

MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA EVALUAR COLAPSO DE
REVESTIMIENTO POR PRODUCCIÓN DE ARENA Y APLICACIÓN A UN
CAMPO DE ECOPETROL.

RUBÉN ALEXANDER GUERRERO MUÑOZ
JOHN FERNANDO PINZÓN ZABALA

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

2020

MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA EVALUAR COLAPSO DE
REVESTIMIENTO POR PRODUCCIÓN DE ARENA Y APLICACIÓN A UN
CAMPO DE ECOPETROL.

RUBÉN ALEXANDER GUERRERO MUÑOZ
JOHN FERNANDO PINZÓN ZABALA

Trabajo de Grado para optar por el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

NÉSTOR FERNANDO SAAVEDRA TRUJILLO
MSc. en Ingeniería de Petróleos

Codirector

MIGUEL FERNANDO PALENCIA MUÑOZ
MSc. en Ingeniería de Hidrocarburos

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

2020

DEDICATORIA

A mi madre, Dílíana Muñoz, por su amor y cariño, por ser mi mayor apoyo en cada momento de mi vida, mi motivación para ser cada día mejor e inspiración para cada proyecto que emprendo.

A mi papa, Rubén Guerrero y a mi familia por su apoyo incondicional y amor

A mi novia Díana, por su invaluable compañía, por ser parte de este bonito proceso

A mis amigos, por su amistad y apoyo incondicional, por cada buen momento.

Rubén guerrero

DEDICATORIA

A Dios por guiar mi camino y darme la sabiduría para superar los retos y obstáculos que se presentaron

A mis padres Juan y María, por brindarme la oportunidad de lograr mis sueños, quienes, con amor, ejemplo y apoyo, me formaron como persona. Y por el esfuerzo, dedicación y consejos se ha cumplido esta fase de la meta

A mis hermanos Genny, Aura, Enrique, Andrés, Mary y Arley por luchar a mi lado en cada momento y por el apoyo y buena fe

A mis familiares, por tantos momentos compartidos y por creer en mis capacidades

A mis amigos UIS, que gracias a ellos aprendí que en la vida se puede ser mejor y porque han llenado esta etapa con buenos recuerdos y experiencias gratificantes

Jhon Pinzón

AGRADECIMIENTOS

*A Dios por darnos la oportunidad de formarnos como profesionales,
por su apoyo y sabiduría*

*A la Universidad Industrial de Santander, por contribuir en gran
manera para cumplir este objetivo. A la Escuela de Ingeniería de
Petróleos y a los profesores que fueron parte de nuestra formación
profesional*

*Al Grupo de Investigación de Estabilidad De Pozos, por darnos esta
oportunidad de ser cada vez mejores mejores personas y
profesionales*

*A los ingenieros Néstor Saavedra y Miguel Palencia por dirigir y
apoyar este proyecto, por creer en nuestras capacidades y por las
sugerencias dadas y por los consejos y recomendaciones para la vida
profesional*

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. GENERALIDADES	17
2.1 GENERALIDADES DE LOS REVESTIMIENTOS.....	17
2.1.1 Tipos de tubería de revestimientos.	17
2.1.2 Especificaciones de las tuberías de revestimiento.....	20
2.1.3 Capacidad de resistencia.....	25
2.3 ANÁLISIS GEOMECÁNICO.....	26
2.3.1 El modelo geomecánico (Mechanical Earth Modeling, MEM).	26
2.3.2 Esfuerzo.....	27
2.3.3 Esfuerzos principales.....	28
2.3.4. Esfuerzo efectivo.	31
2.3.5 Regímenes de esfuerzos.	32
2.3.6 Módulos elásticos.	33
2.3.7 Criterios de falla.	36
2.3 PRODUCCIÓN DE ARENA	40
2.3.1 Causas de la producción de arena.	42
2.3.2 Consecuencia de la producción de arena.....	47
2.3.3 Métodos de control.	49
2.3.4 Clasificación de los modelos de producción de arena.	50

3. COLAPSO DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO.....	56
3.1 COLAPSO.....	56
3.2 CEDENCIA DE LOS MATERIALES.....	56
3.2.1 Tipos de colapso.....	59
3.3 POSIBLES FACTORES DEL COLAPSO DE REVESTIMIENTOS	62
3.3.1 Ovalidad.....	64
3.3.2 Excentricidad.	64
3.3.3 Desgaste interno en el revestimiento.....	65
3.3.4 Desgaste por pandeo.....	66
3.3.5 Temperatura.	68
3.3.6 Sobrecargas debido a formaciones plásticas.....	69
3.3.7 Arenamiento.....	69
3.4 MODELADO DEL COLAPSO EN TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO	71
4. MODELO NUMÉRICO Y SOFTWARE ABAQUS	76
4.1 SIMULACIÓN EN ABAQUS.....	80
4.1.1 Etapas del procesamiento.....	82
4.1.2 Módulos de trabajo interno.....	84
4.2 ARENAMIENTO EN EL SOFTWARE ABAQUS	98
4.2.1 Mallado adaptativo (ALE Adaptive Meshing).	99
4.2.2 Dominio de malla adaptativo (Adaptive Mesh Domain).	100
4.2.3 Restricción de malla adaptativa (Adaptive Mesh Constraint).....	101
5. SIMULACIÓN DEL COLAPSO DEL REVESTIMIENTO	102
5.1 GEOMETRÍA Y DATOS DE ENTRADA DEL MODELO	102
5.1.1 Materiales.	103
5.1.2 Propiedades mecánicas.....	103
5.1.3 Aplicación de los elementos finitos..	104
5.1.4 Condiciones de carga.	106
5.2.5 Dominio de malla adaptativo.....	107

5.3 PASOS EN LA SIMULACIÓN	107
5.3.1 Paso 1 Geoestático.....	107
5.3.2 Paso 2 Perforación.	108
5.3.3 Paso 3 Producción.....	109
5.3.4 Paso 4 Reducción de presión de poro..	109
6. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	110
6.1 VALIDACIÓN DEL MODELO BASADO EN EL CÁLCULO DE ESFUERZOS CON EL MODELO ANALÍTICO DE KIRSCH.....	110
6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	112
6.3 ESCENARIOS DE COLAPSO DE REVESTIMIENTO	115
6.3.1 Escenario 1.....	117
6.3.2 Escenario 2.....	117
6.3.4 Escenario 3.....	119
6.3.4 Escenario 4.....	119
7. CONCLUSIONES	122
8. RECOMENDACIONES.....	123
BIBLIOGRAFÍA.....	124

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tubería de revestimiento.	18
Figura 2. Esquema de las sargas de revestimientos	21
Figura 3. Tipo de conexiones.....	24
Figura 4. Descomposición de la fuerza.....	27
Figura 5. Tipos de esfuerzos	28
Figura 6. (A) Esfuerzos principales in situ. (B) Esfuerzos in situ para un pozo vertical	29
Figura 7. Esfuerzo efectivo.	31
Figura 8. Esfuerzo efectivo en una región cercana al pozo.	32
Figura 9. Esquema de clasificación de E. M. Anderson para las magnitudes de tensión relativa en regiones normales, rumbo deslizante y fallas inversas.....	33
Figura 10. Relación de Poisson.	34
Figura 11. Módulo de rigidez.....	35
Figura 12. Módulo de Young.....	36
Figura 13. Modelo de falla de Von Mises a partir de datos de pruebas triaxiales. .	38
Figura 14. Criterio de falla de Mohr Coulomb a partir de datos de prueba triaxiales.	40
Figura 15. Arco de arena cerca de la perforación.	42
Figura 16. Representación medio continuo y discontinuo.....	53
Figura 17. A. Condición de falla. - B. Envolvente P_{wfc}	54
Figura 18. Fuerzas externas hacia el revestimiento.....	57
Figura 19. Diagrama esfuerzo - deformación de materiales dúctiles.	58
Figura 20. Esquema de tensión radial y tangencial en una sección transversal de tubería.....	59
Figura 21. Representación esquemática de los tipos de colapso en una sección vertical de tubería.	62

Figura 22. Clasificación de causas del colapso de revestimientos.	63
Figura 23. Ovalidad en la tubería.....	64
Figura 24. Excentricidad en la tubería.	65
Figura 25. Desgaste por pandeo.	67
Figura 26. Representación del daño del revestimiento debido a la creación de cavidades y producción de arena en formaciones no consolidadas.	70
Figura 27. Efecto de factores en la capacidad de resistencia de los revestimientos.	70
Figura 28. Sistema coordenado cartesiano.	81
Figura 29. Etapas de trabajo.....	82
Figura 30. Archivos de entrada en el preprocesamiento de Abaqus.....	83
Figura 31. Interfaz de Abaqus/CAE. Rojo: Módulos de trabajo. Azul: Model tree. Verde: Barra de menú.....	84
Figura 32. Familia de elementos.....	94
Figura 33. Elementos de primer orden (Izquierda). Elementos de segundo orden (Derecha).....	96
Figura 34. Comandos de visualización.	98
Figura 35. Representación del modelo simplificado a (1/4) de geometría	103
Figura 36. Análisis de sensibilidad de malla con la deformación.	105
Figura 37. Condiciones de carga. Esfuerzos in situ, presión de poro, condiciones de fronteras.....	106
Figura 38. Domino de malla adaptativa. (izquierda) Restricción de malla adaptativa. (Derecha)	107
Figura 39. Deformación del modelo (izquierda). Desplazamiento del modelo (Derecha).....	108
Figura 40. Remoción del material que corresponde al pozo e inmediatamente su completamiento.....	109
Figura 41. Valores de esfuerzo radial y tangencial para modelo y ecuaciones de Kirsch en dirección "X" ($\theta = 0^\circ$).	111

Figura 42. Esfuerzo de von Mises (A). Máximo valor de von Mises en el revestimiento (B).....	114
Figura 43. Escenario base	115
Figura 44. Escenario 1	117
Figura 45. Escenario 2.....	118
Figura 46. comportamiento del tiempo de colapso vs la tasa de producción de arena.....	118
Figura 47. Comportamiento de escenario 3 y 4	120
Figura 48. Arena producida durante el tiempo de simulación en los diferentes escenarios.....	121

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Métodos utilizados para determinar los esfuerzos principales.	30
Cuadro 2. Factores que influyen en la producción de arena.....	45
Cuadro 3. Ventajas y desventajas de los métodos convencionales de control de arena.....	51
Cuadro 4. Modelos geomecánicos aplicados al colapso de revestimiento y producción de arena	77
Cuadro 5. Sistema internacional de unidades que fue usado en la simulación.	81
Cuadro 6. Comandos de visualización.....	98
Cuadro 7. Materiales.....	104
Cuadro 8. Cargas aplicadas	104
Cuadro 9. Resultados de la variación de la tasa de arenamiento.	116

RESUMEN

TÍTULO: MODELAMIENTO NUMÉRICO PARA EVALUAR COLAPSO DE REVESTIMIENTO POR PRODUCCIÓN DE ARENA Y APLICACIÓN A UN CAMPO DE ECOPETROL.*

AUTORES: RUBÉN ALEXANDER GUERRERO MUÑOZ
JOHN FERNANDO PINZÓN ZABALA**

PALABRAS CLAVES: Colapso de Revestimiento, Producción de Arena, Simulación Numérica, Abaqus.

DESCRIPCIÓN:

Un gran número de yacimientos de hidrocarburos en el mundo se encuentran en formaciones de arenas no consolidadas, en los cuales el colapso del revestimiento y la producción de arena son los principales problemas que afectan la producción de petróleo. El colapso del revestimiento generalmente es reportado durante la producción, siendo originado convencionalmente por las fuerzas de compresión, tensión, estallido o colapso aplicadas en la tubería de revestimiento. Los esfuerzos excesivos y no uniformes que causan la falla de la roca no consolidada son una de las principales razones informadas para la falla del revestimiento.

En este trabajo, se realizó un modelo numérico bidimensional en el software de elementos finitos Abaqus para simular geomecánicamente los efectos sobre el revestimiento en presencia de fuerzas existentes, interacciones hidráulicas y mecánicas con la formación circundante durante cada etapa correspondiente, perforación, completamiento y producción. Se consideraron los efectos de la producción de arena mediante una región de malla adaptativa que permite la erosión de arena en la cara del pozo dependiendo de un parámetro de velocidad.

El objetivo de la simulación es evaluar el colapso del revestimiento. El criterio para determinar el colapso de revestimiento usado es la comparación del estado de esfuerzos triaxial con el criterio de falla uniaxial, es decir, von Mises versus yield strength del revestimiento. En otras palabras, el colapso del revestimiento será indicado si el von Mises obtenido en la simulación excede el yield strength del revestimiento.

Los resultados de la simulación numérica muestran que el von Mises supera el yield strength del revestimiento lo que indica el colapso. Esto se debe a que las cavidades creadas por el arenamiento generan incremento en la concentración de esfuerzos sobre el revestimiento

* Trabajo de Grado.

* *Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Néstor Fernando Saavedra Trujillo, MSc. en Ingeniería de Petróleos. Codirector: Miguel Fernando Palencia Muñoz, MSc. en Ingeniería de Hidrocarburos

SUMMARY

TITLE: NUMERICAL MODELING TO EVALUATE CASING COLLAPSE DUE TO SAND PRODUCTION AND ITS APPLICATION IN ECOPETROL OIL FIELD*

AUTHORS: RUBÉN ALEXANDER GUERRERO MUÑOZ
JOHN FERNANDO PINZÓN ZABALA**

KEY WORDS: Casing collapse, sanding, Numerical Simulation, Abaqus.

DESCRIPTION:

Many reservoirs in the world are found in unconsolidated sand formations, in which the casing collapse and sand production are the main problems that affect oil production. Casing collapse is generally reported during production stage, being conventionally caused by compression, tension, burst or collapse loads applied to the casing wall. Excessive and non-uniform stresses in unconsolidated formations causes rock failure and are one of the main reasons reported for casing failure.

In this research finite element numerical modeling with bidimensional geometry is carried out using ABAQUS software to simulate casing in the presence of existing forces, hydraulic and mechanical interactions with the surroundings of the wellbore during each corresponding stage, drilling, completion and production. The effects of sand production at the wellbore were considered through an adaptive mesh domain that allows sand erosion of the formation depending on a rate speed parameter.

The simulation target is to evaluate the casing collapse. The criteria used to determine the casing collapse is the comparison of the triaxial stress state with the uniaxial failure criterion, (i.e., von Mises versus yield strength of the casing). In other words, casing collapse will be indicated if the von Mises obtained in the simulation exceeds the yield strength of the casing.

The results of the numerical simulation show that the von Mises exceeds the yield strength of the casing, which indicates the collapse. This is because the cavities created by the sanding generate an increase in the stress concentration on the casing.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Néstor Fernando Saavedra Trujillo, MSc. en Ingeniería de Petróleos. Codirector: Miguel Fernando Palencia Muñoz, MSc. en Ingeniería de Hidrocarburos

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera presenta un crecimiento exponencial el cual conlleva a una mayor tasa producción de petróleo en pro de suplir la demanda energética, como es de saberse al producir petróleo también se producen grandes cantidades de agua, gas y en algunos casos producen partículas sólidas o arenas que pertenecen a la formación productora.

Cerca del 70% de los yacimientos de hidrocarburos en el mundo se encuentran en formaciones no consolidadas (nouri et al, 2003a) y geológicamente nuevas, lo que facilita el arenamiento. La producción de arena es un problema significativo que afecta la producción de petróleo, el riesgo de que se genere arenamiento aumenta cuando la presión de poro se reduce a tal punto que los esfuerzos efectivos exceden la resistencia de la formación, esto ocasiona cambios de integridad en zonas cercanas al wellbore por la creación de cavidades (Gholami et al, 2016), pérdida de estabilidad de los granos y una redistribución de esfuerzo que genera a una recompactación y posible subducción, dando como resultado el colapso del revestimiento, pérdida de productividad del pozo y en un escenario más severo su pérdida total provocando costos imprevistos y posibles inversiones para una nueva perforación.

En el presente trabajo se realizó una consulta de los estudios realizados por diferentes autores con el propósito de establecer los principales criterios que causan el colapso de la tubería de revestimiento, haciendo énfasis en el efecto que tiene la producción de arena en el revestimiento. Para ello, se construyó un modelo numérico que permite integrar los factores que afectan la integridad de los revestimientos ocasionados por la producción de arena, permitiendo predecir la influencia del arenamiento en las condiciones de seguridad y estabilidad del revestimiento, con el fin de mantener la productividad el campo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el modelamiento numérico para evaluar el colapso de revestimiento por producción de arena y su aplicación a un campo de Ecopetrol.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar el estado de arte de modelos numéricos aplicados en la industria para evaluar colapso de revestimiento por producción de arena.
- Seleccionar el modelo numérico que más se ajuste a los problemas por colapso de revestimientos registrados en Colombia por producción de arena.
- Reproducir el modelo numérico seleccionado para evaluar colapso de revestimiento por producción de arena aplicando un software de elementos finitos.
- Validar el modelo numérico con datos de literatura y aplicar a un campo colombiano.

2. GENERALIDADES

2.1 GENERALIDADES DE LOS REVESTIMIENTOS

Los pozos perforados ya sea para producir petróleo / gas (o para inyectar materiales en formaciones subterráneas), deben estar revestidos con material de suficiente resistencia y funcionalidad¹. El hueco es revestido con tubería especial cementada, cerrando el espacio comprendido entre la pared del hueco y el revestimiento, evitando derrumbes de las paredes dentro del pozo, aislando manifestaciones de líquidos de las formaciones presentes y ser el componente estructural de un pozo².

La selección apropiada de las tuberías de revestimiento es uno de los aspectos más importantes debido a la capacidad para soportar las presiones, cargas y una serie de condiciones de operación. Es un factor importante en la seguridad económica de la vida productiva del pozo. En la Figura 1 se muestra la tubería de revestimiento que es utilizada en la industria.

2.1.1 Tipos de tubería de revestimientos. La cantidad de sartas de revestimiento que se instalan en un pozo dependen del tipo de zonas a perforar y la profundidad objetivo del pozo.

Los tipos de sartas de revestimiento que se pueden instalar en un pozo son los siguientes:

2.1.1.1 Revestimiento Conductor: Esta sarta es utilizada para soportar formaciones no consolidadas, proteger aguas frescas de ser contaminadas con fluido de perforación, aísla cualquier yacimiento somero de gas y se utiliza para

¹ SHEN, Xipu. BAI, Mao & STANDIFIRD, William. Drilling and Completion in Petroleum Engineering. Theory and Numerical Applications Editors. Broken Sound Parkway NW.CRC Press Taylor & Francis Group. 2011. p. 41.

² *Ibíd.* p. 41.

instalar los sistemas de control del pozo y la desviación para el retorno del fluido de perforación. La sarta usualmente es hincada o cementada a la superficie en tierra y al lecho marino en costa afuera. Es la de sarta de mayor diámetro que se instala en el pozo y varía entre 16” a 30”, el rango de profundidad de asentamiento puede variar entre 90’ y 500’.

Figura 1. Tubería de revestimiento.



Fuente: LA COMUNIDAD PETROLERA. [sitio web]. Tubería de revestimiento. [Consulta: 05 de mayo 2020]. Disponible en: <https://lacomunidadpetrolera.com/2009/01/tuberias-de-revestimiento.html>

2.1.1.2 Revestimiento de Superficie: Esta sarta de tubería se instala de forma que aísle los acuíferos subsuperficiales y acumulaciones someras de gas, así como las formaciones que puedan presentar pérdidas de fluido de perforación. En pozos desviados debe cubrir la sección de crecimiento de ángulo para evitar derrumbes en el pozo. Esta sarta se encuentra, ya sea hasta la superficie o lecho marino o en el interior de la sarta conductora y sostiene las conexiones superficiales de control definitivas. El rango de diámetro va de 7” a 20”, esta proporciona una completa

protección durante la perforación, su profundidad de asentamiento puede variar entre 1000' y 5000'.

2.1.1.3 Revestimiento Intermedio: Es la sarta que se instala dentro del pozo con el fin de proteger las formaciones de las presiones ejercidas por el fluido de perforación. Su cementación juega un papel muy importante para evitar comunicación del revestimiento con los estratos de baja presión, estratos donde puede haber pérdidas de lodo o zonas de hidrocarburos y cualquier otro estrato indeseable. El diámetro puede variar de 7" a 11 3/4", la profundidad de asentamiento generalmente es en estratos de transición a zonas con presiones anormales altas y puede variar de 7000' a 15500'.

2.1.1.4 Revestimiento de producción: Una vez que la perforación llega a la zona objetivo se coloca el revestimiento final o de producción. El pozo quedara completado, produciendo y controlado durante toda su vida productiva. Si esta sarta se coloca en el tope de la zona productora resultará en una terminación a hueco abierto. Si la parte inferior de esta tubería de revestimiento se coloca debajo de la zona productora es necesario cañonear o perforar la tubería para permitir la comunicación entre la tubería y la formación productora; con esto resulta una terminación a hueco revestido. Esta sarta debe soportar la máxima presión de fondo de la formación productora, tener resistencia a la corrosión, así como resistir las presiones que se manejaran en el caso de que el pozo se fracture para aumentar su productividad. El diámetro puede variar de 4 1/2" a 9 5/8".

2.1.1.5 Revestimiento Corto (Liner): El termino camisa o (liner) se aplica generalmente a tramos de tubería que no llegan hasta superficie, quedando 150' a 500' traslapados en el revestimiento inmediatamente anterior, sin embargo, puede ser mayor dependiendo del objetivo. Estas camisas pueden servir como el revestimiento intermedio o de producción a través de varios cientos de pies en la parte inferior de un pozo.

Usos del liner:³

- Control de pozos. El liner permite aislar zonas de alta o baja presión y terminar o continuar la perforación con fluidos de alta o baja densidad.
- Economía de tubería de revestimiento. Debido a la pequeña cantidad de tubería utilizada, no comparable con la tubería llevada hasta la superficie.
- Rápida instalación. Las tuberías de revestimiento cortas pueden ser colocadas en el intervalo deseado mucho más rápido que las normales, una vez conectada la cantidad de tubos necesaria son bajados con la tubería de perforación.
- Ayuda a corregir el desgaste de la última tubería de revestimiento cementada al continuar la perforación
- Evita volúmenes muy grandes de cemento por ser tramos de tubería más cortas
- Permite utilizar empacadores y tuberías de producción de mayor diámetro. Al no tener un diámetro restringido en la tubería de producción.

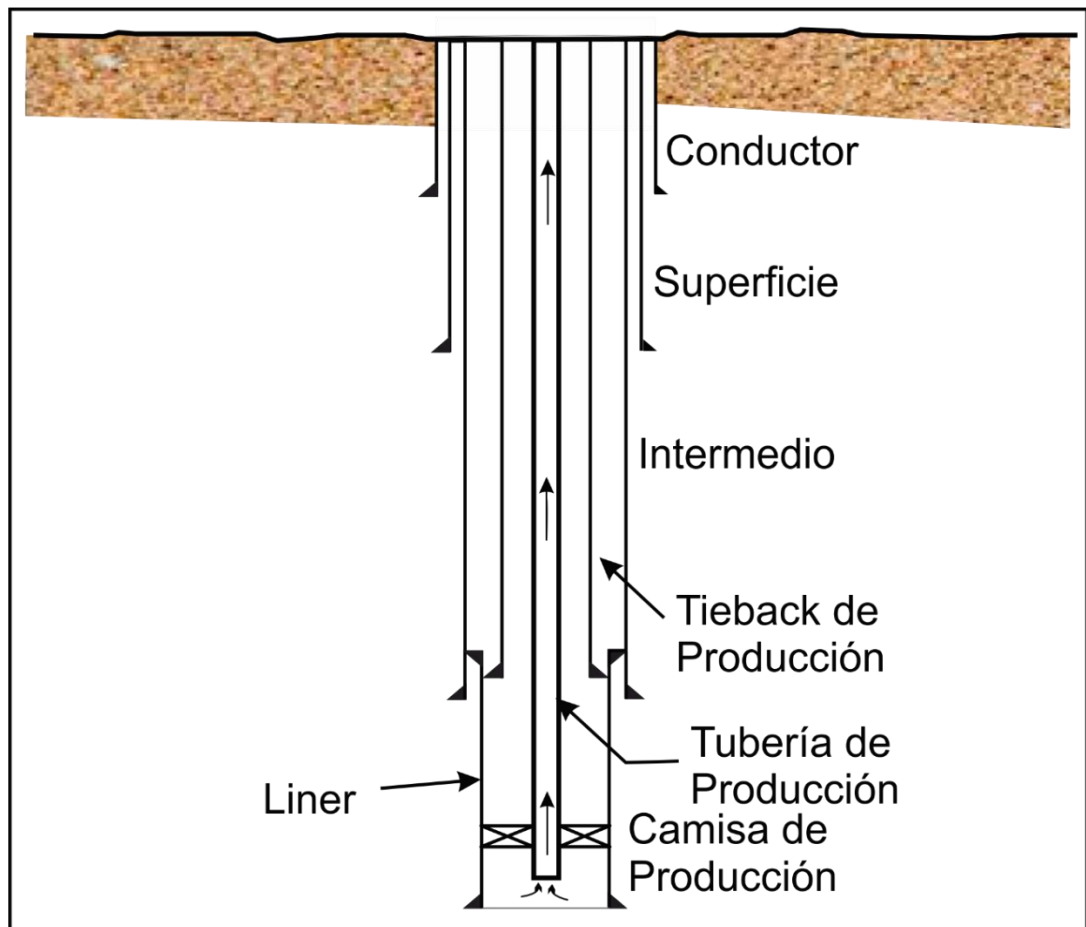
En la Figura 2 se muestra un esquema típico de la sarta de tubería de revestimiento instaladas en un pozo.

2.1.2 Especificaciones de las tuberías de revestimiento. La fabricación de la tubería de revestimiento debe cumplir altos estándares de seguridad y calidad establecidos por el instituto americano del petróleo (API por sus siglas en inglés) en el Boletín 5C3 (API) y la organización internacional de estandarización (ISO por sus siglas en Ingles) que han sido aceptada por la industria petrolera a nivel mundial.

³ BRAVO, VALLEJO, Christian Alejandro; GARCÍA DE LA ROSA, Itzel; LEAL ORTA, Alejandro; MENDOZA VARGAS, Jorge Alejandro; SANTIAGO ÁVILA y Edgar Alexis; URIBE HERNÁNDEZ, José Salvador. Capacidad de resistencia de las tuberías petroleras. [En línea]. México D.F: Instituto Politécnico Nacional. 2013, p. 9. Disponible en: <http://oilproduction.net/files/OilProduction%20-%20capacidad-de-resistencia-de-tuberias.pdf>

Estos organismos han establecido especificaciones para tuberías de revestimiento y cuerpos tubulares que permiten identificar sus dimensiones, magnitudes y rendimiento para obtener su óptimo desempeño.

Figura 2. Esquema de las sartas de revestimientos



Fuente: Manual de diseño de revestidos, PDVSA.

2.1.2.1 Especificaciones químicas: La composición química del acero y el tratamiento térmico que recibe en la fabricación de la tubería de revestimiento juega un rol importante en las propiedades físicas, mecánicas y la resistencia a la corrosión de la tubería.

2.1.2.1.1 Grado: Es una nomenclatura que sirve para nombrar la tubería de revestimiento. Consiste en una letra seleccionada arbitrariamente que indica la química del acero seguido por un número que es el valor mínimo de cedencia del material medido en miles de libras por pulgada cuadrada (lb/in²).

El API define los siguientes grados de acero:

H40 - J55 - K55 - C75 - L80 - N80 – C90 - C95 - T95 – P110 – Q125

Existen grados que presentan ciertas restricciones en el proceso de fabricación y tratamiento térmico. Son grados de tubería no API

2.1.2.1.2 Nivel de servicio: los tubulares utilizados se pueden agrupar en 4 grupos de acuerdo con el servicio, principalmente a las condiciones en las estarán expuestos:⁴

Nivel 1: Grados **H-40, J-55, K-55 y N-80**

- Medio Dulce o Cantidad Limitada de H₂S
- Presiones < 5,000 psi

Nivel 2: Grados **L-80, C-90, C-95 y T-95**

- Presión >10M psi con contenido de H₂S limitado
- Baja Presión y contenido de H₂S elevado

Nivel 3: Grado **P-110**

- Bajo contenido de H₂S;
- Alta Temperatura /Alta Presión

⁴ Programa De Entrenamiento Acelerado Para Ingenieros Supervisores De Pozo, SCHLUMBERGER, Sección 6, Tubería de Revestimiento, p. 25

Nivel 4: Grados por encima del nivel 3 como **Q-125**

- Aplicaciones de alta presión con alto contenido de H₂S

2.1.2.2 Especificaciones físicas

2.1.2.2.1 Diámetro externo (OD): Comercialmente llamado diámetro nominal y corresponde al diámetro externo del cuerpo de tubo, varía desde 4 1/2 hasta 24 pulgadas. El diámetro en los extremos del tubo es mayor debido al maquinado de la rosca. El valor del diámetro externo debe estar dentro del rango de tolerancia especificado en la norma API Spec. 5CT.

2.1.2.2.2 Espesor de pared: se define como la diferencia entre el diámetro externo y el diámetro interno, su valor influye en el rendimiento de las propiedades mecánicas de la tubería. Durante las operaciones de perforación, intervenciones a pozo o el paso de fluidos puede presentarse desgaste en la pared del revestimiento y afectar su capacidad.

2.1.2.2.3 Diámetro Drif: Es el máximo diámetro que puede tener la broca y/o herramienta para pasar a través del revestimiento sin quedarse ajustada con la pared interior del revestimiento, se halla por medio de un mandril cilíndrico que pasa libremente a través del revestimiento con la fuerza ejercida por el peso del mandril que se utiliza en la prueba (API 5CT).⁵ El diámetro drif siempre es ligeramente menor al diámetro interno de la tubería.

2.1.2.2.4 Longitud: el API establece tres rangos de longitud para las juntas de revestimiento

⁵ HIGGINS VARGAS, Dorges de Jesús; CASTAÑEDA CLAVIJO, Duván Mauricio. Evaluación de modelos de optimización de costos de revestimiento y aplicaciones en un campo de Ecopetrol. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2020

Rango I: 16 a 25 (ft)

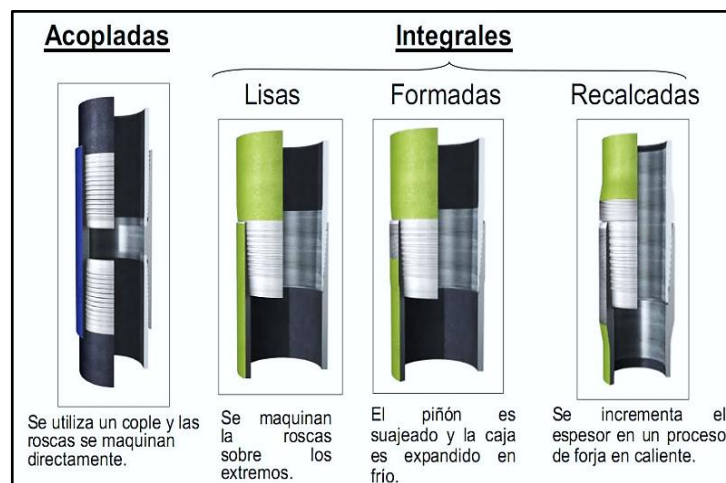
Rango II: 25 a 34 (ft)

Rango III: 34 a 48 (ft)

La longitud de tubería de revestimiento de rango III es la más utilizada ya que se reduce el tiempo en la operación de corrida, número de conexiones y posibles puntos de fallas en las cuplas.

2.1.2.2.5 Conexiones: para lograr cubrir una sección completa en el pozo, los tubos o herramienta y/o equipos de fondo se unen por medio de conexiones, sabiendo que la unión debe ser hermética y capaz de soportar cualquier fuerza a la que será sometida y así formar una sarta de tubería con capacidades específicas. La conexión de las juntas puede ser integral o acoplada.

Figura 3. Tipo de conexiones



Fuente: MARTÍNEZ MEJÍA, Javier Andrés. Consideraciones técnicas para el diseño y la selección de la tubería de revestimiento del pozo stratigráfico profundo ANH-BVTURA-1-ST-P. p. 54. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2011.

Conexión acoplada: integra un tercer elemento llamado cople, es de corta longitud, tiene un diámetro mayor al de la tubería y es roscado internamente por los dos extremos de los tubos.

Conexión integral: consiste en la unión de un extremo de la tubería roscado internamente (caja) en el otro extremo roscado externamente (pin).

2.1.3 Capacidad de resistencia. La capacidad de resistencia de una tubería se puede definir como la aptitud o condición que tiene para reaccionar y evitar cualquier tipo de falla o deformación, ante la acción combinada de cargas de presión, mecánicas, axiales y ambientales.⁶

Los resultados de las investigaciones principalmente del instituto americano del petróleo API proporciona los valores de resistencia al estallido tensión y colapso para las tuberías de revestimiento de pozos, son tabulados y presentados en el boletín 5C3, de la sección 5CT del instituto.

2.1.3.1 Resistencia al colapso: Es la capacidad que tiene el tubular para conservar su forma original, cuando se le aplica una fuerza o presión externa, que generalmente es por el fluido alrededor de la pared externa de la tubería. En el diseño se asume que la tubería esta internamente vacía.

2.1.3.2 Resistencia al estallido: Se refiere a la capacidad del tubular a conservar su forma debido al diferencial de presión hidrostático generado por el fluido que se halla dentro de la tubería de revestimiento. En el diseño de la tubería para el criterio de estallido se asume que la presión externa debe ser menor que la interna y que la resistencia al estallido en las conexiones es mayor al resto del cuerpo del tubo.

2.1.3.3 Resistencia a la tensión: La tensión generada en una tubería de revestimiento es causada por la carga axial presentada a lo largo toda la sección revestida debido al peso de todas las juntas de tubulares y a su vez por un conjunto de esfuerzos generados por el yacimiento.

⁶ TENA FRANCO, Arturo. Nueva tecnología de tubería expandible en la perforación de pozos. Universidad autónoma de México. Ciudad Universitaria, México D. F. 2013. p. 22.

2.3 ANÁLISIS GEOMECÁNICO

El análisis geomecánico de las formaciones en las cuales se encuentra almacenado el crudo ha tomado una gran importancia, siendo un estudio articulado de las interacciones de las rocas, los esfuerzos, las presiones y las temperaturas, básicamente para resolver inconvenientes de los pozos en campos petroleros⁷. Juega un papel significativo durante la planeación, perforación, completamiento y producción de un pozo.

2.3.1 El modelo geomecánico (Mechanical Earth Modeling, MEM)⁸. Es una agrupación explícita de los datos geomecánicos considerados importantes para la construcción de pozos; por ejemplo, la presión de poros, el estado de los esfuerzos y de las propiedades mecánicas.

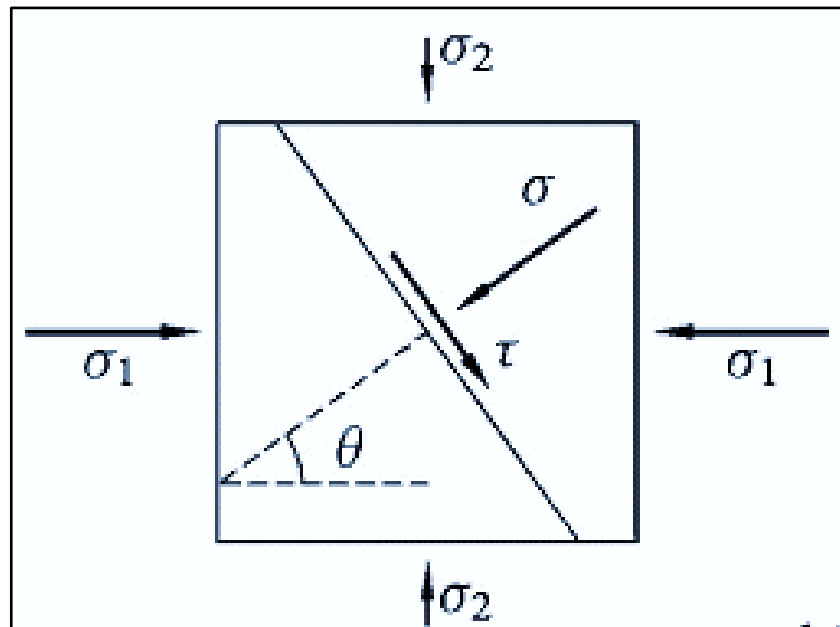
Los datos obtenidos son registros continuos que se emplean para diferentes estudios, incluida la determinación segura de la ventana de peso del lodo (Mud Weight Window) durante la perforación, estudios de fracturación hidráulica, análisis de arenamiento, evaluación del depletamiento de los yacimientos, etc. Sin embargo, las propiedades obtenidas a través del MEM deben calibrarse contra datos de campo o muestras de roca. Esto requiere la adquisición de núcleos para las pruebas de laboratorio y la realización de pruebas de campo, incluidas las pruebas de presión de fugas y formación.

⁷ JEJEN SALINAS, Paola Katherine. LUCICH ROJAS. Gian Carlo. Diseño de una metodología para el seguimiento de la estabilidad mecánica durante la perforación de un pozo en el campo castilla. Trabajo de grado Ingeniero de petróleos. Bogotá D.C. Fundación Universidad De América. Facultad De Ingenierías, 2018. p. 35.

⁸ GHOLAMI. et al. Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production. Rock Mech Rock Eng 49, 2016. P. 1445.

2.3.2 Esfuerzo. Se define como la fuerza aplicada⁹ a un sólido (roca) por unidad de área es medido en (psi o Pa). Se divide en dos componentes el esfuerzo normal (σ) que se actúa perpendicular a la superficie de la roca o de un plano, y el esfuerzo de corte (τ) que actúa a lo largo de la superficie de la roca y tiende a deformar el material, pero sin cambiar su volumen¹⁰.

Figura 4. Descomposición de la fuerza.



Fuente: FJAER, E.; HOLT, R.M.; HORSRUD, P.; RAAEN, A.M. and RISNES, R. Petroleum Related Rock; 2da edición.

2.3.2.1 Tipos de esfuerzos¹¹. Dentro de la mecánica de rocas existen tres tipos de esfuerzos:

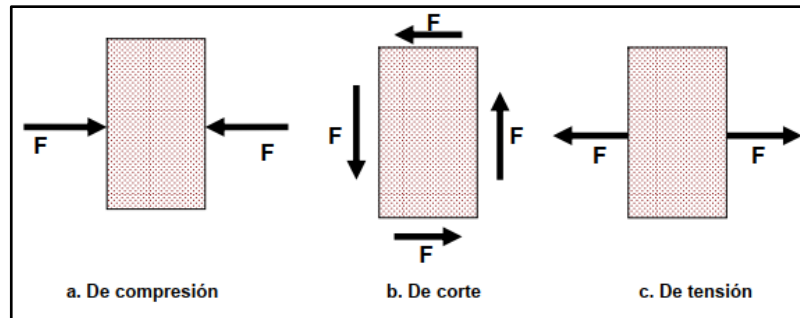
⁹ FJAER, E.; HOLT, R. M.; HORSRUD, P.; RAAEN, A.M and RISNES, R. Petroleum Related Rock Mechanics

¹⁰ GRAJALES HERRERA, Santiago; HOYOS CIFUENTES, Laura Juliana. Metodología que permita estimar los factores críticos que puedan inducir la producción de arena por fuerzas de arrastre. Trabajo de grado Ingeniero de petróleos. Bogotá D.C. Fundación Universidad De América. Facultad De Ingenierías, 2018. p. 35.

¹¹ MONROY ORDOÑEZ, Carlos David; MAESTRE URIBE, John Jairo. Determinación de la redistribución de esfuerzos asociado al Aumento del gradiente de fractura en formaciones Depletadas simulando el fenómeno físico de stress cage. Trabajo de Investigación Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2005. p, 28- 29.

- **Esfuerzo de cizalla:** Es aquel esfuerzo generado por una fuerza de cizalla, es decir, una fuerza que actúa paralela al plano. Este tipo de esfuerzo tiende a romper el cuerpo por ese plano y a desplazar las dos mitades del cuerpo una junto a la otra.
- **Esfuerzo por compresión:** son aquellos esfuerzos generados por fuerzas compresivas, es decir, fuerzas que actúan en sentidos opuestos a lo largo de la misma línea recta y en forma convergente, las cuales acortan un cuerpo.
- **Esfuerzo por tensión:** son aquellos esfuerzos generados por fuerzas que van en sentido contrario a lo largo de la misma línea recta y en forma divergente, las cuales alargan y adelgazan un cuerpo.

Figura 5. Tipos de esfuerzos

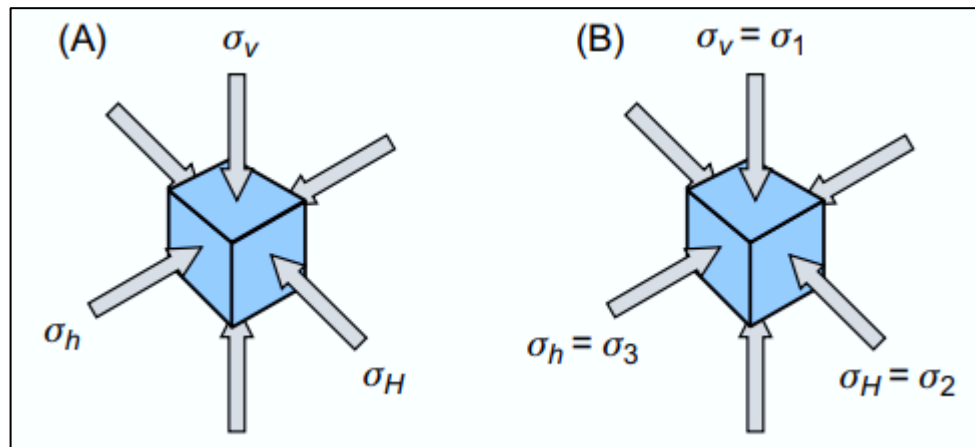


Fuente: PABÓN G, Eduard; OBEID M, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cusiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2004. p. 30.

2.3.3 Esfuerzos principales. Las formaciones de un yacimiento de petróleo están sometidas a diversos esfuerzos (esfuerzos in-situ) los cuales varían su magnitud dependiendo de su dirección y de la fuente de donde provienen¹². Los esfuerzos principales son aquellos que se encuentran en el sistema de coordenadas principales, lo que hace más sencillo la descripción estado de esfuerzo in situ.

¹² GRAJALES. Op. Cit., p 42

Figura 6. (A) Esfuerzos principales in situ. (B) Esfuerzos in situ para un pozo vertical



Fuente: LOOYEH, Reza and AADNOY, Bernt S. Petroleum rock mechanics. Drilling Operations and Well Design 2. ed. Cambridge, United States: Elsevier, Gulf Professional Pub, 2019. p.1o6.

- **Esfuerzo vertical (σ_v):** también llamado esfuerzo overburden es básicamente la sumatoria del peso de cada una de las formaciones de roca ubicadas unas sobre otras. Se calcula a partir de registros de densidad.
- **El esfuerzo horizontal máximo ($\sigma_{H_{max}}$)¹³:** En una situación elástica lineal idealizada su valor podría obtener de repetidas pruebas de fractura. Normalmente es calculado a partir de correlaciones que se basan en pruebas de fuga, fracturamiento hidráulico o fracturas por tensión inducidas durante la perforación y breakouts. no existe una forma directa para determinar la magnitud de este esfuerzo.
- **Esfuerzo horizontal mínimo ($\sigma_{h_{min}}$):** Puede ser obtenido de las pruebas de Leak Off o mini-frac (técnicas de fracturamiento hidráulico). Estos datos son útiles para calibrar el modelo que describe el comportamiento del esfuerzo mínimo en las diferentes litologías.

¹³ SCHLUMBERGER, Sugar Land Technological Learning Center, Rock Mechanics.

El Cuadro 1 se resume los métodos generalmente utilizados para medir o estimar las orientaciones y magnitudes los esfuerzos in situ. Esto incluye no solo la sobrecarga y las tensiones horizontales, sino también la presión de poro de la formación, que es un factor importante para determinar los esfuerzos efectivos¹⁴.

Cuadro 1. Métodos utilizados para determinar los esfuerzos principales.

Elemento de medida	Tipo de esfuerzo	Técnica de medición	Técnica de estimación
Magnitud de esfuerzos	σ_v σ_H σ_h	<ul style="list-style-type: none"> • Registro de densidad. • Fractura hidráulica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Breakout. • Peso del lodo. • Observación de fallas en el pozo. • LOT • Prueba de integridad de la formación. • Pérdida de circulación. • Fracturas inducidas por perforación.
Orientación de esfuerzos	σ_H o σ_h	<ul style="list-style-type: none"> • Dipolo cruzado. • Mini-frac. • Prueba de fractura hidráulica. • Fracturas inducidas por perforación. • Breakout 	<ul style="list-style-type: none"> • Dirección de falla. • Dirección natural de fracturas.
Presión de poro	P_o	<ul style="list-style-type: none"> • DST • Pruebas de formación repetidas. • Prueba dinámica de formación modular. • LWD • MDT 	<ul style="list-style-type: none"> • Registro de densidad. • Registro de Sonico. • Velocidad sísmica. • Peso del lodo usado.

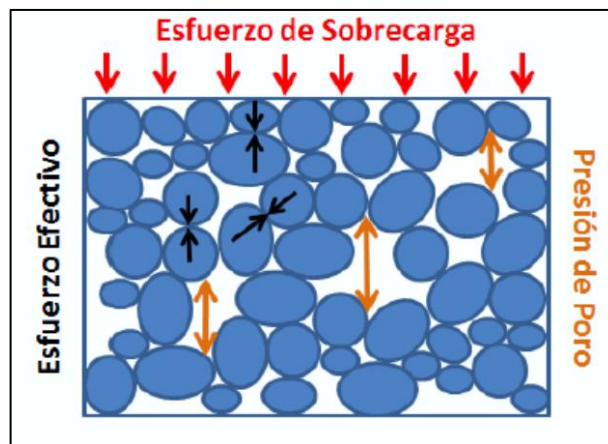
Fuente: LOOYEH, Reza and AADNOY, Bernt S. Petroleum rock mechanics. Drilling Operations and Well Design 2. ed. Cambridge, United States: Elsevier, Gulf Professional Pub, 2019. p.110.

¹⁴ LOOYEH, Op. Cit., p. 109

2.3.4. Esfuerzo efectivo¹⁵. El esfuerzo efectivo es el esfuerzo real que está soportando la roca. En el caso de medios porosos, el esfuerzo efectivo es la diferencia entre el esfuerzo total y la presión de poro. La presión de poro es multiplicada por un factor conocido como la constante de Biot (α), la cual es característica de cada roca y permite conocer la cantidad de esfuerzo que está siendo soportado por la presión de poro que es transmitida como esfuerzo a la roca.

$$\sigma' = \sigma - \alpha P_o$$

Figura 7. Esfuerzo efectivo.



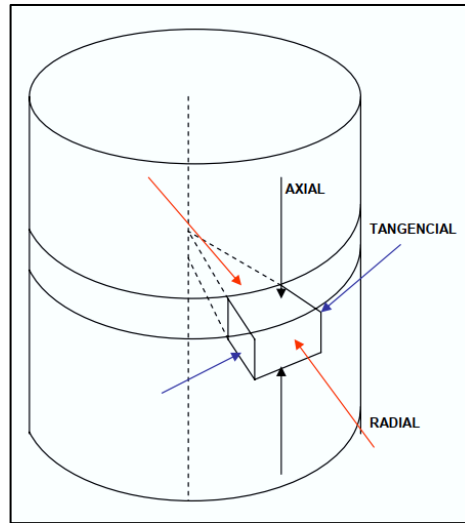
Fuente: Tomada del material de apoyo de la materia “Geomecánica y sus aplicaciones en la industria del petróleo” Ing. Zuly Calderón. Universidad Industrial de Santander.

El esfuerzo efectivo en cualquier punto cercano al pozo está definido por tres esfuerzos principales, es decir, esfuerzo radial, esfuerzo de tangencial y esfuerzo axial.¹⁶

¹⁵ ARAUJO, Op. Cit., p. 24.

¹⁶ LOOYEH, Op. Cit., p. 97.

Figura 8. Esfuerzo efectivo en una región cercana al pozo.



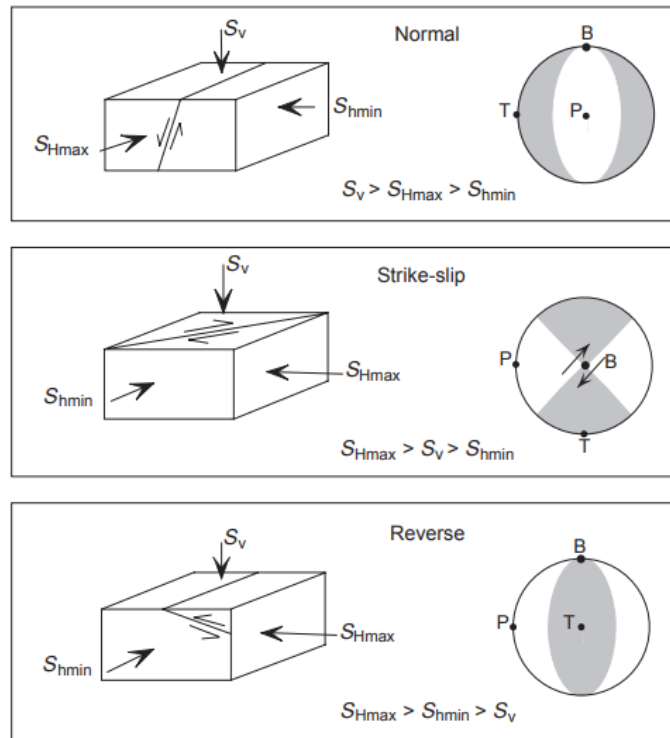
Fuente: PABÓN G, Eduard; OBEID M, Yussed. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos Cusiana y Cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2004 45.

2.3.5 Regímenes de esfuerzos. Depende del valor de los esfuerzos principales y pueden combinarse de tres formas:

- Régimen Extensional o de falla normal: $S_v > S_H > S_h$
- Régimen Inverso o compresivo: $S_H > S_h > S_v$.
- Régimen Rumbo deslizante: $S_H > S_v > S_h$.

La Figura 9 muestra un esquema del régimen de fallas en las formaciones debido al tipo de régimen de esfuerzos.

Figura 9. Esquema de clasificación de E. M. Anderson para las magnitudes de tensión relativa en regiones normales, rumbo deslizante y fallas inversas.



Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. 1st ed. GB: Cambridge University Press, 2007. p. 9.

2.3.6 Módulos elásticos. Son de gran importancia en el análisis de estabilidad debido a que proporcionan información relacionada a la resistencia de la roca.

2.3.6.1 Relación de Poisson (ν)¹⁷: Es la relación entre la deformación transversal y la longitudinal cuando se le aplica un esfuerzo a un cuerpo. Rocas con altas relaciones de Poisson transfieren mayor cantidad del esfuerzo vertical en la dirección horizontal, o sea resultan en mayores valores de esfuerzos horizontales. Las arcillas que tienen mayor relación de Poisson que las arenas, tienen generalmente mayores valores de esfuerzo. Debido al comportamiento no lineal de

¹⁷ RIVERA ORTEGA, Gerson Orlando. Predicción de la producción de arena en las formaciones Poco consolidadas de un campo del valle medio del Magdalena. Trabajo de Investigación Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011. p. 29.

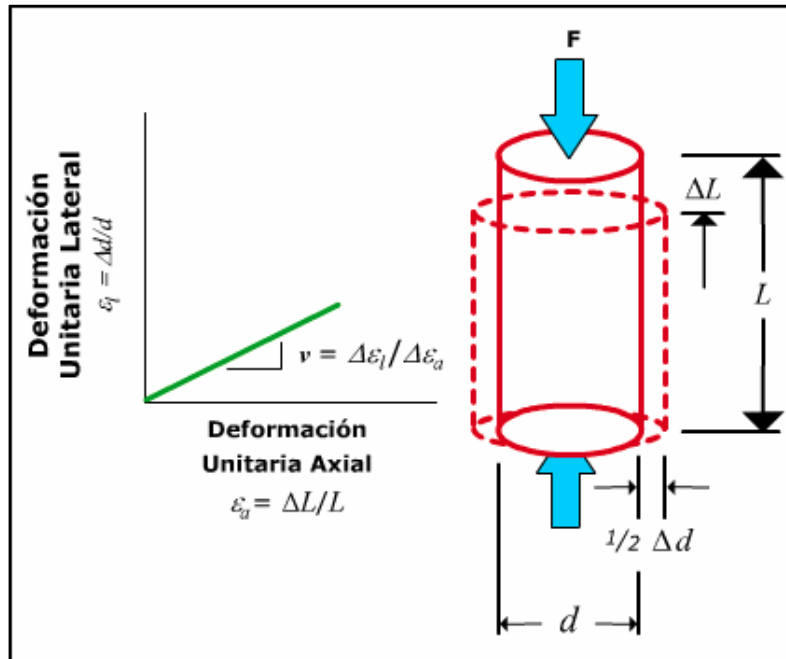
las rocas, la relación de Poisson no es constante en todo el rango de esfuerzo. Es afectado por los mismos factores que el Módulo de Young. Se puede calcular a partir de las velocidades de las ondas sísmicas, de la siguiente manera:

$$v = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

Donde:

v : relación de Poisson. V_p : velocidad de la onda P V_s : velocidad de la onda S.

Figura 10. Relación de Poisson.



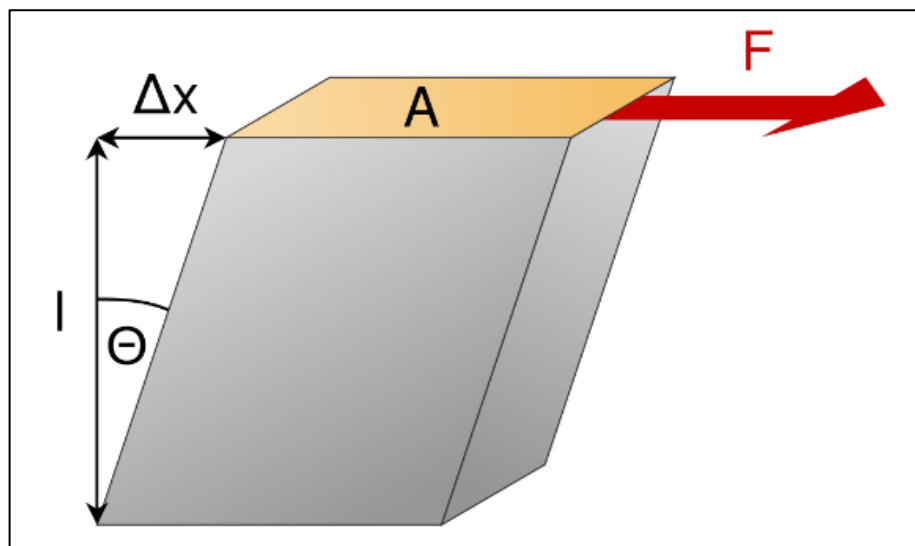
Fuente: Portal del Petróleo. [sitio web]. Mecánica De Las Rocas Aplicado Al Fracturamiento Hidráulico (Parte I). [Consulta: 15 de mayo 2020]. Disponible en: https://www.portaldelpetroleo.com/2016/03/mecanica-de-las-rocas-aplicado-al_13.html

2.3.6.2 El módulo de rigidez (G)¹⁸: Se refiere a la resistencia de un cuerpo ante un esfuerzo de cizalla, donde las fuerzas se aplican en dirección tangencial a las caras sobre las que actúan. A partir de las velocidades sísmicas este módulo se obtiene así:

$$G = \rho V_s^2$$

Donde: ρ corresponde a la densidad de la formación V_s la velocidad de la onda s.

Figura 11. Módulo de rigidez.



Fuente: Portal del Petróleo. [sitio web]. Mecánica De Las Rocas Aplicado Al Fracturamiento Hidráulico (Parte I). [Consulta: 15 de mayo 2020]. Disponible en: https://www.portaldelpetroleo.com/2016/03/mecanica-de-las-rocas-aplicado-al_13.html

2.3.6.3 Módulo de Young (E): Es la relación entre el esfuerzo y la deformación. En un material homogéneo y elástico, como puede ser un metal, esta deformación es lineal en función al esfuerzo que se le aplica. Las rocas por ser un material no homogéneo y no elástico en todo rango de carga se toma la pendiente de la curva en la parte lineal para determinar el Módulo de Young. Un alto valor de E representa

¹⁸ RIVERA. Op. Cit., p. 30.

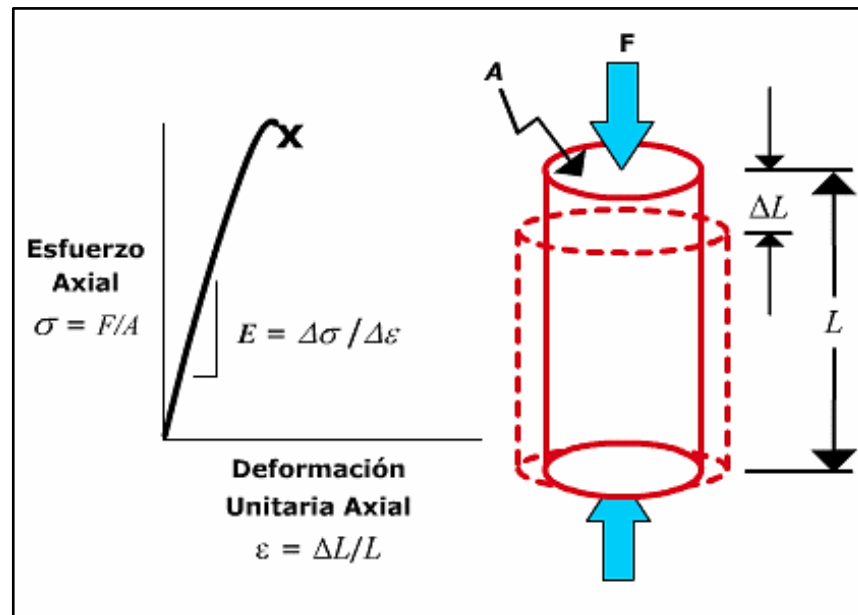
un material que necesita un alto esfuerzo para deformarlo. Matemáticamente equivale a:

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Donde

E : módulo de Young. G : módulo de rigidez. ν : módulo de Poisson.

Figura 12. Módulo de Young



Fuente: Portal del Petróleo. [sitio web]. Mecánica De Las Rocas Aplicado Al Fracturamiento Hidráulico (Parte I). [Consulta: 15 de mayo 2020]. Disponible en: https://www.portaldelpetroleo.com/2016/03/mecanica-de-las-rocas-aplicado-al_13.html

2.3.7 Criterios de falla¹⁹. Existen varios mecanismos que pueden causar problemas de inestabilidad en el pozo y cerca del pozo y provocar fallas en la formación de rocas. Algunos se resumen a continuación:

- Falla de tensión que hace que la formación se separe;

¹⁹ LOOYEH, Op. Cit., p. 53-57.

- Falla de corte sin deformación plástica apreciable;
- Deformación plástica que puede causar el colapso de los poros;
- Erosión o falla cohesiva;
- Falla de fluencia que puede causar un agujero apretado durante la perforación;
- Colapso de poros o falla integral, que puede ocurrir durante la producción.

2.3.7.1 Criterio de falla de Von Mises: Este criterio fue introducido por Von Mises (1913) y se ha utilizado como uno de los criterios de falla más confiables para materiales de ingeniería. Se basa en la segunda invariante desviatoria y el esfuerzo promedio efectivo. Suponiendo una condición de prueba triaxial donde $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, la segunda invariante desviatoria, se simplifica a;

$$\sqrt{J_2} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sqrt{3}}$$

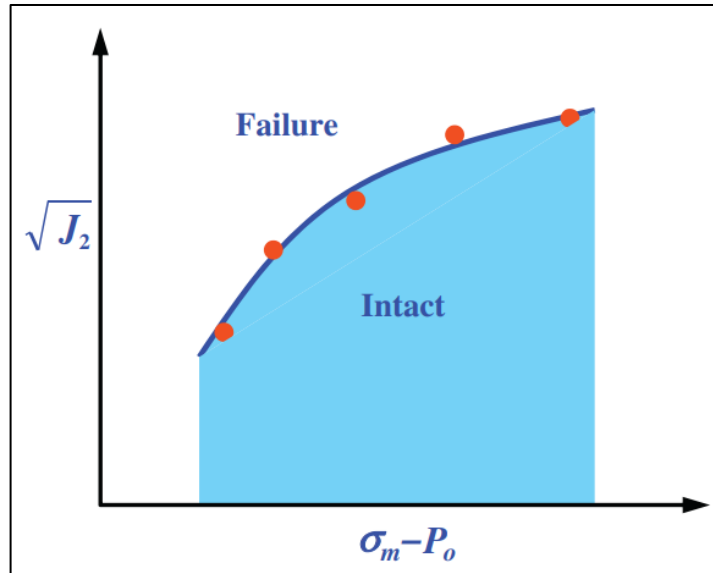
Con el mismo supuesto el esfuerzo promedio efectivo puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_m - P_o = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} - P_o$$

Donde P_o es la presión de poro de la formación y el esfuerzo promedio efectivo se define como el esfuerzo promedio menos la presión de poro.

En el criterio de cizalladura de Von Mises, la segunda invariante desviatoria se representa frente al esfuerzo promedio efectivo para varias cargas axiales σ_1 y presiones de confinamiento σ_3 . La curva resultante, conocida como curva de falla, especifica dos regiones, una debajo de la curva como segura y estable y la otra arriba de la curva como inestable y fallida, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Modelo de falla de Von Mises a partir de datos de pruebas triaxiales.



Fuente: LOOYEH, Reza and AADNOY, Bernt S. Petroleum rock mechanics. Drilling Operations and Well Design 2. ed. Cambridge, United States: Elsevier, Gulf Professional Pub, 2019. p. 55.

2.3.7.3 Criterio de Drucker-Prager: Este criterio es una versión extendida del criterio de Von Mises y supone que el esfuerzo de corte octaédrico alcanza un valor crítico como se indica en la siguiente ecuación²⁰:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \beta = 0$$

Los parámetros del material, es decir, α y β , están relacionados con el ángulo de fricción interna ϕ y la cohesión (resistencia cohesiva) τ_0 para la condición lineal. Una gráfica de $\sqrt{J_2}$, la segunda invariante desviatoria, versus I_1 , la primera invariante, en condiciones de falla permite la evaluación de un problema dado relacionado con la falla de la formación de la roca. Este criterio se ajusta al alto nivel de estrés.

²⁰ DRUCKER, D.C., PRAGER, W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design, 1952. Q. Appl. Math. 10 (2), 157-165.

2.3.7.2 Criterio de Mohr-Coulomb: Este criterio relaciona la resistencia al corte con las fuerzas de contacto y la fricción, y los enlaces físicos que existen entre los granos de roca²¹. La envolvente de falla de Mohr Coulomb se construye a partir de pruebas triaxiales realizadas en muestras cilíndricas, que consisten en aplicar un esfuerzo axial a diferentes condiciones de esfuerzo radial, midiendo la deformación que experimenta la muestra hasta llegar a la falla. Para cada una de estas pruebas se traza un círculo de Mohr, el cual se forma teniendo en cuenta el esfuerzo máximo y mínimo de cada prueba realizada.²²

Una aproximación lineal de este criterio viene dada por:

$$\tau = \tau_0 + \sigma \tan \phi$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, τ_0 es la resistencia cohesiva, ϕ es el ángulo de fricción interna y es el σ esfuerzo normal efectivo que actúa sobre los granos.

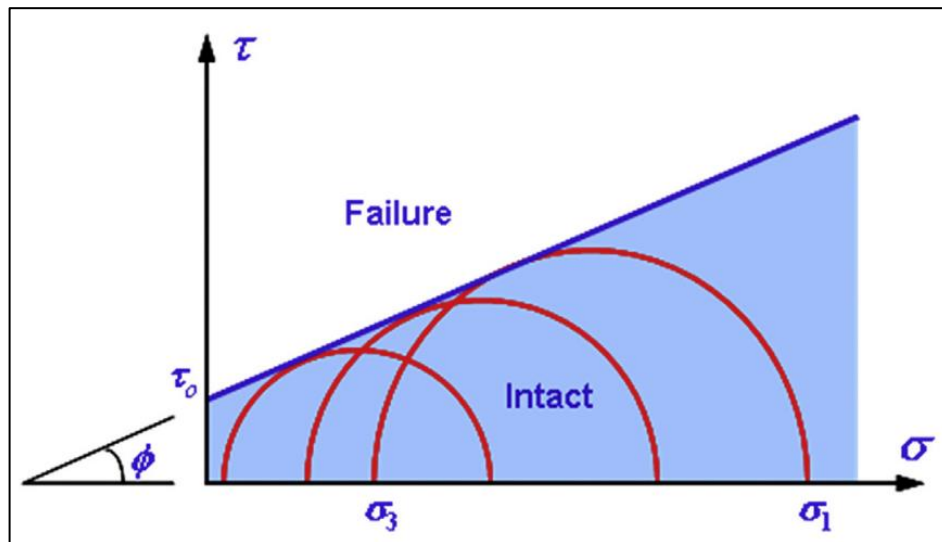
En mecánica de rocas, la resistencia cohesiva es la resistencia al corte de la roca cuando no se aplica tensión normal y en la perforación, el ángulo de fricción interno es equivalente al ángulo de inclinación de una superficie suficiente para causar el deslizamiento de un bloque superincumbente de material similar en la superficie. Estos son coeficientes para la linealización y deben determinarse experimentalmente. Una desviación de una línea recta es muy común durante los intentos de interpretar otro mecanismo de falla con este criterio, que se basa únicamente en la falla de corte²³.

²¹ JAEGER, J.C., COOK, N.G.W. Fundamentals of Rock Mechanics, 1979. Chapman & Hall, London.

²² ARAUJO. Op. Cit., p. 24.

²³ LOOYEH, Op. Cit., p. 55.

Figura 14. Criterio de falla de Mohr Coulomb a partir de datos de prueba triaxiales.



Fuente: LOOYEH, Reza and AADNOY, Bernt S. Petroleum rock mechanics. Drilling Operations and Well Design 2. ed. Cambridge, United States: Elsevier, Gulf Professional Pub, 2019. p. 56.

2.3 PRODUCCIÓN DE ARENA

La producción de arena se puede definir como la producción de una cantidad cuantificable de partículas de arena junto con fluidos de yacimientos. Y es uno de los problemas más comunes y frecuentes en la producción de hidrocarburos a nivel mundial, se presenta principalmente en formaciones poco consolidadas. Aproximadamente el 70% del total de los hidrocarburos del mundo se encuentran en yacimientos poco consolidados²⁴. Se genera cuando parte del material perteneciente a la formación es llevado del yacimiento al pozo debido al movimiento de los fluidos; originando el desprendimiento de los granos de arena de la formación a causa de las fuerzas de arrastre y los gradientes de presión. El material comúnmente denominado arena, son partículas cuyo diámetro varía entre 0,0625 y

²⁴ NOURI, A.; VAZIRI, H.; BELHAJ, H.; ISLAM, R. Effect of volumetric failure on sand production in oil-wellbore, 2003. En: SPE Paper 84448 Presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition Jakarta, Indonesia

2 milímetros²⁵. La producción de arena de formación puede comenzar durante el primer flujo o más tarde en la vida útil del yacimiento cuando la presión ha disminuido o el agua se abre paso.

La predicción del inicio de la producción de arena se basa generalmente en la inestabilidad del arco de arena, la inestabilidad del cañón de perforación, o la inestabilidad vertical, horizontal o desviada del pozo. El arco en la estabilidad de la arena fue tratado por primera vez por Terzaghi²⁶ en 1948, el experimento con trampillas demostró que el arco era un fenómeno real y estable²⁷. Hall, C. D., Jr. y Harrisberger, enfocaron los estudios de la estabilidad del arco de arena en la industria petrolera. Y define, "un arco es una estructura curva que abarca una abertura y sirve para soportar una carga resolviendo la tensión vertical en tensiones horizontales". El arco de arena se visualiza en la Figura 15. Sus experimentos se diseñaron para determinar si el flujo de fluido o el cambio en la carga afecta la estabilidad del arco de arena. Estudiaron los efectos de la redondez de la arena, la trituración de granos, el flujo de fluidos y la humectabilidad en la formación y estabilidad del arco de arena²⁸.

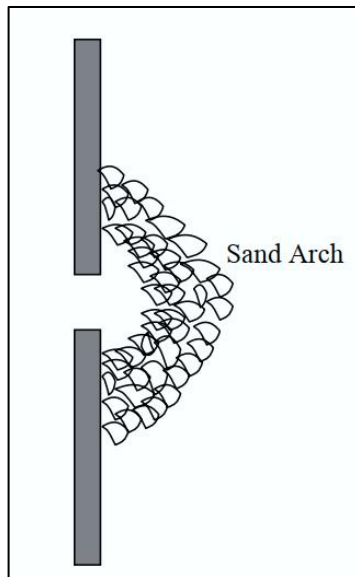
²⁵ LÓPEZ TOLEDO, Jaime E.; CARRILLO CATAÑO, María J. Análisis de los colapsos en revestimientos de pozos productores de un campo colombiano debidos a la inyección de agua. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2014, p. 47

²⁶ YI, Xianjie. Numerical and analytical modeling of sanding onset prediction. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY, 2003. p. 4.

²⁷ TERZAGHI, K. and PECK, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, 1948. John Wiley and Sons Inc., New York.

²⁸ HALL, C. D., Jr. and HARRISBERGER, W. H.: "Stability of Sand Arches: A Key to Sand Control, ",1970. JPT. P, 820-829.

Figura 15. Arco de arena cerca de la perforación.



Fuente: YI, Xianjie. Numerical and analytical modeling of sanding onset prediction. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2003.

2.3.1 Causas de la producción de arena. Las causas de la producción de arena pueden ocurrir naturalmente como resultado de la naturaleza no consolidada de la formación o por las actividades operacionales en el pozo. Porque solo hay dos formas de perturbar a un yacimiento que son a través de la producción de fluido o la inyección de algunos fluidos en la formación²⁹.

2.3.1.1 Causas naturales

2.3.1.1.1 Consolidación: El grado de consolidación define cuán fuertes se han unido los granos de arena individuales y cómo se ha desarrollado el proceso de cementación. Típicamente, la compactación y cementación de la arenisca es un proceso geológico o diagenético secundario³⁰.

²⁹ SYLVESTER, Okotie. "Effect of Sand invasion on Oil Well Production: A Case study of Garon Field in the Niger Delta." 2015.

³⁰ AHAD, Nur; AQILAH, Morteza Jami and TYSON, S. "A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs." 2020. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2

Los sedimentos más antiguos y las litologías particulares tienden a estar más consolidadas. Por esta razón, la mayoría de los yacimientos poco profundos y geológicamente más jóvenes están asociados con la producción de arena, ya que a menudo tienen una cementación débil que une los granos de arena.

Una manera de medir el grado de consolidación es a partir de la resistencia uniaxial compresiva de la roca, que es una propiedad geomecánica de la roca. Las formaciones poco consolidadas generalmente tienen una resistencia a la compresión de menos de 1000 psi.³¹³²

2.4.1.1.2 Reducción de la presión de poros a lo largo de la vida de un pozo:

Parte de la carga de las rocas superpuestas está soportado por la presión de poro en el yacimiento. Al producir los fluidos, la presión de poro cae y se disminuye parte del soporte. Esto crea una mayor cantidad de esfuerzo en el yacimiento hasta el punto en que los granos de arena pueden desprenderse de la matriz y crear finos que se producen junto con los fluidos.³³³⁴

2.4.1.1.3 Viscosidad del fluido del yacimiento:

La fuerza de arrastre de fricción creada por el flujo del fluido del yacimiento está directamente relacionada con la velocidad del flujo y la viscosidad del fluido del yacimiento que se produce. La alta viscosidad del fluido aplicará una mayor fuerza de fricción a los granos de arena de

³¹ IKPORO B, SYLVESTER O. Effect of sand invasion on oil well production: a case study of garon field in the Niger Delta, 2015. Int J Eng Sci (IJES) 4(5):64–72

³² TOELSIE S, PREDIEPKOEMAR G. Sand control in shallow unconsolidated sandstone oil reservoirs at staatsolie NV suriname, 2013. En: SPE European formation damage conference & exhibition. Society of petroleum engineers.

³³ TOELSIE. Op. Cit., p. 66

³⁴ ROBERTS A. Geotechnology: an introductory text for students and engineers, 2014. Elsevier, Amsterdam.

la formación y hará que se produzca arena a partir de muchos yacimientos de petróleo pesado.³⁵³⁶

2.3.1.2 causas operacionales

2.4.1.2.1 La perforación: Causa daño en resistencia mecánica de la formación y es directamente proporcional a la tasa de penetración, adicionalmente el lodo usado puede generar fracturas debido a su excesivo peso como también problemas de filtrado generando daño que proporciona una caída de presión extra por perforado.

2.4.1.2.2 La cementación: Una mala cementación crearía zonas de baja resistencia en la vecindad del pozo debido a la concentración de esfuerzos. Si se dejan canales entre la formación y el revestimiento, estos se volverán canales preferenciales de flujo donde las velocidades serán altas.

2.4.1.2.3 Cañoneo: Las actividades de cañoneo deben ser planificadas y ejecutadas para producir canales estables a largo plazo. Los parámetros de diseño de las perforaciones tales como diámetro, longitud o penetración, densidad, ángulo de fase y presiones de desbalance, deberán ser especificados en función de las propiedades mecánicas de la formación.

2.4.1.2.4 Tasa de producción: La producción de fluidos del yacimiento genera diferenciales de fuerza de presión y de fricción que podrían exceder la resistencia a la compresión de la formación. Por lo tanto, hay una tasa de flujo crítico ya que combinadas estas fuerzas son lo suficientemente grandes para exceder la resistencia a la compresión de la formación para que se inicie la producción de

³⁵ AHAD, Nur; AQILAH, Morteza Jami and TYSON, S. “A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs.” 2020. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. P. 2

³⁶ CHANGYIN et al. Screen sand retaining precision optimization experiment and a new empirical design model, 2016. Pet Explor Dev 43(6):1082–1088

arena. Esta tasa de flujo crítico puede determinarse en campo aumentando lentamente la tasa de producción y monitorear el inicio de la arena producida. En muchos casos, las tasas de flujo crítico generalmente se encuentran por debajo de la tasa de producción aceptable para el pozo.³⁷

2.4.1.2.5 Aumentar la producción de agua durante la vida útil de un pozo: La producción de arena puede ocurrir cuando el agua ingresa al pozo. El agua tiene un impacto severo en la estabilidad del arco de arena alrededor de la perforación, lo que puede iniciar la producción de arena. También puede afectar la permeabilidad relativa en formaciones húmedas, a medida que se aumenta la producción de agua, la permeabilidad relativa del petróleo disminuye dando como resultado un aumento de la presión diferencial para producir petróleo a la misma tasa de producción, es decir disminuye la producción de petróleo y aumenta la de agua³⁸.

El Cuadro 2 resume las diversas causas de la producción de arena en tres categorías: formación, completamiento y problemas de producción.

Cuadro 2. Factores que influyen en la producción de arena

Categoría	Factores que afectan la producción de arena
Formación: propiedades del yacimiento	Fuerza de la roca Tensiones in situ verticales y horizontales (cambio durante el agotamiento) Profundidad (influye en la fuerza, tensiones y presión) La presión de poro cambia durante la producción de fluidos del yacimiento Permeabilidad Composición fluida (gas, petróleo, agua) Radio de drenaje Espesor del yacimiento Heterogeneidad del yacimiento
Completamiento	Orientación del pozo Diámetro del pozo

³⁷ AHAD. Op. Cit. P. 2

³⁸ Ibid. P. 8

Categoría	Factores que afectan la producción de arena
	Tipo de terminación (hueco abierto, perforado) Diseño el cañoneo (altura, tamaño, densidad, fases, bajo / sobre balanceado). Control de arena (tamiz de gravilla, consolidación química) Fluidos de terminación, estimulación (volumen de ácido, tipo de ácido) Tamaño de tubular
Producción	Tasa de flujo Daño en la formación (skin) Procedimiento de apagado y cierre Técnica de levantamiento artificial Agotamiento Volumen acumulativo de arena Influjos de agua o gas

Fuente: AHAD, Nur; AQILAH, Morteza Jami and TYSON, S. "A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020: 1-14.

Por lo tanto, estas causas pueden llevar a varios problemas durante la vida útil de los pozos en un yacimiento en particular, lo cual es un problema importante de ingeniería de producción. Estos pueden conducir a una o más de las siguientes complicaciones³⁹:

- Daño o colapso de la formación por los granos de arena que fluyen.
- Inestabilidad del pozo.
- colapso de revestimiento.
- Deterioro o falla del equipo de superficie o del equipo de fondo de pozo.
- Tiempo de producción perdido debido al cierre del pozo para cambiar el equipo dañado o limpiar el pozo lleno de arena.
- Horas extras y gastos de trabajo para el mantenimiento del pozo y el equipo de producción.
- Costo del coiled tubing y posibles complicaciones.

³⁹ SYLVESTER, Óp. Cit. P. 65

- Costo de separar la arena del fluido producido.
- Problemas ambientales en la disposición
- Costo de eliminación de arena y medidas de control en la zona de aporte.

2.3.2 Consecuencia de la producción de arena. Casi siempre son perjudiciales para la productividad a corto y/o a largo plazo del pozo. Pero muchos autores plantean que puede ser gran ayuda debido a que mejora la permeabilidad de la formación, pero con lleva a gastos operacionales. Oluyemi y Oyenehin en el 2010, declararon que las implicaciones económicas, operativas y de seguridad de las fallas de arena requieren un manejo eficiente de la arena en tiempo real.

2.3.2.1 Erosión de equipos de fondo de pozo y de superficie: En pozos altamente productivos, los fluidos que circulan a gran velocidad y transportan arena pueden erosionar excesivamente tanto el equipo de fondo como el de superficie.⁴⁰ Si la erosión es severa u ocurre durante un período de tiempo suficiente, puede ocurrir una falla completa de la superficie y / o del equipo del fondo del pozo, lo que resulta en problemas críticos de seguridad y ambientales, así como en la producción diferida.

2.3.2.2 Acumulación de arena en equipos de superficie: En ocasiones la velocidad de producción del fluido del yacimiento es lo suficientemente alta para llevar arena por la tubería hacia la superficie. Los granos de arena a menudo se depositan las facilidades de superficie como separadores, calentadores, bombas, condensadores. La limpieza de los equipos se vuelve inevitable, causando una producción diferida (el pozo está cerrado) y el costo adicional como resultado de la actividad de limpieza.

⁴⁰ LÓPEZ, CARRILLO, Óp. Cit. P, 52

2.3.2.3 Acumulación subsuperficial: Cuando la velocidad del flujo de producción no es lo suficientemente alta para transportar los granos de arena a la superficie. La arena se acumula en las paredes de las tuberías o en las conexiones, con el tiempo reduce la tasa de producción para tales pozos que eventualmente podrían cesar ya que la acumulación de arena hace imposible que la producción continúe. Si la producción de arena es continua, pueden requerirse operaciones de limpieza de pozos con regularidad. Esto causa un aumento en el costo de mantenimiento y pérdida de producción, lo que a su vez reduce los retornos del pozo.

2.3.2.4 Eliminación de arena: Constituye un problema en las formaciones que producen arena, especialmente en áreas donde existen restricciones ambientales estrictas. En los sistemas de procesamiento en alta mar que no cumplen con la regulación anticontaminación, la arena separada debe transportarse en tierra para su eliminación, lo que constituye un costo de producción adicional.

2.4.2.5 Subsistencia de formación⁴¹: El efecto de producir la arena de formación por un periodo de tiempo prolongado o la duración del pozo es el colapso de la formación. Con el tiempo, se hallará un gran volumen de arena en la superficie y en el yacimiento un gran vacío detrás de revestimiento. Este vacío puede aumentar a medida que se produce la arena. La zona de arena o lutita sobre el vacío en la formación puede colapsar como resultado de la falta de material para soporte. El colapso de la formación es particularmente importante si el material de la formación llena o llena parcialmente los túneles de perforación ya que se crea una permeabilidad diferente a la inicial debido a la reorganización de los granos. Incluso una pequeña cantidad de material de formación que llena los túneles de perforación conducirá a un aumento significativo en la caída de presión. La probabilidad de la pérdida parcial o completa de la productividad del pozo es alta cuando se colapsa

⁴¹ OPEYEMI MAYOKUN, Aborisade. Practical approach to effective sand prediction, control and management. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Award of Master of Science (M. Sc) in Petroleum Engineering. Abuja, Nigeria. African University of science and Technology. Department of Petroleum Engineering, 2011. P. 9.

la formación de lutita suprayacente, debido a la pérdida de soporte, carga litostática por las formaciones superiores y la capacidad de resistencia del revestimiento también puede colapsar y se perderá el pozo.

2.3.3 Métodos de control. Hay disponible una amplia gama de métodos de control de arena, que incluyen una variedad de diferentes mallas para arena en el fondo de pozo y paquetes de grava. Sin embargo, instalar cada tipo de control de arena conlleva riesgos; por lo tanto, es importante determinar el método correcto de control de arena para una formación particular.

Los principales factores en la selección de métodos de control de arena adecuados son:

- El costo
- Las eficiencias en la retención de arena
- La vida útil.

El Cuadro 3 presenta las ventajas y desventajas de los métodos de control de arena convencionales disponibles. Parlar et al.⁴² En el 2016, sugirieron que, para seleccionar un método de control de arena, se debe comenzar con el control de arena más sencillo y rentable, y luego seleccionar las opciones más elaboradas y costosas si las sencillas no cumplen con los criterios de diseño para el proyecto.

⁴² PARLAR, M.; TIBBLES, R.J.; GADIYAR, B.; STAMM B. A new approach for. selecting sand-control technique in horizontal openhole completions. SPE Drilling & Completion. 2016. 31(01):4-15

2.3.4 Clasificación de los modelos de producción de arena⁴³. Debido a la gran cantidad de estudios realizados hay muchas formas de clasificar los modelos de producción de arena, una de ellas muy general es por el tipo de acercamiento que se realiza al problema, es decir, la suposición del medio continuo o del discontinuo.

La idea básica de cada aproximación es que mientras en el continuo el problema se trata como un elemento continuo, es decir, sin saltos ni discontinuidades, la base del discontinuo está fundamentada en que el problema se puede discretizar en muchas partículas las cuales interactúan entre sí.

Con la intención de resolver los problemas de mayor dimensión del método discreto, autores plantean soluciones por medio del método de elementos finitos a través de la suposición de un medio continuo, y en simultáneo se usa el método de elementos discretos para obtener una solución al problema en secciones de menor dimensión. Aunque no se han realizado aplicaciones en el campo de la producción de arena, se han estudiado diferentes casos donde se aplica este método de solución, como los modelos presentados por Elmekati y Shamy, Azevedo y Lemos, Zeghal y El Shamy, donde se demuestra la eficiencia y capacidad de este método para estudiar a fondo los problemas y aspectos involucrados.

⁴³ARAUJO GUERRERO, Edison Felipe. Modelo de predicción y cuantificación de la producción de arena en yacimientos de crudo pesado. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería de petróleos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Química y Petróleos, 2015. p. 40-48

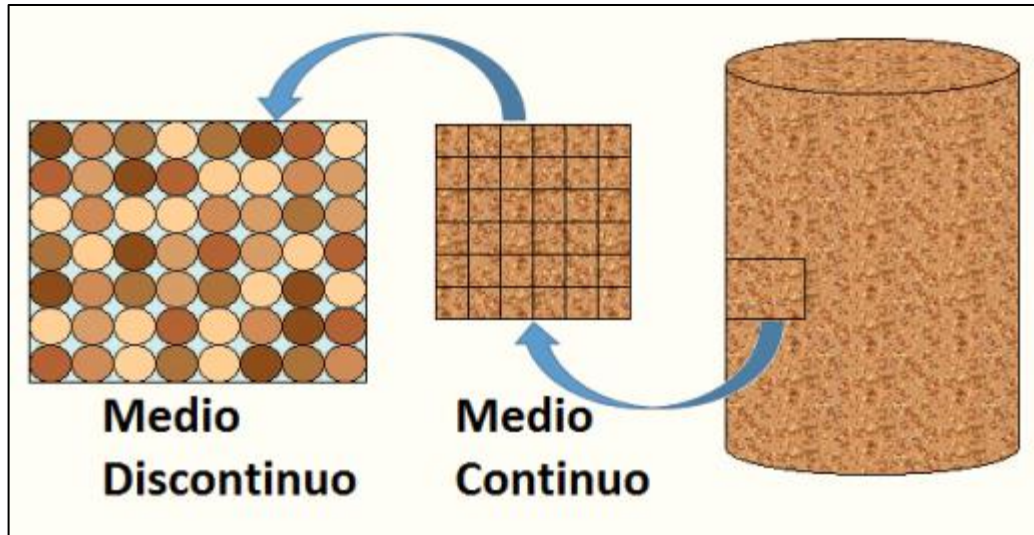
Cuadro 3. Ventajas y desventajas de los métodos convencionales de control de arena.

Método de control de arena	Ventajas	Desventajas
Malla envuelta en alambre	<p>Más simple y barato</p> <p>Más difícil para conectar</p> <p>Lo mejor en la parte inferior de un pozo vertical</p> <p>Ranura trapezoidal</p> <p>Alta eficiencia de fabricación</p> <p>El perfil del material puede ser de acero inoxidable.</p>	<p>Se daña fácilmente en las operaciones en ejecución</p> <p>Menos resistente a la erosión.</p> <p>El espacio incorrecto de los alambres puede permitir la producción o taponamiento de arena de formación.</p> <p>Puede dañarse al instalar a través de doglegs, altos ángulos y secciones horizontales.</p>
Malla de arena expandible (ESS también se conoce como pantalla de conformidad)	<p>Fácil instalación</p> <p>La expansión proporciona un mayor diámetro interno para el trabajo de recuperación.</p> <p>Menos posibilidades de taponamiento</p>	<p>La estimulación requiere un viaje por separado.</p> <p>No se pueden usar dispositivos de control de pérdida de fluidos</p> <p>Bajo índice de colapso</p>
Malla pre-empaquetada	<p>Moderadamente costosa</p> <p>Puede soportar algo de erosión</p> <p>Mejor en la parte superior del pozo vertical y en los pozos horizontales.</p> <p>Más fácil de conectar</p>	<p>Se daña fácilmente en ejecución de las operaciones</p>
Malla tejida o malla metálica	<p>Puede soportar algo de erosión</p> <p>Mejor en la parte superior de pozos verticales, pozos horizontales</p>	<p>Costoso</p> <p>Relativamente fácil de conectar</p> <p>Se daña fácilmente en las operaciones en ejecución</p>

Método de control de arena	Ventajas	Desventajas
Revestimiento ranurado	<p>No se usa para controlar la producción de arena, sino para ayudar con la estabilidad del pozo</p> <p>Costo moderado</p> <p>Fácil instalación</p> <p>Bueno para arenas bien clasificadas</p>	<p>Baja resistencia rotacional</p> <p>Área de entrada baja</p> <p>Sujeto a erosión</p> <p>Baja fiabilidad</p> <p>Se tapona fácilmente</p>
Paquete de grava de pozo abierto	<p>Máximo contacto no fracturado</p> <p>Flujo alto en formaciones de mayor permeabilidad.</p>	<p>Más difícil de diseñar o colocar</p> <p>Experiencia de aplicación limitada</p> <p>Zona limitada o control de agua</p> <p>La pared de formación está cerca de la malla.</p>
Paquete de grava de pozo entubado	<p>Un método confiable para yacimientos de aguas profundas</p>	<p>Alto costo de instalación y reemplazo</p> <p>Área de entrada baja</p> <p>Sujeto a erosión</p> <p>Baja fiabilidad</p> <p>Se tapona fácilmente</p>

Fuente: AHAD, Nur; AQILAH, Morteza Jami and TYSON, S. "A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs." Journal of Petroleum Exploration and Production Technology (2020): 1-14.

Figura 16. Representación medio continuo y discontinuo.

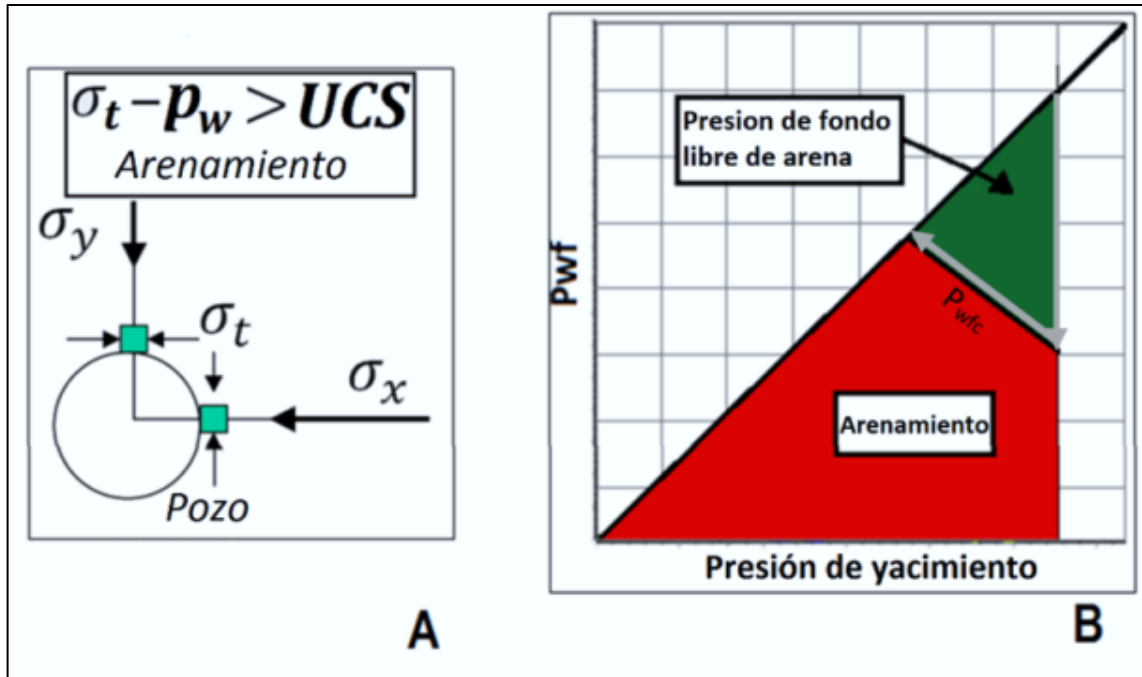


Fuente: ARAUJO GUERRERO, Edison Felipe. Modelo de predicción y cuantificación de la producción de arena en yacimientos de crudo pesado. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería de petróleos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Química y Petróleos, 2015. p. 40.

Un segundo nivel de clasificación en función del método de solución del problema, podría ser métodos analíticos y métodos numéricos.

2.3.4.1 Métodos analíticos: Los modelos analíticos se basan en soluciones generalizadas, es decir soluciones menos específicas. Para calcular el inicio de producción de arena existen modelos basados en soluciones analíticas para los esfuerzos generados en una estructura circular homogénea con un hueco concéntrico. La estructura se encuentra bajo cargas externas, y en función de estas se calculan los esfuerzos alrededor del cilindro. De esta manera, el inicio de producción de arena se obtiene cuando el esfuerzo efectivo tangencial máximo es mayor al valor de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca en la cara del pozo. Aunque estos modelos generan resultados con buena aproximación de las condiciones de producción de arena, no permiten cuantificar el volumen de arena producida.

Figura 17. A. Condición de falla. - B. Envoltente Pwfc.



Fuente: ARAUJO GUERRERO, Edison Felipe. Modelo de predicción y cuantificación de la producción de arena en yacimientos de crudo pesado. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería de petróleos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Química y Petróleos, 2015. p. 40.

Estos modelos también se aplican para determinar el comportamiento de la presión de fondo crítica a través de una sección vertical de yacimiento. El objetivo del registro es conocer las zonas con alto potencial de producción de arena, y zonas donde las presiones de fondo puedan cambiarse con el fin de que no se produzca arena.

2.3.4.2 Modelos numéricos: los métodos numéricos buscan integrar muchos aspectos que afecten la producción de arena. El modelamiento del fenómeno de producción de arena requiere solucionar tres situaciones importantes relacionadas entre sí, generando así un sistema de alta complejidad:

- El estado de esfuerzos que presenta el material, este caso un comportamiento de tipo elastoplástico.

- El flujo de fluidos en un medio poroso, desencadenante de todos los cambios en el sistema.
- Evaluar y solucionar los criterios de producción de arena.⁴⁴

Lo anterior debe ser resuelto en simultáneo para llegar a una solución integral.

⁴⁴ ARAUJO GUERRERO, Óp. Cit., p. 42.

3. COLAPSO DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

El problema de la falla de revestimientos tiene un efecto crítico en la vida útil de los pozos de petróleo y gas⁴⁵, en el capital de inversión de las compañías y la eficiencia de producción de petróleo. Se han presentado graves problemas de falla de revestimientos en campos de petróleo y gas convencionales y no convencionales.

3.1 COLAPSO

El colapso se puede definir como la fuerza mecánica capaz de deformar una tubería como resultado de la presión externa. El colapso es un fenómeno complejo con muchos factores y parámetros que influyen en su efecto⁴⁶.

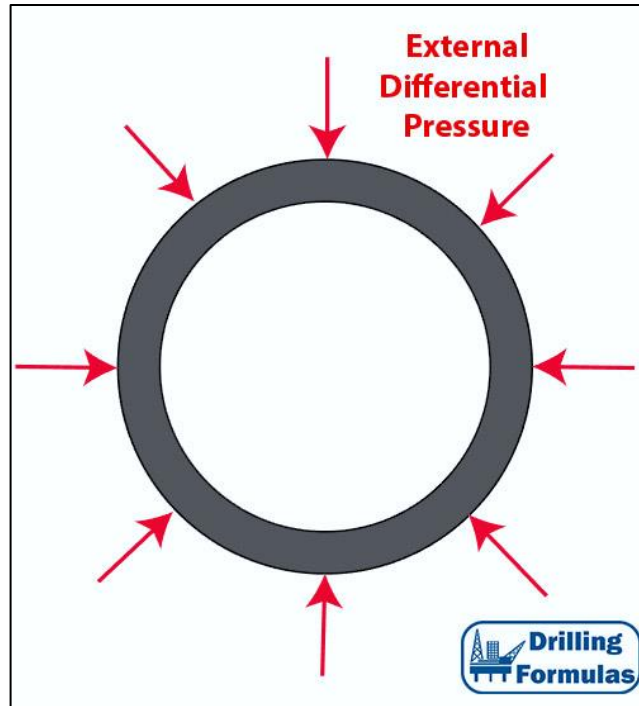
3.2 CEDENCIA DE LOS MATERIALES

Para entender el comportamiento de falla iniciaremos por definir el concepto de cedencia, siendo la capacidad de resistencia del material para soportar la deformación elástica ante la exposición de una carga. Cuando el material se comporta plásticamente, se dice que alcanza la fluencia generando una deformación permanente, es decir, ya no recupera su forma original al liberar la carga aplicada. En la Figura 18 el punto B se denomina esfuerzo o punto de cedencia. La región de B-C, el material se vuelve perfectamente plástico, es decir que puede deformarse sin un incremento en la carga aplicada.

⁴⁵ GHOLAMI, Raof & RASOULI, Vamegh. Numerical simulations of casing collapse: A case study in the South of Iran. WIT Transactions on Engineering Sciences. 2012. p. 152.

⁴⁶ ASADI, A.; PARHIZGAR, N. y MOMENI, E. Prediction of Collapse in a Casing and Tubing: with Case Study of Iran. 2011. P. 1.

Figura 18. Fuerzas externas hacia el revestimiento.



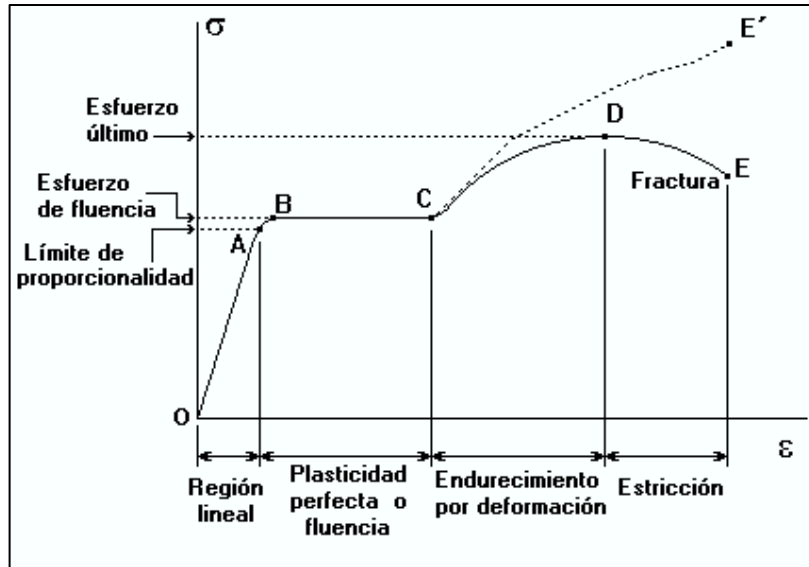
Fuente: MADRID, M., Presión De Colapso. [sitio web]. Perfob.blogspot.com. [5 de junio 2020]. Disponible en: <http://perfob.blogspot.com/2016/06/presion-de-colapso.html>.

Antes de esta deformación, al liberar la carga, el material recupera su estado original. Se dice entonces que el material es elástico, la región O-A, el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales. El punto A se denomina el límite de proporcionalidad. El punto a partir del cual el material se fractura o se rompe, se dice que alcanza su último valor de resistencia a la cedencia⁴⁷. API define el punto de cedencia como el esfuerzo de tensión o compresión que se requiere para producir una elongación total de 0.5% de la longitud medida de un espécimen de prueba, determinado por un extensómetro o multiplicando divisores. Para los grados P- 105 y P- 110 la elongación total de la longitud es de 0.6%.⁴⁸

⁴⁷ Ibid., p. 23.

⁴⁸ SCHLUMBERGER. Programa de entrenamiento acelerado para supervisores. Dimensiones y resistencias para tubulares API empleados en el campo petrolero. p. 23.

Figura 19. Diagrama esfuerzo - deformación de materiales dúctiles.



Fuente: Práctica: Curvas de tensión-deformación en metales y polímeros. [sitio web] [5 de junio 2020]. Disponible en: <https://rodas5.us.es/items/9e078194-9c0c-34a2-b657-0fd5c59d6a2f/2/viewscorm.jsp>

La teoría clásica de la elasticidad nos permite determinar las principales tensiones radiales y tangenciales que actúan sobre la tubería.

Consideremos un sistema de sección transversal, como se muestra en la figura 19. Con una presión externa (P_e) y una presión interna (P_i), y solucionamos para cualquier radio (r), entre el radio inicial (r_i) y radio exterior (r_o), tenemos:

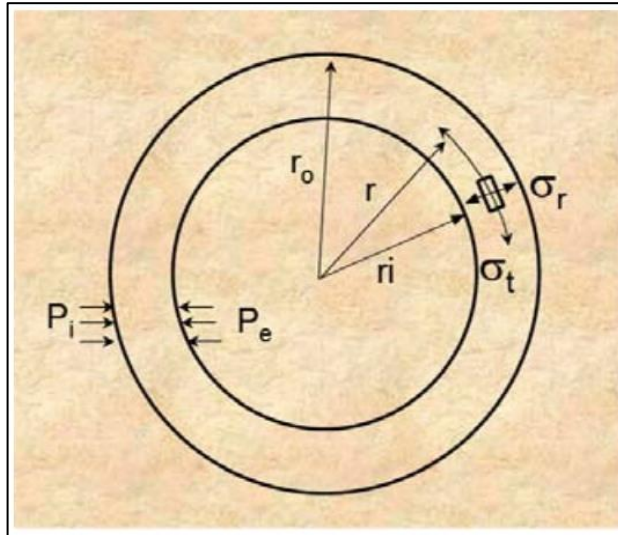
Esfuerzo radial:

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 (r_o^2 - r^2) + P_e r_o^2 (r^2 - r_i^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)}$$

Esfuerzo tangencial:

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_e r_o^2 (r^2 + r_i^2)}{r^2 (r_o^2 + r_i^2)}$$

Figura 20. Esquema de tensión radial y tangencial en una sección transversal de tubería.



Fuente: ASADI, A.; PARHIZGAR, N., y MOMENI, E. Prediction of Collapse in a Casing and Tubing: with Case Study of Iran. 2011. p. 6.

Es posible observar de esta manera que, para las condiciones de colapso y presión interna, el esfuerzo puede ser máximo en la dirección tangencial.

3.2.1 Tipos de colapso. El API 5C3 presenta cuatro fórmulas las cuales permiten predecir el valor mínimo de resistencia al colapso del material, siendo el valor de desempeño más difícil de calcular y depende principalmente de la relación diámetro/ espesor o D/t .

3.2.1.1 Colapso elástico

$$P_c = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left[\frac{1}{\left(\frac{D}{t}\right) \left[\left(\frac{D}{t}\right) - 1\right]^2} \right]$$

Dónde:

$P_c =$ Presión de colapso (psi).

$E =$ Módulo de Young para el acero (psi).

$\nu =$ Relación de poisson (adimensional).

$t =$ Espesor de la pared del tubo (pulgadas).

$D =$ Diámetro exterior del cuerpo del tubo (pulgadas).

3.2.1.2 Colapso de cedencia: La ecuación para la presión de colapso de cedencia de la ecuación de Lamé, donde el valor de la presión de colapso genera esfuerzo de cedencia mínimo en la parte interior del tubo. La ecuación es la siguiente:

$$P_c = 2\sigma_y \left[\frac{\frac{D}{t} - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \right]$$

Dónde:

$P_c =$ Presión de colapso (psi).

$\sigma_y =$ Esfuerzo tangencial al radio r .

$D =$ Diámetro exterior del cuerpo del tubo (pulgadas).

$t =$ Espesor de la pared del tubo (pulgadas).

3.2.1.3 Colapso plástico: La ecuación de presión de colapso plástico y sus constantes se derivó de análisis de regresión estadística de 2488 pruebas realizadas para los tipos de revestimientos K-55, N-80 y P-110 en 1983. Esta ecuación es:

$$P_c = \sigma_y \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t}\right)} - B \right] - C$$

Dónde:

$P_c =$ Presión de colapso (psi).

$\sigma_y =$ Esfuerzo de cedencia (psi).

$t =$ Espesor de la pared del tubo (pulgadas).

$D =$ Diámetro exterior del cuerpo del tubo (pulgadas).

$A, B, C =$ Coeficientes empíricos.

$A = 2.8762 + 0.10679 \times 10^{-5} (\sigma_y) + 0.2130 \times 10^{-10} (\sigma_y^2) - 0.53132 \times 10^{-16} (\sigma_y^3)$

$B = 0.026233 + 0.50609 \times 10^{-6} (\sigma_y)$

$C = -465.3 + 0.030867 (\sigma_y) - 0.10483 \times 10^{-7} (\sigma_y^2) + 0.36989 \times 10^{-13} (\sigma_y^3)$

3.2.1.4 Colapso de transición: La ecuación de transición es usada para calcular la presión de colapso entre su tangente a la curva de presión de colapso plástica y su intersección con la curva de presión de colapso elástica. La ecuación de transición es la siguiente:

$$P_c = \sigma_y \left[\frac{F}{\left(\frac{D}{t}\right)} - G \right]$$

Dónde:

$P_c =$ Presión de colapso (psi)

$\sigma_y =$ Esfuerzo de cedencia (psi)

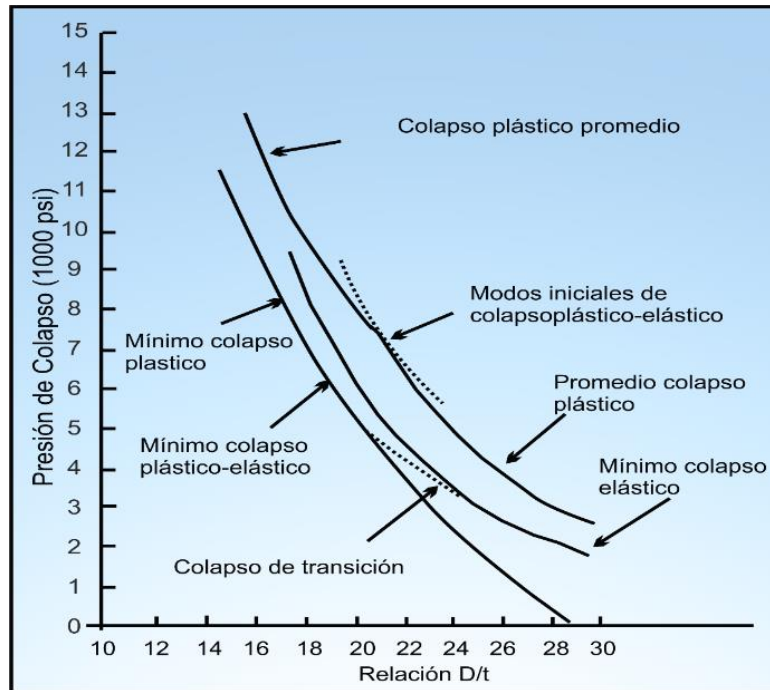
$t =$ Espesor de la pared del tubo (in).

$D =$ Diámetro exterior del cuerpo del tubo (in).

F y $G =$ Coeficientes empíricos

Cada una de las ecuaciones mencionadas es válida para rangos de valores de D/t . Los rangos de D/t para las ecuaciones de presión de colapso se encuentran tabulados en el boletín 5C3 del API sexta edición. La representación gráfica de las ecuaciones anteriores se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Representación esquemática de los tipos de colapso en una sección vertical de tubería.



Fuente: ASADI, A.; PARHIZGAR, N., y MOMENI, E. Prediction of Collapse in a Casing and Tubing: with Case Study of Iran. 2011

3.3 POSIBLES FACTORES DEL COLAPSO DE REVESTIMIENTOS

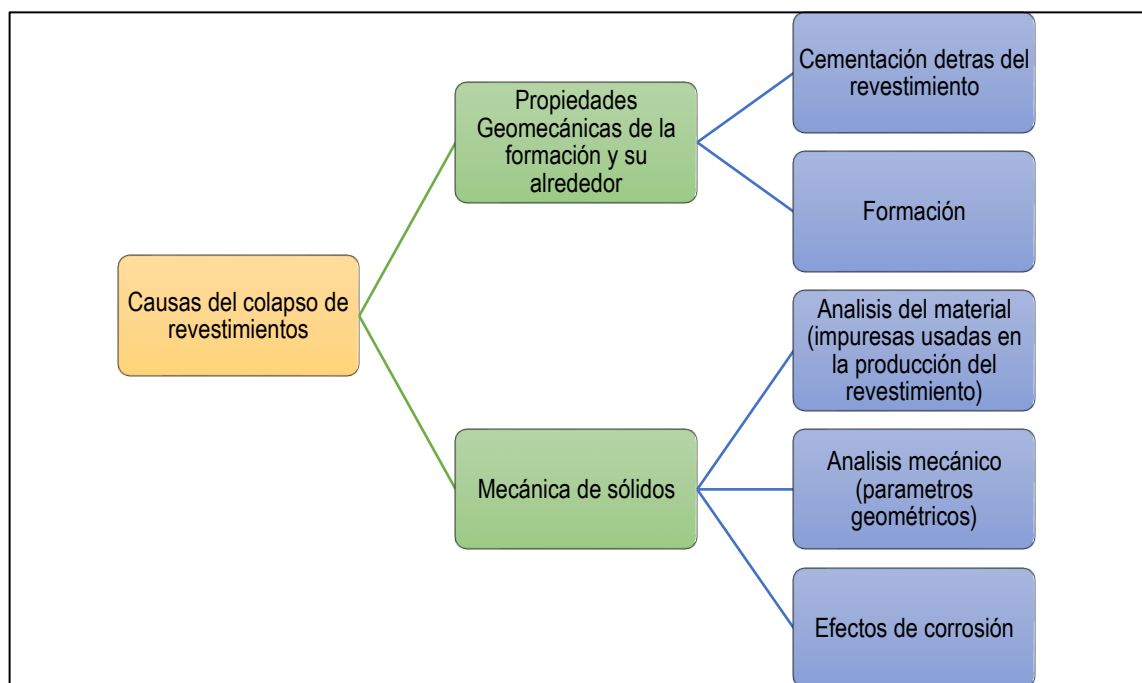
El colapso de revestimientos se genera debido a la presencia de una variedad de factores, incluyendo formaciones salinas y shales. Las formaciones de sal son deformables a grandes profundidades y temperaturas, naturalmente, tienden a moverse bajo la influencia de la presión sobrecargada de las formaciones superiores y la actividad tectónica⁴⁹. La aparición de cargas puntuales o puntos débiles en el revestimiento debido a una mala cementación detrás del revestimiento, el hundimiento o subsidencia de las de los estratos suprayacentes a la formación

⁴⁹ SHERKATI S, LETOUZEY J. Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros. Iran. Mar Petrol Geol 21(4). P. 540.

productora debido a la extracción de fluidos y pérdida del soporte de la formación, etc.⁵⁰

En la Figura 22, se muestra la clasificación de las causas del colapso de revestimiento en términos de parámetros geomecánicos (de formaciones) y mecánica de sólidos.

Figura 22. Clasificación de causas del colapso de revestimientos.



Fuente: Analysis of the Casing Collapse in Terms of Geomechanical Parameters and Solid Mechanics. Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 53(2), 2019. 211-225. doi: 10.22059/jchpe.2019.274240.1267

Resultados de estudios experimentales y analíticos indican que las imperfecciones geométricas pueden reducir drásticamente las presiones de colapso⁵¹. Los dos tipos de imperfecciones geométricas son la ovalidad y la excentricidad de la tubería.⁵²

⁵⁰ GHOLAMI. Op. cit ., p. 1442.

⁵¹ YEH, M.K. y KYRIAKIDES, S., On the Collapse of Inelastic Thick-Walled Tubes Under External Pressure. ASME Journal of Energy Resources Technology, V. 108. 1986. P. 43.

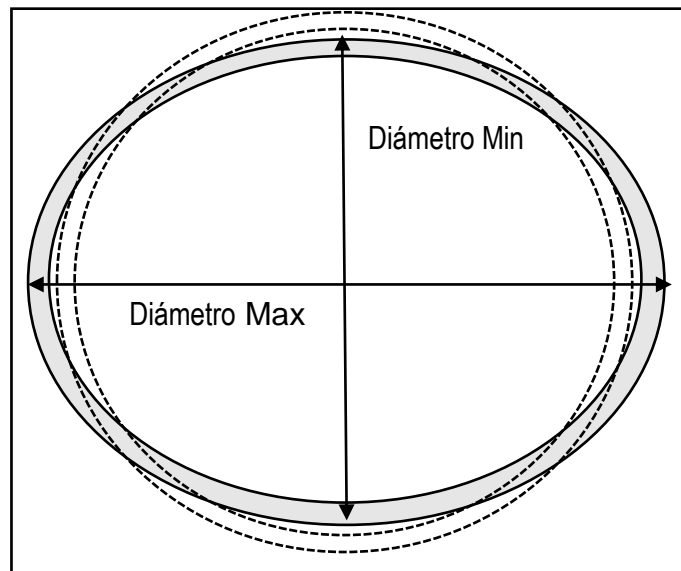
⁵² GHOLAMI. Op. cit., p. 157.

3.3.1 Ovalidad. El revestimiento se desvía ligeramente del modo de redondez debido a la complejidad de su fabricación y se puede expresar de la siguiente manera:

$$OV = \frac{OD_{max} - OD_{min}}{OD_{prom}}$$

Siendo OD_{max} el diámetro máximo, OD_{min} el diámetro mínimo y OD_{prom} el diámetro promedio.

Figura 23. Ovalidad en la tubería.

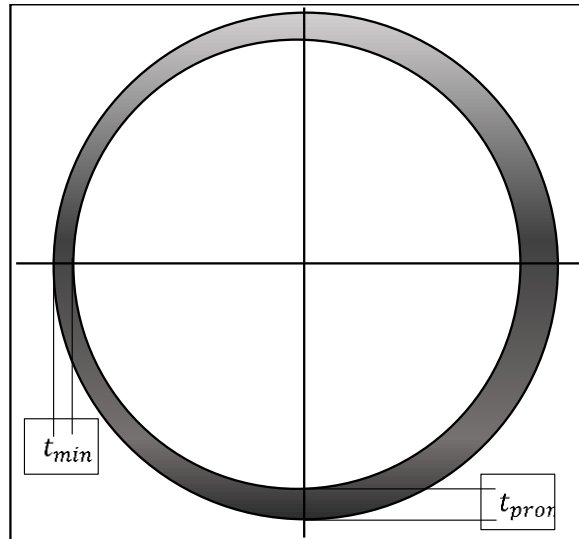


Fuente: Jamedari R. Collapse capacity for a pipeline with thick coating. [Master's thesis]. Ås: Norwegian University of Life Sciences; 2015.

3.3.2 Excentricidad. El grosor de la pared del tubo varía a lo largo de la línea de sección transversal⁵³ debido a errores en su fabricación.

⁵³ HUANG, X.; et al. Collapse strength analysis of casing design using finite element method. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77, 2000. p. 365.

Figura 24. Excentricidad en la tubería.



Fuente: GHODUSI. et al. Effect of Construction Defects on the Casing Collapse Strength. Modares Mechanical Engineering. 2019. P. 3038.

La cantidad de resistencia difiere al valor normal. La excentricidad se puede calcular de siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{prom}}$$

Siendo t_{max} el espesor de pared máximo, t_{min} el espesor de pared mínimo y t_{prom} el espesor de pared promedio.

3.3.3 Desgaste interno en el revestimiento. Este factor está asociado inicialmente con el giro de las juntas que se ejecutan en la sarta de perforación y el número de viajes de fondo de pozo que se realizan. El nivel de desgaste en la tubería está relacionado con:⁵⁴

- Tomar mucho tiempo al perforar.

⁵⁴ ASADI, A.; PARHIZGAR, N., y MOMENI, E. Prediction of Collapse in a Casing and Tubing: with Case Study of Iran. 2011.

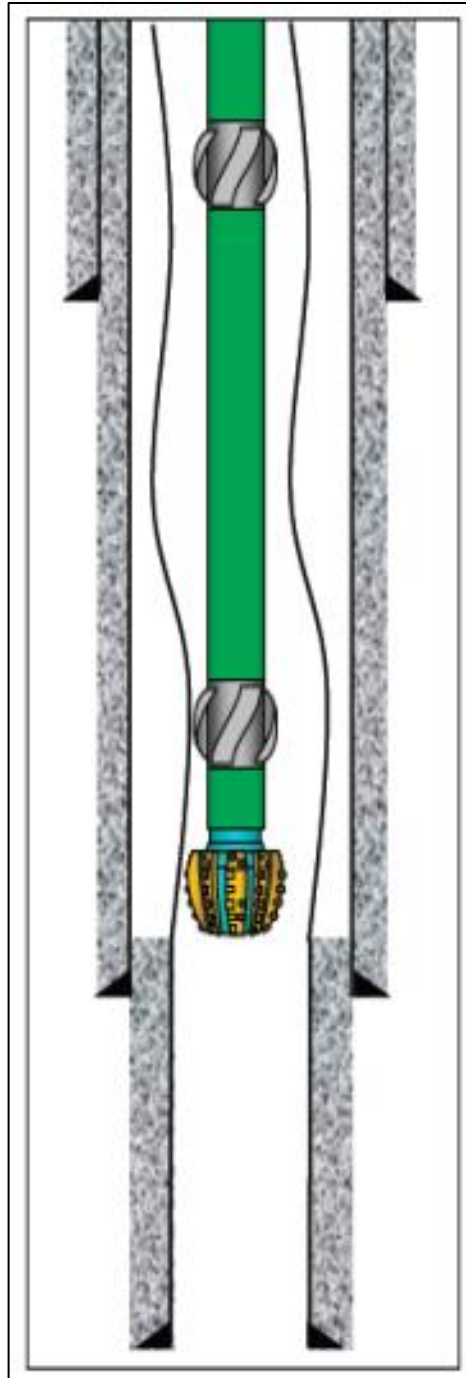
- Alta severidad de la pata del perro.
- Problema por pega de tubería.

También se puede presentar el desgaste con los trabajos de workover o acondicionamiento del pozo. La reducción del grosor de la pared de la tubería da como resultado una reducción de las propiedades mecánicas de la tubería. El desgaste severo del revestimiento ha causado tiempo de inactividad, operaciones fallidas y pérdida de pozos.

3.3.4 Desgaste por pandeo. Se presenta cuando el revestimiento no está cementado hasta la superficie, el valor de tensión que se requiere para colocar adecuadamente la tubería en la cabeza del pozo. Este valor de tensión será un factor de las propiedades mecánicas de la tubería, junto con los cambios en la densidad y la temperatura en la etapa de perforación posterior. Durante la operación de anclaje, debe conocer la altura a la que alcanza la cementación en el pozo, además de determinar la tensión adicional y las fuerzas de alargamiento en la sarta, en términos de los factores que causan el pandeo.

- Cambio en la densidad del fluido interno-externo.
- Cambio en la presión interna-externa del revestimiento.
- Cambio de temperatura.

Figura 25. Desgaste por pandeo.



Fuente: ASADI, A.; PARHIZGAR, N., y MOMENI, E. Prediction of Collapse in a Casing and Tubing: with Case Study of Iran. 2011.

3.3.5 Temperatura. Cuando el tope del cemento no alcanza la superficie del pozo, el fluido de perforación que permanece expuesto a la parte externa, sufrirá degradación física de sus fases a través del tiempo separándose los sólidos del líquido.

Esta agua puede estar expuesta a temperaturas que exceden el punto de ebullición y posteriormente puede evaporarse. Cuando el pozo fluye, la temperatura de los hidrocarburos aumentará a la temperatura del yacimiento, el calor es transferido al fluido en el anular a través del tubo, que puede alcanzar el punto de ebullición generando vapor y cambios de presión. Esta presión puede alcanzar el valor del colapso de la tubería.

Las altas temperaturas tienen el efecto de reducir el punto de cedencia de la tubería de revestimiento. Los revestimientos de diferentes grados se ven afectados en forma distinta por los efectos de la alta temperatura. A mayor grado del acero, mayor será la reducción en el punto de cedencia debido a las altas temperaturas.⁵⁵

También se presenta en los procesos de recobro térmico como la inyección de vapor. El revestimiento se expande cuando es calentado por el flujo de vapor. Si el revestimiento está fijo en dos extremos el esfuerzo axial dentro del revestimiento es compresivo; dicho esfuerzo puede superar el punto de cedencia generando una falla en el revestimiento debido a que el esfuerzo axial se convierte en esfuerzo lateral generando la deformación plástica o permanente.

⁵⁵ SCHLUMBERGER. Programa de entrenamiento acelerado para supervisores. Dimensiones y resistencias para tubulares API empleados en el campo petrolero.

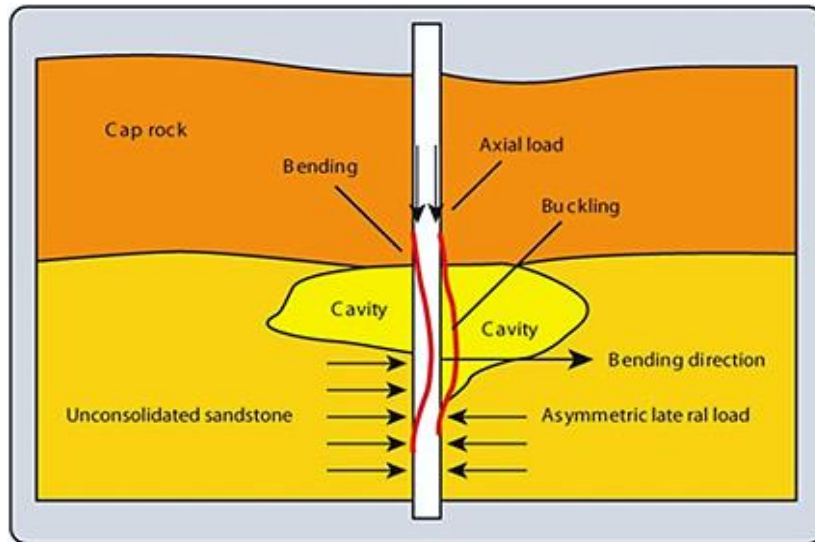
3.3.6 Sobrecargas debido a formaciones plásticas. Cuando los yacimientos se encuentran bajo o en formaciones de shale, arcilla o sal, debido a la profundidad pueden presentar comportamientos fisicoquímicos plásticos, es decir, el fenómeno de fluencia donde el material fluye hacia el pozo y provoca una carga adicional que se transmite radialmente al pozo, lo que podría causar un colapso de del revestimiento.

Zhong en el 2008 concluye que de la presión de sobrecarga seguida de la fluencia en formaciones profundas de sal pueden causar muchos problemas, incluida la inestabilidad del pozo, el atascamiento de la sarta de perforación, atascamiento del revestimiento, el colapso del revestimiento, etc⁵⁶.

3.3.7 Arenamiento. Este proceso se genera cuando los esfuerzos generados por el arrastre de los fluidos, los gradientes de presión y los esfuerzos in situ son mayores que la resistencia mecánica de la formación provocando el arrastre de las partículas. El desprendimiento de las partículas de la formación productora ocasiona cargas adicionales al revestimiento debido a la pérdida del material alrededor del pozo. La Figura 26 representa esquemáticamente el daño del revestimiento debido a la creación de cavidades y la producción de arena a través del intervalo productor. Cabe señalar que esta imagen es una exageración de la realidad y no es absolutamente necesario tener grandes cavernas para desestabilizar el revestimiento. En la Figura 27 se muestra el efecto de algunos factores que afectan la capacidad de resistencia de la tubería de revestimiento.

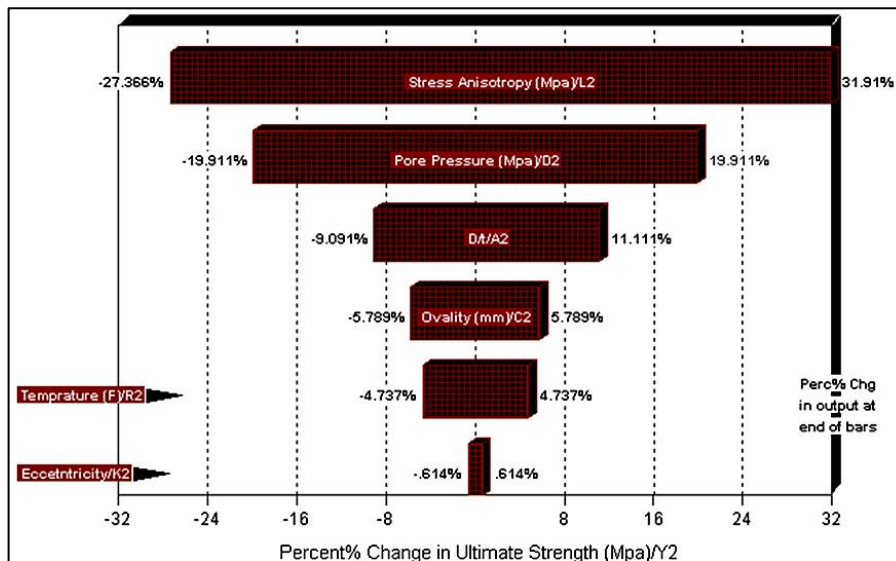
⁵⁶ ZHONG, L. Deep salt formation wells successfully drilled with integrated techniques in Tahe Oilfield. IADC/SPE 115208. 2008. P. 4

Figura 26. Representación del daño del revestimiento debido a la creación de cavidades y producción de arena en formaciones no consolidadas.



Fuente: GHOLAMI, Raof & RASOULI, Vamegh & Aadnoy, Bernt & Mohammadnejad, Mojtaba. Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production. Rock Mechanics and Rock Engineering. 49. P. 1443.

Figura 27. Efecto de factores en la capacidad de resistencia de los revestimientos.



Fuente: GHOLAMI, Raof & RASOULI, Vamegh & AADNOY, Bernt & MOHAMMADNEJAD, Mojtaba. 2015. Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production. Rock Mechanics and Rock Engineering. P. 1457.

3.4 MODELADO DEL COLAPSO EN TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

El colapso de revestimiento es un problema que afecta a muchos campos alrededor del mundo. Ejemplos reportados en la literatura incluyen formaciones salinas en aguas profundas en el Golfo de México, la costa de Angola, Brasil, el norte y oeste de África, los campos maduros en el Mar del Norte y fallamientos tectónicos en Colombia⁵⁷. El colapso de revestimiento puede suceder antes o durante la etapa de producción^{58 59}. Por ende, es imperativo ir un paso más allá en el estudio del colapso de revestimiento. Es fundamental tener en cuenta la integridad del pozo bajo la perspectiva de la geomecánica, analizando la influencia de los efectos geomecánicos resultantes del desarrollo del yacimiento sobre la integridad del pozo⁶⁰. Son los simuladores geomecánicos una ayuda idónea para realizar diferentes modelamientos que permitan analizar y evaluar el comportamiento geomecánico en las diferentes etapas de desarrollo de un yacimiento. Estudios realizados alrededor del mundo son presentados a continuación.

Xinpu Shen, Mao Bai, William Standifird y Robert Mitchell en el 2011 realizaron un modelamiento numérico para determinar la trayectoria óptima para pozos costa afuera y la predicción del colapso del revestimiento debido a la compactación generada por la producción. En este estudio se adoptó el modelamiento numérico para evaluar las ventajas de las posibles trayectorias del pozo. La optimización de la trayectoria es un aspecto fundamental para el desarrollo de un pozo. Una trayectoria optimizada permite que el pozo se desarrolle en el mejor escenario, es

⁵⁷ SHEN, Xinpu. Numerical analysis of casing failure under non-uniform loading in subsalt wells. En: Theory and Numerical Applications Editors. Broken Sound Parkway NW. CRC Press Taylor & Francis Group. 2011. p. 139.

⁵⁸ GHOLAMI. Op. cit., p. 1442.

⁵⁹ SHEN. Op. Cit. p. 140.

⁶⁰ LIMA RIGHETTO, Guilherme, *et. al.* A smart way to build Geomechanical models and analyze casing collapse during the petroleum field development. 3. 2014. P. 1.

decir, menores condiciones de carga que conllevan a promover una mayor vida útil para los revestimientos⁶¹.

En la etapa de producción cuando la presión del yacimiento se reduce a un punto donde los esfuerzos efectivos exceden la resistencia de la formación, puede llegar a producirse arena. El arenamiento puede promover la falla del revestimiento en estos yacimientos, dando, por ejemplo, creación de una cavidad alrededor del revestimiento⁶². Xinpu Shen, Arturo Díaz y Mao Bai en 2011 investigaron la redistribución de esfuerzos generada por la caída de presión del yacimiento utilizando un modelo bidimensional (2D) donde mediante el modelamiento numérico realizado en el software Abaqus visualizan el cambio de patrón en la dirección de los esfuerzos, la manera como simulan la producción de petróleo con el paso del tiempo es representado la depleción del yacimiento mediante la reducción de la presión de poro de 34 Mpa a 10 Mpa.⁶³

El-Sayed and Khalaf (1992) citado por Xinpu Shen (2011) presentaron el efecto de la carga no uniforme en el colapso del revestimiento en formaciones viscoelásticas (sal). Presentaron una simulación geomecánica para revestimiento simple y revestimiento dual bajo carga combinada uniforme y no uniforme. En este estudio se supone que la falla por colapso en el revestimiento es causada por la cedencia del material. Sus resultados indican que la resistencia de un revestimiento bajo carga uniforme a no uniforme se reduce en un rango de 70 a 80% dependiendo de la relación diámetro/espesor en la condición de carga no uniforme. En consecuencia, para aumentar la resistencia al colapso del revestimiento es más efectivo aumentar el espesor de la tubería que aumentar el grado de la tubería. En el 2012, Gholami y Rasouli realizaron un estudio semejante en el que analizaron el

⁶¹ SHEN. Op. cit. p. 44.

⁶² GHOLAMI. Op. cit., p. 1442.

⁶³ SHEN, Xinpu; DIAZ, Arturo & BAI, Mao. Calculation of stress rotation caused by salt creep and pore pressure depletion. En: Theory and Numerical Applications Editors. Broken Sound Parkway NW. CRC Press Taylor & Francis Group. 2011. p. 125.

efecto de la relación diámetro/espesor (D/t) y la excentricidad en la resistencia al colapso del revestimiento. Para evaluar la cantidad de presión externa que pueden resistir los revestimientos antes de que fallen; realizaron 4 modelos con diferente relación (D/t). Los resultados de la simulación fueron validados con estudios experimentales presentando una variación de 5%⁶⁴.

Dassault Systemes desde antes del 2010 y actualizado a la fecha ha presentado un caso de estudio referente a la erosión de material (producción de arena) en un pozo petrolero (Erosion of material (sand Production) in an oil wellbore). En este estudio la erosión de arena se modela en la superficie del wellbore, declarando que es parte de un dominio de malla adaptativa y prescribiendo movimientos de malla de superficie que retroceden en el material. La erosión de arena se modela durante el paso final de cada análisis⁶⁵. El desarrollo de este estudio presenta una simulación bidimensional y otra tridimensional, donde el criterio de falla para la formación corresponde a Drucker Prager, y el criterio de erosión⁶⁶ es descrito por Papamichos, E., y M. Stavropoulou. El modelo bidimensional es para un pozo “open hole” mientras que el tridimensional es completado con un revestimiento de 1 mm de espesor y materiales blandos, no propios del revestimiento, donde el objetivo es evaluar el arenamiento y no el revestimiento. En el 2011 Xinpu Shen complementa este estudio yendo más a fondo con el estudio del arenamiento. Shen predijo la presión de fondo fluyente crítica para predecir el inicio del arenamiento mediante valores de deformación plástica equivalente (PEEQ), siendo razonable que se presente arenamiento cuando el porcentaje de deformación plástica equivalente supere el 1% para pozos open hole, y 10% para pozos completados⁶⁷.

⁶⁴ GHOLAMI, Raof & RASOULI, Vamegh. Numerical simulations of casing collapse: A case study in the South of Iran. WIT Transactions on Engineering Sciences. 2012. P. 154.

⁶⁵ Dassault Systems: Abaqus Analysis User's Manual, Vol. 3: Materials, Version 6.8, Vélizy-Villacoublay. 2008.

⁶⁶ PAPANICHOS, E., and M. Stavropoulou. An Erosion-Mechanical Model for Sand Production Rate Prediction,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, no. 35. 199 8. pp. 4–5.

⁶⁷ SHEN, Xinpu. Numerical predictions on critical pressure drawdown and sand production for wells in weak formations. En: Theory and Numerical Applications Editors. Broken Sound Parkway NW. CRC Press Taylor & Francis Group. 2011. p. 156.

Gholami. et al, en el 2016 analizaron el efecto del colapso de la tubería de revestimiento por la producción de arena en el software de elementos finitos Abaqus. En este estudio se evidencia que el revestimiento pierde soporte lateral debido a la formación de cavidades pandeándose en una o ambas direcciones⁶⁸. En estudios similares desarrollados mediante modelos analíticos y numéricos se asume que la arena es producida continuamente en el yacimiento, lo que no es cierto según las observaciones de campo⁶⁹ y aunque se han presentado muchos análisis numéricos para modelar la producción de arena, estos análisis se limitan en la mayoría de los casos a identificar el inicio del arenamiento y no a cuantificar el grado de falla debido a tal fenómeno.

Mohammad Abdideh & Soheila Hedayati Khah en el 2018 analizaron el fenómeno del colapso principalmente por la presencia de formaciones compuestas principalmente de sal, se sabe que las formaciones de sal son deformables a grandes profundidades y temperaturas. Naturalmente tienden a moverse bajo la influencia de la presión de sobrecarga de las capas superiores y las actividades tectónicas. Para evaluar ello utilizan la simulación numérica empleando el software Abaqus, siendo uno de los más potentes softwares de modelado numérico en la simulación de rocas y tuberías. Para determinar las propiedades de la roca utilizan registros y pruebas en rocas de la formación.

Zhao et al en el 2019, analizaron el colapso de las tuberías de revestimiento por carga lateral debido a la expansión de rocas por la adsorción del agua y el arrastre de la formación adyacente en el yacimiento de un campo en China. Utilizaron el principio de trabajo virtual para evaluar la capacidad de la tubería, validaron los resultados obtenidos por medio de la simulación con elementos finitos y

⁶⁸ GHOLAMI. Op. Cit., p. 1442.

⁶⁹ HILBERT. et al. Modeling horizontal completion deformations in a deepwater unconsolidated sand reservoir. SPE Drill Complet J 26(1). 2011. P.76.

recomendaron que es importante tener conocimiento ya que la reduce el valor del colapso de diseño estándar dado por el API.⁷⁰

Imo, Yang y Yong Sheng en 2019, desarrollaron una simulación numérica en Abaqus con el fin de evaluar las condiciones y los mecanismos que rigen el flujo alrededor de un pozo, los gradientes de presión, la falla de la roca y la producción de arena. Basaron las condiciones de producción de arena en dos criterios: criterio de falla del material descrito por el modelo Drucker Prager y el criterio de arenamiento por un modelo de generación de masa sólida erosionada. Se evalúa la interacción entre el funcionamiento y las condiciones del yacimiento, Además, los efectos de la deformación plástica, la variación de la presión de poro y la producción de arena⁷¹.

Aunque se han presentado diversos estudios sobre el revestimiento y el arenamiento donde se utilizaron métodos numéricos o analíticos⁷², se presenta desinformación referente a estudios que consoliden en el mismo modelo el colapso de revestimiento por producción de arena. Para la simulación del proyecto se requiere un modelo numérico que contenga la información necesaria para el desarrollo de la simulación, con base en lo mencionado, este será alimentado por un modelo numérico de colapso de revestimiento y un modelo numérico por arenamiento.

⁷⁰ ZHAO. et al. Study of Deformation Law of Casing Local Lateral Collapse Based on the Principle of Virtual Work. *Energies*, 2019.

⁷¹ ESHIET, Ki, YANG, D.; SHENG Y. Computational study of reservoir sand production mechanisms. *Geotechnical Research* 6(3). 2019. p, 179.

⁷² GHOLAMI. Op. cit. p. 1443.

4. MODELO NUMÉRICO Y SOFTWARE ABAQUS

Con el propósito de evaluar el colapso de revestimiento debido a la producción de arena, se identifican los estudios más influyentes y se concluye que en la literatura principalmente se evalúan estos fenómenos por separado, es decir, producción de arena o colapso de revestimiento. Por ende, la selección de un modelo numérico que permita llevar a cabo los objetivos de esta investigación conlleva a acoplar un modelo en el que se simulen la consecuencia del arenamiento con otro que evalúe el colapso del revestimiento. El Cuadro 4 presenta los principales modelos, sin embargo, es pertinente aclarar que cada estudio mencionado en este libro fue fundamental para el desarrollo de la simulación.

Cuadro 4. Modelos geomecánicos aplicados al colapso de revestimiento y producción de arena

REFERENCIA	TÍTULO	CRITERIO DE FALLA		GEOMETRÍA	
		Formación	Casing	Tipo	Dimensión
Gholami et al (2016)	Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production	Drucker-Prager with hardening	Von Mises plasticity	No lineal	3D
Xinpu Shen (2011)	Subsidence Prediction and Casing Integrity with Respect to Pore-Pressure Depletion With 3D Finite-Element Method	Mohr-Coulomb yielding	PEEQ (Kaiser 2009)	No detallado	3D
Shen X, Shen G y Standifir W. (2016)	A Simplified 3D Numerical Scheme for Accurate Calculation of Critical Value of Pressure Drawdown of Weak Sand Formation	Mohr-Coulomb plastic yielding	Asumido para optimizar capacidad computacional.	No detallado	3D
Mohammad Abdideh y Soheila Hedayati (2018)	Analytical and Numerical Study of Casing Collapse in Iranian Oil Field	No detallado	Von Mises stress vs Yield streng	Lineal	2D
Soheila Hedayati y Mohammad Abdideh (2018)	3D Geomechanical Modeling of Casing Collapse in Plastic Formations (Cap Rock of Hydrocarbon Reservoir)	No detallado	Von Mises stress vs Yield streng	No detallado	3D
Dassault System Simula (2008)	Erosion of material (sand production) in an oil wellbore	Drucker-Prager model with hardening	No aplica	Lineal	2D

REFERENCIA	TÍTULO	CRITERIO DE FALLA		GEOMETRÍA	
Autor/es año		Formación	Casing	Tipo	Dimensión
Xinpu Shen (2010)	Numerical analysis of casing failure under non-uniform loading in subsalt wells	Drucker-Prager yielding	Von Mises Plasticity	No lineal	3D
Xinpu Shen 2010	Numerical predictions on critical pressure drawdown and sand production for wells in weak formations	Drucker-Prager	Asumido para no gastar espacio computacional	No detallado	3D
R. Gholami V. Rasouli (2011)	Numerical simulations of casing collapse: a case study in the South of Iran	no detallado	VonMises plasticity	Lineal	2D

Los modelos anteriormente mencionados tienen características en común como: software de simulación Abaqus, el tipo de elementos finitos para el cemento C3D8, para el revestimiento S4R y cuando es asumido para ahorrar carga computacional se trabaja con elementos tipos membrana siendo así común el M3D8R, para la formación circundante CPE4P en un modelo bidimensional y C3D8R o C3D10MP para un modelo tridimensional. Por último, la manera de llevar a cabo dichos modelos tiene un patrón definido, el cual se define brevemente como:

- Realizar un paso geostático donde el equilibrio es logrado después de aplicar la presión de poro y esfuerzos iniciales llevando a cabo un cálculo FEM con flujo poroso junto con deformación.
- Remover los elementos del pozo (simulando perforación) y aplicar la presión del lodo en la superficie del pozo.
- Reducir/reemplazar la presión de peso del lodo con la presión de fondo fluyente
- Análisis de suelos simulando la producción mediante un diferencial de presión entre los límites del modelo y la cara del pozo.

De la revisión bibliográfica se escoge como base para la simulación numérica, el modelo propuesto por Dassault System⁷³ (2008 con actualización a la fecha) que consiste en una geometría bidimensional con mallado adaptativo ALE junto con el modelo propuesto por Mohammad Abdideh 2018 y Gholami et al 2016. Los cuales permiten llevar a cabo un estudio que consolide y evalúe el colapso de revestimiento por producción de arena.

Basado en la herramienta computacional a usar y con el propósito de llevar a cabo la simulación, se hace necesario entender cómo funciona Abaqus y cómo llevar a cabo una simulación geomecánica en este simulador. A continuación, se describen las bases necesarias para entender el proceso de simular geomecánicamente y

⁷³ DASSAULT SYSTEMS: Abaqus Analysis User's Manual, Vol. 3: Materials, Version 6.8, Vélizy-Villacoublay, France: 19.3.1-17–19.3.2-14. 2008.

analizar resultados de una simulación del colapso de revestimiento por producción de arena en el software Abaqus.

4.1 SIMULACIÓN EN ABAQUS

Este capítulo se enfoca en describir las bases necesarias para entender el proceso de cómo llevar a cabo y analizar los resultados de una simulación del colapso de revestimiento por producción de arena en el software Abaqus.

El software Abaqus es una poderosa herramienta computacional en la resolución de problemas de ingeniería, basado en el método de los elementos finitos, el cual tiene la flexibilidad de poder resolver problemas que van desde análisis lineales relativamente simples hasta las más desafiantes simulaciones no lineales, esto gracias a su extensa librería de elementos logrando así modelar cualquier geometría. Tiene una lista igualmente extensa de modelos de materiales que pueden simular el comportamiento de la mayoría de los materiales típicos en ingeniería, incluidos metales, cauchos, polímeros, compuestos, hormigón armado, espumas triturables y elásticas, y en el campo de la simulación realizar procesos geomecánicos de suelos y rocas acoplado con un análisis de esfuerzos con fluidos porosos (coupled pore fluid-stress analyses)⁷⁴

- **Sistema de unidades en Abaqus**

El software Abaqus no permite especificar las unidades a utilizar, por lo tanto, las unidades elegidas deben ser consistentes.

⁷⁴ Abaqus documentation 6.16, Getting Started with Abaqus/CAE, Dassault Systemes Simulia. 2016.

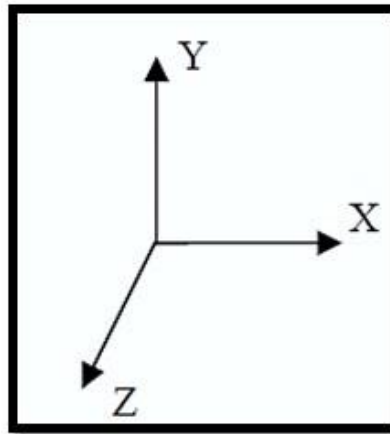
Cuadro 5. Sistema internacional de unidades que fue usado en la simulación.

Dimensión	Indicador	S.I Unidades
Longitud	L	Metro
Peso	M	Kilogramo
Tiempo	T	Segundo
Presión	P	Pascales

- **Sistema coordenado⁷⁵:**

El sistema coordenado usado por el programa de elementos finitos es el sistema cartesiano, cuyo convenio de signo positivo debe coincidir con la regla de la mano derecha. Abaqus permite elegir otro sistema localmente, ya sea para las salidas referidas a variables nodales (desplazamiento, aceleración, esfuerzos, etc.), condiciones de carga, restricciones y especificaciones de material de las secciones.

Figura 28. Sistema coordenado cartesiano.



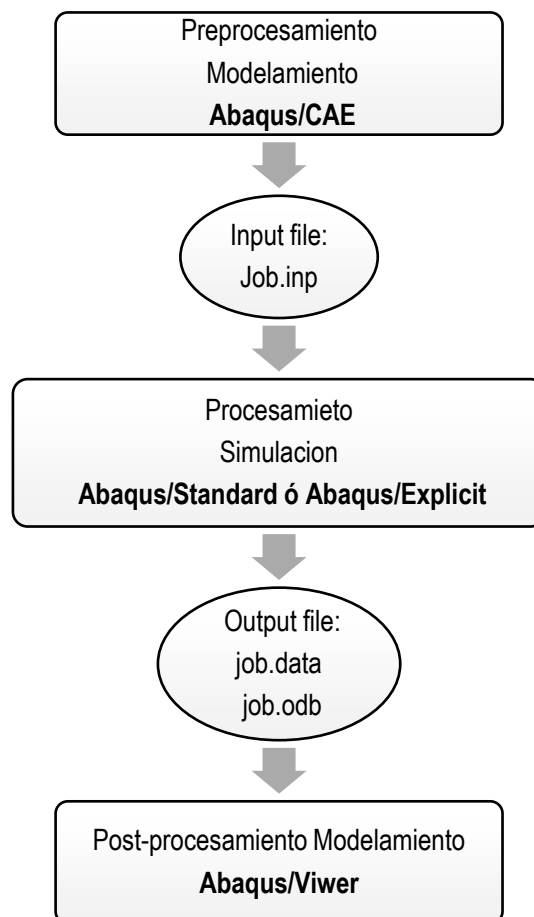
Fuente: FLORES, M.Y.U., ABAQUS Programa de Elementos Finitos Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes: Mérida. p. 7.

⁷⁵ FLORES, M.Y.U., ABAQUS Programa de Elementos Finitos Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes: Mérida, Venezuela.

4.1.1 Etapas del procesamiento. Un análisis completo de Abaqus generalmente consta de tres etapas distintas: preprocesamiento, simulación o procesamiento y postprocesamiento.

En la Figura 29 se muestra la secuencia de las etapas del procesamiento de datos en Abaqus

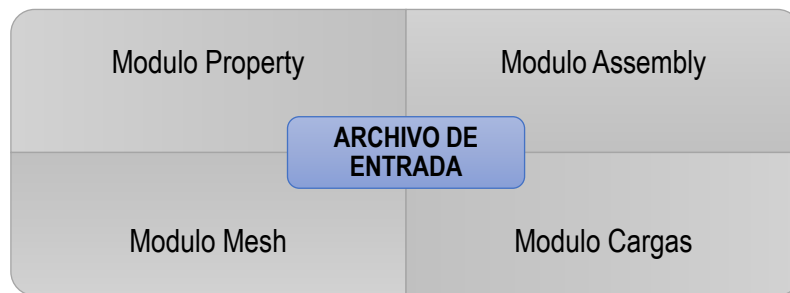
Figura 29. Etapas de trabajo



Fuente: Abaqus Documentation. [sitio web]. Preprocessing, simulation, and Postprocessing. [Consulta: 25 de abril de 2020]. Disponible en: <https://abaqusdocs.mit.edu/2017/English/SIMACAEFSARefMap/simagsa-cabspresimulationpost.htm#:~:text=A%20complete%20Abaqus%20analysis%20usually,create%20an%20Abaqus%20input%20file.>

4.1.1.1 Preprocesamiento: En esta etapa, se define el modelo del problema físico y se crea un archivo de entrada en Abaqus. El modelo generalmente se crea gráficamente usando la interfaz Abaqus /CAE (módulo interactivo para la creación de modelos de elementos finitos, permite plantear modelos de forma rápida y sencilla) u otro preprocesador.

Figura 30. Archivos de entrada en el preprocesamiento de Abaqus



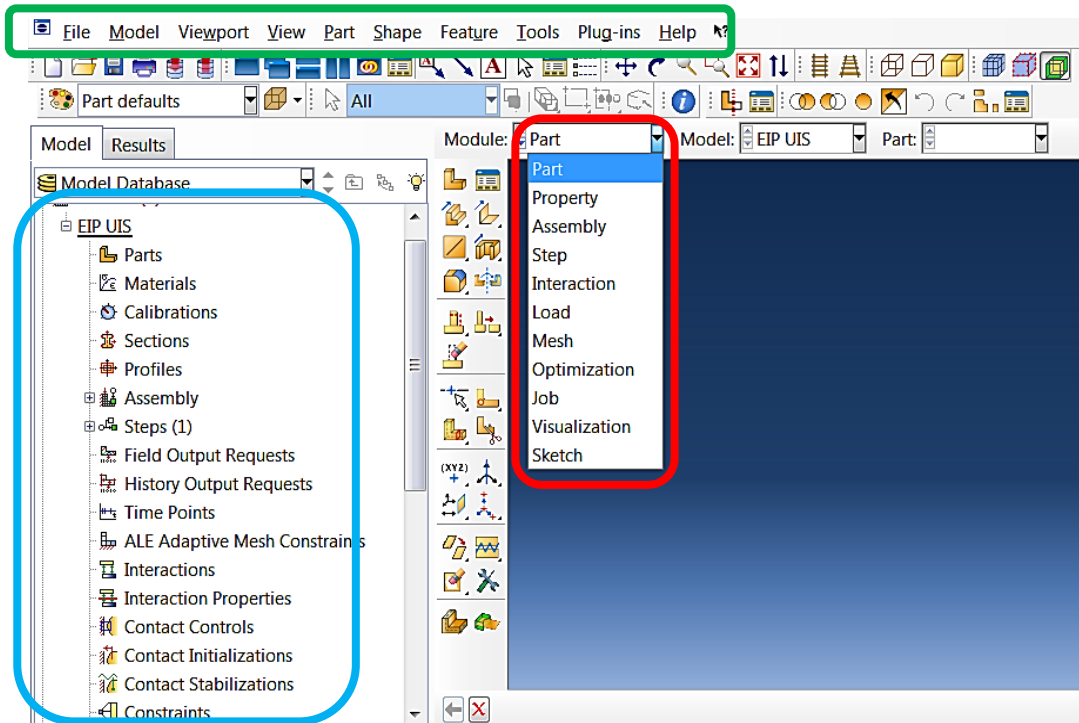
4.1.1.2 Simulación (Abaqus/Standar): La simulación, que normalmente es ejecutada como un proceso en segundo plano, es la etapa en la que Abaqus/Standard o Abaqus/ Explicit resuelve el problema numérico definido en el modelo. Dependiendo de la complejidad del problema que se analiza y la potencia de la computadora que se utiliza, puede llevar de segundos a días completar una ejecución de análisis. Para la simulación realizada en el presente proyecto se usó Abaqus/Standar debido a su mayor velocidad en la convergencia respecto a Abaqus/Explicit.

4.1.1.3 Postprocesamiento: Permite evaluar los resultados una vez que se haya completado la simulación y se hayan calculado los desplazamientos, tensiones u otras variables fundamentales. La evaluación generalmente se realiza de forma interactiva utilizando el módulo de visualización de Abaqus/CAE u otro postprocesador. El módulo de visualización, que lee el archivo de base de datos de salida binaria neutral, tiene una variedad de opciones para mostrar los resultados, incluyendo gráficos de contorno de color, animaciones y gráficos en el plano.

4.1.2 Módulos de trabajo interno. Una simulación en Abaqus/CAE se divide en módulos, cada módulo define un aspecto en la construcción o el desarrollo del proceso a modelar, por ejemplo: el módulo Part permite definir la geometría, el siguiente aspecto es definir que materiales asignarle a dicha geometría, lo cual es posible gracias al módulo Property. De esta manera se genera un archivo de entrada para su análisis en Abaqus/Standar y su posterior visualización en el postprocesador Abaqus/CAE, que corresponde al módulo de visualización y también se licencia como un producto separado llamado Abaqus/Viewer.

Para aspectos más específicos en la construcción del modelo se hace indispensable usar la barra de menú donde se especifican procesos tales como Adaptive mesh Domain, Adaptive mesh Constraint entre otros, los cuales serán detallados más adelante. También se hace uso del “Model tree” donde se encuentran a mayor detalle los subprocesos en el paso a paso de la construcción del modelo.

Figura 31. Interfaz de Abaqus/CAE. Rojo: Módulos de trabajo. Azul: Model tree. Verde: Barra de menú.



4.1.2.1 Part⁷⁶ Permite crear, editar y manejar la o las partes mediante un perfil bidimensional, cuando la parte se crea desde el módulo Part, es denominada parte nativa y contiene información de la geometría, así como un conjunto de reglas que gobiernan el comportamiento de la geometría.

Es propicio mencionar que Abaqus / CAE ofrece diferentes maneras de obtener la parte:

- Mediante las herramientas disponibles en el módulo Part.
- Importar la parte desde un archivo que contiene geometría almacenada en un formato de terceros tales como CATIA, SOLIDWORKS entre otros.
- Importar la malla de la parte desde una base de datos de salida.
- Importe una parte mallada desde un archivo de entrada Abaqus.
- Unir o separar instancias de piezas en el módulo de ensamblaje.
- Crear una parte mallada en el módulo de malla

4.1.2.2 Property⁷⁷: El módulo Property permite definir un material, creando y asignando secciones, a la que dicho material pertenece. Un único material puede ser asignado a varias secciones.

- **Definiendo el material:** Abaqus/CAE permite escoger en su librería las propiedades de un material, cada material creado se le asigna su propio nombre y es independiente de cualquier sección.
- **Definir y asignar una sección:** Una sección contiene la información de las propiedades de un material ya sea en la geometría completa o en una región de esta (una geometría se le pueden asignar varias secciones y a cada sección se le puede asignar un material).

⁷⁶ Abaqus documentation 6.16, Abaqus/CAE User's Guide, The Part Module, Dassault Systemes Simulia. 2016.

⁷⁷ Abaqus documentation 6.16, Abaqus/CAE User's Guide, The Property Module, Dassault Systemes Simulia. 2016.

Las secciones se nombran y crean independientemente de cualquier región, geometría o ensamblaje en particular. Es posible asignar una sola sección a múltiples regiones. Mediante el módulo de propiedades es posible escoger el tipo de sección, por ejemplo: crear secciones sólidas, secciones de viga, secciones de fluido y otras secciones.

Para la simulación en proceso se hizo uso de una sección sólida de tipo homogénea que se define:

- **Secciones sólidas:** las secciones sólidas definen las propiedades de sección de las regiones sólidas bidimensionales, tridimensionales y axial simétricas.
- **Secciones sólidas homogéneas:** las secciones sólidas homogéneas consisten en un nombre de material. Cuando la sección se utiliza en una región bidimensional como la del presente proyecto, se debe especificar el espesor de la sección.

4.1.2.3 Assembly: En Abaqus cada parte creada es independiente de las otras, debido que tiene su propio sistema coordinado, el módulo Assembly permite un ensamblaje completo del modelo, mediante la creación de instancias donde se establece la ubicación final de las partes en la misma coordenada, y su respectiva ubicación en el modelo global respecto a las otras partes.

En el módulo Assembly se crean copias de las partes, llamadas instancias, posicionadas entre ellas de manera relativa en un sistema de coordenadas global. Una instancia mantiene su relación con la parte original. Si la geometría de la parte cambia, el programa automáticamente realizará los cambios pertinentes en la instancia, de este modo, para realizar cambios en las propiedades de una instancia, debe modificarse la parte correspondiente.

Un modelo puede contener varias partes, y una parte puede dar lugar a una o varias instancias en el ensamblaje; sin embargo, un modelo sólo puede contener un único ensamblaje.

4.1.2.4 Step⁷⁸. El módulo Step define los pasos y las variables a desarrollarse en la simulación, de esta manera establece la secuencia de análisis que se van a llevar a cabo.

La secuencia de los pasos proporciona una forma conveniente para especificar los cambios en; condiciones de frontera, cargas y en reproducir el fenómeno de estudio por etapas logrando una mayor veracidad del proceso.

4.1.2.4.1 Tipos de pasos⁷⁹

- **Paso Inicial:** Abaqus lo crea automáticamente, permite definir las condiciones de frontera, campos predefinidos e interacciones que se aplican al comienzo del análisis.
- **Pasos del Análisis:** Están asociados con un procedimiento específico que define el tipo de análisis que se desarrolla durante el modelo; por ejemplo: análisis de esfuerzos estáticos o dinámicos, análisis de esfuerzo/desplazamiento, estado estable, transitorio con respuesta del material dependiente del tiempo, campo geoestático de esfuerzos.

⁷⁸ Abaqus documentation 6.16, Abaqus/CAE User's Guide, The Step Module, Dassault Systemes Simulia. 2016

⁷⁹ PALENCIA M., Miguel F. Evaluación de los modos de falla breakout y exfoliación en la pared del pozo mediante simulación numérica y pruebas de laboratorio. Bucaramanga. 2018. P. 41.

4.1.2.4.2 Variables de salida: un análisis de elementos finitos puede crear múltiples variables de salida de forma predeterminada, en la mayoría de los casos muchas no son necesarias para el objeto de estudio; por ende, Abaqus/CAE permite especificar las variables creando solicitudes de salida que se propagan a los pasos de análisis posteriores. Una solicitud de salida define qué variables se generarán durante un paso de análisis, desde qué región del modelo se generarán y a qué velocidad se generarán.

Tipos de solicitud de salida:

- Field Output Request: Permite especificar las variables de salida de datos, a partir de datos que se distribuyen espacialmente en todo el modelo o en una parte de este.
- History Output Request: Permite especificar las variables de salida requeridas y generar resultados históricos a partir de estas en puntos específico del modelo, posterior a esto y en la mayoría de los casos, se usa el módulo visualización para analizar los resultados históricos de las variables escogidas mediante gráficos en el plano.

Para la simulación en proceso las variables requeridas como solicitud de salida corresponden a:

Esfuerzos:

- S: S_{11} , S_{22} , S_{33}
- MISES, Esfuerzo equivalente Mises.
- MISESMAX: Máximo estrés equivalente de Mises.

Deformaciones:

- E, Componentes de deformación total.
- LE, Componentes de deformación logarítmica.

- PE, Componentes de deformación plástica.
- PEMAG, Magnitud de la deformación plástica.
- PEEQ, Deformación plástica equivalente.

Desplazamiento

- U, translación y rotación.

Medios porosos/Fluidos

- VOIDR, Relación de vacío: es definida como el cociente entre el volumen poroso y el volumen de matriz rocosa. Dado que la porosidad es la relación del volumen poroso con el volumen total. La ecuación que relaciona la porosidad con la relación de vacío es:

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

Donde:

e^0 = Relación de vacío inicial

n^0 = Porosidad inicial

- POR, Presión de poro.

Volumen

- VOLC, Cambio en el área o cambio en el volumen de un conjunto de elementos. Se encuentra disponible únicamente en mallas adaptativas.

4.1.2.4.3 Mallas adaptativas: Permite definir regiones de malla adaptativa y especificar controles para mallas adaptativas en esas regiones. Se hará énfasis en mallas adaptativas en el “análisis de arenamiento” realizado más adelante.

4.1.2.4.4 Controles de análisis: Permite personalizar los controles generales de la solución y el control del solucionador.

4.1.2.5 Load: El módulo load permite aplicar las cargas, condiciones de frontera y condiciones iniciales al modelo, los cuales son paso-dependientes, esto quiere decir que se debe especificar los pasos en los cuales estarán activos.

Cargas: El termino carga en Abaqus se refiere a cualquier acción/cosa que induce un cambio en la respuesta de una estructura desde su estado inicial. En Abaqus/Cae y objeto de estudio para la simulación, es fundamental la carga tipo presión.

Presión: Es creada para definir una presión sobre una superficie, puede aplicarse de los siguientes modos

- Uniforme
- Fuerza total
- Hidrostática

Condiciones de frontera: Mediante la creación de condiciones de frontera en el Módulo Load es posible asignar valores nulos (ceros), o asignar valores no nulos dentro del paso. Abaqus permite que las condiciones sean propagadas, modificadas o desactivadas a partir del paso en que fueron creadas.

Abaqus/Cae ofrece variedad de tipos de condiciones de frontera

- Desplazamiento
- Rotación
- Presión de fluido
- Presión de poros

- Temperatura
- Potencial eléctrico
- Concentración normalizada
- Presión acústica.

Las condiciones de frontera objetivo en la simulación son descritas a continuación:
Simetría/Antisimétrica/Encastre

- XSYMM: Simetría alrededor de un plano $X=\text{constante}$, implica que los grados de libertad 1,5,6=0.
- YSYMM: Simetría alrededor de un plano $Y=\text{constante}$, implica que los grados de libertad 2,4,6=0.
- ZSYMM: Simetría alrededor de un plano $Z=\text{constante}$, implica que los grados de libertad 3,4,5=0.
- XASYMM: Anti-simetría alrededor de un plano $X=\text{constante}$, implica que los grados de libertad 2,3,4=0.
- YASYMM: Anti-simetría alrededor de un plano $Y=\text{constante}$, implica que los grados de libertad 1,3,5=0.
- ZASYMM: Anti-simetría alrededor de un plano $Z=\text{constante}$, implica que los grados de libertad 1,2,6=0.
- PINNED: Tipo broche, implica que los grados de libertad 1,2,3=0.
- ENCASTRE: Totalmente empotrado, implica que los grados de libertad 1,2,3,4,5,6=0.

Presión de Poro: Permite especificar la presión de poro en un medio poroso.

Condiciones iniciales⁸⁰

Las condiciones iniciales son aplicadas tanto en nodos como en elementos, estas pueden ser impuestas directamente, por medio de un archivo externo, subrutinas de usuarios y en algunos casos a través de un archivo de resultados obtenido de un análisis previo con Abaqus. Existen distintos tipos de condiciones iniciales cuya aplicación depende del tipo de análisis utilizado.

1. Presión acústica inicial.
2. Concentración normalizada inicial en análisis de difusión de masa.
3. Superficies de contacto iniciales.
4. Valores iniciales de campos de variables predefinidos.
5. Presión de fluido inicial en elementos de fluidos hidrostáticos.
6. Valores iniciales de la variable de estado de endurecimiento plástico.
7. Presión de fluido inicial en un medio poroso.
8. Presión de esfuerzo inicial en análisis de difusión de masa.
9. Relación de vacío inicial en un medio poroso.
10. Densidad relativa inicial.
11. Velocidad angular y traslacional inicial.
12. Saturación inicial en un medio poroso.
13. Valores iniciales de variables de estado incluídas por medio de una subrutina de usuario.
14. Energía específica inicial para ecuaciones de estado.
15. Definición apud can embedment or spud can preload.
16. Definición de esfuerzos iniciales.
17. Definición de esfuerzos iniciales en análisis geostáticos.
18. Temperatura inicial.
19. Velocidad inicial para especificar grados de libertad.

⁸⁰ FLORES, M.Y.U., ABAQUS Programa de Elementos Finitos Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes: Mérida, Venezuela

Las condiciones iniciales preestablecidas para la simulación en proceso se basan en:

- Esfuerzos iniciales para análisis geoestáticos
- Relación de vacío inicial en un medio poroso.

4.1.2.6 Mesh: El módulo Mesh contiene las herramientas que permiten generar el enmallado a las partes y ensambles, creados dentro de Abaqus/Cae. Hay varios niveles de automatización y controles disponibles para crear una malla que satisfaga las necesidades de un análisis; por ejemplo, la capacidad computacional. Como el proceso de creación de partes y ensamblajes, el proceso de asignación de atributos de malla al modelo, como semillas, técnicas de malla y tipos de elementos, se basa en diferentes características. Como resultado, puede modificar los parámetros que definen una pieza o un ensamblaje, y los atributos de malla que especificó dentro del módulo malla se regeneran automáticamente⁸¹. Los pasos básicos para realizar un enmallado son los siguientes:

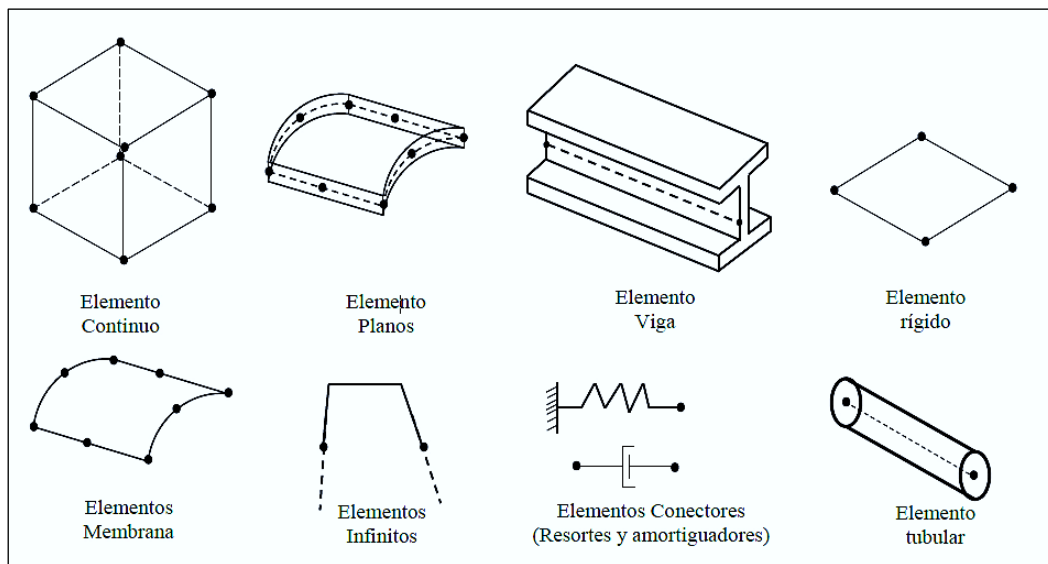
- Asignar los atributos de la malla y fijar los controles de esta: Se especifica las características de la malla como densidad, forma y tipo de elemento.
- Generar la malla: Se especifica la técnica de enmallado, la cual determina el nivel de control que se tendrá sobre la malla.
- Refinar la malla: Se especifican las semillas, se divide el modelo complejo en varias regiones más simples para obtener mejor calidad de la malla.
- Optimizar la malla: Se pueden asignar reglas de remallado a las regiones del modelo para permitir un sucesivo refinamiento de la malla de acuerdo con los resultados del análisis.

⁸¹ Abaqus documentation 6.16, Abaqus/CAE User's Guide, The Mesh Module, Dassault Systemes Simulia. 2016

- Verificar la malla: Se verifica la calidad de la malla la cual influye significativamente en la precisión y exactitud de los resultados del análisis.

Como se mencionaba anteriormente el módulo Mesh permite escoger el tipo de elemento, y son precisamente los elementos, los componentes fundamentales en un modelo de análisis. Abaqus presenta una extensa librería de elementos que proporciona una herramienta robusta para la solución de una gran variedad de problemas ingenieriles; las características más importantes de los elementos familia: La Figura 32 muestra las familias de elementos que son usadas en un análisis de esfuerzos. La mayor diferencia entre las diferentes familias de elementos es la geometría que cada familia asume.

Figura 32. Familia de elementos.



Fuente: PALENCIA, M, Miguel F., Evaluación de los modos de falla breakout y exfoliación en la pared del pozo mediante simulación numérica y pruebas de laboratorio. P. 43.

Grados de libertad⁸²: Los grados de libertad son variables fundamentales calculadas durante un análisis. Estos grados de libertad están íntimamente relacionados con la familia del elemento.

⁸² FLORES. Op. Cit. p. 9.

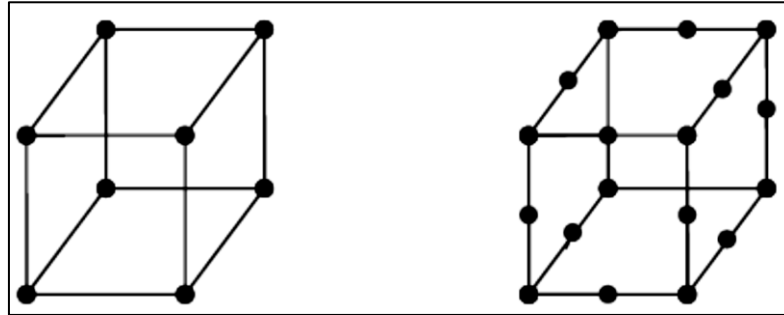
El programa considera los grados de libertad que se muestran a continuación:

1. Desplazamiento en x
2. Desplazamiento en y
3. Desplazamiento en z
4. Rotación a través del eje x
5. Rotación a través del eje y
6. Rotación a través del eje z
7. Warping amplitude (para secciones abiertas de elementos beams)
8. Presión de poro
9. Potencial eléctrico
10. No usado
11. Temperatura (o concentración normalizada en análisis de difusión de masa)
12. Segunda temperatura (para elementos Shell o Beams)
13. Tercera temperatura (para elementos Shell o Beams)
14. Entre otras

Formulación: Se refiere a la matemática usada para definir el comportamiento de un elemento. Abaqus presenta dos opciones, la primera es usada para los análisis de esfuerzos/desplazamientos y está basada en la teoría Lagrangiana. La segunda es la teoría Euleriana o espacial, la cual se usa para análisis de mecánica de fluidos.

Número de nodos y orden de interpolación. El orden de interpolación es determinado por el número de nodos usados en el elemento, por ejemplo, los elementos que tienen nodos solo en las esquinas usan interpolación lineal y son llamados elementos lineales o elementos de primer orden, Figura 33. En Abaqus/Standard los elementos con nodos intermedios usan interpolación cuadrática y son llamados elementos cuadráticos o elementos de segundo orden.

Figura 33. Elementos de primer orden (Izquierda). Elementos de segundo orden (Derecha).



Fuente: Abaqus documentation 6.16, Abaqus/CAE User's Guide, The mesh Module, Dassault Systemes Simulia. 2016.

Integración: Abaqus emplea técnicas numéricas para integrar sobre el volumen de cada elemento, la cuadratura de Gaussian es la más usada para los elementos. Abaqus evalúa la respuesta del material para cada punto de integración en cada elemento. Algunos elementos continuos pueden usar integración completa o reducida, esta decisión puede tener un significativo efecto sobre la exactitud de los resultados. Abaqus usa la letra R al final del nombre del elemento para identificar a los elementos que usan integración reducida.

El tipo de elementos escogido en la simulación para el yacimiento es:

C PE 4 P

C: Continuo para esfuerzos y desplazamientos

PE: Esfuerzos planos

4: Numero de nodos

P: Presión de poro

El tipo de elementos escogido en la simulación para el cemento y casing es:

C S 4 R

C: Continuo para esfuerzos y desplazamientos

S: Shell para esfuerzo/desplazamiento

4: Numero de nodos

R Integración reducida

4.1.2.7 Job: El módulo Job permite finalizar todas las tareas que se incluyen en la definición de un modelo (tales como definir la geometría del modelo, asignar las propiedades de la sección y definir las condiciones iniciales y de frontera y el enmallado del mismo), Abaqus utiliza el módulo Job para analizar el modelo. Este módulo permite crear un trabajo, enviarlo para su análisis y monitorear su progreso. Si se requiere, se pueden crear varios modelos, trabajos, correr y monitorear los trabajos simultáneamente⁸³.

El análisis de un modelo envuelve los siguientes pasos:

- Crear y configurar un trabajo de análisis
- Escribir el archivo de entrada
- Enviar el trabajo para análisis
- El módulo de trabajo permite realizar las siguientes acciones:
- Escribir un archivo de entrada para el modelo que se va a enviar a analizar
- Desarrollar una revisión de los datos del modelo
- Enviar un trabajo para análisis
- Continuar el completamiento de un análisis después de llevar a cabo una revisión de los datos
- Monitorear el análisis a medida que este progrese
- Revisar los resultados de un trabajo
- Introducir subrutina de usuario






⁸³ Abaqus documentation 6.16, Abaqus/CAE User's Guide, The Job Module, Dassault Systemes Simulia. 2016

- Abortar o matar un trabajo que está actualmente corriendo

4.1.2.8 Visualization: El módulo Visualization proporciona una visualización gráfica de modelos y resultados de la simulación. Este módulo corresponde a la etapa de postprocesamiento y cuenta con su propia licencia (Abaqus/Viewer). Permite leer el archivo de salida (output file) tanto del modelo que actualmente se corrió como de modelos ya corridos (Modulo Job almacena varios modelos corridos).

La manera de controlar las variables de salida y la información requerida para analizar en el módulo Visualization son configuradas mediante lo mencionado en el módulo Step. Los comandos de visualización más comunes son mencionados en la Figura 34.

Cuadro 6. Comandos de visualización.

Acción	Modulo	Icono
Mostrar geometría no deformada	Visualización	
Mostrar geometría deformada	Visualización	
Mostrar gráfico de contorno sobre la geometría no deformada	Visualización	
Mostrar gráfico de contorno sobre, la geometría deformada	Visualización	
Gráfico bidimensional X-Y	Visualización	

4.2 ARENAMIENTO EN EL SOFTWARE ABAQUS⁸⁴

La simulación numérica de la producción de arena es un componente importante de la aplicación de los fenómenos multifísicos en la industria del petróleo. En el proceso de producción de arena, intervienen un total de tres fases de material (líquido, matriz y grano sólidos). Durante la producción de arena, el petróleo transporta los granos

⁸⁴ Abaqus documentation 6.16, Abaqus/CAE Example Problem Guide, Erosion of material (sand production) in an oil wellbore, Dassault Systemes Simulia. 2011.

de arena al pozo y a la superficie. La arena puede ser transportada por petróleo al pozo, tanto desde el interior de la formación como desde el exterior.⁸⁵

Hay dos fuentes principales de la producción de arena en un pozo. Una es volumétrica, y se debe a la falla del material, debido a los altos esfuerzos la roca se desmorona y los granos son transportado por el fluido a través de los poros, la otra está basada en la fricción entre los granos y se debe a la ruptura del material por la acción hidrodinámica del flujo. Dependiendo de las propiedades de los estratos que contienen petróleo y las velocidades de flujo, uno u otro puede ser la fuente dominante del arenamiento.

Dassault Systemes describe que el arenamiento en Abaqus se simplifica a modo de erosión en la superficie. Este proceso es simulado mediante la tecnología de mallado adaptativo ALE. La superficie que presenta erosión/arenamiento, se le asigna un dominio de mallado adaptativo, el cual se volverá a mallar automáticamente utilizando la misma topología de malla que explica la nueva ubicación de la superficie. La malla adaptativa se trata como un proceso de incremento posconvergente. El funcionamiento de esta malla es detallado a continuación

4.2.1 Mallado adaptativo (ALE Adaptive Meshing). La técnica de mallado adaptativo en Abaqus combina las características del análisis lagrangiano puro y el análisis euleriano puro. Este tipo de mallado adaptativo a menudo se denomina análisis arbitrario lagrangiano-euleriano (ALE)⁸⁶.

⁸⁵ SHEN. Op. Cit. p. 157.

⁸⁶ Abaqus documentation 6.16, Abaqus/Analysis User's Guide, Adaptivity Techniques, Dassault Systemes Simulia. 2016

Con un enfoque lagrangiano, la malla se mueve junto con el material. Esto es lo que generalmente se hace en Abaqus para los sólidos en general. Con un enfoque euleriano, la malla se fija y el material se mueve a través de ella. Este enfoque tiene sentido para los fluidos. Con un mallado adaptativo ALE, el dominio asignado logra un enfoque arbitrario que puede ser completamente lagrangiano o completamente euleriano según sea requerido.

El propósito del mallado adaptativo ALE es reducir la distorsión de la malla y mantener sus características, incluso bajo deformaciones severas. Esto se hace moviendo los nodos. La topología no se modifica, por lo que no se modifica la conectividad y, por lo tanto, la cantidad de elementos.

4.2.2 Dominio de malla adaptativo (Adaptive Mesh Domain). Poner en funcionamiento la técnica de mallado adaptativo ALE, para permitir altas distorsiones de malla debido al arenamiento, conlleva a declarar la superficie a erosionar ser parte de un dominio de malla adaptativo (Adaptive Mesh Domain).

Para la simulación en proceso, una extensión suficientemente grande de la malla de elementos finitos cerca del pozo es declarada como el dominio de malla adaptativa. La identificación del dominio de la malla adaptativa dará como resultado la configuración de la malla cerca de la superficie necesaria para permitir que la erosión de arena progrese a profundidades arbitrarias. Todos los nodos en el límite del dominio de malla adaptativa donde se encuentra con la malla regular deben considerarse como lagrangiano para respetar los elementos adyacentes no adaptativos.

4.2.3 Restricción de malla adaptativa (Adaptive Mesh Constraint). La erosión de arena se describe a través de una restricción de malla adaptativa espacial (Adaptive mesh Constraint), que se aplica a todos los nodos en la superficie a erosionar. Las restricciones de malla adaptativa solo se pueden aplicar en dominios de malla adaptativa (Adaptive Mesh Domain).

Las restricciones de malla adaptativa se aplican para definir el movimiento de los nodos explícitamente permitiendo un control total sobre el movimiento de la malla. Para la simulación en proceso se define una restricción de malla adaptativa de tipo velocidad.

5. SIMULACIÓN DEL COLAPSO DEL REVESTIMIENTO

En este capítulo, el análisis numérico del modelado del colapso del revestimiento se muestra a detalle. La simulación numérica basada en el método de los elementos finitos se realiza por medio de la herramienta software Abaqus, para predecir el colapso de revestimiento debido a la producción de arena.

5.1 GEOMETRÍA Y DATOS DE ENTRADA DEL MODELO

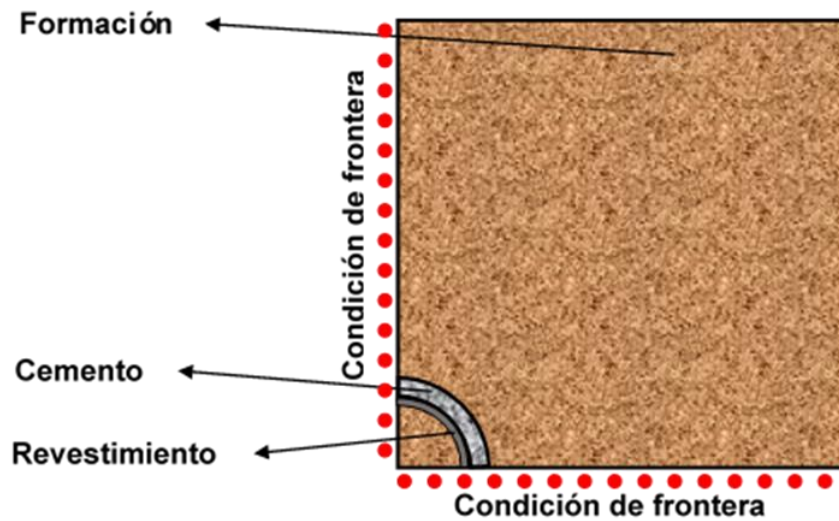
Para iniciar la simulación del colapso de revestimiento se tuvieron en cuenta los estudios realizados por los diferentes autores y se tomó la decisión de utilizar una geometría bidimensional (2D), asumiendo que no hay variación de cargas y deformación en la dirección longitudinal. Esto es lo que generalmente se conoce como condiciones de deformación plana en las que se restringen los desplazamientos en la dirección longitudinal. Se ha informado que esta simplificación es válida ya que los estudios experimentales demostraron, que la presión de colapso medida es independiente de la longitud del revestimiento⁸⁷.

El tamaño total de la geometría se simplifico a un cuarto ($\frac{1}{4}$), debido a la simetría, con el fin de realizar un estudio más detallado y optimizar la carga computacional, ver figura 35. El modelo consiste en una placa delgada con un área superficial de 15 x 15 (m x m). La relación longitud-radio entre la formación y el pozo perforado cumple la regla de ser mayor a 10, de este modo se representan dimensiones infinitas, se elimina el efecto de borde en la simulación y se cumplen con los parámetros para aplicar la solución analítica de kirsch en la calibración del modelo⁸⁸.

⁸⁷ HUANG. Óp. Cit., p. 362.

⁸⁸ PALENCIA. Óp. Cit., p. 81.

Figura 35. Representación del modelo simplificado a (1/4) de geometría



5.1.1 Materiales. La formación es asumida como homogénea y se modela utilizando un modelo de plasticidad generalizado capaz de simular la dependencia de la presión de las rocas, es decir Drucker Prager, el cual también corresponde al criterio de falla con su extensión a Drucker Prager con endurecimiento. El casing se asume como elastoplástico aplicando el criterio de falla de Von Mises y el cemento se asume perfectamente elástico.

5.1.2 Propiedades mecánicas. Las propiedades de la formación, cemento y casing, fueron tomados del Instituto colombiano del petróleo, con el objetivo de aplicar esta simulación a un campo colombiano. Estos datos corresponden a una profundidad de 1220 m, para una arenisca de grano medio en un régimen de falla normal. En el Cuadro 6 y 7 se agrupan las propiedades de los materiales y las cargas utilizadas

Cuadro 7. Materiales

Formación		
Densidad de la roca [KG/m ³]		2700
Elasticidad	Modulo Young [MPa]	551
	Relación de Poisson	0.3
Permeabilidad [mD]		325
Relación de Vacíos		0.13
Drucker- Prager	Ángulo de Fricción	33
	Ángulo de dilatación	18
Tipo de roca		Arenisca
Régimen de falla		Normal
Cemento		
Densidad del cemento [KG/m ³]		1797
Elasticidad	Modulo Young [MPa]	30000
	Relación de Poisson	0.21
Espesor (in)		3.625
Revestimiento		
Elasticidad	Modulo Young [MPa]	210000
	Relación de Poisson	0.3
Yield Stress (Mpa)		750
Diámetro externo (in)		8.625
Espesor (in)		0.450
Diámetro interno (in)		7.725
Grado		P110
Peso (lb/ft)		40

Fuente: Información suministrada por el Instituto Colombiano del Petróleo

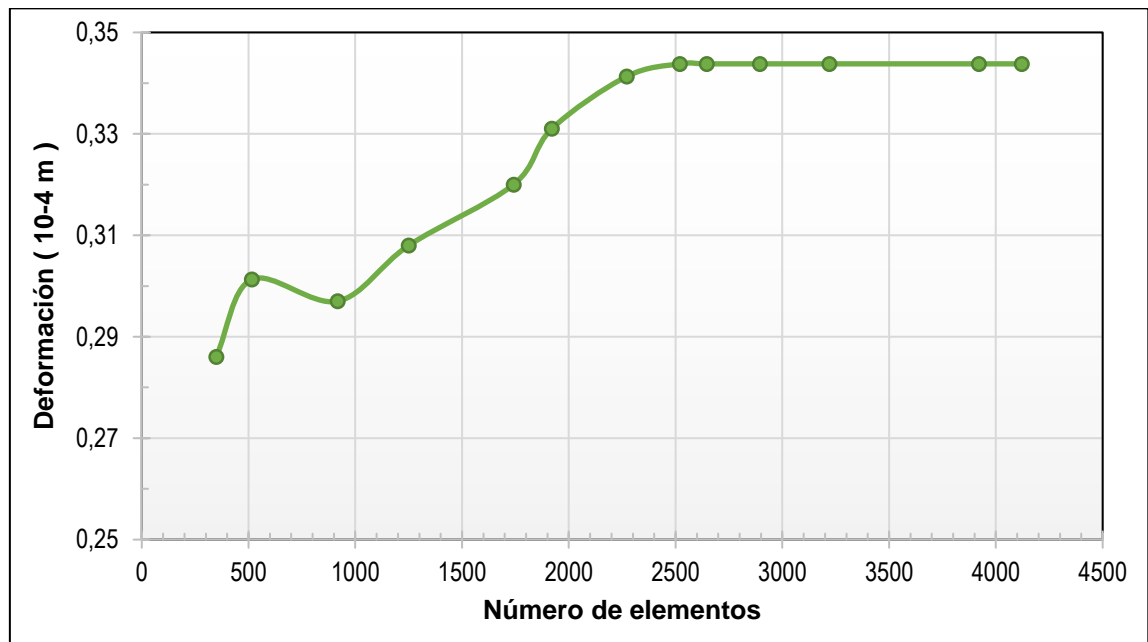
Cuadro 8. Cargas aplicadas

Carga	Valor
σ_v	27.24 MPa @1220 m
σ_H	20 MPa
σ_h	18.64 MPa
P_{Mud}	13.6 MPa
P_p	11.47 MPa

Fuente: Información suministrada por el Instituto Colombiano del Petróleo

5.1.3 Aplicación de los elementos finitos. El tipo de elementos usados para la simulación corresponden a elementos continuos de primer orden, con una técnica de mallado tipo estructural. Para permitir una mayor discretización y exactitud en la simulación, se refino la zona cerca a la cara del pozo⁸⁹ y se realizó análisis de sensibilidad del mallado para determinar la cantidad de elementos requeridos.

Figura 36. Análisis de sensibilidad de malla con la deformación.

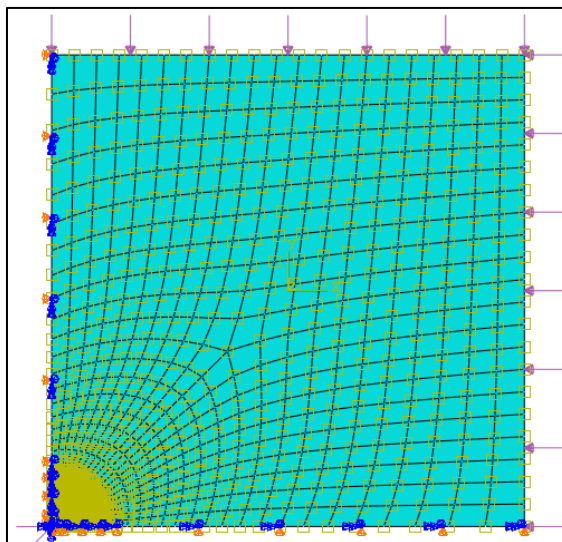


Con el análisis de sensibilidad de malla se aprecia que a partir de 2500 elementos se estabilizan los valores de deformación. De esta manera se selecciona el número adecuado de elementos y se optimiza la capacidad computacional. Los elementos de la formación en el modelo tienen un grado de libertad adicional para tener en cuenta la presión de poro, pertenecen a la familia pore fluid/stress con 4 nodos, es decir **C PE 4 P**. Los elementos para el casing y el cemento usan la técnica de integración reducida, pertenecen a la familia plane stress, con 4 nodos tipo shell convencional para esfuerzo/desplazamiento, es decir **C S 4 R**.

⁸⁹ PALENCIA. Op. Cit. p. 55.

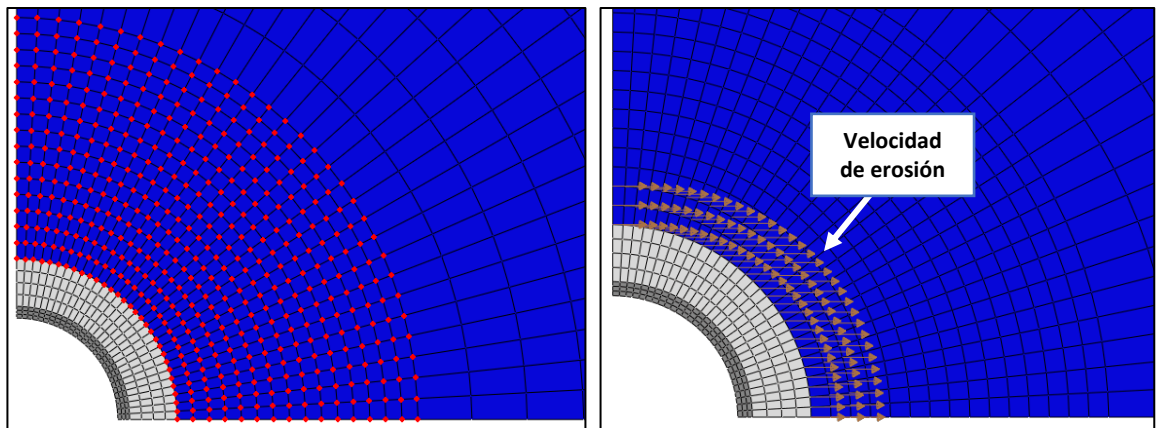
5.1.4 Condiciones de carga. Los esfuerzos in situ son aplicados como esfuerzos efectivos en el límite del modelo, dado que hay $\frac{1}{4}$ de geometría, el esfuerzo máximo horizontal es aplicado en el eje lateral derecho y el esfuerzo horizontal mínimo en el eje superior. Abaqus no permite esfuerzos fuera del plano; por ende, en una geometría bidimensional no es permitido ingresar el esfuerzo vertical como carga, sin embargo, es permitido incluirlo dentro del módulo load en el campo predefinido, donde se especifican las condiciones iniciales de esfuerzos in situ efectivos, buscando representar el equilibrio. En el campo predefinido también se ingresa como condición inicial la relación de vacío. Las condiciones de frontera son aplicadas restringiendo dos grados de libertad, es decir; la parte inferior de la geometría se le restringen los desplazamientos en Y, y la parte lateral derecha se le restringen los desplazamientos en X. Un encastre en el revestimiento, cemento y la formación a remover es configurado desde el paso inicial hasta el geostático, en el paso de perforación esta restricción es suprimida para dar paso a la perturbación en la cara del pozo. La presión de poro es ingresada como condición de frontera desde el paso inicial.

Figura 37. Condiciones de carga. Esfuerzos in situ, presión de poro, condiciones de fronteras.



5.2.5 Dominio de malla adaptativo. La figura 38 muestra el dominio de malla adaptativo configurado en la región circundante al wellbore, extendiéndose a una distancia de 2,5 veces el radio del pozo. Sobre este dominio se especifica una restricción de malla adaptativo a todos los nodos y elementos pertenecientes a la superficie de la cara del pozo, y se introduce una velocidad de erosión la cual permitirá describir el comportamiento de la producción de arena durante la simulación.

Figura 38. Dominio de malla adaptativa. (izquierda) Restricción de malla adaptativa. (Derecha)



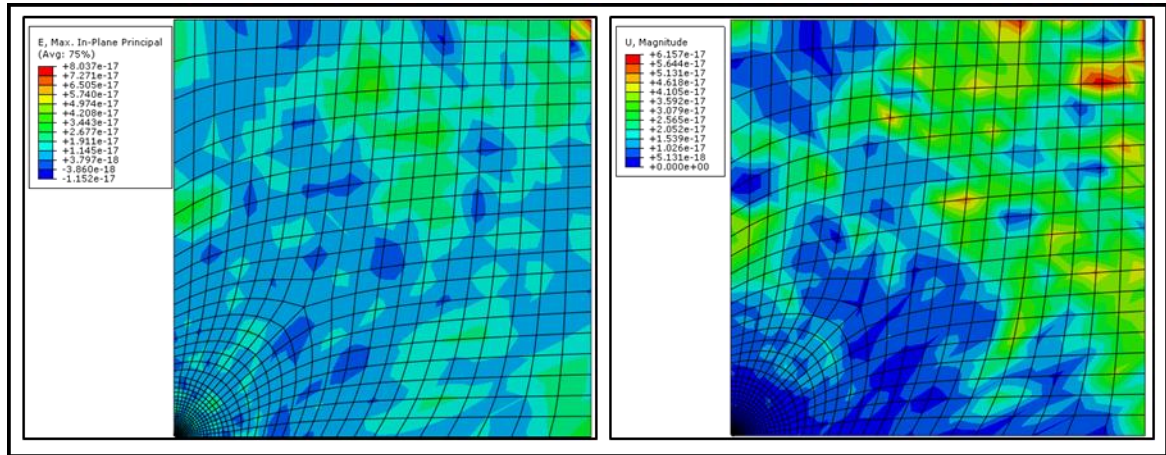
5.3 PASOS EN LA SIMULACIÓN

El proceso de la simulación se desarrolla en un orden que consta de una serie de pasos específicos que permiten el ajuste de las condiciones a simular a través del tiempo. Se plantea una secuencia de 4 pasos que se describen a continuación:

5.3.1 Paso 1 Geoestático. Permite verificar que el campo de esfuerzos inicial está en equilibrio con las cargas aplicadas y las condiciones iniciales del modelo. De esta manera si no se presentan deformaciones ni desplazamientos se valida que las condiciones de carga se encuentran en equilibrio.

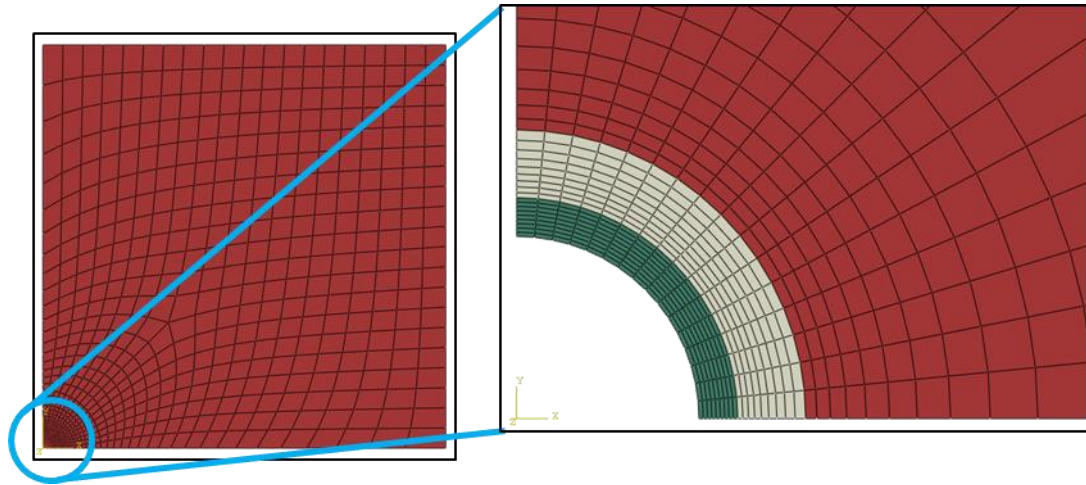
En la Figura 39 se observa que Abaqus alcanzó el equilibrio en las condiciones iniciales del paso geostático (esfuerzos in situ) sin generar desplazamiento y deformación en el modelo.

Figura 39. Deformación del modelo (izquierda). Desplazamiento del modelo (Derecha).



5.3.2 Paso 2 Perforación. Consiste en un paso de suelos en el que se perfora el pozo retirando los elementos que lo representan en el modelo y se asume su finalización inmediatamente, es decir, el pozo queda revestido y cementado. En este paso la presión del lodo es aplicada en la cara del pozo representando la roca que ha sido removida.

Figura 40. Remoción del material que corresponde al pozo e inmediatamente su completamiento.



En la parte derecha de la figura 40 se observa el completamiento, el revestimiento (color verde) y cemento (color gris).

5.3.3 Paso 3 Producción. La perforación viene seguida de un paso de suelos en estado transitorio para considerar la reducción de la presión de poro durante la producción, en este paso se simula la producción cambiando las condiciones de frontera de presión de poro para generar un diferencial de potencial entre los límites del modelo y la cara del pozo. La carga que representaba el peso de lodo es desactivada en este paso y se crea una nueva que representa la presión generada por el nivel de fluido en la cara interna del revestimiento, es decir, la presión que se opone a la presión del yacimiento. Para simular la erosión de arena en el paso de producción, se configuro un dominio de malla adaptativo en la región circundante al modelo, y una restricción de malla adaptativa en la cara del pozo especificando la velocidad a erosionar.

5.3.4 Paso 4 Reducción de presión de poro. Después de un largo periodo de producción se genera una reducción en la presión de poro, este paso mantiene las condiciones de carga del paso producción, a excepción de la presión de poro.

6. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 VALIDACIÓN DEL MODELO BASADO EN EL CÁLCULO DE ESFUERZOS CON EL MODELO ANALÍTICO DE KIRSCH

Kirsch 1898; Jaeger y Cook 1979, desarrollaron las ecuaciones que determinan la distribución de esfuerzos alrededor de un pozo vertical perforado de manera paralela al esfuerzo vertical principal, σ_v , en un medio isotrópico y elástico.

Esfuerzo Radial

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

Esfuerzo Tangencial

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

Donde:

σ_r =Esfuerzo Radial

σ_θ =Esfuerzo Tangencial

σ_H =Esfuerzo Máximo Horizontal

σ_h =Esfuerzo Mínimo Horizontal

r =Radio De Análisis

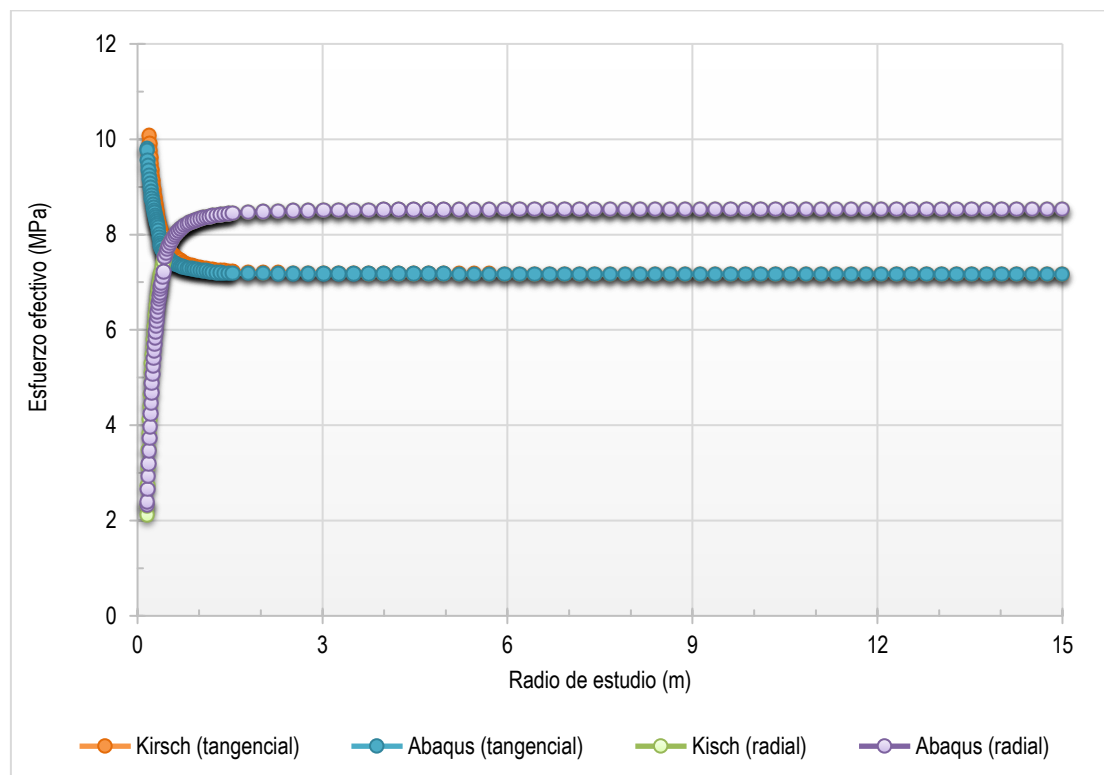
R_w =Radio Del Pozo

P_w =Presión Del Lodo

θ =Es el ángulo entre la dirección del σ_θ y la dirección del σ_H

La calibración del modelo de simulación en el paso 2 (paso de perforación), se realiza utilizando el modelo analítico de Kirsch para calcular los esfuerzos radial y tangencial. Luego se comparan con los esfuerzos S11 y S22 obtenidos en la simulación en coordenadas cilíndricas. En la figura 41 se muestra los resultados obtenidos en de la validación del modelo para un ángulo (θ) igual a cero con respecto la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Se puede notar la correspondencia en los resultados, lo que valida la simulación numérica realizada.

Figura 41. Valores de esfuerzo radial y tangencial para modelo y ecuaciones de Kirsch en dirección “X” ($\theta = 0^\circ$).



Para evaluar los efectos que causa el arenamiento sobre el revestimiento, se simuló en el software una restricción de malla adaptativa de tipo velocidad mediante la cual la erosión de arena será descrita en un área especificada como dominio de malla adaptativa, ver Figura 38. Dependiendo de esta velocidad y el tiempo de simulación,

Abaqus estimará el volumen total de arena producido en metros cúbicos por metro de espesor.

Debido a que no se cuenta con información de campo respecto a la tasa de producción de arena que hizo colapsar el revestimiento a los 5 años. Se utilizó un estudio de laboratorio planteado por E. Papamichos, I. Vardoulakis, J. Tronvoll y A. Skjvrstein en el 2001, como método para validar la tasa calculada por el software y no basar los cálculos en tasas de arenamiento ilógicas que podrían forzar al simulador a dar un resultado de colapso fuera de un escenario real. El estudio propuesto por Papamichos et al 2001, corresponde a un plug sintético con propiedades análogas al campo colombiano en estudio y propone una tasa de producción de arena dependiente de esfuerzos radiales del orden de 0.036 g/min y 0.066 g/min.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de la simulación es evaluar el colapso del revestimiento. El criterio para evaluar colapso de revestimiento más aceptado es basado en la teoría de la energía máxima de distorsión, es decir Huber-Hencky-Mises, Von Mises stress, “esfuerzo triaxial,” o esfuerzo equivalente^{90,91}. Von Mises stress es un valor teórico que permite comparar un estado de esfuerzos triaxial con un criterio de falla uniaxial (esto es, yield strength). En otras palabras, si el von Mises Stress excede el Yield strength, el revestimiento colapso.

Para cumplir con los objetivos planteados de estudiar el colapso de revestimiento en un campo colombiano debido al arenamiento en las formaciones productoras, se escoge un campo que cumpla estas características, es decir, altas tasas de

⁹⁰ CRANDALL, S.H. and DAHL, N.C.: An introduction to the mechanics of solids. McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1959. p. 453

⁹¹ SHEN. Op. cit., p. 70.

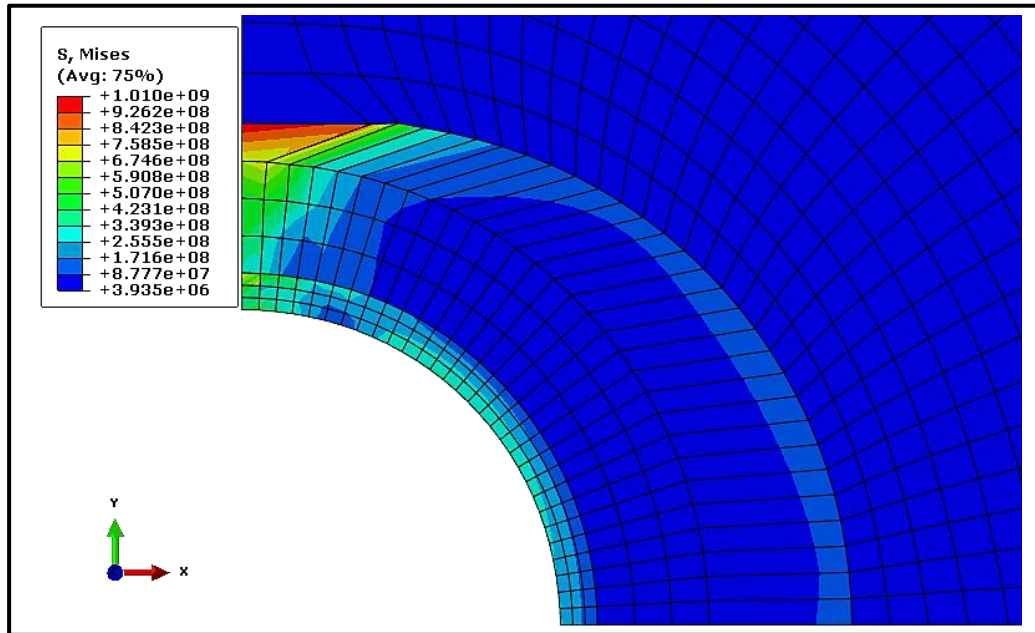
producción de arena y colapsos de revestimientos. El pozo productor para evaluar dentro de este campo es perforado en octubre de 2009 y completado en noviembre del mismo año. En octubre del año 2014 se realiza servicio al pozo y se encuentra que el revestimiento de 8 5/8 OD está colapsado a 1220 m. Por lo anterior mencionado, la simulación se lleva a cabo en un periodo de 5 años, especificando todos los datos y características fundamentales para lograr reproducir este fenómeno de la manera óptima, donde el objetivo es identificar el colapso y el efecto del arenamiento sobre el revestimiento.

La falla será indicada si el Von Mises (parámetro especificado como variable de salida en Abaqus) supera el yield strength del revestimiento, es decir, el von Mises debe superar los 750 Mpa, valor correspondiente al yield strength del revestimiento.

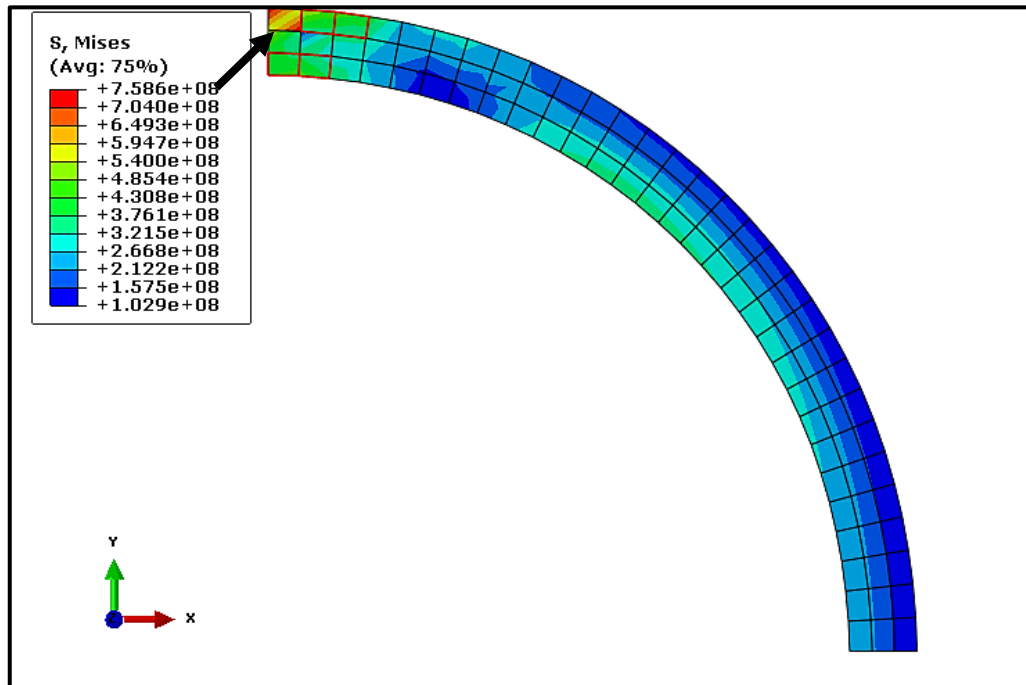
La Figura 42 muestra los resultados de la simulación en pascales e indican el punto exacto en el que el esfuerzo equivalente von Mises supera el yield strength del revestimiento. La Figura 42 A muestra la distribución del von Mises en el modelo enfocando la zona cercana al wellbore. La Figura 42 B representa la distribución del esfuerzo von Mises en el revestimiento, la flecha en dicha figura indica la sección del revestimiento que tiene el valor máximo del von Mises.

Figura 42. Esfuerzo de von Mises (A). Máximo valor de von Mises en el revestimiento (B)

A

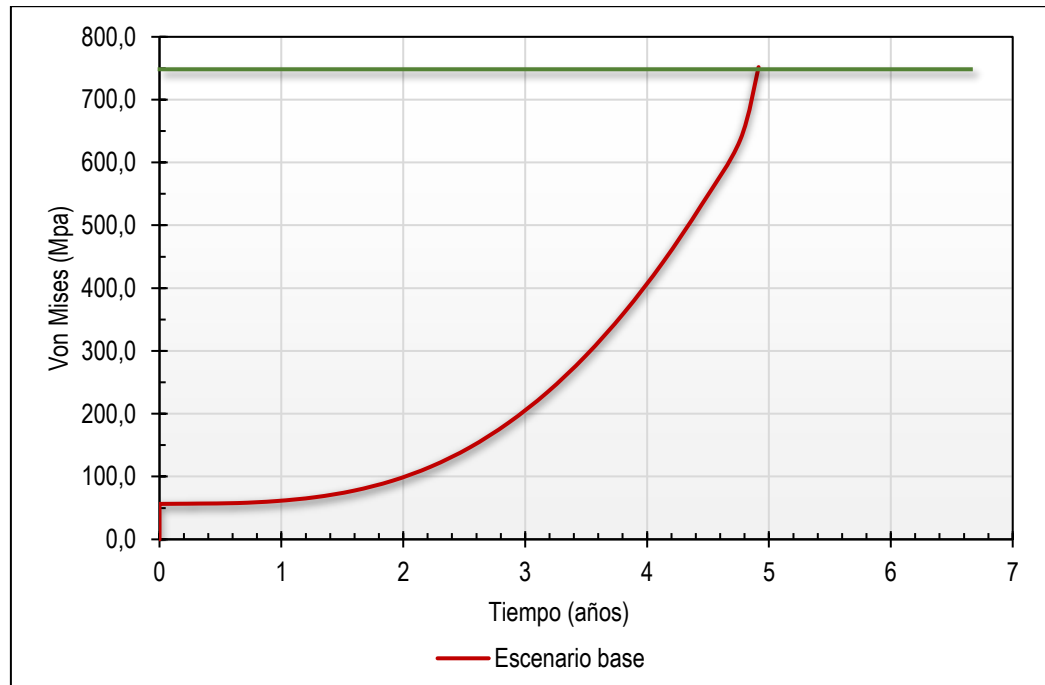


B



La Figura 43 corresponde al incremento del esfuerzo von Mises en la zona perteneciente al revestimiento durante el tiempo total de simulación (5 años). De esta grafica se analiza que el cambio de (0 - 60) Mpa corresponde a la etapa de perforación, donde se pasa de un estado de equilibrio a un estado alterado de esfuerzos. Inmediatamente empieza el paso de producción en el que se presenta el arenamiento, por ende, como se observa en la Figura 43, la tendencia del von Mises va creciendo de manera exponencial debido a la producción de arena que se está dando en la zona circundante al pozo, creando una concentración de esfuerzos sobre el revestimiento.

Figura 43. Escenario base



6.3 ESCENARIOS DE COLAPSO DE REVESTIMIENTO

Anteriormente se realizó la simulación en un periodo 5 años con el objetivo de validar el colapso del revestimiento presentado en el campo colombiano bajo una tasa de producción de arena específica. Para evaluar posibles escenarios de

colapso de revestimiento se plantearon diferentes tasas de producción de arena modificando la velocidad de erosión configurada en la restricción de malla adaptativa. El Cuadro 8 presenta 11 escenarios de colapso de revestimiento bajo diferentes tasas de producción. Es importante señalar que las tasas de producción de arena utilizadas para la simulación se encuentran dentro de los valores reales, esto es corroborado con el volumen total de arena producida para cada escenario durante la simulación, ver Figura 48.

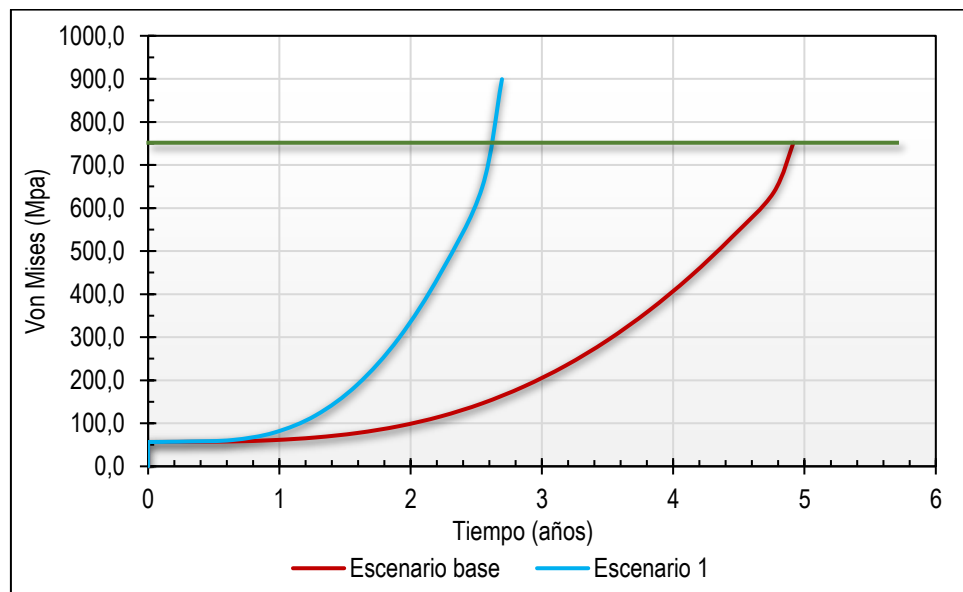
Cuadro 9. Resultados de la variación de la tasa de arenamiento.

Tasa de producción (g/min)	Tiempo de colapso (años)
0.0135	9.91
0.017	7.79
0.024	5.61
0.027	4.95
0.032	4.15
0.036	3.64
0.041	3.23
0.045	2.92
0.050	2.66
0.052	2.62
0.054	2.44

Para establecer el tiempo de colapso de revestimiento es necesario cuantificar el von Mises sobre la pared del revestimiento con diferentes tasas de producción de arena, como se evidencia en la figura 43 del escenario base. Para lograr una mayor comprensión del efecto del arenamiento sobre la falla del revestimiento se evalúa a detalle la tasa menor y mayor de los 11 casos presentados, denominándose escenario 1 y escenario 2.

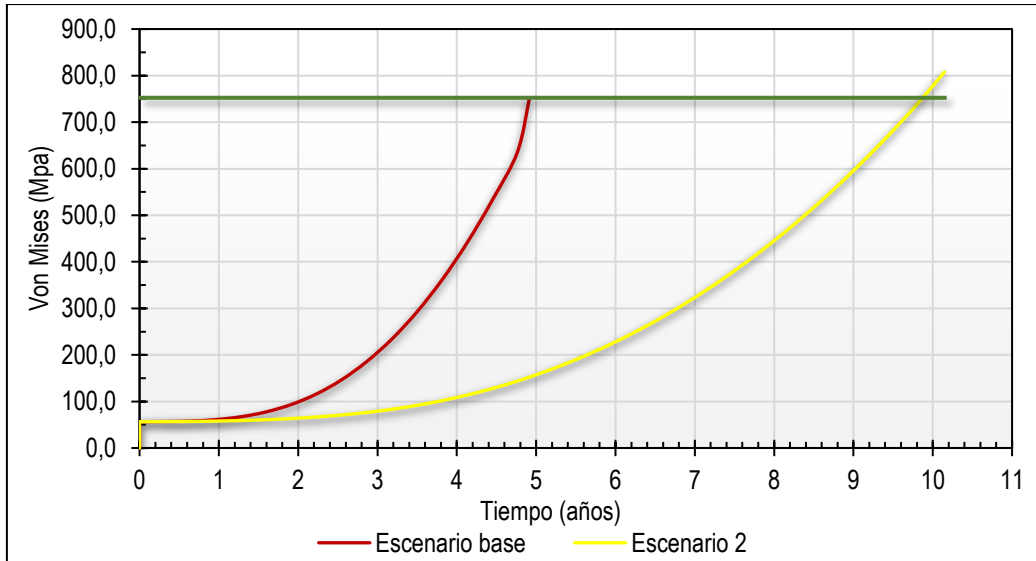
6.3.1 Escenario 1. Se cambió la tasa de producción de arena a 0.054 g/min. La Figura 44 muestra el comportamiento del von Mises en el escenario base y el escenario 1 donde se identifica valores del von Mises similares para periodos tempranos de producción, sin embargo, el comportamiento exponencial del esfuerzo von Mises a una tasa de 0.054 g/min supera el yield strength del revestimiento en un periodo de tiempo menor a tres años.

Figura 44. Escenario 1



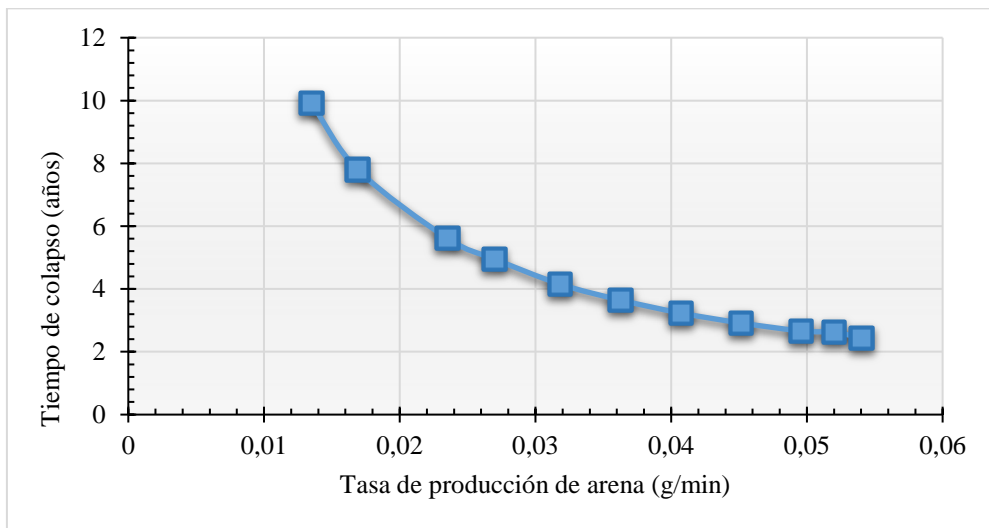
6.3.2 Escenario 2. Se cambió la tasa de producción de arena a 0.0135 g/min, se observa que el esfuerzo de von Mises para los dos escenarios durante el primer año presenta valores similares. Este comportamiento se debe a que en periodos tempranos de producción de arena no se ha formado una cavidad que genere una concentración de esfuerzos sobre el revestimiento, por ende, la tasa de 0.0135 g/min necesita más de 2 años para observar un cambio relevante en la tendencia del von Mises. De esta manera el tiempo de colapso aumenta a un periodo cercano a los 10 años, incrementando el tiempo de servicio del pozo en más de cuatro años con respecto al escenario base.

Figura 45. Escenario 2



La Figura 46 muestra los resultados de los 11 casos presentados en el Cuadro 8. La tendencia de la curva indica que la tasa de producción de arena influye de forma inversa en la falla del revestimiento. Es decir que a mayor tasa el tiempo de colapso disminuye de forma exponencial

Figura 46. comportamiento del tiempo de colapso vs la tasa de producción de arena.



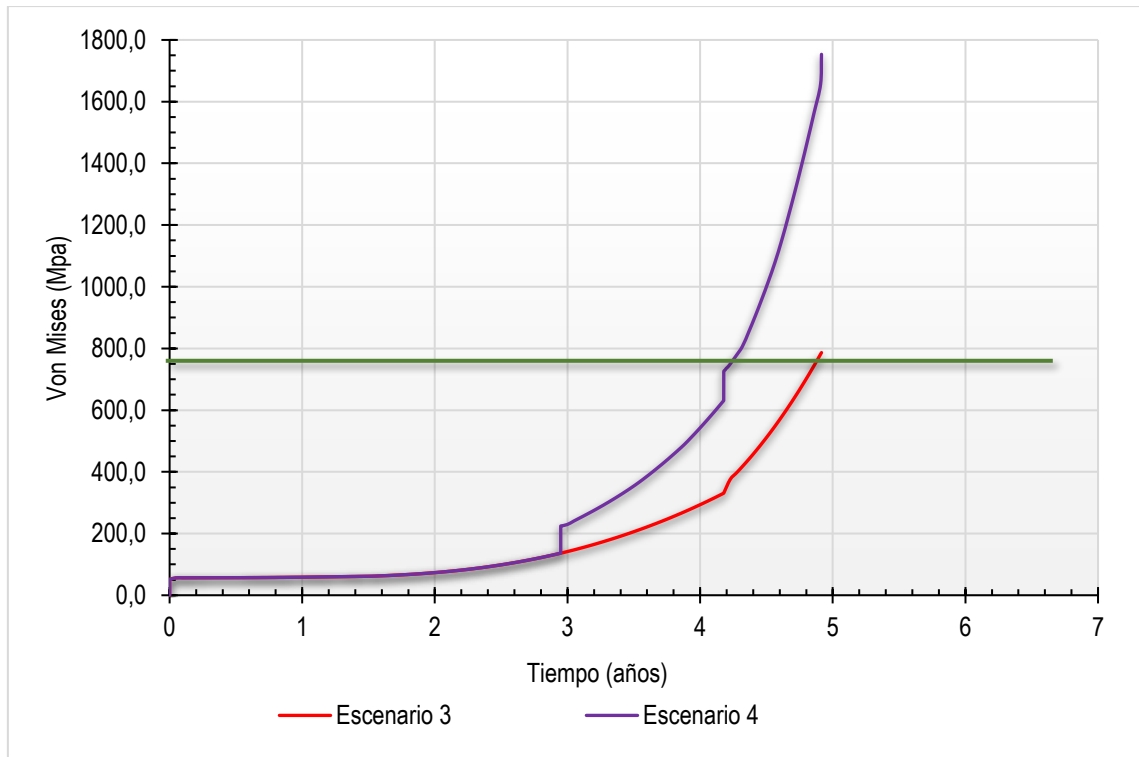
Adicionalmente se realizan dos escenarios con el fin de evaluar tasas variables de producción de arena durante el tiempo de simulación, pérdida de integridad del cemento y reducción de la presión de poro en el modelo.

6.3.4 Escenario 3. Se realizó un análisis del comportamiento del esfuerzo equivalente von Mises mediante el aumento de la tasa producción de arena en el tiempo; de la siguiente manera, la tasa del escenario 2 durante 1.5 años, la tasa del caso base durante 2.7 años y la tasa del escenario 1 durante 0.7 años. De esta manera se obtiene una tasa promedio durante el tiempo de simulación correspondiente a la del escenario base. En la Figura 46 el escenario 3 presenta cambios en la tendencia del esfuerzo equivalente von Mises relacionados directamente con las variaciones en tasas de producción de arena.

6.3.4 Escenario 4. Se utilizaron las mismas condiciones de tasas de producción de arena del escenario 3, además se removió un volumen de cemento en la región cercana al pozo con el fin de evaluar pérdida de integridad del cemento y se redujo la presión de poro en 2.5 MPa durante la última etapa de producción.

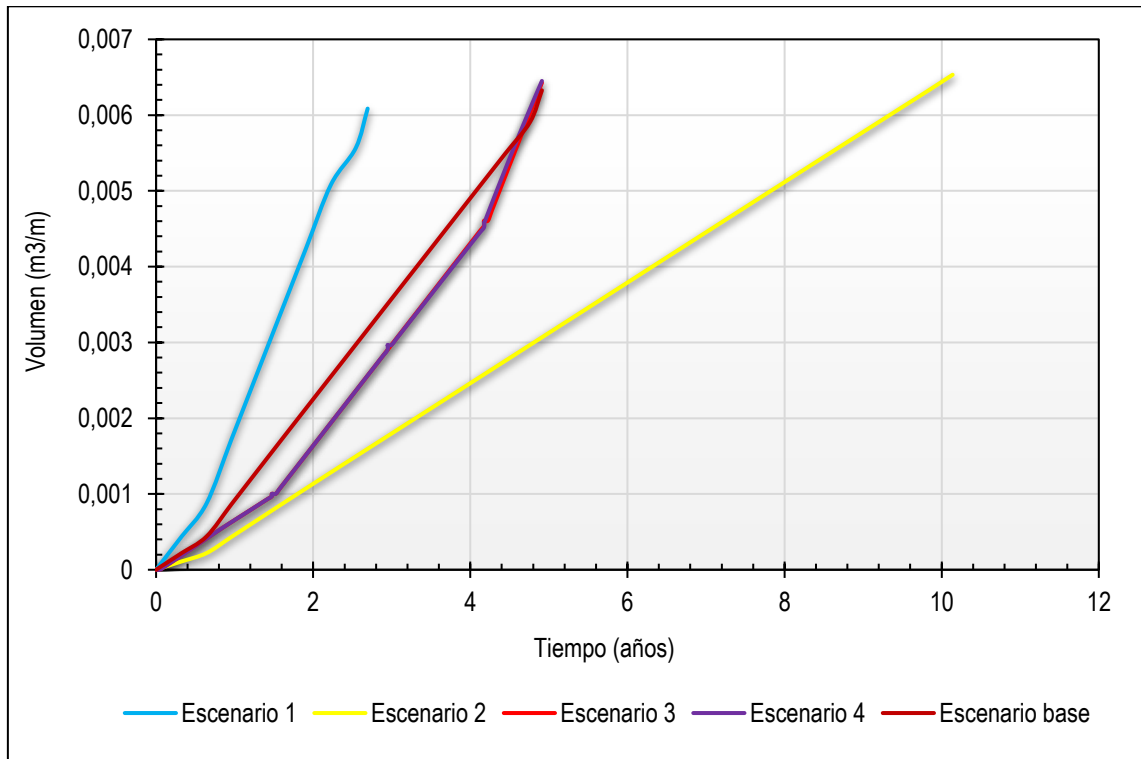
En la Figura 47, el escenario 4 presenta un incremento inmediato en la tendencia a los 2,9 años, lo cual se debe a la pérdida de integridad del cemento que genera cargas no uniformes sobre el revestimiento. La reducción de la presión de poro a los 4,2 años se traduce en un aumento de los esfuerzos efectivos dando como resultado una concentración de esfuerzos sobre la pared del revestimiento.

Figura 47. Comportamiento de escenario 3 y 4



Como se mencionó anteriormente, las tasas de producción de arena utilizadas para la simulación se encuentran dentro de los valores reales, esto es corroborado con el volumen total de arena producida para cada escenario durante la simulación. La Figura 48 presenta el comportamiento del volumen de arena producida en los diferentes escenarios permitiendo identificar que a pesar de las altas diferencias en los tiempos para alcanzar la falla del revestimiento, el volumen total producido se mantiene dentro de valores muy cercanos, es decir, se necesita un volumen promedio de $0.006 \text{ m}^3/\text{m}$ para que el esfuerzo de von Mises supere el yield strength del revestimiento .

Figura 48. Arena producida durante el tiempo de simulación en los diferentes escenarios.



7. CONCLUSIONES

- Mediante el modelo numérico reproducido en Abaqus software, se evidencia que el valor de von Mises logra superar el yield strength del revestimiento a los 5 años de simulación con una tasa de producción de arena de 0.027 g/min.
- La producción de arena afecta la integridad del revestimiento. Como se demuestra en el modelo numérico reproducido, este fenómeno se vuelve crítico cuando la producción de arena se presenta en la cara del pozo, es decir, cuando se están formando cavidades. El incremento continuo de estas hará que el colapso del revestimiento sea inminente.
- se identifica que la tasa de producción de arena influye de forma inversa en la falla del revestimiento. Es decir, que a mayor tasa el tiempo de colapso disminuye de forma exponencial.
- La simulación realizada alcanzó el colapso de revestimiento en los diferentes escenarios oscilando en tiempos de 2 a 10 años aproximadamente, sin embargo, el volumen de arena necesario para el colapso está entre valores muy cercanos, esto es 0.0055 - 0.0065 m³/m
- La reducción en la presión de poro se lleva a cabo buscando simular la depleción del yacimiento. Al realizar una reducción de 2,5 Mpa, se observa un incremento del Von Mises sobre la cara externa del revestimiento mayor a 50 MPa.
- El procedimiento numérico realizado en el presente proyecto constituye una herramienta útil a la hora de predecir bajo ciertas variables el momento en que el revestimiento podría colapsar.
- La calibración realizada al modelo en el paso de perforación, comparando los esfuerzos efectivos radial y tangencial obtenidos analíticamente con las ecuaciones desarrolladas por Kirsch, con los esfuerzos S11, S22 en coordenadas cilíndricas, obtenidos de la simulación realizada, evidencia la similitud entre los dos modelos y ofrece un margen de credibilidad al modelo numérico realizado.

8. RECOMENDACIONES

- El Software Abaqus presenta la opción de realizar submodelamiento. Se recomienda usar esta opción si el modelo global es muy grande en relación con el área objetivo de análisis.
- Para simulaciones donde se requiera cuantificar el arenamiento basado en la deformación plástica equivalente (PEEQ), mediante el software Abaqus se recomienda el uso de la Subrutina UMESHMOTION.
- Se recomienda realizar un modelo tridimensional para tener en cuenta los efectos gravitacionales y el esfuerzo axial como también para un mayor análisis al intervalo cañoneado.
- Se recomienda realizar simulaciones con más datos de campo con el fin de obtener un mayor ajuste en el modelo.
- Se recomienda realizar un análisis donde se identifiquen los efectos del diseño del cañoneo y el área de drenaje sobre la tasa de producción de arena.
- Se recomienda antes de la perforación de un pozo, realizar una simulación geomecánica que permita establecer la presión de fondo fluyente crítica para prevenir o reducir el arenamiento, dando como resultado una menor probabilidad de colapso de revestimiento.

BIBLIOGRAFÍA

Abaqus documentation 6.16, Abaqus/CAE. Example Problem Guide, Erosion of material (sand production) in an oil wellbore, Dassault Systemes Simulia. 2016

_____. User's Guide, The Step Module, Dassault Systemes Simulia. 2016

_____. Dassault Systemes Simulia. 2016.

_____. User's Guide, The Job Module, Dassault Systemes Simulia. 2016

_____. User's Guide, The Mesh Module, Dassault Systemes Simulia. 2016

_____. User's Guide, The Part Module, Dassault Systemes Simulia. 2016.

ABDIDEH, M.; HEDAYATI KHAH, S. Analytical and Numerical Study of Casing Collapse in Iranian Oil Field. *Geotech Geol Eng* 36, 1723–1734 (2018). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0428-0>

AHAD, Nur; AQILAH, Morteza Jami and TYSON, S. "A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020: 1-14.

Analysis of the Casing Collapse in Terms of Geomechanical Parameters and Solid Mechanics. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2019. 53(2), 211-225. doi: 10.22059/jchpe.2019.274240.1267

API. Bulletin 5C3 on formulas and calculations for casing, tubing, drill pipe and line pipe properties, 5th edn. American Petroleum Institute. 1989

ARAUJO GUERRERO, Edison Felipe. Modelo de predicción y cuantificación de la producción de arena en yacimientos de crudo pesado. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería de petróleos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Química y Petróleos, 2015.

Archivo PDF. - David Hernández Morales. Diseño de tuberías de revestimiento. (Servicios Técnicos Petroleros). Tenaris Tamsa. 2009.

ASADI, A.; PARHIZGAR, N. y MOMENI, E. Prediction of Collapse in a Casing and Tubing: with Case Study of Iran. 2011.

AZEVEDO, N. M., & LEMOS, J. V. Hybrid discrete element/finite element method for fracture analysis. 2006. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 195(33- 36), 4579–4593. <http://doi.org/10.1016/j.cma.2005.10.005>

BAÑO S. Tuberías de revestimiento, optimización de su diseño y perforación, Tesis previa a la obtención del título de ingeniero, Quito-Ecuador. Universidad Central del Ecuador, 2008.

BRAVO VALLEJO, Christian Alejandro; GARCÍA DE LA ROSA, Itzel; LEAL ORTA, Alejandro; MENDOZA VARGAS, Jorge Alejandro; SANTIAGO ÁVILA y Edgar Alexis; URIBE HERNÁNDEZ, José Salvador. Capacidad de resistencia de las tuberías petroleras. [En línea]. México D.F: Instituto Politécnico Nacional. 2013, Disponible en: <http://oilproduction.net/files/OilProduction%20-%20capacidad-de-resistencia-de-tuberias.pdf>

Dassault Systems: Abaqus Analysis User's Manual, Vol. 3: Materials, Version 6.8, Vélizy-Villacoublay, France: 19.3.1-17–19.3.2-14, 2008.

ELMEKATI, A., & SHAMY, U. El. A practical co-simulation approach for multiscale analysis of geotechnical systems. 2010. *Computers and Geotechnics*, 37(4), 494–503. <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.02.002>

ESHJET KI, Yang D.; and SHENG, Y. Computational study of reservoir sand production mechanisms. *Geotechnical Research* 6 3): 2019. 177–204, Disponible en: <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00026>

FLORES, M.Y.U., ABAQUS Programa de Elementos Finitos Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes: Mérida, Venezuela.

GHODUSI BORUJENI, F.; JALALIFAR, H.; JAFARI, S.; RAFATI, A. Investigating the effect of construction defects on the Casing Collapse Strength. *Modares Mechanical Engineering*. 2019; 19 (12): 3031-3038 Disponible en: <http://journals.modares.ac.ir/article-15-24124-fa.html>

GHOLAMI, R. et al. Geomechanical and Numerical Studies of Casing Damages in a Reservoir with Solid Production. *Rock Mech Rock Eng* 49, 2016. 1441–1460. Disponible en: <https://doi.org/10.11007/s00603-015-0828-5>

GHOLAMI, Raof & RASOULI, Vamegh. Numerical simulations of casing collapse: A case study in the South of Iran. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2012. 80. 151-162. Disponible en: 10.2495/PMR120141.

GUTIÉRREZ ESCOBAR, Sergio. Identificación de problemas de colapso en revestimientos de pozos, ocasionados por efectos geomecánicos. Caso de estudio: pozo de un campo colombiano. Trabajo de Investigación Ingeniero Mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013.

HALL, C. D., Jr. and Harrisberger, W. H.: "Stability of Sand Arches: A Key to Sand Control, ",1970. JPT. P, 820-829

HEDAYATIKHAH, Soheila & ABDIDEH, Mohammad. 3D Geomechanical Modeling of Casing Collapse in Plastic Formations (Cap Rock of Hydrocarbon Reservoir). Natural Resources Research. 2018. Disponible en: 10.1007/s11053-018-9386-3.

HILBERT, LB.; SARAT, VK.; BIRBIGLIA, DKJ.; SHUMILAK, EE.; HINDRIKS KCOH, Schutjens PM, Klever F. Modeling horizontal completion deformations in a deepwater unconsolidated sand reservoir. SPE Drill Complet J 26(1). 2011. 68–83.

HUANG, X.; et al. Collapse strength analysis of casing design using finite element method. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77, 2000. 359–367.

IKPORO B, SYLVESTER O. Effect of sand invasion on oil well production: a case study of garon field in the Niger Delta, 2015. Int J Eng Sci (IJES) 4(5):64–72

JAMEDARI R. Collapse capacity for a pipeline with thick coating. [Master's thesis]. Ås: Norwegian University of Life Sciences; 2015.

JEJEN SALINAS, Paola Katherine; LUCICH ROJAS, Gian Carlo. Diseño de una metodología para el seguimiento de la estabilidad mecánica durante la perforación de un pozo en el campo castilla. Trabajo de grado Ingeniero de petróleos. Bogotá D.C. Fundación Universidad De América, 2018.

LÓPEZ TOLEDO, Jaime Enrique; CARRILLO CATAÑO, María José. Análisis de los colapsos en revestimientos de pozos productores de un campo colombiano debidos a la inyección de agua. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2014.

OPEYEMI MAYOKUN, Aborisade. Practical approach to effective sand prediction, control and management. in Partial Fulfillment of the Requirements for the Award of Master of Science (M. Sc) in Petroleum Engineering. Abuja, Nigeria. African University of science and Technology. Department of Petroleum Engineering, 2011.

PALENCIA M., Miguel F. Evaluación de los modos de falla breakout y exfoliación en la pared del pozo mediante simulación numérica y pruebas de laboratorio. Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2018. 136p.

PAPAMICHOS, E., and STAVROPOULOU, M. An Erosion-Mechanical Model for Sand Production Rate Prediction,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, no. 35. 1998. p. 4–5, Paper No 090.

PORTAL DEL PETRÓLEO. [sitio web]. Mecánica De Las Rocas Aplicado Al Fracturamiento Hidráulico (Parte I). [Consulta: 15 de mayo 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Uu2TUjW>

RIVERA ORTEGA, Gerson Orlando. Predicción de la producción de arena en las formaciones Poco consolidadas de un campo del valle medio del Magdalena. Trabajo de Investigación Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011.

ROBERTS A. Geotechnology: an introductory text for students and engineers, 2014. Elsevier, Amsterdam.

SCHLUMBERGER. Programa de entrenamiento acelerado para supervisores. Dimensiones y resistencias para tubulares API empleados en el campo petrolero. Disponible en: <https://es.slideshare.net/MagnusMG/09-dimensiones-y-resistencias-de-los-tubulares>

SHEN, Xinpu. Numerical analysis of casing failure under non-uniform loading in subsalt wells. En: Theory and Numerical Applications Editors. Broken Sound Parkway NW. CRC Press Taylor & Francis Group. 2011.

SHEN, Xinpu. Numerical predictions on critical pressure drawdown and sand production for wells in weak formations. En: Theory and Numerical Applications Editors. Broken Sound Parkway NW. CRC Press Taylor & Francis Group. 2011. p. 155-174.

SHEN, Xinpu; BAI, Mao & STANDIFIRD, William. Drilling and Completion in Petroleum Engineering. Theory and Numerical Applications Editors. Broken Sound Parkway NW. CRC Press Taylor & Francis Group. 2011. ISBN. 13: 978-1-4398-7055-6

SHERKATI S, LETOUZEY J. Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. Mar Petrol Geol 21(4): 2004. 535–554.

SYLVESTER, Okotie. “Effect of Sand invasion on Oil Well Production: A Case study of Garon Field in the Niger Delta.” 2015.

TERZAGHI, K. and PECK, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, 1948. John Wiley and Sons Inc., New York.

TOELSIE S.; PREDIEPKOEMAR G. Sand control in shallow unconsolidated sandstone oil reservoirs at staatsolie NV suriname, 2013. En: SPE European formation damage conference & exhibition. Society of petroleum engineers.

VARGAS REYES, Julián Enrique. Análisis de colapsos de casing para pozos productores en arenas del cretáceo. Trabajo de Investigación Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2005.

YEH, M.K. y KYRIAKIDES, S., On the Collapse of Inelastic Thick-Walled Tubes Under External Pressure. ASME Journal of Energy Resources Technology, V. 108. 1986.

YI, Xianjie. Numerical and analytical modeling of sanding onset prediction. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2003.

ZEGHAL, M., & EI SHAMY, U. A continuum-discrete hydromechanical analysis of granular deposit liquefaction. 2004. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28(14), 1361–1383. <http://doi.org/10.1002/nag.390>

ZHAO, W.; GE, J.; PATHEGAMA GAMAGE, R.; LI, Y.; SONG, Z., & WANG, T. Study of Deformation Law of Casing Local Lateral Collapse Based on the Principle of Virtual Work. *Energies*, 2019. 3717. MDPI AG. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/en12193717>