

MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA EVALUAR COLAPSO DE  
REVESTIMIENTO POR ACTIVIDAD TECTÓNICA, APLICACIÓN A UN CAMPO  
COLOMBIANO

SEBASTIÁN SERRANO SERRANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2020

MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA EVALUAR COLAPSO DE  
REVESTIMIENTO POR ACTIVIDAD TECTÓNICA, APLICACIÓN A UN CAMPO  
COLOMBIANO

SEBASTIAN SERRANO SERRANO

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos

Director

DIEGO ARMANDO VARGAS SILVA

MSc. Geofísica

Codirector

HERNÁN DARÍO MANTILLA HERNÁNDEZ

MSc. Geotecnia y Geomecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2020

## DEDICATORIA

*A Dios por darme salud y fortaleza para afrontar los retos que se presentaron en el desarrollo de mis estudios.*

*A mis padres, Luz Mary y Nelson por darme la vida y contribuir a la formación de un ser humano con valores y carácter, inculcándome siempre la importancia del estudio y el sentido de superación, por exigirme siempre dar lo mejor y ser una persona integral, los amo.*

*A mis tíos, Saray y Miguel Ángel, por apoyar de forma incondicional cada uno de mis proyectos y ocurrencias, siempre confiando en mi criterio, los amo.*

*A mis amigos de la universidad, Camila, Clara, Paula, Roberto y Alejandra. Este viaje no habría sido lo mismo sin ustedes acompañándome, por siempre en mi corazón y pensamientos.*

*A mi novia, Laura, por su apoyo en los momentos más críticos en el desarrollo de esta investigación, por su voz de serenidad y confianza, impulsándome cada día a ser mejor.*

*Sebastián*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo de la UIS por generar espacios para el desarrollo de investigaciones en ingeniería que complementan enormemente la formación de profesionales integrales para la industria.

Al profesor Diego Armando Vargas, director del proyecto, por su tiempo, colaboración, paciencia y constante consejo desde el momento de mi ingreso a GIEP como en todo el desarrollo de la investigación.

Al Instituto Colombiano del Petróleo y sus profesionales por brindar el soporte y constantes observaciones, su apoyo fue indispensable para el desarrollo del proyecto.

A mis maestros de la primaria, bachillerato y universidad por inculcar en mi la importancia de las ciencias y las humanidades.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos por formarme como profesional y contribuir a mi desarrollo personal.

A cada una de las personas que hicieron parte de este proceso.

## CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. MARCO REFERENCIAL.....	16
2.1 TUBERÍA DE REVESTIMIENTO .....	16
2.2 TIPOS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO .....	18
2.2.1 Conductor .....	18
2.2.2 Revestimiento de Superficie .....	18
2.2.3 Revestimiento Intermedio .....	19
2.2.4 Revestimiento de Producción .....	20
2.2.5 Liners .....	21
2.3 CARGAS SOBRE EL REVESTIMIENTO.....	22
2.3.1 Cargas de Colapso .....	22
2.3.1.1 Etapa de instalación.....	23
2.3.1.2 Etapa de perforación.....	23
2.3.1.3 Etapa de producción .....	24
2.3.2 Cargas de Estallido.....	24
2.3.2.1 Etapa de instalación.....	24
2.3.2.2 Etapa de perforación.....	24
2.3.2.3 Etapa de producción .....	25
2.4 DAÑOS EN EL REVESTIMIENTO.....	25
2.4.1 Tensión .....	25
2.4.2 Compresión Axial.....	26
2.4.3 Compresión Lateral.....	27
2.4.4 Cizallamiento .....	28
2.5 ESFUERZOS EN LA CORTEZA TERRESTRE .....	32
2.5.1 Esfuerzos principales.....	32
2.5.2 Esfuerzos in situ.....	33

2.5.3 Esfuerzo efectivo.....	33
2.6 REGÍMENES DE ESFUERZOS.....	34
2.6.1 Régimen de falla normal .....	35
2.5.2 Régimen de falla de rumbo .....	35
2.5.3 Régimen de falla inversa.....	36
2.7 FALLAS GEOLÓGICAS.....	37
2.8 ANTECEDENTES DE SIMULACIÓN.....	39
3. SIMULACIÓN GEOMECÁNICA.....	54
3.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE Y MODELO .....	54
3.1.1 Selección del software .....	54
3.1.2 Selección y reproducción del modelo.....	56
3.1.2.1 Geometría del modelo.....	56
3.1.2.2 Propiedades de los materiales.....	58
3.1.2.4 Pasos de simulación .....	60
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO .....	65
4.1 PASO GEOESTÁTICO .....	65
4.2 PASO DE PRODUCCIÓN.....	68
4.2.1. Compactación .....	69
4.2.2 Deslizamiento de falla .....	71
4.2.3 Evaluación de colapso .....	72
5. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL COLAPSO .....	75
6. APLICACIÓN A UN CAMPO COLOMBIANO .....	79
6.1 APLICACIÓN METODOLOGÍA EVALUACIÓN DE COLAPSO .....	79
7. CONCLUSIONES .....	89
8. RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	91

ANEXOS .....95

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Tipos de revestimiento en un programa de casing. ....	17
Figura 2. Cargas de colapso sobre revestimiento cementado. ....	23
Figura 3. Falla por tensión. ....	26
Figura 4. Compresión axial del revestimiento por existencia de cavidad. ....	27
Figura 5. Pozo horizontal sujeto a compactación de yacimiento. ....	28
Figura 6. Cizallamiento sobre un pozo. ....	29
Figura 7. Yacimiento lenticular sujeto a compactación. ....	30
Figura 8. Cizalla y Pandeo de tubería de revestimiento. ....	32
Figura 9. Tensor de esfuerzo principal. ....	33
Figura 10. representación gráfica del esfuerzo efectivo. ....	34
Figura 11. Esfuerzos in situ en régimen de falla normal. ....	35
Figura 12. Esfuerzos in situ en régimen de falla de rumbo. ....	36
Figura 13. Esfuerzos in situ en régimen de falla inversa. ....	36
Figura 14. Deslizamiento de plano de falla. ....	38
Figura 15. Geometría del modelo de simulación definida en el módulo Parte. ....	57
Figura 16. Condiciones iniciales del modelo. ....	61
Figura 17. Configuración del paso Geoestático. ....	62
Figura 18. Paso de producción, disminución de presión de poro. ....	63
Figura 19. Enmallado del modelo. ....	64
Figura 20. Resultado paso Geoestático. ....	66
Figura 21. Esfuerzos in situ al final del paso Geoestático. ....	67
Figura 22. Paso de producción luego de 365 días de producción. ....	69
Figura 23. Evolución del esfuerzo vertical a un año de producción. ....	70
Figura 24. Campo de desplazamientos en la dirección del eje Y. ....	71
Figura 25. Acumulación de esfuerzos en la zona de falla. ....	72
Figura 26. Evaluación de colapso de revestimiento de pozo. ....	73
Figura 27. Campo de desplazamiento. ....	74

Figura 28. Ajuste de zona de falla sobre el modelo de simulación. ....	81
Figura 29. Modulo Propiedades, asignación de materiales.....	82
Figura 30. Malla de simulación ajustada al nuevo ángulo de la zona de falla.....	83
Figura 31. Verificación paso Geoestático.....	84
Figura 32. Resultados de la simulación al finalizar la etapa de producción. ....	86

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Propiedades de la roca y zona de falla. ....	58
Tabla 2. Propiedades mecánicas del cemento. ....	59
Tabla 3. Propiedades mecánicas del acero. ....	60
Tabla 4. Tabulación de propiedades de los materiales. ....	76
Tabla 5. Tabulación de esfuerzos in situ y presión de poro. ....	77
Tabla 6. Tabulación de propiedades de los materiales. ....	80
Tabla 7. Tabulación de esfuerzos in situ y presión de poro. ....	81

## LISTA DE ANEXOS

	Pag.
A. TABULACIÓN DE ANTECEDENTES DE SIMULACIÓN.....	96

## RESUMEN

**TÍTULO:** MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA EVALUAR COLAPSO DE REVESTIMIENTO POR ACTIVIDAD TECTÓNICA, APLICACIÓN A UN CAMPO COLOMBIANO\*

**AUTOR:** SEBASTIAN SERRANO SERRANO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** COLAPSO, REVESTIMIENTO, ACTIVIDAD TECTÓNICA, ESFUERZOS, INTEGRIDAD, FALLA.

### DESCRIPCIÓN:

Los pozos utilizados en la producción de petróleo son estructuras construidas en ambientes complejos, la falla de los revestimientos de un pozo es un fenómeno asociado a las condiciones del medio en el que este se construye. La acumulación de esfuerzos sobre el revestimiento puede tener diversos orígenes, de forma específica, la actividad tectónica representa un problema sobre la integridad del revestimiento. En este estudio se muestra que en un yacimiento sometido a producción de fluidos la compactación de la roca favorece la acumulación de tensiones de cizalla sobre una zona de falla, produciendo el deslizamiento o reactivación de esta estructura geológica, en el modelo se muestra un incremento de 11 MPa durante un tiempo de producción de un año y una tendencia del campo de desplazamiento hacia la zona compactada. La evaluación del colapso bajo esta condición de esfuerzo muestra una deformación sobre la zona del cemento, sin mayor afectación a la región del acero, lo indica que bajo este escenario de esfuerzo el pozo no colapsa, pero disminuye su integridad mecánica.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Diego Armando Vargas Silva, MSc. Geofísica. Codirector: Hernán Darío Mantilla Hernández, MSc. Geotecnia y Geomecánica

## SUMMARY

**TITLE:** NUMERICAL MODELING TO EVALUATE CASING COLLAPSE BY TECTONICS, APPLICATION TO COLOMBIAN OILFIELD\*

**AUTHOR:** SEBASTIAN SERRANO SERRANO\*\*

**KEY WORDS:** COLLAPSE, CASING, TECTONICS, STRESSES, INTEGRITY, FAULT.

### DESCRIPTION:

Wells used in oil production are structures built in complex environments, the casing failure is a phenomenon associated with the environment condition in which it is built. Stress accumulation on casing can have several origins, specially, tectonic activity represents a problem on casing integrity. This study shows that in a reservoir subjected to fluid production, rock compaction generates the accumulation of shear stresses on a fault zone, producing sliding or reactivation of this geological structure. The model shows an increment of 11MPa during the production stage and a trend of the displacements field towards the compacted zone. Casing collapse evaluation is developed under this stress condition performing a deformation on the cement zone, no major impact is registered on steel, indicating that under this stress scenario the well does not collapse, but its mechanical integrity decreases.

---

\*Degree work

\*\* Faculty of Physiochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Diego Armando Vargas Silva, MSc. Geophysics. Co-director: Hernán Darío Mantilla Hernández, MSc. Geotechnical and Geomechanics.

## INTRODUCCIÓN

La simulación numérica representa una herramienta de gran importancia en la evaluación de fenómenos relacionados con la industria de los hidrocarburos, específicamente en el área de la geomecánica, la simulación ha sido utilizada para desarrollar modelos que permiten anticipar la distribución de esfuerzos en las capas de roca en función de actividades como la perforación y la producción de fluidos. Existen diferentes metodologías de simulación que se basan en evaluar fenómenos de deformación relacionados con la magnitud y dirección de los esfuerzos de la roca con el fin de mejorar las prácticas con las que se diseñan cada una de las etapas involucradas en la producción de hidrocarburos. La disminución de la presión de poro está relacionada directamente con la producción de los fluidos del yacimiento, esta situación promueve en la roca una redistribución de esfuerzos a medida que la onda de presión se expande a través del medio poroso. Dicha redistribución de esfuerzos tiene un impacto sobre estructuras geológicas como planos de falla que pueden estar presentes en zonas cercanas a los pozos o intersecar a los mismos. A continuación, se presentan los conceptos para tener en cuenta en la evaluación de colapso de revestimiento a través de un modelo de simulación numérica utilizando las tendencias de modelamiento y metodologías reportadas en la literatura, se muestran los antecedentes de simulación y su aporte al desarrollo de la investigación. La selección del software de simulación se realiza verificando los antecedentes de modelamiento para identificar la herramienta con mayor aplicación en la industria de los hidrocarburos. Se muestra un modelo de simulación que se reproduce a partir de información encontrada en la literatura revisada, de la cual se toma la geometría del modelo, comportamiento mecánico de los materiales y la secuencia de etapas de simulación. Finalmente se propone una metodología para evaluar el colapso de revestimiento a través de un modelo de simulación numérica y se aplica dicha metodología a un campo colombiano.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar el modelamiento numérico para evaluar colapso de revestimiento por actividad tectónica, aplicación a un campo colombiano.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar el estado del arte de la evaluación de colapso de revestimiento utilizando software de simulación numérica, aplicado a la industria de los hidrocarburos.
- Seleccionar el software y modelo de simulación que permita desarrollar el análisis de colapso de revestimiento reproduciendo las condiciones bajo las cuales se presenta este fenómeno de deformación.
- Reproducir el modelo de simulación seleccionado para evaluar el colapso de revestimiento por actividad tectónica y generar una metodología que permita implementar el modelo para evaluar el respectivo colapso.
- Validar el modelo de simulación con información de literatura, para aplicar a un campo colombiano.

## **2. MARCO REFERENCIAL**

A continuación, se presenta la revisión de los conceptos utilizados para el desarrollo de este proyecto, así como también los antecedentes de investigación.

### **2.1 TUBERÍA DE REVESTIMIENTO**

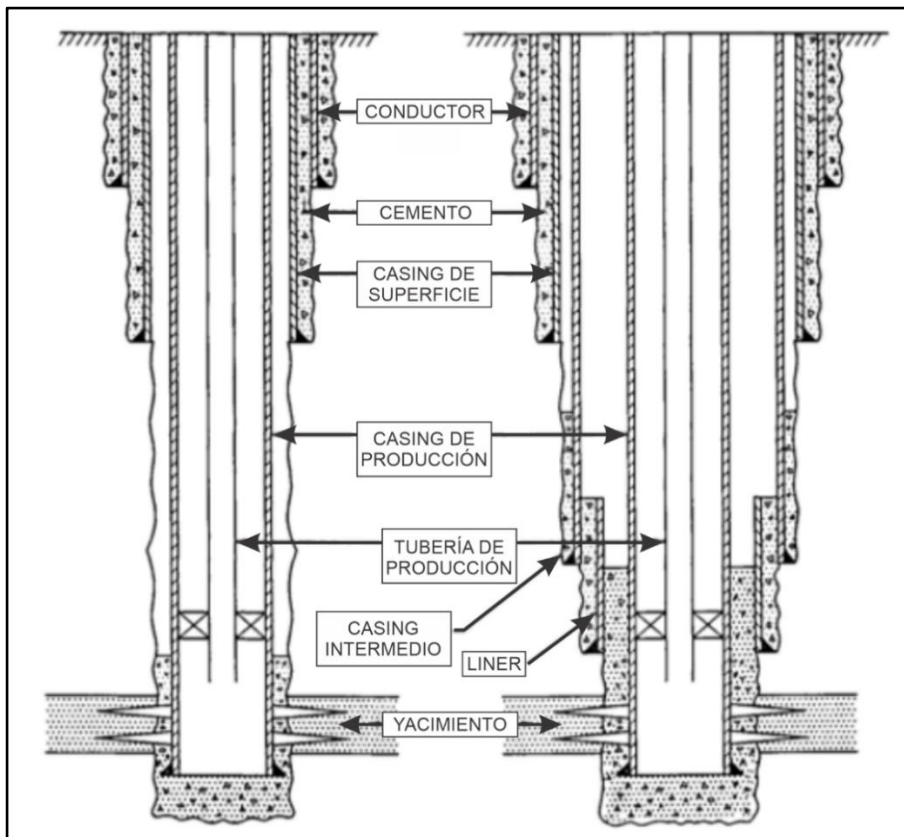
La tubería de revestimiento es el componente estructural más importante de un pozo, está formado por un ensamble de tubos de acero posicionados en profundidades seleccionadas específicamente en función de la presión de poro y presión de fractura de las formaciones a perforar, el comportamiento geomecánico de la zona, problemas de estabilidad estructural, experiencias de perforación previas en la zona en donde se desarrolla la operación, regulaciones ambientales, políticas de la compañía operadora, entre otras consideraciones.

A continuación, se presentan las funciones principales del revestimiento de un pozo:

- Dar soporte mecánico a las paredes del pozo para evitar derrumbes y colapso de formaciones de baja resistencia como lutitas fisibles o rocas de baja cementación, asegurando que el agujero se mantenga estable.
- Proteger acuíferos someros para evitar la contaminación de aguas subterráneas por contacto con fluidos de perforación, completamiento o producción.
- Aislar formaciones sobrepresionadas o zonas de alta pérdida de lodo, con el fin de asegurar el control del pozo y así desarrollar de forma segura la perforación de las siguientes secciones.

- Confinar la producción en pozos que atraviesan varias formaciones saturadas con fluidos incompatibles que podrían causar problemas futuros como precipitación de escamas minerales o daño a las formaciones productoras.
- Asegurar un conducto de dimensiones conocidas para correr herramientas de intervención o mantenimiento de pozo.

Figura 1. Tipos de revestimiento en un programa de casing.



Fuente: RAHMAN, S.S y CHILINGARIAN, G.V. Casing Design Theory and Practice. Países Bajos: ELSEVIER SCIENCE B. V., 1995, 2 p. ISBN: 0-444-81743-3.

## 2.2 TIPOS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

La tubería de revestimiento puede clasificarse de acuerdo con la profundidad en la que la sarta se posiciona. Un pozo siempre estará completado con varias secciones de tubo dependiendo de las necesidades de estabilidad, protección ambiental, regulaciones gubernamentales, configuración geológica, entre otras. Estas consideraciones se tienen en cuenta durante el diseño y planeación de la operación. Las diferentes secciones del revestimiento son: Conductor, Revestimiento de Superficie, Revestimiento Intermedio, Revestimiento de Producción y Liners.

**2.2.1 Conductor.** Es la primera sección del pozo, este puede ser instalado realizando una perforación previa en la locación y cementando hasta la superficie o hincarse en el terreno. La función principal de este revestimiento es dar estabilidad a las formaciones someras que tienden a ser incompetentes, y servir como guía para la perforación de las secciones siguientes. De acuerdo con Byron<sup>1</sup> las profundidades de asentamiento pueden variar dependiendo de las condiciones del terreno, lo usual es que se ubique entre 50 a 100 pies de profundidad, sin embargo, en zonas con formaciones someras muy inestables el revestimiento conductor puede alcanzar profundidades de entre 200 a 500 pies.

**2.2.2 Revestimiento de Superficie.** Es la siguiente sección del pozo. La función principal de esta sección de revestimiento es aislar y proteger acuíferos someros para evitar la contaminación por contacto con fluidos de perforación, completamiento o producción. Ya que esta sección es perforada a profundidades someras en donde las formaciones normalmente son mecánicamente débiles, su instalación sirve para dar soporte mecánico a las formaciones que atraviesa el pozo

---

<sup>1</sup> BYROM, Ted. Casing and Liners for Drilling and Completion - Design and Application. 2 ed. Reino Unido: ELSEVIER. 2015, 46 p. ISBN: 978-0-12-800570-5

y así evitar la generación de derrumbes y colapso del agujero. Con el completamiento del casing de superficie se asegura que la perforación de la siguiente sección se realizará bajo condiciones seguras y sin fracturar las formaciones ya revestidas con el nuevo peso de lodo. Normalmente este revestimiento se cementa hasta la superficie y sobre él se instala el sistema de válvulas preventoras BOP.

**2.2.3 Revestimiento Intermedio.** Corresponde a la sección de revestimiento utilizada para aislar zonas problemáticas que puedan estar presentes entre la profundidad del revestimiento de superficie y la zona objetivo o yacimiento. En el Manual de Perforación de IADC<sup>2</sup> se mencionan a las zonas problemáticas como formaciones con presiones anormales con potencial de generar sobrepresiones en el pozo o por el contrario producir pérdidas de fluido de perforación, secciones con hinchamiento de arcillas que provocan agujeros apretados, zonas de lutitas fisibles con alta producción de derrumbes e inestabilidad de pozo, formaciones parcialmente depletadas en las que se generan pegas diferenciales, formaciones químicamente corrosivas, capas de sal con comportamiento plástico, entre otras.

Un buen diseño de pozo debe tener en cuenta la mayor combinación de situaciones problemáticas posibles cuando se selecciona la profundidad de asentamiento de esta sección. Por efectos económicos, se podría utilizar un liner en lugar de una sarta completa, pozos muy problemáticos pueden contener varios revestimientos intermedios o varios liners.

---

<sup>2</sup> International Association of Drilling Contractors (IADC). IADC Drilling Manual. 12 ed. Estados Unidos: 2015, CT-2 p, vol. 1. ISBN: 978-8-9915095-0-8

**2.2.4 Revestimiento de Producción.** Es el revestimiento de pozo que se sienta después de la perforación de la última sección y a través del cual se corre la tubería de producción por donde se mueven los fluidos desde el yacimiento a la superficie. “En pozos convencionales, el casing de producción se sitúa generalmente algunos pies por debajo del intervalo productor, es común detener la perforación y acondicionar el fluido antes de llegar a la formación productora para reducir el daño a la formación.”<sup>3</sup>

El revestimiento de producción estará expuesto a condiciones más complejas que las secciones anteriores del pozo, y de forma particular la sección que compete al yacimiento; dicha sección recibirá el impacto de los cambios que sufra la formación durante el agotamiento de la presión del yacimiento, debe ser compatible con los fluidos de la formación y soportar las condiciones de presión y temperatura, aislar el intervalo productor, facilitar el mantenimiento del pozo y mantener su integridad estructural durante toda la vida de producción.

El tamaño del revestimiento de producción se selecciona teniendo en cuenta los siguientes parámetros<sup>4</sup>:

- Potencial de producción del pozo y tamaño de la tubería de producción.
- Posibilidad de un completamiento múltiple.

---

<sup>3</sup> SIMPSON, David A. PRACTICAL ONSHORE GAS FIELD ENGINEERING. Estados Unidos: ELSEVIER. 2017, 108 p. ISBN: 978-0-12-813022-3

<sup>4</sup> International Association of Drilling Contractors (IADC). IADC Drilling Manual. 12 ed. Estados Unidos: 2015, CT-2 p, vol. 1. ISBN: 978-8-9915095-0-8

- Espacio requerido para equipos de fondo como válvulas de seguridad, equipos de levantamiento artificial, entre otros.
- Mantenimientos y recompletamientos.
- Espacio anular adecuado para permitir la circulación de fluidos.
- Condiciones mecánicas de la roca con potencial de deteriorar el revestimiento.

**2.2.5 Liners.** “Los liners corresponden a cualquier tubo que se cuelgue de algún punto por debajo del cabezal de pozo sobre el casing, cuya longitud no se extiende hasta la superficie. Un liner puede estar cementado completamente para asegurar un sello con el casing anterior o sin cementar, los liners pueden ser tuberías intactas, tuberías ranuradas o tuberías perforadas”<sup>5</sup>. Según el Manual de Perforación de IADC<sup>6</sup> los liners pueden ser instalados con los siguientes propósitos:

- Incrementar la resistencia de la zapata para que así soporte el peso del lodo con el que se perforará la siguiente sección del pozo.
- Aislar zonas problemáticas.
- Minimizar la longitud de los diámetros reducidos en el agujero para superar los posibles efectos adversos en la hidráulica de perforación y el tamaño de la tubería de perforación a ser utilizada.

---

<sup>5</sup> SIMPSON, David A. PRACTICAL ONSHORE GAS FIELD ENGINEERING. Estados Unidos: ELSEVIER. 2017, 108 p. ISBN: 978-0-12-813022-3

<sup>6</sup> International Association of Drilling Contractors (IADC). IADC Drilling Manual. 12 ed. Estados Unidos: 2015, CT-2 p, vol. 1. ISBN: 978-8-9915095-0-8

- Colgar un liner es más económico que correr una sarta completa de revestimiento desde la superficie.

## **2.3 CARGAS SOBRE EL REVESTIMIENTO**

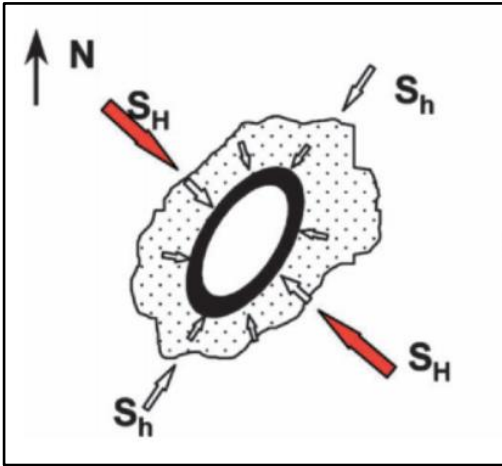
El revestimiento se ve expuesto a diferentes condiciones de esfuerzos desde el momento en el que es instalado en el pozo y posteriormente a lo largo de su vida útil. Cada sección del pozo se verá expuesta a condiciones diferentes dependiendo de la localización de esta y de la configuración geológica de la zona. A continuación, se muestran algunas consideraciones para tener en cuenta en la selección de la resistencia de revestimiento necesaria para que este conserve su integridad durante toda la vida útil del pozo.

**2.3.1 Cargas de Colapso.** Son diferenciales de presión que ocurren sobre la superficie externa del revestimiento. Estos esfuerzos pueden superar la resistencia al colapso del casing provocando inestabilidad en el pozo, haciendo que el revestimiento se deforme o colapse. Las cargas de colapso pueden presentarse durante todas las etapas del pozo, desde su construcción hasta la puesta en producción<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> BYROM, Ted. Casing and Liners for Drilling and Completion - Design and Application. 2 ed. ELSEVIER. 2015, 106 p.

Figura 2. Cargas de colapso sobre revestimiento cementado.



Fuente: KELSO, G, *et al.* Evaluation, Impact, and Management of Casing Deformation Caused By Tectonic Forces In The Andean Foothills, Colombia. Society of Petroleum Engineers (SPE). 2006.

**2.3.1.1 Etapa de instalación.** Este periodo incluye el posicionamiento del casing en la profundidad seleccionada, los trabajos de cementación y pruebas de integridad. En esta etapa se tienen en cuenta los diferenciales de presión que aparecen al correr el casing parcialmente vacío, las cargas que se producen por la diferencia de presión generada por el cemento colocado en el anular y el fluido desplazante al interior de la tubería.

**2.3.1.2 Etapa de perforación.** Las cargas de colapso durante la etapa de perforación ocurren cuando se perfora la sección siguiente al asentamiento y cementación de una sarta de revestimiento anterior. Aquí se tienen en cuenta los diferenciales de presión que ocurren cuando el fluido de perforación es evacuado del agujero, parcial o completamente, por pérdidas de circulación. Si se hace un análisis hidrostático la columna de fluido al interior del pozo puede reducirse de forma considerable o en el peor de los escenarios desaparecer, por lo que los

esfuerzos que actúan sobre la superficie exterior del casing superaran la resistencia al colapso de este, provocando una posible deformación.

**2.3.1.3 Etapa de producción.** Durante esta etapa es importante tener en cuenta el comportamiento mecánico de la formación y la respuesta de la roca a la disminución de la presión de poro como consecuencia de la producción de fluidos. La deformación de la formación causará una acumulación de esfuerzos compresivos sobre el revestimiento de producción, dicha deformación se encuentra en función de las características petrofísicas de la roca, la tasa de producción del pozo, la configuración geomecánica de la zona, presencia de fallas o fracturas, entre otros factores.

**2.3.2 Cargas de Estallido.** Son diferenciales de presión que ocurren sobre la superficie interna del casing, en su evaluación se asume que la máxima presión interna ocurre de forma simultánea con la mínima presión externa sobre el revestimiento. Las cargas de estallido también pueden ocurrir durante todas las etapas del pozo.

**2.3.2.1 Etapa de instalación.** Esta fase tiene en cuenta la colocación de los topes de cemento y el bombeo de tapones de cemento, también como las pruebas de presión que se llevan a cabo para evaluar la integridad de las tuberías. Dichas operaciones someten al revestimiento a condiciones críticas de presión que consecuentemente pueden provocar el estallido.

**2.3.2.2 Etapa de perforación.** Existen dos escenarios en donde se pueda presentar el estallido del revestimiento durante la perforación de la siguiente sección del pozo:

Utilizar la densidad de lodo máxima configurada para la siguiente sección a perforar y la presión generada por una patada.

**2.3.2.3 Etapa de producción.** El revestimiento de producción debe estar diseñado para soportar los esfuerzos generados durante las actividades de producción como las campañas de estimulación, fracturamiento hidráulico y cementaciones remediales.

## **2.4 DAÑOS EN EL REVESTIMIENTO**

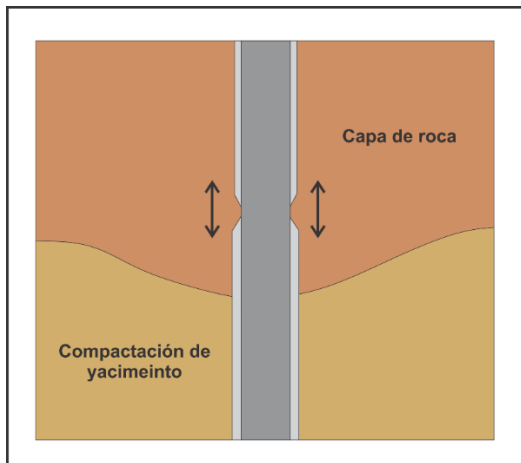
El revestimiento se ve sometido a diferentes configuraciones de esfuerzos que actúan de forma independiente durante las etapas de perforación, producción y la vida útil del pozo de forma general. Durante la etapa de producción es importante comprender la interacción entre el comportamiento mecánico de la roca y los componentes tectónicos presentes a nivel local, y de esta forma identificar el mecanismo con potencial de ocasionar la acumulación de esfuerzos sobre el pozo, para verificar los escenarios de deformación y daño.

Los daños del revestimiento generar una disminución en las características de integridad del conjunto acero-cemento, las cargas que ocasionan el daño se presentan bajo diferentes escenarios durante la producción de los fluidos. A continuación, se mencionan algunas configuraciones de esfuerzos producto de la compactación y subsidencia del yacimiento durante la etapa de producción.

**2.4.1 Tensión.** Una de las funciones del cemento es generar adherencia entre la sarta de revestimiento y la roca, esta condición facilita la transmisibilidad de los

esfuerzos de tensión a los que se ve sometida la roca por la acción del desplazamiento vertical provocado por la compactación. “El revestimiento falla en tensión debido a la elongación de los estratos en la capa de roca producto de la compactación de la formación productora. La cantidad de deformación axial puede ser calculada utilizando modelos de elementos finitos”<sup>8</sup>.

Figura 3. Falla por tensión.



Fuente: KEEDY, C. R, VEEKEN, C. A M y WAHLEITNER, J. P. Experimental modelling of casing deformation in a compacting reservoir. SPE-28090 Society of Petroleum Engineers. 1994.

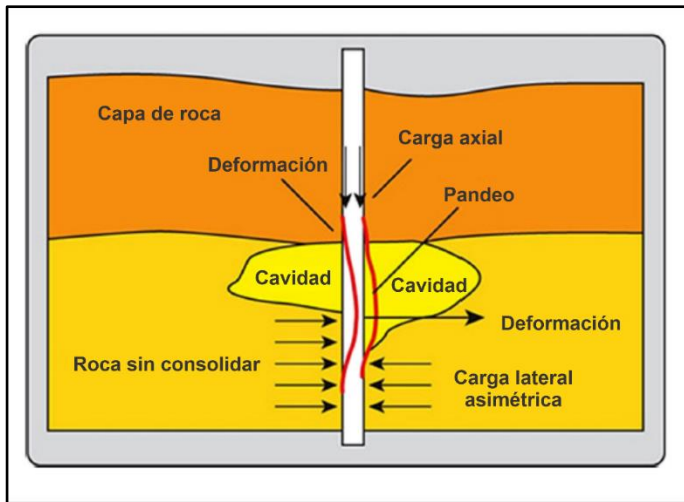
**2.4.2 Compresión Axial.** Este tipo de daño es atribuido a cavidades tras el revestimiento asociadas con la ausencia de cemento, producción de arena y estimulación acida, de acuerdo con lo reportado<sup>9</sup>. Las cavidades tras la sarta de revestimiento facilitan la deformación de la tubería como respuesta a la compresión generada por su propio peso o a la condición de compactación del yacimiento. Este

<sup>8</sup> VEEKEN, C. A. M., WAHLEITNER, J. P. y KEEDY, C. R. Experimental Modeling of Casing Deformation in a Compacting Reservoir. Países Bajos: SPE 28090, Agosto, 1994.

<sup>9</sup> KEEDY, C. R, VEEKEN, C. A. M. y WAHLEITNER, J. P. Experimental Modeling of Casing Deformation in a Compacting Reservoir. Países Bajos: SPE 28090, Agosto, 1994.

tipo de daño impide el acceso al pozo y a bajar herramientas a fondo para toma de registros o acondicionamientos.

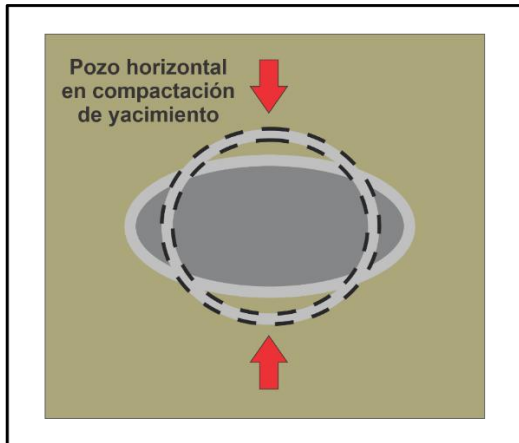
Figura 4. Compresión axial del revestimiento por existencia de cavidad.



Fuente: AADNOY, Bernt., *et al.* Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production. Springer. 2015.

**2.4.3 Compresión Lateral.** El casing se torna elíptico o de forma ovalada cuando se aplican sobre él cargas no uniformes en dirección lateral. Este escenario puede observarse en pozos horizontales o desviados perforados a través de formaciones sensibles a esfuerzos o a perturbaciones en la presión de poro. La ovalación del pozo también puede ser observada en los intervalos de capas de sal en donde el comportamiento plástico de este tipo de rocas genera sobre el revestimiento la acumulación de cargas no uniformes que inducen la deformación, tornando al pozo con una nueva geometría.

Figura 5. Pozo horizontal sujeto a compactación de yacimiento.



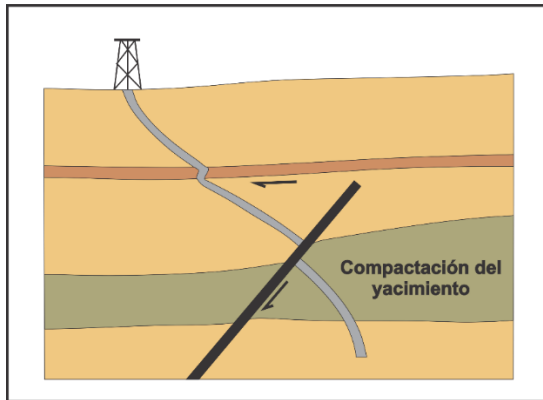
Fuente: KEEDY, C. R, VEEKEN, C. A M y WAHLEITNER, J. P. Experimental modelling of casing deformation in a compacting reservoir. SPE-28090 Society of Petroleum Engineers. 1994.

**2.4.4 Cizallamiento.** Según Veeken, Wahleitner y Keedy<sup>10</sup> el revestimiento se deforma por cizalla cuando es intersecado por una cizalla activa que puede ser una falla o superficie en deslizamiento. El fenómeno ocurre cuando se presenta el movimiento lateral relativo de los estratos de roca a lo largo de planos de esfuerzos cuando se supera la resistencia a la cizalla de los materiales. La deformación en las rocas es transmitida al pozo por la acumulación de esfuerzos sobre la superficie externa del revestimiento, por lo general este tipo de cargas son puntuales y no uniformes.

---

<sup>10</sup> KEEDY, C, VEEKEN, C y WAHLEITNER, J, Experimental modelling of casing deformation in a compacting reservoir. SPE-28090 Países Bajos: Society of Petroleum Engineers. 1994.

Figura 6. Cizallamiento sobre un pozo



Fuente: KEEDY, C. R, VEEKEN, C. A M y WAHLEITNER, J. P. Experimental Modelling of Casing Deformation in a Compacting Reservoir. SPE-28090 Society of Petroleum Engineers. 1994.

Fredrich menciona que: “La falla por cizalla puede ser inducida por desplazamientos horizontales en los flancos de yacimientos lenticulares sometidos a compactación, deslizamientos localizados en planos de estratificación débiles o la reactivación de fallas en la capa de roca”<sup>11</sup>. De acuerdo con Dusseault, Bruno y Barrera<sup>12</sup>, es muy común encontrar deslizamiento relativo ocurriendo en planos delgados individuales, usualmente de algunos centímetros de espesor. De acuerdo con estos autores los escenarios críticos en los que un pozo falla por cizalla son:

- Cizalla horizontal localizada en la interfaz de litologías débiles en la capa de roca, durante la compactación del yacimiento. Este escenario se presenta en

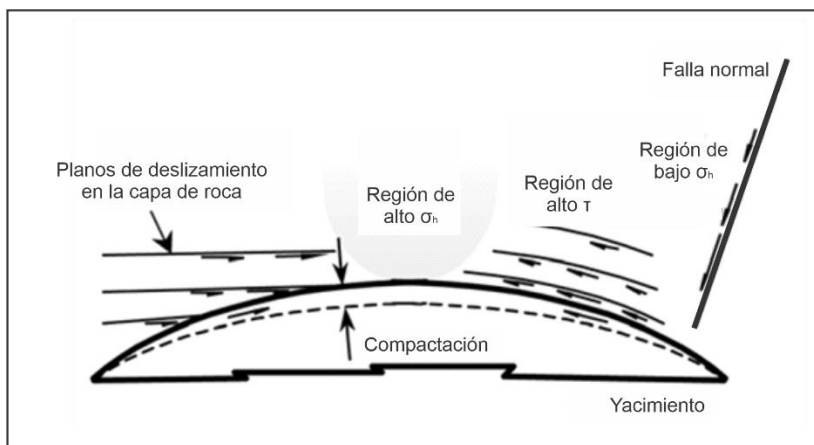
<sup>11</sup> FREDRICH, J. T. Reservoir Compaction, Surface Subsidence, and Casing Damage: A Geomechanical Approach to Mitigation and Reservoir Management. Noruega: SPE/ISRM 47284, Julio, 1998.

<sup>12</sup> DUSSEAULT, Maurice, BRUNO, Michael y BARRERA, Jhon. Casing Shear: Causes, Cases, Cures, SPE Drilling & Completion, June 2001.

formaciones como areniscas con intercalaciones de arcillolitas fisibles sensibles a perturbación que facilitan la formación de planos de deslizamiento.

- Cizalla horizontal localizada en el tope de un intervalo productor o inyector, causada por cambios de volumen en la formación. Los cambios de volumen se refieren a la compactación del yacimiento por la producción de petróleo o la inyección de fluidos que incrementan la presión de poro ocasionando el hinchamiento de la roca
- Pandeo y cizalla en el intervalo productor, principalmente en la zona de los perforados, ocurre por la ausencia de soporte lateral y el cizallamiento en las interfaces litológicas. El cañoneo reduce la integridad del revestimiento en la zona de los perforados por lo que, si se pierde soporte lateral por producción de arena o cementación deficiente la sarta va a tender a doblarse o comprimirse de forma axial.

Figura 7. Yacimiento lenticular sujeto a compactación.



Fuente: DUSSEAULT, Maurice, BRUNO, Michael y BARRERA, Jhon. Casing Shear: Causes, Cases, Cures. Vol. 16, Estados Unidos: SPE, Drilling & Completion, 2001.

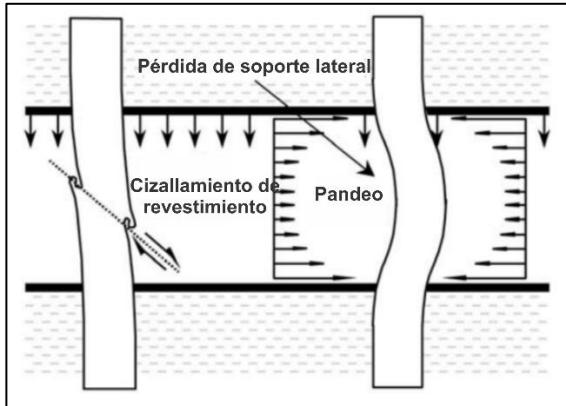
La cizalla localizada en el tope de un intervalo productor se presenta por el contraste entre las propiedades mecánicas de los materiales que se encuentran en contacto en una región específica, este escenario se agudiza por la compactación de uno de los materiales, refiriéndose al contexto de la compactación del yacimiento, el movimiento vertical de la masa de roca modifica la distribución de esfuerzos de forma general en la zona en donde está ocurriendo la producción de los fluidos, de acuerdo a la teoría, el comportamiento de una roca saturada estará controlado por la diferencia entre el esfuerzo externo aplicado y la presión de poro interna<sup>13</sup>.

A medida que la presión de poro disminuye, el contacto intergranular aumenta y así la fuerza de reacción que perciben los granos de roca por la acción del contacto. De esta forma, a medida que la onda de presión se expande, se propaga la compactación y la perturbación del estado de esfuerzos de la roca, que pasa de estar en equilibrio sujeta a esfuerzos in situ generados por la configuración de su propio peso, esfuerzos tectónicos y presión de poro a una condición transitoria provocada por la alteración de uno de estos factores, la presión de poro.

---

<sup>13</sup> Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley, New York. 1923.

Figura 8. Cizalla y Pandeo de tubería de revestimiento



Fuente: DUSSEAULT, Maurice, BRUNO, Michael y BARRERA, Jhon. Casing Shear: Causes, Cases, Cures. Vol. 16, Estados Unidos: SPE, Drilling & Completion, 2001.

## 2.5 ESFUERZOS EN LA CORTEZA TERRESTRE

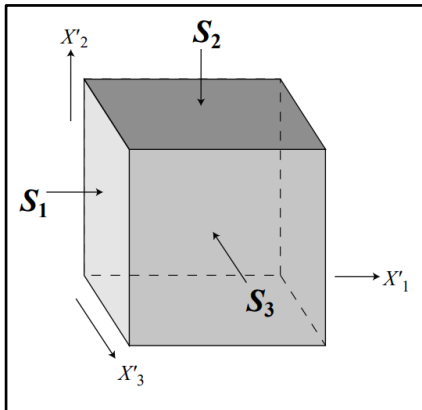
Un esfuerzo es una fuerza que actúa sobre un área determinada, de acuerdo con Zoback<sup>14</sup>, el esfuerzo es un tensor que describe la densidad de fuerza que actúa sobre todos los planos que atraviesan un mismo punto en el espacio.

**2.5.1 Esfuerzos principales.** En el sistema de coordenadas principales los esfuerzos de cizalla desaparecen y el campo de esfuerzos es descrito completamente por los esfuerzos principales  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ . Se definen como los esfuerzos que actúan perpendicularmente sobre las direcciones principales.

---

<sup>14</sup> ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, Estados Unidos: Cambridge University Press, New York, 2007. P 6.

Figura 9. Tensor de esfuerzo principal



Fuente: ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, Estados Unidos: Cambridge University Press, New York, 2007. P 6.

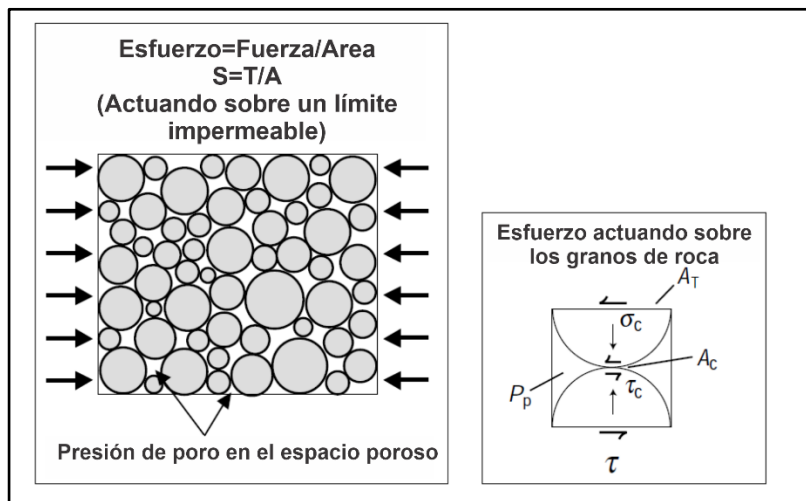
**2.5.2 Esfuerzos in situ.** Son esfuerzos propios de las capas de roca, generados por la acción de la gravedad sobre los materiales rocosos y el comportamiento tectónico de la corteza terrestre. Se consideran esfuerzos compresivos ya que la resistencia a la tensión de las rocas es generalmente baja, por lo que un esfuerzo de tensión de gran magnitud no podría ser soportado por las capas de roca. Se definen tres esfuerzos in situ, Esfuerzo Vertical ( $S_v$ ), Esfuerzo Horizontal Máximo ( $S_{Hmax}$ ) y Esfuerzo Horizontal Mínimo ( $S_{Hmin}$ ).

Uno de los factores para tener en cuenta en el análisis de integridad de un pozo, es el régimen de esfuerzos de la zona en la que se encuentra localizado, de la configuración de esfuerzos dependerá el comportamiento de las superficies de falla.

**2.5.3 Esfuerzo efectivo.** Terzaghi propone en su trabajo de mecánica de suelos, en 1923, que el comportamiento de una roca saturada va a estar controlado por el esfuerzo efectivo, el cual es la diferencia entre el esfuerzo aplicado externamente

sobre una superficie y la presión de poro interna del cuerpo, en este caso la roca. Esta teoría explica la compactación del yacimiento y la acumulación de esfuerzos en la cara del pozo durante la producción del yacimiento. A medida que disminuye la presión de poro aumenta el contacto intergranular y en este sentido la fuerza de reacción como consecuencia de dicho contacto.

Figura 10. representación gráfica del esfuerzo efectivo



Fuente: ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, United States: Cambridge University Press, New York, 2007. P 67.

## 2.6 REGÍMENES DE ESFUERZOS

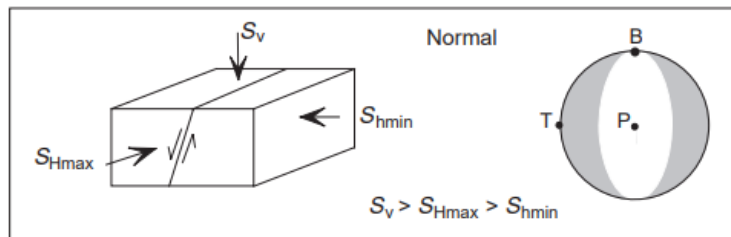
El régimen de esfuerzos es la relación entre la magnitud de los esfuerzos in situ que define el comportamiento tectónico de una región. Se postula un esquema de clasificación en áreas de falla normal, falla de rumbo y falla inversa<sup>15</sup>. El régimen de

<sup>15</sup> Anderson, E. M. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. Edinburgh, Oliver and Boyd. 1951.

esfuerzos se determina organizando los esfuerzos in situ ( $S_v$ ,  $S_{Hmax}$  y  $S_{hmin}$ ) de acuerdo con su magnitud, en el orden de los esfuerzos principales ( $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ ). La determinación del régimen de esfuerzos de forma visual se puede realizar analizando el comportamiento de dos bloques o capas de roca divididos por una zona de falla.

**2.6.1 Régimen de falla normal.** Se presenta cuando el bloque que se encuentra sobre la falla se desliza relativamente hacia abajo respecto al bloque que se encuentra bajo la falla. En la falla normal los esfuerzos in situ se presentan de la siguiente forma  $S_v > S_{Hmax} > S_{hmin}$ .

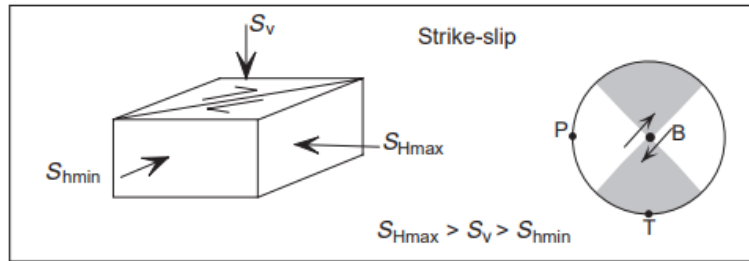
Figura 11. Esfuerzos in situ en régimen de falla normal



Fuente: ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, United States: Cambridge University Press, New York, 2007. P 9.

**2.5.2 Régimen de falla de rumbo.** Este tipo de fallamiento se presenta cuando los bloques de roca se deslizan horizontalmente a través de superficies de falla casi verticales. Los esfuerzos se organizan de la siguiente manera  $S_{Hmax} > S_v > S_{hmin}$ .

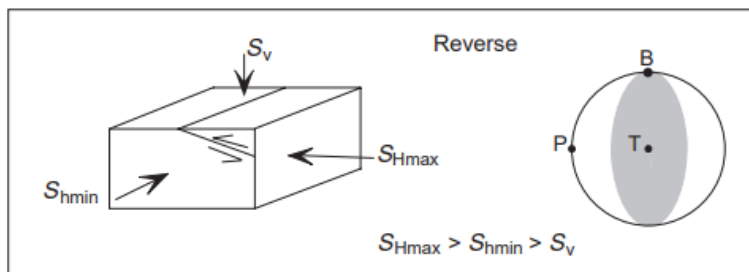
Figura 12. Esfuerzos in situ en régimen de falla de rumbo



Fuente: ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, United States: Cambridge University Press, New York, 2007. P 9.

**2.5.3 Régimen de falla inversa.** El bloque que se encuentra sobre la zona de falla asciende relativamente sobre el bloque que se encuentra bajo el plano de falla, movimiento contrario al régimen normal. La organización de los esfuerzos en este tipo de falla es el siguiente  $S_{Hmax} > S_{hmin} > S_v$ .

Figura 13. Esfuerzos in situ en régimen de falla inversa



Fuente: ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, United States: Cambridge University Press, New York, 2007. P 9.

## 2.7 FALLAS GEOLÓGICAS

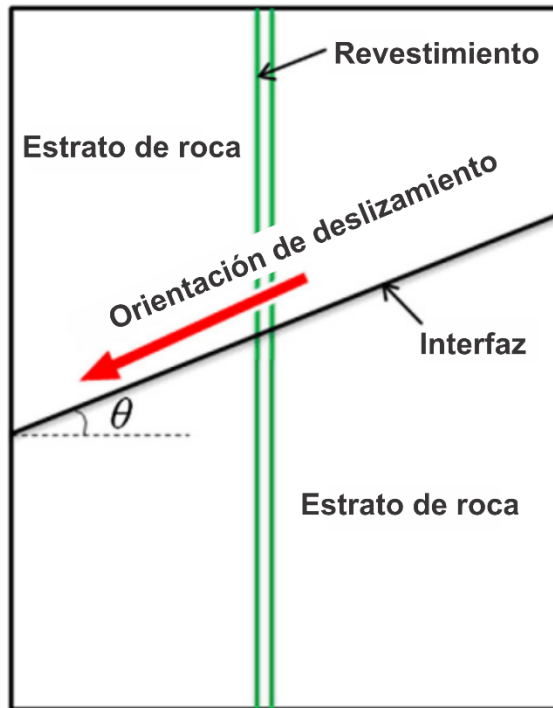
Las fallas son discontinuidades que se presentan en la corteza terrestre a través de las cuales se produce el deslizamiento de bloques de roca. Las fallas están compuestas por un núcleo de baja permeabilidad y una zona de daño fuertemente fracturada de permeabilidad variable<sup>16</sup>. En cuanto a sus propiedades mecánicas, la zona de falla presenta una alta variación en sus características de respuesta a los esfuerzos, a comparación de la roca huésped a través de la cual se propaga. Las fallas pueden extenderse kilómetro o formarse solo en algunos metros, su comportamiento está ligado al régimen de esfuerzos y a la configuración tectónica de la región en donde se localizan. Una falla se deslizará cuando la relación entre cizalla y el esfuerzo efectivo normal que actúan sobre el plano de deslizamiento exceda su resistencia a la fricción.<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> ZHANG, Yanhua, et al. Numerical Modelling of Fault Reactivation in Carbonate Rocks Under Fluid Depletion Conditions, 2D Generic Models with a Small Isolated Fault, Australia: Elsevier, 2016. P 1-12.

<sup>17</sup> ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, United States: Cambridge University Press, New York, 2007. P 3.

Figura 14. Deslizamiento de plano de falla.



Fuente: CHEN, Jinhua, et al. Failure modes of the venthole casing during longwall coal extraction: A case study, China: Key Laboratory of Rock Mechanics in Mechanical Structural Engineering, Chongqing, 2012.

La integridad de un pozo que atraviesa una falla se puede ver reducida por el cizallamiento del plano de deslizamiento cuando este se reactiva por una perturbación en el estado de esfuerzos. En la industria de los hidrocarburos se han desarrollado e implementado metodologías para evaluar el colapso de revestimiento a través de softwares de simulación numérica.

## 2.8 ANTECEDENTES DE SIMULACIÓN

A continuación, se presenta la revisión de los antecedentes de simulación geomecánica para la evaluación del colapso de revestimiento utilizando modelos de simulación numérica.

**KIBBLE, K., *et al.*: “Collapse Strength Analysis of Casing Design Using Finite Element Method” ELSEVIER. 2000.**

En este trabajo se propone un modelo de elementos finitos utilizado para predecir la resistencia al colapso de un revestimiento sujeto a cargas externas. Inician explicando los modos de colapso elástico y plástico bajo una suposición ideal de revestimiento de longitud infinita y espesor despreciable. El colapso de revestimiento es un fenómeno complejo de entender por lo que deben utilizarse métodos numéricos para desarrollar un análisis concreto, en este estudio se construye un modelo de simulación 2D de elementos finitos utilizando el software ABAQUS. Se asume que la falla ocurre por imperfecciones preexistentes la sarta de revestimiento. Los autores mencionan que la descripción del comportamiento constitutivo del revestimiento es crucial para desarrollar un análisis preciso. Finalmente se realiza la validación del modelo con pruebas de laboratorio a tubos de acero comercial.

El aporte de esta investigación es la implementación de ABAQUS como herramienta de simulación con el uso de elementos finitos, además de presentar el modelamiento del acero como material elastoplástico anisotrópico.

**FOSSUM, A. F., FREDICH, J.T.: “Large-Scale Three-Dimensional Geomechanical Modeling of Reservoirs: Examples from California and the Deepwater Gulf of Mexico” Oil & Gas Science and Technology. 2002.**

Se utiliza la simulación geomecánica para administrar el yacimiento, desarrollando un modelo de simulación 3D de elementos finitos en el software JAS3D. En este trabajo se presentan dos casos de estudio, el primero relacionado con yacimientos de aceite negro en el campo Lost Hills, California, en donde se integra la simulación de aceite negro con la simulación geomecánica para investigar las causas del daño del revestimiento de pozo. El segundo caso es el estudio de la integridad de pozos localizados en el Golfo de México, se evalúa el impacto de las formaciones de sal con la deformación del revestimiento. En este proyecto se indica la importancia de entender el comportamiento de las rocas en la simulación, por lo que se presenta un estudio del comportamiento constitutivo de las rocas que componen el ambiente geológico a simular. Finalmente presentan la aplicación del modelo desarrollado y cuestionan futuros desarrollos de la simulación como el desarrollo de modelos constitutivos realistas, la implementación robusta de modelos constitutivos en análisis de elementos finitos, y la estimación de parámetros de la naturaleza heterogénea de las formaciones geológicas, entre otros.

El aporte principal de esta publicación es el modelamiento de la roca y el estudio del comportamiento constitutivo de este tipo de material, los yacimientos están sometidos a condiciones variables de esfuerzos por la variación de la presión de poro por lo que se debe tener claro cuál es su comportamiento bajo un escenario específico de esfuerzos.

**EUSTES, A. W, FLECKENSTEIN, W. W y RODRIGUEZ. W, J.: “Simulation of Collapse Loads on Cemented Casing Using Finite Element Analysis” Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 84566. 2003.**

Los autores de este trabajo inician mencionando las diferentes secciones del casing de un pozo, mencionando la forma tradicional en la que se diseña el revestimiento. El objetivo de la investigación es determinar los esfuerzos inducidos sobre el revestimiento bajo diferentes escenarios de colapso. Construyen un modelo de simulación en dos dimensiones utilizando el software ANSYS. La simulación en dos dimensiones es utilizada ya que se asume que el colapso es un fenómeno de deformación plana. Este estudio se divide en tres focos de análisis, en donde el revestimiento no tiene soporte lateral, análisis de revestimiento cementado y el comportamiento entre formación-cemento-sarta. Finalmente se concluye que las características de la deformación del revestimiento dependen del comportamiento mecánico de la roca.

De este estudio se identifica la incorporación de roca, cemento y acero como un solo sistema, además de las características mecánicas que se le dan al cemento y al acero, estos materiales se asumen como elásticos.

**BERGER, A., et al.: “Effect of Eccentricity, Voids, Cement Channels, and Pore Pressure Decline on Collapse Resistance of Casing” Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 90045. 2004.**

En esta investigación se investigan los efectos de las cargas no uniformes sobre el revestimiento producto de trabajos deficientes durante el completamiento del pozo, es así como se abordan cuatro escenarios posibles (revestimiento no centrado,

cavidades en el cemento y la formación, canales en el cemento y depleción en las cavidades) se usa un modelo en dos dimensiones a través del software ANSYS, validando con soluciones analíticas. Se menciona que un mejor entendimiento de estas condiciones en fondo de pozo ayudará a analizar los esfuerzos de colapso inducidos sobre las tuberías por lo que se tomaran mejores acciones en el diseño del revestimiento. El estudio menciona la utilidad del análisis de elementos finitos como una herramienta de solución de problemas de ingeniería en donde se divide un cuerpo en un número finito de elementos, se calcula el desplazamiento de estos, se estima la deformación y finalmente se evalúan los esfuerzos mediante relaciones esfuerzo-deformación.

El aporte principal de este trabajo es mostrar el impacto de las cargas puntuales no uniformes sobre la integridad del revestimiento de pozo y como pueden causar deformaciones en el pozo si superan la resistencia mecánica del revestimiento.

**ASBIL, W. T, Last, N. C. y PALTILLO, P. D.: “Effect of Nonuniform Loading on Conventional Casing Collapse Resistance” Society of Petroleum Engineers Paper SPE 79871-PA. 2004.**

Este trabajo presenta un estudio de las posibles causas del aumento de los esfuerzos de colapso y la disminución de la resistencia de las tuberías de revestimiento de los pozos localizados en el pie de monte colombiano. Para analizar el efecto de cargas no uniformes sobre el revestimiento se construyó un modelo de elementos finitos en dos dimensiones utilizando el software ABAQUS. El modelo consta de un cuarto de circunferencia que representa la tubería, y una placa que genera los esfuerzos de colapso sobre la superficie de la sarta. Los autores utilizan una validación experimental para corroborar los resultados del modelo, concluyendo que los defectos de fábrica de los tubos y las ovalaciones presentadas durante y

después de la instalación en pozo, por sí solas no pueden generar grandes deformaciones, pero si disminuyen la resistencia al colapso del revestimiento.

El aporte de esta investigación es el uso de ABAQUS como herramienta de simulación para evaluar el colapso de revestimiento, la utilidad de modelar una sección de la geometría del modelo por la simetría del dominio de simulación y el comportamiento constitutivo del casing como material completamente elástico.

**KELSO, Gary., et al.: “Evaluation, Impact, and Management of Casing Deformation Caused by Tectonic Forces in the Andean Foothills, Colombia” Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 74560-PA. 2006.**

La investigación fue llevada a cabo para crear una estrategia de evaluación de integridad de pozos para mejorar la planeación. En un principio la evaluación de la deformación del revestimiento se hizo monitoreando los pozos corriendo registros caliper para medir la ovalación del casing, se encontró que la deformación estaba alineada con la configuración tectónica de la región, y las fallas predominaban en la formación Carbonera Inferior, lo que permitió diferir que la pérdida de integridad de los pozos se debía al comportamiento geomecánico de la zona. Este trabajo abordó dos escenarios en donde el casing no está cementado y en donde posee una buena cementación, el análisis se llevó a cabo utilizando un modelo de elementos finitos de dos dimensiones en donde se simuló un cuarto de circunferencia que representaba la sarta de revestimiento y una placa que representa la formación. Finalmente se concluye que los métodos convencionales para el diseño y evaluación del revestimiento son conservadores y no describen escenarios reales. Además, se menciona que el uso de doble sarta cementada sigue siendo la solución más práctica para conservar la integridad de los pozos en la zona del pie de monte colombiano.

De este artículo se identifica el impacto del comportamiento tectónico en zonas específicas sobre la integridad de los pozos y de cómo la generación de cargas puntuales provoca deformaciones en el pozo.

**AMAYA, R., et al.: “Casing Collapse Study on Block VI Wells: Casabe Field” Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 122956. 2009.**

Los autores de este trabajo desarrollaron un análisis estadístico de la deformación en los pozos del campo Casabe con el fin de encontrar la posible causa de la pérdida de integridad y posterior colapso del revestimiento. El estudio inicia con un análisis estadístico de la distribución de las fallas en los pozos productores e inyectores, en donde se encontró que la deformación ocurría en proporciones muy cercanas. A continuación, se realizó el mismo ejercicio con pozos en estado inactivo, activo y abandonado, se analizaron las fallas en el revestimiento durante las tres campañas de perforación que se habían llevado a cabo en el campo hasta la actualidad, además se hizo un estudio de la frecuencia de colapso a nivel estratigráfico, sin encontrar ninguna tendencia de deformación. Durante el estudio estratigráfico se encontró que los pozos que sufrían mayor afectación atravesaban las formaciones que estaban sometidas a inyección de agua.

Un análisis probabilístico posterior, en donde se cruzó información de la fecha de reporte de la falla y los años de servicio del pozo, mostraron que hubo un pico de deformaciones durante el inicio de la campaña de inyección de agua, y que la falla de los pozos se agudizaba durante bombeos extensivos. La investigación concluye recomendando un diseño de pozo utilizando el software TDAS, para obtener un estado mecánico ideal con una vida de servicio estimada de 20 años.

**SHEN, Xinpu: “Subsidence Prediction and Casing Integrity with Respect to Pore-Pressure Depletion with 3-D Finite-Element Method”. Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 138338. 2010.**

El objetivo general de este trabajo es investigar la subsidencia de la formación productora del campo Compos en Brasil, con el fin de relacionar este fenómeno de con la falla de los revestimientos de pozo y diseñar la presión de fondo fluyente apropiada, utilizando los resultados de una simulación numérica. Este trabajo se desarrolla a través del software ABAQUS, se construye un modelo de simulación global a escala de campo, en donde se pretende configurar las condiciones de frontera de un submodelo a escala de pozo, con el fin de mejorar la exactitud de la simulación.

El modelo global inicia con la definición de la geometría y asignación de profundidades y propiedades de las rocas, este análisis usó el criterio modificado de Drucker-Prager para describir el comportamiento mecánico de las rocas. Posterior a esto se carga el modelo con la presión hidrostática de la capa de agua en la parte superior, se define la aceleración de la gravedad para configurar el esfuerzo vertical que se genera y por último como condición de frontera de las caras laterales se asigna un encastre. Se corre un paso geoestático para lograr el equilibrio de esfuerzos y poder verificar las zonas de mayor deformación para evaluar la integridad de un revestimiento en esta sección.

La estimación de la integridad del pozo se hace mediante un submodelo que utiliza las condiciones de frontera obtenidas como resultado numérico de la simulación global del campo. El submodelo tiene varios pasos: Establecer el equilibrio de esfuerzos mediante un paso geoestático, simular la perforación del pozo removiendo los elementos de roca que hacen parte de la cavidad del agujero y

definir una presión de lodo en las paredes del pozo de forma temporal, ensamblar elementos que representen el cemento y el revestimiento, finalmente se define una presión de fondo fluyente y se calcula la deformación del pozo.

El aporte de este estudio es el uso de ABAQUS como herramienta de simulación para la evaluación de colapso de revestimiento, el uso de una serie de etapas de simulación que capturan el equilibrio de esfuerzos in situ y la posterior perturbación de la presión de poro que genera la redistribución de esfuerzos.

**ERGOU, Liang., et al.: “Analysis on Collapse Strength of Casing Wear”  
CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, Vol. 26, N°3, p. 613-619.  
2013.**

En este trabajo se investigan los mecanismos de falla y los factores asociados a la pérdida de resistencia al colapso del revestimiento, por medio del análisis de elementos finitos, validando el modelo con resultados de experimentos físicos. La simulación se hace por medio del software MSC/Nastran, se construye un modelo en dos dimensiones de media circunferencia, se asume que existe un mecanismo de desgaste del revestimiento por la fricción de la sarta de perforación durante la perforación de la siguiente sección del pozo. Al asumirse una deformación en el plano, se utiliza la simetría para simular únicamente media circunferencia, de la misma forma se asume que el desgaste del casing se presenta uniformemente a lo largo de la dirección axial. En este trabajo se concluye que el desgaste en el revestimiento disminuye la resistencia al colapso, esto se deduce del desplazamiento de los nodos en la zona desgastada y la zona intacta de la pared interna del tubo. Además, se menciona que un radio de desgaste mayor tiene menor impacto sobre la resistencia al colapso del casing.

El aporte de este estudio es el análisis de colapso a través de una geometría simétrica en la que se utiliza únicamente una mitad del dominio de simulación, se muestra el comportamiento mecánico del acero de revestimiento como un material elástico sometido a condiciones de colapso.

**GUTIERREZ, E. S.: “Identificación de Problemas de Colapso en Revestimientos de Pozos, Ocasionados por Efectos Geomecánicos. Caso de Estudio: Pozo de un Campo Colombiano” Universidad Industrial de Santander. 2013.**

El propósito de este trabajo es demostrar mediante un modelo 3D de elementos finitos en el software ABAQUS, el mecanismo de falla de un pozo sujeto a esfuerzos de colapso. En este proyecto se realiza la simulación global del yacimiento, para encontrar las condiciones de esfuerzo a las cuales se ve sometido el pozo, posteriormente se desarrolla un submodelo de simulación de la región del del pozo y así se evalúe el colapso. Se inicia simulando el yacimiento con un paso geoestático, en el que se pretende alcanzar el equilibrio entre el estado de esfuerzos y las condiciones de frontera. En este paso la deformación debe tender a cero gracias al equilibrio de esfuerzos. En la etapa siguiente se define la región del submodelo, se simula la perforación retirando los elementos de la matriz de roca que representan el agujero, se cambia la malla de la superficie a conveniencia. En el siguiente paso se define una presión de lodo sobre la superficie interna del pozo y se verifican las reacciones sobre la matriz de roca. Se ensamblan las partes correspondientes al cemento y revestimiento y finalmente se utiliza un paso de tipo suelo para poner a producir el pozo por medio de la disminución de la presión de poro. En este trabajo se tiene en cuenta el tipo de cañoneo del pozo para obtener resultados más cercanos a la realidad.

El aporte principal de este trabajo es la presentación de las etapas de simulación utilizadas en el software ABAQUS, en donde se parte de una etapa de equilibrio estático entre los esfuerzos in situ y la presión de poro, seguida de la perturbación de la presión de poro por la producción de fluidos y finalmente la evaluación e colapso en una geometría independiente.

**AADNOY, Bernt., et al.: “Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production”. SPRINGER. 2015.**

El objetivo general de esta investigación es desarrollar un modelo de simulación que permita investigar las causas del colapso de revestimiento en una formación específica en un campo del sudeste de Irán. El arenamiento es uno de los principales desafíos del campo, por medio de un análisis de elementos finitos utilizando el software ABAQUS se construye un modelo de simulación que permita evaluar el grado de deformación producido por la producción de arena.

En la investigación se desarrolló un modelo de mecánica de rocas para conseguir la información necesaria el área de influencia del campo, también para identificar la respuesta de las formaciones a los escenarios de perforación y producción, este modelamiento mecánico se hizo por medio del estudio de núcleos de roca y la toma de registros de pozo, con el fin de conseguir los módulos mecánicos dinámicos y poder transformarlos a estáticos a través de correlaciones de la literatura. Se genera entonces un modelo en 3D utilizando el software ABAQUS, en el que se permite estudiar la interacción entre roca-cemento-sarta con el fin de evaluar la falla del revestimiento. Se menciona de forma particular que las rocas se modelaron utilizando el principio de plasticidad generalizada para resaltar su sensibilidad a los cambios de presión, en el enmallado se utilizaron elementos de tipo Presión de Fluido/Esfuerzo y el criterio de Drucker-Prager para modelar la formación.

La simulación consta de tres pasos, generación del equilibrio de esfuerzos con un paso de tipo geoestático. Este paso lo sigue la perforación del pozo con un paso de tipo suelo, en este trabajo se asume que el pozo se perfora y cementa de forma inmediata, a continuación, se define una presión hidrostática de lodo en el interior del revestimiento. Finalmente se simula la reducción de la presión de poro con el fin de simular la producción de fluidos. El modelo revela que esfuerzos excesivos aplicados sobre las cercanías al pozo incrementan el potencial de falla de cizalla, arenamiento y daños en la sarta de revestimiento.

El aporte principal de este trabajo de investigación es el uso de la herramienta ABAQUS para la evaluación de colapso y las etapas en las que se desarrolla la simulación, en donde se utiliza en equilibrio geoestático y la producción de fluidos para relacionar el comportamiento mecánico de la roca con el colapso de revestimiento.

**SAMUEL, Robello y WANG, HanYi.: “3D Geomechanical Modeling of Salt-Creep Behavior on Wellbore Casing for Presalt Reservoirs” Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 166144-PA. 2016.**

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo de simulación en 3D para predecir la pérdida de integridad en un pozo asociada al comportamiento de formaciones de sal. Este trabajo asocia las propiedades mecánicas de la roca, cemento y sarta con la variación de temperatura en el pozo, además del estado de esfuerzos in situ. El revestimiento de los pozos se ve afectado por la acumulación de esfuerzos producto del movimiento de capas de sal.

En el modelo de simulación interactúan tres secciones principales, la formación de sal, el cemento y la sarta de revestimiento. La simulación inicia con el equilibrio de esfuerzos a través de un paso geoestático, seguido del proceso de perforación en donde se eliminan los elementos de la roca que representan al pozo, se define una presión de lodo sobre la cara del pozo y una condición de temperatura baja durante 100 días de perforación. El paso siguiente se denomina proceso de transición en donde se produce una primera perturbación de la presión de poro antes de la producción. Finalmente se simula la producción del pozo durante 500 días con una condición de temperatura alta. Se evalúan los resultados de la simulación y luego se propone una metodología para diseñar el completamiento de los pozos.

**ABDIDEH, Mohammad, y HEDAYATI, Soheila.: “Analytical and Numerical Study of Casing Collapse in Iranian Oil Field”. SPRINGER 2017.**

Los autores de este artículo inician mencionando al desplazamiento de formaciones de sal y lutitas como uno de los mecanismos de colapso de revestimiento, el desplazamiento genera la acumulación de cargas que producen la acumulación de esfuerzos. En la investigación se utiliza un modelo de simulación de elementos finitos en dos dimensiones en el software ABAQUS para verificar el impacto de este escenario sobre la integridad del pozo. Durante la investigación se encuentran dos mecanismos principales de acumulación de esfuerzos, las cargas localizadas producto de trabajos deficientes de completamiento y la generación de esfuerzos de cizalla en la interfaz de dos formaciones con diferencias marcadas en sus características mecánicas. Se menciona también que es muy importante la forma en que el esfuerzo se transmite desde la formación hacia el revestimiento ya que esto define el impacto que dicha carga tendrá sobre la resistencia mecánica del casing.

La primera etapa de la simulación consiste en determinar las propiedades mecánicas de la formación como las constantes elásticas y también características como la porosidad, presión de poro, esfuerzos principales y resistencia a la compresión uniaxial. Esta información se obtuvo a través de la revisión de registros sísmicos y de densidad, con el fin de encontrar los valores necesarios para utilizar ecuaciones empíricas. Posteriormente se construye un modelo de elementos finitos en dos dimensiones a través del software ABAQUS. Se inicia definiendo las dimensiones del modelo, se especifican las propiedades de los materiales, para este modelo en particular se asumió a la formación y al revestimiento como materiales elastoplásticos y al cemento como completamente elástico. Se carga el modelo con los esfuerzos in situ y se corre la simulación. En los resultados se observa que en las formaciones con mayor contenido de sal se superaba la resistencia mecánica del revestimiento por lo que se producía la deformación.

El aporte principal de esta investigación es el uso de ABAQUS como herramienta de simulación a través de una geometría en dos dimensiones, en donde se utilizan una serie de pasos de simulación que tienen en cuenta el equilibrio geoestático y la producción de fluidos con la acumulación de esfuerzos sobre el revestimiento de pozo.

**ABDIDEH, Mohammad, y HEDAYATI, Soheila.: “3D Geomechanical Modeling of Casing Collapse in Plastic Formations (Cap Rock of Hydrocarbon Reservoir)” 2018 Natural Resources Research, p. 273-286**

El propósito de este trabajo es investigar el esfuerzo producido por la deformación de una formación de sal por medio de la simulación numérica y verificar el impacto sobre la integridad de un pozo. Se menciona que una parte fundamental del modelamiento es la obtención de la información mecánica de los materiales como

las constantes elásticas de la roca, las cuales pueden ser calculadas por medio de ecuaciones empíricas que requieren como datos de entrada valores obtenidos de la toma de registros de pozo y calibrados con pruebas de núcleos. Con el fin de investigar este fenómeno de deformación se construye un modelo de elementos finitos en 3D en el software ABAQUS. La formación y el casing se asumen como materiales inicialmente elásticos con una evolución plástica, el cemento exhibe un comportamiento elástico durante toda la simulación. Para verificar el impacto del esfuerzo producido por la deformación de la formación de sal se incrementó el valor de la relación de Poisson de la roca con el fin de verificar que al aplicar un esfuerzo mayor la deformación lateral de la masa de roca iba a ser por consiguiente mayor, por lo que el esfuerzo producido sobre el revestimiento aumentaría en magnitud. Se concluye que el esfuerzo producido por la deformación de la capa de sal supera la resistencia al colapso del casing por lo que se produce la falla.

El aporte de este artículo es el uso de ABAQUS como herramienta de simulación, se utiliza una metodología de modelamiento que tienen en cuenta el equilibrio de esfuerzos, la perturbación producida por la perforación y la disminución e la presión de poro como etapas críticas en la evaluación de colapso de revestimiento de pozo.

**PAK, A, TAHERI, S.: “Casing Failure in Salt Rock: Numerical Investigation of its Causes”. SPRINGER. 2020.**

En este trabajo se presenta una investigación del origen de la inestabilidad de los pozos de un campo del sudeste de Irán, las hipótesis fueron verificadas utilizando ensayos de laboratorio y simulación numérica. La simulación numérica se desarrolla por medio de un modelo de elementos finitos en 3D utilizando el software ABAQUS, la primera hipótesis trabajada fue el daño del casing producto de la compactación del yacimiento. El modelo presenta la interacción mecánica entre formación-

cemento-sarta, la formación se asume como un material elastoplástico descrito por el criterio de Mohr-Coulomb, el cemento como un material elástico y el casing como un material elastoplástico. La simulación se inicia definiendo un paso de equilibrio en el que se especifica el campo de esfuerzos inicial. La siguiente etapa involucra la perforación instantánea del pozo por medio de la eliminación de los elementos que representan el agujero en la matriz de roca, luego se define una presión de lodo en las paredes del pozo. Se acoplan las partes del cemento y revestimiento; finalmente se define una presión de fondo fluyendo y se corre la simulación. De esta primera corrida de simulación se logró identificar que la compactación del yacimiento no es la causa de la deformación del pozo ya que el esfuerzo máximo de Von Mises registrado sobre el revestimiento solo correspondió al 30% de la resistencia al colapso del tubo, antes y después del agotamiento inducido de presión. Los resultados de la simulación mostraron que después de 24 años de producción la acumulación de esfuerzos sobre el casing sin soporte superaba la resistencia al colapso de este, por lo que se generaba la deformación.

El aporte de este trabajo es el uso de una serie de pasos de simulación en la herramienta ABAQUS, con el uso de estas etapas se busca capturar la perturbación de esfuerzos en cada escenario a través del desarrollo de un pozo. Además, se muestran el comportamiento mecánico de los materiales y las características de los elementos que componen la malla como elementos tipo Presión de poro/Esfuerzo de integración reducida.

### 3. SIMULACIÓN GEOMECÁNICA

En este capítulo se presenta la metodología adoptada para evaluar el colapso de revestimiento utilizando un software numérico de elementos finitos, en el cual se verifica el comportamiento mecánico de la roca durante la etapa de producción para posteriormente evaluar el impacto del estado de esfuerzos sobre la integridad del revestimiento de pozo.

#### 3.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE Y MODELO

La simulación numérica ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para la industria de los hidrocarburos ya que facilita la evaluación de fenómenos relacionados con aspectos geomecánicos y de producción de fluidos, en este caso la evaluación de la integridad del revestimiento de un pozo por el deslizamiento de planos de falla.

**3.1.1 Selección del software.** La selección del software de simulación se desarrolla a través de los siguientes pasos en donde la consideración más relevante es la frecuencia de aplicación de la herramienta para evaluar escenarios geomecánicos en la industria de los hidrocarburos.

1. Recolectar artículos y libros a través de las bases de datos y bibliotecas electrónicas disponibles en la biblioteca de la UIS como OnePetro, Elsevier, Springer, Knovel, entre otras.

2. Organizar cronológicamente la información recolectada, intentando mapear los estudios que siguen una misma línea de desarrollo o tienen autores en común, con el fin de encontrar información en común entre las simulaciones revisadas.

3. Leer y revisar artículos, identificar la información general del texto como año de publicación, escenario de simulación, objetivo general del estudio, software utilizado; de la misma forma recolectar información más detallada como geometría y dimensiones del modelo, propiedades mecánicas de los materiales, consideraciones para la simulación de los materiales, régimen de esfuerzos, condiciones de frontera del modelo, entre otras características.

4. Tabular la información recolectada cronológicamente y verificar qué tipo de software ha sido utilizado con más frecuencia en simulación geomecánica aplicada a la industria de los hidrocarburos, ver anexo A.

5. Seleccionar el software de simulación teniendo en cuenta la frecuencia de aplicaciones en simulación geomecánica aplicada a la industria del petróleo, disponibilidad de la herramienta, tipo de metodología de simulación reportada, posibilidad de soporte técnico y teórico por parte del Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo y disponibilidad de manuales e información en línea.

Teniendo en cuenta lo anterior, se selecciona a ABAQUS como la herramienta de simulación numérica para el desarrollo de la evaluación de colapso de revestimiento de pozo utilizando la licencia de funcionamiento del software con la que cuenta el Instituto Colombiano del Petróleo con el acompañamiento del codirector del proyecto. ABAQUS es un ambiente de simulación desarrollado por la compañía DASSAULT SYSTEMES, este proporciona una interfaz simple y consistente para la

creación, monitoreo y evaluación de resultados de la simulación de modelos construidos a partir de elementos finitos. El software está dividido en módulos, en donde cada módulo define un aspecto lógico del proceso de modelamiento, por ejemplo, definir una geometría, definir propiedades de materiales y generar una malla. Lo anterior teniendo en cuenta lo que se menciona en el manual de usuario de ABAQUS.

**3.1.2 Selección y reproducción del modelo.** Una vez seleccionado el software, el siguiente paso es seleccionar y reproducir el modelo de simulación numérica que más se acople a la evaluación de colapso de revestimiento por actividad tectónica, de forma específica, evaluar la posibilidad de colapso de revestimiento de pozo por el deslizamiento de planos de falla.

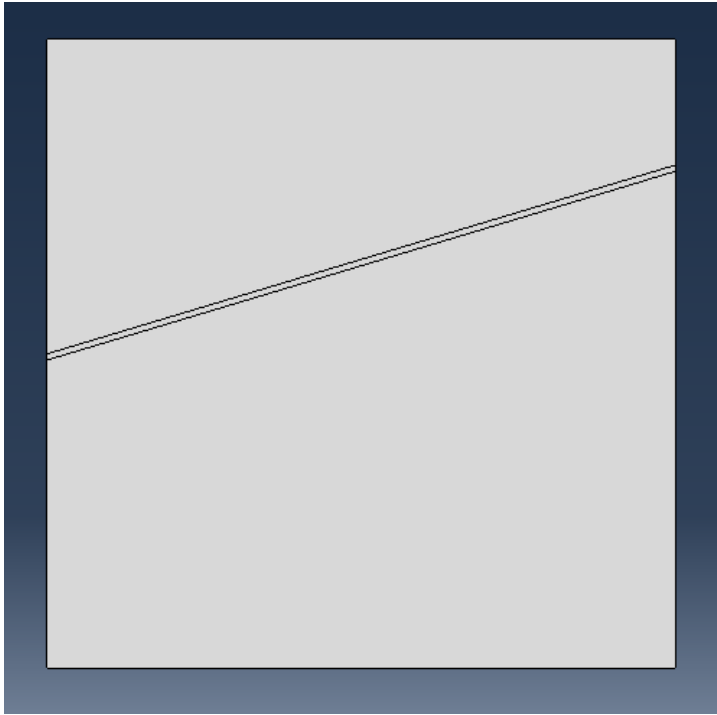
**3.1.2.1 Geometría del modelo.** Zhang <sup>18</sup> propone una geometría en dos dimensiones, en donde se evalúa la reactivación de una falla normal aislada, alojada en un yacimiento de carbonatos sujeto a producción de fluidos. Este tipo de geometría se replica en los trabajos de Treffeisen y Henk, Rinaldi, Cappa y Rutqvist. De acuerdo con Zhang, la roca huésped y la zona de falla se identifican como tipos de roca de naturaleza diferente, definidas dentro de una geometría predeterminada. La falla se representa como una zona estrecha de 10 cm de grosor, con propiedades mecánicas que facilitan el deslizamiento <sup>19</sup>. La simulación en dos dimensiones proporciona información de calidad para la comprensión de los mecanismos que producen potencialmente la deformación del pozo, además del ahorro computacional en el procesamiento de los datos comparado con un modelo 3D.

---

<sup>18</sup> ZHANG, Yanhua, et al. Numerical Modelling of fault reactivation in carbonate rocks under fluid depletion conditions, 2D generic models with a small isolated fault, Australia: Elsevier, 2016. P 1-12.

<sup>19</sup> ZHANG, Yanhua, et al. Numerical Modelling of fault reactivation in carbonate rocks under fluid depletion conditions, 2D generic models with a small isolated fault, Australia: Elsevier, 2016. P 1-12.

Figura 15. Geometría del modelo de simulación definida en el módulo Parte.



Fuente: Autor.

Se define entonces una geometría en dos dimensiones en el módulo Parte, constituida por un cuadrilátero dividido por una franja de 10 cm de grosor que representa la zona de falla, la geometría de dos dimensiones es usada en trabajos realizados por Kibble<sup>20</sup>, Eustes<sup>21</sup>, Asbil<sup>22</sup> y Abdidehm<sup>23</sup> entre otros. De acuerdo con lo reportado en la literatura, los modelos de simulación diseñados para evaluar la magnitud y dirección de esfuerzos a nivel de campo se extienden kilómetros de forma lateral, por otra parte, los dominios de simulación empleados en evaluar

---

<sup>20</sup> KIBBLE, K., et al. Collapse Strength Analysis of Casing Design Using Finite Element Method. Estados Unidos: Elsevier, 2000.

<sup>21</sup> EUSTES, A. W, FLECKENSTEIN, W. W y RODRIGUEZ. W, J.: Simulation of Collapse Loads on Cemented Casing Using Finite Element Analysis. Colorado: Society of Petroleum Engineers, Paper 84566. 2003.

<sup>22</sup> ASBIL, W. T, Last, N. C. y PALTILLO, P. D. Effect of Nonuniform Loading on Conventional Casing Collapse Resistance. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers Paper SPE 79871-PA. 2004.

<sup>23</sup> ABDIDEH, Mohammad, y HEDAYATI, Soheila. Analytical and Numerical Study of Casing Collapse in Iranian Oil Field. Springer. 2017.

localmente los esfuerzos en la zona cercana al pozo se extienden algunos metros desde la cara del pozo. De esta forma, se define un modelo de 10 metros de ancho por 10 metros de alto para evaluar el estado de esfuerzos en la región cercana al pozo, pasado un año de producción.

**3.1.2.2 Propiedades de los materiales.** La roca se representa como un material elastoplástico, la región elástica la definen el módulo de Young y la relación de Poisson, mientras que el comportamiento plástico se modela mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb. Esta representación del comportamiento mecánico de las rocas fue utilizada con éxito en las simulaciones documentadas por Fontoura, Gutiérrez, Zhang, Hedayatikhah y Abdideh, Treffeisen y Henk. Para la reproducir el modelo sintético de simulación se utilizan las siguientes propiedades para la roca huésped y la zona de falla, ver tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de la roca y zona de falla.

Propiedad	Roca	Zona de Falla
Densidad (Kg.m <sup>-3</sup> )	2400	2400
Módulo de Young (GPa)	15	0.1
Relación de Poisson	0.2	0.2
Cohesión (MPa)	15	9
Ángulo de fricción	33	30
Ángulo de dilatación	13.7	15.32
Relación de vacío	0.3	0.3
Permeabilidad (m <sup>2</sup> )	0.00087	3x10 <sup>-15</sup>

Fuente: Modificado, ZHANG, Yanhua, *et al.* Numerical Modelling of fault reactivation in carbonate rocks under fluid depletion conditions, 2D generic models with a small isolated fault, Australia: Elsevier, 2016. P 1-12.

Gutiérrez<sup>24</sup> postula y evalúa el mecanismo de falla al que se encuentra sujeto el revestimiento de un pozo, en este estudio incorpora el cemento al sistema de revestimiento como un material elastoplástico. Aadnoy<sup>25</sup> agrupa el modelamiento de la formación y cemento bajo el mismo comportamiento plástico. Schutjens<sup>26</sup> presenta un sistema roca-cemento-acero para desarrollar la simulación, en donde el cemento se describe utilizando un modelo constitutivo elastoplástico, calibrado con pruebas triaxiales sobre núcleos de cemento. En la tabla 2 se presentan las propiedades con las que se describe el comportamiento mecánico del cemento.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del cemento.

<b>Propiedad</b>	<b>Cemento</b>
Densidad (Kg.m-3)	1893.23
Módulo de Young (GPa)	15
Relación de Poisson	0.32
Cohesión (MPa)	40
Ángulo de fricción	20
Ángulo de dilatación	0

Fuente: GUTIERREZ, Sergio. Identificación de problemas de colapso en revestimiento de pozos, ocasionados por efectos geomecánicos. Caso de estudio: Pozo de un campo colombiano. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, 2013.

<sup>24</sup> GUTIERREZ, Sergio. Identificación de problemas de colapso en revestimiento de pozos, ocasionados por efectos geomecánicos. caso de estudio: pozo de un campo colombiano. Universidad Industrial de Santander, UIS, Bucaramanga. 2013.

<sup>25</sup> AADNOY, Bernt., *et al.* Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production. Springer. 2015.

<sup>26</sup> SCHUTJENS, P, M, T, M. *et al.* Compaction-and Shear-Induced Well Deformation in Tyra: Geomechanics for Impact on Production. Springer. 2019.

Eustes<sup>27</sup> menciona que el colapso de una tubería de acero, causado por cargas externas, es un fenómeno complejo que puede ser descrito utilizando la elasticidad clásica para establecer el comportamiento mecánico del acero. Por otra parte, Abdideh y Khah<sup>28</sup>, Pak y Taheri<sup>29</sup> utilizaron propiedades como la densidad y módulos elásticos para simular el comportamiento mecánico del acero. Basado en las metodologías de simulación descritas anteriormente, se define al acero como un material elástico en el modelo de simulación.

Tabla 3. Propiedades mecánicas del acero.

<b>Propiedad</b>	<b>Acero</b>
Densidad (Kg.m-3)	7850
Módulo de Young (GPa)	210
Relación de Poisson	0.3

Fuente: GUTIERREZ, Sergio. Identificación de problemas de colapso en revestimiento de pozos, ocasionados por efectos geomecánicos. Caso de estudio: Pozo de un campo colombiano. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, 2013.

**3.1.2.4 Pasos de simulación.** En el análisis de colapso de revestimiento es importante capturar los cambios en el estado de esfuerzos en la zona cercana al pozo, las alteraciones se producen al inicio de la perforación y se mantienen durante la etapa de producción. Gholami, Guo, Pak y Taheri utilizan una serie de etapas de

<sup>27</sup> EUSTES, A. W, FLECKENSTEIN, W. W y RODRIGUEZ. W, J.: Simulation of Collapse Loads on Cemented Casing Using Finite Element Analysis. Colorado: Society of Petroleum Engineers, Paper 84566. 2003.

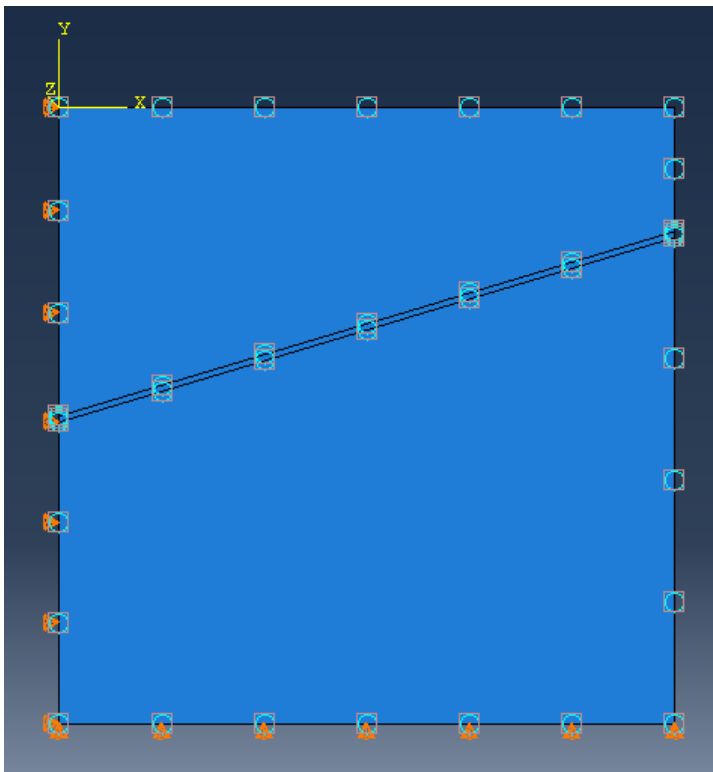
<sup>28</sup> ABDIDEH, Mohammad, y HEDAYATI, Soheila. Analytical and Numerical Study of Casing Collapse in Iranian Oil Field. Springer. 2017

<sup>29</sup> PAK, A, TAHERI, S, Casing Failure in Salt Rock: Numerical Investigation of its Causes, Austria: Springer, 2020.

simulación para capturar el efecto de cada una de las perturbaciones a las que se ve sometido el revestimiento, con el fin de relacionar el efecto de la compactación del yacimiento con el mecanismo de falla que se presenta en una sección del pozo.

ABAQUS genera de forma predeterminada un paso inicial en donde se definen condiciones iniciales utilizando campos predefinidos con los que asignan propiedades homogéneas e isotrópicas sobre la geometría del modelo. Se deben definir entonces esfuerzos in situ, presión de poro inicial, porosidad y restricciones de movimiento en las direcciones de los ejes de coordenadas según sea necesario.

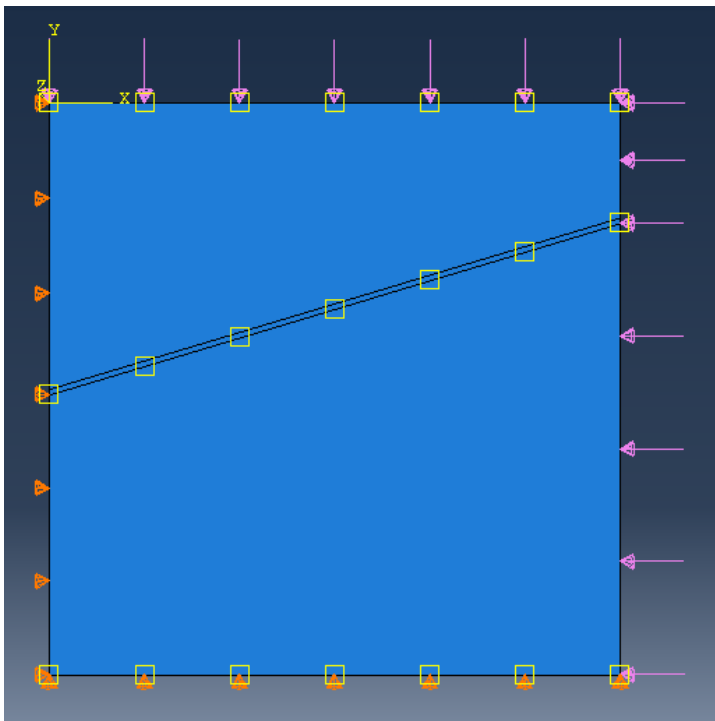
Figura 16. Condiciones iniciales del modelo



Fuente: Autor

La simulación inicia configurando el equilibrio estático entre los esfuerzos in situ y la presión de poro a través de un paso tipo Geoestático. El manual de ABAQUS menciona que el paso tipo Geoestático se utiliza para equilibrar las cargas del modelo de elementos finitos y establecer la distribución inicial de la presión de poro. En esta etapa se deben definir sobre la geometría los esfuerzos in situ representados como presiones sobre los bordes externos del modelo.

Figura 17. Configuración del paso Geoestático.



Fuente: Autor

El inicio de la producción representa el comienzo de la compactación del yacimiento, este escenario se verifica utilizando la teoría de esfuerzo efectivo postulada por Terzaghi<sup>30</sup>, en donde se menciona que al disminuir la presión de poro aumenta el

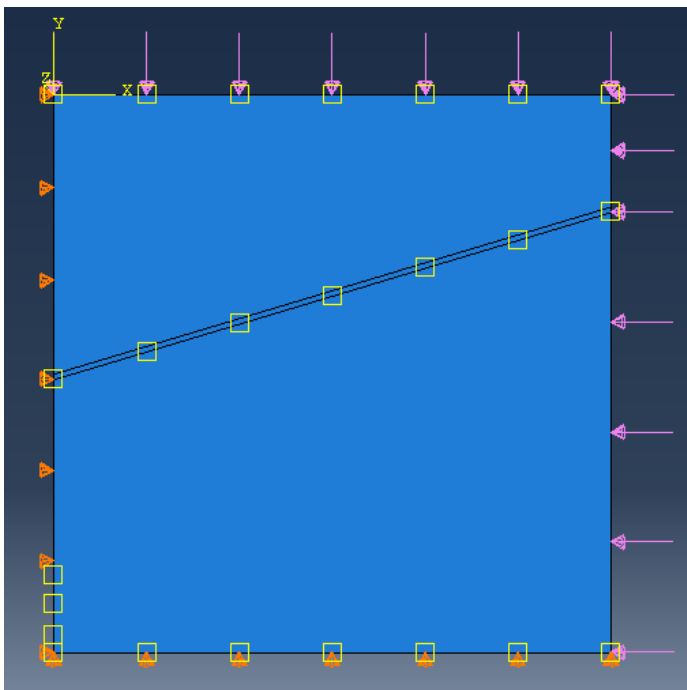
---

<sup>30</sup> TERZAGHI, K. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley, New York. 1923.

contacto intergranular y por ende el esfuerzo efectivo que perciben los granos de roca.

La producción se desarrolla a través de un paso tipo Suelo, se debe seleccionar el intervalo productor y agrupar un conjunto de nodos sobre los cuales se define un atributo de presión de poro negativa como una nueva condición de frontera, este nuevo atributo genera una disminución gradual de la presión de poro sobre la extensión de la roca y así se simula la producción de fluidos. La disminución de presión de poro provoca el inicio de la compactación del yacimiento y teóricamente el deslizamiento del plano de falla por la acumulación de esfuerzos de cizalla sobre la interfaz de la roca y la zona de falla.

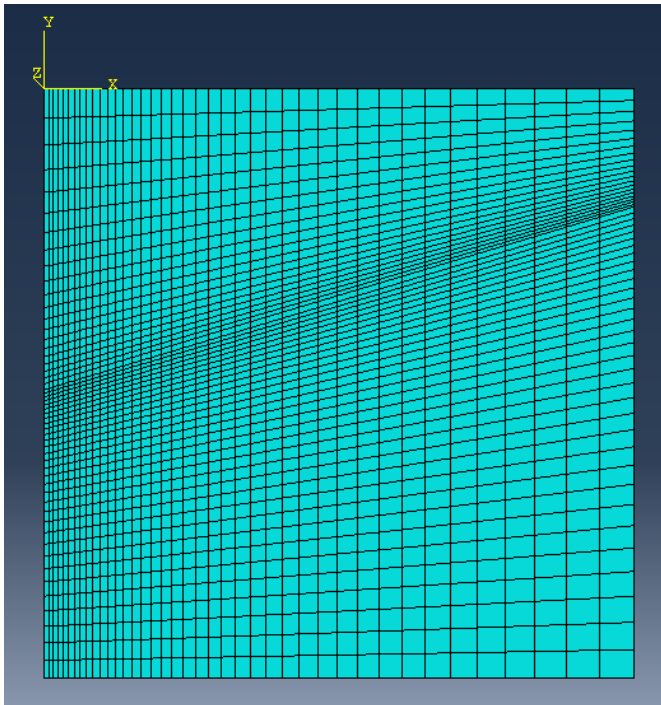
Figura 18. Paso de producción, disminución de presión de poro.



Fuente: Autor.

La técnica de enmallado utilizada para discretizar el modelo es de tipo Estructurado con elementos cuadriculados que siguen un patrón definido, “Este tipo de elementos minimiza la transición de la malla y reduce la distorsión de esta” lo cual se menciona en el manual de usuario de ABAQUS. Se utilizan elementos tipo Fluido de Poro/Esfuerzo CPE8RP, elementos cuadrilaterales de 8 nodos de integración reducida. Zhang<sup>31</sup> muestra en su trabajo que la región cercana a la falla tiene una densidad de elementos mayor con dimensiones cercanas a las de la franja de falla. Los elementos cercanos a la falla tienen un grosor de 10cm, el mismo grosor de la franja que representa la zona de falla, la cual está discretizada con un solo elemento en la dirección Y, 40 en la dirección X. La malla se refina sobre la región cercana al pozo para verificar si el plano de falla se desliza y de esta forma capturar la perturbación de los esfuerzos en esta zona.

Figura 19. Enmallado del modelo.



Fuente: Autor.

---

<sup>31</sup> ZHANG, Yanhua, *et al.* Numerical Modelling of fault reactivation in carbonate rocks under fluid depletion conditions, 2D generic models with a small isotade fault, Australia: Elsevier, 2016. P 1-12.

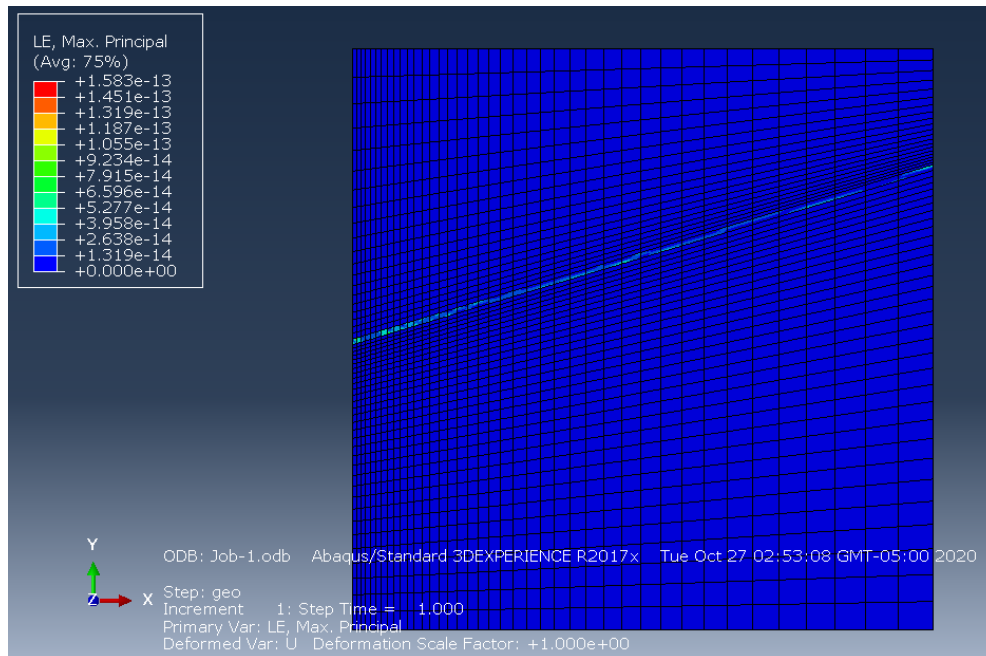
## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO**

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de un año de producción en un yacimiento que contiene una zona de falla, la producción de los fluidos genera la compactación de la roca facilitando el deslizamiento o reactivación de la superficie de falla. En el módulo Visualización se verifican los cambios en magnitud y dirección de esfuerzos a través del tiempo. La validación del modelo sintético se realiza a través de cada uno de los pasos de simulación, se comparan los resultados obtenidos en el módulo de visualizaciones con información reportada en la literatura relacionada al comportamiento mecánico de un yacimiento sujeto a compactación y el deslizamiento de planos de falla relacionado con la producción de fluidos.

### **4.1 PASO GEOESTÁTICO**

La primera característica por verificar es la deformación general al final del paso geoestático. Este paso se utiliza en la simulación para alcanzar el equilibrio de esfuerzos, al tratarse de un escenario de equilibrio estático los desplazamientos y deformaciones que se presenten deben tender a cero. Los resultados de la primera etapa de simulación se muestran en la figura 20, se observa que en la roca huésped no se presenta ningún tipo de deformación, mientras que en la zona de falla las deformaciones se encuentran en el orden de  $10^{-14}$ , por lo que se pueden considerar como cero.

Figura 20. Resultado paso Geoestático.



Fuente: Autor.

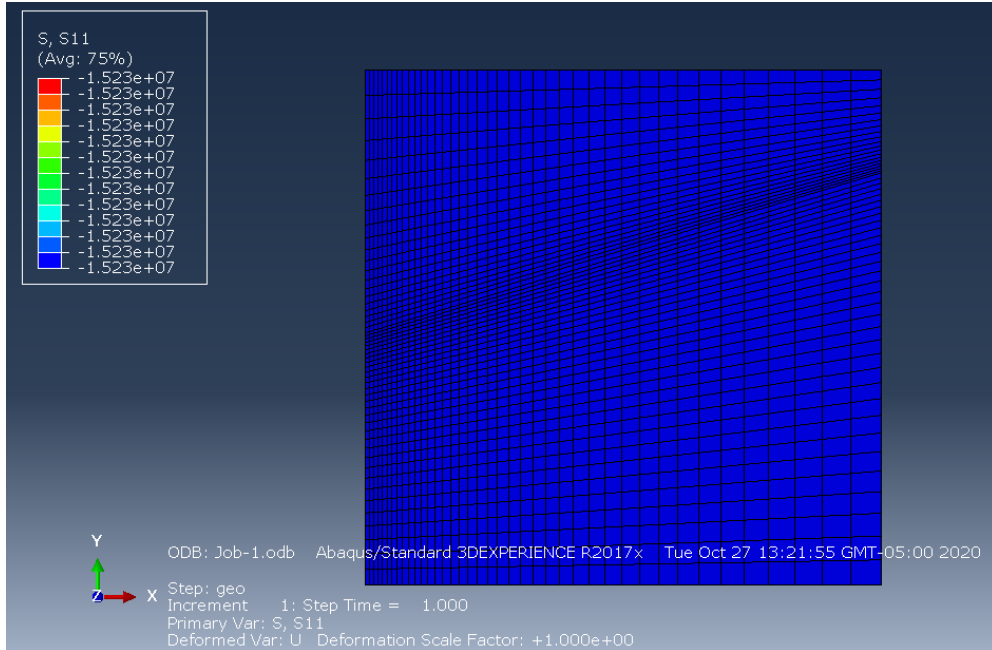
Al final de esta etapa de simulación la magnitud de los esfuerzos resultantes en las direcciones principales debe ser igual a los valores de esfuerzos in situ digitados en el campo predefinido inicial, Gutiérrez<sup>32</sup> menciona que el valor de los esfuerzos in situ resultantes en el software deben ser iguales a los valores que se ingresan en el paso Inicial, estas son las condiciones a las que la roca se encuentra sometida antes de ser perturbada por la producción de fluidos. En la figura 21, se observan los valores de los esfuerzos in situ reportados por el software al final del paso Geoestático.

---

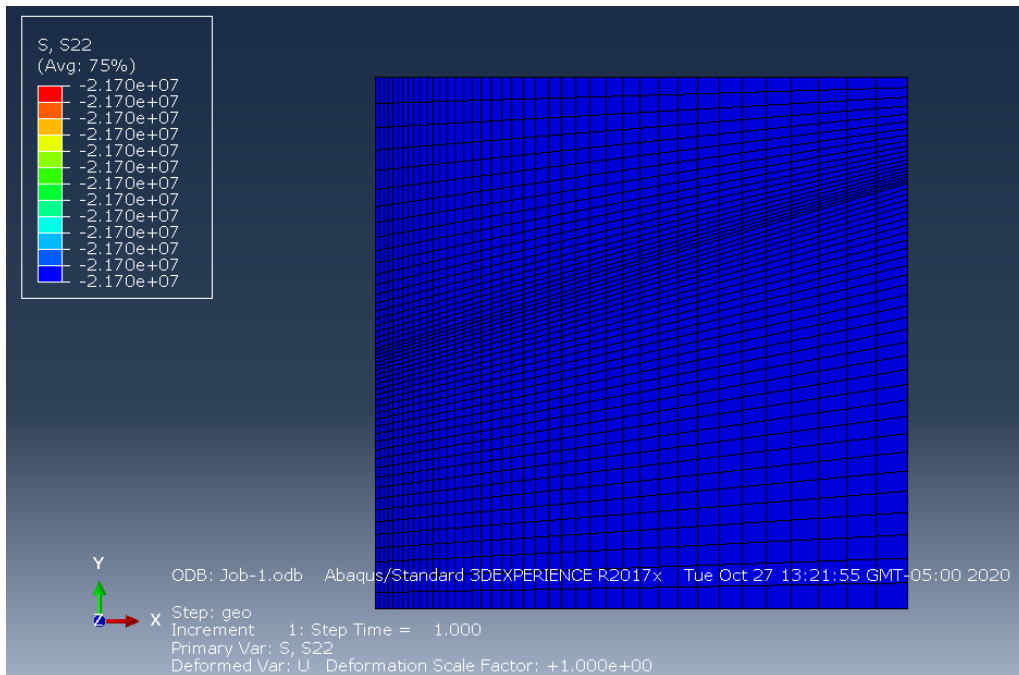
<sup>32</sup> GUTIERREZ, Sergio. Identificación de problemas de colapso en revestimiento de pozos, ocasionados por efectos geomecánicos. caso de estudio: pozo de un campo colombiano. Universidad Industrial de Santander, UIS, Bucaramanga. 2013.

Figura 21. Esfuerzos in situ al final del paso Geoestático.

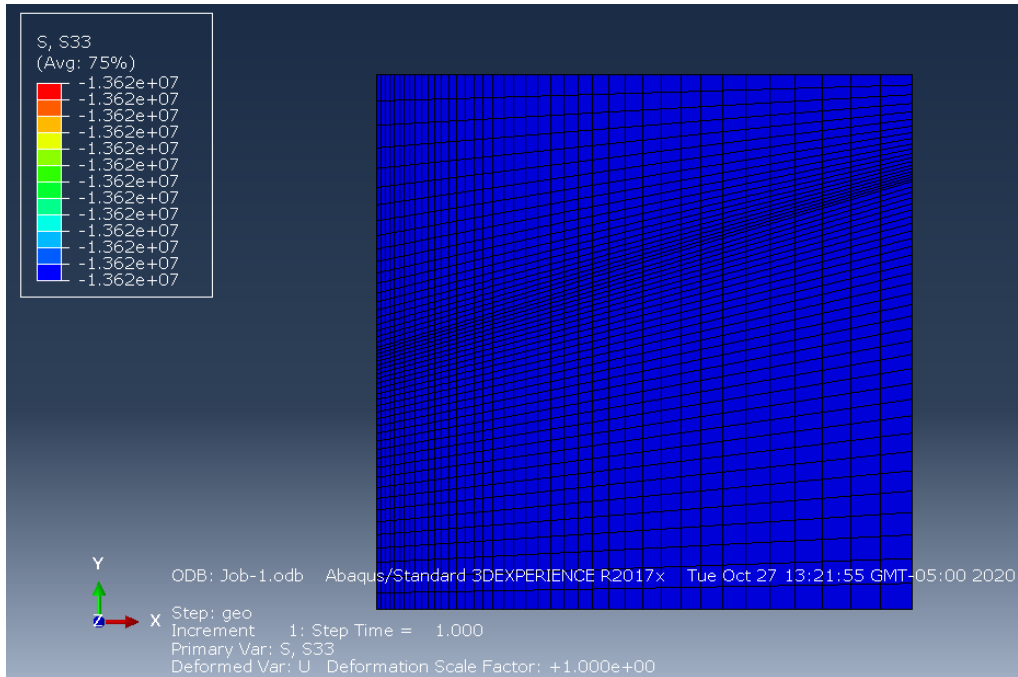
a. Esfuerzo horizontal máximo (S11)



b. Esfuerzo vertical (S22)



### c. Esfuerzo horizontal mínimo (S33)



Fuente: Autor.

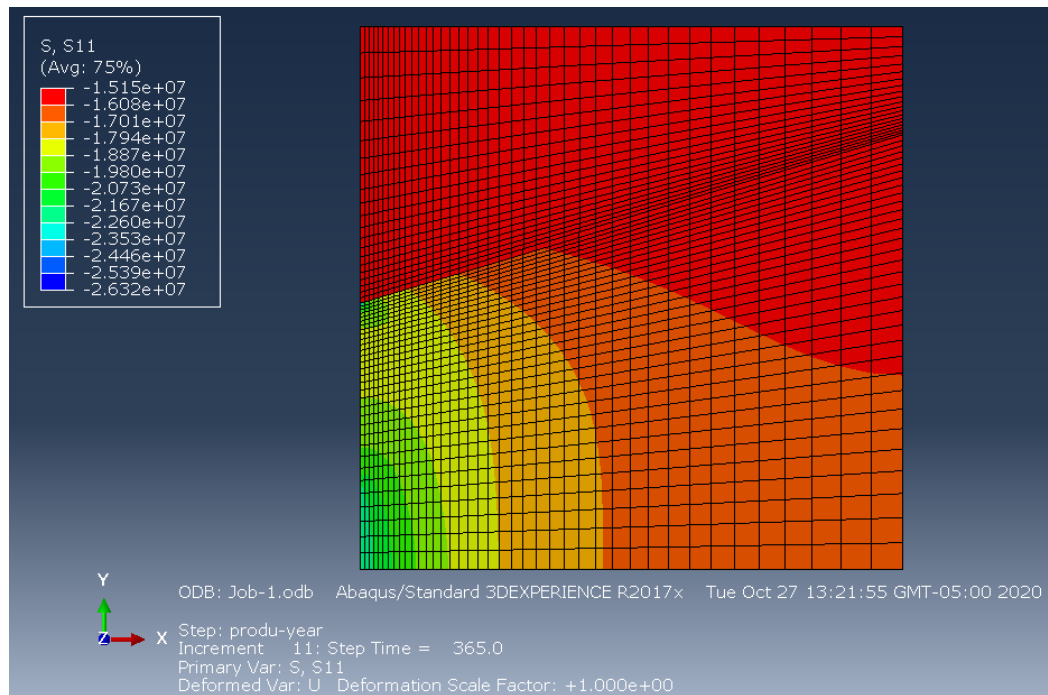
## 4.2 PASO DE PRODUCCIÓN

De acuerdo con el manual de usuario de ABAQUS, ejemplo 9.1.3, la etapa de producción se desarrolla a través de dos pasos tipo Suelo, en el primero se configura la presión de fondo fluyente de forma instantánea a través de una condición de frontera y en el segundo paso se define el periodo de tiempo en el que se mantendrá esta condición de presión. Esta metodología es utilizada con éxito por Robello<sup>33</sup> en la simulación de producción de fluidos.

<sup>33</sup> ROBELLO, Samuel y WANG, Han Yi.: "3D Geomechanical Modeling of Salt-Creep Behavior on Wellbore Casing for Presalt Reservoirs" Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 166144-PA. 2016.

**4.2.1. Compactación.** Zoback<sup>34</sup> menciona que el concepto de esfuerzo efectivo se basa en el trabajo de Terzaghi, quien notó que el comportamiento de una roca saturada está controlado por la diferencia entre el esfuerzo externo aplicado y la presión de poro interna. Este concepto se toma como principio de validación de los resultados de la simulación de producción de fluidos, en donde se define una condición de frontera tipo presión de poro para generar una disminución de esta característica. Como se observa en la figura 22, en la zona designada para los perforados se observa una concentración de esfuerzos en la dirección S11, la magnitud del esfuerzo en esta región inicia en 15.23 MPa y luego de un año de producción varía entre 21.67 a 22.60 MPa.

Figura 22. Paso de producción luego de 365 días de producción.

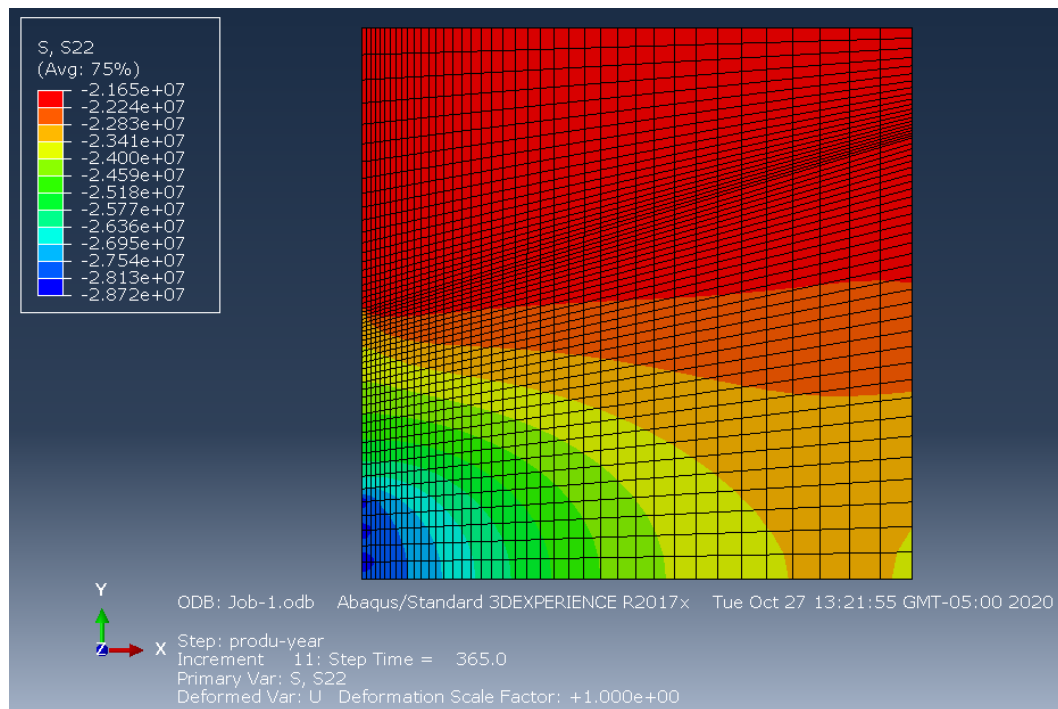


Fuente: Autor.

<sup>34</sup> ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, ISBN-978-0-521, United States: Cambridge University Press, New York, 2007.

La compactación del yacimiento se puede verificar mediante el análisis de la magnitud del esfuerzo efectivo en la dirección Y junto con la tendencia de desplazamiento de los elementos de la malla, ver figura 23. Los resultados de la simulación muestran que el esfuerzo efectivo inicia con magnitud de 21.7 MPa y luego de un año de producción registra un incremento de alrededor de 7 MPa en la zona de producción.

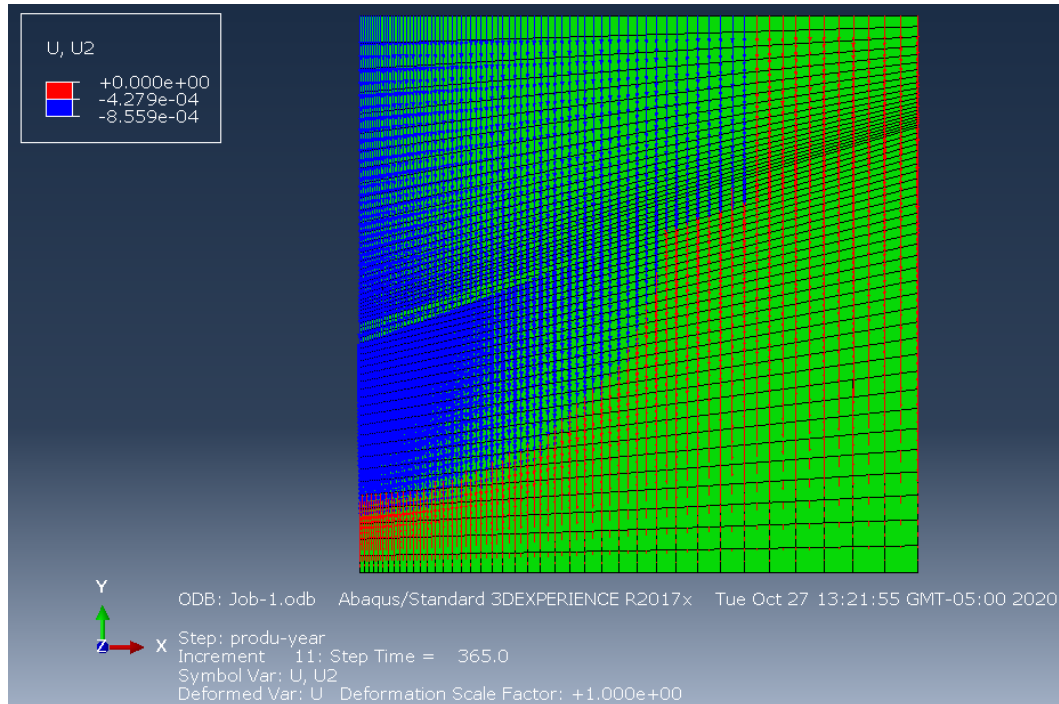
Figura 23. Evolución del esfuerzo vertical a un año de producción.



Fuente: Autor

Con relación a la tendencia de desplazamiento del modelo, figura 24, se observa que la zona perturbada por la disminución de presión presenta una mayor densidad de vectores de desplazamiento a diferencia de las regiones distantes del pozo, de esta forma se valida que el yacimiento está sujeto a compactación como consecuencia de la producción de fluidos.

Figura 24. Campo de desplazamientos en la dirección del eje Y.

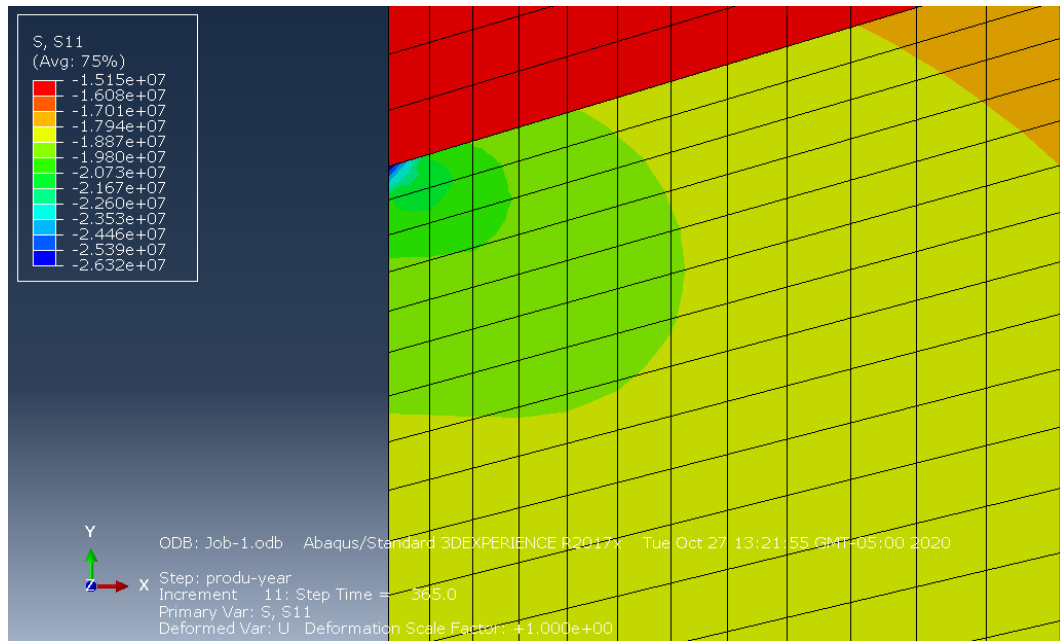


Fuente: Autor.

**4.2.2 Deslizamiento de falla.** Treffeisen<sup>35</sup> propone una metodología para representar una zona de falla dentro de una roca huésped, en el análisis de resultados concluye que el desplazamiento de la sección fallada puede ser verificado por la acumulación de esfuerzos en la dirección S11 sobre los puntos distales de la superficie de falla. Los resultados del modelo de simulación muestran un aumento de 11 MPa al final de 365 días de producción, de forma general, la zona de falla que se encuentra en contacto con el pozo muestra una acumulación de esfuerzos en un rango de entre 19.80 MPa a 26.32 MPa, el valor inicial del esfuerzo S11 es de 15.23 MPa.

<sup>35</sup> TREFFEISEN, T y HENK, A. Representation of faults in reservoir-scale geomechanical finite element models- A comparison of different modelling approaches. ELSEVIER. 2019.

Figura 25. Acumulación de esfuerzos en la zona de falla.



Fuente: Autor

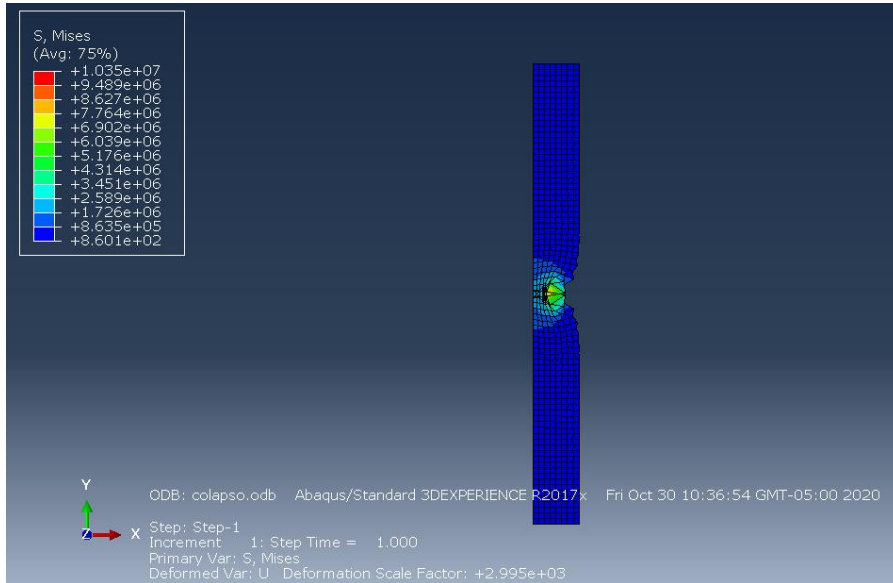
La consideración anterior permite inferir la posibilidad de desplazamiento del plano de falla y la generación de una carga puntual sobre el área correspondiente al pozo, este tipo de esfuerzos, por lo general, provocan disminución de integridad del revestimiento. El escenario siguiente es la evaluación del colapso de revestimiento por la acumulación de esfuerzos producida por el deslizamiento de la falla.

**4.2.3 Evaluación de colapso.** Como consecuencia de la complejidad de las interacciones entre las superficies de los materiales, el análisis de colapso se desarrolla en un modelo de simulación independiente en donde el conjunto cemento-acero es sometido al esfuerzo registrado entre la zona de falla y la región del pozo, de esta forma se verifica si el revestimiento falla por colapso o de lo contrario soporta las condiciones de esfuerzo que genera el deslizamiento de la

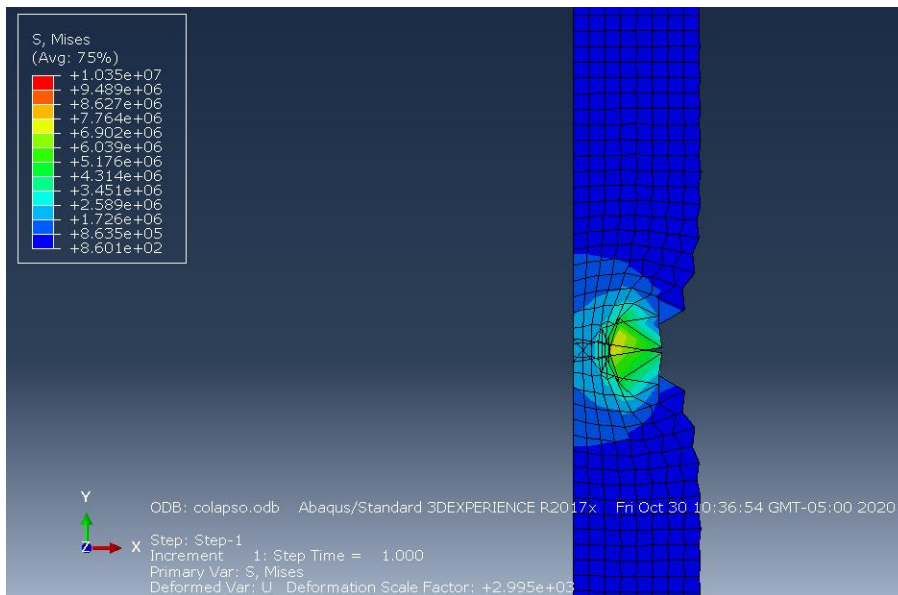
falla. En la figura 26 se muestran los resultados de la simulación de la carga sobre el revestimiento.

Figura 26. Evaluación de colapso de revestimiento de pozo.

a. Esfuerzo Von Mises



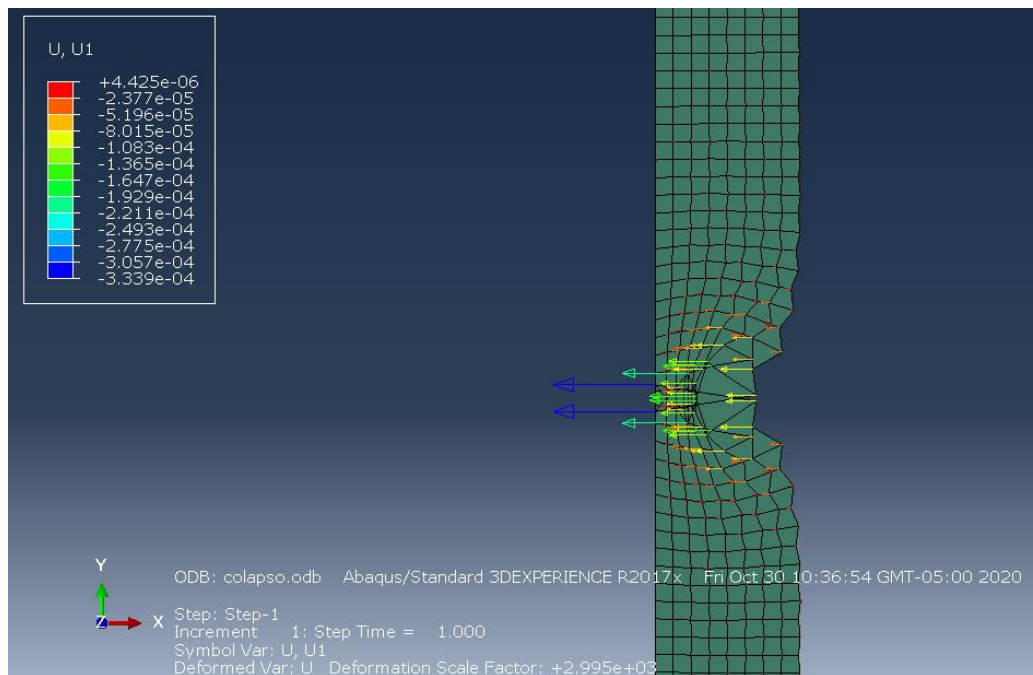
b. Esfuerzo Von Mises, acercamiento



Fuente: Autor.

El resultado de esta simulación permite identificar la pérdida de integridad del cemento como consecuencia de una carga puntual, es posible validar esta afirmación verificando el campo de desplazamiento en la dirección X, ver figura 27. No se observa una acumulación de esfuerzos considerable sobre la superficie interna del revestimiento que supere la resistencia mecánica del acero, en este caso el esfuerzo de cedencia del material es de 750 MPa, acero P-110, sin embargo, se produce la reducción de la integridad del revestimiento al presentarse la deformación de la capa de cemento, abriendo la posibilidad a una deformación mayor si se continua con la misma tasa de producción y tendencia de deslizamiento de la falla por la compactación de la roca.

Figura 27. Campo de desplazamiento.



Fuente: Autor.

## 5. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL COLAPSO

A continuación, se presenta la metodología propuesta para evaluar el colapso de revestimiento por el deslizamiento de planos de falla, haciendo uso de un modelo numérico sintético de elementos finitos, reproducido a partir de la información de trabajos de simulación previos reportados en la literatura. ABAQUS permite modificar las propiedades de los materiales y generar nuevas condiciones de simulación bajo la misma geometría definida, esto facilita la evaluación de diferentes escenarios de falla.

Se establece la siguiente metodología para evaluar el colapso de revestimiento utilizando el software ABAQUS:

1. Seleccionar el área de estudio, campo, pozo y profundidad de investigación para verificar el tipo de roca, tipo de casing con que está revestido el pozo y tipo de cemento utilizado.
2. Verificar la existencia de fallas o fracturas a la profundidad de investigación. Si el análisis se realiza sobre la interfaz entre dos capas de roca, reportar el buzamiento de los estratos y utilizar este ángulo en la región de zona de falla en la geometría del modelo.
3. Recolectar y tabular en la table 4 las propiedades de los materiales (roca-cemento-casing) que están involucrados en el modelo de simulación, para todos los materiales se deben definir densidad y módulos elásticos (módulo de Young y relación de Poisson). Los materiales tipo roca y cemento tienen un comportamiento

elastoplástico por lo que se deben definir ángulo de fricción, ángulo de dilatación y cohesión. Para la roca se debe definir porosidad, permeabilidad y peso específico del fluido mojante.

Tabla 4. Tabulación de propiedades de los materiales.

<b>Propiedad</b>	<b>Roca</b>	<b>Zona de Falla</b>	<b>Cemento</b>	<b>Casing</b>
Densidad (Kg.m <sup>-3</sup> )				
Módulo de Young (MPa)				
Relación de Poisson				
Cohesión (MPa)				
Ángulo de fricción				
Ángulo de dilatación				
Porosidad				
Permeabilidad (m <sup>2</sup> )				

Fuente: Autor

4. Recolectar y reportar en la tabla 5 información de esfuerzos in situ y presión de poro para definir el campo de esfuerzos inicial sobre la geometría del modelo. El esfuerzo vertical puede ser determinado utilizando registros de densidad y correlaciones disponibles en la literatura como la integración del peso de las capas de roca, perfiles de esfuerzos obtenidos de registros de pozo, entre otros.

Tabla 5. Tabulación de esfuerzos in situ y presión de poro.

<b>Propiedad</b>	<b>Magnitud</b>
Esfuerzo Vertical (S22)	
Esfuerzo Horizontal Máximo (S11)	
Esfuerzo Horizontal Mínimo (S11)	
Presión de poro	

Fuente: Autor.

5. Ajustar el ángulo de la zona de falla en el modelo sintético de acuerdo con la información recolectada en el numeral 2. Utilizar la herramienta Partición en el módulo Parte para realizar esta modificación.

6. Asignar las propiedades de los materiales sobre las partes del modelo de acuerdo con la información verificada en el numeral 3, módulo Propiedades.

7. Ajustar campo de esfuerzos, presión de poro y relación de vacío en el paso Inicial, esta información ha sido recolectada, verificada y tabulada en el numeral 5. Ir al módulo Carga sobre el paso Inicial, y modificar los campos predefinidos de estas propiedades.

8. Verificar que la malla de simulación cumpla con las especificaciones de refinamiento en la zona de falla y en la cercanía al pozo, esto con el fin de capturar de forma adecuada los esfuerzos en estas secciones críticas.

9. Modificar la presión de fondo fluyente en el paso de producción de acuerdo con las condiciones del pozo que se analiza. Tener en cuenta que esta condición está configurada en el paso como una condición de frontera de presión negativa.

10. Someter la simulación y monitorear los resultados, verificar que se cumplan las condiciones de validación en cada uno de los pasos. Observar los desplazamientos y deformación sobre la zona de falla para verificar que se presente el deslizamiento del plano como consecuencia de la producción.

11. Verificar la evolución del campo de esfuerzos en la dirección S11 sobre la región de contacto entre la zona de falla y el pozo, este valor de esfuerzo será el que se defina como carga para el modelo cemento-casing, ya que, si se presenta la falla el valor de esfuerzo sobre esta región se considera un valor crítico.

12. Generar la geometría del revestimiento en el módulo Parte, asignar las propiedades de cemento y casing tabuladas en el numeral 3 a través del módulo Propiedades. Definir sobre la superficie del cemento la carga determinada en el numeral 11 y simular de forma instantánea. Al final de este paso, verificar el esfuerzo Von Mises que reporta el software y determinar si este supera la resistencia al colapso del acero de revestimiento.

13. Evaluar la posibilidad de colapso de revestimiento si la acumulación de esfuerzos producto del deslizamiento del plano de falla y la producción supera la resistencia al colapso del revestimiento o si existe la posibilidad de la pérdida de integridad del conjunto cemento-acero sin la presencia de deformación sobre la superficie interna del acero.

## **6. APLICACIÓN A UN CAMPO COLOMBIANO**

Con el fin de implementar la metodología postulada se selecciona un campo colombiano para aplicar el procedimiento de evaluación de colapso de revestimiento por actividad tectónica utilizando un software de elementos finitos, la aplicación consiste en evaluar el deslizamiento de la falla como consecuencia de la producción, y su impacto sobre la integridad del revestimiento de pozo.

### **6.1 APLICACIÓN METODOLOGÍA EVALUACIÓN DE COLAPSO**

1. Seleccionar el área de estudio, campo, pozo y profundidad de investigación para verificar el tipo de roca, tipo de casing con que está revestido el pozo y tipo de cemento utilizado.

Campo colombiano, profundidad de investigación de 1200 metros, formación Colorado A2, casing de 7 pulgadas P-110 de 40 lb/ft.

2. Verificar la existencia de fallas o fracturas a la profundidad seleccionada. Si el análisis se realizará sobre la interfaz entre dos capas de roca, reportar el buzamiento de los estratos y utilizar este ángulo en la región de zona de falla en la geometría del modelo.

La presencia de fallas es una de las características estructurales del campo, estas se encuentran cerca a los pozos y algunas intersecan a los mismos.

3. Recolectar y tabular en la table 6 las propiedades de los materiales (roca-cemento-casing) que estarán involucrados en el modelo de simulación, para todos los materiales se deben definir densidad y módulos elásticos (módulo de Young y relación de Poisson). Los materiales tipo roca y cemento tienen un comportamiento elastoplástico por lo que se deben definir ángulo de fricción, ángulo de dilatación y cohesión. Para la roca se debe definir porosidad, permeabilidad y peso específico del fluido mojante.

Tabla 6. Tabulación de propiedades de los materiales

<b>Propiedad</b>	<b>Roca</b>	<b>Zona de Falla</b>	<b>Cemento</b>	<b>Casing</b>
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2700	2400	1797	7850
Módulo de Young (MPa)	551	10	30000	210000
Relación de Poisson	0.3	0.2	0.21	0.3
Cohesión (MPa)	10	9	-	-
Ángulo de fricción	33	30	-	-
Ángulo de dilatación	18	15.32	-	-
Porosidad	0.25	0.25	-	-
Permeabilidad (m <sup>2</sup> )	4.93x10 <sup>-8</sup>	4.9x10 <sup>-13</sup>	-	-

Fuente: Modificado, COMPILACIÓN DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA.

5. Recolectar y reportar en la tabla 7 información de esfuerzos in situ y presión de poro para definir el campo de esfuerzos inicial sobre la geometría del modelo. El esfuerzo vertical puede ser determinado utilizando registros de densidad y correlaciones disponibles en la literatura como la integración del peso de las capas de roca, perfiles de esfuerzos obtenidos de registros de pozo, entre otros.

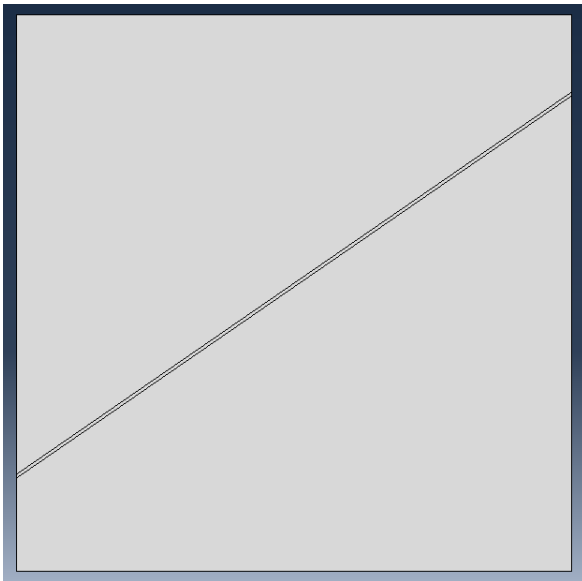
Tabla 7. Tabulación de esfuerzos in situ y presión de poro.

<b>Propiedad</b>	<b>Magnitud</b>
Esfuerzo Vertical (MPa)	27.24
Esfuerzo Horizontal Máximo (MPa)	20
Esfuerzo Horizontal Mínimo (MPa)	18.64
Presión de poro (MPa)	11.47

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

6. Ajustar el ángulo de la zona de falla en el modelo sintético de acuerdo con la información recolectada en el numeral 2. Utilizar la herramienta Partición para realizar esta modificación.

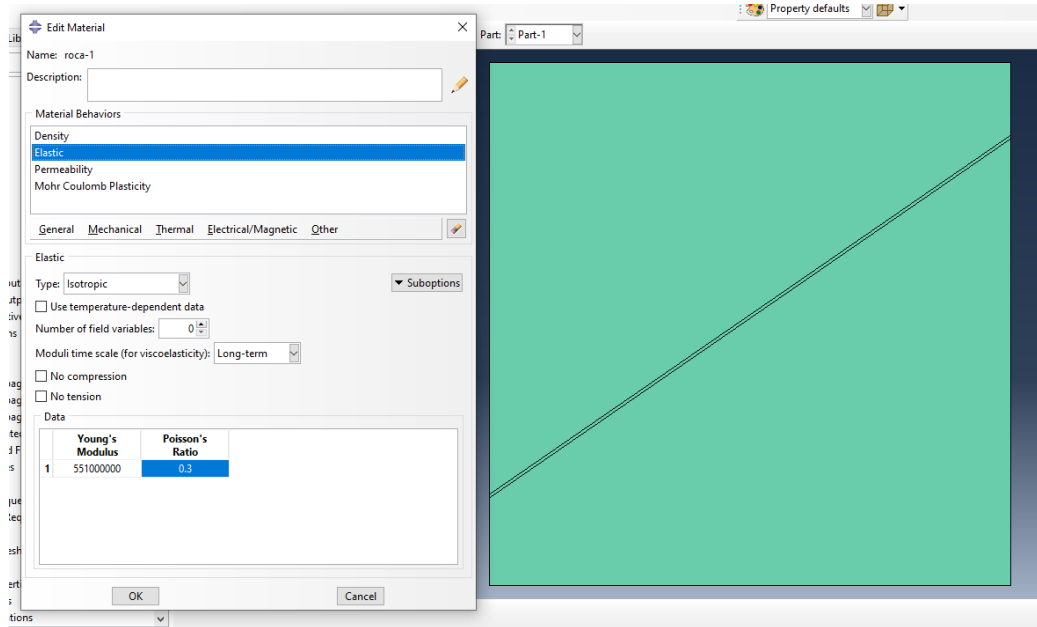
Figura 28. Ajuste de zona de falla sobre el modelo de simulación.



Fuente: Autor.

7. Asignar las propiedades de los materiales sobre las partes del modelo de acuerdo con la información verificada en el numeral 3.

Figura 29. Modulo Propiedades, asignación de materiales.

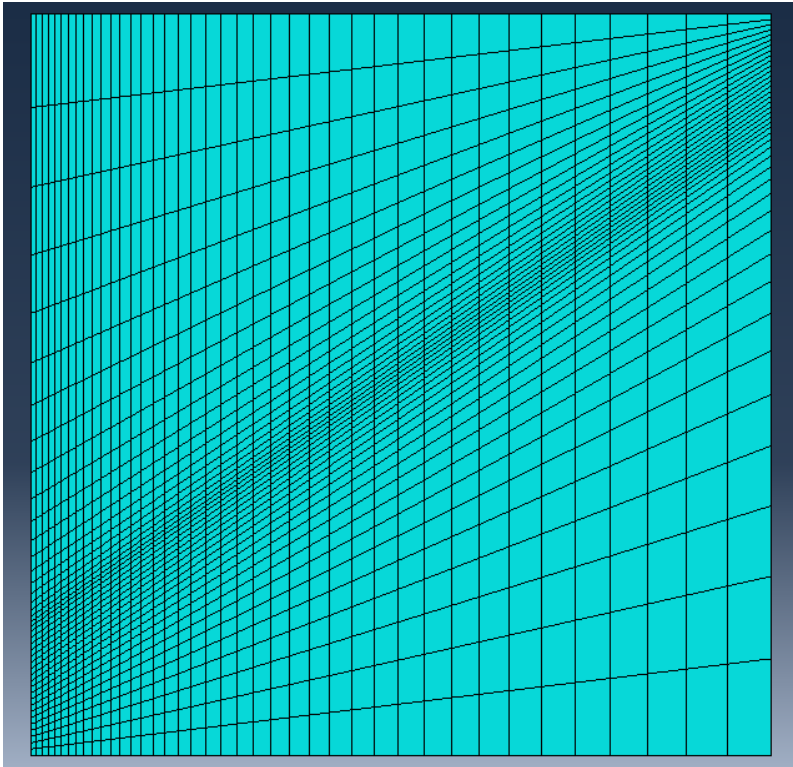


Fuente: Autor.

8. Ajustar campo de esfuerzos, presión de poro y relación de vacío en el paso Inicial, esta información ha sido recolectada, verificada y tabulada en el numeral 5.

9. Verificar que la malla de simulación cumpla con las especificaciones de refinamiento en la zona de falla y en la cercanía al pozo, esto con el fin de capturar de forma adecuada los esfuerzos en estas secciones críticas.

Figura 30. Malla de simulación ajustada al nuevo ángulo de la zona de falla.



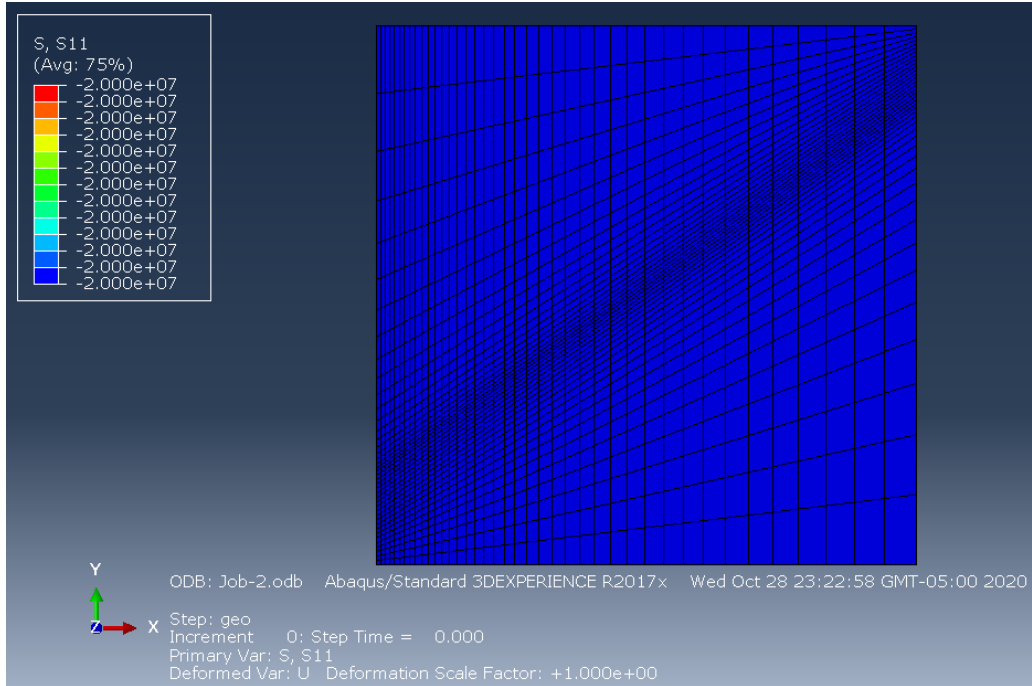
Fuente: Autor.

10. Modificar la presión de fondo fluyente en el paso de producción de acuerdo con las condiciones del pozo que se analiza. Tener en cuenta que esta condición está configurada en el paso como una condición de frontera de presión negativa.

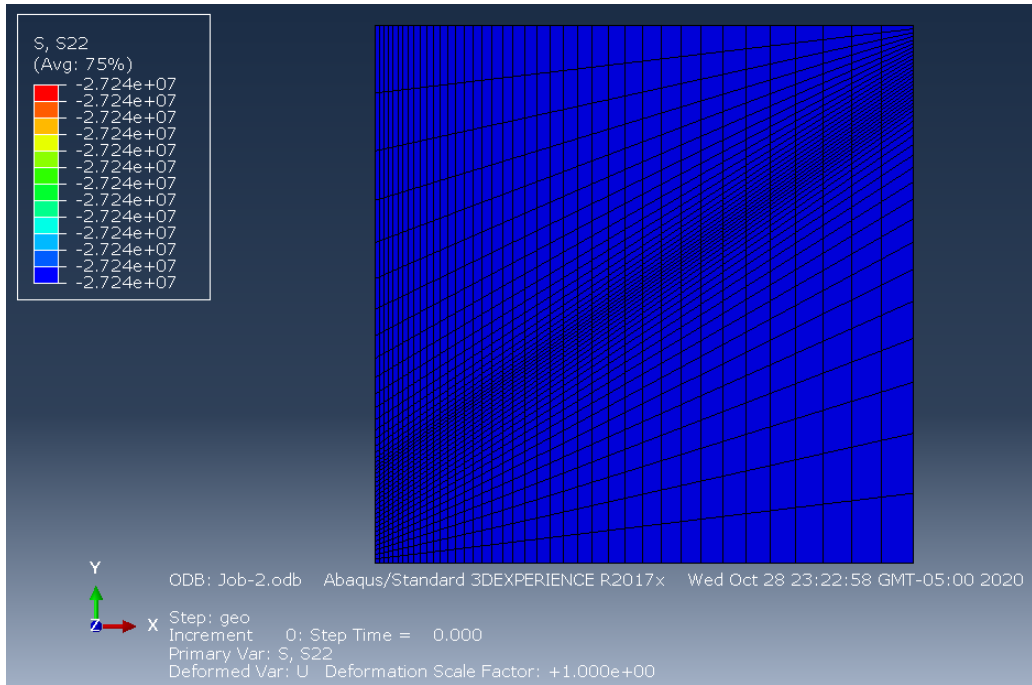
11. Someter la simulación y monitorear los resultados, verificar que se cumplan las condiciones de validación en cada uno de los pasos. Observar los desplazamientos y deformación sobre la zona de falla para verificar que se presente el deslizamiento del plano como consecuencia de la producción, ver figura 35.

Figura 31. Verificación paso Geoestático.

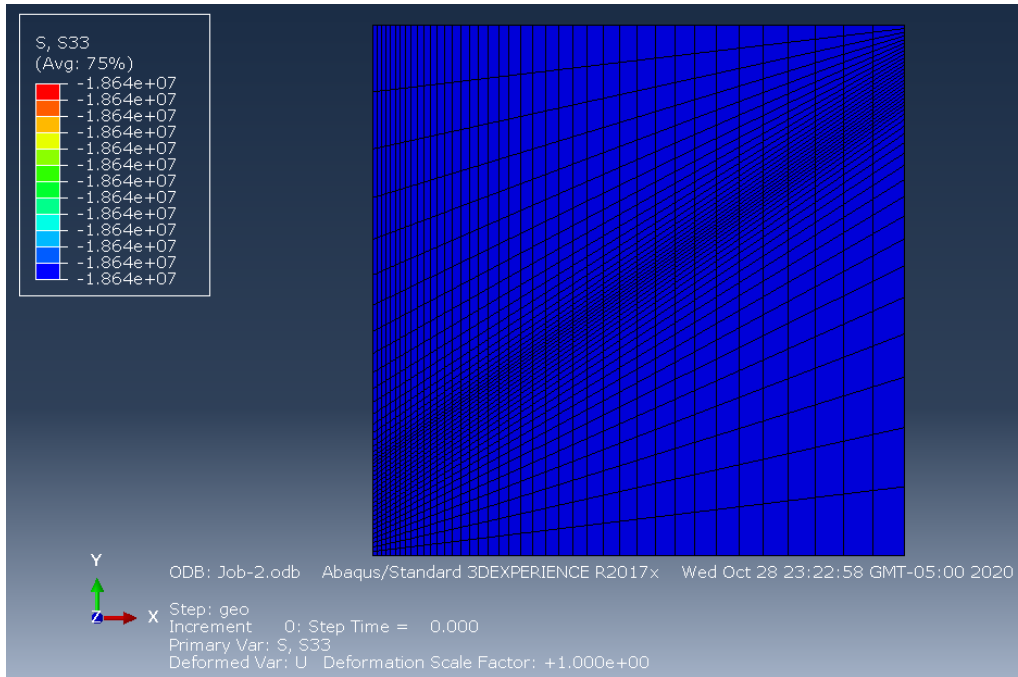
a. Esfuerzo S11



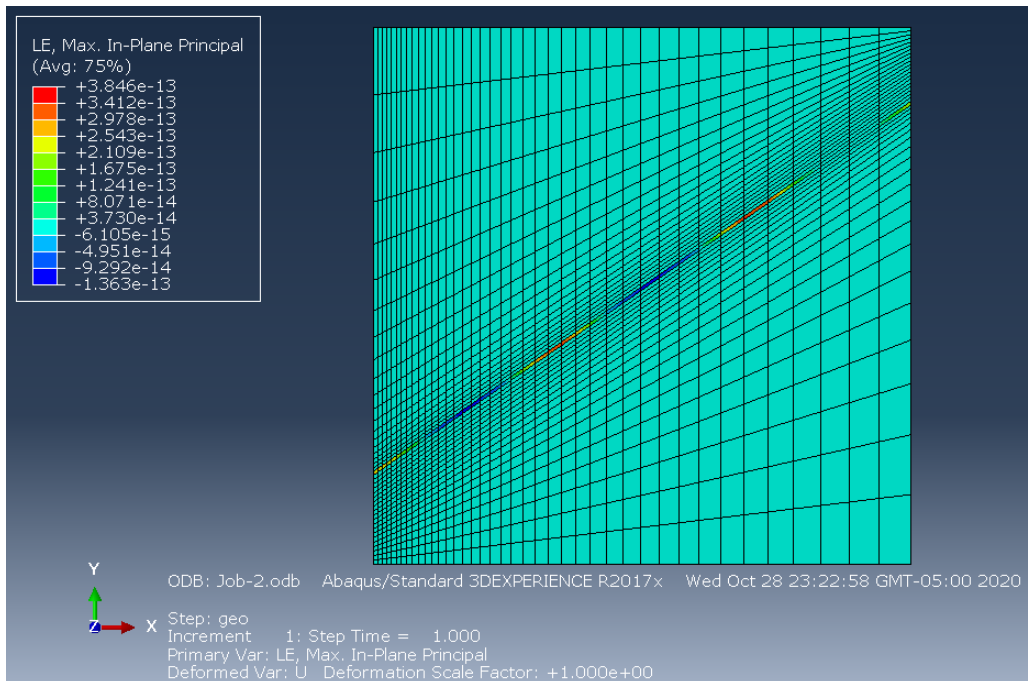
b. Esfuerzo S22



### c. Esfuerzo S33



### d. Deformación al final del paso Geoestático



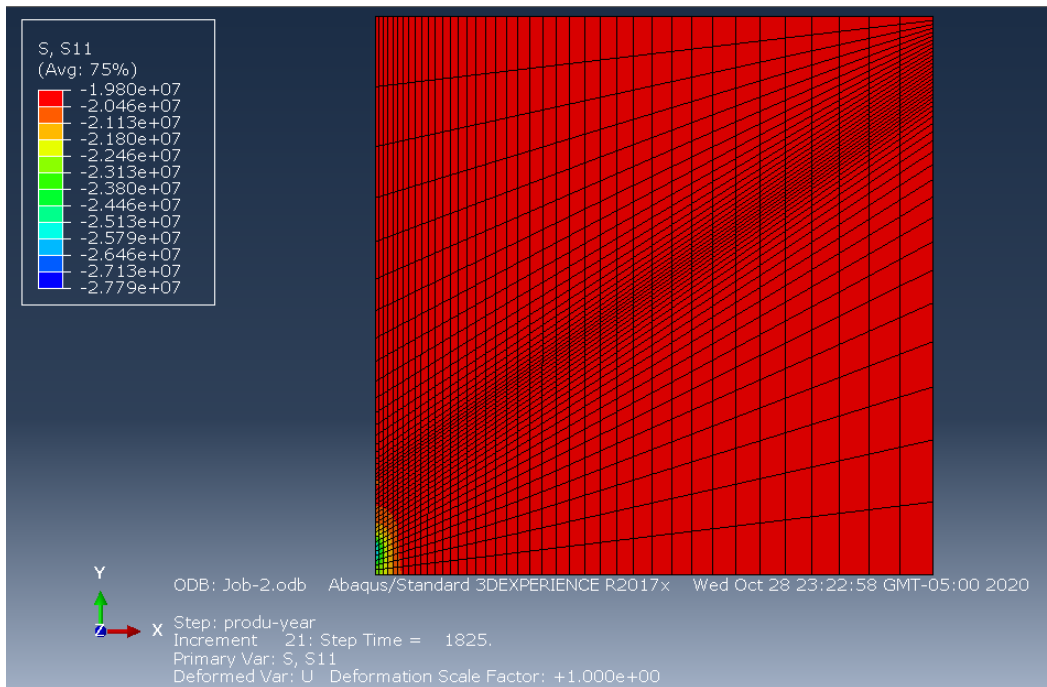
Fuente: Autor.

De los resultados de la simulación del primer paso del modelo, se observa que el paso Geoestático es coherente con los resultados esperados, la deformación tiende a cero y los esfuerzos efectivos corresponden a los definidos en el paso inicial.

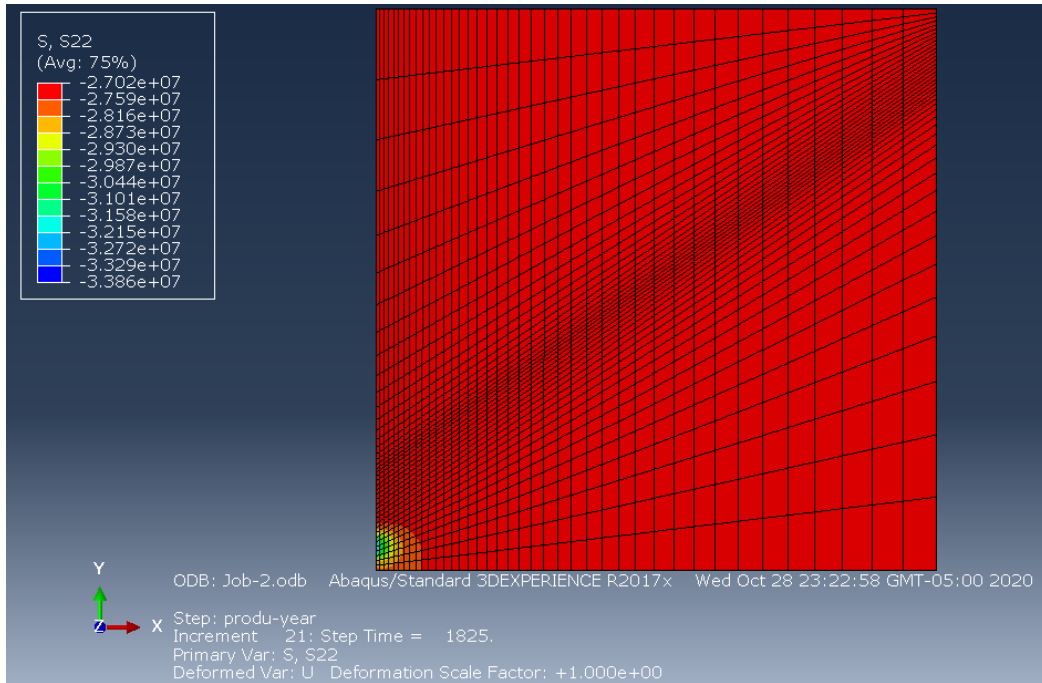
12. Verificar la evolución del esfuerzo S11 sobre la región de contacto entre la zona de falla y el pozo, este valor de esfuerzo será el que se defina como carga para el modelo cemento-casing, ver figura 36.

Figura 32. Resultados de la simulación al finalizar la etapa de producción.

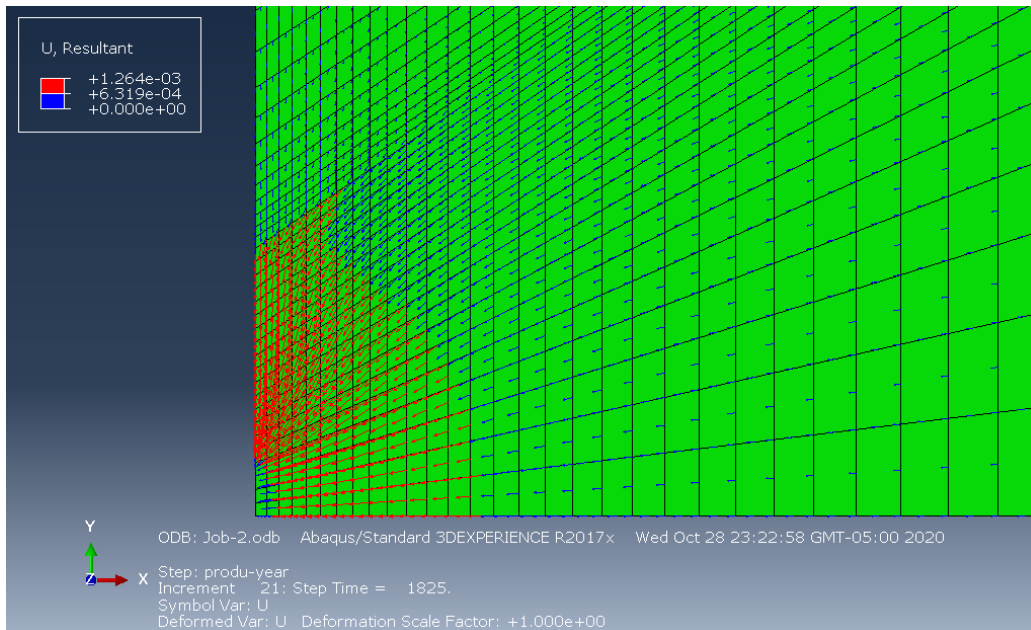
a. Esfuerzo S11



## b. Esfuerzo S22



## c. Desplazamiento en la dirección Y (S22)



Fuente: Autor.

Se observa un incremento en la magnitud de los esfuerzos en la zona de influencia de los perforados, como es de esperarse por la reducción de la presión de poro en esta región. El campo de desplazamiento muestra una tendencia de movimiento hacia la dirección -Y apuntando a la región de perforados. Basado en este comportamiento se puede concluir que la roca se encuentra sometida a compactación como consecuencia de la reducción de la presión de poro (producción de fluidos). No se registra perturbación de esfuerzos sobre la zona de falla, en general, el modelo conserva las magnitudes de los esfuerzos in situ en las zonas distantes al pozo, lo que indica que la perturbación de esfuerzos se produce en la cara del pozo.

13. Generar la geometría del revestimiento en el módulo Parte, asignar las propiedades de cemento y casing tabuladas en el numeral 3 a través del módulo Propiedades. Definir sobre la superficie del cemento la carga determinada en el numeral 12 y simular durante el tiempo de producción. Al final de este paso, verificar el esfuerzo Von Mises que reporta el software y determinar si este supera la resistencia al colapso del casing.

No se observa concentración de esfuerzos en los puntos distales de la falla, por lo que se concluye que la perturbación de los esfuerzos en la zona cercana al pozo no es suficiente para producir la reactivación de esta característica tectónica en el intervalo de dos años de producción. es importante verificar si en la zona de estudio existe alguna tendencia de falla de revestimiento por la reactivación de fallas o si por el contrario la integridad del pozo se ve afectada por otros factores.

## 7. CONCLUSIONES

Se verifica el aporte de la simulación numérica a la evaluación de fenómenos geomecánicos aplicada a la industria de los hidrocarburos, identificando las tendencias de desarrollo a nivel mundial y las herramientas software de mayor utilidad.

El uso de herramientas de simulación en la industria de los hidrocarburos permite entender fenómenos físicos que se presentan como resultado de las actividades de la operación como lo es la perforación de pozos y la producción de fluidos.

Se identifica que el revestimiento de un pozo está sujeto a diferentes configuraciones de carga desde el momento de su instalación en el agujero, la evolución de estos esfuerzos puede ocasionar la distorsión de la sarta y deformaciones en el pozo dependiendo de la resistencia mecánica de los materiales que lo revisten.

Se visualiza la pérdida de integridad del revestimiento de pozo por la generación de cargas puntuales como consecuencia del deslizamiento de un plano de falla, la perturbación de los esfuerzos se produce por la disminución de la presión de poro en el espacio poroso de la roca yacimiento por el avance en la producción de fluidos.

Se identifica que la perturbación de esfuerzos sobre una falla que interseca un pozo depende de la propagación de la onda de presión generada por la disminución de la presión de poro.

## 8. RECOMENDACIONES

Generar un modelo 3D en donde se tenga en cuenta la interacción física en la interfaz de la formación y la falla, ABAQUS permite asignar características a las superficies para verificar el comportamiento de estas bajo condiciones de esfuerzo.

Realizar un modelo que acople el cemento y casing sobre la roca y permitir un paso estático en el que se evalúe el colapso sin la necesidad de generar modelos adicionales.

Incluir la zona de daño de la falla y verificar cual es el impacto de esta discontinuidad sobre el deslizamiento del plano de falla, incluir un análisis de permeabilidad sobre la zona de falla con el fin de verificar el drenaje de fluidos a través de la zona de daño, este escenario puede generar una distribución diferente de presión de poro.

Utilizar diferentes criterios de falla para describir el comportamiento mecánicos de las rocas y verificar si existen nuevas tendencias en el modelamiento numérico del cemento y acero.

Calibrar el modelo con información de producción de un pozo y realizar sensibilidades a la tasa de producción para verificar el impacto sobre la distribución de esfuerzos.

## BIBLIOGRAFÍA

AADNOY, Bernt., *et al.* Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production. Springer. 2015.

ABDIDEH, Mohammad, y HEDAYATI, Soheila. Analytical and Numerical Study of Casing Collapse in Iranian Oil Field. Springer. 2017.

ABDIDEH, Mohammad, y HEDAYATI, Soheila. 3D Geomechanical Modeling of Casing Collapse in Plastic Formations (Cap Rock of Hydrocarbon Reservoir). Natural Resource Research, P.273-286. 2018.

AMAYA, R., *et al.* Casing Collapse Study on Block VI Wells: Casabe Field. Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 122956. 2009.

Anderson, E. M. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. Edinburgh, Oliver and Boyd. 1951.

ASBIL, W. T, Last, N. C. y PALTILLO, P. D. Effect of Nonuniform Loading on Conventional Casing Collapse Resistance. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers Paper SPE 79871-PA. 2004.

BERGER, A., *et al.*, Effect of Eccentricity, Voids, Cement Channels, and Pore Pressure Decline on Collapse Resistance of Casing. Texas: Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 90045. 2004.

BYROM, Ted, G. Casing and Liners for Drilling and completion, Design and Application, Second edition, United States: Elsevier, 2015.

CAPPA, Frederic, Modelling fluid transfer and slip in a fault zone, when integrating heterogeneous hydromechanical characteristics in its internal structure, France: Journal Compilation, 2009, P 1-6.

CAPPA, F, Rinaldi, A y Rutqvist, J, Geomechanical Effects on CO2 leakage through fault zones during large-scale underground injection, United States: Elsevier, 2013.

CHEN, Jinhua, et al. Failure modes of the venthole casing during longwall coal extraction: A case study, China: Key Laboratory of Rock Mechanics in Mechanical Structural Engineering, Chongqing, 2012.

DUSSEAULT, Maurice, BRUNO, Michael y BARRERA, Jhon. Casing Shear: Causes, Cases, Cures. Vol 16, United States: SPE, Drilling & Completion, 2001.

ERGOU, Liang., *et al.* Analysis on Collapse Strength of Casing Wear. CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, Vol. 26, N°3, P. 613-619. 2013.

EUSTES, A. W, FLECKENSTEIN, W. W y RODRIGUEZ. W, J.: Simulation of Collapse Loads on Cemented Casing Using Finite Element Analysis. Colorado: Society of Petroleum Engineers, Paper 84566. 2003.

FOSSUM, A. F., FREDICH, J.T. Large-Scale Three-Dimensional Geomechanical Modeling of Reservoirs: Examples from California and the Deepwater Gulf of Mexico. Oil & Gas Science and Technology. 2002.

FREDRICH, J. T. Reservoir Compaction, Surface Subsidence, and Casing Damage: A Geomechanical Approach to Mitigation and Reservoir Management. Noruega: Society of Petroleum Engineers (SPE), 1998.

GUTIERREZ, Sergio. Identificación de problemas de colapso en revestimiento de pozos, ocasionados por efectos geomecánicos. Caso de estudio: Pozo de un campo colombiano. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, 2013.

HENK, A, TREFFEISEN, T. Representation of Faults in reservoir-scale geomechanical finite element models, a comparison of different modelling approaches, Germany: Elsevier, 2019.

International Association of Drilling Contractors (IADC). Drilling Manual Vol. 1 of 2, Houston, Texas: DM, 2015. Cp. 2 Vol 1.

KEEDY, C. R, VEEKEN, C. A M y WAHLEITNER, J. P. Experimental modelling of casing deformation in a compacting reservoir. SPE-28090 Países Bajos: Society of Petroleum Engineers. 1994.

KELSO, Gary, *et al.* Evolution, Impact, and Management of Casing Deformation Caused by Tectonic Forces in the Andean Foothills, Colombia. United States: Society of Petroleum Engineers (SPE). 2006.

KIBBLE, K., *et al.* Collapse Strength Analysis of Casing Design Using Finite Element Method. Estados Unidos: Elsevier, 2000.

MAYORGA, D, L. "Evaluación de prácticas operacionales para reducir las fallas en tuberías de producción por efecto de la inyección de agua en el campo casabe", Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, UIS, Facultad de Ingenierías Físico Químicas, 2011.

PAK, A, TAHERI, S, Casing Failure in Salt Rock: Numerical Investigation of its Causes, Austria: Springer, 2020.

RODRÍGUEZ, J, FLECKEINSTEN, W, EUSTES, A, Simulation of Collapse Loads on Cemented Casing Using Finite Element Analysis, Denver, Colorado: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2003. P 1-9.

SAMUEL, Robello y WANG, HanYi. 3D Geomechanical Modeling of Salt-Creep Behavior on Wellbore Casing for Presalt Reservoirs. Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 166144-PA. 2016.

SCHUTJENS, P, M, T, M. *et al.*, Compaction-and Shear-Induced Well Deformation in Tyra: Geomechanics for Impact on Production. Austria: Springer. 2019.

SERRANO, D, VARGAS, L. Evaluación del colapso en el revestimiento de un pozo de ECOPETROL, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, UIS, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2019.

SHEN, Xinpu. Subsidence Prediction and Casing Integrity with Respect to Pore-Pressure Depletion with 3-D Finite-Element Method. Society of Petroleum Engineers, Paper SPE 138338. 2010.

SIMPSON, David A. Practical Onshore Gas Field Engineering, United States: Elsevier, 2017. P.106-108.

SIMULIA: "Abacus CAE/Analysis user's and example problems manual 6.11". Online documentation. 2013.

Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley, New York. 1923.

TREFFEISEN, T y HENK, A. Representation of faults in reservoir-scale geomechanical finite element models- A comparison of different modelling approaches. Elsevier. 2019.

VEEKEN, C. A. M., WAHLEITNER, J. P. y KEEDY, C. R. Experimental modeling of casing deformation in a compacting reservoir. Países Bajos: Society of Petroleum Engineers (SPE), 1994.

ZHANG, Yanhua, *et al.* Numerical Modelling of fault reactivation in carbonate rocks under fluid depletion conditions, 2D generic models with a small isolated fault, Australia: Elsevier, 2016. P 1-12.

ZOBACK, M. Reservoir Geomechanics, United States: Cambridge University Press, New York, 2007.

## ANEXOS

## A. TABULACIÓN DE ANTECEDENTES DE SIMULACIÓN

<b>Título</b>	Simulation of Collapse Loads on Cemented Casing Using Finite Element Analysis	Subsidence Prediction and Casing Integrity with Respect to Pore-Pressure Depletion With 3-D Finite-Element Method
<b>Año Publicación</b>	2003	2010
<b>Simulador</b>	ANSYS	ABAQUS
<b>Geometría</b>	Dos dimensiones	Tres dimensiones
<b>Dimensiones</b>	No definido	Global: 4000x5000x5000 Submodelo: 8x8x10
<b>Resumen</b>	Estudio del efecto de cargas de colapso sobre las propiedades mecánicas del revestimiento de un pozo, teniendo en cuenta el acero, el cemento y la roca	Inician con la simulación de las rocas a escala de campo para conseguir las condiciones de frontera para un submodelo derivado de los resultados de la primera simulación. El submodelo es la simulación del pozo
<b>Modelamiento de la roca</b>	No definido	Se emplea el criterio de Drucker-Prager, y se menciona el equivalente a Mohr-Coulomb. Presentan densidad de las capas de roca y propiedades elásticas
<b>Cargas y Condiciones de Frontera</b>	No definido	Presión de poro inicial, esfuerzos in situ, no desplazamiento es las caras laterales y la base del modelo
<b>Presión de Poro</b>	No definido	50 MPa
<b>Casing ID</b>	No definido	0.0752 m
<b>Casing OD</b>	No definido	0.0889 m
<b>Cemento OD</b>	No definido	0.108m
<b>Modelamiento de Casing</b>	Material elástico. La deformación del revestimiento ocurre únicamente en la región plástica, no fractura por los esfuerzos aplicados.	Material elastoplástico
<b>Modelamiento de Cemento</b>	Cemento perfectamente adherido a casing y formación.	Criterio de Drucker-Prager

<b>Título</b>	Modeling of coupled deformation and permeability evolution during fault reactivation induced by deep underground injection of CO2	Analysis of the hydromechanical behavior of fault zones in petroleum reservoirs
<b>Año Publicación</b>	2011	2013
<b>Simulador</b>	FLAC3D	ABAQUS
<b>Geometría</b>	Dos dimensiones	Tres dimensiones
<b>Dimensiones</b>	2000x2000	No definido
<b>Resumen</b>	Evaluar el impacto del deslizamiento de planos de falla sobre el almacenamiento de CO2 en yacimientos de roca sedimentaria	Evaluación de reactivación de fallas por inyección de fluidos a un yacimiento de hidrocarburos
<b>Modelamiento de la roca</b>	Zonas de falla de 10 metros. La permeabilidad del núcleo de falla puede estar entre $1 \times 10^{-17}$ a $1 \times 10^{-21}$ y el módulo de Young entre 1 a 10 GPa. La roca se modela como un material elastoplástico utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb	Se considera a la falla como una zona preestablecida. La roca y zona de falla son modeladas utilizando el criterio de Mohr-Coulomb ya que solo necesita de 3 parámetros: Angulo de fricción cohesión y dilatancia.
<b>Cargas y Condiciones de Frontera</b>	Esfuerzo vertical aplicado en el tope del modelo, esfuerzo horizontal máximo definido en el borde derecho. Presión constante en los bordes	No definido
<b>Presión de Poro</b>	25MPa	No definido
<b>Casing ID</b>	No definido	No definido
<b>Casing OD</b>	No definido	No definido
<b>Cemento OD</b>	No definido	No definido
<b>Modelamiento de Casing</b>	No definido	No definido
<b>Modelamiento de Cemento</b>	No definido	No definido

<b>Título</b>	Workflow for Wellbore Integrity Analysis during Reservoir Development	Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production
<b>Año Publicación</b>	2013	2015
<b>Simulador</b>	ABAQUS	ABAQUS
<b>Geometría</b>	Tres dimensiones	Tres dimensiones
<b>Dimensiones</b>	Global: 140x140x28	700x50x50
<b>Resumen</b>	Efecto del desarrollo del yacimiento sobre la integridad de un pozo, utilizando un análisis de elementos finitos	Evaluar deformación del revestimiento por pérdida de soporte lateral pro alta producción de arena
<b>Modelamiento de la roca</b>	Yacimiento, cemento y casing modelados con Mohr-Coulomb.	Formaciones homogéneas y modeladas utilizando un modelo de plasticidad generalizada. Criterio de falla de Drucker Prager. Elementos tipo Pore fluid/stress C3D10MP. Se utilizó una malla de menor tamaño en la cercanía al pozo. Se asumió interacción entre las capas de roca (interacción cohesiva = 85MPa). elementos de 5 metros de tamaño para las cercanías al pozo, casing y cemento
<b>Cargas y Condiciones de Frontera</b>	No definido	Campo predefinido de Presión de poro
<b>Presión de Poro</b>	No definido	45 MPa
<b>Casing ID</b>	0,162	0.244 m
<b>Casing OD</b>	0,178	0.222 m
<b>Cemento OD</b>	No definido	No definido
<b>Modelamiento de Casing</b>	Mohr-Coulomb	Criterio de plasticidad de Von Mises. Para verificar la deformación del casing se asume una geometría no lineal. Material elástico/perfectamente plástico. Elementos tipo integration shell S4R
<b>Modelamiento de Cemento</b>	Mohr-Coulomb	Se asume una buena adhesión entre el cemento y la formación (interacción de contacto cohesivo $K_{nn}=K_{ss}=K_{tt}=75\text{MPa}$ ). Elemento tipo stress C3D8

<b>Título</b>	3D Geomechanical Modeling of Salt-Creep Behavior on Well bore Casing for Presalt Reservoirs	Numerical Modelling of Fault Reactivation in Carbonate Rocks under Fluid Depletion Conditions - 2D Generic Models with a Small Isolated Fault
<b>Año Publicación</b>	2016	2016
<b>Simulador</b>	ABAQUS	No definido
<b>Geometría</b>	Tres dimensiones	Dos dimensiones
<b>Dimensiones</b>	r= 12.7 L=12.7	100x10
<b>Resumen</b>	Modelamiento detallado de la zona cercana al pozo, para investigar los efectos de creep de sal sobre la integridad del pozo	Estudiar los patrones de deformación y la perturbación de esfuerzos, reactivación asociada a la evolución de permeabilidad de la falla, efecto sobre los patrones de flujo
<b>Modelamiento de la roca</b>	No se considera el efecto gravitacional sobre las formaciones. Se inicia con un paso geostático para simular condiciones iniciales de esfuerzos	Material elástico plástico, roca carbonato. Modelo constitutivo de Mohr-Coulomb
<b>Cargas y Condiciones de Frontera</b>	0,08	No definido
<b>Presión de Poro</b>		No definido
<b>Casing ID</b>	0,201	No definido
<b>Casing OD</b>	0,219	No definido
<b>Cemento OD</b>	0,311	No definido
<b>Modelamiento de Casing</b>	No definido	No definido
<b>Modelamiento de Cemento</b>	No definido	No definido

<b>Título</b>	Analytical and Numerical Study of Casing Collapse in Iranian Oil Field	Representation of faults in reservoir-scale geomechanical finite element models-A comparison of different modelling approaches
<b>Año Publicación</b>	2017	2020
<b>Simulador</b>	ABAQUS	ANSYS
<b>Geometría</b>	Dos dimensiones	Dos dimensiones
<b>Dimensiones</b>	40X40	3000X3000
<b>Resumen</b>	No definido	Comparación de 3 enfoques para la simulación de una falla en un modelo de elementos finitos, para evaluar su impacto en los resultados de la simulación
<b>Modelamiento de la roca</b>	La formación se asume como un material elastoplástico. El esfuerzo horizontal máximo se definió sobre los bordes laterales del modelo, mientras el esfuerzo horizontal mínimo en la parte superior e inferior	Mohr-Coulomb ampliamente utilizado, bajo módulo de Young y bajo ángulo de fricción para la zona de falla
<b>Cargas y Condiciones de Frontera</b>	No definido	No definido
<b>Presión de Poro</b>	No definido	No definido
<b>Casing ID</b>	No definido	No definido
<b>Casing OD</b>	No definido	No definido
<b>Cemento OD</b>	No definido	No definido
<b>Modelamiento de Casing</b>	Material elástico-plástico	No definido
<b>Modelamiento de Cemento</b>	Material elástico	No definido