzo principal mínimo (pero

no en formaciones adyacentes). También puede haber pega de tubería debido al diferencial entre el peso del lodo y la presión de poro en las formaciones depletadas y podría existir una invasión considerable y daño a la formación. Si se utilizan pesos de lodo mucho más bajos para evitar estos problemas en la zona depletada, la inestabilidad de pozo podría ser un problema significativo tanto para valores por encima como por debajo.

Como se discutió en van Oort, Gradicher *et al.* (2003) hay una variedad de técnicas que pueden ser usadas para abordar el problema de perforación a través de formaciones depletadas. Algunos de esas son las relacionadas con el uso de lodos base agua y aditivos de pérdida de circulación para perforar con pesos de lodo por encima del gradiente de fractura. También podría ser ventajoso perforar en direcciones óptimas para evitar el fracturamiento hidráulico cerca al pozo y pérdidas de circulación cuando se perfora con pesos de lodo por encima del esfuerzo principal mínimo. Otras técnicas incluyen el uso de aditivos para prevenir la penetración del lodo a la formación y el uso de aditivos que “refuercen” la formación los cuales, en efecto, cementan los granos fuera de la formación a medida que el pozo va avanzando haciendo más fácil la perforación.

**2.3.5 Cambios de porosidad y permeabilidad durante la depleción.** Basados en la teoría poroelástica lineal y los cambios en los esfuerzos y presión de poro, la reducción de la porosidad como resultado de la depleción es pequeña; típicamente menos del 1%. En realidad, el cambio de porosidad debería ser heterogéneo, en parte debido a la heterogeneidad de la roca y a la deformación localizada.

La tasa de producción de un yacimiento como resultado de una cierta cantidad de depleción se controla en gran medida por la permeabilidad de la roca del yacimiento. Del mismo modo, la capacidad de un fluido inyectado (agua, gas) para desplazar los hidrocarburos también está vinculada a la permeabilidad. Debido a la distribución heterogénea de las rocas dentro de un yacimiento, y a las fracturas y fallas, la permeabilidad puede variar considerablemente en el volumen del yacimiento. Esta variabilidad resulta en barreras, canales de flujo y compartimientos de cuerpos rocosos dentro del yacimiento, lo cual controla cómo el fluido es drenado del yacimiento durante la depleción y durante las operaciones de recobro mejorado. Además, la anisotropía de permeabilidad implica que se preferirán direcciones de flujo in-situ, incluso dentro de las capas homogéneas.

Un estudio extenso de datos de pruebas de pozo fue realizado por Heffer, Dowokpor (1990) y Heffer *et al.* (1994). Ellos mostraron que la dirección de flujo horizontal preferida, vista en las pruebas de pozo en la mayoría de yacimientos fracturados y no fracturados, es paralela al esfuerzo horizontal máximo in-situ. Esto implica que la anisotropía de esfuerzos permite la anisotropía de la permeabilidad y que la identificación de la dirección de los esfuerzos in-situ principales es importante para la estrategia de drenaje del yacimiento.

Experimentalmente se encuentra que la permeabilidad se reduce con el aumento de los esfuerzos isotrópicos. La reducción relativa de la permeabilidad es generalmente mayor en rocas con permeabilidad y porosidad bajas, donde la permeabilidad es principalmente debida a grietas, fisuras o poros estrechos los cuales son fácilmente cerrados mediante un esfuerzo aplicado (Yale, 1984; Kilmer *et al.* 1987; Holt, 1990; Schutjens *et al.*, 2004).

Desde un punto de vista microscópico, la permeabilidad es controlada por los siguientes parámetros: Porosidad, tamaño del poro/tamaño del grano (y distribución de tamaño), forma del poro/forma del grano y la tortuosidad. La permeabilidad puede entonces ser mejorada o reducida, dependiendo de la trayectoria de esfuerzos, porosidad y permeabilidad inicial de la roca, así como de su comportamiento constitutivo.

La reducción de la presión de poro es la principal fuerza que impulsa la producción de petróleo. El efecto de los esfuerzos en la permeabilidad es un efecto combinado del incremento de los esfuerzos externos y la disminución de la presión de poro. Se puede anticipar que la permeabilidad es funcionalmente dependiente del esfuerzo efectivo (Ecuación 17).

$$\sigma' = \sigma - \alpha_k * P_p \quad \text{Ecuación 17}$$

Este esfuerzo efectivo no es el mismo que el esfuerzo efectivo que regula el comportamiento elástico. El coeficiente  $\alpha_k$  es un coeficiente poroelástico para permeabilidad. Experimentos con areniscas (Zoback y Byerlee, 1975) arrojan valores de  $\alpha_k$  entre 2 y 4, que por supuesto es muy diferente a la suposición convencional ( $\alpha_k = 1$ ). Flornes (2005) encontró valores cercanos a 1 para areniscas de alta porosidad. Esto está de acuerdo con la observación de que el cambio de la permeabilidad en virtud de la carga hidrostática se controla principalmente por el cambio de porosidad: El esfuerzo efectivo para la porosidad es igual al esfuerzo neto (presión de confinamiento menos presión de poro). Sin embargo, si la fase sólida es heterogénea como señala Berryman (1992), el coeficiente de esfuerzo efectivo para permeabilidad puede desviarse significativamente de  $\alpha_k = 1$ .

Los esfuerzos del yacimiento y los cambios de esfuerzos durante la producción son anisotrópicos. Se podría esperar, por tanto, que la permeabilidad y los cambios de permeabilidad sean anisotrópicos (Heffer *et al.*, 1994). Existen pocas pruebas publicadas en la literatura donde la anisotropía de la permeabilidad ha sido directamente medida mediante el monitoreo de los componentes principales del tensor de permeabilidad en la misma prueba.

### **3. GENERALIDADES SOBRE LOS PARÁMETROS PARA SIMULAR GEOMECÁNICAMENTE EN EL SOFTWARE: ABAQUS**

El interés en los simuladores y la simulación numérica no es nuevo y su uso se ha dado desde hace mucho tiempo para crear modelos de actividades complejas en la industria petrolera, posicionándose como una herramienta importante gracias a la posibilidad de evidenciar diversos efectos o comportamientos fundamentales para predecir y prevenir diferentes problemas potenciales.

A comienzos de la década de 1950, se desarrollaron modelos matemáticos básicos para comprender y anticipar la subsidencia del campo Wilmington, situado en California y más adelante la subsidencia del campo Ekofisk del Mar del Norte, descubierto a comienzos de la década de 1980, instó el desarrollo de métodos de modelado por elementos finitos y la vinculación de la producción de hidrocarburos con los cambios producidos en las propiedades de los yacimientos y en la deformación; fue desde ese momento en que las compañías se interesaron en comprender de la mejor manera posible cómo evolucionan los esfuerzos a medida que se agotan los yacimientos ya que si era factible modelar los cambios de los esfuerzos a lo largo de la vida productiva de un campo petrolero, los operadores podrían predecir los problemas durante la vida productiva de un pozo o anticipar la necesidad de perforar pozos de relleno o mejorar las facilidades de superficie.

ABAQUS es un conjunto de programas de simulación para ingeniería (Figura 12), basado en el método de elementos finitos, que puede resolver problemas que van desde análisis lineales simples hasta las simulaciones no-lineales más desafiantes. Contiene una extensa librería de elementos que pueden modelar virtualmente cualquier geometría. Posee una gran lista de modelos de materiales

que pueden simular el comportamiento de la mayoría de los materiales más típicos en ingeniería e incluyen: Metales, caucho, polímeros, concreto reforzado, espumas triturables y resistentes e incluso materiales geotécnicos como suelos y rocas. Diseñado como una herramienta de simulación de propósitos generales, ABAQUS puede ser usado para estudiar más que problemas estructurales (esfuerzo/desplazamiento). Este puede simular problemas en áreas diversas como transferencia de calor, difusión de masa, manejo térmico de componentes eléctricos (análisis térmico-eléctrico acoplado), mecánica de sólidos, análisis electromagnéticos y dinámica de fluidos<sup>20</sup>.

Figura 12. Logo de entrada, ABAQUS/CAE.



Fuente: Imagen de inicio de Abaqus/CAE 6.11-PR3 [Viewport: 1].

Los problemas con múltiples componentes son modelados asociando la geometría que define cada componente con el modelo de material apropiado y especificando las interacciones de los componentes. En un análisis no lineal Abaqus automáticamente escoge los incrementos de carga apropiados y las tolerancias de convergencia, ajustándolos continuamente durante el análisis para asegurar que una solución exacta sea obtenida eficientemente.

El método de los elementos finitos supone que el comportamiento mecánico de un continuo, está conformado por un número finito de partes o elementos. Sobre estas partes o elementos son consideradas las propiedades del material y las

---

<sup>20</sup> Abaqus 6.11, Simulia [Disponible en línea]. <http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.11>.

relaciones constitutivas, donde a su vez, estos elementos se encuentran conectados entre sí por un número de puntos llamados nodos; temática que se abordará más adelante.

### 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

**3.1.1 Capacidades de ABAQUS para simulación geomecánica<sup>21</sup>.** Esta herramienta de simulación puede ser usada para múltiples propósitos en ingeniería y ciencias, pero posee un gran potencial para simular diversos escenarios desde el punto de vista geomecánico. Entre ellos, se destacan el uso relacionado con plataformas offshore cuya aplicación es la de evaluar la integridad de las bases teniendo en cuenta el procedimiento de instalación y cargas operacionales, mejorando la estabilidad de las estructuras offshore. En el caso del control de arena o arenamiento los trabajos realizados se basan en la estimación de la erosión y producción de arena como función de la producción de hidrocarburos, con lo que se pretende determinar las técnicas apropiadas con mayor confianza. También se han simulado los efectos del fracturamiento hidráulico en la producción de hidrocarburos, se ha evaluado el uso de tecnología apropiada para el fracturamiento y se han diseñado casings teniendo en cuenta el efecto térmico y los movimientos de la formación, para reducir fallas de casing debido a *Cyclic Steam Stimulation (CSS)*, *Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD)* y otros métodos de extracción térmicos, entre muchos otros trabajos.

---

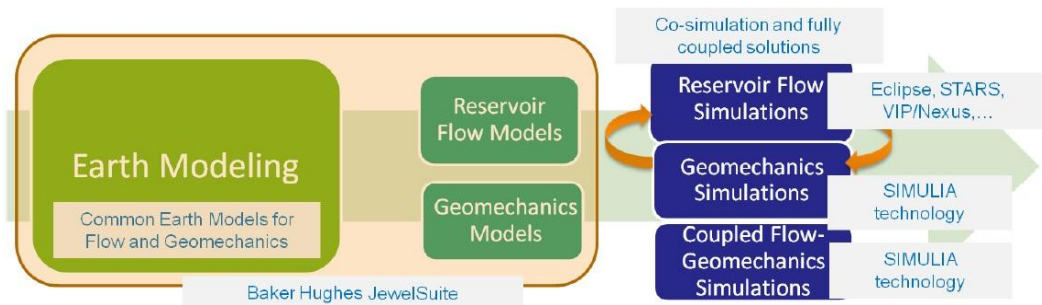
<sup>21</sup> Stephen King. SIMULIA, Dassault Systèmes. Abaqus for Oil & Gas Geomechanics.

En el caso relacionado con geomecánica de yacimientos, se han realizado trabajos para determinar la subsidencia y compactación como función de la extracción de hidrocarburos con el fin de mejorar la estimación de la producción de los mismos y evitar fallas en los pozos. Este fenómeno de compactación y subsidencia está ampliamente documentado gracias a diversas investigaciones y análisis que se han realizado con la ayuda de este software de simulación. La extracción de aceite y gas de los yacimientos conduce a la reducción de la presión de poro lo que resulta en una redistribución de esfuerzos en la formación rocosa, puede dar lugar a la subsidencia o hundimiento del terreno y a su vez puede afectar el flujo de aceite y gas dentro del yacimiento. Realizar predicciones geomecánicas de la deformación del suelo es necesario para maximizar la extracción de gas y aceite, pero este tipo de simulaciones en ABAQUS requiere que el flujo de aceite y gas sea simulado mediante simuladores de flujo de fluidos en yacimientos tales como Eclipse y que ABAQUS sea utilizado como la herramienta para análisis geomecánicos (Figura 13), lo que dificulta en gran medida el desarrollo de una simulación acoplada considerada de gran nivel como esta en el presente trabajo, ya que se hace necesario un sin número de actividades para poder relacionar los datos entre un simulador y otro. Por tal motivo, el flujo de fluidos no se tuvo en cuenta sino que se realizó la investigación tomando en consideración las herramientas que ofrecía ABAQUS; cabe resaltar que el propósito no es simular compactación y subsidencia sino lograr realizar un análisis del nuevo estado de esfuerzos y deformaciones producto de la producción de hidrocarburos tomando como herramienta de trabajo un solo simulador (Figura 14).

**3.1.2 Componentes de un modelo de análisis.** La realización de un modelo para su respectivo análisis en Abaqus requiere la revisión de una serie de

aspectos que en conjunto conforman el modelo a simular. Un modelo Abaqus/CAE está compuesto por: Partes, materiales, secciones, ensamblaje, conjuntos, superficies, pasos, cargas, condiciones límites y campos, así como diferentes interacciones y sus propiedades (Figura 15).

Figura 13. Esquema general para simulaciones acopladas utilizando ABAQUS.



Fuente: Stephen King. SIMULIA, Dassault Systèmes. Abaqus for Oil & Gas Geomechanics. Integrated Reservoir Simulations.

Figura 14. Start Session, ABAQUS 6.11.



Fuente: Imagen de inicio de Abaqus/CAE 6.11-PR3 [Viewport: 1].

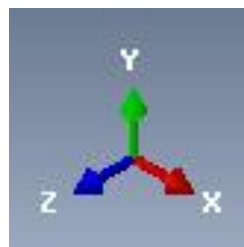
El sistema coordenado utilizado por el programa de elementos finitos es el sistema cartesiano, cuyo convenio de signo positivo se muestra en la Figura 16. Abaqus permite elegir otro sistema localmente, ya sea para las salidas referidas a variables nodales (desplazamiento, aceleración, esfuerzos), condiciones de carga, restricciones y especificaciones de material de las secciones; para propósitos de la simulación realizada se mantuvo el sistema cartesiano.

Figura 15. Esquema general de los componentes de un modelo de análisis.



Fuente: Working with Abaqus/CAE. Abaqus/CAE User's Manual. Abaqus 6.11, Simulia [Disponible en línea]. <http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.11>.

Figura 16. Sistema coordenado, ABAQUS 6.11.



Fuente: Imagen de inicio de Abaqus/CAE 6.11-PR3 [Viewport: 1].

El software no especifica las unidades a utilizar, por lo tanto, las unidades elegidas deben ser consistentes entre sí. Por ejemplo, las unidades (De Campo) utilizadas en la simulación del modelo conceptual se muestran en la Tabla 3. En ABAQUS las rotaciones son expresadas en radianes y los ángulos en grados.

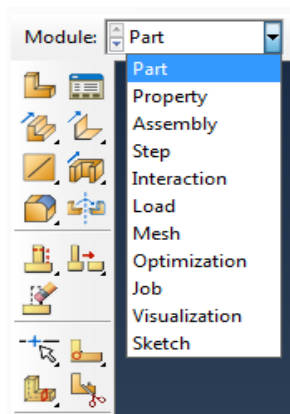
Tabla 3. Unidades de campo, unidades de la simulación realizada.

Dimensión	Unidad de Campo	Abreviaturas
<b>Longitud</b>	Pie	ft
<b>Tiempo</b>	Segundo	seg
<b>Peso</b>	Libra	lb
<b>Presión</b>	Libras por pulgada cuadrada	psi

**3.1.3 Módulos de trabajo.** Abaqus/CAE está dividido en unidades funcionales llamadas módulos. Cada módulo contiene las herramientas que son relevantes para una parte específica del objetivo a simular. Por ejemplo, el módulo *mesh* contiene las herramientas necesarias para crear mallas de elementos finitos, mientras el módulo *job* contiene sólo lo usado para crear, editar y monitorear el análisis del trabajo. El orden de los módulos en el menú corresponde a una secuencia lógica que se sigue para crear el modelo (Figura 17). En algunos casos, se debe seguir este progreso de forma estricta para completar el modelo; por ejemplo, se deben crear las partes antes de crear un ensamblaje. Abaqus/CAE hace opcional el uso de módulos como *optimization* e *interaction* dependiendo de la tarea a realizar.

Los siguientes módulos disponibles en Abaqus/CAE describen brevemente las tareas de modelamiento que se pueden realizar en cada uno.

Figura 17. Barra de contexto ó lista de módulos.



Fuente: Abaqus/CAE 6.11-PR3 [Viewport: 1].

*Part*: Permite crear partes individuales, ya sea dibujando su geometría o importándola de otro programa de modelamiento geométrico.

*Property*: Se define el material asociado a una región y geometría. Se pueden crear secciones y materiales diferentes y asignarlos a regiones de las partes.

*Assembly*: Permite posicionar las partes o geometrías unas respecto a otras en un sistema global de coordenadas y así crear un ensamblaje.

*Step*: Se usa para crear y configurar los pasos del análisis y asociarlos con los requerimientos de los datos de salida.

*Interaction*: Se especifican las secciones mecánicas y térmicas entre las regiones de un modelo o entre una región y su alrededor. ABAQUS no reconoce el contacto mecánico entre las partes o regiones de un ensamblaje a menos que el contacto sea especificado en este módulo. La proximidad física de dos superficies en un ensamblaje no indica cualquier tipo de interacción entre superficies. Las

interacciones son paso-objeto dependientes, es decir, se debe especificar en los pasos del análisis en qué momento están activas.

*Load:* Permite especificar cargas, condiciones límite y campos predefinidos. Las cargas y las condiciones límite son paso-objeto dependientes, algunos campos predefinidos son paso-dependientes mientras que los otros son aplicados al comienzo del análisis solamente. Las cargas y las condiciones de frontera son paso-dependientes, es decir, se debe especificar el paso o los pasos en los cuales ellas están activas.

*Mesh:* Contiene herramientas que permiten generar una malla de elementos finitos en el ensamblaje de ABAQUS. Permite varios niveles de automatización y control que satisfacen las necesidades para diferentes tipos de análisis.

*Optimization:* Crea tareas de optimización para mejorar la topología del modelo dándole objetos y limitaciones.

*Job:* Se analiza el modelo y permite presentar un trabajo interactivo para analizar y monitorear el progreso de la simulación. Se pueden presentar múltiples modelos simultáneamente.

*Visualization:* Proporciona una visualización gráfica de los modelos de elementos finitos y los resultados.

*Sketch:* Perfiles en dos dimensiones que son usados para ayudar a formar la geometría de la parte original. Se usa para crear un dibujo que define una parte plana o partición y que puede ser extruido para formar una parte tridimensional.

### 3.2 ANÁLISIS UTILIZANDO ABAQUS

El método de elementos finitos (FEM) es una herramienta común dentro de varios campos de ingeniería. Este es usado para cálculos numéricos avanzados y es desarrollado en base a la teoría de la mecánica del continuo, la cual estudia el equilibrio, movimiento y deformación de sólidos. FEM tiene como requisito que el modelo matemático que describe el medio debe estar basado en funciones continuas.

FEM es quizás el método numérico más aplicado en ciencia e ingeniería. Desde su origen a principios de 1960, la mayoría de los trabajos realizados con FEM han estado específicamente orientados hacia problemas de mecánica de rocas. Esto ha sido debido a que fue el primer método numérico con suficiente flexibilidad para el tratamiento de heterogeneidades del material, deformación no lineal (principalmente plasticidad), condiciones límite complejas, esfuerzos in-situ y gravedad. El método apareció cuando el tradicional método de diferencias finitas (FDM) con cuadrículas o mallas regulares no podía satisfacer los requerimientos esenciales para problemas de mecánica de rocas<sup>22</sup>.

En FEM las funciones continuas son aproximadas por un modelo discreto donde el cuerpo a ser estudiado es dividido en varias partes muy pequeñas, llamadas elementos. El modelo discretizado está compuesto por un número de funciones de elementos que son continuas sobre cada elemento por separado. Esos elementos están conectados mediante nodos, que es donde principalmente se realizan los

---

<sup>22</sup> LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. *Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis*. En ARMA, presentado en 45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, Junio 26-29, 2011.

cálculos. Los valores numéricos de los nodos se compilan para hacer que el elemento funcione como una aproximación exacta de la función global; la precisión mejora cuando el número de nodos aumenta.

Las funciones de los elementos son reunidas en un sistema global de ecuaciones que contiene los datos geométricos y del material. Las fuerzas aplicadas en la geometría del elemento son representadas mediante vectores de carga que actúan en los nodos. Las matrices rápidamente aumentan su tamaño y, así mismo la demanda de equipos con alto rendimiento para ser resueltas. Los valores entre los nodos se calculan mediante interpolación con aproximaciones ya sea linealmente o mediante polinomios de  $n$  grados.

Generalmente cualquier análisis usando el software comercial Abaqus involucra 2 procedimientos principales: Pre-procesamiento y Post-procesamiento.

- Pre-Procesamiento:

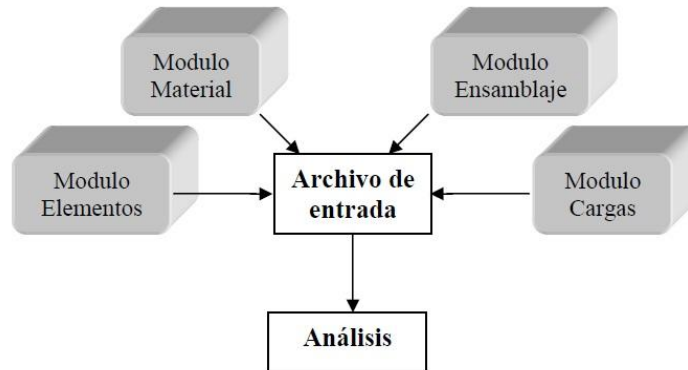
Esto comprende todos los pasos para crear un modelo con ABAQUS/CAE (Figura 18). Los siguientes pasos principales son tomados secuencialmente:

*I. Crear una parte ó definir la geometría del modelo:* En esta etapa es importante decidir el sistema de unidades a usar en el modelo ya que ABAQUS no tiene un sistema integrado de unidades.

*II. Definir el material y las propiedades de la sección:* El siguiente paso en la creación del modelo involucra la definición y asignación del material y las

propiedades de la sección a la parte. Cada región de un cuerpo deformable debe referirse a una propiedad de la sección, la cual incluye la definición del material.

Figura 18. Componentes de un modelo en Abaqus.



Fuente: Maylett Y. Uzcátegui Flores. Abaqus programa de elementos finitos. Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

*III. Crear un montaje (ensamblar):* Cada parte creada es orientada en su propio sistema coordinado y es independiente de las otras partes en el modelo. La geometría del montaje [assembly] es definida mediante la creación de instancias de una parte y entonces se posicionan las instancias relativas de cada una en un sistema de coordenadas global.

*IV. Configurar el análisis:* El paso de análisis puede ser en general categorizado como un paso INICIAL y pasos de ANÁLISIS SUBSECUENTES.

El propósito de un análisis es predecir la respuesta de un modelo sometido a una carga externa. El análisis en el presente programa de elementos finitos está basado en el concepto de steps, el cual es descrito en la historia de datos del archivo de entrada. A través de los steps se introducen cambios en las

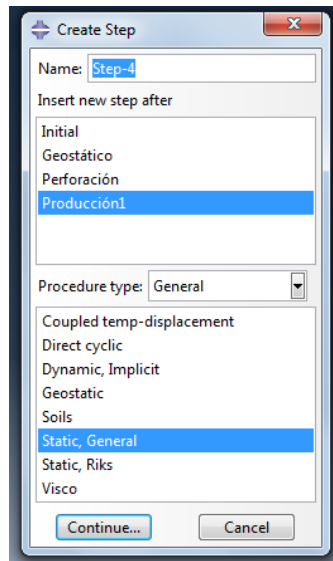
condiciones de contorno, en las cargas o el tipo de análisis, es importante destacar que no existe límite en el número de steps dentro de un análisis.

ABAQUS/CAE crea un paso inicial especial, en el comienzo de la secuencia de pasos del modelo y llama a este INITIAL (Figura 19). Este permite definir condiciones límite, predefinir campos e interacciones que son aplicables desde el comienzo del análisis. El paso inicial es seguido por uno o más pasos de análisis. Cada paso de análisis es asociado con un procedimiento específico que define el tipo de análisis a ser realizado durante el paso. El estado de la estructura al final de un Step provee las condiciones iniciales para el próximo paso del análisis, obteniéndose fácilmente simulaciones consecutivas de condiciones de cargas para un modelo.

Hay dos tipos de pasos de análisis en ABAQUS: *Pasos de análisis general*, los cuales pueden ser usados para analizar respuestas lineales o no lineales y *pasos de perturbación lineal* los cuales pueden ser usados sólo para analizar problemas lineales.

El análisis de elementos finitos puede crear grandes cantidades de datos de salida, por lo que Abaqus permite controlar y manejar estos *outputs* imprimiendo sólo los datos necesarios para interpretar los resultados de la simulación. Así el análisis se limita a dar cantidades relevantes como el desplazamiento y estado de esfuerzos, dependiendo del estudio a realizar.

Figura 19. Tipos de Steps ó Análisis en ABAQUS 6.11.



Fuente: Abaqus/CAE 6.11-PR3 [Viewport: 1].

V. *Asignar las propiedades de interacción:* La interacción entre las superficies en contacto consiste en 2 componentes: Uno normal a las superficies y uno tangencial a las superficies. El componente tangencial consiste en movimientos relativos (sliding) de las superficies y posiblemente esfuerzos de corte friccional.

VI. *Aplicar las condiciones límite y aplicar carga:* Las condiciones límite se aplican a las regiones del modelo en el que se conocen los desplazamientos y/o rotaciones. Estas regiones pueden ser obligadas a permanecer fijas (tienen cero desplazamiento y/o rotación) durante la simulación o pueden haberse especificado desplazamientos y/o rotaciones.

VII. *Diseñar el enmallado, crear, correr y monitorear un trabajo;* todo esto para finalizar el montaje del modelo y comenzar a correr la simulación para obtener los resultados producto del respectivo análisis.

- Post-Procesamiento:

El módulo visualización proporciona gráficas del modelo de elementos finitos y los resultados. Este obtiene el modelo y la información resultante desde la base de datos de salida; controla la información que se desea observar mediante la modificación de los requisitos de salida en el módulo Step.

**3.2.1 Análisis geostático.** Un procedimiento geostático permite verificar que el campo de esfuerzos inicial está en equilibrio con las cargas aplicadas y las condiciones límite. Itera, si es necesario, para obtener el equilibrio ó computa automáticamente el equilibrio para casos en los cuales el estado inicial es conocido. Este tipo de procedimiento es el primer paso obligatorio de un análisis geotécnico, seguido de un procedimiento de análisis estático o difusión de fluido, entre otros. Idealmente las cargas y los esfuerzos iniciales deberán equilibrarse exactamente y producir cero deformaciones. Sin embargo, en problemas complejos es difícil especificar esfuerzos iniciales y cargas que equilibren exactamente.

ABAQUS proporciona dos procedimientos para establecer el equilibrio inicial. El primero es aplicable a problemas para los cuales el estado de esfuerzos inicial es conocido, al menos aproximadamente y el segundo aplicable para casos en los cuales los esfuerzos iniciales no son conocidos, este sólo es posible para un número limitado de elementos y materiales; el primero es el caso aplicado en el modelo de simulación.

*Establecer el equilibrio cuando el estado de esfuerzos inicial es conocido:* El procedimiento geostático requiere que los esfuerzos iniciales estén cercanos al

estado de equilibrio; de otra manera, los desplazamientos correspondientes al estado de equilibrio podrían ser demasiado grandes. ABAQUS verifica el equilibrio durante el procedimiento geostático e itera, para obtener un estado de esfuerzos que equilibre las condiciones límite y cargas preestablecidas. Este estado de esfuerzos el cual es una modificación del campo de esfuerzos definido mediante las condiciones iniciales, es usado como el campo de esfuerzos inicial en un análisis estático ó acoplado difusión del fluido del poro/esfuerzo (con o sin transferencia de calor) subsecuente. Este procedimiento involucra:

Flujo total o parcialmente saturado.

Relación de vacíos inicial del medio poroso.

Presión de poro inicial.

Esfuerzos efectivos iniciales.

**3.2.2 Análisis estático.** Es usado para problemas estables y puede incluir problemas lineales o no lineales. Ignora los efectos dependientes del tiempo en el material (creep, hinchamiento, visco-elasticidad), pero tiene en cuenta la plasticidad y el comportamiento de histéresis de los materiales. Su función principal es la calcular esfuerzos y deformaciones según las condiciones a las que esté sometido el modelo en estudio.

Durante un paso estático se asigna un periodo de tiempo al análisis. En algunos casos esta escala de tiempo es bastante real, por ejemplo, la respuesta puede ser causada por temperaturas que varían con el tiempo basados en una transferencia de calor previa o la respuesta del material puede ser dependiente de la rata (plasticidad), de modo que existe una escala de tiempo natural. Otros casos no

tienen tal escala de tiempo, por ejemplo, cuando un tanque es presurizado a la carga límite con una respuesta del material independiente de la tasa. Si no se especifica un periodo de tiempo, ABAQUS asigna por defecto un periodo de tiempo el cual sería desde 0.0 a 1.0 en el paso. Este procedimiento involucra un valor de presión en el interior del pozo, adicional a los datos necesarios en el análisis estático, entre otras características.

### **3.3 PRINCIPIO DE ESFUERZO EFECTIVO PARA MEDIOS POROSOS**

Cuando se produce fluido desde un yacimiento, el peso de los estratos de sobrecarga no se reduce pero si lo hace la presión de poro, lo que incrementa el esfuerzo efectivo vertical que actúa sobre la matriz sólida. El resultado de tener un fluido presurizado en un ambiente sólido es que tanto el fluido como el sólido soportan los esfuerzos sobre el material. Este concepto es el principio del esfuerzo efectivo, que establece que el esfuerzo que afecta el comportamiento de un material sólido es el esfuerzo aplicado menos el soporte de la presión del fluido intersticial<sup>23</sup> ...véase el numeral 2.1...

Un medio poroso es modelado en ABAQUS/Standard mediante la aproximación convencional que considera el medio como un material multifase y adopta el principio de esfuerzo efectivo para describir su comportamiento. El medio poroso modelado considera la presencia de dos fluidos en el medio. Uno es el "líquido húmedo", el cual se asume que es relativamente incompresible. Frecuentemente, el otro es gas, el cual es compresible. Cuando el medio es parcialmente saturado,

---

<sup>23</sup> DOORNHOF, Dirk, *et al.* Compactación y Subsistencia. Oilfield Review, Invierno de 2006/2007.

ambos fluidos existen en un punto y cuando es completamente saturado, los poros están completamente llenos con el líquido húmedo<sup>24</sup>. Para efectos de la simulación realizada se estableció un medio poroso completamente saturado.

Para simular geomecánicamente la disminución de la presión de poro en una roca productora de hidrocarburos en el software comercial ABAQUS, se hace necesario el uso del principio de esfuerzo efectivo, la aplicación del análisis geostático y estático, así como datos de entrada (Tabla 4) que ayudan a definir el tipo de roca y las características de la geometría o estructura de la misma. Este proceso de simulación consiste en la aplicación de cuatro pasos de análisis. Primero, un análisis inicial el cual es aplicado de manera inmediata por el software. Segundo, un análisis geostático obligatorio para simulaciones geotécnicas y dos análisis estáticos, el primero de ellos utilizado para simular el proceso de perforación y el otro para llevar a cabo el proceso de producción; asegurando de esta manera que los fenómenos o alteraciones del estado de esfuerzos y deformaciones dados en el proceso de perforación influyan y/o afecten el proceso de producción. Cabe resaltar que la simulación del modelo conceptual se lleva a cabo haciendo una corrida por cada valor de presión de poro, es decir, generando una salida para cada disminución de la Pp. Este valor de Pp no es ingresado al análisis como perfil de presión de poro (menor Pp en la cara del pozo y mayor Pp a medida que se aleja del pozo), sino como un valor que es constante en la porción de roca productora a analizar (Figura 20).

La mayoría de los datos planteados obedecen a una arenisca típica cuya densidad es 183.33 lb/ft<sup>3</sup>. En el caso de la porosidad 0.25, esta no es un dato de entrada como tal sino que se hace necesario el cálculo de un valor denominado relación de vacíos que corresponde a 0.33 y para el caso de la permeabilidad absoluta que

---

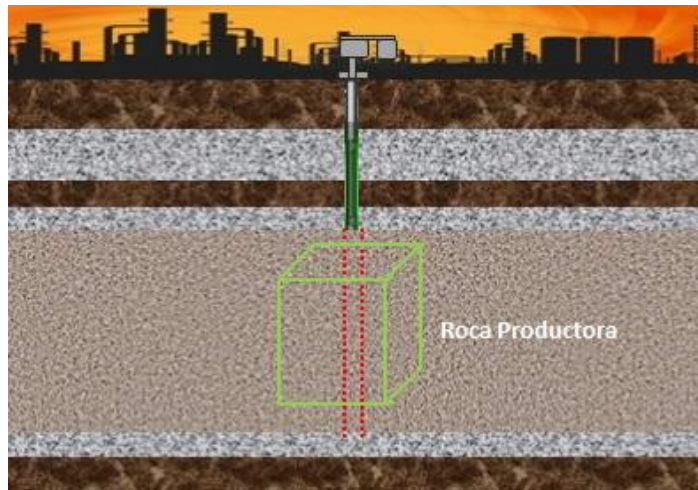
<sup>24</sup> Effective Stress Principle for Porous Media. ABAQUS 6.11, Theory Manual. Simulia.

corresponde a un valor de 325 Darcy, esta es ingresada como el cálculo de la conductividad hidráulica en ft/seg.

Tabla 4. Datos de entrada para la simulación propuesta.

Propiedad	Magnitud
Modulo de Young [psi]	725
Relación de Poisson	0.25
Ángulo de fricción interna (AFI)	33
Relación de vacios	0.33
Conductividad hidráulica [ft/seg]	0.0285
Saturación	1
Shmax [psi]	5800
Shmin [psi]	2900
Sv [psi]	6401.75
Presión de poro [psi]	1450
Presión del lodo [psi]	2175
Cohesión [psi]	739.5
Pwf [psi]	1174.806
Radio del pozo [ft]	0.36

Figura 20. Porción de roca productora a simular \*\*\*.



\*\*\*La porción de roca productora a simular corresponde a la resaltada en color verde.

#### 4. MODELO DE SIMULACIÓN

Los métodos de modelamiento numérico tal como el ampliamente utilizado método de elementos finitos proporcionan una excelente oportunidad para analizar el estado de esfuerzos del pozo para una variedad de aplicaciones tales como la integridad del pozo, diseño del pozo ó fracturamiento hidráulico. Sin embargo, los métodos de modelamiento numérico introducen errores por naturaleza, ya que ellos representan una aproximación y frecuentemente utilizan supuestos y simplificaciones del problema físico. Así, un problema común de los estudios numéricos es la validación y calibración de las soluciones analíticas y datos de campo, ya que pueden no coincidir matemáticamente con la solución analítica si el enmallado del modelo numérico no se tiene en cuenta cuidadosamente.

Algunas aplicaciones para análisis de estabilidad de pozos, diseño de pozos, cementación, así como procesos de fracturamiento hidráulico se basan en una representación exacta del estado de esfuerzos en la región cercana al pozo. La solución analítica de los esfuerzos en el pozo para un material lineal elástico está dada por la bien conocida solución derivada por Ernst Gustav Kirsch en 1898... véase el numeral 2.2.... Bradley y Zhang derivaron además los esfuerzos efectivos en la pared del pozo para un pozo inclinado incluyendo presión de poro y presión de lodo.

Sin embargo, la solución analítica tiene limitaciones en el manejo de geometrías de formaciones complejas, heterogeneidades del material y diferentes modelos reológicos. Los computadores y los software numéricos comerciales han llegado a estar rápidamente disponibles como una herramienta estándar de ingeniería para

realizar una variedad de estudios de esfuerzos en el pozo utilizando análisis de elementos finitos 2D y 3D para solucionar problemas geomecánicos.

Para los análisis de esfuerzos del pozo la exactitud de los resultados del modelamiento numérico resulta crucial especialmente en la pared del pozo donde el estado de esfuerzos cambia rápidamente y por lo tanto, se recomienda un enmallado de alta calidad para obtener resultados exactos<sup>25</sup>. La optimización de la calidad de la malla no se puede realizar en todos los estudios y hasta la fecha sólo unas pocas investigaciones han demostrado que la calidad de la malla tiene una influencia significativa en los resultados de modelamiento numérico en aplicaciones geomecánicas. Estas investigaciones han arrojado como resumen, que los parámetros de discretización como el tamaño del elemento, el tipo de elemento, tamaño del modelo y las condiciones límite son cruciales en relación con la exactitud de los resultados numéricos.

#### 4.1 GEOMETRÍA DEL MODELO

La geometría del modelo se construyó utilizando el software comercial ABAQUS, el cual incluye<sup>26</sup>:

- Abaqus/Standard: Este programa de análisis de elementos finitos para propósitos generales incluye todas las capacidades de análisis excepto el análisis dinámico no lineal.

---

<sup>25</sup>LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. *Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis*. En ARMA, presentado en 45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, Junio 26-29, 2011.

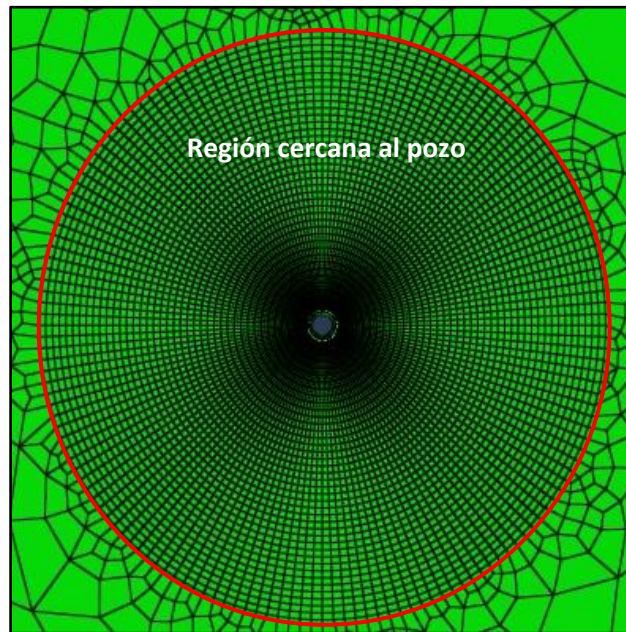
<sup>26</sup> ABAQUS 6.11, SIMULIA. Abaqus Release Notes (Disponible en Línea: <http://www.ilsb.tuwien.ac.at/v6.11/books/rnb/default>].

- Abaqus/Explicit: Proporciona análisis dinámicos, transitorios y no lineales de sólidos y estructuras mediante la integración de tiempo explícito. Sus potentes capacidades de contacto, la confiabilidad y la eficiencia computacional en modelos grandes también hace que sea muy eficaz para aplicaciones cuasi-estáticas que implican un comportamiento no lineal discontinuo.
- Abaqus/CFD: Es un programa de dinámica de fluidos computacional con amplio apoyo para pre-procesamiento, simulación y post-procesamiento en Abaqus/CAE. Proporciona capacidades de simulación para abordar problemas no lineales de acople fluido-termal y de fluidos-estructural.
- Abaqus/CAE: Es un ambiente completo de Abaqus (Complete Abaqus Environment) que proporciona una interface simple y consistente para crear modelos de elementos finitos, realizar análisis de Abaqus, monitorear y diagnosticar trabajos, así como evaluar resultados. Abaqus/CAE está dividido en módulos, donde cada módulo define un aspecto lógico del proceso de modelamiento; por ejemplo, definir la geometría, propiedades del material, generar una malla, realizar el trabajo de análisis e interpretar resultados.
- Abaqus/Viewer: Subconjunto de Abaqus/CAE que contiene sólo el post-procesamiento del módulo de visualización. Este proporciona la configuración de deformación, contornos, vectores y gráficas X-Y, así como animación de resultados.

Para la simulación del efecto de la disminución de la presión de poro en el estado de esfuerzos y deformaciones en una roca productora, se tiene en cuenta a Abaqus/Standard como el programa de análisis y a Abaqus/CAE y Abaqus/Viewer como los responsables del pre-procesamiento y post-procesamiento de los datos, respectivamente.

Para la geometría del pozo, se usó una malla circular relativamente fina en la región cercana al pozo (Figura 21), ya que el estado de esfuerzos cambia rápidamente cerca a la pared del mismo. La región cercana al pozo es definida en el rango de  $R_w$  a  $20R_w$  desde el centro del mismo y se encuentra subdividida en un total de 40 elementos como se muestra en la figura 22, lo cual permite una densidad de elementos finitos considerables para un buen análisis de la zona cercana al pozo que es afectada en mayor medida debido a la producción de fluidos<sup>27</sup>; hasta la condición frontera se estableció una longitud de  $42R_w$ , desde el centro del pozo. En las secciones exteriores (región lejana), se usó una malla más gruesa ya que el estado de esfuerzos resultantes debe ser homogéneo en esta zona.

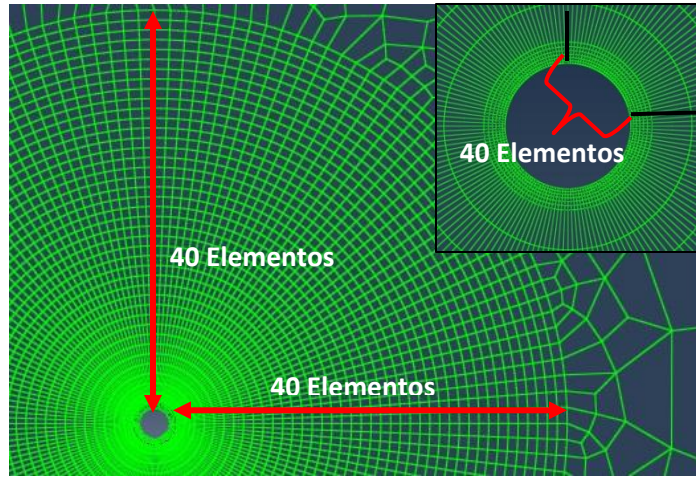
Figura 21. Malla circular fina en la región cercana al pozo. El radio del pozo corresponde a  $R_w = 0.36$  [ft].



Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.

<sup>27</sup> LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. *Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis*. En ARMA, presentado en 45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, Junio 26-29, 2011.

Figura 22. Subdivisión de la región cercana al pozo.



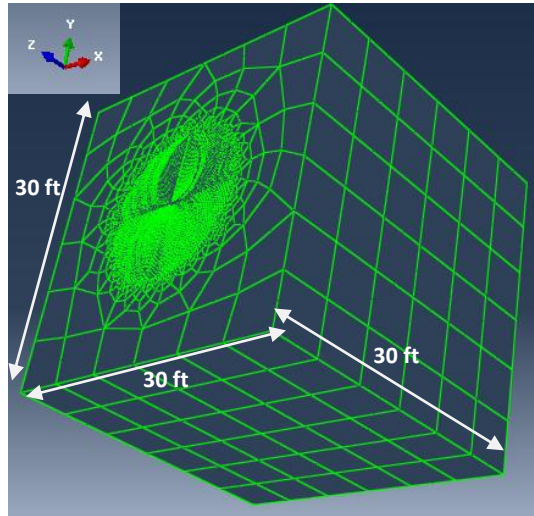
Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.

Escoger el tamaño del modelo es el primer paso cuando se modela una estructura geométrica. Si el tamaño del modelo es escogido apropiadamente, el estado de esfuerzos en el límite del modelo debe alcanzar los esfuerzos aplicados como condición limite ( $Sh_{max}$ ,  $Sh_{min}$  y  $S_v$ ). Se estableció que el modelo simulado en este trabajo tendrá como dimensiones 30x30x30 ft (Figura 23) y un radio de pozo de 0.36 ft (Diámetro del pozo = 8.6"). Un mayor tamaño del modelo proporciona un mejor ajuste entre los resultados del modelo y la solución analítica<sup>28</sup>, cabe resaltar que un tamaño excesivo requiere una gran capacidad computacional, así como un gran tiempo de cómputo. Debe entenderse que los métodos de elementos finitos calculan esfuerzos en el punto de integración del elemento, el cual está situado dentro del elemento (Figura 24) y así no puede reproducir los resultados con absoluta exactitud en superficies libres como la pared del pozo en un completamiento a hueco abierto, el cual es el caso simulado. Para comparar los esfuerzos modelados mediante elementos finitos con la solución analítica los esfuerzos de los elementos deben ser extrapolados desde los puntos de

<sup>28</sup> LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. *Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis*. En ARMA, presentado en 45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, Junio 26-29, 2011.

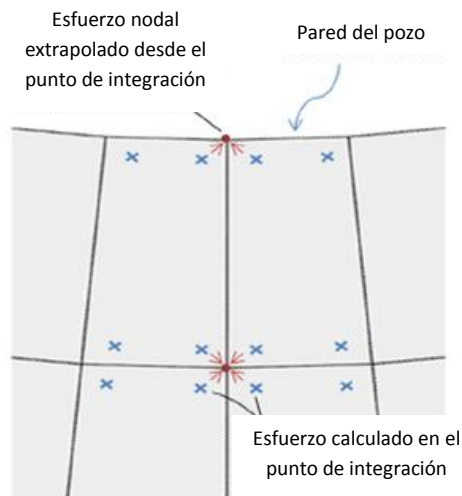
integración hasta las coordenadas nodales, razón por la cual se realiza un enmallado fino que garantice poca alteración de los datos para minimizar el error.

Figura 23. Dimensiones del modelo simulado.



Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.

Figura 24. Esfuerzos calculados en los puntos de integración.



Fuente: LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis.

## 4.2 ESPECIFICACIONES DEL MODELO

El modelo geomecánico realizado mediante el software comercial Abaqus evaluará un criterio de falla y un modelo constitutivo de material a cada celda o elemento de la malla de simulación, considerando las propiedades mecánicas de la roca, el estado de esfuerzos in-situ, presión de poro, presión del lodo para el respectivo proceso de perforación y la Pwf para la producción.

El modelo de simulación se realizó en tres dimensiones, el cual permite observar y extraer las nuevas condiciones de esfuerzo y deformación producto de la disminución de la presión de poro desde la cara del pozo hasta el límite de la roca productora; la reducción que se estableció se realizó mediante un caso base y 8 escenarios de descenso de Pp (Tabla 5). Cabe resaltar que todas las características del modelo permanecerán constantes durante las diferentes corridas, excepto la Pp.

Tabla 5. Escenarios de disminución de presión de poro.

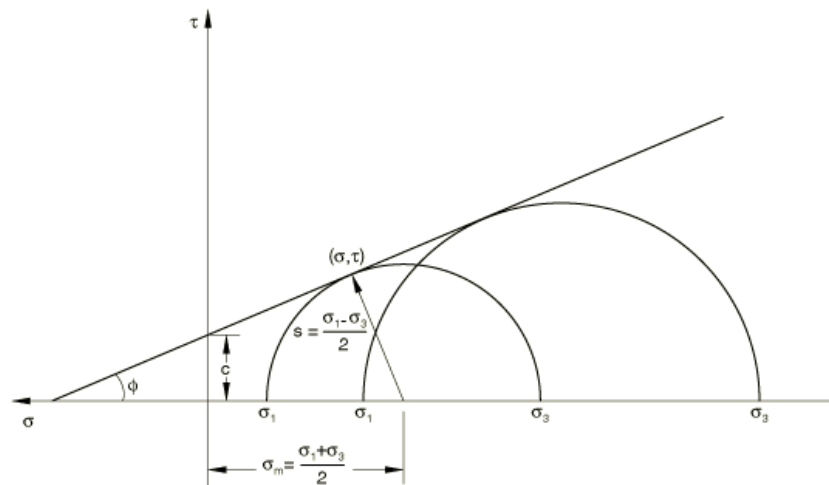
	Producción 1	Producción 2	Producción 3	Producción 4	Producción 5	Producción 6	Producción 7
Pp [psi]	1360	1305	1270	1200	1180	1015	725
Caso Base: 1450 [psi]	Producción 8	435					

El criterio de falla de Mohr Coulomb y el modelo constitutivo del material Elasto-Plástico...véase el numeral 1.5.3... se hacen necesarios y son los utilizados para este proceso de simulación. El criterio de resistencia o de falla de Mohr Coulomb<sup>29</sup>, asume que la falla es controlada por el máximo esfuerzo de corte y

<sup>29</sup> Abaqus 6.11, SIMULIA. Abaqus/CAE User's Manual.[Disponible en Línea:<http://abaqus.me.chalmers.se/v6.11/books/usi/default.htm>]

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 ( $\sigma_1$ ) y mínimo ( $\sigma_3$ ). La línea de falla de Mohr Coulomb es la mejor línea recta que toca estos círculos de Mohr (Figura 25).

Figura 25. Criterio de Mohr Coulomb.



Fuente: Abaqus/CAE User's Manual. Abaqus 6.11, Simulia [Disponible en línea: <http://abaqus.me.chalmers.se/v6.11/books/usi/default.htm>]

El criterio es escrito así:

$$\tau = C + \sigma * \tan \phi \quad \text{Ecuación 18}$$

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:

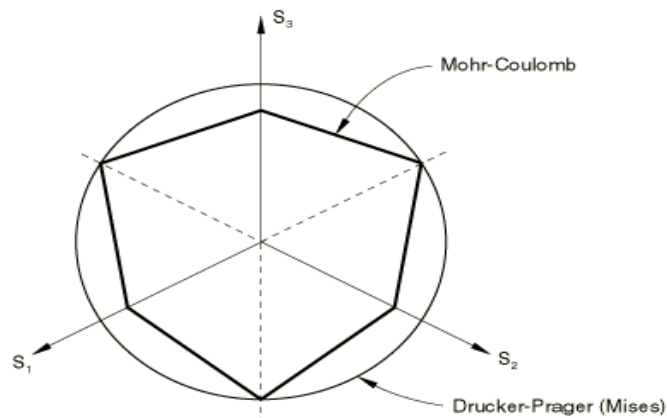
$$\tau = S * \cos \phi = \frac{1}{2} * (\sigma_1 - \sigma_3) * \cos \phi \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\sigma = \sigma_m - S * \sin \phi = \frac{1}{2} * (\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2} * (\sigma_1 - \sigma_3) * \sin \phi \quad \text{Ecuación 20}$$

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 26).

Figura 26. Modelo de Mohr-Coulomb en el plano deviatoríco.



Fuente: Abaqus/CAE User's Manual. Abaqus 6.11, Simulia [Disponible en línea: <http://abaqus.me.chalmers.se/v6.11/books/usi/default.htm>]

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 tiene una forma hiperbólica en el plano de esfuerzo meridional y no tiene vértices en el espacio del esfuerzo deviatorico.

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

El comportamiento elástico es modelado como lineal e isotrópico y la descomposición de la tasa de deformación está dada por:

$$d \epsilon = d \epsilon^{el} + d \epsilon^{pl} \quad \text{Ecuación 21}$$

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 plástica.

El diseño del modelo de simulación desarrollado consiste en un pozo vertical en el centro de una porción de roca productora (arenisca) a 6561.68 ft de profundidad con completamiento openhole, al cual se le aplicarán diferentes valores de presión de poro y se extraerán los datos correspondientes al nuevo estado de esfuerzos y deformaciones en cada caso. La simulación realizada en el software ABAQUS, se realiza de acuerdo a los módulos que contiene y cuya aplicación se basa en un orden lógico estipulado en el mismo, sin embargo no es obligatorio seguir el esquema de aplicación ni mucho menos utilizar todos los módulos como se explicó anteriormente. El comportamiento del material se determinó mediante datos de

entrada que definen la densidad de la roca, la elasticidad, permeabilidad y la plasticidad Mohr Coulomb (Tabla 6).

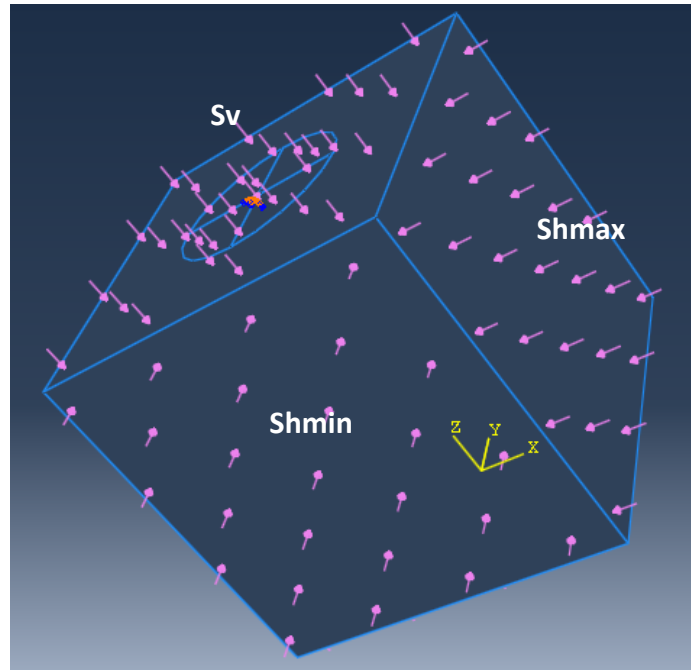
Las condiciones de carga son definidas como Sv, Shmax, Shmin, Pp, Presión del lodo y Pwf (Figura 27). El modelo parte de un pozo ya perforado y a él se le aplican los siguientes análisis en el orden respectivo: Análisis Inicial, donde se especifican las condiciones límite y de carga; Análisis Geostático, en el cual se equilibran todos los datos o características ingresadas; Análisis Estático I, donde se simula el proceso de perforación (estado de esfuerzos y deformaciones) partiendo de un pozo ya perforado y por último una análisis estático II en el cual se modela el proceso de producción (sin flujo de fluidos) y en el que se harán las respectivas disminuciones de presión de poro, presión que será homogénea en todo el modelo.

Tabla 6. Definición del comportamiento del material.

<b>Densidad de la roca [lb/ft<sup>3</sup>]</b>	183.33	Distribución Uniforme	
<b>Elasticidad</b>	Modulo de Young [psi]	725	Tipo Isotropica
	Relación de Poisson	0.25	
<b>Conductividad Hidráulica [ft/seg]</b>	0.0285	Tipo Isotropica	
<b>Relación de Vacios</b>	0.33		
<b>Plasticidad Mohr Coulomb</b>	Ángulo de Fricción	33	
	Ángulo de dilatación	18	
	Cohesión [psi]	739.5	

Fuente: LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis. Los datos que no se encuentran en este paper fueron suministrados por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

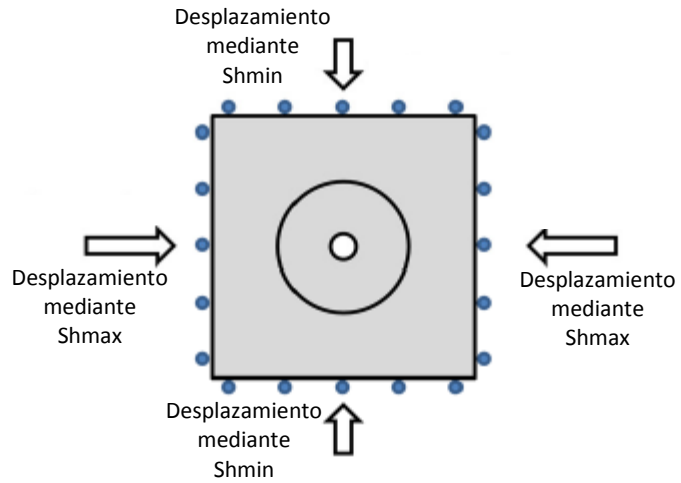
Figura 27. Condiciones de carga del modelo diseñado.



Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.

El modelo de simulación no va a tener en cuenta el flujo de fluidos a través de la formación hacia el pozo, ni micro-fracturas 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 se basará en un cilindro hueco como pozo. La condición límite será de desplazamiento, es decir, los esfuerzos de campo lejanos ( $S_v$ ,  $S_{hmax}$ ,  $S_{hmin}$ ) son generados mediante la aplicación de desplazamiento al límite del modelo (Figura 28). Los valores de las cargas están especificados en la Tabla 7.

Figura 28. Condición límite de desplazamiento.



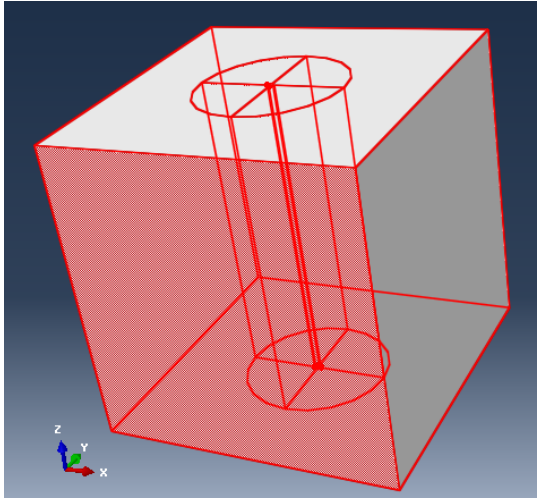
Fuente: LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis. Displacement Boundary Conditions.

Tabla 7. Valores asignados a las cargas.

Parámetro	Magnitud
<b>Sv [psi]</b>	6401.75
<b>Shmax [psi]</b>	5800
<b>Shmin [psi]</b>	2900
<b>Pp [psi]</b>	1450
<b>Plodo [psi]</b>	2175
<b>Pwf [psi]</b>	1174.806

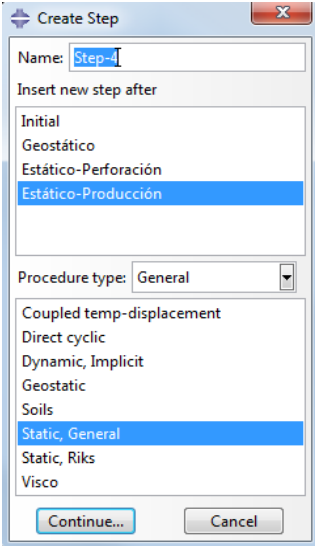
Fuente: LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis.

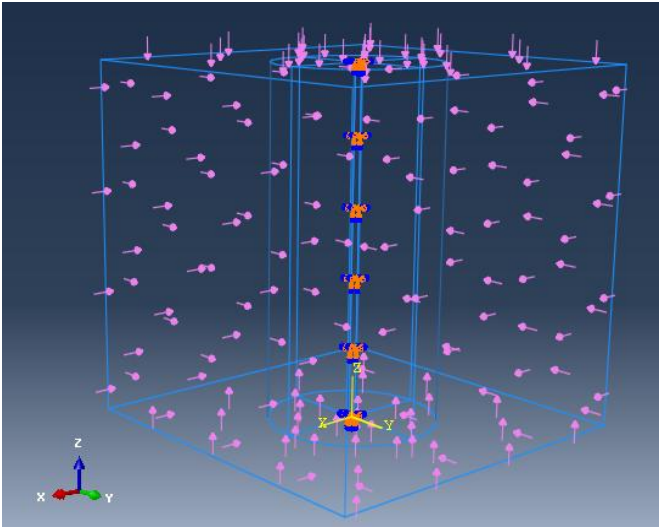
### 4.3 ANÁLISIS CON ABAQUS<sup>30</sup>

MÓDULO	CARACTERÍSTICAS
PARTES	<p>Las partes son los bloques constructores de los modelos y se crean con las herramientas existentes en el módulo. Tiene una representación basada en características, es decir, una característica es una pieza significativa de diseño que permite ser construida y modificada.</p> <p>La primera característica que se crea cuando se construye una parte es la <i>característica base</i>, especificando la forma o topología. En el modelo se dibuja el perfil de la característica y luego se extruye o alarga a través de una distancia especificada, lo que se conoce como: EXTRUSIÓN.</p> <p>Se hace necesario representar la parte original para poder aplicarle cargas e interacciones, es decir, se realiza la <i>copia de una parte</i> y se integra la parte en un sistema de coordenadas X-Y-Z (3D). Al modelo se le permite deformación de la parte (geometría) cuando esté sometida a una carga, se define como <i>deformable</i>.</p> <p>Figura 29. Parte diseñada para el modelo de simulación.</p>  <p>Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.</p>

<sup>30</sup> Manuales Del Software Abaqus. Abaqus 6.11 Documentation Collection. Disponibles en: <http://abaqus.me.chalmers.se/v6.11/index.html>

MÓDULO	CARACTERÍSTICAS
PROPIEDADES	<p>Permite desarrollar las siguientes actividades: Definir el material, crear y asignar secciones, orientaciones, definir capas compuestas e inercia en una parte. Se puede asignar propiedades mediante la creación de una sección y asignarla a la parte. En muchas ocasiones, las secciones hacen referencia a materiales que se definen. Un único material puede ser asignado a varias secciones.</p> <p>Para el tipo de simulación realizada se especificó una <i>Sección sólida homogénea</i> en 3D, debido a que la geometría modelada es una roca la cual se asume homogénea.</p> <p>En este módulo se define el modelo de plasticidad de Mohr Coulomb, desde la caja de diálogo de edición del material y se ingresan los valores para definir sus características.</p>
ENSAMBLAJE	<p>El modelo contiene únicamente un ensamble, el cual está compuesto de ejemplos de las partes del modelo. Cuando se crea una parte esta existe en su propio sistema de coordenadas independiente de las otras partes del modelo, por lo tanto en este módulo se crean copias de las partes y se posicionan relacionando unas respecto a otras en un sistema global de coordenadas. Si la geometría de una parte cambia, Abaqus/CAE actualiza automáticamente todas las copias de las partes para que reflejen estos cambios.</p>
PASOS	<p>En este se pueden crear los pasos del análisis, especificar los requerimientos de salida, el enmallado adaptativo y los controles de análisis. La secuencia de los pasos proporciona una forma conveniente para capturar los cambios en las condiciones frontera, cargas, forma en que las partes del modelo interactúan con otras y reproducir el fenómeno de estudio por etapas logrando una mayor exactitud en el proceso. No hay límite en el número de pasos y el modelo propuesto está compuesto por: Paso inicial y Pasos de Análisis (Geostático, estático). En cada paso se definen las características sobre condiciones límite, campos predefinidos y cargas (Figura 30).</p> <p>El tipo de solicitud de salida será <i>Field Output Request</i>, en el cual se solicitó que en el archivo de base de datos de salida se encuentren las siguientes variables relacionadas con todo el modelo:</p>

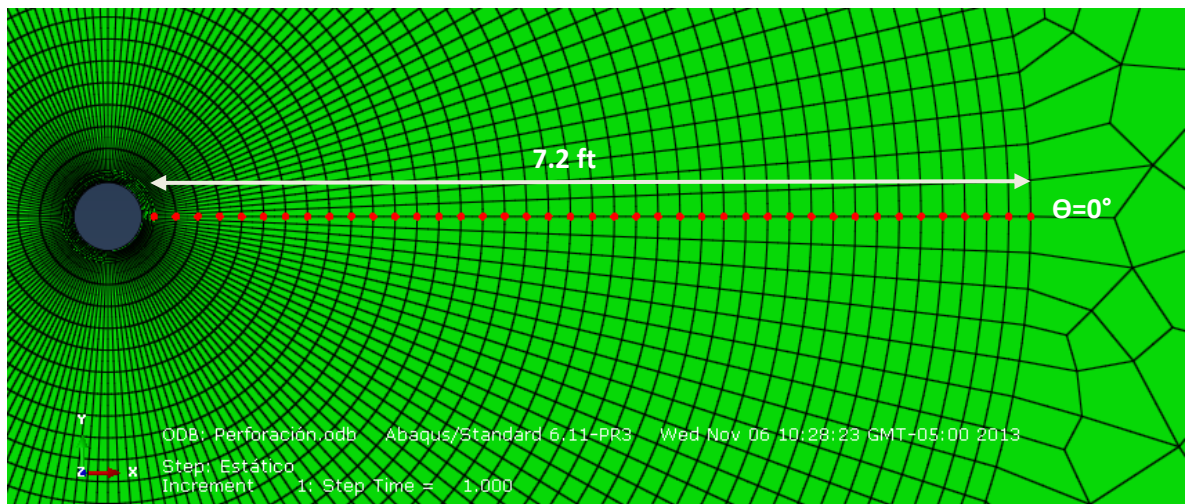
MÓDULO	CARACTERÍSTICAS
PASOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ S, componentes de esfuerzos e invariantes.</li> <li>✓ E, componentes de deformación total.</li> </ul> <p>Figura 30. Pasos de análisis en la simulación realizada.</p>  <p>Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.</p>
CARGA	<p>Condiciones Frontera:</p> <p>ENCASTRE, totalmente empotrado lo que implica que los grados de libertad 1, 2, 3, 4, 5, 6=0; para la parte externa del modelo y PARED FLUIDO SIN DESLIZAMIENTO, para la parte interna del pozo ya que crea una superficie donde el fluido se adhiere a la pared sin deslizamiento y sin penetración, específicamente para la simulación del proceso de perforación.</p> <p>Todas las condiciones de carga están definidas en el modelo como una presión uniforme sobre una superficie.</p> <p>La presión de poro inicial en un medio poroso es una condición de campo predefinido, la cual se define para los nodos de la malla de dos maneras, directamente como función dependiente de la elevación (presión de poro variando linealmente con la coordenada vertical, Z) o como un valor constante en todo el modelo, situación simulada en el desarrollado. Como campos predefinidos también se tiene la relación de vacío inicial y la saturación inicial en un medio poroso, así como el campo de esfuerzos iniciales. A manera de esquema general acerca de los</p>

MÓDULO	CARACTERÍSTICAS
CARGA	<p>datos aplicados en el módulo carga se presenta la Figura 31.</p> <p>Figura 31. Esquema general de cargas aplicadas.</p>  <p>Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.</p>
ENMALLADO	<p>Permite generar las mallas en partes y ensambles creados dentro de Abaqus/CAE. Los atributos de enmallado de un modelo son las semillas, técnicas de enmallado, algoritmo de enmallado y tipos de elementos finitos.</p> <p>Los elementos finitos son los componentes fundamentales de un modelo en Abaqus, 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 hasta por 6 grados de libertad para un nodo de referencia y los elementos deformables tienen muchos más grados de libertad.</p> <p>Tipo de elemento utilizado: C3D20RP  C: Continuo para esfuerzos y desplazamientos.  3D: Tres dimensiones.  20: Número de nodos.  R: Integración reducida.  P: Presión de poro.</p>
TRABAJO	<p>Permite crear un trabajo, enviarlo para su análisis y monitorear su progreso.</p>

#### 4.4 CALIBRACIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN

Para realizar la calibración del proceso de perforación se hace necesario el uso de las formulaciones de Kirsch (1898)...véase el numeral 2.2... Para ello, la simulación de las características de la etapa de perforación se realizó bajo la condición de un material elástico. El respectivo análisis se llevó a cabo en los nodos situados a  $0^\circ$  respecto a la dirección del esfuerzo horizontal máximo, desde la cara del pozo hasta 7.2 ft de distancia ó  $20R_w$  (Figura 32).

Figura 32. Elementos utilizados para la validación con las Ecuaciones de Kirsch.



Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.

Al realizar la simulación del fenómeno, se extraen los respectivos resultados de  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  y  $\sigma_a$  y se lleva a cabo la comparación con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la solución analítica propuesta por Kirsch (1898), Figuras 33, 34 y 35. Esta calibración se realiza con resultados cuyos valores corresponden a datos de esfuerzos efectivos para cada uno de los  $\sigma$  trabajados; se tiene en cuenta el  $Sh_{max}$ ,  $Sh_{min}$ ,  $S_v$ ,  $Plodo$ ,  $R_w$ ,  $V$  y  $P_p$  correspondiente al valor base de simulación ó valor inicial ( $P_p=1450$  [psi]), entre otros tipos de datos para especificar el material y el comportamiento elástico del mismo.

Figura 33. Variación del esfuerzo radial vs. Radio desde la cara del pozo.

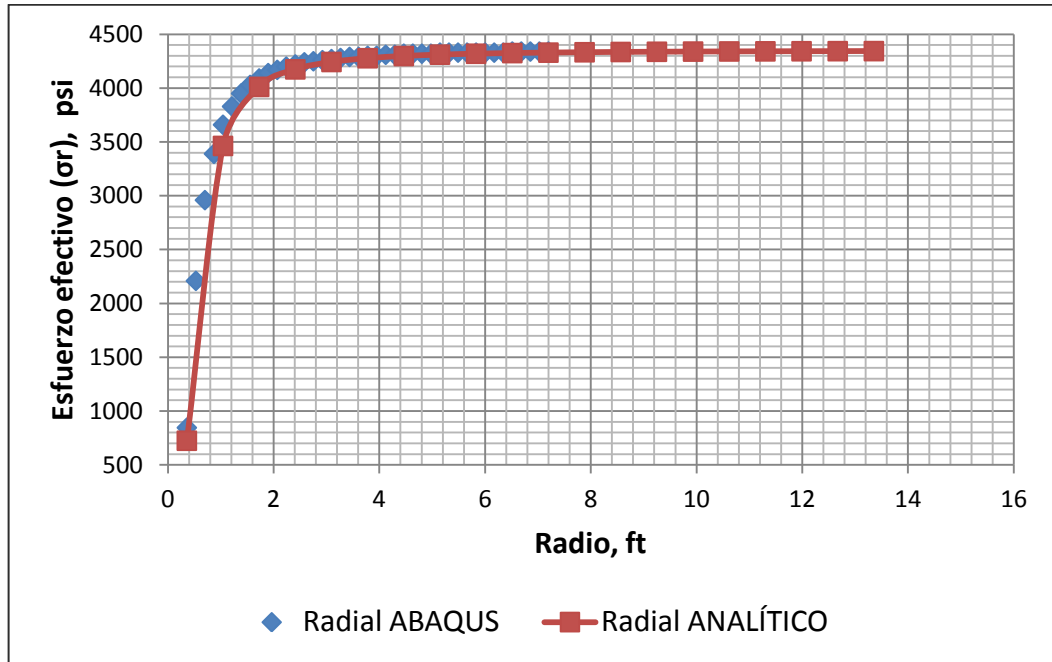


Figura 34. Variación del esfuerzo tangencial vs. Radio desde la cara del pozo.

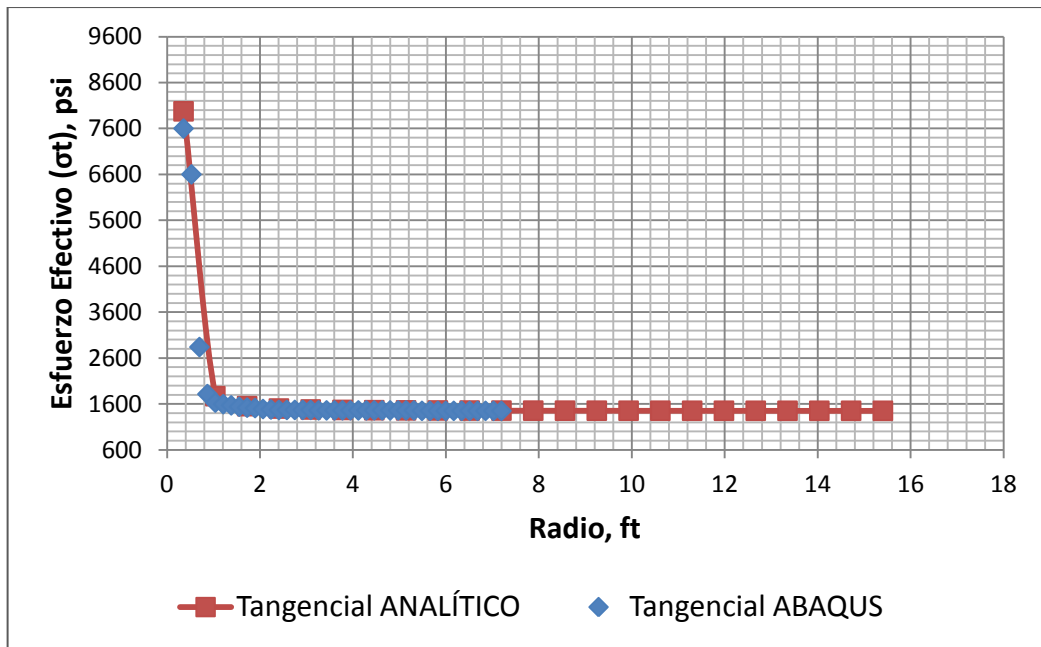
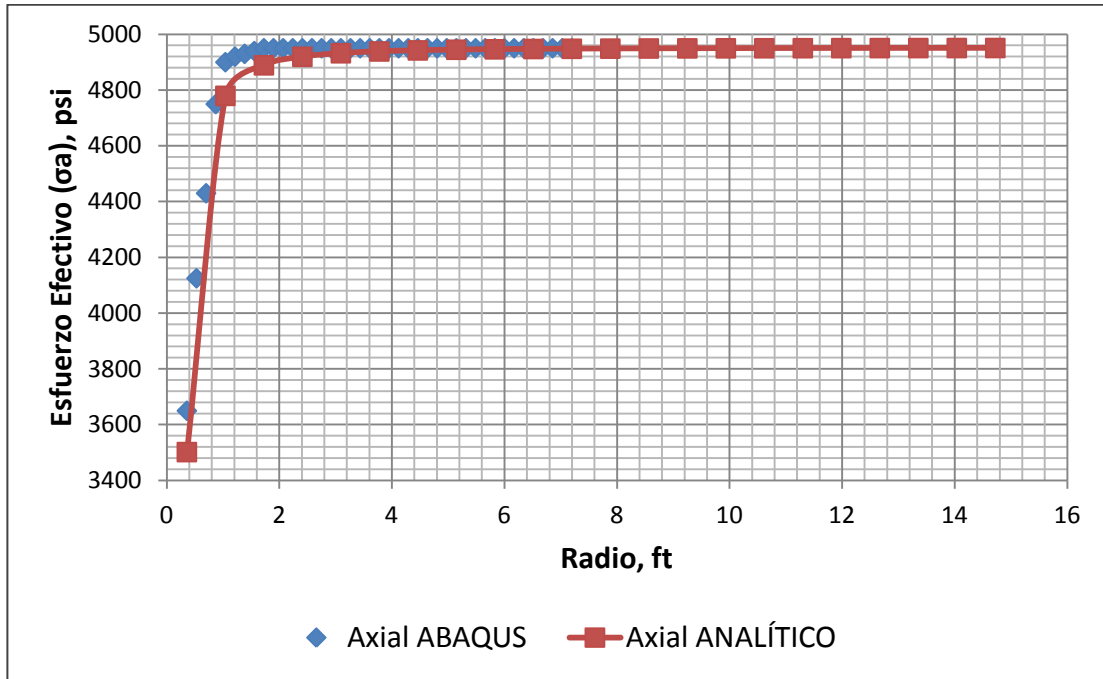


Figura 35. Variación del esfuerzo axial vs. Radio desde la cara del pozo.



En las figuras anteriores (33, 34 y 35) se puede observar como los datos obtenidos mediante la solución analítica y la simulación realizada en Abaqus son bastante similares, es decir, puede concluirse que los resultados del software comercial se asemejan en gran medida al comportamiento analítico y pueden ser utilizados para estudios posteriores garantizando el buen desempeño de la herramienta computacional, Abaqus.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Determinar la sensibilidad del estado de esfuerzos y deformaciones ante la disminución de la presión de poro, mediante la simulación de un modelo conceptual de roca productora correspondiente a una arenisca y en la cual la distribución de la Pp es constante, es la meta u objetivo principal de esta investigación. Para ello, se diseñó un modelo de simulación en el software comercial ABAQUS, al cual se le especificaron todos los datos y características necesarias para lograr recrear de la mejor manera este fenómeno...en la sección 4... Además se utilizó completamiento Openhole para no hacer uso de ningún tipo de revestimiento en la sección productora; este tipo de completamiento se realiza en zonas donde la formación está altamente compactada, siendo el intervalo a completar o producir normalmente grande (100-400 ft) y homogéneo en toda su longitud.

Normalmente la presión de poro comienza a disminuir cuando los campos inician el proceso de producción. El perfil de esfuerzos in-situ de los campos también disminuirá a medida que la presión de poro reduzca su valor, generando nuevos perfiles de esfuerzos y por tanto también de deformaciones<sup>31</sup>.

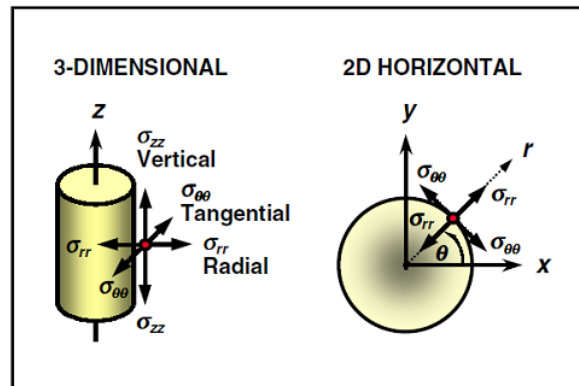
En diversos estudios realizados en simuladores con aplicaciones geomecánicas como el software comercial ABAQUS, se han evidenciado resultados acerca de este nuevo cambio de esfuerzos debidos a la producción o flujo inducido, término que se utilizará de ahora en adelante para enfatizar que los cambios de esfuerzos

---

<sup>31</sup> SALEHI, Saeed, HARELAND, Geir y NYGAARD, Runar. *Numerical Simulations Of Wellbore Stability In Under-Balanced-Drilling Wells*. En *Journal of Petroleum Science and Engineering* 72 (2010); p. 229-235.

referidos en este trabajo son debidos a la producción del yacimiento. En uno de estos estudios<sup>32</sup> se resalta el hecho de que los principales cambios de esfuerzos son radiales, tangenciales y axiales, y son anisotrópicos,  $\Delta\sigma_r \neq \Delta\sigma_t \neq \Delta\sigma_a$  (Figura 36). También socializa como resultado, el hecho de que la magnitud absoluta del cambio del esfuerzo radial es siempre mayor o igual al cambio del esfuerzo tangencial  $|\Delta\sigma_r| \geq |\Delta\sigma_t|$ . Lo que para producción de traduciría en:  $q > 0$ ,  $\Delta\sigma_r < 0$  y  $\Delta\sigma_r < \Delta\sigma_t$ .

Figura 36. Configuración y convención de signos de un campo de esfuerzos en coordenadas cilíndricas,  $\sigma_{rr} = \sigma_r$ ,  $\sigma_{zz} = \sigma_a$  y  $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_t$ .



Fuente: CHEN, Her-Yuan y TEUFEL, Lawrence W. Reservoir Stress Changes Induced by Production/Injection.

La producción de yacimientos de hidrocarburos puede conducir a la disminución de la presión de poro, de hasta 8703 psi ó más, durante la vida útil de un campo. Esta depleción tiene como resultado el cambio de los esfuerzos horizontales que actúan en el yacimiento, así como el estado de esfuerzos radiales, tangenciales y axiales con sus respectivas deformaciones, debidas a los nuevos estados de esfuerzos dados a medida que se da la disminución de la presión de poro producto de la depleción<sup>33</sup>.

<sup>32</sup> CHEN, Her-Yuan y TEUFEL, Lawrence W. *Reservoir Stress Changes Induced by Production/Injection*. SPE International 71087 presentado en SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Keystone, Colorado, 21-23 May 2001.

<sup>33</sup> ADDIS M.A. *Reservoir Depletion and Its Effect on Wellbore Stability Evaluation*. En Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34: 3-4, Paper No. 004 (1997).

## 5.1 ESFUERZOS EFECTIVOS

Un aumento en los esfuerzos efectivos toma lugar en yacimientos como consecuencia de la producción de fluidos, un fenómeno bien conocido en yacimientos superficiales y profundos<sup>34</sup>. El modelo elasto-plástico desarrollado en el software comercial ABAQUS ofrece la capacidad de evaluar el nuevo estado de esfuerzos y deformaciones producto de la disminución de la presión de poro, realizada mediante la simulación del efecto de 9 valores de presión de poro diferentes...ver Tabla 5... Los resultados se analizan a 0° de la dirección de aplicación del  $\sigma_{\max}$  (Eje x) hasta una distancia que va desde la cara del pozo hacia la formación, equivalente a  $20R_w$  (7.2 ft), región que corresponde al enmallado más fino del modelo. El modelo tiene como dimensiones 30x30x30 ft y según lo observado los resultados son los mismos sin importar la profundidad donde sean medidos los valores de  $\sigma_t$ ,  $\sigma_r$  y  $\sigma_a$  (Figura 37). Todos los datos de los valores de esfuerzos extraídos ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_r$  y  $\sigma_a$ ), harán referencia a esfuerzos efectivos.

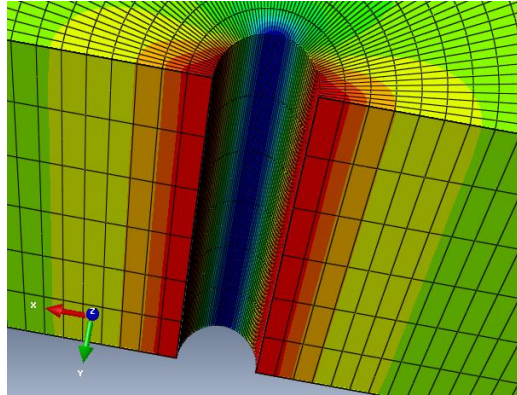
El análisis de sensibilidad para cada uno de los esfuerzos efectivos ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  y  $\sigma_a$ ) permite observar como cada uno de ellos se encuentra directamente influenciado por la disminución de la presión de poro, lo que permite evidenciar gráficamente lo analizado según el principio de esfuerzo efectivo... véase el numeral 2.1..., es decir, los esfuerzos efectivos experimentan un aumento en su valor debido a la disminución de la  $P_p$  (Figuras 38, 39 y 40). Se hace necesario recordar que el principio de esfuerzo efectivo está influenciado por la constante de Biot, parámetro que normalmente se toma igual a la unidad en la evaluación de la depleción del

---

<sup>34</sup> BELHAJ, H.A., VAZIRI, H.H. y ISLAM M.R. *Laboratory Investigation of Effective Stresses' Influence on Petrophysical Properties of Sandstone Reservoirs During Depletion*. En Journal Of Canadian Petroleum Technology. Vol. 48 (7), (jul. 2009); p. 47-53.

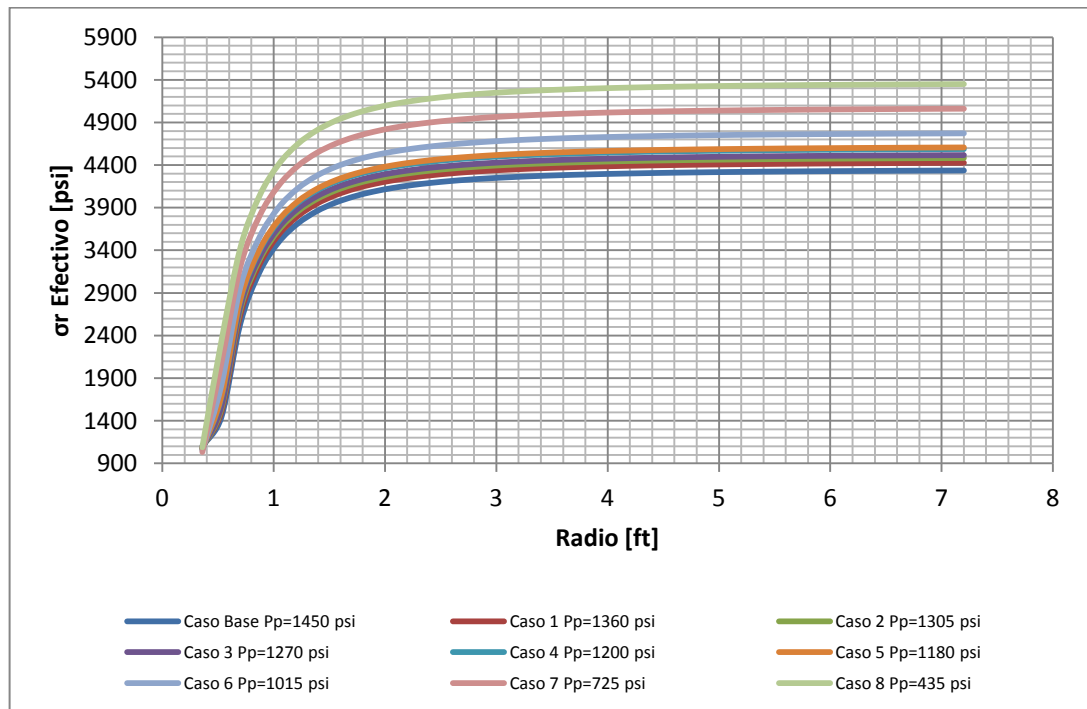
yacimiento<sup>35</sup> y que en el caso desarrollado en esta investigación también se asume igual a la unidad.

Figura 37. Perfil de  $\sigma_r$ .



Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.

Figura 38. Esfuerzo radial efectivo vs. Radio de estudio a 0° del Shmax.



<sup>35</sup> ADDIS M.A. *Reservoir Depletion and Its Effect on Wellbore Stability Evaluation*. En Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34: 3-4, Paper No. 004 (1997).

Figura 39. Esfuerzo tangencial efectivo vs. Radio de estudio a 0° del Shmax.

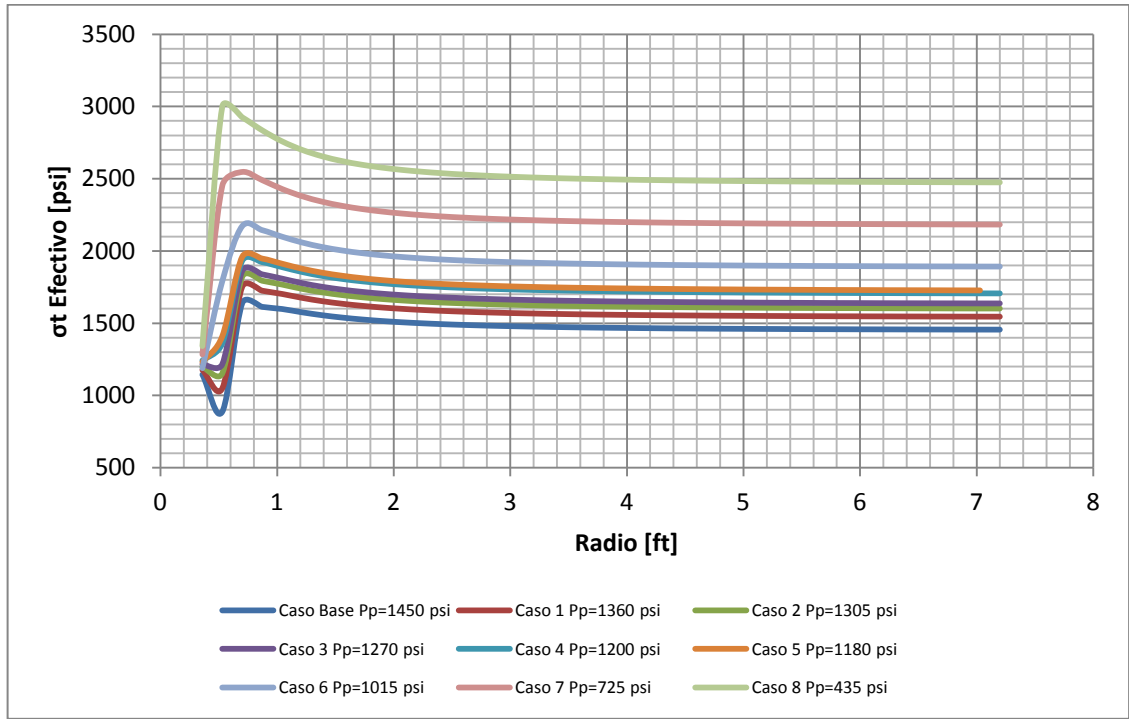
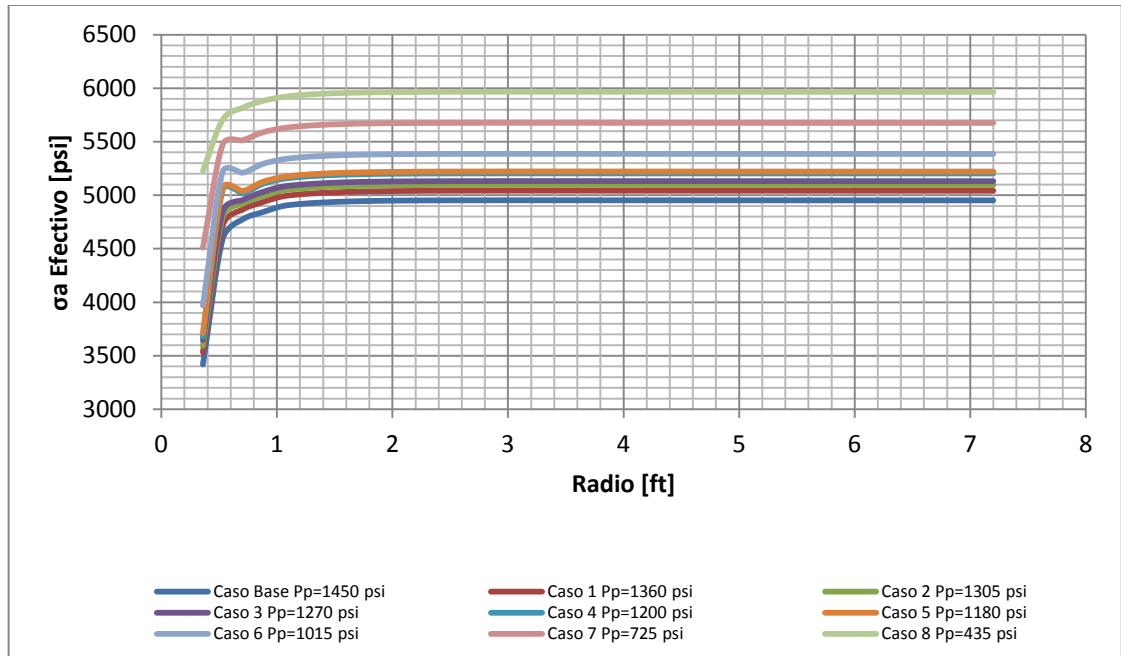
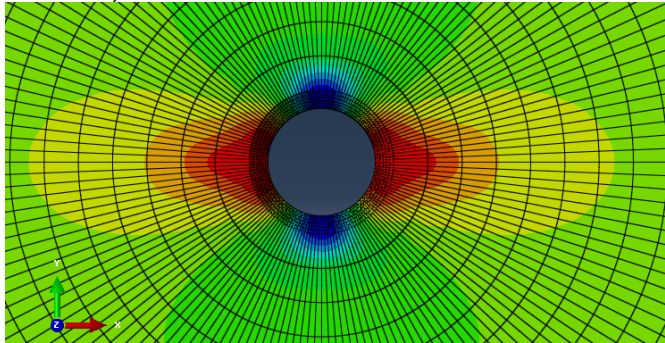
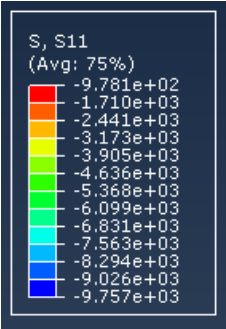
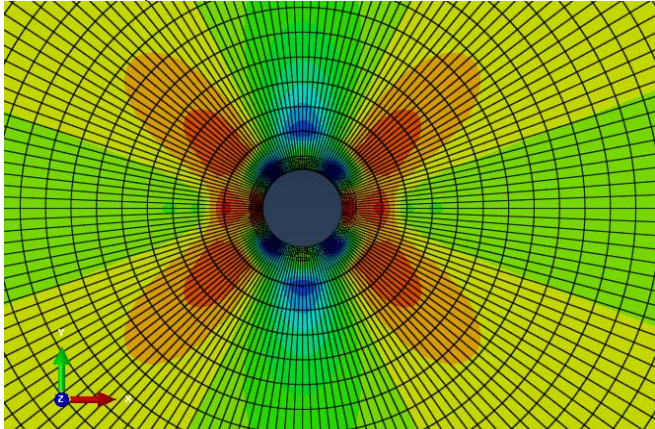
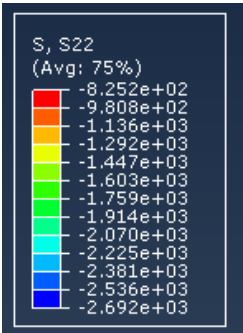


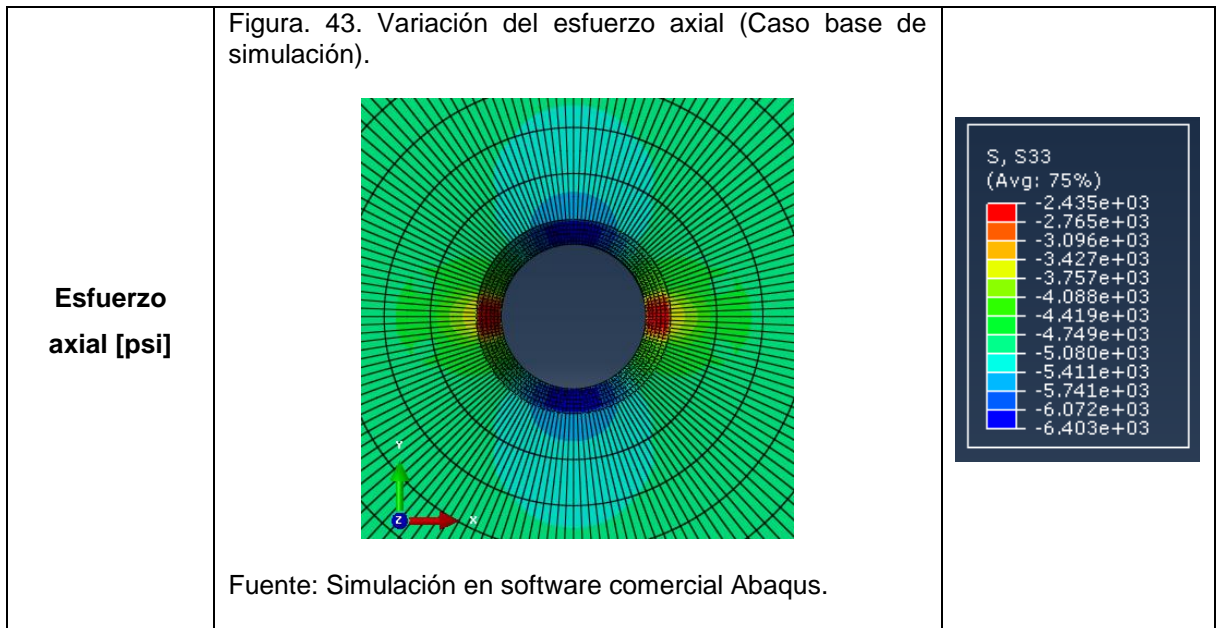
Figura 40. Esfuerzo axial efectivo vs. Radio de estudio a 0° del Shmax.



Al realizar las simulaciones correspondientes se hizo evidente que los valores de  $\sigma_r$  para cada una de las corridas en la pared del pozo ( $R_w=r$ ) corresponden al valor de la Pwf trabajada y que para los tres casos la zona que se ve afectada en mayor medida por la disminución de la Pp es la región cercana a la pared del pozo, reflejando mayor variación de esfuerzos a cortas distancias; un ejemplo de esta variación puede ser la observada en la Tabla 8.

Tabla 8. Variación de esfuerzos efectivos (Caso base de Simulación).

TIPO DE ESFUERZO	GRÁFICO	VALORES
<p><b>Esfuerzo radial [psi]</b></p>	<p>Figura 41. Variación del esfuerzo radial (Caso base de simulación).</p>  <p>Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.</p>	
<p><b>Esfuerzo tangencial [psi]</b></p>	<p>Figura. 42. Variación del esfuerzo tangencial (Caso base de simulación).</p>  <p>Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.</p>	



Las variaciones de los esfuerzos  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  y  $\sigma_a$  para los casos restantes reflejan la misma geometría de la Tabla 8 en cada uno de sus resultados, con la diferencia de que los valores de los esfuerzos van siendo mayores (Tabla 9) y cuando existe un delta de  $P_p$  (725 psi ó más) muy grande las zonas afectadas se van desplazando hacia la formación de una forma más notoria.

Tabla 9. Variación del esfuerzo radial efectivo para los 4 primeros casos de simulación.

CASOS	Base	Producción 1	Producción 2	Producción 3
<b>Esfuerzo Radial [psi]</b>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-9.781e+02</li> <li>-1.710e+03</li> <li>-2.441e+03</li> <li>-3.173e+03</li> <li>-3.905e+03</li> <li>-4.636e+03</li> <li>-5.368e+03</li> <li>-6.099e+03</li> <li>-6.831e+03</li> <li>-7.563e+03</li> <li>-8.294e+03</li> <li>-9.026e+03</li> <li>-9.757e+03</li> </ul>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-9.906e+02</li> <li>-1.728e+03</li> <li>-2.464e+03</li> <li>-3.201e+03</li> <li>-3.938e+03</li> <li>-4.675e+03</li> <li>-5.412e+03</li> <li>-6.149e+03</li> <li>-6.886e+03</li> <li>-7.623e+03</li> <li>-8.360e+03</li> <li>-9.097e+03</li> <li>-9.834e+03</li> </ul>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-9.925e+02</li> <li>-1.731e+03</li> <li>-2.469e+03</li> <li>-3.208e+03</li> <li>-3.946e+03</li> <li>-4.684e+03</li> <li>-5.423e+03</li> <li>-6.161e+03</li> <li>-6.899e+03</li> <li>-7.638e+03</li> <li>-8.376e+03</li> <li>-9.114e+03</li> <li>-9.853e+03</li> </ul>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-1.001e+03</li> <li>-1.739e+03</li> <li>-2.477e+03</li> <li>-3.215e+03</li> <li>-3.953e+03</li> <li>-4.692e+03</li> <li>-5.430e+03</li> <li>-6.168e+03</li> <li>-6.906e+03</li> <li>-7.644e+03</li> <li>-8.382e+03</li> <li>-9.120e+03</li> <li>-9.859e+03</li> </ul>

Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.

El signo negativo (-) de cada uno de los valores de la Tabla 9 indica que se hace referencia a esfuerzos compresivos en cada zona representada con esa gama de colores. Los datos allí resumidos son el promedio de los valores de todos los nodos que se encuentran en la región del mismo color, lo que hace más conveniente el uso de los valores nodo por nodo (Figura 44) y no la visión generalizada que se ofrece mediante estos recuadros para cualquier análisis geomecánico que se pretenda realizar. Es importante resaltar que el modelo está compuesto por 186.439 nodos, cuyos valores no podrían ser agrupados de una manera correcta en 10 ó más zonas de colores diferentes.

Figura 44. Reporte de los datos nodo por nodo (Caso 6: Pp=725 [psi]).

Node Label	S.S11 @Loc 1	S.S22 @Loc 1	S.S33 @Loc 1
186439	-5.07932E+003	-2.17790E+003	-5.67666E+003
186438	-5.08065E+003	-2.17852E+003	-5.67660E+003
186437	-5.07813E+003	-2.17186E+003	-5.67679E+003
186436	-5.07717E+003	-2.17170E+003	-5.67681E+003
186435	-5.07370E+003	-2.17433E+003	-5.67683E+003
186434	-5.07899E+003	-2.17133E+003	-5.67676E+003
186433	-5.08557E+003	-2.17049E+003	-5.67667E+003
186432	-5.08273E+003	-2.17555E+003	-5.67660E+003
186431	-5.07958E+003	-2.17767E+003	-5.67664E+003
186430	-5.08058E+003	-2.17908E+003	-5.67659E+003
186429	-5.08105E+003	-2.17854E+003	-5.67658E+003
186428	-5.08034E+003	-2.17826E+003	-5.67662E+003
186427	-5.07808E+003	-2.17139E+003	-5.67680E+003
186426	-5.06209E+003	-2.18254E+003	-5.67692E+003
186425	-5.06293E+003	-2.18238E+003	-5.67690E+003
186424	-5.08285E+003	-2.17349E+003	-5.67667E+003
186423	-5.08147E+003	-2.17426E+003	-5.67667E+003
186422	-5.08386E+003	-2.17309E+003	-5.67664E+003
186421	-5.07572E+003	-2.17255E+003	-5.67685E+003
186420	-5.07946E+003	-2.17116E+003	-5.67676E+003
186419	-5.08087E+003	-2.17932E+003	-5.67657E+003
186418	-5.08106E+003	-2.17932E+003	-5.67656E+003

Fuente: Simulación en software comercial Abaqus. S11, S22 y S33 corresponden a esfuerzo efectivo radial, tangencial y axial, respectivamente.

**5.1.1 Sensibilidad.** La sensibilidad de los esfuerzos  $\sigma_r$ ,  $\sigma_a$  y  $\sigma_t$  a la  $P_p$  fue realizada de la siguiente manera: Se seleccionaron 6 casos con valores de presión de poro de 1360, 1270, 1200, 1015, 725 y 425 [psi], que representan un delta de  $P_p$  de 90, 180, 250, 435, 725 y 1015 [psi], respectivamente. Se realizan las corridas correspondientes para cada caso y se extraen los valores nodo por nodo con el fin de disponer para cada situación con los valores de esfuerzos a  $0^\circ$  respecto al eje de aplicación del  $Sh_{max}$  a 7.2 ft de la cara del pozo, es decir, un valor de  $\sigma_r$ , uno de  $\sigma_t$  y otro de  $\sigma_a$ , para cada caso a 7.2 ft; datos que serán organizados en un diagrama araña que permite visualizar de una mejor manera el efecto de la  $P_p$  en cada uno de ellos. Debido a que el diagrama araña requiere de un valor base, un valor por encima y otro por debajo del mismo, se hizo necesario realizar corridas de simulación adicionales con valores por encima del caso base ( $P_p=1450$  [psi]) cuyo delta fuera el mismo para cada caso. Los resultados se encuentran en las figuras 45, 46 y 47.

Figura 45. Diagrama araña para  $\sigma_r$ .

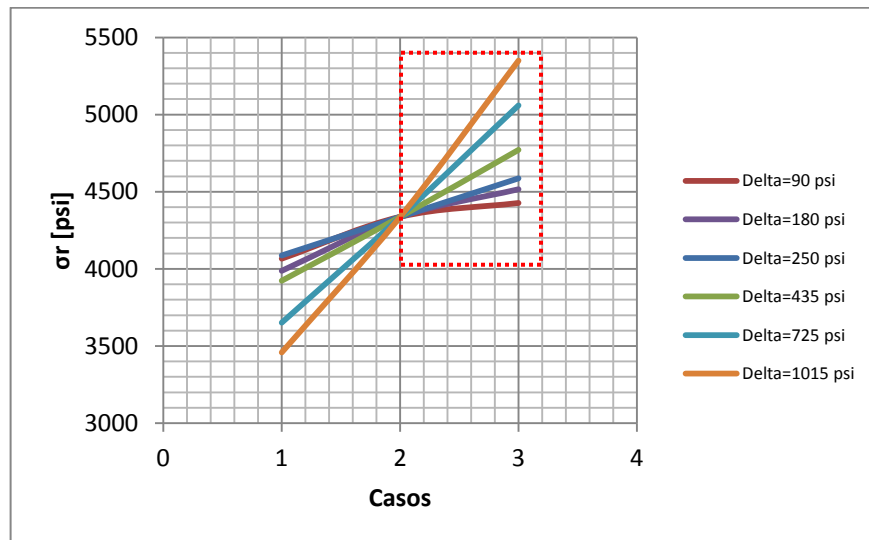


Figura 46. Diagrama araña para  $\sigma_t$ .

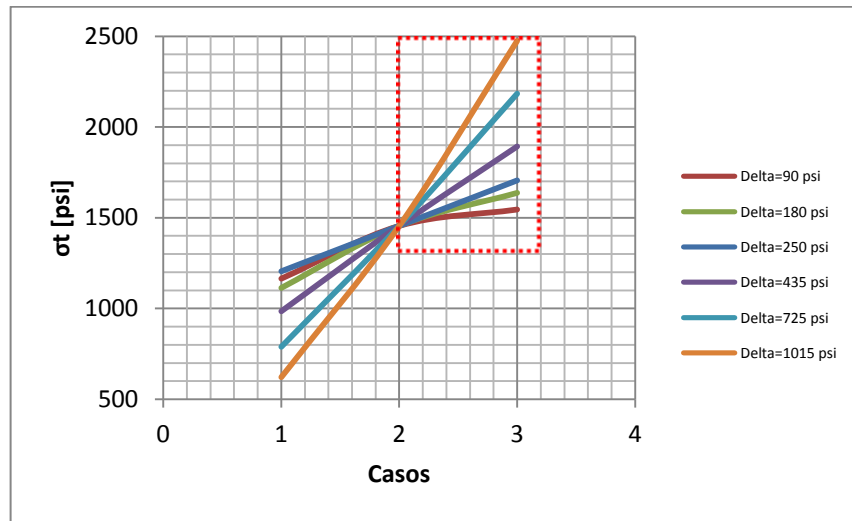
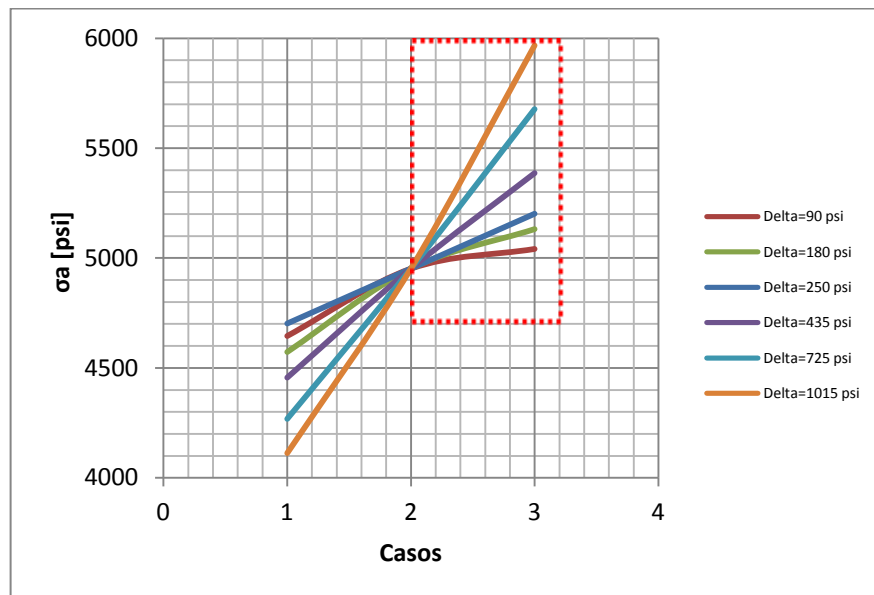


Figura 47. Diagrama araña para  $\sigma_a$ .



La parte derecha de las figuras 45, 46 y 47 (resaltadas en cada una) representan de una manera clara el efecto de la disminución de la presión de  $P_p$  en el estado esfuerzos, es decir, se logra observar que a medida que existe un mayor delta de

Pp los esfuerzos efectivos se verán afectados en mayor manera aumentando su valor. La parte izquierda de las mismas representa el caso contrario, el de inyección, proceso que no está ajustado de la mejor manera al modelo de simulación diseñado, pero cuyas corridas se hacen necesarias para generar los diagramas y cuyo resultado esperado sería el de disminuir el valor de los esfuerzos efectivos.

Se observo también, que el valor de cada uno de los esfuerzos estudiados ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  y  $\sigma_a$ ) a medida que se alejan de la pared del pozo ( $R_w=r$ ) y se acercan a la frontera del modelo, pueden tenerse en cuenta como los valores correspondientes a  $S_{hmax}$  efectivo,  $S_{hmin}$  efectivo y  $S_v$  efectivo, respectivamente, debido a que se acercan a los valores de los esfuerzos aplicados en la frontera del modelo diseñado en la etapa inicial.

## **5.2 DEFORMACIONES**

Un cuerpo rocoso responde al esfuerzo aplicado a través de diversos modos de deformación que producen cambios de volumen y de forma, a menudo acompañados por cambios en las propiedades de las rocas (el modelo simulado no calcula las propiedades mecánicas de las rocas ante el nuevo cambio en el estado de esfuerzos). El espectro de deformación oscila entre la deformación elástica, o reversible y la deformación plástica, o permanente, antes de terminar finalmente en la falla de la roca. Además de la magnitud del esfuerzo aplicado, la respuesta de una roca al esfuerzo depende en gran medida del tipo de roca, la cementación, porosidad y la profundidad de sepultamiento. Cuando se dan

incrementos de esfuerzos pequeños generalmente esto causa una deformación pequeña, de la que la roca podría recuperarse<sup>36</sup>.

Los cambios en el estado de esfuerzos causan deformación en la parte sólida de la roca y esta cantidad de deformación se incrementa con la magnitud de los esfuerzos y el tiempo<sup>37</sup>.

Mark D. Zoback en uno de sus trabajos<sup>38</sup> investiga acerca de la deformación de yacimientos depletados, específicamente en el estudio de arenas débilmente cementadas, ya que argumenta que los efectos de la depleción en tales yacimientos son considerables y hay muchos de ellos alrededor del mundo. Esta investigación se cita debido a que en el presente trabajo se dieron valores de deformación muy pequeños, tan pequeños que hacían dudar de alguna manera sobre la confiabilidad de los resultados obtenidos, pero al observar el trabajo de Mark D. Zoback se pudo concluir que los resultados se comportan de acuerdo a lo que sucede en la realidad o a lo que se pudo observar en su investigación.

En su trabajo (Zoback, 2007) se observan rangos de deformación total entre 0 y 0.1 debida a una depleción de 2900.755 [psi] y otras deformaciones totales entre 0.1 y 0.15 correspondientes a 5801.51 [psi] en 20 años respectivamente. Lo que permite observar que las variaciones de la deformación total se dan en valores muy pequeños, como se puede analizar en la figura 48. Estos valores de

---

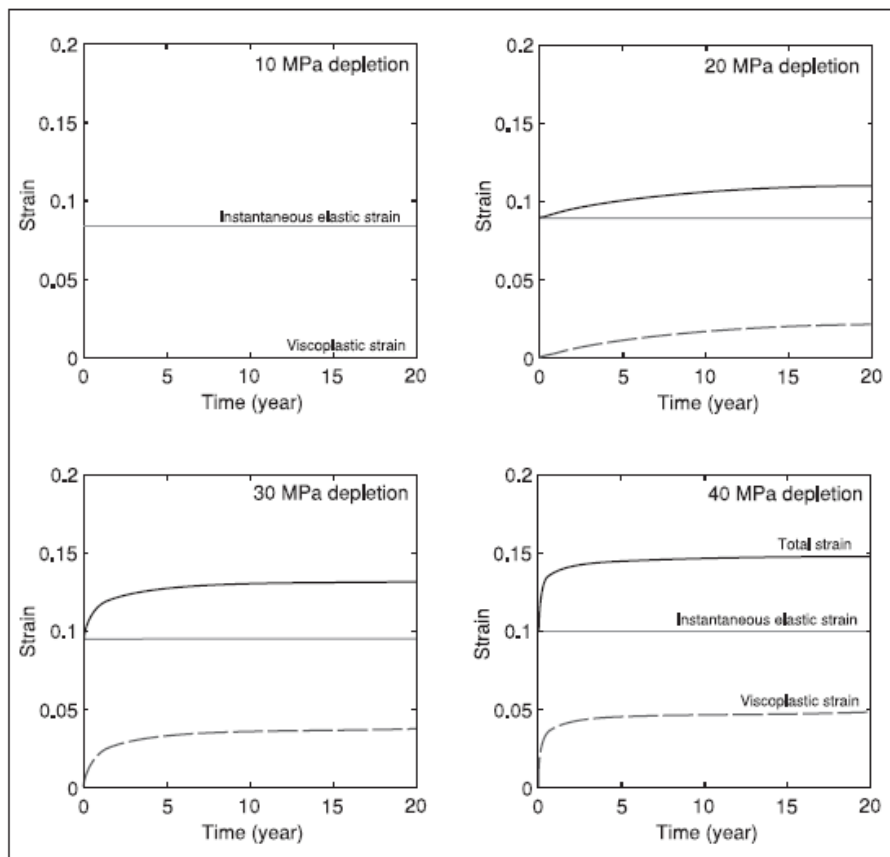
<sup>36</sup> COOK, John, *et al. Las Rocas Importan: Realidades de la Geomecánica*. En Oilfield Review. Invierno de 2007/2008; p. 38-59.

<sup>37</sup> NARANJO, Abel & SOTO, Carlos M. *Efecto de los Parámetros Geomecánicos en el Fracturamiento Hidráulico de Yacimientos de Hidrocarburos sensibles a esfuerzos*. En Boletín de Ciencias de la Tierra. Número 21 (nov. 2007).

<sup>38</sup> ZOBACK, Mark D. *Reservoir Geomechanics*. Department of Geophysics, Stanford University. United Kingdom at the University Press, Cambridge, 2007. 505 p.

deformación tan pequeños obedecen a periodos de depleción de 20 años y disminuciones de presión de poro entre 2900.755 y 5801.51 [psi], magnitudes que comparadas con los valores de la presente investigación son extremadamente grandes y aun así, las generadoras de valores de deformación muy pequeños. Lo que hace pensar que según los deltas de Pp utilizados en esta investigación, el valor de las deformaciones serán valores mucho más pequeños. Los resultados que obedecen a las deformaciones en el presente trabajo hacen referencia a deformación total, es decir, a la suma de la deformación elástica y plástica.

Figura 48. Deformación para diferentes cantidades de depleción para el campo Z del Golfo de México.



Fuente: ZOBACK, Mark D. *Reservoir Geomechanics*. Department of Geophysics, Stanford University. United Kingdom at the University Press, Cambridge, 2007. Page: 411.

Los resultados de las figuras 49, 50 y 51 obedecen a las deformaciones causadas por los valores de esfuerzos  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  y  $\sigma_a$  socializados anteriormente, exactamente bajo las mismas condiciones. De aquí en adelante se hará referencia a cada tipo de deformación total como:  $E_r$  (Deformación debida a  $\sigma_r$ ),  $E_t$  (Deformación debida a  $\sigma_t$ ) y  $E_a$  (Deformación debida a  $\sigma_a$ ).

Figura 49. Deformación debida a  $\sigma_r$  ( $E_r$ ) vs. Radio de estudio a  $0^\circ$  del  $Sh_{max}$ .

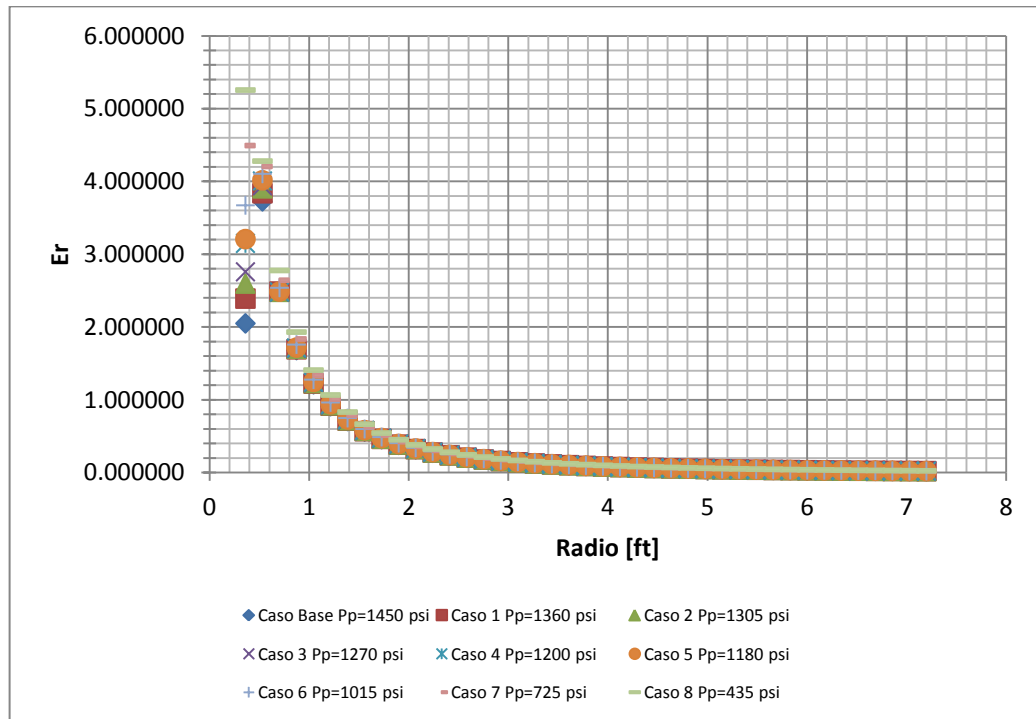


Figura 50. Deformación debida a  $\sigma_t$  ( $E_t$ ) vs. Radio de estudio a  $0^\circ$  del  $Sh_{max}$ .

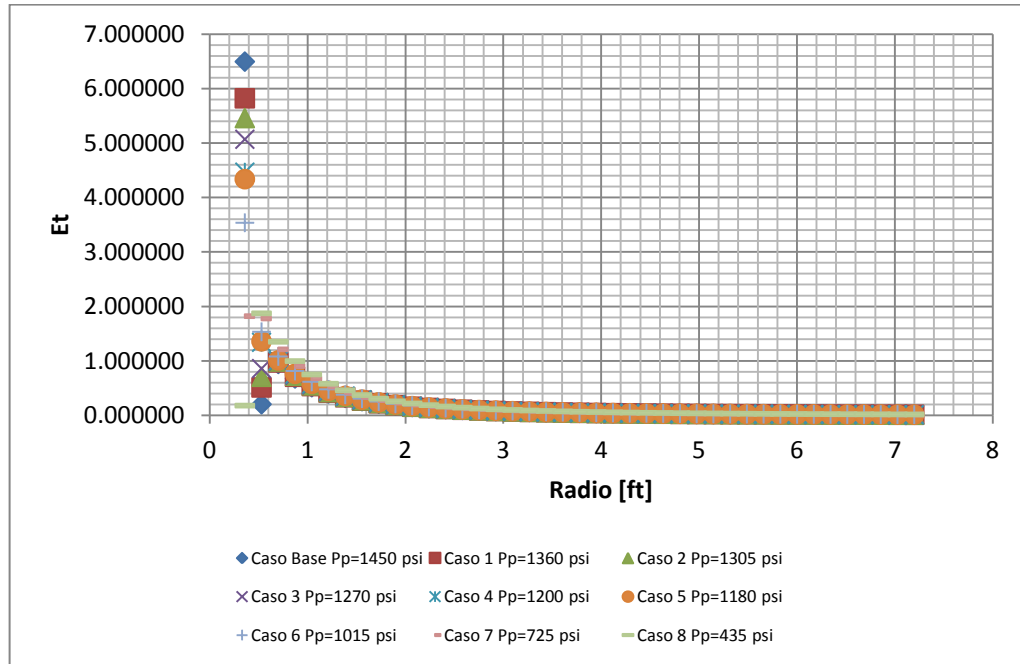
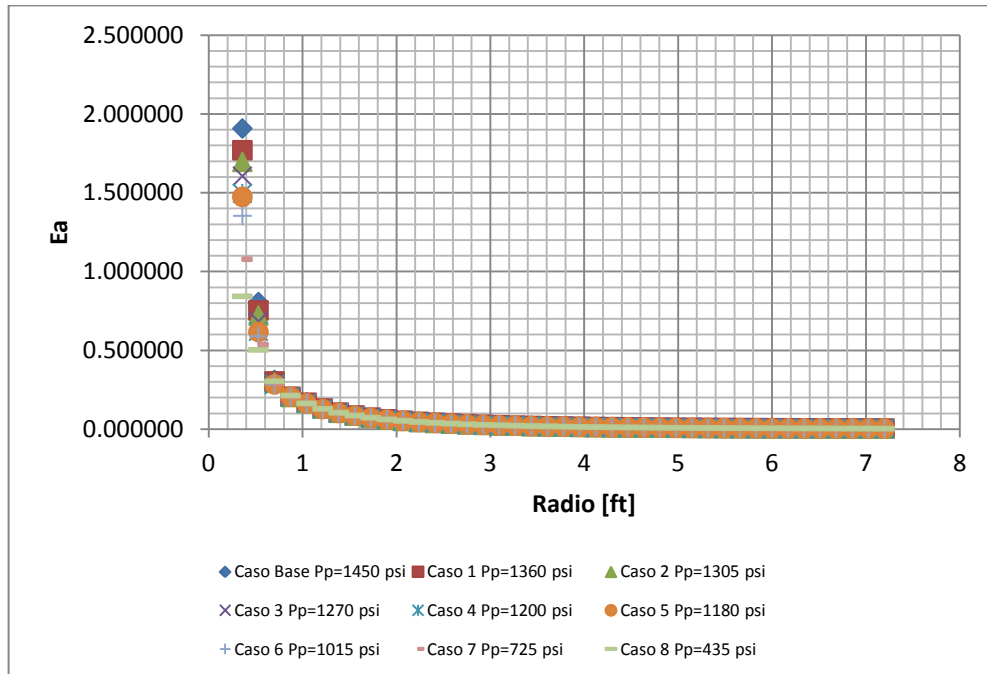


Figura 51. Deformación debida a  $\sigma_a$  ( $E_a$ ) vs. Radio de estudio a  $0^\circ$  del  $Sh_{max}$ .



Las gráficas 49, 50 y 51 permiten observar que los valores que obedecen a las deformaciones correspondientes son realmente valores muy pequeños, situación que no permite que sean visualizados de la mejor manera en las gráficas (el tipo de roca simulada corresponde a una arenisca y esta sea tal vez una razón por la cual se dan variaciones de deformación muy pequeñas). Las gráficas y los datos observados con mayor detenimiento (Tabla 10), también permiten visualizar el aumento de la magnitud de las deformaciones a medida que los esfuerzos efectivos ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_a$ ) aumentan, producto de la disminución de la presión de poro.

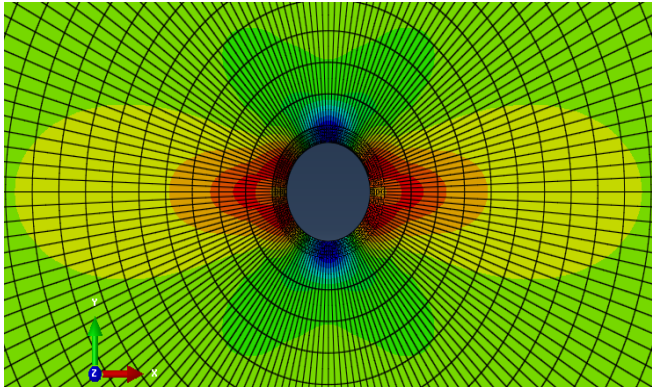
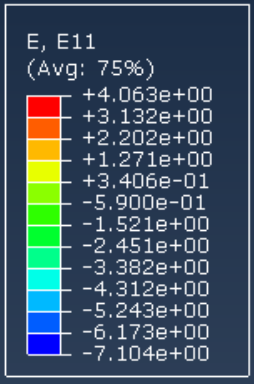
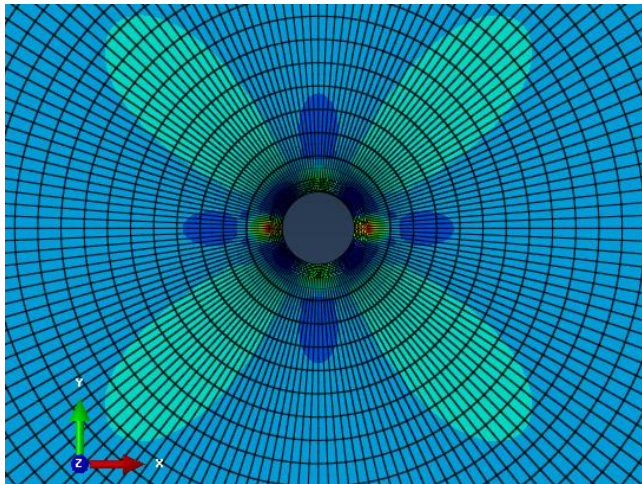
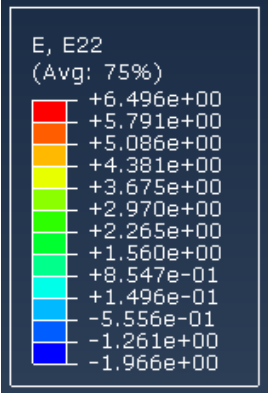
Al realizar las simulaciones correspondientes se hizo evidente que las deformaciones dependen de la variación de los esfuerzos y que cada variación de esfuerzo dada...véase Tabla 8... resulta en deformaciones producto de las magnitudes de  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  y  $\sigma_a$ . Para los tres casos la zona que se ve afectada en mayor medida por la disminución de la  $P_p$  es la región cercana a la pared del pozo, reflejando mayor variación de esfuerzos y por ende de deformaciones a cortas distancias; un ejemplo de esta variación puede ser la observada en la Tabla 11.

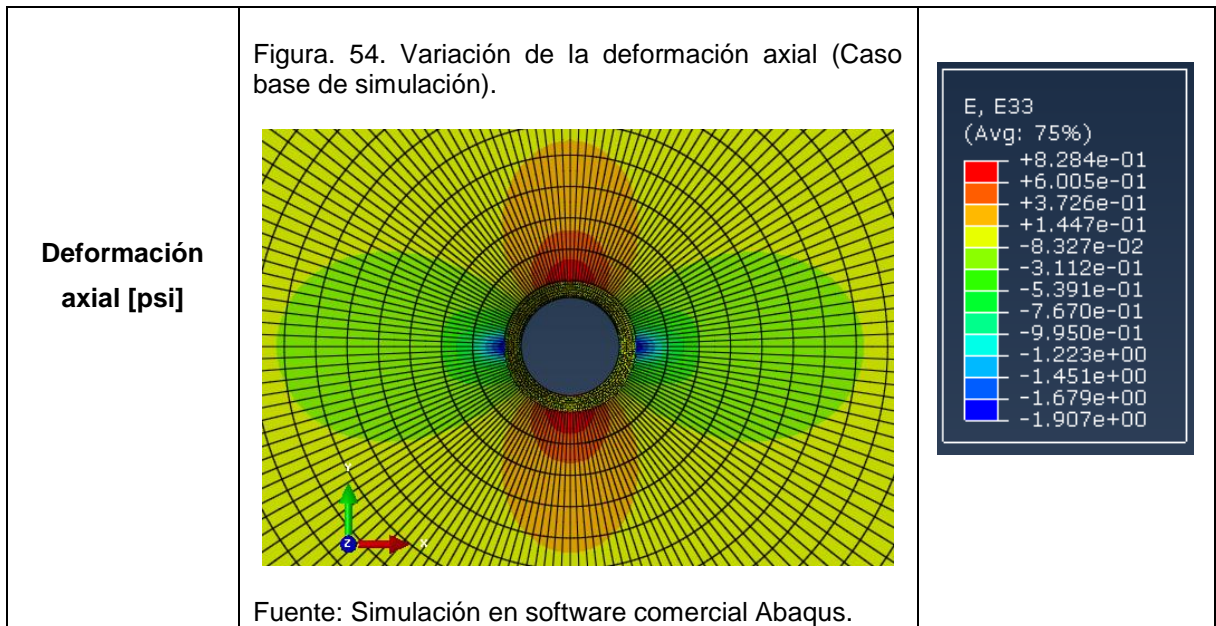
Es importante señalar que así como la mayor variación de esfuerzos se da en la región cercana a la cara del pozo, de esta misma forma las deformaciones más significativas tendrán lugar en la misma región (Tabla 10) se harán cada vez más pequeñas a medida que se alejan de  $R_w=r$ .

Tabla 10. Comparación de la deformación debida a  $\sigma_r$  ( $E_r$ ) para 4 casos de simulación.

<b>r [ft]</b>	<b>Caso Base</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 4</b>
0.36	2.050310	2.391340	2.597970	3.14915
0.531	3.727060	3.838610	3.906340	4.00721
0.702	2.495680	2.487750	2.484290	2.48159
0.873	1.683190	1.694490	1.702050	1.71303
1.044	1.213560	1.223280	1.230090	1.2425
1.215	0.912254	0.919971	0.925411	0.936117
1.386	0.708086	0.714446	0.718902	0.727925
1.557	0.564329	0.569612	0.573310	0.580855
1.728	0.459412	0.463841	0.466943	0.473293
1.899	0.380574	0.384331	0.386964	0.392374
2.07	0.319918	0.323141	0.325401	0.330059
2.241	0.272304	0.275096	0.277054	0.281103
2.412	0.234270	0.236710	0.238422	0.241972
2.583	0.203427	0.205577	0.207086	0.210221
2.754	0.178085	0.179993	0.181332	0.184121
2.925	0.157019	0.158723	0.159919	0.162415
3.096	0.139327	0.140858	0.141932	0.144178
3.267	0.124331	0.125713	0.126683	0.128715
3.438	0.111514	0.112769	0.113648	0.115494
3.609	0.100478	0.101621	0.102422	0.104106
3.78	0.090911	0.091956	0.092688	0.0942305
3.951	0.082564	0.083524	0.084196	0.0856125
4.122	0.075241	0.076125	0.076744	0.0780493
4.293	0.068783	0.069599	0.070170	0.0713771
4.464	0.063060	0.063816	0.064344	0.0654624
4.635	0.057966	0.058667	0.059157	0.0601958
4.806	0.053412	0.054065	0.054520	0.0554868
4.977	0.049326	0.049934	0.050359	0.0512601
5.148	0.045646	0.046214	0.046611	0.0474527
5.319	0.042321	0.042853	0.043224	0.0440114

Tabla 11. Variación de la deformación (Caso base de Simulación).

TIPO DE DEFORMACIÓN	GRÁFICO	VALORES
<p><b>Deformación radial [psi]</b></p>	<p>Figura 52. Variación de la deformación radial (Caso base de simulación).</p>  <p>Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.</p>	 <p>E, E11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+4.063e+00</li> <li>+3.132e+00</li> <li>+2.202e+00</li> <li>+1.271e+00</li> <li>+3.406e-01</li> <li>-5.900e-01</li> <li>-1.521e+00</li> <li>-2.451e+00</li> <li>-3.382e+00</li> <li>-4.312e+00</li> <li>-5.243e+00</li> <li>-6.173e+00</li> <li>-7.104e+00</li> </ul>
<p><b>Deformación tangencial [psi]</b></p>	<p>Figura. 53. Variación de la deformación tangencial (Caso base de simulación).</p>  <p>Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.</p>	 <p>E, E22 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+6.496e+00</li> <li>+5.791e+00</li> <li>+5.086e+00</li> <li>+4.381e+00</li> <li>+3.675e+00</li> <li>+2.970e+00</li> <li>+2.265e+00</li> <li>+1.560e+00</li> <li>+8.547e-01</li> <li>+1.496e-01</li> <li>-5.556e-01</li> <li>-1.261e+00</li> <li>-1.966e+00</li> </ul>



Las variaciones de las deformaciones  $E_r$ ,  $E_t$  y  $E_a$  para los casos restantes reflejan la misma geometría de la Tabla 8 en cada uno de sus resultados, con la diferencia de que los valores de las deformaciones van siendo mayores (Tabla 12) a medida que se va disminuyendo la  $P_p$ .

Tabla 12. Variación de la deformación debida al esfuerzo efectivo  $\sigma$  para los 4 primeros casos de simulación.

CASOS	Base	Producción 1	Producción 2	Producción 3
<b>Deformación Radial [psi]</b>	<p>E, E11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+4.063e+00</li> <li>+3.132e+00</li> <li>+2.202e+00</li> <li>+1.271e+00</li> <li>+3.406e-01</li> <li>-5.900e-01</li> <li>-1.521e+00</li> <li>-2.451e+00</li> <li>-3.382e+00</li> <li>-4.312e+00</li> <li>-5.243e+00</li> <li>-6.173e+00</li> <li>-7.104e+00</li> </ul>	<p>E, E11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+4.169e+00</li> <li>+3.202e+00</li> <li>+2.234e+00</li> <li>+1.267e+00</li> <li>+2.998e-01</li> <li>-6.674e-01</li> <li>-1.635e+00</li> <li>-2.602e+00</li> <li>-3.569e+00</li> <li>-4.536e+00</li> <li>-5.504e+00</li> <li>-6.471e+00</li> <li>-7.438e+00</li> </ul>	<p>E, E11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+4.226e+00</li> <li>+3.234e+00</li> <li>+2.243e+00</li> <li>+1.251e+00</li> <li>+2.589e-01</li> <li>-7.330e-01</li> <li>-1.725e+00</li> <li>-2.717e+00</li> <li>-3.709e+00</li> <li>-4.700e+00</li> <li>-5.692e+00</li> <li>-6.684e+00</li> <li>-7.676e+00</li> </ul>	<p>E, E11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+4.259e+00</li> <li>+3.252e+00</li> <li>+2.244e+00</li> <li>+1.236e+00</li> <li>+2.283e-01</li> <li>-7.795e-01</li> <li>-1.787e+00</li> <li>-2.795e+00</li> <li>-3.803e+00</li> <li>-4.811e+00</li> <li>-5.818e+00</li> <li>-6.826e+00</li> <li>-7.834e+00</li> </ul>

Fuente: Simulación en software comercial Abaqus.

Los signos de cada uno de los valores de la Tabla 11 desde el punto de vista de análisis geomecánico y para el caso de las magnitudes de la deformación total, no indican ni hacen referencia a nada. Los datos allí resumidos al igual que los datos de esfuerzos derivan del promedio de los valores de todos los nodos que se encuentran en la región del mismo color, lo que hace más conveniente el uso de los valores nodo por nodo y no la visión generalizada que se ofrece mediante estos recuadros para cualquier análisis geomecánico que se pretenda realizar.

**5.2.1 Sensibilidad.** La sensibilidad de las deformaciones  $E_r$ ,  $E_a$  y  $E_t$  a la  $P_p$  fue realizada de la misma forma como se llevó a cabo la sensibilidad de los esfuerzos a la  $P_p$ ...véase el numeral 5.1.1... Se tienen los mismos 6 casos de presión de poro, así como los mismos deltas. Se extraen los valores nodo por nodo con el fin de disponer de los valores de deformaciones a  $0^\circ$  respecto al eje de aplicación del  $Sh_{max}$  a 7.2 ft de la cara del pozo, es decir, un valor de  $E_r$ , uno de  $E_t$  y otro de  $E_a$ , para cada caso a 7.2 ft; datos que serán organizados en un diagrama araña que permite visualizar de una mejor manera el efecto de la  $P_p$  en cada uno de ellos. Los resultados para cada caso se encuentran en las figuras 55, 56 y 57.

La parte derecha de las figuras (55, 56 y 57, resaltadas en cada una) representan de una manera más clara el efecto de la disminución de la presión de poro en el estado deformaciones, es decir, se logra observar que a medida que existe un mayor delta de  $P_p$  las deformaciones existentes en la roca se verán afectadas en mayor medida aumentando su valor.

Figura 55. Diagrama araña para Er.

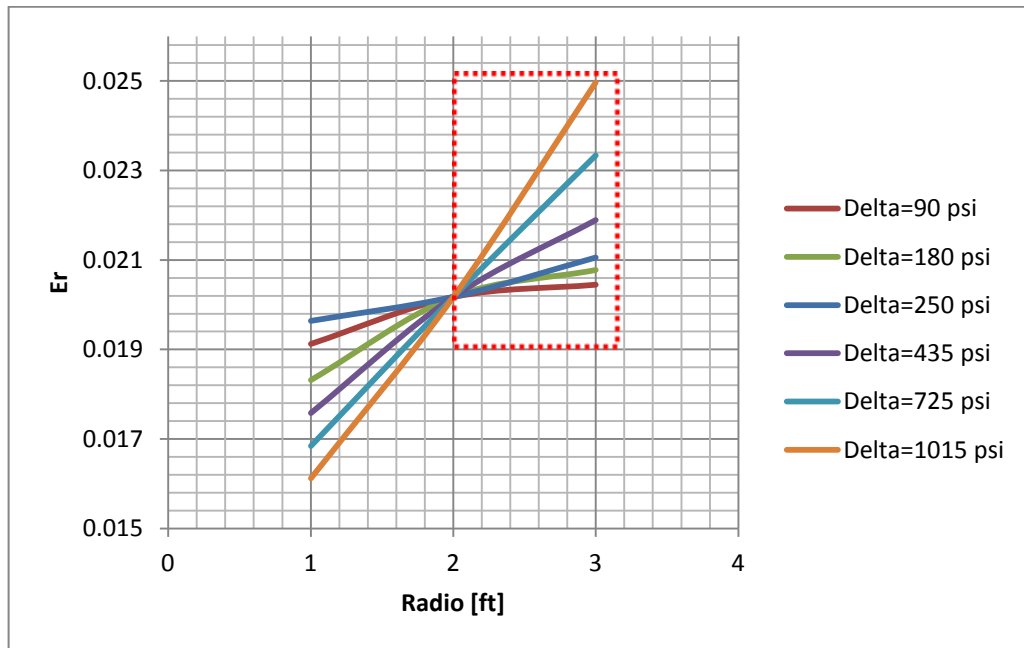


Figura 56. Diagrama araña para Et.

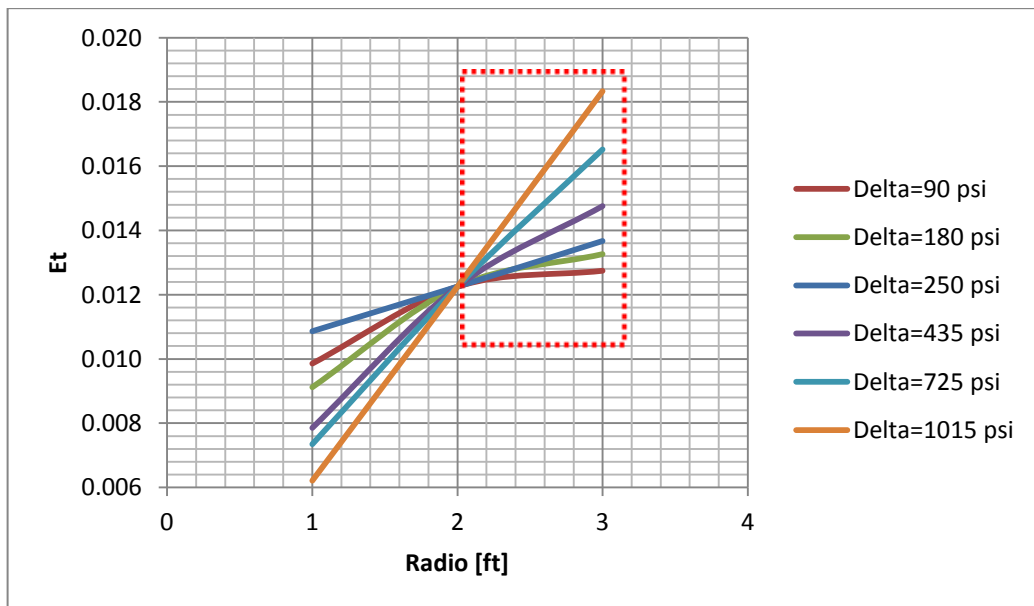
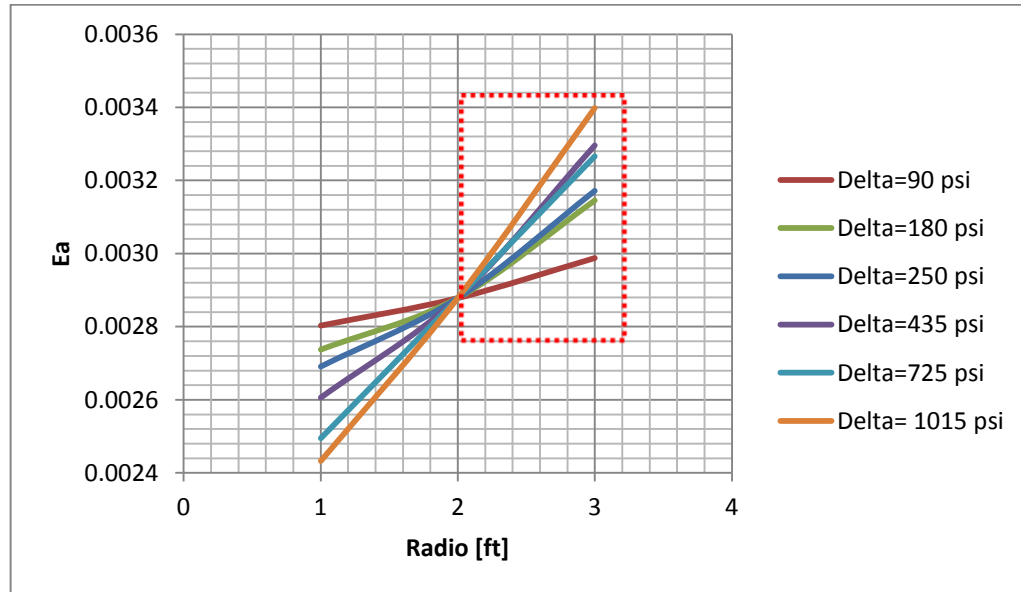


Figura 57. Diagrama araña para  $E_a$ .



### 5.3 VARIACIONES GENERADAS

Con los datos obtenidos mediante el *Field Output Request* de las simulaciones del modelo desarrollado, se pueden calcular los deltas para esfuerzos y deformaciones debidas a la disminución de la presión de poro. Para este análisis se tomaron en cuenta los 9 casos de simulación realizados y se extrajeron los datos de  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_a$ ,  $E_r$ ,  $E_t$  y  $E_a$  a una distancia de 4 ft a partir de la cara del pozo a  $0^\circ$  del eje de aplicación del  $S_{hmax}$ . Los resultados obtenidos fueron organizados en las Tablas 13 y 14, para los esfuerzos efectivos y deformaciones, respectivamente.

La finalidad de la identificación de estos deltas a 4 ft de la cara del pozo, es determinar cuáles de los 6 parámetros estudiados ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_a$ ,  $E_r$ ,  $E_t$  y  $E_a$ ) resultan afectados en mayor medida por la disminución de la presión de poro producto de la producción en el yacimiento.

Tabla 13. Variación de  $\sigma_r$ ,  $\sigma_a$  y  $\sigma_t$  a 4 [ft] de la cara del pozo.

	$\sigma_r$ [psi]	$\sigma_t$ [psi]	$\sigma_a$ [psi]	$\Delta\sigma_r$ [psi]	$\Delta\sigma_t$ [psi]	$\Delta\sigma_a$ [psi]
<b>Caso Base</b>	4299.73	1466.24	4952.62			
<b>Caso 1</b>	4389.31	1557.15	5042.61	89.58	90.91	89.99
<b>Caso 2</b>	4444	1612.71	5097.61	144.27	146.47	144.99
<b>Caso 3</b>	4478.79	1648.08	5132.61	179.06	181.84	179.99
<b>Caso 4</b>	4548.33	1718.81	5202.61	248.6	252.57	249.99
<b>Caso 5</b>	4568.17	1739.02	5222.61	268.44	272.78	269.99
<b>Caso 6</b>	4731.77	1905.69	5387.6	432.04	439.45	434.98
<b>Caso 7</b>	5019	2198.71	5677.6	719.27	732.47	724.98
<b>Caso 8</b>	5305.77	2491.74	5967.61	1006.04	1025.5	1014.99

Tabla 14. Variación de  $E_r$ ,  $E_a$  y  $E_t$  a 4 [ft] de la cara del pozo.

	$E_r$	$E_t$	$E_a$	$\Delta E_r$	$\Delta E_t$	$\Delta E_a$
<b>Caso Base</b>	0.075241	0.039432	0.011938			
<b>Caso 1</b>	0.076125	0.040830	0.012358	0.000884	0.001399	0.000420
<b>Caso 2</b>	0.076744	0.041720	0.012397	0.001502	0.002288	0.000460
<b>Caso 3</b>	0.077164	0.042297	0.012409	0.001923	0.002865	0.000472
<b>Caso 4</b>	0.078049	0.043473	0.012509	0.002808	0.004041	0.000571
<b>Caso 5</b>	0.078337	0.043806	0.012593	0.003095	0.004374	0.000656
<b>Caso 6</b>	0.080848	0.046602	0.012624	0.005606	0.007170	0.000686
<b>Caso 7</b>	0.085703	0.051722	0.012700	0.010462	0.012290	0.000762
<b>Caso 8</b>	0.091214	0.057013	0.012823	0.015972	0.017582	0.000886

Se debe resaltar, que el caso base corresponde a una presión de poro de 1450 [psi] y que los demás representan valores de  $P_p$  en descenso (Tabla 5), es decir, el caso 8 corresponde al valor de  $P_p$  más pequeño (425 [psi]).

Los resultados expuestos en las tablas anteriores (Tablas 13 y 14) permiten verificar el comportamiento del nuevo estado de esfuerzos y deformaciones. En ellas se puede observar que los valores de esfuerzos efectivos y deformaciones debidas a la disminución de la presión de poro aumentan. Luego, el aumento de los esfuerzos efectivos afecta la tasa de deformación, a medida que este aumento es más notorio o lo que es lo mismo la caída de presión de poro es mayor, la deformación resultante también lo es.

También es posible observar que bajo las condiciones del análisis, el esfuerzo efectivo tangencial ( $\sigma_t$ ) es la variable que sufre una mayor alteración debido a la disminución de la  $P_p$ , seguida del esfuerzo efectivo axial y el esfuerzo efectivo radial. Sin embargo, se esperaría que el efecto reflejado en las deformaciones se diera en el mismo orden, pero la mayor alteración la sufre la deformación total debida al esfuerzo tangencial ( $E_t$ ), seguida por la deformación debida al esfuerzo radial ( $E_r$ ) y por último la debida al esfuerzo axial ( $E_a$ ).

## 6. CONCLUSIONES

Para estimar el nuevo estado de esfuerzos y deformaciones debido a la depleción de un yacimiento, se propuso un modelo de simulación elasto-plástico que, aunque siendo de naturaleza conceptual, permitió reflejar el comportamiento del nuevo estado de esfuerzos efectivos y deformaciones debidas a la disminución de la presión de poro en una roca productora.

La calibración del comportamiento del modelo fue realizada sólo en el proceso de perforación, ya que no se cuenta con expresiones analíticas para realizarla en la etapa de producción. Para esta validación se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Kirsch, comparando los esfuerzos efectivos radial, tangencial y axial obtenidos analíticamente con los esfuerzos  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  y  $S_{33}$  de la simulación realizada, obteniendo un ajuste significativo y corroborando así, que el modelo se comporta de una manera adecuada.

Luego de analizar los resultados se pudo observar aumentos significativos en las magnitudes del estado de esfuerzos, lo cual refleja claramente el principio de esfuerzo efectivo y el correspondiente aumento de su magnitud al disminuir el valor de la presión de poro que actúa en el yacimiento. En el caso de las deformaciones estas también sufren incrementos producto de los esfuerzos inducidos y son al igual que los esfuerzos, más sensibles o cambiantes en la región cercana a la cara del pozo.

El efecto de la densidad del enmallado del modelo fue corroborado en la medida en que la calibración del proceso de perforación no era exitosa para tipos de

enmallado más simples, lo que hizo necesario el uso de una geometría de enmallado como la desarrollada en la investigación, para contrarrestar efectos de la extrapolación nodal en la cara del pozo y sus respectivos errores.

El análisis de resultados se realizó para todos los casos en una misma dirección,  $0^\circ$  respecto al eje de aplicación del esfuerzo horizontal máximo en la frontera del modelo. Este tipo de análisis puede realizarse en cualquier dirección, de hecho es posible obtener datos de esfuerzos y deformaciones para cualquier posición dentro del modelo, extrayendo los datos de los respectivos nodos. Esta característica resulta muy positiva por el hecho de poder utilizar esos datos para evaluar diferentes actividades que se podrían realizar post-producción como el fracturamiento hidráulico y la perforación de pozos en zonas depletadas, mejorando en gran medida la efectividad de los procesos.

La zona en la que el efecto de la disminución de la presión de poro se observa en mayor medida es la región cercana a la pared del pozo, según los gráficos arrojados por el simulador estas variaciones específicamente se darían en gran manera a  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , dirección donde fue aplicado el esfuerzo horizontal máximo y a  $90^\circ$  y  $270^\circ$ , donde fue aplicado el valor del esfuerzo horizontal mínimo.

## 7. RECOMENDACIONES

Es necesario, a la hora de realizar análisis geomecánicos en el software comercial ABAQUS, no extraer datos por elementos ya que este tipo de resultados obedece al promedio todos los puntos de integración añadiendo errores a los resultados. Para obtener resultados más precisos estos datos deben ser de cada uno de los nodos del modelo.

Diseñar un modelo de simulación que tenga en cuenta diferentes litologías de la columna estratigráfica, de manera que se dé la simulación de un yacimiento como un todo y no la simulación de un fragmento de roca productora, con el fin de garantizar que el efecto de las demás litologías y las características de las rocas relacionadas con ellas afecten la evolución de los esfuerzos en la zona productora del modelo. Así como la adición de fracturas naturales, fallas y demás características que pueden enriquecer el modelo.

Lograr asociar el flujo de fluidos a los análisis realizados en la herramienta seleccionada, mediante el uso de Abaqus/CFD, subrutinas y la técnica de submodelamiento. Además, poder calcular las propiedades mecánicas de la roca, porosidad, permeabilidad y demás, ante el nuevo cambio en el estado de esfuerzos.

## BIBLIOGRAFÍA

Abaqus 6.11, Simulia [Disponible en línea]. <http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.11/>  
[Fecha de acceso: 22 de Octubre de 2013].

ADDIS, M.A. *The Stress-Depletion Response of Reservoirs*. SPE International 38720 presentado en SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 5-6 Octubre 1997.

ADDIS, M.A. *Reservoir Depletion and Its Effect on Wellbore Stability Evaluation*. En Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34: 3-4, Paper No. 004 (1997).

ARIAS ALFONSO, Jorge Luis y MORALES GOMÉZ, Juan David. *Evaluación del flujo de fluidos y escenarios de explotación de sistemas de pozos cercanos a fallas conductivas mediante simulación numérica*. Bucaramanga, 2012, 147 p. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

BELHAJ, H.A., VAZIRI, H.H. y ISLAM M.R. *Laboratory Investigation of Effective Stresses' Influence on Petrophysical Properties of Sandstone Reservoirs During Depletion*. En Journal of Canadian Petroleum Technology. Vol. 48 (7), (Jul. 2009); p. 47-53.

BOSTROM, B y SKOMEDAL, E. *Reservoir Geomechanics with ABAQUS*. En ABAQUS User's Conference (2004).

CAPASSO, Gaia y MANTICA, Stefano. *Numerical Simulation of Compaction and Subsidence Using ABAQUS*. En ABAQUS User's Conference (2006).

CHEN, Her-Yuan y TEUFEL, Lawrence W. *Reservoir Stress Changes Induced by Production/Injection*. SPE International 71087 presentado en SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Keystone, Colorado, 21-23 May 2001.

COOK J, FULLER J y MARSDEN JR: "Geomechanics Challenges in Gas Storage and Production" presentado en el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas. Rusia, 27 al 29 de junio de 2001.

COOK, John, *et al.* *Las Rocas Importan: Realidades de la Geomecánica*. En Oilfield Review. Invierno de 2007/2008; p. 38-59.

DOORNHOF, Dirk, *et al.* *Compactación y Subsistencia*. En Oilfield Review. Invierno 2006/2007; p. 50-69.

E. PAPAMINCHOS. Constitutive Laws for Geomaterials. En Oil & Gas Science and Technology, Vol. 54 (1999), No. 6, pp. 759-771.

FEKADU, Petros. *Simulating the dynamic response of a soil-pile system using ABAQUS*. Göteborg, Sweden, 2010. Master of Science Thesis in the master's Programme Geo and Water Engineering. Chalmers University of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering. Division of GeoEngineering. Geotechnical Engineering Research Group.

FJAER, Erling, *et al.* *Petroleum Related Rock Mechanics*. Second Edition, Elsevier, Amsterdam, 2008. 515 p.

LEE, M., ECKERT, A. y NYGAARD, R. *Mesh Optimization for Finite Element Models of Wellbore Stress Analysis*. En ARMA, presentado en 45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, Junio 26-29, 2011.

MENG, Fanhong y FUH, Giin-Fa. *Reservoir Depletion Effect on In-Situ Stresses and Mud Weight Selection*. En American Rock Mechanics Association, presentado en 44th US Rock Mechanics Symposium y 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City. June 27–30, 2010.

NARANJO, Abel & SOTO, Carlos M. *Efecto de los Parámetros Geomecánicos en el Fracturamiento Hidráulico de Yacimientos de Hidrocarburos sensibles a esfuerzos*. En Boletín de Ciencias de la Tierra. Número 21 (nov. 2007).

SALEHI, Saeed, HARELAND, Geir y NYGAARD, Runar. *Numerical Simulations of Wellbore Stability in Under-Balanced-Drilling Wells*. En Journal of Petroleum Science and Engineering 72 (2010); p. 229-235.

SAYERS CM y SCHUTJENS PMTM: "An Introduction to Reservoir Geomechanics," *The Leading Edge* 26, no. 5 (Mayo de 2007): 597–601.

SCHUTJENS, Peter, *et al.* *Wellbore Stress Change due to Drawdown and Depletion: An Analytical model and its application*. Presentado en International Petroleum Technology Conference. Dubai, 4 al 6 de diciembre de 2007.

VASQUEZ H, Andrés. Introducción a la geomecánica petrolera [online]. Capítulo 1. 2001. Disponible en <URL:<http://www.youblisher.com/p/106315-Introduccion-Geomecanica/>>

ZOBACK, Mark D. *Reservoir Geomechanics*. Department of Geophysics, Stanford University. United Kingdom at the University Press, Cambridge, 2007. 505 p.