



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMÁN

SIMULACIÓN NUMÉRICA EN FORMACIONES PLÁSTICAS.

A FIN DE OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO PETROLERO

PRESENTA:
MÉNDEZ BERMAN ARMANDO

ASESOR INTERNO:
ING. ALBERTO ENRIQUE MORFÍN FAURE

DIRECTOR DE TESIS:
M. EN I. JOAQUÍN MENDIOLA SÁNCHEZ



CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2020

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Presente

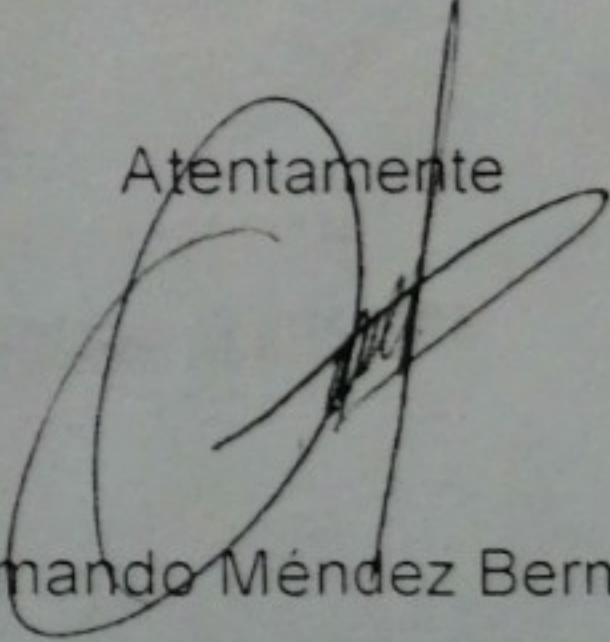
Bajo protesta de decir verdad el que suscribe C. Armando Méndez Berman manifiesto ser autor de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "Simulación numérica de formaciones plásticas", en adelante "LA TESIS" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al Instituto Politécnico Nacional, en adelante EL IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales (Publicación en Línea) "LA TESIS" por un periodo de un año contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovara automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "EL IPN" de su terminación.

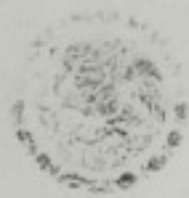
En virtud de lo anterior, "EL IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "LA TESIS".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "LA TESIS", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "LA TESIS", por lo que deslindo de toda responsabilidad a EL IPN en caso de que el contenido de la "LA TESIS" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México a 3 de abril de 2020

Atentamente


Armando Méndez Berman



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán

EP Y T/126/2020.

Asunto

Registro de Tema

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

CDMX, 10 de marzo de 2020.

C. ARMANDO MENDEZ BERMAN

PASANTE DEL PROGRAMA ACADÉMICO DE
INGENIERÍA PETROLERA

PRESENTE

A continuación, comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha, para elaborarla.

"SIMULACIÓN NUMÉRICA EN FORMACIONES PLÁSTICAS".

- CONTENIDO
RESUMEN
ABSTRACT
OBJETIVO GENERAL
OBJETIVO ESPECÍFICO
INTRODUCCIÓN
I. REVISIÓN DE LA LITERATURA.
II. MODELOS DE FLUENCIA PROPUESTOS.
III. ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA.
IV. APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA
CONCLUSIONES y RESULTADOS
BIBLIOGRAFÍA

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico.

FRCH/betv*



UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



2020
LEONA VICARIO



Folio
EP Y T/128/2020.

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

APROBACIÓN

CDMX, 11 de Marzo de 2020.

ING. FERNANDO RODRÍGUEZ CHÁVEZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, hacemos constar que el Tema, por la opción de **Tesis Individual**, "**SIMULACIÓN NUMÉRICA EN FORMACIONES PLÁSTICAS**" presentado por el pasante del Programa Académico de **Ingeniería Petrolera**, **C. ARMANDO MÉNDEZ BERMAN**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto, esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES

ING. ALBERTO ENRIQUE MORFIN FAURE

ING. MANUEL TORRES HERNÁNDEZ

ING. CARLOS ANTONIO CASTILLO ARREAGA

M. en C. DAVID VELÁZQUEZ CRUZ

ING. OMAR ALVARADO BAILEY



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

EP Y T/110/2020.

Asunto
ASESORIA DE TESIS

CDMX, 04 de Marzo de 2020

ING. ALBERTO ENRIQUE MORFIN FAURE
PRESENTE

En atención a la Solicitud del **C. ARMANDO MÉNDEZ BERMAN**, pasante del Programa Académico de **Ingeniería Petrolera** con base en el Reglamento de Titulación Profesional del I.P.N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso I, se le informa que ha sido seleccionado para asesorar la tesis del pasante mencionado, Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por el interesado.

Seguro de contar con su participación, le saludo cordialmente.

ATENTAMENTE
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico



UNIDAD TICOMAN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

c.c.p. M. en C. David Velázquez Cruz. - Jefe del Departamento de Formación Profesional Especifica.
Interesado

FRCH/betv*





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán

EP Y T/111/2020.

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Asunto

Asesoría de Tesis

CDMX, 04 de Marzo de 2020.

M. en I. JOAQUIN MENDIOLA SÁNCHEZ

LÍDER TECNOLÓGICO DE LA GERENCIA
DE SOLUCIONES Y HERRAMIENTAS EN
SISTEMAS PARA POZOS DEL INSTITUTO
MEXICANO DEL PETRÓLEO

PRESENTE

En atención a la Solicitud del C. **ARMANDO MÉNDEZ BERMAN**, pasantes del Programa Académico de **Ingeniería Petrolera** y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarlo a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional que, por la opción de **Tesis Individual**, deberán desarrollar el interesado, por lo que solicito a usted, se sirva proponer a esta Subdirección el Tema y Contenido.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico

FRCH/betv*



UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



2020
LEONA VICARIO

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme vida y permitirme ser ingeniero.

A mi alma mater el **Instituto Politécnico Nacional** y maestros que tuve a lo largo de mi carrera, por forjarme como profesionista.

A mi madre **Zoyla Virginia Berman (Q.E.P.D)**, gracias por todo el amor y el cariño que me pudiste brindar, donde quiera que estés TE AMO.

A mi padre **Armando**, gracias por todo tu esfuerzo, sacrificio, amor y cariño que me brindas diario y todo el que me brindaste durante mi trayectoria, a su esposa **Karla**, muchas gracias por el apoyo y consejos que me diste, gracias a los dos por hacerme un hombre de bien.

A mi hermana **Samantha**, gracias por ser mi confidente, mejor amiga y hermana que puede existir, a mi cuñado **Josimar** por el apoyo que me has brindado cada vez que lo he necesitado, muchísimas gracias.

A mi **familia** por su apoyo que me han brindado, el cariño y animo que me dieron a lo largo de este trayecto.

Al **M. en I. Joaquín Mendiola** por su apoyo, guía en el desarrollo de este trabajo y entrañable amistad.

Al **Ing. Enrique Morfín** por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta tesis y enseñanza a lo largo de mi estudios y realización de tesis.

A los ingenieros del **IMP Poza Rica y IMP Ciudad de México**, por apoyo, enseñanza y amistad brindada.

A mis amigos que forme en la trayectoria de la carrera profesional y mis amigos de Poza Rica; muchísimas gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas, gracias por estar cuando los necesite.

Y a los que olvide mencionar muchísimas gracias.

Armando.

INDICE

INDICE DE TABLAS.....	v
INDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS.....	v
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
OBJETIVO GENERAL.....	x
OBJETIVOS ESPECIFICOS	x
INTRODUCCIÓN.....	xi
CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA.	1
1.1 Modelos reológicos.	4
1.2 Modelos matemáticos.	5
1.3 Método numérico por elemento finito.	7
1.4 Método numérico por elemento discreto. ^[10]	10
1.4.1 Modelo de Burger en elemento discreto.....	10
1.4.2 Modelo termo-mecánico de Fluencia en Elemento Discreto.	11
1.5 Modelos físicos.....	11
1.6 Análisis experimental.	13
CAPÍTULO 2 MODELOS DE FLUENCIA PROPUESTOS.	21
2.1 Concepto de fluencia. ^[20]	21
2.2 Problemas asociados con la deformación por fluencia.....	22
2.2.1 Inestabilidad de agujero ^[28]	22
2.2.2 Efectos en la permeabilidad ^[22]	22
2.2.3 Compactación de los yacimientos ^[23]	23
2.3 Modelado matemático de la fluencia ^[24]	23
2.4 Ley de ritmo de fluencia y fórmulas de endurecimiento.....	24
2.5 Ley de fluencia basada en microestructuras para fluencia en estado estacionario.....	25
2.6 Métodos de correlación y extrapolación.	26
2.6.1 Método de Larson-Miller	27
2.7 Mecanismo de fluencia.....	27
2.7.1 Fluencia dominada por la difusión en estado sólido.	28
2.7.1.1 Nabarro-Herring o Fluencia por Difusión Volumétrica.	29
2.7.1.2 Fluencia por difusión en la frontera del grano.....	29
2.7.1.3 Harper-Don o Fluencia por dislocación aumentada.....	30

2.8 Fluencia dominada por deslizamiento.	31
2.8.1 Fluencia por dislocación o deslizamiento asistido por difusión.	31
2.8.2 Fluencia generada por dislocación por deslizamiento.	32
2.8.3 Fluencia por deslizamiento en la frontera del grano.	32
2.9 Ecuaciones de fluencia para carga multiaxial.	32
2.10 Formulación para los problemas de fluencia.	36
2.11 Modelos propuestos. ^[23,25,26]	39
2.11.1 Modelo de Maxwell.....	39
2.11.2 Modelo de Kelvin-Voigt.	42
2.11.3 Modelo de Burger.....	44
2.11.4 Modelo de Zener ^[27]	46
CAPÍTULO 3. ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA ^[15,39]	50
3.1 Desarrollo del modelo global. ^[2,15,29,31,32]	55
3.1.1 Definición de la geometría del modelo global.	55
3.1.2 Determinación del modelo constitutivo que rigen los materiales.....	55
3.1.3 Condiciones de frontera ^[33,37]	58
3.1.3.1 Tipos de condiciones de frontera.....	58
3.1.3.1.1 Frontera “ <i>Type</i> ”.	58
3.1.3.1.2 Formato directo.	58
3.1.4 Pasos de carga.....	59
3.1.4.1 Incremento de los pasos de carga.	59
3.1.4.2 Paso geoestático.....	60
3.1.4.3 Paso estático.....	60
3.1.4.4 Paso de suelos.....	60
3.1.4.5 Paso visco.	60
3.1.5 Mallado y tipos de elemento. ^[33-37]	61
3.1.5.1 Acerca de los elementos.....	61
3.1.5.2 Familia.	61
3.1.5.3 Grados de libertad.....	62
3.1.5.4 Número de nodos y orden de interpolación.	63
3.1.5.5 Formulación.....	64
3.1.5.6 Integración.....	64
3.1.5.7 Mallado.	64
3.1.5.7.1 Técnicas adaptativas de remallado.....	65

3.1.6 Cargas aplicadas ^[33,37]	67
3.1.6.1 Tipos de cargas.....	67
3.1.6.1.1 Basado en elementos.....	67
3.1.6.1.2 Basada en superficies.....	67
3.1.6.2.3 Cargas predefinidas.....	67
3.1.7 Validación del modelo global.....	68
3.1.7.1 Validación del modelo mediante un modelo 1D ^[38]	68
3.1.7.2 Validación mediante soluciones analíticas ^[7]	68
3.2 Construcción del submodelo.....	70
3.2.1 Selección de técnica de submodelado.....	70
3.2.1.1 Submodelado por superficie.....	70
3.2.1.2 Submodelado por nodos.....	71
3.3 Escenarios ^[15,28]	71
3.3.1 Perforando antes de la sal.....	71
3.3.2 Atravesando la sección salina.....	72
3.3.3 Saliendo de la sección salina.....	73
3.3.4 Perforando alrededor de la sal.....	75
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN.....	77
4.1 Construcción del modelo global.....	77
4.1.1 Características de los materiales.....	78
4.1.2 Condiciones de frontera y aplicación de cargas.....	79
4.1.4 Resultado numérico del modelo global.....	80
4.2 Validación del modelo global mediante modelo 1D.....	84
4.3 Desarrollo y descripción del submodelo intermedio.....	86
4.3.1 Resultado numérico del submodelo intermedio.....	87
4.4 Desarrollo de los submodelos terciarios.....	91
4.4.1 Resultado del submodelo terciario.....	92
4.5 Comparativo de cierre de pozo en formación elástica contra formación plástica.....	99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1 Modelos descriptivos de la sal.....	15
Tabla 2.1 Modelos propuestos para la deformación por fluencia.....	48
Tabla 3.1 Modelos constitutivos.....	56
Tabla 3.2 Tipos de elementos	61
Tabla 3.3 Ejemplo de tipos de elementos.....	63
Tabla 3.4 Tabla comparativa de las tres técnicas adaptativas de remallado.....	66
Tabla 3.5 Soluciones analíticas.....	69
Tabla 4.1 Propiedades elásticas de los materiales.....	78
Tabla 4.2 Valores de permeabilidad de la roca.....	78
Tabla 4.3 Valores del exponente para la ley de potencia de fluencia.....	79
Tabla 4.4 Cargas aplicadas al modelo.....	80
Tabla 4.5 Cargas iniciales aplicadas al modelo.....	80
Tabla 4.6 Densidades usadas en el submodelo.....	91

INDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS.

Fig. 2. 1 Curva representativa de la fluencia en sus tres etapas.....	21
Fig. 2. 2 Modelo reológico de Maxwell.	39
Fig. 2. 3 Representación gráfica del modelo de Maxwell	41
Fig. 2. 4 Modelo reológico de Kelvin-Voigt.....	42
Fig. 2. 5 Representación gráfica del modelo de Kelvin-Voigt.....	44
Fig. 2. 6 Modelo reológico de Burger.....	45
Fig. 2. 7 Representación gráfica del modelo de Burger.....	45
Fig. 2. 8 Modelo reológico de Zener.....	47
Fig. 2. 9 Representación gráfica del modelo de Zener.....	47
Fig. 3. 1 Estrategia general de simulación numérica.....	54
Fig. 3. 2 Etapas en el análisis de fluencia.....	73
Fig. 3. 3 intrusión del cuerpo salino (azul) en el cuerpo elástico, del lado derecho se nota la orientación de los esfuerzos perpendiculares a la superficie donde se va presentando la intrusión de la sal.....	75
Fig. 4. 1 Modelo global dividido en tres secciones.....	77
Fig. 4. 2 Esfuerzos distribuidos en el eje X.....	81

Fig. 4. 3 Esfuerzos distribuidos en el eje Y. Fig. 4. 4 Esfuerzos distribuidos en el eje Z.	81
Fig. 4. 5 Desplazamiento en el eje x.	82
Fig. 4. 6 Desplazamiento en el eje Y.	82
Fig. 4. 7 Desplazamiento en el eje Z.	83
Fig. 4. 8 Presión de poro mostrado en el modelo global.	83
Fig. 4. 9 Esfuerzo en el eje X.	87
Fig. 4. 10 Esfuerzo en el eje Y.	87
Fig. 4. 11 Esfuerzo en el eje Z.	87
Fig. 4. 12 Esfuerzo de corte en el eje XY.	88
Fig. 4. 13 Esfuerzo de corte en el eje XZ.	88
Fig. 4. 14 Esfuerzo de corte en el eje YZ.	89
Fig. 4. 15 Desplazamiento en el eje X.	89
Fig. 4. 16 Desplazamiento en el eje Y.	90
Fig. 4. 17 Desplazamiento en el eje Z.	90
Fig. 4. 18 Representación del submodelo terciario.	92
Fig. 4. 19 Esfuerzo resultante en el eje X. Fig. 4. 20 Esfuerzo resultante en el eje Y.	93
Fig. 4. 21 Esfuerzo resultante en el eje XZ.	94
Fig. 4. 22 Esfuerzo resultante en el eje YZ.	95
Fig. 4. 23 Desplazamiento resultante.	95
Fig. 4. 24 Desplazamiento en el eje X.	96
Fig. 4. 25 Desplazamiento en el eje Y.	96
Fig. 4. 26 Comparativo de gráficos de cierre de pozo a diferentes densidades.	97
Fig. 4. 27 Comparativo de esfuerzos resultantes en el eje X en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).	100
Fig. 4. 28 Comparativo de esfuerzos resultantes en el eje Y en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).	100
Fig. 4. 29 Comparativo de esfuerzos resultantes en el eje Z en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).	101
Fig. 4. 30 Comparativo de esfuerzos resultantes de corte en el eje XY en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).	101
Fig. 4. 31 Comparativo de esfuerzos resultantes de corte en el eje XZ en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).	102
Fig. 4. 32 Comparativo de esfuerzos resultantes de corte en el eje YZ en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).	102
Fig. 4. 33 Comparativo de desplazamientos en el eje X en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).	103
Fig. 4. 34 Comparativo de desplazamientos en el eje Y en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).	103

Gráfico 4. 1 Comparativo del esfuerzo vertical obtenido por el simulador de elemento finito (color negro) contra el esfuerzo vertical calculado (color rojo).	84
Gráfico 4. 2 Comparativo de esfuerzos mínimos calculado (color azul) y el obtenido por el simulador (naranja).	85
Gráfico 4. 3 Comparativo de esfuerzos máximos calculado (azul) contra el obtenido por el simulador (café).....	85
Gráfico 4. 4 Cierre de agujero a diferentes densidades.	99
Gráfico 4. 5 Comparativo de cierres de agujero en sección elástica y plástica.	104

RESUMEN

Este trabajo aborda el fenómeno de fluencia, uno de los problemas presentes en las rocas, pero siendo más problemático en las rocas con comportamiento plástico como por ejemplo la sal, roca analizada en este trabajo, que genera problemas en la perforación siendo el más común el cierre de pozo.

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de una metodología para la simulación numérica con elemento finito en la formación plástica mediante el empleo de un simulador.

En el primer capítulo, se desarrolla una breve reseña histórica de estudios, pruebas y análisis en fluencia, también asimismo se describen los modelos analíticos, reológicos, físicos, experimentales y los numéricos mediante análisis de elemento finito y elemento discreto.

El segundo capítulo, detalla el concepto básico de fluencia, los problemas que genera, los modelos constitutivos empleados y el modelo a considerar en la simulación numérica.

El tercer capítulo, describe el método de numérico por elemento finito que es la base para el análisis, también se describe paso a paso la estrategia de simulación numérica propuesta, la estrategia se encuentra resumida en un diagrama de flujo dentro del cual se explica los pasos a seguir la construcción de un modelo global, el submodelado y los escenarios posibles.

En el cuarto y último capítulo se aplica la estrategia de simulación descrita en el capítulo anterior, se propone un caso y los diferentes escenarios.

ABSTRACT

This thesis addresses the phenomenon of creep, which is one present phenomenon on the rocks, but being problematic on the rocks with plastic behavior which cause drilling problems, being the most important the wellbore closure, problematic analyzed on this thesis.

The objective of this thesis is the development of the numerical simulation methodology for salt formation by finite analysis method.

On the first chapter develops a brief historical review about tests, and analysis about creep also short review about analytical models, rheological models, physics models, finite element models and discrete element models.

Second chapter details basic concepts about creep, problems related on creep, detailed equations and model proposals.

Third chapter describes the numerical method by finite element which is the basis for finite element analysis, also it describes the numerical simulation strategy, this strategy is summarized in a flow chart which explains the steps to follow, the construction of a global model, the submodeling and the possible scenarios..

Fourth and last chapter applies the numerical simulation strategy describe don previous chapter, a case is proposed and different scenarios.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollo de una metodología para simular numéricamente a través de la técnica de análisis de elemento finito el comportamiento plástico de una formación salina, que permita evaluar sus efectos durante el proceso de perforación de pozos con énfasis en los momentos de entrada, atravesando y saliendo de la misma.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Análisis de información técnica para determinar el estado del arte y definir modelos susceptibles de aplicación.
- Evaluación de los modelos aplicables y selección del modelo a utilizar.
- Simulación numérica del modelo seleccionado a través de la técnica de elemento finito.
- Desarrollo del submodelado a partir del modelo global.
- Validación del modelo a partir de datos obtenidos de pruebas de laboratorio.
- Aplicación en escenarios potenciales.
- Evaluación y análisis de resultados.

INTRODUCCIÓN

La perforación en aguas profundas en el Golfo de México es uno de los retos más grandes en la industria petrolera mexicana, la necesidad de contar con la tecnología y conocimiento es completamente primordial para afrontar los retos que este implica.

Uno de los retos más grandes en aguas profundas es la perforación en sal; la sal es una roca evaporítica y una excelente roca sello con baja permeabilidad y que no permite el paso de fluidos. Aunque por otra parte la roca salina genera uno de los problemas más grandes en la perforación es el cierre de agujero y genera problemas de estabilidad de agujero, la estabilidad de agujero se considera cuando el diámetro del pozo es el mismo que el de la barrena, por lo tanto cuando se presenta inestabilidad de agujero es debido a las condiciones mecánicas de tal, las fallas compresionales caracterizan un comportamiento de derrumbe o por cierre del agujero en formaciones plásticas mientras que por esfuerzo de tensión se producen fracturas alrededor del agujero (Trejo, 2009).

Una de las formas de controlar el problema de estabilidad de agujero es mediante la densidad del lodo de perforación; se debe evaluar el rango de la densidad de lodo que puede ser empleada pero los modelos analíticos son inexactos para evaluar el cierre, dado que contienen muchas simplificaciones y no representan la realidad o en el otro extremo llevan a soluciones muy complejas.

Por lo anterior, se necesita la proposición de una metodología para la simulación numérica de la formación salina la cual ha probado ser la más exitosa, por lo tanto, para el desarrollo de esta se proponen diferentes modelos matemáticos como por ejemplo la ley de potencia de Bailey-Norton, dicha ley esta expresada en función de

diferentes parámetros como el tiempo, por endurecimiento o por esfuerzo de corte, en dichas ecuaciones se introducen parámetros obtenidos a partir de pruebas de laboratorio. Sin embargo, para el análisis completo de la roca se necesita el análisis del parámetro elástico, dichos análisis se obtienen también a partir de pruebas de laboratorio y se pueden determinar criterios de falla de la roca a partir de los criterios Mohr-Coulomb o Tresca.

En la presente tesis se desarrolla una metodología, aplicable a el análisis de cierre de pozo, el escenario planteado, es al momento de atravesar la sección salina, la sección la cual dentro de la problemática más grave que es la fluencia que presenta la sal, explicado previamente la manera de contrarrestar la fluencia es mediante el fluido de perforación, por lo tanto se proponen diferentes densidades de lodo; dentro de este contexto se efectúan diferentes simulaciones con los lodos y se analiza la fluencia que presenta la litología, cuando existe una presión de lodo dentro del pozo. La metodología propuesta pide que el modelo sea validado ya sea de manera analítica como, por ejemplo; con las soluciones de Maxwell, Kelvin o las formulaciones de Bradley, otra manera de validación es mediante un modelo 1D (Ventana Operativa) analizando los gradientes de fractura, presión de poro y la sobrecarga graficada en la ventana operativa comparativamente contra la que se obtiene en la simulación.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA.

Una gran cantidad de yacimientos de petróleo alrededor del mundo se encuentra en estratos por debajo de diapiros de sal. La industria del petróleo rutinariamente perforaba cerca de los diapiros de sal, (Beltrão et al., 2009; Meyer et al., 2005; Seymour et al., 1993) y siempre se había evitado perforar a través de ella (Dusseault et al., 2004; Seymour et al. 1993)^[1] dado que deriva en un ambiente con perturbaciones y cambios significantes en los esfuerzos adyacentes, dichas perturbaciones lleva a una rotación de esfuerzos en la interface sal-clástico y el cambio de magnitud de esfuerzos puede diferir significativamente de los esfuerzos lejanos dando como resultado la sobrepresión subsal o la reversión de presión que crea zonas extensas de roca fragmentada o zonas altamente fracturadas por debajo o adyacente a los diapiros de sal.^[2]

Los esfuerzos de los sedimentos, así como sus respuestas que presenta a las cargas externas son función de la carga histórica, así de su deposición (Terzaghi et al., 1996) y su historia diagenética (Laubach et al., 2010). Tomando en cuenta el historial de esfuerzos los cuales son esencialmente críticos en ambientes cerca de los diapiros de sal que han sufrido cargas geológicas significantes por lo mismo se han encontrado problemas en la perforación de los domos salinos como lo son el cierre de agujero, pérdidas de circulación, problemas al cementar la tubería de revestimiento, asentamiento de la tubería de revestimiento, y el diseño del lodo de perforación, dificultad en la toma de registros y la tendencia del pozo a desviarse hacia una dirección preferida por la sal, llevando a gastos adicionales excesivos o

en casos extremos el cierre del pozo. (Bradley, 1978; Dusseault et al., 2004; Wilson et al., 2003).^[1]

Algunas características de las deformaciones a gran escala en las cuencas salinas han sido identificados por muchos años en la explotación petrolera mediante técnicas de investigación geofísica y de estabilidad del agujero, algunas de estas características típicas consideran el estudio de sinclinales, monoclinales, anticlinales, domos perforados, domos no perforados y las perturbaciones generadas debido a las formaciones salinas aunque existen poca disponibilidad de datos para caracterizar cualquier deformación existente en las formaciones salinas. De manera común, las formaciones salinas, incluyen otras rocas no salinas que se depositaron mediante inclusiones dentro de la formación salina, esto por ejemplo puede incluir rocas de mayor dureza como las anhidritas, o de menor dureza como las lutitas.^[3]

La observación de las minas evaporíticas (Evans & Linn, 1970), sugirieron que en la estructura a gran escala de la formación salina perturbada podían existir deformaciones superpuestas de las intercalaciones no salinas, así como en la estructura interna de los lechos salinos. La comprensión de los mecanismos principales que producen deformaciones a gran escala y deformaciones internas en regiones perturbadas, relativamente perturbadas o en regiones relativamente no perturbadas de las cuencas salinas. Para estudiar estos mecanismos, se desarrolló un modelado numérico para la deformación, que fue comparado con análisis de

laboratorio y datos de campo de un sitio salino, con potencial de vertedero nuclear, localizado al sureste de Utah. ^[3]

Halbourty (1979), desarrolló un resumen de varias teorías de deformación mecánica de la sal dentro del cual se tomó un concepto de mecánica de fluidos, altamente aceptado por la comunidad geológica en el desarrollo temprano de los modelos, conocido como fluencia. Este concepto de mecánica de fluidos dicta que la sal y sus alrededores presenta un comportamiento totalmente viscoso, donde las fuerzas principales consistían en el contraste de la densidad entre la sal más ligera y la más pesada, y la superposición de sedimentos. ^[3]

Desde el punto de vista geomecánico, la fluencia de la sal es el movimiento del cierre (deformación) causado por disipación de energías o deformación de alto nivel generado por diferencia de esfuerzos debido a la perforación del estrato salino que se encontraba sin perturbar, dicho fenómeno puede alcanzar altos niveles que llegan a colapsar las paredes del pozo. ^[18]

A través de las últimas décadas una gran cantidad de estudios emplearon la aproximación geomecánica para el modelo de interacción sal-sedimento y mejorar su entendimiento en el cambio de esfuerzos alrededor de la sal. ^[1] y para ello se describen los modelos empleados y desarrollados a continuación.

A continuación, se presenta un resumen de los diferentes tipos de modelos a fin de definir el comportamiento de la sal.

1.1 Modelos reológicos.

Christensen (1971), derivó la solución para el modelo viscoelástico de Maxwell, modelo usado para los procesos de fluencia con comportamiento lineal^[5] mientras que Passaris (1979) propuso un modelo constitutivo relativamente simple para la roca con un resorte, un material viscoso y el modelo de Kelvin^[7], tiempo después Barker et al. (1994) derivó la solución para el modelo de Norton, modelo que predice el radio del pozo en función del tiempo, temperatura y diferencia de esfuerzos in situ (se asumen que son isotrópicos) y la presión del agujero, mientras que Norton es usado para fluencia no lineal^[6], se encontró que el modelo de Maxwell es un arreglo para la simulación de elemento finito y que es un caso específico de la solución de cierre por fluencia de agujero por el otro lado la solución de Barker es presentado para la integridad de pozos.^[9]

Mudson (1997), Hunsche & Hampel (1999), presentaron el ritmo de fluencia en su segunda etapa (estacionaria), expresando como función de poder los esfuerzos deviatorios y relación exponencial de la temperatura.^[6]

Wilson et al. (2003), demostró que la solución de Barker tendía a sobrepredecir el ritmo de cierre del agujero, esta falta de exactitud se atribuyó al hecho de que en la solución analítica se impusieron los requerimientos de la sal que era incompresible y que la deformación elástica y plástica en el eje axial era de cero, dichos supuestos previnieron una relajación por parte del esfuerzo radial, llevando la fluencia a rangos excesivos; eliminando la estimación de esfuerzos elásticos de Barker se derivó una

nueva solución analítica de esfuerzos de cierre por fluencia del agujero basado en la teoría viscoelástica de Perzyna (1966).^[7]

Qiu et al. (2003), construyó el modelo de fluencia mediante análisis comparativos al cual llegó como resultado que la fluencia en las rocas salinas es diferente; Liu (2006) propuso la ecuación constitutiva relevante en estado estacionario con respecto a temperatura, presión de confinamiento y esfuerzos deviatorios en la fluencia de sal; Tang et al. (2010), dedujo la expresión de la fluencia en intercalaciones arcillosas ^[6]. Un año después Liu (2011), revisó las soluciones analíticas del modelo de cierre de por fluencia con soluciones correctas para Maxwell y Norton, así como nuevas soluciones para Kelvin y Perzyna. ^[5]

1.2 Modelos matemáticos.

El primer modelo analizado en el estudio de una solución analítica fue desarrollado por Biot & Ode (1965) y Ramberg (1981) ^[3]. Weertman & Weertman (1970), presentaron una ecuación para la sal de la Isla Avery (Halita al 99%) la cual era una ecuación exponencial con limitante de la energía de activación para el mecanismo de flujo limitado, después Horseman (1972) determinó su ecuación exponencial como resultado de la muestra mediante una regresión ponderada de mínimos cuadrados no lineales ^[8]; Hermann et al.(1980), propuso ecuaciones constitutivas para el modelado de deformación de la sal en una planta piloto de aislamiento de desechos, dicha ley fue desarrollada para simular fluencia de sal en instalaciones de aislamiento de desechos nucleares, tiempo después la compañía Terralog modificó la ecuación asociando datos como la degradación a la resistencia,

transición de la compacto-dilatación basado en el criterio de cedencia de Drucker-Prager y la respuesta de la carga-descarga^[9]. Y finalmente se determinó que el flujo en estado estacionario se puede dividir en dos regímenes, el primer caso donde los esfuerzos y la deformación presentan valores altos (Wawersik & Zeuch 1986, Skrotski & Haasen 1988, Wawersik 1988) y el segundo donde los esfuerzos y la deformación presenta bajos niveles de esfuerzos y deformación (Carter & Hansen 1983, Horseman et al. 1992, Senseny et al. 1992)

En análisis de esfuerzos y fluencia en sal, Infante & Chenevert (1989), encontraron altos esfuerzos de Von Mises, donde la sal fluye de manera plástica, cuando se presentaron altos rangos de cierre, este se asoció de manera directa con el flujo plástico. Como consecuencia el análisis explícitamente no consideraba la fluencia en el régimen elástico, esto significa que a bajos esfuerzos se presentaron cambios en la forma del cuerpo alterando su volumen.^[7]

Cristescu (1993), desarrolló una ecuación general constitutiva para fluencia transitoria y estacionaria en la sal que puede ser usado en diferentes estados de esfuerzos.^[11]

El daño causado por la fluencia en sal ha sido observado por muchos autores (Botelho, 2008; Chatar & Imler, 2010; Cheatham Jr. & McEver, 1964; Clegg, 2004; Dusseault et al., 2004; Khalaf, 1985; Mathur et al., 2010; Patillo & Rankin, 1980; Wilson et al., 2003) en publicaciones más recientes (Costa, 2010; Mackay, 2008), muchos métodos numéricos han sido usados para la simulación del comportamiento viscoplástico de la roca y también el daño que estos generan en las tuberías de

revestimiento, basándose en las ecuaciones constitutivas de Munson (2004)^[10] y sus respectivas modificaciones que este haya aplicado mientras que Urai & Spiers (2007) desarrollaron el concepto de fluencia estacionaria a partir de la ecuación de fluencia de dislocación^[15].

Zhou et al. (2010), propuso un modelo constitutivo de fluencia en base a la derivada parcial en base al tiempo para describir deformación por fluencia no lineal en sal; modelo que reemplaza el amortiguador newtoniano en el modelo de Nishihara con la derivada parcial del amortiguador de Abel, dicho resultado dio concordancia con los datos experimentales. En otros estudios Sheinin & Blokhin (2012), Wisetsaen et al. (2014), encontraron que la temperatura elevada reduce el módulo elástico y aumenta el ritmo de fluencia.^[10]

1.3 Método numérico por elemento finito.

Los primeros modelos que se empezaron a desarrollar estimaron en la viscosidad un modelo de flujo lineal los cuales fueron un punto de arranque para el desarrollo y luego se fue generando las variables de esfuerzo efectivo y generaron para un modelo de flujo no lineal con sus fronteras ya definidas, Carter & Hansen (1983), dieron las primera leyes de flujo no lineal con sus fronteras ya definidas, ecuación descrita de manera exponencial en función de energía de activación, constantes universales de gas y la temperatura, dicha ley provee una relación mecánica para el modelado 2D de elemento finito.^[11]

Al inicio de los años 90, las leyes de fluencia se basaban en mecanismo de deformación, dichas leyes fueron recomendadas por la literatura técnica de la época

para representar el comportamiento intrínseco de las evaporitas, la ley que incorporó los mecanismos de deformación fue desarrollada por Munson basado en los mecanismos de dislocación, deslizamiento y el mecanismo desconocido y sus efectos identificaron fluencia dentro de los granos, provocado por la disolución de la sal en función de la solubilidad, por lo tanto para el análisis del comportamiento elasto-visco-plástico se optó por la ley de fluencia de doble mecanismo.^[12]

Uno de los modelos usados para la determinación de fluencia (Fokker, 1995), es la ecuación exponencial que fue desarrollada a partir del modelo reológico de Kelvin para fluencia secundaria (Porier 1972, 1984; Horsemen, 1993; Franssen, 1993), con la diferencia de que en el modelo empleado se usó de constante el valor de esfuerzo de referencia ^[13].

Wilson et al. (2003), propuso para el análisis de elemento finito el modelo analítico de Barker para la predicción de cierre de agujero en función de tamaño de agujero, peso del lodo relativo a la sobrecarga y la temperatura de formación; dicho modelo es parecido al modelo desarrollado por los laboratorios SANDIA y este da valores comparables de ritmos de deformación por fluencia estacionaria, una temperatura y valores de esfuerzo. En el modelo de Baker se usó con distribución de esfuerzos elásticos. Y para lograr condición de esfuerzos litoestáticos, se asumió que la sal era incompresible en los regímenes elásticos e inelásticos; mientras que la solución de SANDIA consideraba la sal compresible en el régimen elástico e incompresible en el régimen inelástico, el modelo incluía deformación por fluencia transitoria y de

acuerdo a las observaciones de campo y laboratorio el modelo permitía relajación de esfuerzos^[14].

Fredrich et al. (2003), reportó simulaciones mediante análisis de elemento finito tridimensional de varias geometrías de cuerpo salino incluyendo cuerpos esféricos, cuerpos horizontales, columnas de diapiros de sal y diapiros de sal superpuestos^[2].

Donde obtuvo los siguientes resultados:

1. El esfuerzo de corte es mayor en ciertas zonas de geometrías específicas adyacentes al cuerpo de sal.
2. Los esfuerzos horizontales en el cuerpo salino son anisotrópicos.
3. Los esfuerzos principales no son ni verticales u horizontales, ni el esfuerzo vertical es el esfuerzo máximo.
4. Dependiendo de la geometría del cuerpo, los esfuerzos verticales que se encuentran adyacente a la sal no son iguales a la carga gravitacional.
5. La perturbación de esfuerzos se determina solamente a través de ecuaciones constitutivas, compatibilidad y equilibrio con su respectiva condición inicial y de frontera usando método de elemento finito.

Mackay et al. (2008), desarrolló una ecuación general para el análisis de elemento finito mediante una ley de potencia que sigue el endurecimiento en función del tiempo con la adición de constantes de temperatura definidos por el usuario y la introducción de parámetros elásticos debido a que se considera que si se presenta comportamiento de fluencia también se presentaba comportamiento elástico, su simulación revelo que durante la fluencia los esfuerzos tangenciales y radiales cerca

del agujero fueron disminuyendo con el tiempo, sin embargo los esfuerzos tangenciales lejanos al agujero (una distancia de 10 a 20 veces el radio de pozo) incrementaron con el tiempo^[15]. Pouya (2015), modelo térmicamente una muestra de sal; prueba realizada y observada en el departamento de Geología de la Universidad de Texas A&M. Los granos de la sal y las fronteras de los granos fueron representados por elementos de superficie y elementos de unión respectivamente, se desarrolló la hipótesis de que la deformación por fluencia es debido a la propagación de fracturas y se simularon pruebas de fluencia con severos modelos de daño para entender si las fracturas primarias se propagan de los granos o en su interface intergranular^[16].

1.4 Método numérico por elemento discreto.^[10]

Desarrollado por Cundall & Strack (1979), este método ha sido adoptado ampliamente en la investigación de mecanismos micromecánicos en muchas disciplinas de ciencia e ingeniería. (Han et al., 2012; Li et al., 2016; Wang et al., 2014; Zhou et al., 2016).

El método numérico por elemento discreto tiene diversas ventajas sobre los convencionales de mecánica del medio continuo (Martínez, 2012), debido a que los modelos convencionales no pueden capturar los efectos macroscópicos originados por los micromecánicos.

1.4.1 Modelo de Burger en elemento discreto.

La sal se discretiza en un arreglo de partículas, y su arreglo entre partículas demuestra varios comportamientos mecánicos dependiendo de los modelos

asignados. Las partículas proveen aproximación del comportamiento de simulación mecánica de la masa de sal sus componentes reológicos dependen del modelo de Maxwell y Kelvin, para direcciones de normales y corte respectivamente.

1.4.2 Modelo termo-mecánico de Fluencia en Elemento Discreto.

Itasca (2015), modeló la transferencia de calor a través de tubos térmicos que simulaban el calor de yacimiento; propuso un novedoso sistema híbrido de elemento discreto, para el modelo de fluencia en función de la temperatura comprendido por modelo de contacto de Burger y Modelo de contacto lineal.

1.5 Modelos físicos.

Varios modelos se han sido desarrollado a fin de capturar la deformación de la sal, como la ley de fluencia de Munson-Dawson (1981), el modelo de Lubby2 (Heusermann, 2003) y el modelo viscoplástico (Cristescu, 1993; Heunsche & Hampel, 1999.). Los componentes plásticos de las leyes visco-elasto-plásticas se pueden desestimar donde la presión de confinamiento es lo suficientemente enorme para prevenir la dilatación. Los mecanismos de deformación viscosa considerada por las leyes constitutivas anteriormente mencionadas no toman en cuenta la fluencia por disolución. La fluencia por solución-precipitación es un proceso de solución-precipitación activado por agua dominante en bajos rangos de deformación (Schoenherr et al., 2010), durante la cual la frontera del grano se disuelve en los contactos grano-agua y se depositan en los sitios de precipitación, la fluencia por solución-precipitación es fuertemente dependiente del tamaño del grano.^[17]

El modelo de multimecanismo de deformación es un modelo sofisticado que simula la fluencia transitoria y estacionaria, desarrollada después del modelo de Munson-Dawson (Chan et al.1992). Basado en la superposición de los mecanismos de fluencia micromecánicos en la etapa de fluencia estacionaria, estimado por leyes de potencia y la expresión del seno hiperbólico; dichos mecanismos son de deslizamiento, escalamiento y uno sin definir, la fluencia transitoria se estima por un ajuste de ritmo de fluencia con el uso de funciones transitorias como el endurecimiento y los parámetros de ajuste, el modelo de multimecanismo destaca por la fluencia de la roca salina en función del tiempo^[18].

La deformación a ritmos halocinéticos ($1e-16s^{-1}$ a $1e-9s^{-1}$) y temperatura (20-140°C), caen en transición entre la fluencia por dislocación y fluencia por solución-precipitación donde el tamaño del grano en sales naturales sugiere que ambos mecanismos ocurren concurrentemente. Un modelo de Carreau (1972), un modelo de Ellis (Van Keken et al., 1993) o un modelo bilineal (Broudard et al. 2009) se pueden usar para tomar ambos mecanismos de deformación en un simple modelo constitutivo^[17].

El modelo de fluencia de doble mecanismo (Costa et al., 2005) es el análogo a la Ley de Mecanismo Múltiples Visco-plásticos (Dusseault et al, 1987), desarrollado en las minas de potasio y ha sido empleado para propósitos petroleros. Es considerado un mecanismo gobernante responsable del comportamiento de fluencia dependiendo de los niveles de esfuerzo del problema llevado a cabo, determinando dos mecanismos principales, el primero un movimiento por

dislocación por fluencia para niveles de esfuerzos bajos y por otra parte el mecanismo de fluencia por solución-precipitación lo gobierna dicho modelo simula propiamente la fluencia en estado estacionario, presentando buena respuesta de ritmo de deformación ^[18].

El propio entendimiento del comportamiento de la sal requiere realización de modelos a microescala para el desarrollo del desempeño del grano. (Zhu & Arson, 2013), Müller et al., (2012) uso el método numérico de análisis por elemento discreto para simulación del deterioro de la roca salina ^[10].

1.6 Análisis experimental.

Weiguo et al. 2011, realizó un análisis del estrato de sal, intercalaciones de glauberita y yeso son comunes a parte de la sal sucia. Se corrieron dos pruebas de ciclos de carga, la primera se desarrolló entre los dos límites mientras que el segundo el límite superior del ciclo se incrementa del próximo ciclo. En las pruebas los ritmos de carga se controlaron y las descargas se automatizaron por el sistema, los resultados demostraron que en una prueba uniaxial, la glauberita tiene mayor resistencia mientras que la halita presentó la menor resistencia y la mayor deformación en pruebas de una sola carga. Sin embargo, los parámetros mecánicos de la halita y otras intercalaciones cambian bajo distinta carga cíclica, siendo el yeso el más débil comparado con los resultados de una sola carga, el pico de cuatro rocas bajo carga cíclica decrementa en varias medidas, la amplitud disminuye para la nardita, glauberita y yeso en 34%, 19% y 35% respectivamente. ^[19]

En 2012, se hicieron pruebas triaxiales multinivel en glauberita, anhidrita y roca arcillosa, hecha con la misma presión de confinamiento en las tres pruebas (10Mpa). Se observó que la roca salina bajo un pequeño nivel de esfuerzos deviatorios puede entrar a la fase de fluencia estacionaria y mientras mayor sean las cargas constantes, las rocas necesitan mayor tiempo para trascender de fluencia primaria a secundaria, cuando la fluencia se volvió estable se procede a la siguiente carga. En los experimentos realizados en la primera y segunda carga necesitan una carga constante de alrededor de 50 horas, mientras que la tercera y la cuarta requieren un promedio de 100 horas para trascender a la segunda etapa de fluencia.^[6]

Wenjing et al. (2017), mencionó que existen tres pruebas separadas de fluencia con la roca cuando se corre a cargas constantes (Goodman, 1989; Park et al., 2010), los resultados demostraron que la sal se queda en la fluencia transitoria por un corto periodo de tiempo hasta que llega a la fluencia estacionaria y se mantiene por un largo periodo; las pruebas de fluencia se hicieron a fin de explorar los micromecanismos de la roca a escala de núcleo. El análisis PFC (flujo de partícula) demostró que se presenta excelente comportamiento dúctil en la fluencia secundaria en dicho modelado se propuso un modelo híbrido donde el modelo de contacto de Burger y el modelo de contacto lineal paralelo fueron asignados después de la generación de partículas.^[10]

A continuación, se presenta un resumen que ilustra la evolución de los modelos que describen el comportamiento mecánico de la sal.

Tabla 1.1 Modelos descriptivos de la sal.

Método de solución.	Modelo.	Características.
Reológico	Maxwell	<p>Considera el comportamiento de un viscoelástico definido por la combinación de un elemento elástico y un viscoso acoplado en serie.</p> <p>Determina la deformación instantánea.</p>
	Kelvin-Voigt	<p>Considera el comportamiento viscoelástico definido por un elemento elástico y un viscoso acoplado en paralelo.</p> <p>Explica el comportamiento real de la fluencia, teniendo en cuenta una fluencia de tipo exponencial en función del tiempo.</p>
	Combinado de Burger	<p>Combinación en serie de los modelos de Kelvin-Voigt y</p>

		Maxwell. El modelo asemeja un comportamiento mecánico real de la fluencia.
Empírico	Ley de potencia de Norton	Predice el radio del pozo en función del tiempo, temperatura, y diferencia de esfuerzos in situ (se asumen esfuerzos isotrópicos).
Matemático	Teoría Viscoelástica de Perzyna (1966)	Se basa en la hipótesis de descomposición de deformación total en deformación elástica y viscoplástica y la relación entre deformación elástica y tensión.
	Barker (1994)	Basado en la Ley de Norton, predice la fluencia no lineal.
	Weertman & Weertman (1970)	Desarrolló su ecuación exponencial con una sal limpia
	Horseman (1972)	Determinó su ecuación mediante una regresión

Matemático		ponderada de mínimos cuadrados no lineales.
	Hermann (1980)	Propuso ecuaciones constitutivas de deformación de sal en una planta piloto de aislamiento de desechos.
	Herrman modifica por Terralog	Asoció datos basados en el criterio de Drucker-Prager.
	Infante & Chenevert (1989)	Realizó pruebas con criterio de falla de Von Mises.
	Cristescu (1993)	Desarrolló una ecuación general para fluencia transitoria y estacionaria.
	Munson (2004)	Determinó sus ecuaciones para fluencia estacionaria, para cada mecanismo micromecánico.
	Urai & Spiers (2007)	Desarrollaron el concepto de fluencia estacionaria a partir de la ecuación de fluencia de dislocación.

	Zhou (2010)	Modelo constitutivo de fluencia en base a la derivada parcial en función del tiempo para describir deformación por fluencia no lineal.
<p>Numérico por Elemento Finito</p>	Carter & Hansen (1983)	Proporcionó una relación mecánica para el modelado 2D de elemento finito.
	Munson (1991)	Basado en los micromecanismos de fluencia, opto por la ley de mecanismo de doble fluencia.
	Fokker (1995)	Desarrolló su ecuación a partir del modelo de Kelvin
	Wilson (2003)	Propuso el modelo de Baker y lo comparo con el modelo desarrollado por los laboratorios SANDIA.
	Fredrich (2003)	Realizó el análisis en diferentes geometrías de cuerpo salino.

	Mackay (2008)	Desarrolló su ecuación mediante una ley de potencia con adiciones de endurecimiento con adición de constantes de temperatura.
	Pouya (2015)	Incluyó efecto de temperatura en el modelado.
Númérico por Elemento Discreto	Modelo de Burger	Discretizado en arreglo de partículas, proveen aproximación de simulación mecánica de la masa de sal.
	Itasca, 2015 (Termino Mecánico de Fluencia)	Se modeló la transferencia de calor en el yacimiento con tubos térmicos.
Modelo Físico	Modelo Multimecanismo	Superposición de mecanismos de fluencia micromecánicos.
	Modelo de fluencia de doble mecanismo	Mecanismo gobernante responsable del comportamiento de fluencia

		dependiendo de los niveles de esfuerzo
	Mecanismo de fluencia por dislocación fluida	Describe el movimiento de dislocación de manera ideal hasta llegar a la frontera del grano donde desaparece.
	Mecanismo de fluencia por dislocación aumentada	Depende del esfuerzo lineal y es independiente del tamaño del grano y su energía de activación está cerca de los valores de la difusión volumétrica.

CAPÍTULO 2 MODELOS DE FLUENCIA PROPUESTOS.

2.1 Concepto de fluencia.^[20]

Es la tendencia de la roca a exhibir una deformación continua bajo esfuerzos constantes, dicha deformación se divide en tres etapas (fig. 2.1).

- **Primaria o Transitoria:** el ritmo de deformación es decreciente.
- **Secundaria o Estacionaria:** el ritmo de deformación es constante.
- **Terciaria o Acelerada:** el ritmo de deformación se acelera.

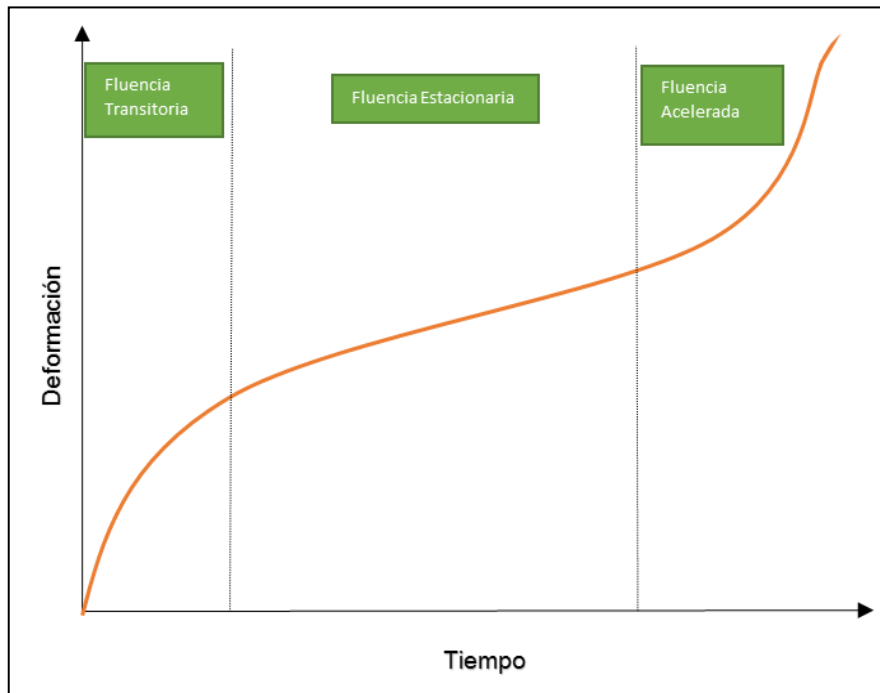


Fig. 2. 1 Curva representativa de la fluencia en sus tres etapas.

2.2 Problemas asociados con la deformación por fluencia.

2.2.1 Inestabilidad de agujero ^[28].

El cierre de agujero es un proceso que depende del tiempo. Este proceso ocasionalmente está asociado a la fluencia generada por la presión de sobrecarga, y ocurre en secciones de flujo plástico de lutita y sal. Los problemas asociados se deben al cambio en la perforación y presión asociada del fluido de perforación, inclusión de rocas no evaporíticas, sobrepresión causada por las bolsas de salmuera y bitúmenes móviles. Así como también en la perforación se generan problemas como el incremento del torque y arrastre, incrementa la pegadura de la tubería de revestimiento y la dificultad de asentar la tubería.

2.2.2 Efectos en la permeabilidad ^[22].

La evolución de la permeabilidad se relaciona a la deformación volumétrica en el proceso de fluencia. Chen et al., (2014), observaron presencia de microfracturas emergiendo en la fase de fluencia primaria, estas se propagaron en la secundaria y en la terciaria, las fracturas se transformaron en macrofracturas. También Chen et al.(2015), explicaron que la relación del cambio de la permeabilidad y la deformación volumétrica se atribuyen a la iniciación, propagación y coalescencia de microfracturas, exhibiendo un ligero decremento en su fase de fluencia primaria, estable en la secundaria y rápida en la terciaria; la deformación por fluencia y su permeabilidad se controla por las microfracturas.

2.2.3 Compactación de los yacimientos ^[23].

El desarrollo de la compactación depende de los esfuerzos iniciales en el yacimiento y sus cambios de los esfuerzos durante el agotamiento del pozo. La variación de esfuerzos en función del tiempo depende de los cambios de presión y comportamiento constitutivo del material, así como la propiedad de la roca dentro del yacimiento.

El comportamiento viscoelástico de la roca (fluencia) puede causar un retraso en la respuesta de deformación de la roca ante los cambios de presión.

2.3 Modelado matemático de la fluencia ^[24].

Mientras que la respuesta de fluencia de los materiales se relaciona íntimamente a los procesos microestructurales que toman lugar dentro del material de deformación, una descripción continua del proceso de fluencia es de gran ayuda en los procesos de ingeniería. Desde un punto de vista de la representación, la solución de la fluencia requiere ecuaciones de estado de equilibrio mecánico, ecuaciones constitutivas apropiadas para el comportamiento de fluencia y sus adecuadas condiciones iniciales y de frontera. Debido a que la temperatura es una variable clave en la fluencia se recomienda resolver las ecuaciones de balance de energía.

El caso más simple, es investigar la carga uniaxial. La representación genérica de la forma matemática de la curva de fluencia es:

$$\epsilon^c = F(\sigma, T, t) = f(\sigma)g(T)h(t) \quad (2.0)$$

Donde

- ϵ^c = Deformación por fluencia.
- σ = Esfuerzo.
- T= Temperatura.
- t = Tiempo.

Las variables de tiempo y temperatura se incluyen explícitamente debido a que estas dos variables juegan un papel importante en la respuesta de la fluencia. Las funciones $f(\sigma)$, $g(T)$ y $h(t)$ implican que se asumen la separación de los efectos de esfuerzo, temperatura y tiempo, lo cual se realiza frecuentemente, la expresión indicada es la base a fin de determinar la formulación que se usa para investigar fenómenos de fluencia bajo esfuerzos variables.

2.4 Ley de ritmo de fluencia y fórmulas de endurecimiento.

En el diseño de ecuaciones, lo más interesante es el modelo en la fluencia primaria o secundaria. Una ecuación usada comúnmente para la representación de estas dos etapas de fluencia es la Ley de Bailey- Norton o también conocida como ley de potencias para fluencia. Dicha ecuación es:

$$\epsilon^c = A\sigma^n t^m \quad (2.1)$$

La anterior también se puede expresar en término de ritmo de fluencia:

$$\epsilon^{\circ c} = A\sigma^n m t^{m-1} \quad (2.2)$$

A esta ecuación se le conoce como formulación del endurecimiento en función del tiempo de la ley de potencia de la fluencia, donde A , m , n son constantes de los materiales dependientes de la temperatura.

Si la ley de Bailey-Norton se resuelve para t y se sustituye el resultado en la ecuación anterior el resultado es:

$$\dot{\epsilon}^c = A^{1/m} m \sigma^{n/m} (\epsilon^c)^{(m-1)/m} \quad (2.3)$$

Esta fórmula se le conoce como formulación de endurecimiento por deformación de la ley de potencia de fluencia.

El tiempo y el endurecimiento por deformación son formulaciones usados en la práctica para predecir la curva de fluencia bajo esfuerzos variables usando solamente los datos que se obtienen de múltiples pruebas de fluencia a esfuerzo constante. La experiencia indica que la formulación del esfuerzo de deformación a menudo produce mejores aproximaciones con los resultados de las pruebas con esfuerzo variable.

2.5 Ley de fluencia basada en microestructuras para fluencia en estado estacionario.

Para la fluencia en estado estacionario el ritmo de deformación ha sido adecuadamente representado por la ecuación de Mukherjee-Bird-Dorn, el cual expresa el ritmo de fluencia en términos de esfuerzo, temperatura y tamaño de grano.

$$\dot{\epsilon}_s^c = \frac{AGb}{kT} D \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n = A' e^{\left(\frac{Q}{kT}\right)} \quad (2.4)$$

Siendo:

- A = una constante adimensional
- D = coeficiente de difusión

Donde D está dado por

$$D = D_0 e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \quad (2.5)$$

Donde

- D_0 = factor de frecuencia
- Q = energía de activación
- $R=N_A k$ = la constante de los gases
- N_A = número de Avogadro
- k =constante de Boltzmann
- d = tamaño de grano
- p, n = constantes del material

2.6 Métodos de correlación y extrapolación.

La fluencia de los componentes estructurales se determina a partir de la curva estándar de fluencia. Sin embargo, esto requiere pruebas de laboratorio extensas y la necesidad de acelerar los resultados de las pruebas a condiciones extremas con objeto de predecir la fluencia en condiciones no tan extremas.

Los métodos de extrapolación son correlaciones que involucran temperatura, tiempo de ruptura y esfuerzo, así como el menor número posible de pruebas aceleradas usadas

para determinar el periodo de fluencia bajo condiciones menos extremas. El método de extrapolación más común es:

2.6.1 Método de Larson-Miller

Dentro del procedimiento de Larson-Miller el resultado de las constantes pruebas de ingeniería son determinados y el parámetro m_{LM} se define por:

$$m_{LM} = T(\log t_r + C) \quad (2.6)$$

Donde

- T = temperatura (Kelvin).
- t_r =tiempo de ruptura (hrs).
- C =constante de material (adim).

Entonces, si la constante C se conoce, para determinar el tiempo de ruptura bajo esfuerzo constante a cierta temperatura, una prueba acelerada al mismo esfuerzo, pero a mayor temperatura se lleva a cabo para determinar m_{LM} . El tiempo de ruptura deseado a una mayor temperatura puede ser determinado fácilmente.

2.7 Mecanismo de fluencia.

Los átomos en estado sólido vibran a altas frecuencias (aprox. 10^{13} s^{-1}) muy cercano a su posición principal. Ocasionalmente ($\approx 1/10^6$ veces), la amplitud de la vibración es lo suficiente grande para que el átomo se mueva fuera de su ubicación actual hacia sitios vecinos. Este proceso es llamado difusión en estado sólido que está ligado a un proceso de activación térmica. La energía termal provee la energía de activación necesaria

requerida para superar la barrera del potencial de energía que previene desplazamientos atómicos.

Por lo tanto, la difusión en estado sólido aumenta a mayores temperaturas, debido a que el movimiento atómico se relaciona directamente al proceso de reorganización microestructural es natural esperar que el fenómeno de fluencia este directamente relacionado al fenómeno de difusión en estado sólido, particularmente a altas temperaturas.

Si la temperatura es relativamente baja, la difusión es de menor relevancia y la deformación por fluencia a escala atómica se influencia por los fenómenos característicos de deslizamiento y resbalamiento, presentados a bajas temperaturas de deformación plástica. Por lo tanto, de acuerdo a la temperatura predominante y al esfuerzo en sólido fluyente, varios mecanismos microestructurales determinan el comportamiento observado en la fluencia. A continuación, se presenta un resumen de los mecanismos de fluencia más empleados.

2.7.1 Fluencia dominada por la difusión en estado sólido.

A altas temperaturas, la difusión en estado sólido es dominante y tiene una fluencia difusional. Dependiendo del nivel de esfuerzo, del más bajo al más alto, se presentan los siguientes regímenes:

2.7.1.1 Nabarro-Herring o Fluencia por Difusión Volumétrica.

A bajos esfuerzos el ritmo de difusión de estado sólido en el volumen de los granos cristalinos determina el ritmo de fluencia. La siguiente relación, para el ritmo de fluencia fue obtenida por Nabarro y Herring:

$$\dot{\epsilon} = A_{NH} \frac{D G b}{k T} \left(\frac{b}{d}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{G}\right) \quad (2.7)$$

Donde:

- A_{NH} constante adimensional de Nabarro-Herring. ≈ 12.5 ,
- D = coeficiente de difusión en el volumen de los granos,
- d = tamaño de los granos,
- b = magnitud del vector de Burgers,
- T = temperatura,
- k = constante de Boltzmann,
- σ = esfuerzo,
- G = módulo de corte,

2.7.1.2 Fluencia por difusión en la frontera del grano.

A medida que el esfuerzo incrementa y/o la temperatura disminuye, el ritmo de difusión en estado sólido a lo largo con la frontera de los granos se intensifico más que en el volumen de los granos y por lo tanto es determinante en la deformación por fluencia. La siguiente relación por fluencia fue obtenida por Coble:

$$\dot{\epsilon} = A_c \frac{D_{gb} G b}{kT} \left(\frac{\delta}{b}\right) \left(\frac{b}{d}\right)^3 \left(\frac{\sigma}{G}\right) \quad (2.8)$$

Donde

- A_c constante adimensional de coble ≈ 40 ,
- D_{gb} = coeficiente de difusión en la frontera del grano,
- δ = grosor de la frontera del grano,
- k = constante de Boltzmann,
- G = módulo de corte,
- σ = esfuerzo,
- d = tamaño de los granos,
- b = magnitud del vector de Burgers.

2.7.1.3 Harper-Don o Fluencia por dislocación aumentada.

A bajos esfuerzos, altas temperaturas y granos de tamaño enorme, la difusión dilatada asistida por dislocación aumentada a veces tiende a ser determinante del ritmo de la fluencia. Harper-Don obtuvo la siguiente relación:

$$\dot{\epsilon} = A_{HD} \frac{D G b}{kT} \left(\frac{\sigma}{G}\right) \quad (2.9)$$

Donde;

- $A_{HD} \approx$ constante adimensional de Harper-Don $\approx 10^{-11}$.
- $D =$ coeficiente de difusión.
- $d =$ tamaño del grano.
- $k =$ constante de Boltzmann.
- $G =$ módulo de corte.
- $\sigma =$ Esfuerzo.
- $b =$ magnitud del vector de Burgers.
- $T =$ temperatura.

2.8 Fluencia dominada por deslizamiento.

A bajas temperaturas o esfuerzos altos, el proceso de deslizamiento empieza a dominar la respuesta de la fluencia. Sin embargo, la contribución de la difusión puede aún ser significativa. Los siguientes regímenes han sido observados:

2.8.1 Fluencia por dislocación o deslizamiento asistido por difusión.

A relativamente altos esfuerzo y temperaturas la dislocación por deslizamiento puede ser asistida por la difusión. Específicamente, un obstáculo al movimiento por dislocación sobrepasa la asistencia en la difusión asistida alrededor del objeto. La siguiente relación de la fluencia fue obtenida por Weertman:

$$\dot{\epsilon} \approx \frac{DGb}{kT} \left(\frac{\sigma}{G}\right)^5 \quad (2.10)$$

Donde,

- D = coeficiente de difusión en el volumen de los granos.
- k = constante de Botzmann.
- T = temperatura.
- σ = esfuerzo.
- G = módulo de corte.
- b = magnitud del vector de Burgers.

2.8.2 Fluencia generada por dislocación por deslizamiento.

Mientras el esfuerzo aumenta a sus niveles más altos, como consecuencia de los procesos de dislocación por resbalamiento, sobre planos cristalográficos y la dirección se convierte más importante y la influencia de la difusión es relativamente pequeña.

Los mecanismos de deformación son esencialmente los mismos que predominan a temperatura ambiente.

2.8.3 Fluencia por deslizamiento en la frontera del grano.

A grandes niveles de esfuerzo y temperatura, los granos individuales comienzan a deslizarse uno con otro. La estructura integral de los componentes está severamente comprometida a medida que la fluencia terciaria se hace presente.

2.9 Ecuaciones de fluencia para carga multiaxial.

En la mayoría de las aplicaciones en ingeniería, existe un área especializada en la investigación del comportamiento de fluencia bajo condiciones de carga multiaxial. Por lo

tanto para su utilidad práctica se deben generalizar las condiciones aplicables a las ecuaciones presentadas anteriormente. Los puntos clave de la formulación incluyen:

- La formulación se debe reducir a una de tipo uniaxial bajo carga uniaxial.
- Incompresibilidad.
- Ritmo de deformación independiente del esfuerzo hidrostático.
- Que el esfuerzo y la deformación coincidan en los materiales isotrópicos.

Si el tensor de ritmo de deformación se asume proporcional a los componentes del tensor deviatorio σ''_{ij} : los requerimientos previamente mencionados, por lo tanto:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \lambda \sigma''_{ij} \quad (2.11)$$

Donde,

- $\sigma''_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$.
- El factor de proporcionalidad λ se determina con los esfuerzos efectivos y la deformación efectiva por fluencia.

Donde el esfuerzo efectivo se define como:

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12) \\ &= \sqrt{\frac{3}{2} \sigma''_{ij} \sigma''_{ij}} = \sqrt{3J_2} \end{aligned}$$

Donde J_2 es la segunda invariante del tensor de esfuerzo deviatorio.

El ritmo de deformación efectiva se define:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_e^c = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\dot{\varepsilon}_{11}^c - \dot{\varepsilon}_{22}^c)^2 + (\dot{\varepsilon}_{33}^c - \dot{\varepsilon}_{22}^c)^2 + (\dot{\varepsilon}_{11}^c - \dot{\varepsilon}_{33}^c)^2 \\ + 6((\dot{\varepsilon}_{12}^c)^2 + (\dot{\varepsilon}_{23}^c)^2 + (\dot{\varepsilon}_{13}^c)^2)]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_{ij}^c \dot{\varepsilon}_{ij}^c} = \sqrt{\frac{4}{3} I_2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Donde I_2 es la segunda invariante del tensor de ritmo de deformación por fluencia.

El parámetro λ esta dado por:

$$\lambda = \frac{3 \dot{\varepsilon}_e^c}{2 \sigma_e} \quad (2.14)$$

Y este puede ser determinado a través del desarrollo de pruebas uniaxiales.

Por lo tanto la Ley Bailey-Norton para el caso multiaxial se expresa en términos de un esfuerzo efectivo y el ritmo de deformación como:

$$e_e^c = A \sigma_e^n t^m \quad (2.12)$$

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{3}{2} A m \sigma_e^{n-1} t^{m-1} \quad (2.16)$$

De acuerdo a la ley de endurecimiento, el ritmo de fluencia se calcula como:

$$e_{ij}^c = \frac{3}{2} \sigma_{ij}' A m \sigma_e^{n-1} t^{m-1} \quad (2.17)$$

Mientras que si se usa la regla de endurecimiento por deformacion la ecuación queda:

$$\dot{e}_{ij}^c = \frac{3}{2} \sigma_{ij}' m A^{1/m} \sigma_e^{(n/m)-1} (e_e^c)^{(m-1)/m} \quad (2.18)$$

Para la reducción de variables y presentacion de la ecuación, es conveniente introducir nuevos parámetros:

$$\mu = \frac{1-m}{m} \quad (2.19)$$

$$n = \frac{n}{m} \quad (2.20)$$

$$\frac{1}{T \sigma_m^n} = m A^{1/m} \quad (2.21)$$

Con estos parámetros la regla de endurecimiento por deformación se transforma en:

$$\frac{d(e_e^c)^{1+\mu}}{dt} = \frac{1+\mu}{T} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_m} \right)^n (e_e^c)^{-\mu} \quad (2.22)$$

Para el caso de carga uniaxial, la integración de la ecuación de arriba es:

$$\epsilon^c = \left[\frac{1 + \mu}{T} \left(\frac{\sigma}{\sigma_m} \right)^n t \right]^{\frac{1}{1+\mu}} \quad (2.23)$$

Esta ecuación a fin de para satisfacer los datos de prueba de fluencia y determina los valores de los parametros n , μ y $T\sigma_m^n$.

2.10 Formulación para los problemas de fluencia.

Los componentes del tensor de deformación se descomponen en valores plásticos, contribuciones de fluencia y termoelástico por ejemplo:

$$e_{ij} = e_{ij}^e + \alpha T \delta_{ij} + e_{ij}^p + e_{ij}^c \quad (2.24)$$

Esto se convierte en seis ecuaciones independientes, cada una con su propia contribución. La deformación elástica por la Ley de Hooke es;

$$e_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij}}{2G} \quad (2.25)$$

Lo anterior genera seis ecuaciones adicionales.

La deformación plástica, una vez que el cuerpo alcanza el punto de cedencia, la deformación plástica se incrementa:

$$de_{ij}^P = \frac{3}{2} \frac{de_e^P}{\sigma_e} \sigma_{ij}'' \quad (2.26)$$

Donde:

$$de_e^P = \sqrt{\frac{2}{3} de_{ij}^P de_{ij}^P} \quad (2.27)$$

Junto con la curva de esfuerzo-deformación experimental $e_e^P = e_e^P(\sigma_e)$, dejando un conjunto de siete ecuaciones.

Finalmente la deformación por fluencia esta dada por la regla de flujo de fluencia

$$\dot{e}_{ij}^c = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_e^c}{\sigma_e} \sigma_{ij}' \quad (2.28)$$

Con la curva de fluencia experimental $e_e^c = e_e^c(\sigma_e, T, t)$; se crean otras siete ecuaciones.

Estas ecuaciones deben ser combinadas juntos con las ecuaciones mecánicas de equilibrio.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad (2.29)$$

Al considerar la relación deformación-desplazamiento, se tiene:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u_i}{x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \quad (2.30)$$

Y la ecuación de energía:

$$H = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.31)$$

Las tres ecuaciones de equilibrio junto con las seis de desplazamiento-deformación y las ecuaciones de energía producen diez ecuaciones adicionales.

Las definiciones de esfuerzo efectivo, incremento efectivo de deformación plástica y el incremento efectivo de deformación por fluencia dan origen a tres ecuaciones más y las ecuaciones constitutivas de los componentes deviatorios de esfuerzo y deformación generan doce relaciones adicionales.

Existe un total de cincuenta ecuaciones que para determinar los 51 valores desconocidos $e_{ij}, e_{ij}^e, e_{ij}^p, e_{ij}^c, e'_{ij}, \sigma_{ij}, \sigma'_{ij}$ (seis de cada uno), u_i (tres) y $T, de_e^p, de_e^c, e_e^p, e_e^c, \sigma_e$ (una de cada una).

En la práctica la solución de este tipo de problemas actuales también requieren condiciones iniciales y de frontera específicos.

2.11 Modelos propuestos. [23,25,26]

2.11.1 Modelo de Maxwell.

Considera el comportamiento de un modelo viscoelástico, descrito por un componente elástico y uno viscoso acoplados en serie. Al aplicar una fuerza, este se comporta en forma dual, por un lado ofrecer una deformación o alargamiento instantáneo definido por la Ley de Hooke, y su respuesta se produce de manera instantánea y no se afecta por el tiempo. Por otro lado en la respuesta viscosa, la deformación aumenta con el tiempo según la Ley de Newton. En este sentido, la variación de la deformación con el tiempo es proporcional a (σ/η) .

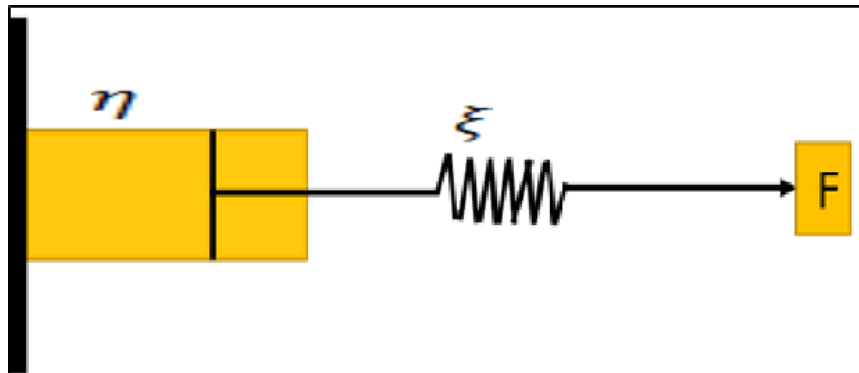


Fig. 2. 2 Modelo reológico de Maxwell.

Dado los componentes acoplados en serie, la deformación total del material (ϵ) es la suma de la deformación elástica (ϵ_1) y viscosa (ϵ_2).

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (2.32)$$

Ambas tensiones, son un efecto al estar conectados en serie.

CAPÍTULO 2 MODELOS DE FLUENCIA PROPUESTOS.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.33)$$

Si se deriva la ecuación de deformación con respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (2.34)$$

Al analizar las ecuaciones del elemento elástico y viscoso se tiene:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{\xi} \frac{d\sigma_1}{dt} \quad (2.35)$$

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{1}{\eta} \sigma_2 \quad (2.36)$$

Donde:

ξ es la constante elástica y η la constante viscosa.

Sustituyendo y considerando que las tensiones son las mismas, se tiene la siguiente expresión general:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\xi} \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma_2 = \frac{1}{\xi} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \quad (2.37)$$

Si nos centramos en el caso de fluencia implicando que las tensiones son constantes ($\sigma = \sigma_0 = \text{cte.}$) entonces la derivada con respecto al tiempo se anula un termino quedando la expresión.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\eta} \sigma \quad (2.38)$$

CAPÍTULO 2 MODELOS DE FLUENCIA PROPUESTOS.

Integrando la ecuación (2.38) nos da una expresión lineal donde K, es la constante de integración, relacionado con la respuesta inmediata del Modelo de Maxwell y corresponde a la deformación del resorte y una tensión cte. (σ_0) de tal manera que tiene el valor (σ_0/ξ) demostrando la expresión:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\eta}\sigma \Rightarrow \int d\varepsilon = \int \frac{1}{\eta}\sigma dt \Rightarrow \varepsilon = t + k = \frac{\sigma_0}{\eta}t + \frac{\sigma_0}{\xi} \quad (2.39)$$

Gráficamente se considera como material viscoelástico que opera una tensión constante, con una deformación de respuesta inmediata debido al elemento elástico ($\varepsilon_0 = \sigma_0/\xi$) y una deformación lineal creciente con el tiempo debido a la respuesta viscosa ($\varepsilon = \sigma_0/t$) siendo la pendiente de la recta.

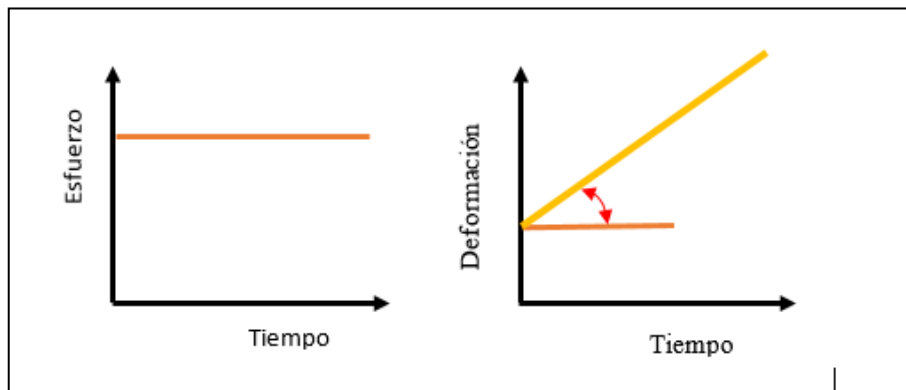


Fig. 2. 3 Representación gráfica del modelo de Maxwell

En relación a la fluencia el Modelo de Maxwell, es capaz de estimar la deformación elástica inicial pero la fluencia viscosa con el paso del tiempo también es lineal, lo cual no se ajusta a la realidad.

2.11.2 Modelo de Kelvin-Voigt.

Este modelo considera el comportamiento viscoelástico de un cuerpo descrito acoplado a un medio viscoso y un resorte en paralelo.

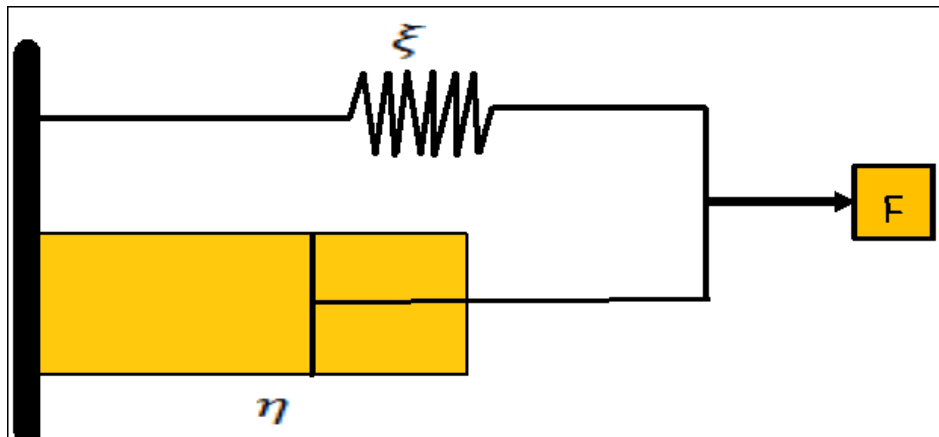


Fig. 2. 4 Modelo reológico de Kelvin-Voigt.

En esta configuración, hay que tener en cuenta que al aplicar una fuerza, parte de la energía la almacena el resorte y el resto se disipa progresivamente al desplazarse el émbolo, lo que genera una deformación que depende del tiempo. Al momento que cesa la carga se recupera la forma original en función de la energía que queda almacenada en el resorte, más no la que se almacena en el émbolo.

Existen dos condiciones para el modelo de Kelvin-Voigt. Por una parte las tensiones soportadas por el material son la suma de la tensión en el muelle (σ_1) y la tensión del

émbolo (σ_2), y por otra la deformación de los dos elementos es idéntico dado que están conectados en paralelo:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.40)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2.41)$$

Tomando en cuenta la variable de tiempo y despejando la tensión de la parte elástica, (Ley de Hooke) y la parte viscosa (Ley de Newton), se obtiene la expresión general del modelo:

$$\sigma = \xi \varepsilon_1 + \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \xi \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.42)$$

Si se estudia la validez del modelo en un fenómeno a largo plazo como lo es la fluencia ($\sigma = \sigma_0 = \text{cte.}$) en la expresión general del modelo no se anula ningún término. Se trata de una ecuación diferencial cuya solución es dada por la ecuación:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\xi} \left(1 - e^{-\frac{\xi}{\eta t}}\right) \quad (2.43)$$

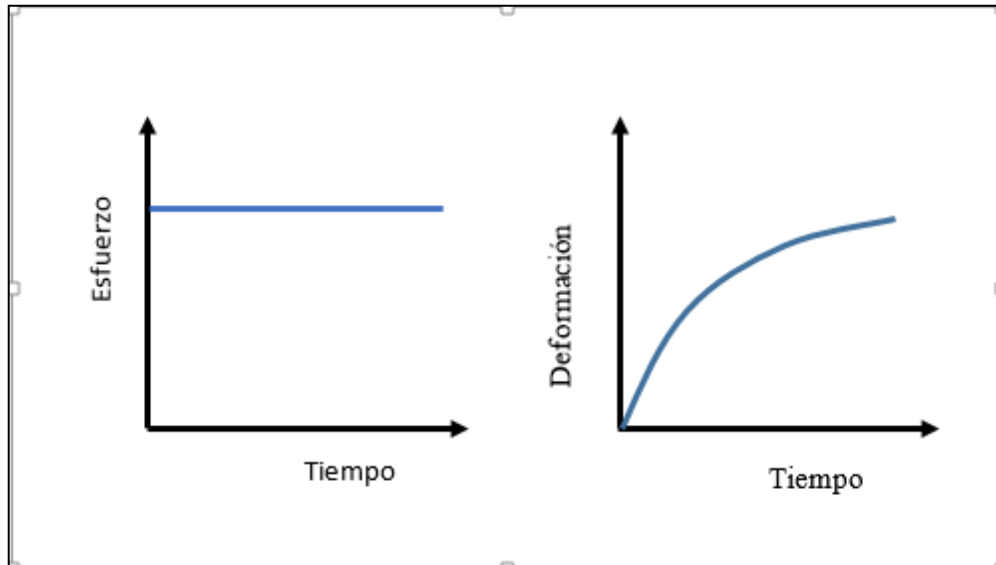


Fig. 2. 5 Representación gráfica del modelo de Kelvin-Voigt.

En términos generales, el Modelo de Kelvin-Voigt explica en forma satisfactoria el comportamiento real de la fluencia, teniendo en cuenta una fluencia de tipo exponencial en función del tiempo.

2.11.3 Modelo de Burger.

Es un modelo combinado. Al estar acoplado en serie el modelo de Maxwell y el de Kelvin-Voigt, la deformación total (ϵ) es la suma de las deformaciones correspondientes al modelo de Maxwell (ϵ_M) y la resultante del modelo de Kelvin (ϵ_{KV}).

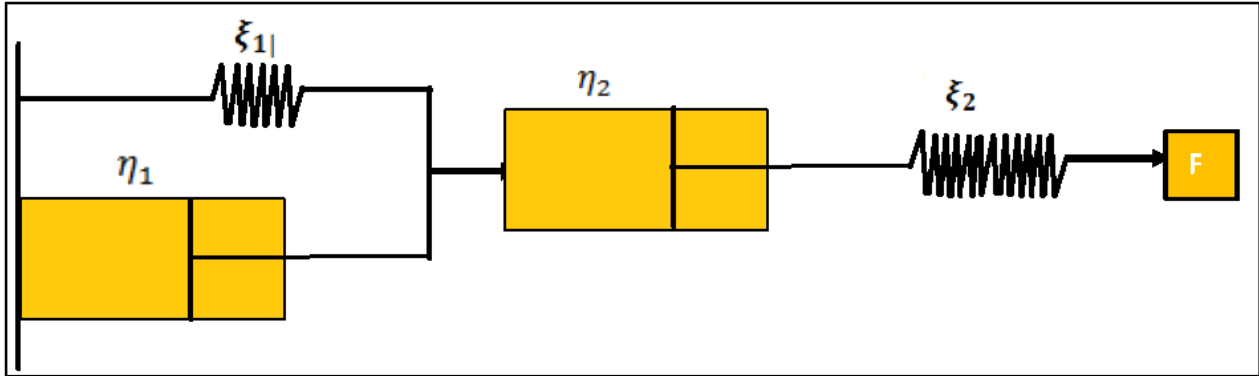


Fig. 2. 6 Modelo reológico de Burger.

Así al tener en cuenta la deformación con el tiempo en cada uno de los modelos es posible aproximar la deformación total al modelo según la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_{KV}. \quad (2.44)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\xi_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} t + \frac{\sigma_0}{\xi_{KV}} (1 - e^{-\xi_{KV}/\eta_{KV} \cdot t}). \quad (2.45)$$

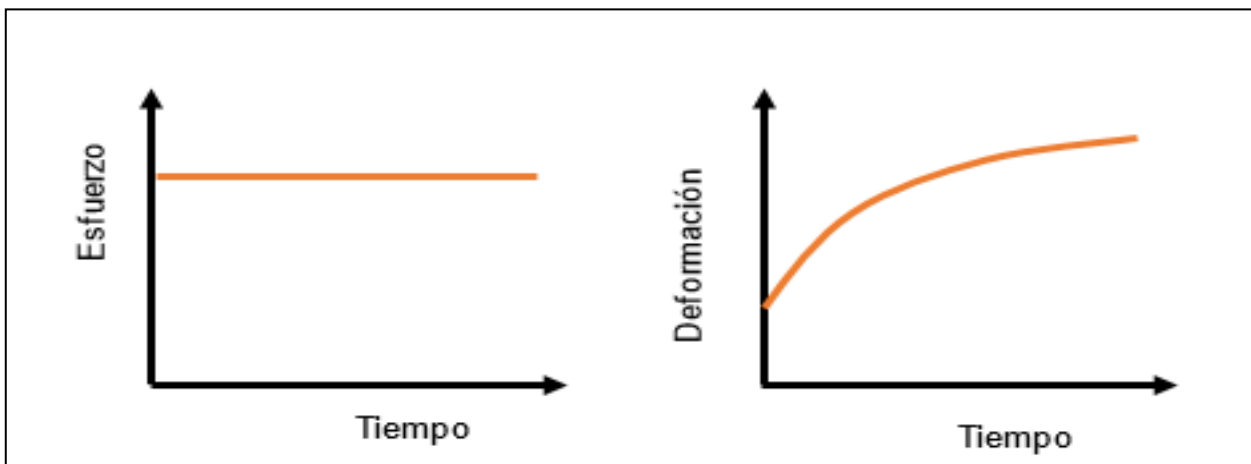


Fig. 2. 7 Representación gráfica del modelo de Burger.

2.11.4 Modelo de Zener ^[27].

También se conoce como modelo viscoelástico lineal estándar que proporciona una mejor descripción de los modelos viscoelásticos reales y este modelo se define por la siguiente ecuación:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\xi_2}{\eta(\xi_1 + \xi_2)} \left(\frac{\eta}{\xi_2} \dot{\sigma} + \sigma - \xi_1 \varepsilon \right). \quad (2.46)$$

Un modo de aunar las virtudes y resolver los defectos que los ensayos de los Modelos de Maxwell y Kelvin consiste en ensayar la combinación de ambos, que es lo que logró el Modelo de Zener al describir los fenómenos de fluencia y relajación de esfuerzos.

Para las condición de esfuerzo constante, el modelo es:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\xi_1} \left[1 - \frac{\xi_2}{\xi_1 + \xi_2} e^{\left(-\frac{\xi_1 \xi_2}{\eta(\xi_1 + \xi_2)} t \right)} \right] \quad (2.47)$$

Mientras que en una deformación constante, se tiene:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left[\xi_1 + \xi_2 e^{\left(-\frac{\xi_2}{\eta} t \right)} \right] \quad (2.48)$$

El modelo de Zener bajo esfuerzo constante, el muelle que se conecta en serie al material viscoso no está sometido a esfuerzo, al tener la deformación en el material viscoso.

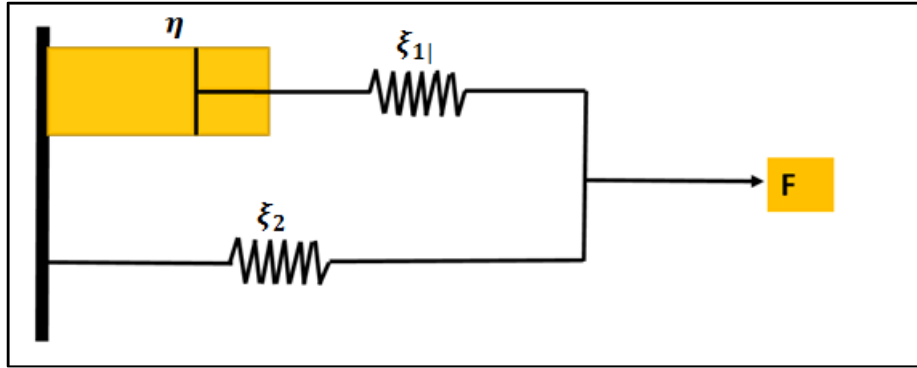


Fig. 2. 8 Modelo reológico de Zener.

Caso contrario al producir una recuperación instantánea en una parte de la deformación al retirar la carga, como se indica en la Fig. 2.9.

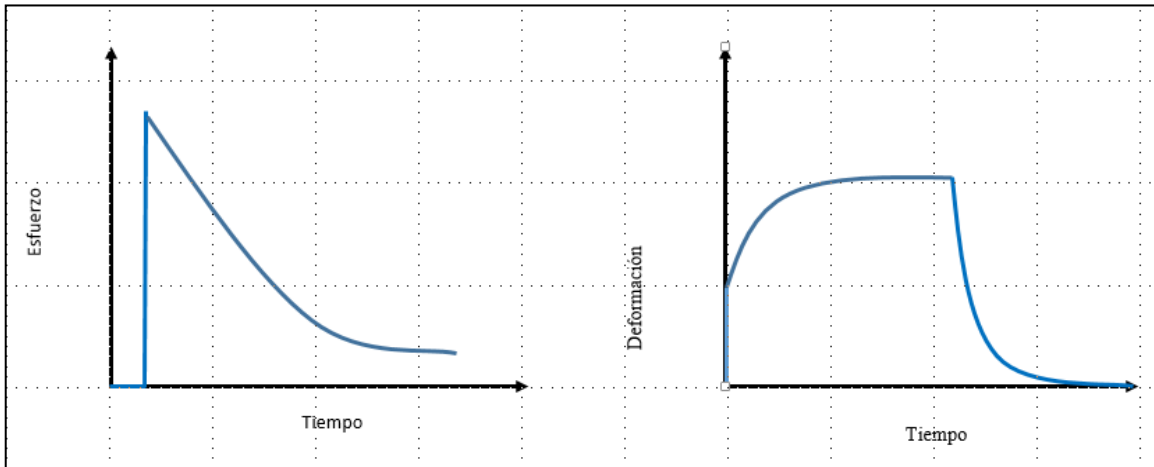
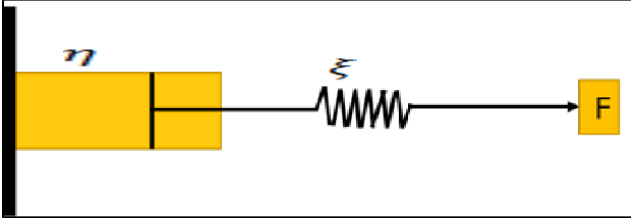
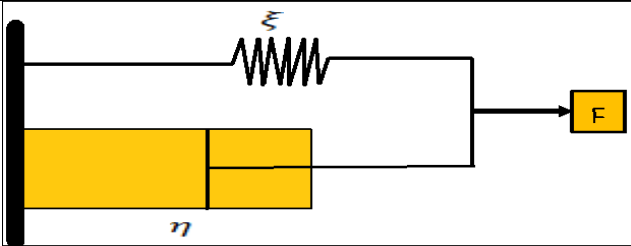
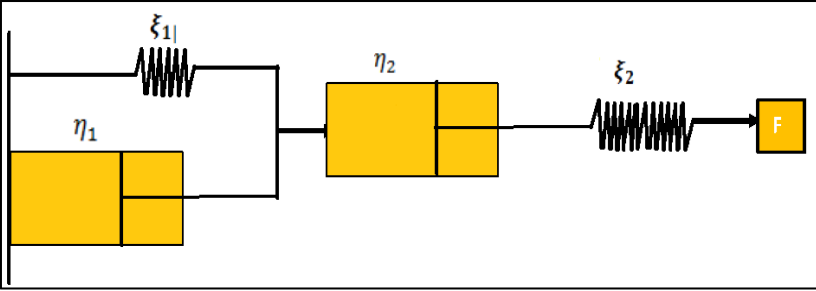
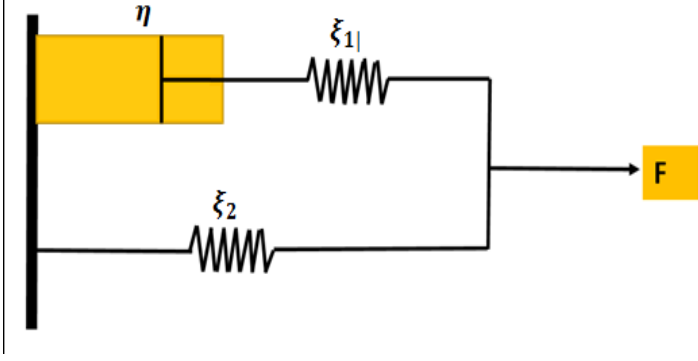
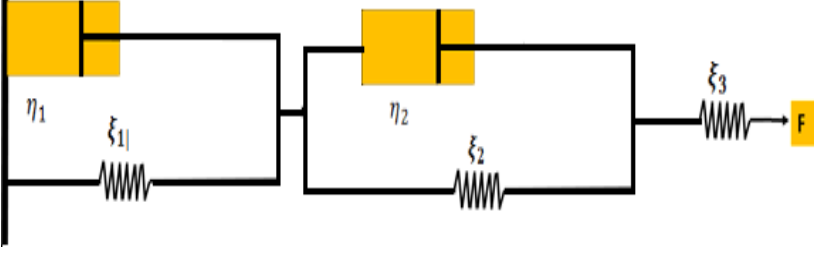


Fig. 2. 9 Representación gráfica del modelo de Zener.

En esta tesis se consideraran los siguientes modelos para el modelado de fluencia. (Tabla 2.1)

Tabla 2.1- Modelos propuestos para deformación por fluencia.

<p>Maxwell</p>		$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{\xi} + \frac{\sigma * t}{\eta}$
<p>Kelvin-Voigt</p>		$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\xi} (1 - e^{-\frac{\xi}{\eta t}})$
<p>Burger</p>		$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\xi_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} t + \frac{\sigma_0}{\xi_{KV}} (1 - e^{-\xi_{kv}/\eta_{kv} t}).$

<p>Zener</p>		$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\xi_1} \left[1 - \frac{\xi_2}{\xi_1 + \xi_2} e^{\left(-\frac{\xi_1 \xi_2}{\eta(\xi_1 + \xi_2)} t \right)} \right]$
<p>Zener Modificado</p>		$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{\xi_1} + \frac{\sigma}{\xi_2} \left[1 - e^{\frac{-\xi_2 t}{\eta_1}} \right] + \frac{\sigma}{\xi_3} \left[1 - e^{\frac{-\xi_3 t}{\eta_2}} \right]$

CAPÍTULO 3. ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA [15,39].

En este capítulo se plantea una estrategia de simulación numérica para el cual se recurre al análisis por el método de elemento finito, este análisis surgió a partir del método de elemento finito, que es una técnica numérica que permite resolver ecuaciones diferenciales parciales, el método se usa en la resolución de problemas de ingeniería del tipo estructurales, térmicos y eléctricos.

Este método numérico, encuentra una solución aproximada a la ecuación diferencial, donde se resuelve la solución de u y se puede describir de manera polinómica.

$$u \approx u_n \equiv \sum_{j=1}^n C_j \Phi_j(x) \quad (3.1)$$

Donde

- C_j = un coeficiente apropiado.
- Φ_j = la función apropiada.
- u = solución exacta.
- u_n = solución aproximada.

El método principal de solución es la discretización del área en el modelo (solución de dominio) en un número finito de elementos y cuya solución se calcula a partir de la interpolación de nodos.

Por lo tanto, el análisis de un elemento finito como se mencionó anteriormente se fundamenta en el método de elemento finito, con un sistema de puntos, una serie de nodos que componen un mallado, que representa un elemento en el análisis. Los nodos y elementos contienen propiedades de los materiales, propiedades mecánicas (como por ejemplo deformación y esfuerzo) u otras propiedades físicas. A través del análisis en base a nodos y elementos, el comportamiento mecánico u otro tipo de comportamiento físico calcula a través de equipos de cómputo.

El proceso de análisis por elemento finito se realiza a través de una serie de pasos, empezando con la creación de la geometría y aplicación de las propiedades del material, cargas y condiciones de frontera, como, por ejemplo, fuerza, presión o desplazamiento, que se aplica. Cuando existen diferentes fases o materiales la interacción o contacto entre cada uno también es definido, al final el comportamiento del nodo, mallado y estructura se pueden obtener a través del análisis por elemento finito.

El interés de la geomecánica por el análisis por elemento finito es el estudio del comportamiento de formaciones plásticas y establece el análisis de los perfiles de esfuerzo y deformación, así como el análisis de fluencia cuando este llegue a su límite de cedencia a partir de las cargas aplicadas. El modelo de fluencia que se presenta, en el análisis de elemento finito es la ley de potencia de fluencia con endurecimiento en función del tiempo.

$$\dot{\epsilon}^{cr} = Aq^n t^m \quad (3.2)$$

- $\dot{\epsilon}^{cr}$ = ritmo de deformación uniaxial equivalente.
- q = esfuerzo deviatorio uniaxial equivalente.
- t = tiempo total.
- A, n, m como se menciona anteriormente en el capítulo 2 de este trabajo, son las constantes de los materiales dependientes de la temperatura.

Para la simulación de fluencia, también se requieren los parámetros elásticos del módulo de Young (E) y relación de Poisson (ν), porque se considera que el elemento que presenta un comportamiento de fluencia también considera el comportamiento elástico.

A partir de la ley de potencia de fluencia con endurecimiento en función del tiempo se obtiene el tensor de deformación:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} S_{ij} A \sigma_e^{n-1} t^m \quad (3.3)$$

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} \quad (3.4)$$

$$J_2 = \frac{S_{ij} S_{ij}}{2} \quad (3.5)$$

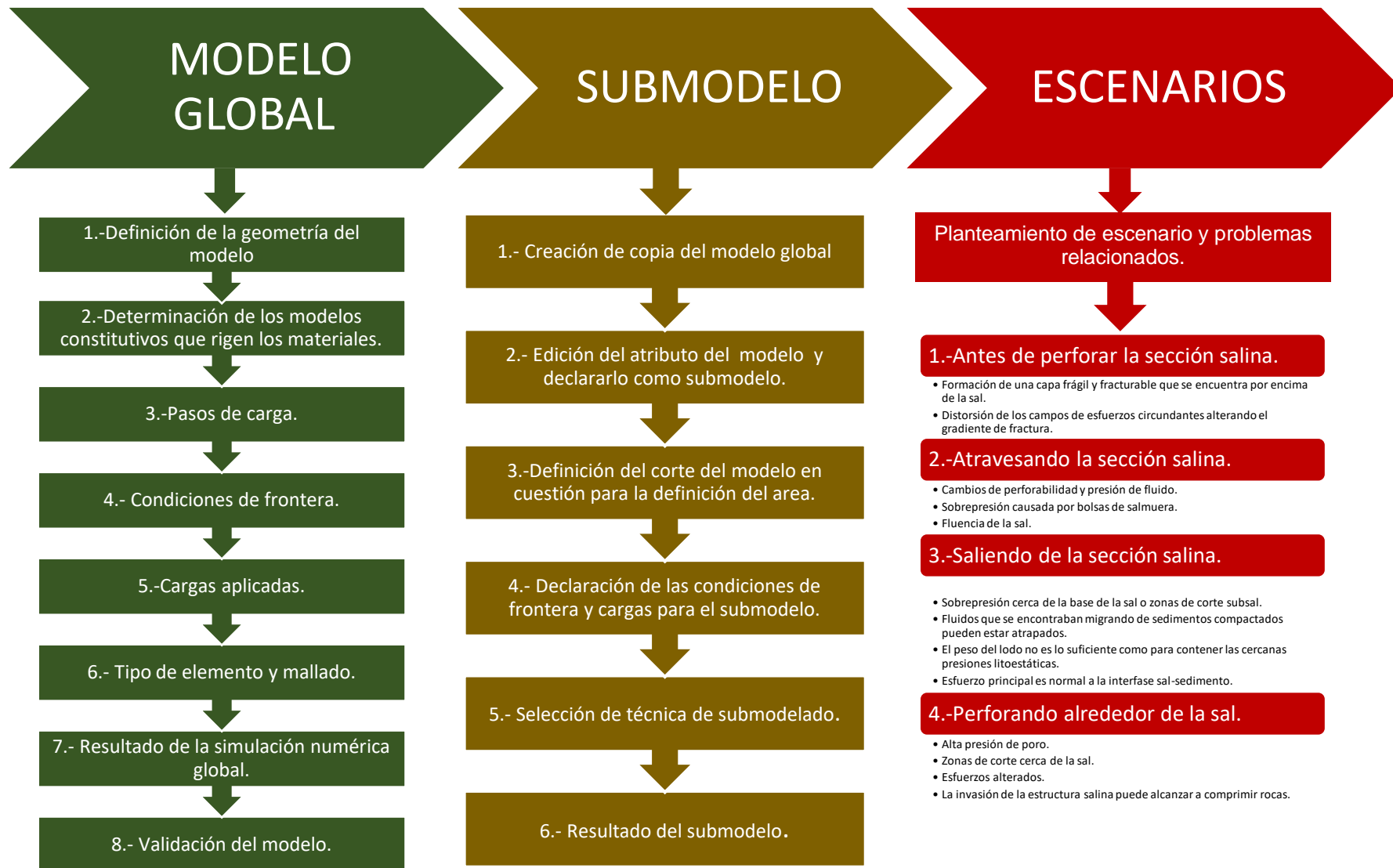
Donde

- $\dot{\epsilon}_{ij}$ = tensor de ritmo de deformación.
- S_{ij} = tensor de esfuerzo deviatorio.
- σ_e = esfuerzo equivalente de Von Mises.
- J_2 = segunda invariante del tensor de esfuerzos deviatorios.

Adicionalmente, se proponen otros modelos de fluencia tratados en el capítulo anterior.

Este capítulo, pretende desarrollar a través del software de análisis por elemento finito, la estrategia de simulación, donde se arranca a partir de la construcción de un modelo global, validar los resultados, el desarrollo de submodelos considerando el modelo para varios escenarios, dicha estrategia se ilustra en la figura. (fig. 3.1)

Fig. 3. 1 Estrategia general de simulación numérica.



3.1 Desarrollo del modelo global. [2,15,29,31,32]

Aunque no existe un procedimiento estándar en la literatura revisada, existen pasos en común y bajo esta consideración se plantea una estrategia para la construcción del modelo global que se va a ir explicando en este capítulo.

3.1.1 Definición de la geometría del modelo global.

Se pueden construir geometrías idealizadas, que incluye cuerpos esféricos, camas de sal, columnas de diapiros de sal con intercalaciones, etcétera; también se realizan varias permutaciones del modelo en cada caso ideal, así como también se construyen las geometrías reales a partir de datos sísmicos y exportando los datos de otros simuladores y/o software de aplicación específica.

Para la construcción de un modelo válido se tienen que distinguir los contactos superficiales, estas secciones son conocidas como “*watertight*”, lo que significa que los espacios en las intersecciones se encuentran sellados y no hay espacio libre entre cada uno, con ese ajuste se requiere definir la formación como un volumen cerrado y generar una superficie real geológicamente.

3.1.2 Determinación del modelo constitutivo que rigen los materiales.

A continuación, de la tabla 3.1, se describen los modelos que constituyen cada material y los parámetros que definen cada modelo.

Tabla 3.1 Modelos constitutivos.		
Material	Modelo constitutivo	Parámetros
Elástico	Ley de Hooke.	Módulo de Young.
		Relación de Poisson.
Poroelástico	Modelo de Biot.	Límite de tensión elástica.
		Módulo de densidad logarítmica.
Plástico	Mohr-Coulomb plasticidad.	Angulo de fricción.
		Angulo de dilatación.
		Deformación plástica absoluta.
		Esfuerzo de cedencia de cohesión.
	Drucker-Prager.	Angulo de fricción.
		Relación de flujo de esfuerzo.
Angulo de dilatación.		
Fluencia	Ley de potencia de endurecimiento por deformación.	Multiplicador de la ley de potencia.
		Orden de los esfuerzos.
		Orden del tiempo.
	Ley de potencia por endurecimiento en función del tiempo.	Multiplicador de la ley de potencia.
		Orden de los esfuerzos.
		Orden del tiempo.
Multiplicador de la ley hiperbólica.		

Fluencia	Ecuación del seno hiperbólico.	Orden de esfuerzos.
		Energía de activación.
		Constante universal de los gases.
	Modelo de Kelvin.	Esfuerzo inicial.
		Constante elástica.
		Constante viscosa.
		Tiempo.
	Modelo de Maxwell	Esfuerzo.
		Tiempo.
		Constante viscosa
		Constante elástica.
	Modelo de Burgers	Esfuerzo inicial.
		Constante elástica del modelo de Maxwell.
		Constante elástica del modelo de Kelvin.
		Constante viscosa del modelo de Maxwell.
		Constante viscosa del modelo de Kelvin.
		Tiempo.
	Modelo de Zener.	Esfuerzo inicial.
		Constante elástica 1.
		Constante elástica 2.
		Constante viscosa.
Tiempo.		
Modelo de Zener modificado.	Constante elástica 1.	
	Constante elástica 2.	
	Constante elástica 3.	
	Constante viscosa 1.	
	Constante viscosa 2.	
	Tiempo.	
	Esfuerzo.	

3.1.3 Condiciones de frontera ^[33,37].

Las condiciones de frontera se usan para especificar las variables básicas de la solución (desplazamiento, rotación, amplitudes, etcétera), en los límites de los nodos del cuerpo.

3.1.3.1 Tipos de condiciones de frontera.

3.1.3.1.1 Frontera “Type”.

Este tipo de condición de frontera puede ser especificado a través de los grados de libertad que se requieran para el modelo.

Existen las siguientes condiciones:

- XSYMM simetría en el plano X.
- YSYMM simetría en el plano Y.
- ZSYMM simetría en el plano Z.
- ENCASTRE totalmente empotrado.
- PINNED fijado.
- XASYMM antisimétrico del plano X.
- YASYMM antisimétrico del plano Y.
- ZASYMM antisimétrico del plano Z.

3.1.3.1.2 Formato directo.

Especifica la región del modelo al cual la condición de frontera aplica, el grado o los grados de libertad a ser especificados y la magnitud de la condición de frontera, si la magnitud se omite se considera cero. Por ejemplo, existen los siguientes:

- Presión de poro.
- Temperatura.
- Presión de cavidad de fluido.

En análisis de esfuerzo/desplazamiento, se puede especificar la velocidad o la aceleración.

3.1.4 Pasos de carga.

El paso de carga o “*step*” permite resolver mediante divisiones del historial de problema en distintos pasos, el paso depende de cualquier fase en el historial del problema dependiendo de análisis que se haga, por ejemplo, análisis termal, análisis de fluencia, análisis dinámico, etcétera.

Cada paso de carga incluye el tipo de análisis a ser desarrollado por datos históricos, así como cargas, condiciones de frontera y datos de salida.

3.1.4.1 Incremento de los pasos de carga.

Cada paso de carga en el análisis se divide en múltiples incrementos, en el cual se selecciona de acuerdo con el tipo de problema sea automático o incrementos especificados por el usuario, aunque comúnmente se seleccionan los incrementos automáticos, al momento de resolver problemas no lineales es necesario iterar cuantas veces sea necesario, dependiendo de la severidad de la no linealidad presente en el problema. Cabe destacar que el simulador posee la opción de selección llamado NLGEOM que permite indicar que toda no linealidad debe ser tomada en cuenta.

Se define el número máximo de incrementos, si el número máximo de incrementos en un solo ciclo de carga puede llegar a una solución, no se llega si se tiene solo el número de incrementos menor al necesario, dado que esto se detiene antes de llegar a la solución.

3.1.4.2 Paso geoestático.

El paso geoestático se usa para verificar si el campo de esfuerzo se encuentra en equilibrio con sus cargas aplicadas y las condiciones de frontera, este parámetro es relevante cuando hay regiones en el modelo acoplados a elementos con presión de poro-temperatura. También es necesario especificar en este paso si existe o no temperatura.

3.1.4.3 Paso estático.

Después del paso geoestático, se presenta el paso estático que es el paso general para este tipo de simulaciones que se utiliza cuando solamente el paso pide las cargas aplicadas y las condiciones de frontera para la resolución del paso, que es justo los datos que se tienen agregados.

3.1.4.4 Paso de suelos.

El paso de suelos (*soils*) se usa con objeto de especificar la respuesta de un análisis transitorio o estacionario en un medio poroso saturado o semisaturado de fluidos.

3.1.4.5 Paso visco.

Opción que se usa para obtener una respuesta estática transitoria en el análisis de comportamiento de material dependiente del tiempo.

3.1.5 Mallado y tipos de elemento. ^[33-37]

3.1.5.1 Acerca de los elementos.

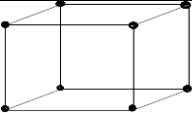
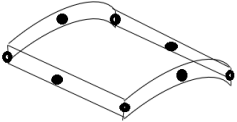

En el simulador de elemento finito, existen cinco aspectos que caracterizan su comportamiento.

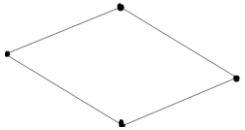
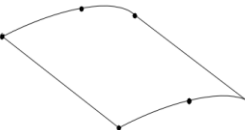
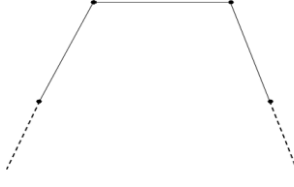

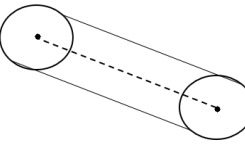
1. Familia
2. Grados de libertad
3. Número de nodos
4. Formulación
5. Integración

Cada elemento tiene su nombre único, como por ejemplo T2D2 o C3D8R.

3.1.5.2 Familia.

La siguiente tabla indica el tipo de elementos que se emplean en el software de elemento finito.

Tabla 3.2 Tabla de elementos.	
Dibujo.	Tipo de elemento.
	Elementos continuos (<i>continuum</i>). Sólidos y fluidos.
	Elemento de coraza (<i>Shell</i>).
	Elemento de viga (<i>Beam</i>).

	<p>Elemento rígido (<i>Rigid</i>).</p>
	<p>Elemento de membrana (<i>Membrane</i>).</p>
	<p>Elemento infinito (<i>Infinite</i>).</p>
	<p>Elemento conector (<i>Connector</i>) (por ejemplo, resortes o pistón).</p>
	<p>Elemento de armazón (<i>Truss</i>).</p>

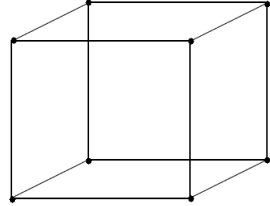
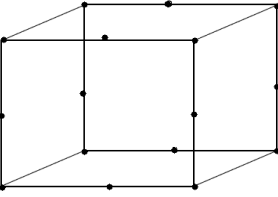
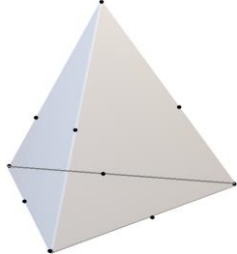
La primera letra o letras del nombre del elemento indican a que familia pertenecen. Por ejemplo, C3D8R, indica que es un elemento continuo (continuum); el nombre del elemento es el que se encuentra entre paréntesis ya que es el nombre del elemento en inglés.

3.1.5.3 Grados de libertad.

Los grados de libertad son variables fundamentales calculadas durante el análisis, para una simulación de esfuerzo y desplazamiento los grados de libertad son la traslación.

3.1.5.4 Número de nodos y orden de interpolación.

El desplazamiento o los grados de libertad se calculan en los nodos del elemento, en cualquier otro punto del elemento, los desplazamientos se obtienen por la interpolación de los desplazamientos nodales. Usualmente el orden de interpolación se determina por el número de nodos usados en el elemento, por ejemplo (tabla 3.3).

Tabla 3.3 Ejemplo de tipos elementos.		
	<p>Elemento lineal Ejemplo: Cubo de 8 nodos (<i>8-node brick</i>) C3D8</p>	<p>Interpolación lineal. Son comúnmente llamados elementos lineales o elementos de primer orden.</p>
	<p>Elemento cuadrático Cubo de 20 nodos (<i>20 node brick</i>, C3D20).</p>	<p>Interpolación cuadrática comúnmente llamado elemento cuadrático o elemento de segundo orden.</p>
	<p>Elemento de segundo orden modificado. Tetraedro de 10 nodos. (<i>10-node tetrahedron</i>, C310M)</p>	<p>Elementos triangulares o tetraédricos usan interpolación de segundo orden modificado.</p>

Típicamente el número de nodos es fácil de identificar en el nombre del elemento por ejemplo el elemento de 8 nodos es llamado C3D8 y la coraza de 4 nodos es llamado S4R.

3.1.5.5 Formulación.

La formulación de los elementos se refiere a la teoría matemática usada para definir el comportamiento de los elementos. En este caso se recurre al método de Lagrange que describe el comportamiento de la deformación del material, y el método Euleriano se usa comúnmente en las simulaciones de mecánica de fluidos.

3.1.5.6 Integración.

El software de análisis de elemento finito usa varias técnicas numéricas sobre el volumen de cada elemento, permitiendo una proyección general en el comportamiento del material una de las técnicas de mayor aplicación es el método cuadrático Gaussiano que aplica para la mayoría de los elementos y con él se evalúa la respuesta del material.

Algunos elementos continuos (*continuum*) pueden usar integración completa o reducida, esta decisión de integración afecta en la precisión del material para el problema dado, en el nombre del elemento se usa la letra R al final de él para declarar el elemento como de integración reducida.

3.1.5.7 Mallado.

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos, dos nodos adyacentes pertenecen al mismo elemento finito y estos pueden pertenecer a varios elementos, al conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se le conoce como malla. El refinamiento de la malla o remallado implica generar una malla que se aproxime de manera consecutiva a la verdadera forma final del elemento en estudio.

3.1.5.7.1 Técnicas adaptativas de remallado.

La optimización y calidad de la malla tienen una fuerte influencia en el análisis numérico y en su resultado, cuando el mallado se distorsiona o se vuelve más fino por efecto de los requisitos del análisis en algunas áreas del cuerpo. Existen tres técnicas adaptativas para el mallado:

- ALE (*Arbitrary Lagrangian Eulerian adaptive meshing*) mallado adaptativo euleriano lagrangiano arbitrario.
- Remallado adaptativo.
- Solución de mapeo malla a malla.

Mallado adaptativo ALE.

Se usa para tratar la distorsión del mallado, la idea es ajustar los nodos del elemento, pero sin cambiar su topología cuando el elemento se distorsiona durante la etapa de análisis.

Remallado adaptativo.

Se usa para incrementar la precisión en la solución y su efectividad en el análisis de elemento finito, la idea principal es hacer más fino el mallado cuando el modelo presenta un grueso mallado y no tiene alta precisión. Este método es útil cuando la geometría de la estructura tiene una región particular con un comportamiento distinto y por lo tanto puede tener mayor precisión.

Solución de mapeo malla a malla.

Este método se usa para controlar la distorsión del mallado, la diferencia entre este método y el método ALE, es que este método reemplaza el mallado y el análisis continuo, cuando ocurren grandes deformaciones este método se usa para resolver los problemas de distorsión.

A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume las características de las técnicas de mallado.

Tabla 3.4 Tabla comparativa de las tres técnicas adaptativas de remallado.		
Técnica de remallado	Uso en el modelado.	Remallado ocurre cuando...
Método ALE	Control de la distorsión del mallado.	Dentro de un paso del análisis.
Remallado adaptativo	Incremento de la precisión.	Dentro de un paso del análisis.
Solución de mapeo malla a malla.	Control de distorsión de mallado.	Entre dos pasos del análisis.

3.1.6 Cargas aplicadas ^[33,37].

3.1.6.1 Tipos de cargas.

3.1.6.1.1 Basado en elementos.

Se usa a fin de definir las cargas distribuidas en la superficie de los elementos, con estas se debe proveer el número de elementos y su distribución, este identifica el tipo y la carga del elemento con el cual está hecha.

3.1.6.1.2 Basada en superficies.

Se usa en carga de superficie para prescribir la distribución de estos en una superficie geométrica o esquina geométrica, este método se facilita en los modelos geométricos complejos.

3.1.6.2.3 Cargas predefinidas.

Las cargas predefinidas son condiciones iniciales con valores diferentes a cero, no dependen de una solución, donde se introducen los siguientes valores:

- Temperatura.
- Variables de campo.
- Flujo de masa.
- Presión de poro.
- Relación de vacío.

3.1.7 Validación del modelo global.

3.1.7.1 Validación del modelo mediante un modelo 1D ^[38].

La validación mediante un modelo 1D es realizar el análisis de los gradientes de fractura tanto normal como el de corte en una ventana operativa, para los cálculos de estos gradientes es necesario de un software que permita el cálculo de geopresiones en donde se tienen que realizar los siguientes pasos para los cálculos:

1. Cálculo del gradiente de sobrecarga.
2. Determinar el gradiente de fractura, que es el esfuerzo horizontal mínimo.
3. Determinación del esfuerzo horizontal máximo.
4. Determinación de los parámetros de esfuerzo que son cohesión y ángulo de fricción interna (en dado caso que se use el modelo de Mohr-Coulomb.).

La presión de poro propuesta presenta un valor estático en la que no hubo variación en relación al tiempo, así como la presión hidrostática se rige por el fluido que en casos prácticos se considera el agua.

En ninguno de los dos casos se considera el agotamiento de la presión de poro dado que el objetivo del análisis es la estabilidad de pozo.

3.1.7.2 Validación mediante soluciones analíticas ^[7].

La solución analítica es una expresión matemática que proporciona la información sobre el comportamiento del sistema, para cualquier valor de variables y parámetros que intervienen en las ecuaciones de gobierno.

Existen una cantidad considerable de soluciones analíticas que permiten conocer el comportamiento del fenómeno de la fluencia, para la validación de este modelo se utiliza las soluciones mencionadas en la tabla 3.5 donde se pueden corroborar los resultados obtenidos por la simulación.

Tabla 3.5 Soluciones analíticas.	
Solución.	Ecuación.
Analítica de Kelvin.	$u(t) = \frac{1+\nu}{E} (p_0 - p_w) \frac{R^2}{r} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t}\right)$
Analítica de Maxwell.	$u(t) = (1 + \nu)(p_0 - p_w) \frac{R^2}{r} \left(\frac{1}{E} + \frac{t}{\eta}\right)$
Solución de cierre de agujero para modelo elastoplástico de Van Mises.	$\dot{u} = \frac{du_r}{dt} = \frac{(\sqrt{3})^{n+1}}{2n^n} A e^{-\frac{B}{T}} (p_0 - p_w)^n \left(\frac{R}{r}\right)^2 r$
Ritmo de desplazamiento radial de fluencia en agujero para Mohr-Coulomb.	$u_r = A e^{-\frac{B}{T}} \left[(1 - N)p_0 + (p_0 - p_w) \frac{(N - 1)n + N_p + 1}{n} \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{N_p+1}{n}} \right]^n r$
Ritmo de desplazamiento radial de fluencia en agujero para Van Mises.	$u_r = \frac{du_r}{dt} = \frac{\sqrt{3}^{n+1}}{2n^n} A e^{-\frac{B}{T}} (p_0 - p_w)^n \left(\frac{R}{r}\right)^2 r$
Formulaciones de Bradley.	$\sigma_r = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta$ $+ \tau_{xy} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + p_w \frac{R^2}{r^2}$

$$\sigma_{\theta} = \left[\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right] \left[1 + \frac{R^2}{r^2} \right] - \left[\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right] \left[1 + \frac{3R^4}{r^4} \right] \cos 2\theta$$

$$- \tau_{xy} \left[1 + \frac{3R^4}{r^4} \sin 2\theta - p_w \frac{R^2}{r^2} \right]$$

3.2 Construcción del submodelo.

La construcción del submodelado es un proceso sencillo en el cuál los datos, condiciones y resultados se toman del modelo global, solo es necesario la adición de dos factores más para que el submodelado se ejecute correctamente.

El primer paso es crear una copia del modelo global y dentro de la copia determinar las secciones a submodelar.

El segundo paso es simplemente declarar el submodelo como tal en las secciones de campos predefinidos y condiciones de frontera, solo se añade una nueva condición de frontera y un nuevo campo predefinido, en ambos se presenta la opción de “submodelo”. Se crea un nuevo trabajo y el submodelo se ejecuta de manera normal.

3.2.1 Selección de técnica de submodelado.

3.2.1.1 Submodelado por superficie.

La selección del submodelado por superficie es más útil cuando la simulación si controla por cargas y existen cambios de rigidez entre el modelo y el submodelo, cuya rigidez cambia por las propiedades del material o por su geometría.

3.2.1.2 Submodelado por nodos.

En otros casos la técnica basada en el nodo da resultados similares, sin meter problemas numéricos, debido a los cuerpos de modelo rígido, los largos desplazamientos y rotaciones son más precisos en el submodelado que se basa en nodos.

3.3 Escenarios ^[15,28].

A continuación, se presentan los aspectos más importantes de los escenarios y su problemática que existen en la presencia de sal y detalles a considerar para su simulación. (fig. 3.1)

3.3.1 Perforando antes de la sal.

Existen dos problemas relacionados con la perforación antes de llegar a la sección salina, el primero es la formación de una capa frágil y fracturada que se encuentra de inmediato por encima de la sal y segundo en la sección salina, que altera y distorsiona los campos de esfuerzos circundantes y altera potencialmente el gradiente de fractura.

El primer problema de la capa frágil es que típicamente es la más vieja y mejor cementada que otras litologías supra-sal, especialmente si estos contienen rocas carbonatadas por lo tanto son más propensos a fracturarse, dichas fracturas suelen ser un problema si estos tienen fluidos sobrepresionados, lo que ocasiona incrementos de presión en el pozo, también las fracturas pueden generar problemas de pérdida de circulación del lodo de perforación.

El segundo problema que se genera es debido a la estructura de la sal, por ejemplo, en un cuerpo salino intrusivo la cresta de la estructura salina se encuentra típicamente en extensión, disminuyendo los esfuerzos horizontales, si no se alcanza a distinguir los problemas relacionados con la reducción de los esfuerzos horizontales, el peso del lodo puede exceder el gradiente de fractura lo que genera y en consecuencia pérdidas de circulación.

En contraste la sección inferior de la estructura salina que se encuentra en compresión, lo que aumenta el esfuerzo horizontal mínimo en donde desde una perspectiva de esfuerzos es mejor perforar en los sinclinales salinos que por los anticlinales salinos.

3.3.2 Atravesando la sección salina.

El escenario sobre el análisis de la perforación a través de una sección salina, donde se tienen problemas de cambios de perforación, sobrepresión ocasionada por las bolsas de salmuera, tendencia de los pozos al desvío debido a los esfuerzos anisotrópicos en la sal y al problema más importante que es la fluencia que genera el cierre del agujero, este problema se analiza mediante la fluencia, a fin de generar un análisis de la fluencia mediante la simulación del análisis de elemento finito se requieren seguir en tres pasos que se indican en la fig. 3.2:

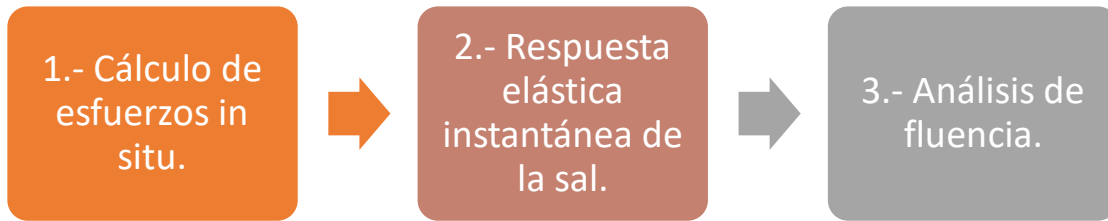


Fig. 3. 2 Etapas en el análisis de fluencia.

Las etapas 2 y 3 ocurren durante la perforación, la respuesta elástica instantánea de la sal se presenta en el momento de perforar la sección salina e inmediatamente comienza a actuar el fenómeno de la fluencia y comienza el cierre de agujero que se genera por dicho fenómeno.

3.3.3 Saliendo de la sección salina.

Al momento de abandonar la sección salina, el pozo pasa instantáneamente de un ambiente simple teniendo esfuerzos isotrópicos y sin presión de fluidos hacia un ambiente de esfuerzos sin conocer, presión de fluido y las propiedades del material. Los problemas comunes al momento de salir de la zona salina pueden incluir altas sobrepresiones cerca de la base de sal, o zonas de corte subsal, encuentros con bitúmenes móviles y la rotación de esfuerzos. Al ser la sal impermeable bajo la mayoría de las condiciones, los fluidos que se encontraban migrando de sedimentos compactados suelen ser atrapados por debajo de la capa horizontal de sal. La presión de los fluidos en esta zona se aproxima a la presión litoestática, el problema radica de manera común por debajo de los pliegues de sal, los cuales están emplazados rápidamente cerca de la superficie los sedimentos sin compactar. La perforación se complica por la presión del fluido disminuye por debajo de la base de

sal (regresión de presión), así que el peso del lodo es lo suficiente como para contener la presión litoestática cercana en la base de sal que se inyecta en la formación más abajo.

Los bitúmenes móviles son comunes por debajo de la base de la sal, especialmente debajo de los pliegos de sal, en diversos casos el bitumen se encuentra de manera inmediata al salir o cerca de la base de la sal. En otras instancias, el bitumen se ha perforado por cientos o miles de metros.

En ausencia de la zona de corte en la base de sal, la interfase sal-sedimentos asumen ser una superficie de esfuerzo de corte nulo, por lo tanto, los ejes de los esfuerzos principales deben rotar por lo que uno de los principales esfuerzos es normal a la interfase, esto se debe a la ausencia en el deslizamiento a lo largo del contacto que tiene esfuerzo de corte nulo.

Por ejemplo, una esfera viscoelástica de sal se relaja entre los sedimentos elásticos, uno de los esfuerzos principales es normal al contacto. (fig. 3.3). Los pozos perforados en dirección al ángulo de los ejes normales esta sujeto a los esfuerzos de corte complicando aún más la situación.

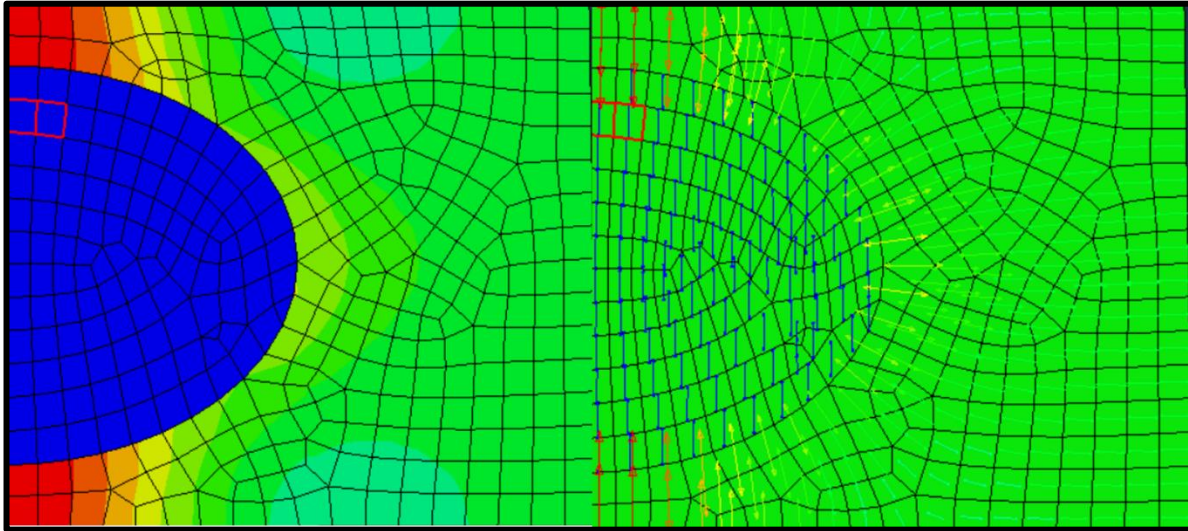


Fig. 3. 3 intrusión del cuerpo salino (azul) en el cuerpo elástico, del lado derecho se nota la orientación de los esfuerzos perpendiculares a la superficie donde se va presentando la intrusión de la sal.

3.3.4 Perforando alrededor de la sal.

Los diapiros de sal tienden a levantarse y expandirse hacia los sedimentos, creando un ambiente abundante con riesgos de perforación. Los diapiros de sal no son tan problemáticos como un subsal, debido a que la perforación en los flancos de sal no involucra normalmente una transición abrupta de la previsibilidad de la intrasal hacia sedimentos adyacentes variables. Sin embargo, en los costados de la sal tienen una larga lista de problemas en la perforación, incluyendo sedimentos fuertemente deformados, alta presión de poro, zonas de corte cerca de la sal y alteración de esfuerzos.

Diversos factores se combinan al alterar los esfuerzos alrededor de las estructuras salinas. Primero la sal mecánicamente es un fluido, lo cual significa que los esfuerzos se relajan a ser casi isotrópicos dentro de la sal, para estructuras como

domos o paredes, los esfuerzos isotrópicos se encuentran cerca de los valores de la presión de sobrecarga, por lo tanto estos empujan los demás sedimentos cuyos esfuerzos son típicamente una fracción de los esfuerzos de sobrecarga, produciendo elevados esfuerzos horizontales en la pared de la roca, en algunos casos el esfuerzo radial se puede convertir en el máximo esfuerzo.

Segundo. Los diapiros de sal se conectan hidráulicamente a capas fuente que se presuriza por el peso común de sobrecarga. Estas presiones se transmiten por el diapiro cuando contribuyen a los elevados esfuerzos horizontales que empujan a los sedimentos adyacentes.

Tercero. La estructura salina cerca de superficie puede generar elevados topográficos, que tienden a esparcirse de manera lateral poniendo a las rocas adyacentes bajo compresión, estas rocas se pueden comprimir si son suficientemente débiles.

La presión de poro puede ser elevada cerca de la sal por dos razones, la primera es la expansión del domo que causa una reducción de las rocas adyacentes elevando la presión de poro si la permeabilidad es baja; segundo el echado se va de manera radial de los diapiros de sal, así que la presión de poro generada en el centro de la cuenca migra hacia la interfase con la sal.

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN.

En el capítulo anterior se analizó el desarrollo de la estrategia de simulación numérica en la cual se aplica la metodología de estrategia de simulación numérica, desarrollado paso a paso desde la construcción del modelo global pasando por la construcción de distintos submodelos llevando al final los resultados que se obtienen del submodelo.

4.1 Construcción del modelo global.

La siguiente figura muestra el modelo global que es un cubo de 3000 metros de alto por 3000 metros de largo por 3000 metros de ancho (Fig. 4.1) que se encuentra dividido en tres secciones las secciones superior e inferior son secciones elásticas, la cual en términos prácticos se le nombra en este trabajo roca en medio es donde se encuentra la sección salina.

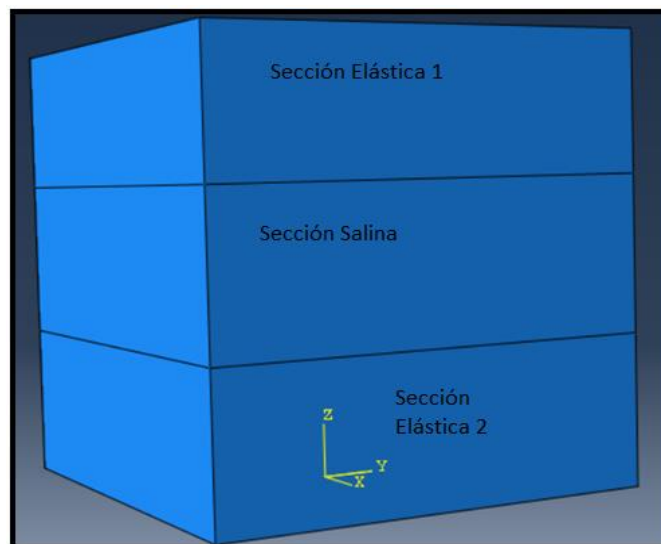


Fig. 4. 1 Modelo global dividido en tres secciones.

La primera sección rocosa está a una profundidad de 938.026 metros, la segunda sección, la salina, es de 1,044.20 metros y la tercera sección rocosa está a una profundidad de 1,017.774 metros.

4.1.1 Características de los materiales.

A continuación, se presentan las siguientes tablas con las propiedades de los materiales que se introducen en el modelo global (tablas 4.1- 4.3), dichas propiedades se obtienen de la literatura a excepción de las propiedades de la sal las cuales se obtienen mediante pruebas de laboratorio de un núcleo de Halita (cloruro de sodio) 97% puro.

Tabla 4.1 Propiedades elásticas de los materiales.				
Material.	Densidad. Kg/m³	Módulo de Young (E) Pascales.	Módulo de Young (E) PSI.	Relación de Poisson. (ν) (Adimensional)
Roca	2500	1.7E ¹⁰	2.45E ⁶	0.30
Sal	2100	1.3E ¹⁰	1.88E ⁶	0.22

Tabla 4.2 Valores de permeabilidad de la Roca.	
Permeabilidad (K) m²	Relación de Vacío* (adimensional)
1E ⁻¹⁰	0.1
1E ⁻⁶	0.5

*Aunque la relación de vacío puede ser considerada también como la porosidad, el simulador de elemento finito considera la relación de vacío con la siguiente formula.

$$Void\ Ratio = \frac{\phi}{1 - \phi}$$

- Siendo ϕ porosidad (adimensional).

La siguiente tabla, tiene los parámetros para el modelo constitutivo de la Ley de potencia de la sal obtenidos en laboratorio que es la ecuación que presenta el mejor ajuste en el comportamiento de deformación en función del tiempo.

Tabla 4.3 Valores del exponente para la Ley de Potencia de fluencia.			
$\varepsilon^c = A\sigma^n t^m$			
Material.	A	m	n
Roca	2.5E ⁻²²	2	0
Sal	2.5E ⁻¹⁷	2.942	0

4.1.2 Condiciones de frontera y aplicación de cargas.

Las fronteras del modelo incluyen las siguientes condiciones, restricciones en los desplazamientos laterales, así como restricciones en la superficie inferior y la superior queda libre, la carga gravitacional se encuentra aplicada en todos los elementos del modelo.

Las cargas consideradas en el modelo son las siguientes (tabla 4.4 a 4.6).

Tabla 4.4 Cargas aplicadas al modelo.

Tipo de carga.	Valor.	Unidades.
Presión atmosférica	101,325	Pascales.
Gravitacional	9.81	m/s ²

Tabla 4.5 Cargas iniciales aplicadas al modelo.

Sección	Tipo de carga	Valor	Unidades
Sección superior elástica.	Presión de poro	9797.12*	Pascal/metro
	Relación de vacío	0.1	Adimensional
	Carga vertical	14711.68*	Pascal/metro
Sección salina.	Presión de poro	0	Pascal/metro
	Relación de vacío	0	Adimensional
	Carga vertical	29401.34	Pascal/metro
Sección inferior elástica.	Presión de poro	9797.12*	Pascal/metro
	Relación de vacío	0.1	Adimensional
	Carga vertical	14711.68	Pascal/metro

*Valores en gradiente.

4.1.4 Resultado numérico del modelo global.

Las figuras 4.2 a 4.4 muestran los resultados de los esfuerzos tanto en el eje x como en el eje z. Los esfuerzos mostrados aquí son los esfuerzos efectivos.

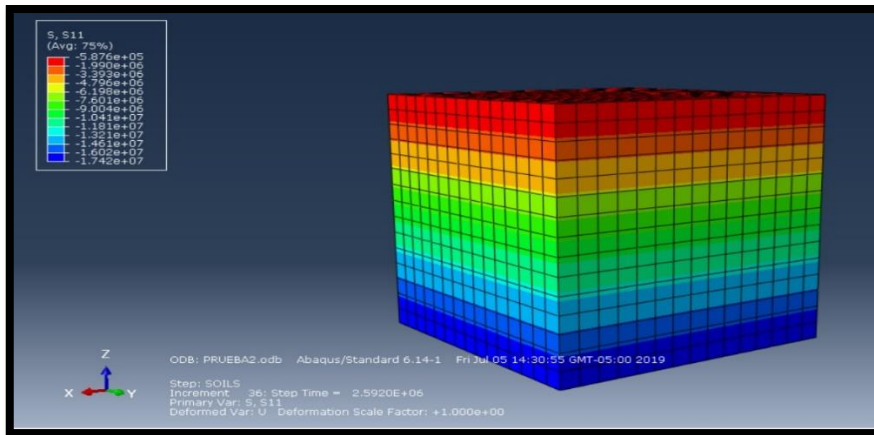


Fig. 4. 2 Esfuerzos distribuidos en el eje X.

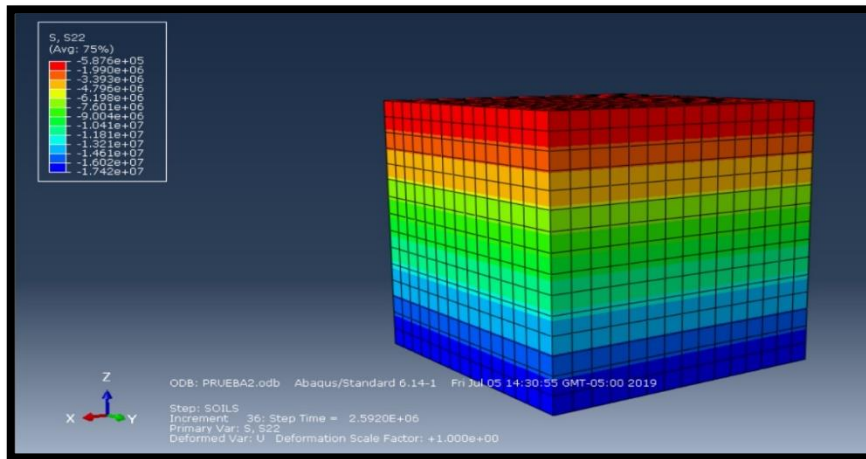


Fig. 4. 3 Esfuerzos distribuidos en el eje Y.

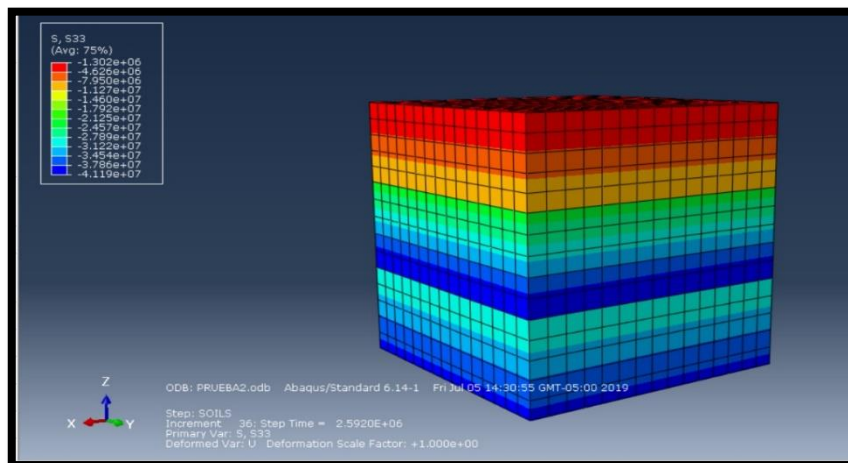


Fig. 4. 4 Esfuerzos distribuidos en el eje Z.

Se observa en el modelo global que la distribución de esfuerzos es totalmente isotrópica; también se percibe que, entre la sección inferior y sección salina, se notan esfuerzos mayores al final de la zona salina y que este disminuye cuando se sale de la sección salina, los esfuerzos son distintos completamente.

También en las figuras 4.5 a la 4.7 se tienen diferentes los desplazamientos que ocurren en los ejes X, Y y Z.

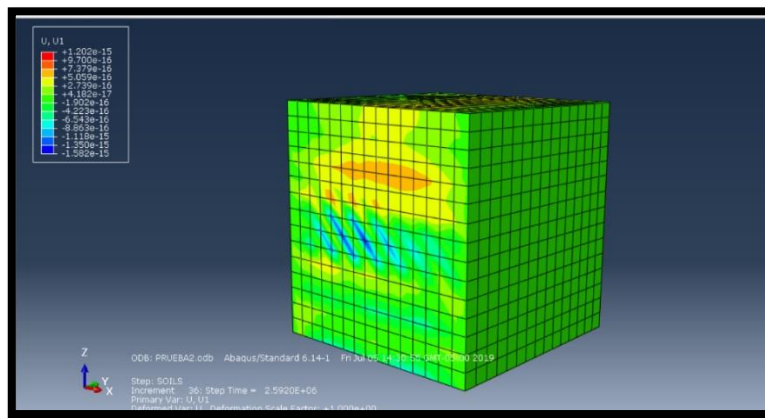


Fig. 4. 5 Desplazamiento en el eje x.

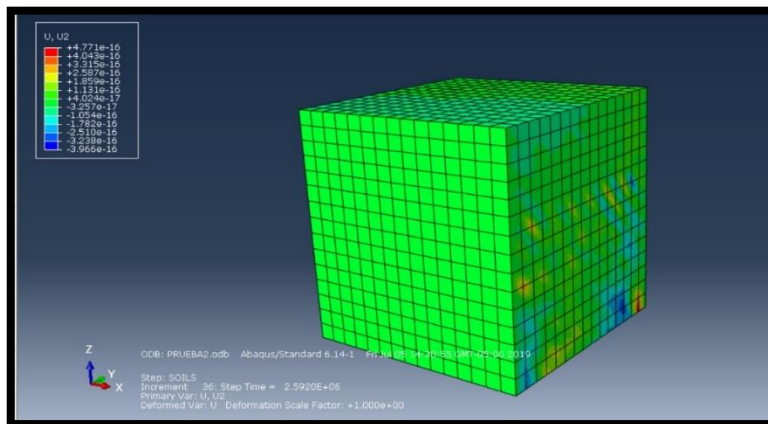


Fig. 4. 6 Desplazamiento en el eje Y.

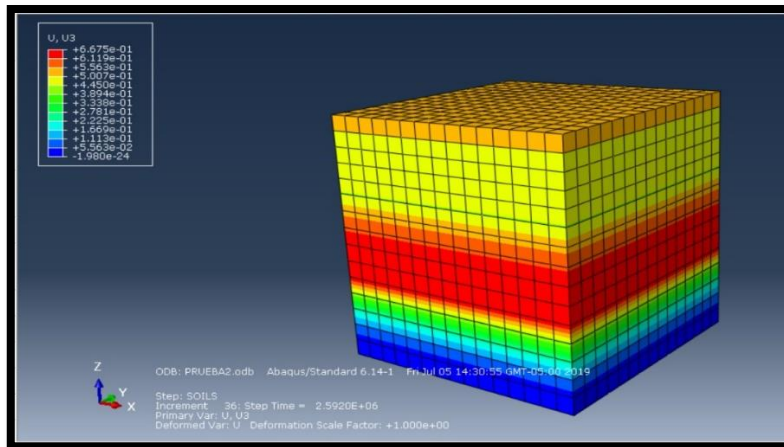


Fig. 4. 7 Desplazamiento en el eje Z.

Los desplazamientos indicados en las figuras anteriores presentan desplazamientos mínimos en los ejes X y Y, aunque en el eje Z existe un desplazamiento mayor al de los otros ejes que es .667mts o 6.67cms, esto quiere decir que naturalmente y con las propiedades de la formación este se llegó a compactar. Por lo tanto, la formación sufrió una pequeña compactación que en cierto punto se considera despreciable, pero siendo mayor en los ejes X y Y.

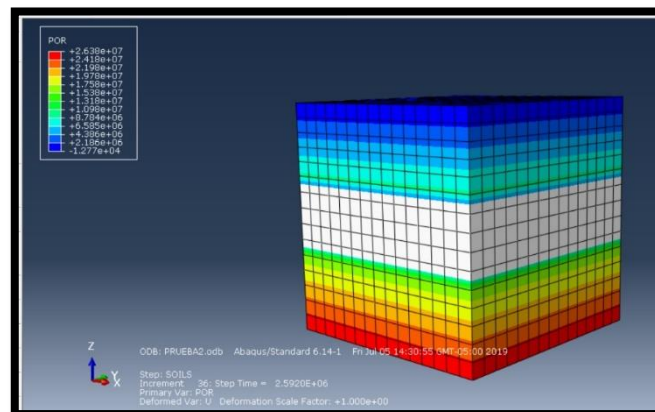


Fig. 4. 8 Presión de poro mostrado en el modelo global.

También se alcanza a distinguir la zona salina en el modelo gracias a los valores de presión de poro en el modelo global (ver fig.4.8), ya que la sección salina (color blanco) no presenta presión de poro.

4.2 Validación del modelo global mediante modelo 1D.

El modelo se valida mediante la comparación de esfuerzos que se calcula del modelo 1D contra los que se tienen en el simulador de elemento finito. En las siguientes gráficas se observa el contraste de la formación poroelástica y la sal en términos de esfuerzos.



Gráfico 4. 1 Comparativo del esfuerzo vertical obtenido por el simulador de elemento finito (color negro) contra el esfuerzo vertical calculado (color rojo).

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN.

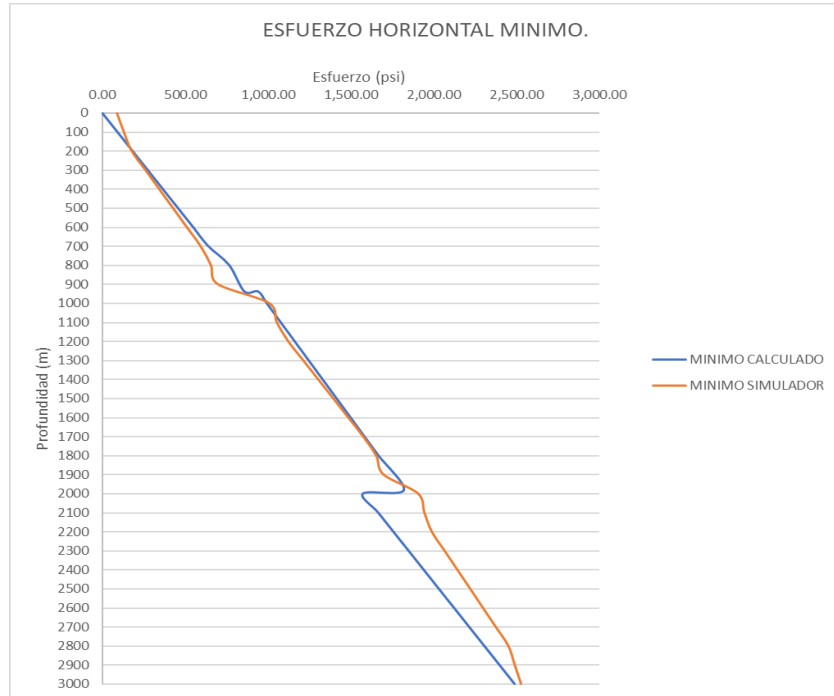


Gráfico 4. 2 Comparativo de esfuerzos mínimos calculado (color azul) y el obtenido por el simulador (naranja).

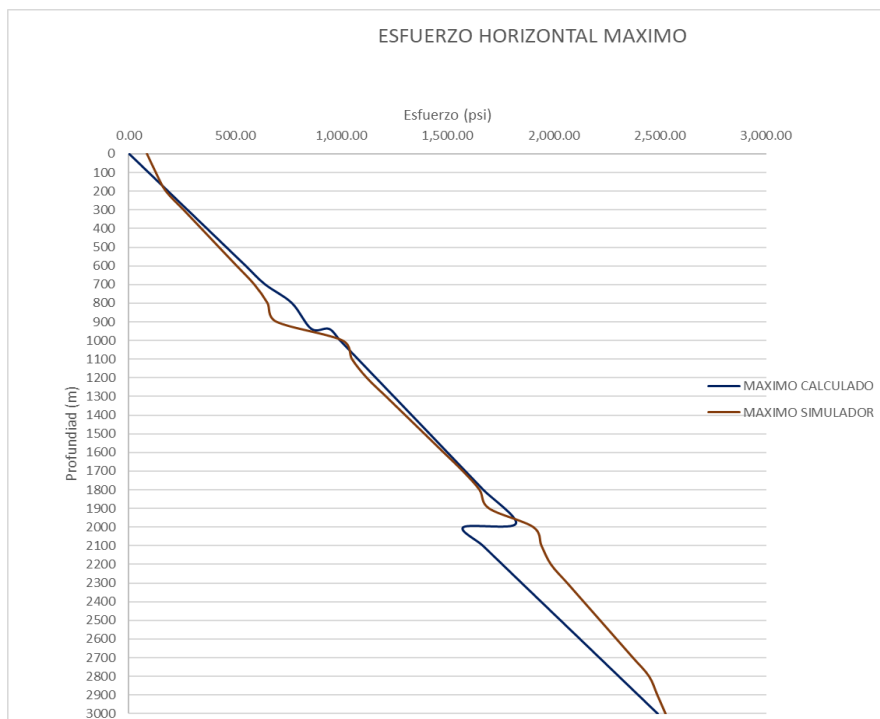


Gráfico 4. 3 Comparativo de esfuerzos máximos calculado (azul) contra el obtenido por el simulador (café).

El esfuerzo indicado en la gráfica 4.1, es el esfuerzo efectivo, en el cual la presión de poro es sustraída del esfuerzo total por lo tanto se observa mayor esfuerzo en la sección salina (profundidad de 1000 a 2000 metros) debido a que en la sal como se mencionado anteriormente no hay presión de poro. La gráfica 4.1, demuestra en el comparativo los resultados tanto el calculado como el obtenido por el simulador.

Las gráficas 4.2 y 4.3, son los esfuerzos verticales horizontales y estos a diferencia de la intersección de la sección salina y la sección elástica inferior no ocurre lo mismo que en el esfuerzo vertical dado que estos disminuyen, si no que estos siguen aumentando a medida que la profundidad aumenta con pequeñas variaciones de presión entre 2000 a 2100 metros

4.3 Desarrollo y descripción del submodelo intermedio.

Para evitar problemas de escala entre los submodelos y el modelo global se optó por generar un submodelo intermedio con medidas de ancho, largo y alto de 100 metros situado en la sección salina, la función del submodelo intermedio es la transferencia de esfuerzos geoestáticos iniciales y las condiciones de frontera de desplazamiento, por lo tanto en este submodelo aún no se considera la inclusión del pozo.

4.3.1 Resultado numérico del submodelo intermedio.

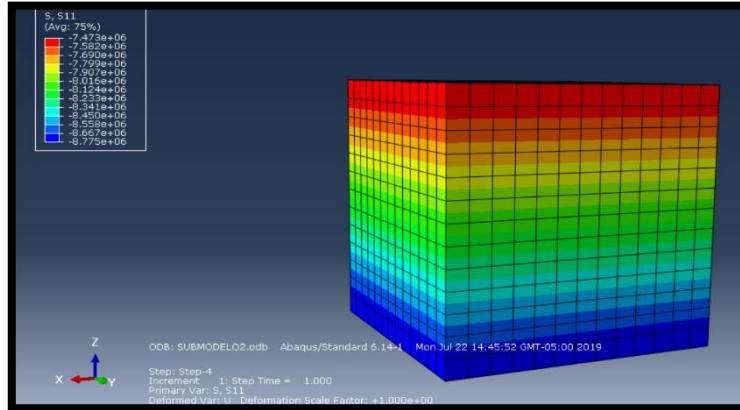


Fig. 4. 9 Esfuerzo en el eje X.

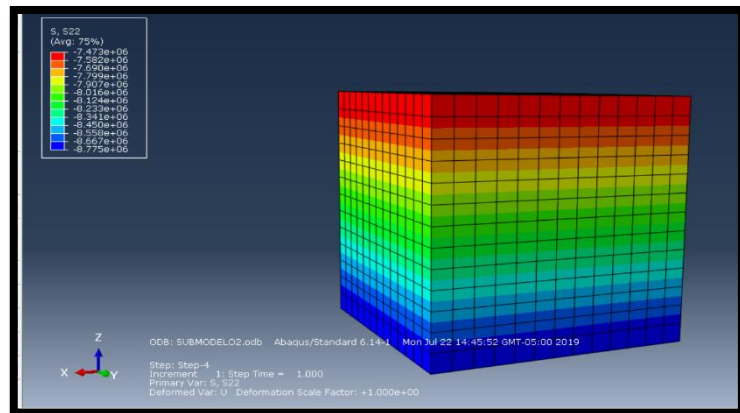


Fig. 4. 10 Esfuerzo en el eje Y.

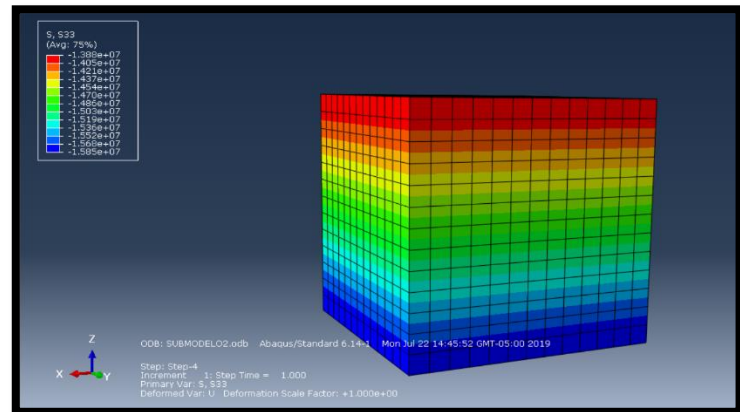


Fig. 4. 11 Esfuerzo en el eje Z.

Al igual que en el modelo global se perciben esfuerzos isotrópicos en los ejes X,Y y Z (figs. 4.9 a 4.11), la diferencia es que el modelo global y el submodelado es que se ilustra los esfuerzos de corte debido a que en el modelo global los esfuerzos de corte no se percibían de manera detallada como en el submodelo, también se destaca que los esfuerzos de corte en la sal son mayores que en las secciones elásticas. (Figs. 4.12 a 4.14)

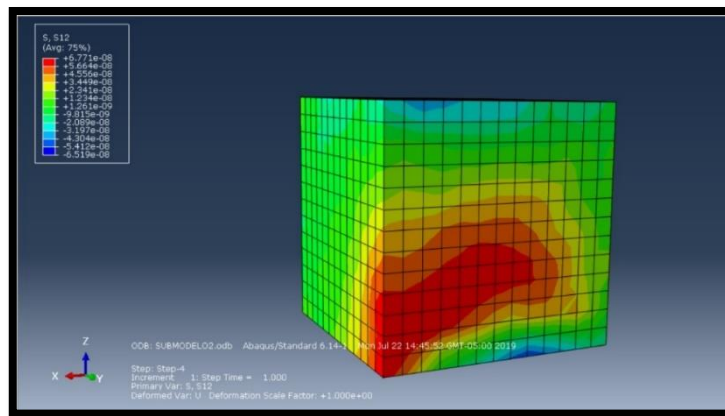


Fig. 4. 12 Esfuerzo de corte en el eje XY.

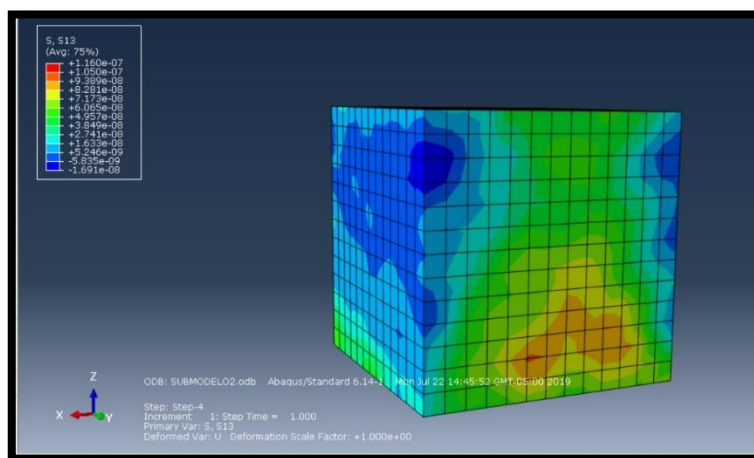


Fig. 4. 13 Esfuerzo de corte en el eje XZ.

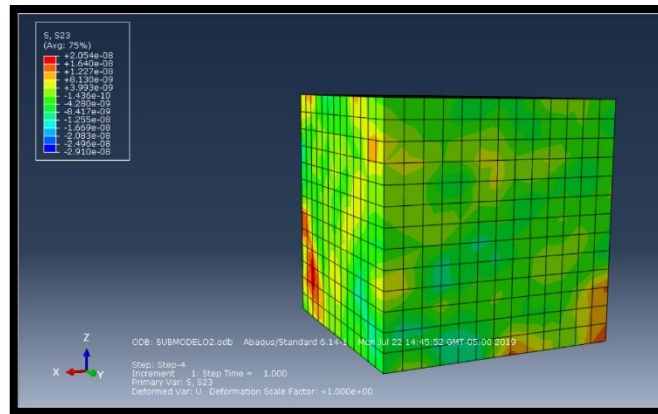


Fig. 4. 14 Esfuerzo de corte en el eje YZ.

En los desplazamientos (figs. 4.15 a 4.17), no existe diferencia en términos de magnitud, básicamente con el modelo global los desplazamientos en X y Y son casi despreciables siendo casi idéntico con el modelo global y en el desplazamiento en Z se observan valores más detallados en comparación con el modelo global.

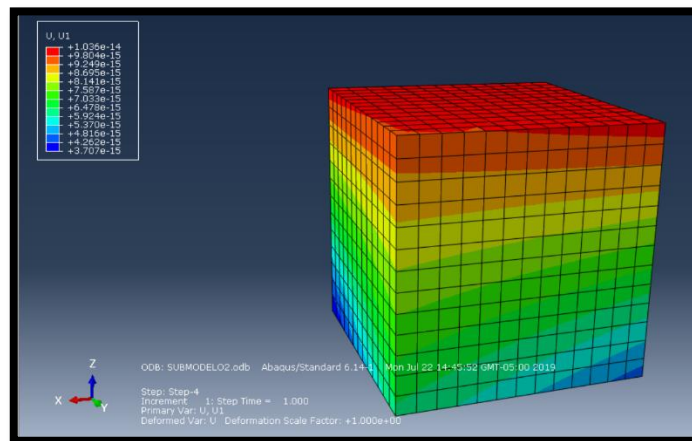


Fig. 4. 15 Desplazamiento en el eje X.

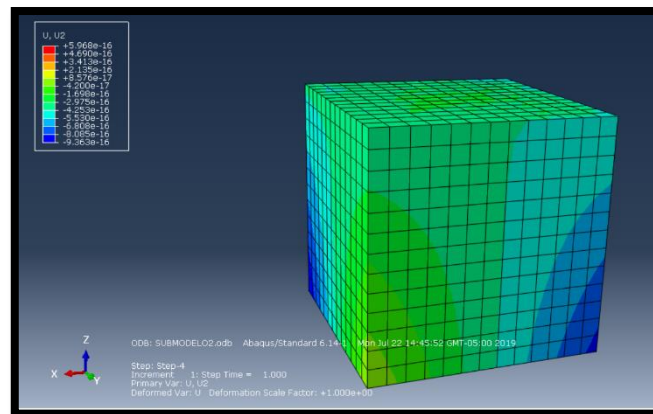


Fig. 4. 16 Desplazamiento en el eje Y.

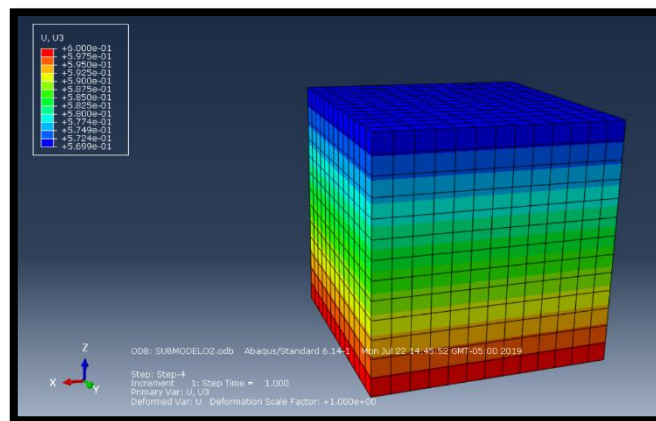


Fig. 4. 17 Desplazamiento en el eje Z.

4.4 Desarrollo de los submodelos terciarios.

Para el submodelo final se presenta la función de mayor importancia ya que en este submodelo se inserta el pozo, una presión de lodo (P_w) y se analizan los resultados de fluencia, desplazamiento y esfuerzos generados en el pozo; las medidas del submodelo final son de 4 metros de largo y ancho por 8 metros de alto y al centro en la cara superior un agujero de 12.25 pulgadas o .31115 metros. (Fig. 4.18).

Cabe destacar que se desarrollan diferentes submodelos ya que varían las condiciones de presión de pozo y como estos pueden afectar en el análisis de fluencia.

Para este modelo se aplicarán las siguientes densidades de lodo y su respectiva presión hidrostática en los submodelos.

Tabla 4.6 Densidades usadas en el submodelo.	
Densidad de lodo (gr/cm^3)	Presión hidrostática. (pascales)
0.4	3.824E+006
0.6	5.64E+006
0.8	7.456E+006
1.0	9.2712E+006
1.2	1.112E+007
1.4	1.2979E+007

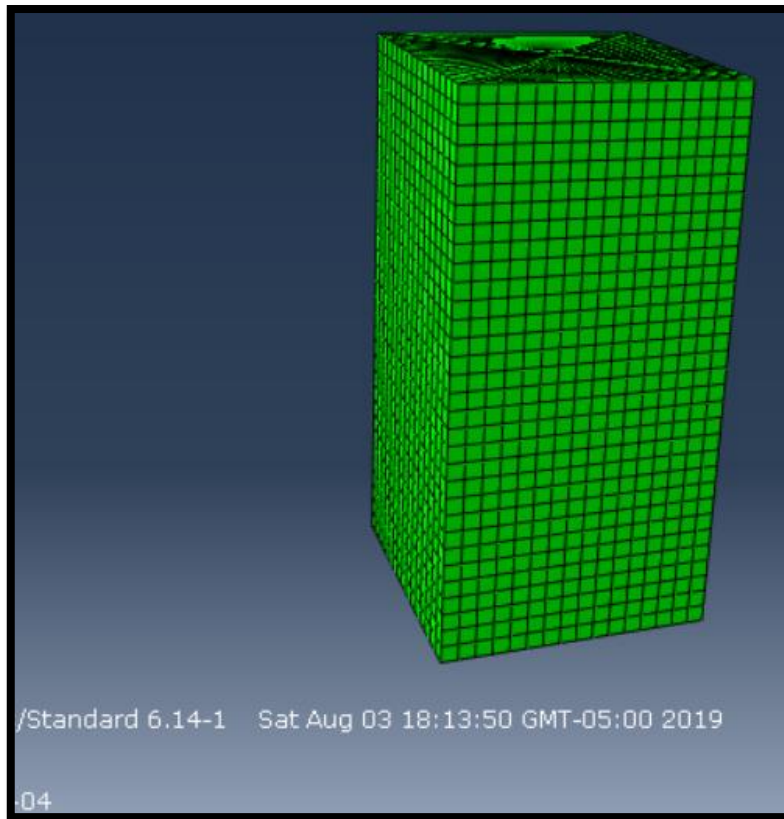


Fig. 4. 18 Representación del submodelo terciario.

4.4.1 Resultado del submodelo terciario.

La simulación de los submodelos terciarios se efectuó con un tiempo de simulación de seis horas (21600 segundos), cada uno de ellos arrojó diferentes resultados que se detalla más adelante.

Se escogió a fin de ilustrar el resultado del programa de análisis de elemento finito la densidad de 0.8 gr/cm^3 , debido a que en la simulación el cierre del pozo a densidades menores es mayor, sin embargo, en la simulación del cierre de pozo no regresa a su forma original si no que los nodos se trasponen uno con él otro y en la

representación gráfica no se alcanza a distinguir detalladamente el cierre del agujero.

Tanto los esfuerzos resultantes normales (figs. 4.19 a 4.21) como los de corte (figs. 4.26 a 4.27) demuestran esfuerzos mayores en la vecindad del pozo y estos disminuyen mientras se llega a la frontera externa en donde se encuentran en equilibrio, debido a que los esfuerzos horizontales son iguales éstos presentan cierta simetría.

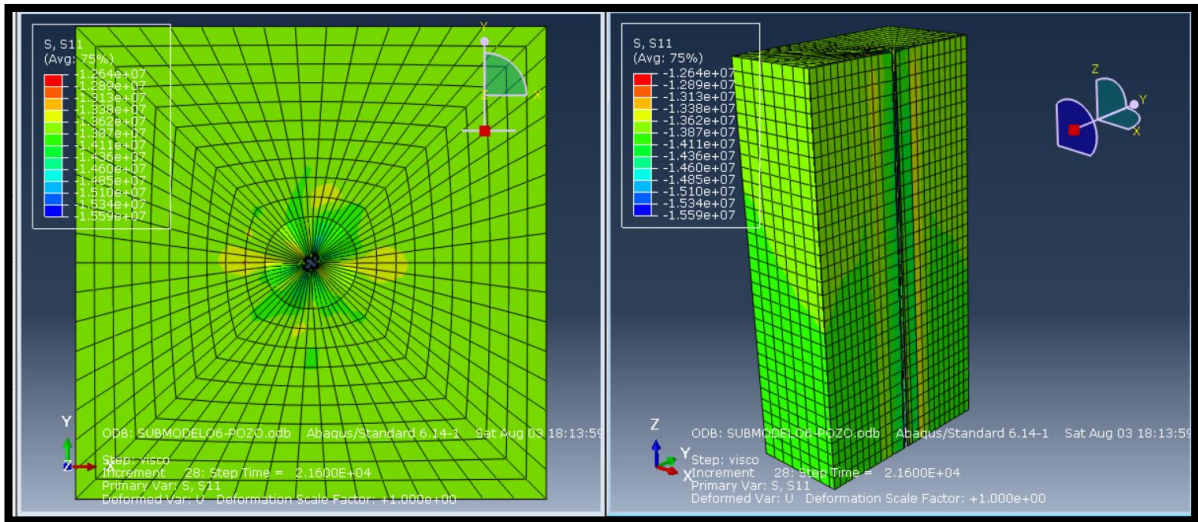


Fig. 4. 19 Esfuerzo resultante en el eje X.

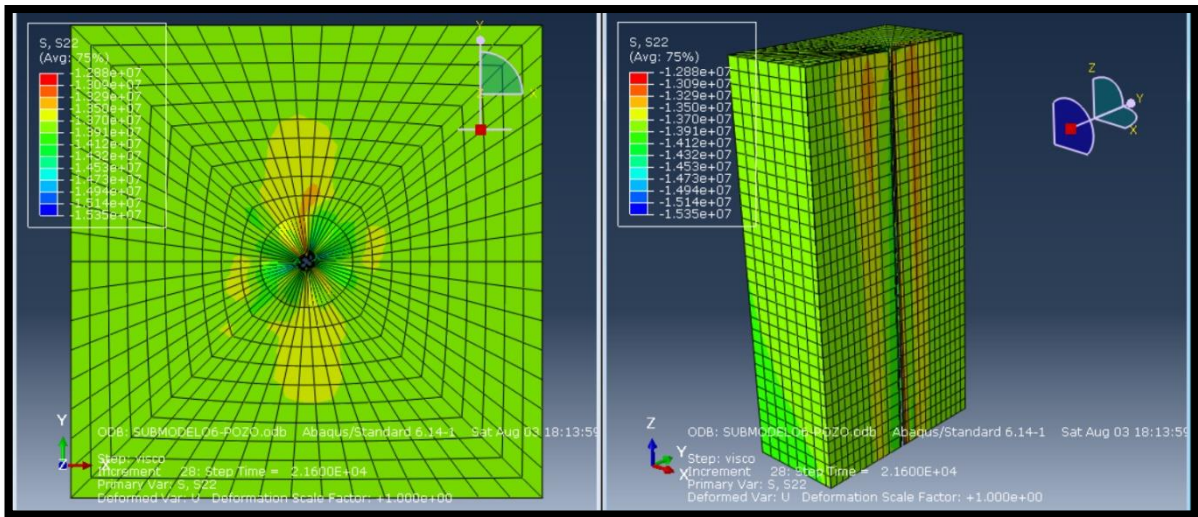


Fig. 4. 20 Esfuerzo resultante en el eje Y.

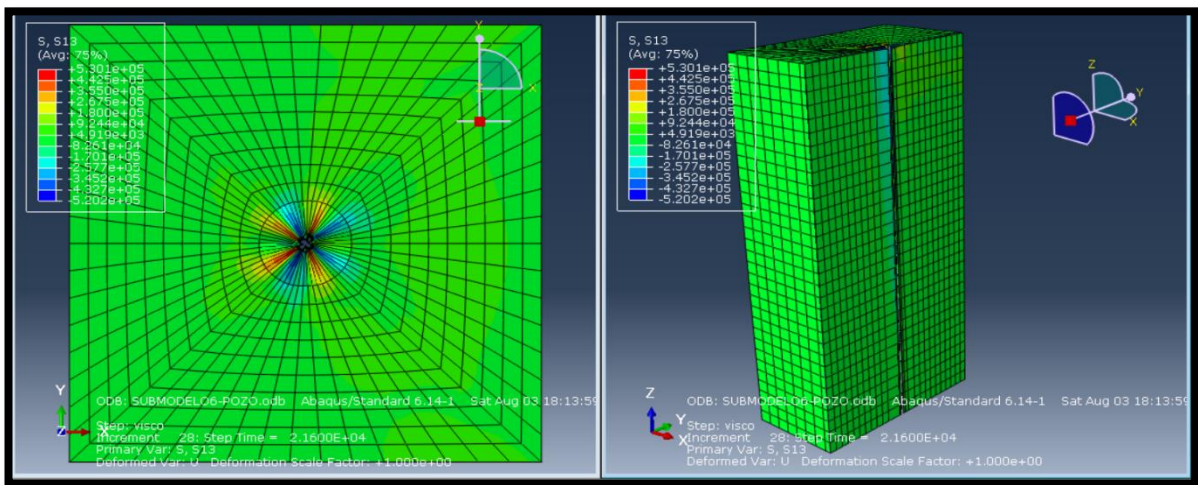


Fig. 4. 21 Esfuerzo resultante en el eje XZ.

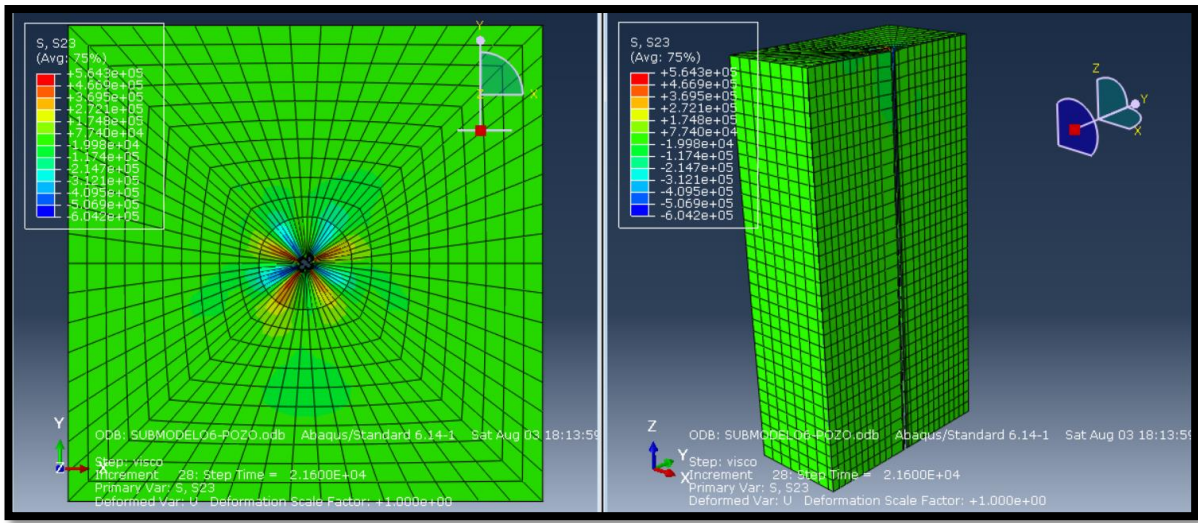


Fig. 4. 22 Esfuerzo resultante en el eje YZ

Desplazamientos resultantes.

Las figuras (4.26 a 4.27) indican los desplazamientos en el eje X (fig. 4.26) y en el eje Y (fig. 4.27), sin embargo, estos desplazamientos ocurren solamente en esos ejes para tener el desplazamiento resultante es necesario determinar la resultante de los nodos tanto en X como en Y. (fig. 4.25).

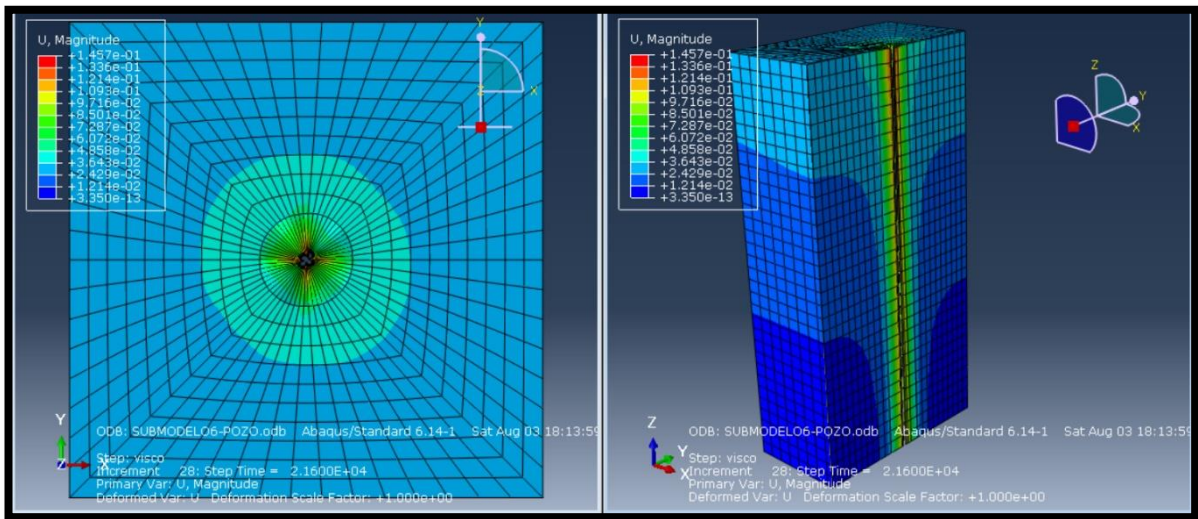


Fig. 4. 23 Desplazamiento resultante.

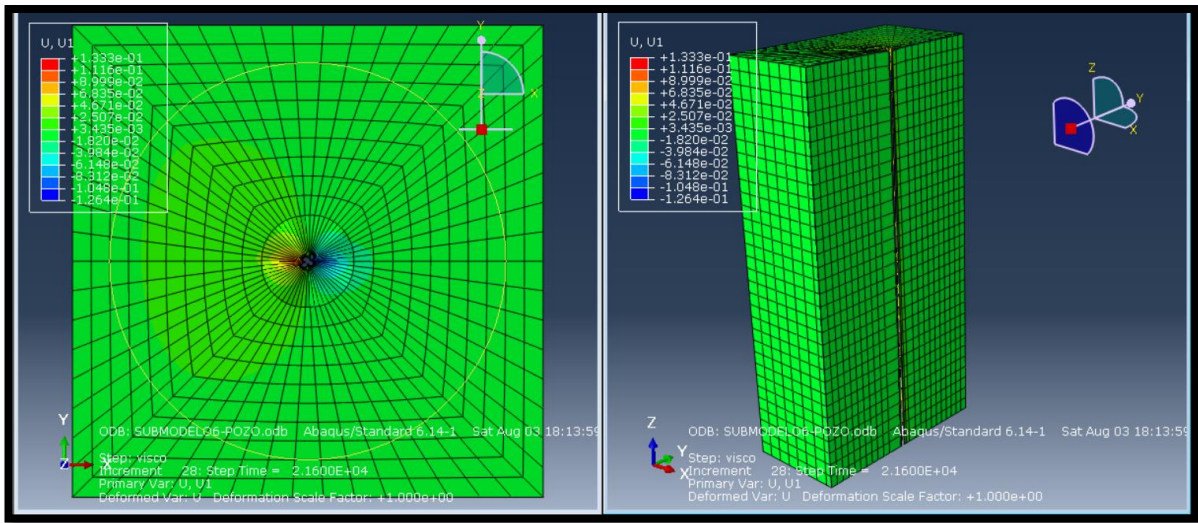


Fig. 4. 24 Desplazamiento en el eje X.

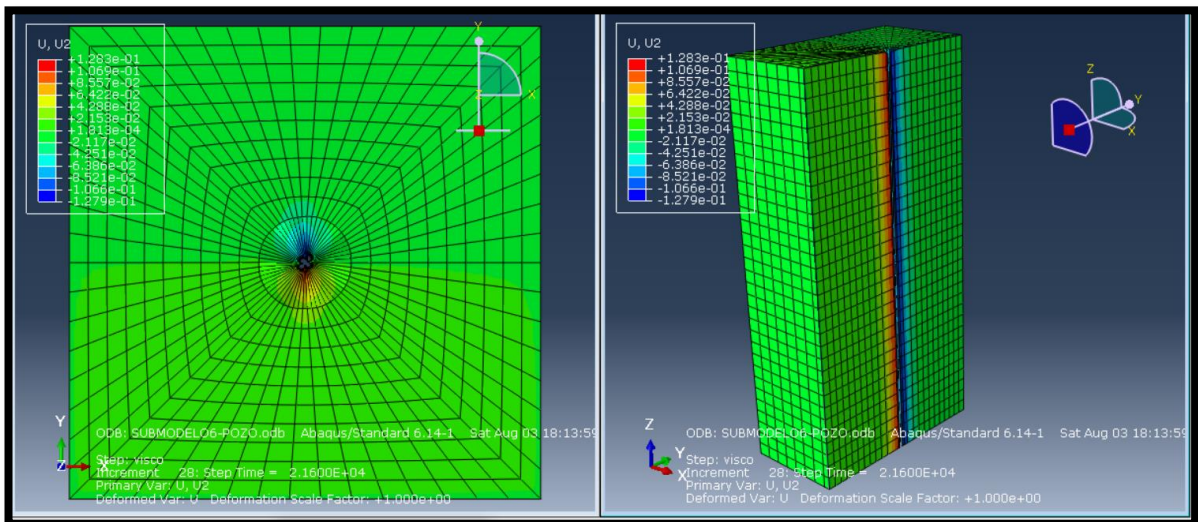


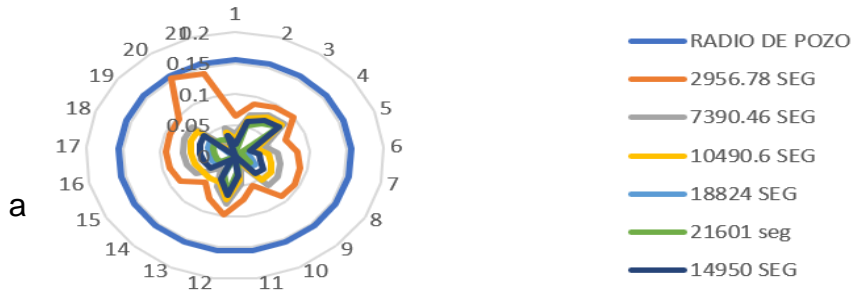
Fig. 4. 25 Desplazamiento en el eje Y..

A continuación, se presentan los gráficos de cierre de pozo con las densidades que se usaron en las simulaciones.

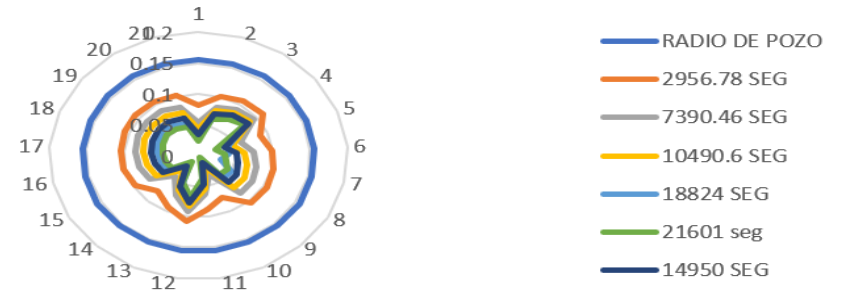
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN.

Fig. 4. 26 Comparativo de gráficos de cierre de pozo a diferentes densidades.

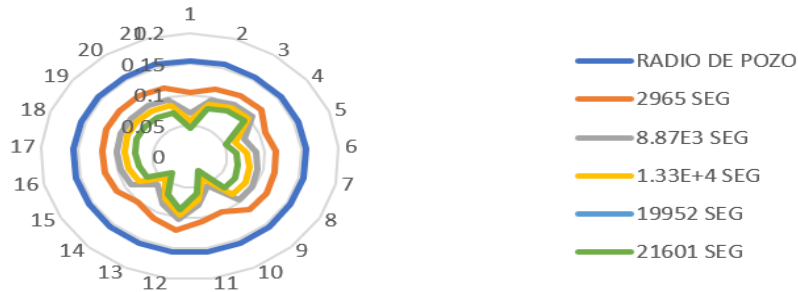
Diametro de pozo contra tiempo.
Densidad de 0.4 g/cc



Diametro de pozo contra tiempo.
Densidad de 0.6 gr/cc



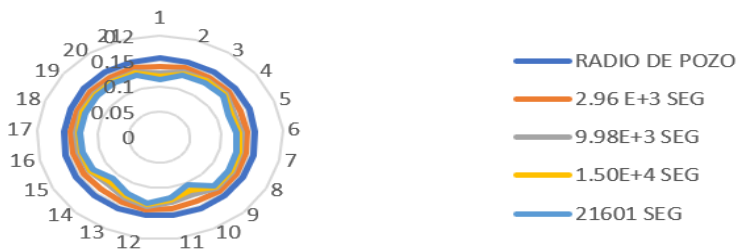
Diametro de pozo contra tiempo
Densidad de 0.8 gr/cc..



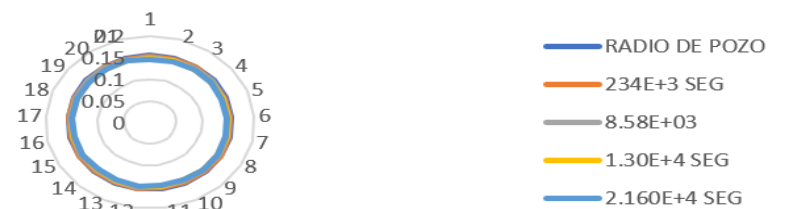
Diametro de pozo contra tiempo.
Densidad de 1.0 gr/cc.



Diametro de pozo contra tiempo.
Densidad de 1.2 gr/cc.



Diametro de pozo contra tiempo.
Densidad de 1.4 gr/cc.



En la comparativa de las gráficas anteriores se manejan tiempos casi similares esto debido a los incrementos que necesitaron las simulaciones que fueron distintos, sin embargo se escogieron los tiempos más aproximados, hasta llegar a las 6 horas de simulación.

La figura 4.26 demuestra los siguientes resultados:

- Se presenta el cierre de agujero en dos casos, el primero es a partir de 10490 segundos (2.91 horas) cuando se maneja una densidad de 0.4gr/cm^3 , en el segundo a partir de los 21601 segundos (6 horas) con una densidad de 0.6 gr/cm^3 .
- Con densidad de 0.8gr/cm^3 el pozo no presenta un cierre total, pero presenta un radio promedio de 0.06 metros sin embargo se intuye que después de las seis horas se presenta un cierre completo de pozo.
- Lo mismo ocurre con el cierre a una densidad de 1.0 gr/cm^3 que presenta un radio promedio de 0.1 metros después de seis horas, sin embargo, también se intuye que después de las seis horas se presenta un cierre total de pozo.
- Con densidades de 1.2gr/cm^3 y de 1.4gr/cm^3 no se observan cierres notables como con densidades menores, sin embargo, el radio de cada uno si presenta variación con densidad de 1.2 gr/cm^3 que presenta un radio promedio de 0.12 metros y una densidad de 1.4gr/cm^3 , el radio de pozo no disminuye de manera notable ya que el radio promedio fue de aproximadamente 0.14 metros.

La gráfica 4.4 indica el cierre del pozo con lodo a diferente densidad y de los resultados se pueden notar los cierres de pozo que se obtienen a diferente densidad que se resume en una sola gráfica.

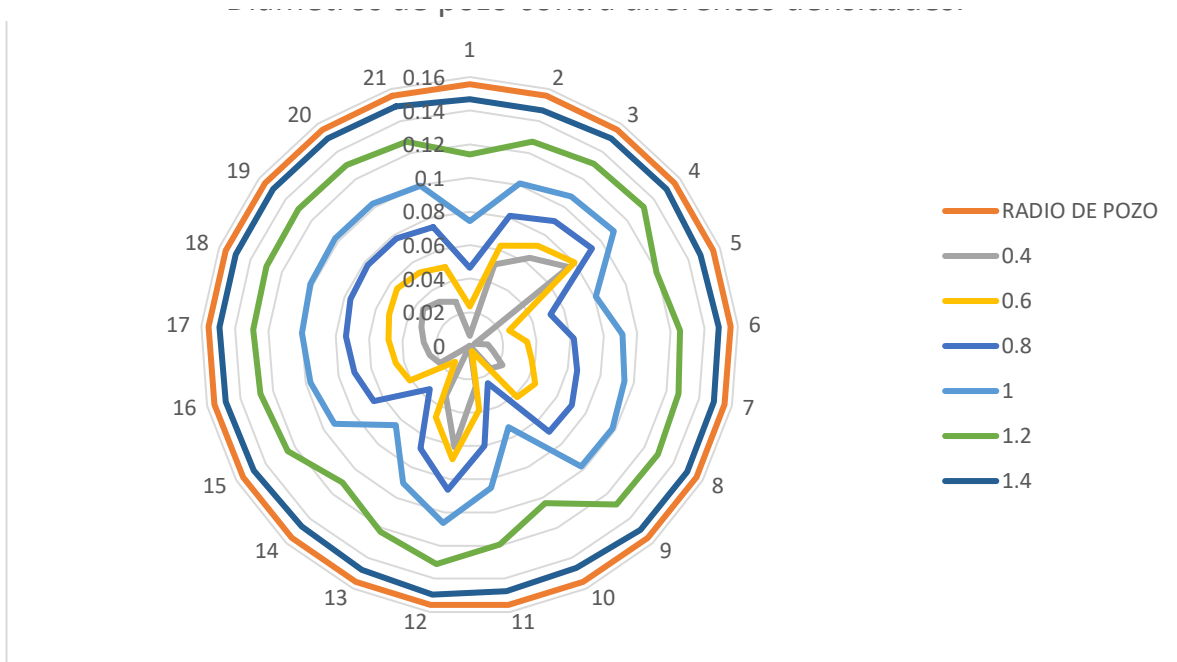


Gráfico 4. 4 Cierre de agujero a diferentes densidades.

4.5 Comparativo de cierre de pozo en formación elástica contra formación plástica.

Se realizó un comparativo de cierre de pozo en dos formaciones que se describen en este capítulo (secciones elástica y salina) en ambos se presentan las mismas características, que presentan la misma densidad de lodo de 1.1 gr/cm³ y en ambos el diámetro de pozo es de 12.25 pulgadas, en la comparativa se tomaron las profundidades más próximas en la sección elástica ésta tiene una profundidad de 838 metros y la sección elástica una profundidad de 946.03 metros.

A continuación, se ilustran las figuras (4.27-4.32) comparativas de esfuerzos de sección salina contra sección elástica.

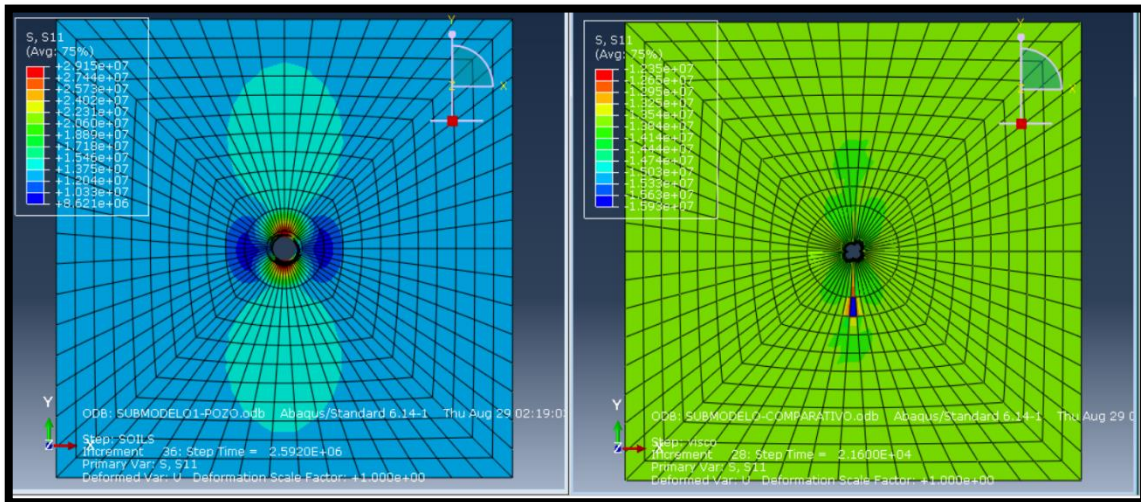


Fig. 4. 27 Comparativo de esfuerzos resultantes en el eje X en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).

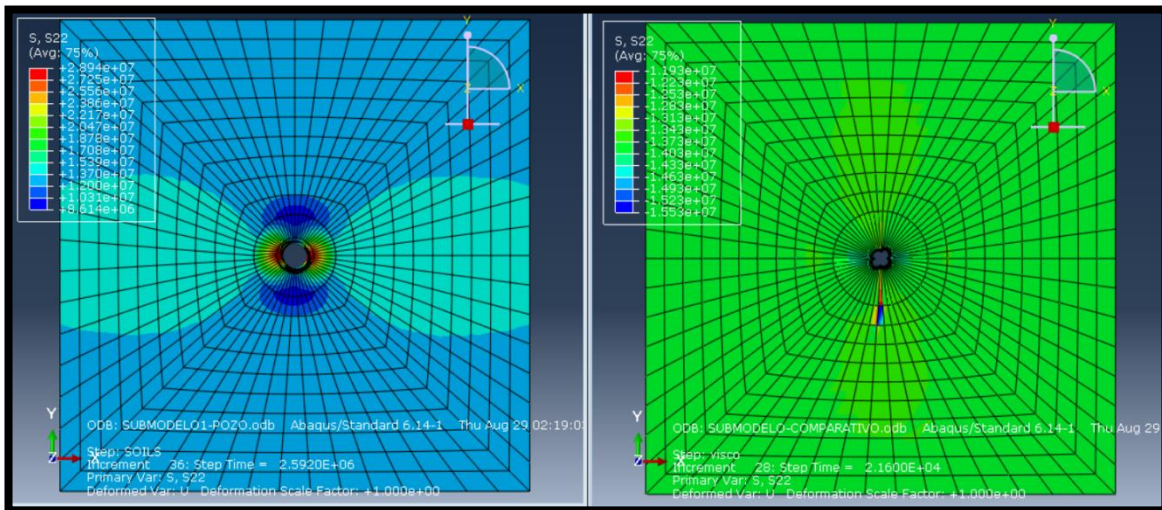


Fig. 4. 28 Comparativo de esfuerzos resultantes en el eje Y en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).

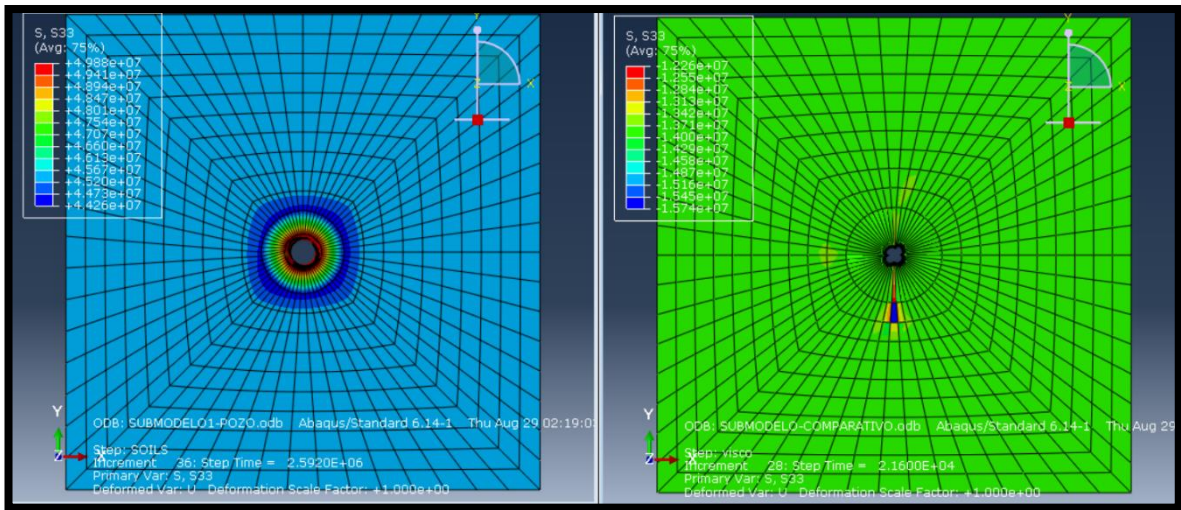


Fig. 4. 29 Comparativo de esfuerzos resultantes en el eje Z en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).

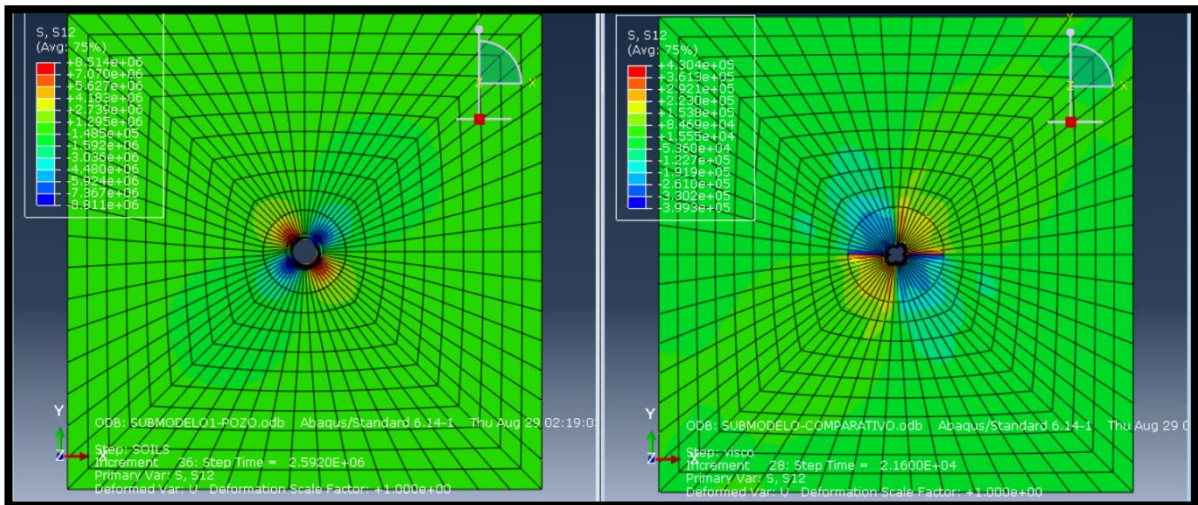


Fig. 4. 30 Comparativo de esfuerzos resultantes de corte en el eje XY en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).

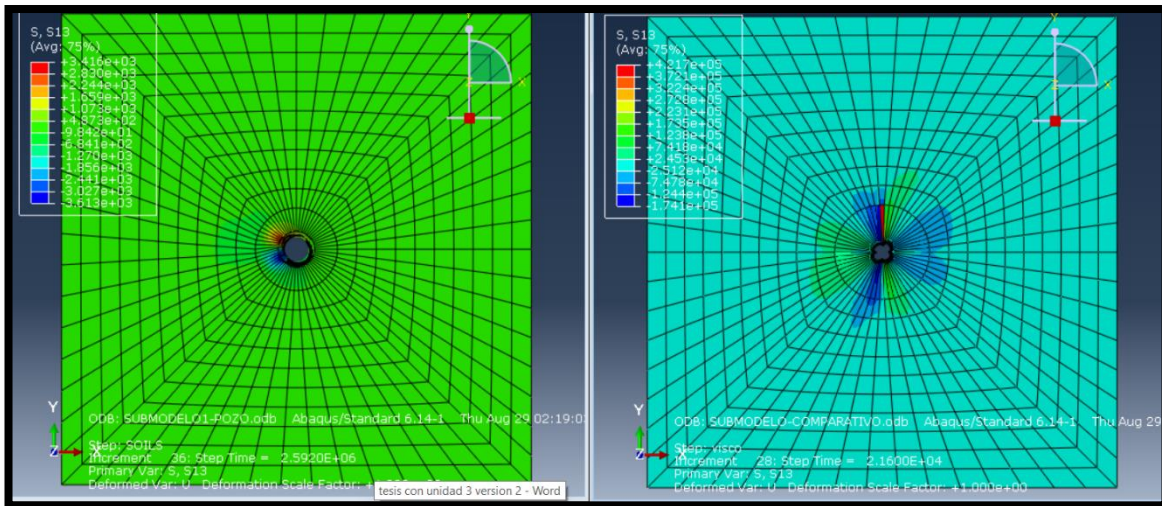


Fig. 4.31 Comparativo de esfuerzos resultantes de corte en el eje XZ en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).

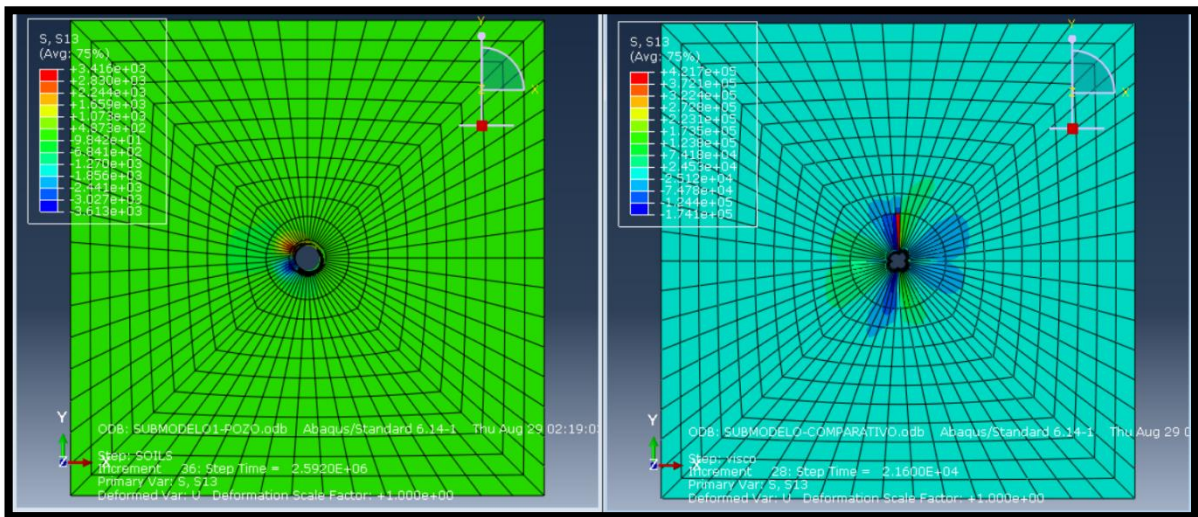


Fig. 4.32 Comparativo de esfuerzos resultantes de corte en el eje YZ en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).

Los esfuerzos normales (Figs. 4.27 a 4.29) presentan mayor variación en la sección elástica que en la sección salina, sin embargo, el cambio de esfuerzos es más brusco en la sección salina; los esfuerzos de corte (Figs. 4.31-4.33), son más pequeños en la sección elástica que en la salina por lo menos presenta una diferencia de 1×10^2 pascales de diferencia, también cabe destacar que en la sección

elástica la variación de esfuerzos de corte es mínima, cosa distinta en la sección salina donde inclusive ya estando un poco alejado del pozo aun presenta variaciones.

A continuación, se presenta los comparativos de desplazamientos. (Figs. 4.33 a 4.34)

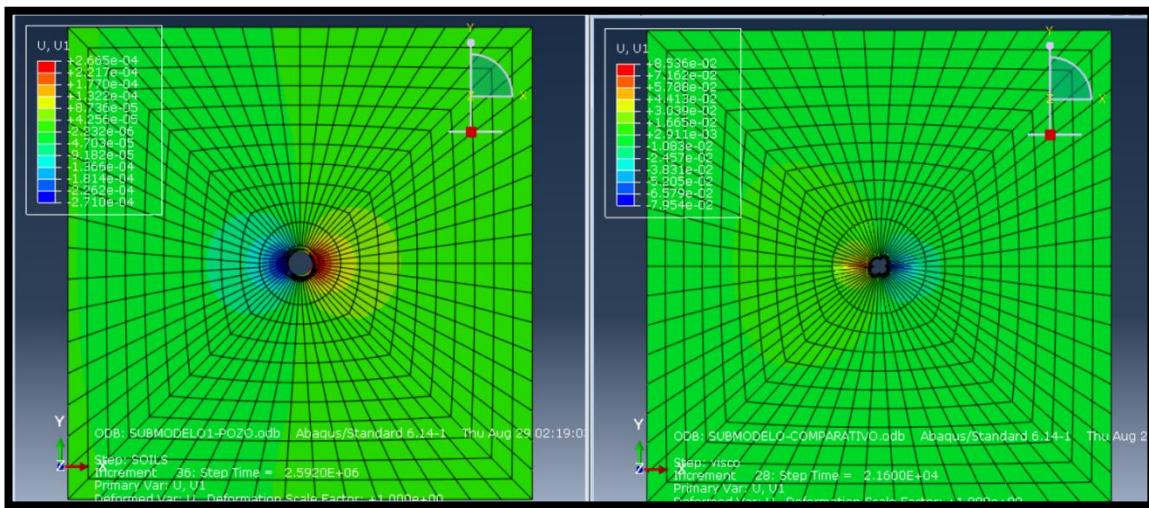


Fig. 4. 33 Comparativo de desplazamientos en el eje X en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).

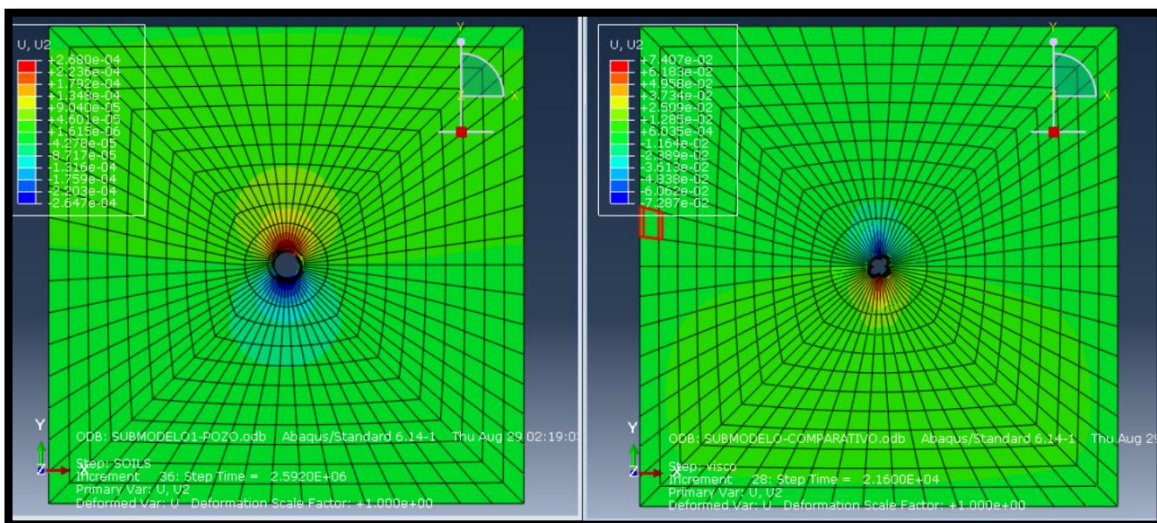


Fig. 4. 34 Comparativo de desplazamientos en el eje Y en sección elástica (lado izquierdo) contra sección salina (lado derecho).

Las figuras anteriores demuestran los desplazamientos en ambas secciones, en la sección elástica los desplazamientos en ambos ejes son mínimos comparados a la sección salina donde los desplazamientos son mayores, por lo tanto en la sección elástica el agujero es completamente estable, caso contrario a la sección salina donde se está generando el cierre de pozo por el fenómeno de fluencia; el comparativo de ambos radios de pozo se ilustra en la gráfica 4.5.

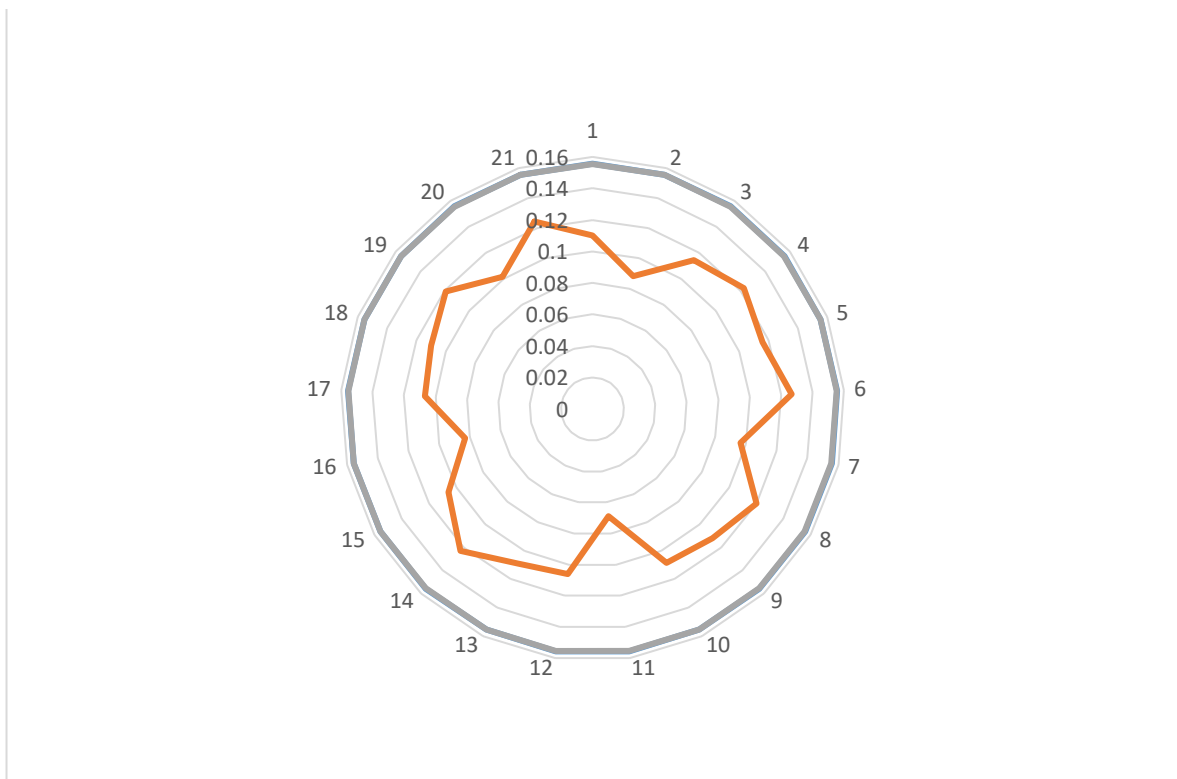


Gráfico 4. 5 Comparativo de cierres de agujero en sección elástica y plástica.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Se puede manejar una variedad de densidad de lodos para evitar el cierre de pozo ya depende de la decisión y el criterio del ingeniero o compañía el lodo a usar al momento de atravesar la sección salina, sin embargo, se recomienda usar un lodo con alta densidad que permita el retraso del cierre del pozo.
- Se desarrolló e implementó una metodología para la simulación numérica de formaciones plásticas basada en elemento finito, el cual constituye una herramienta de vanguardia tecnológica que permite simular el comportamiento mecánico a través de modelos constitutivos para plasticidad tales como el modelo de plasticidad de Mohr-Coulomb, Drucker Prager, la Ley de Potencia de Bailey-Norton a diferentes parámetros como por ejemplo tiempo, endurecimiento o esfuerzo de corte, las soluciones analíticas de Maxwell y Kelvin, formulaciones de Bradley y el ritmo de desplazamiento de fluencia por Von Mises o Mohr Coulomb.
- Los modelos de elemento finito definidos (general, secundario y terciario) permiten observar los esfuerzos y deformaciones producidas por los campos de esfuerzos, cargas, fronteras y propiedades del medio, lo cual permite definir zonas o áreas de mayor afectación susceptibles a inestabilidad del pozo (cierre).

- De los modelos constitutivos para formaciones plásticas analizados, se puede decir que para éste caso en particular, el modelo de Ley de Potencias permitió un ajuste adecuado con los datos experimentales lo que permitió ser empleado en la simulación numérica.
- Se debe contar con una caracterización geomecánica de la formación a partir de pruebas en laboratorio que permitan conocer el tipo de comportamiento que presenta una formación plástica en especial como el caso que presenta fluencia, así como determinar los parámetros necesarios para poder alimentar el modelo constitutivo.
- La metodología propuesta en su aplicación empleada ilustró como se permite el análisis de la densidad de fluido de perforación a emplear para evaluar la ventana operativa al perforar en presencia de sal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Nikolinakou, M., Flemings, P., & Hudec, M. (2013). Modeling stress evolution around a rising salt diapir.
- [2] Shen, X., Diaz, A. and Sheehy, T. (2012). A case study of mud weight design with finite element method for subsalt wells. 1st ed. Taylor and Francis Group, LLC, pp.95-99.
- [3] F.C Tsai, J.E.O'Rourke W.Silva, Basement rock faulting as a primary mechanism for initiating major salt deformation features, ARMA 87-0621, presented at the 28th US Symposium on Rock Mechanics, Tucson, Arizona, 29 June-1 July 1987. Pp. 1-2.
- [4] ARMA 18-984 Orozco, Sergio O; Pino, Javier; Paredes, Miguel A.; Vasquez, Jose L. y Xavier, Alberto. Managing Creep Closure in Salt Uncertainty While Drilling. American Rock Mechanics Association. Vol 18, Pp. 3.
- [5] Orlic, B & Buizje, L (2014). Numerical Modeling of Wellbore Closure by the Creep of rock salt caprocks, American Rocks Mechanics Association, 14(7499),3.
- [6] Zhang, H., Wang, Z., Zheng, Y., Duan, P., & Ding, S. (2012). Study on tri-axial creep experiment and constitutive relation of different rock salt. Safety Science, 50(4), 801-805. doi: 10.1016/j.ssci.2011.08.030
- [7] ARMA 11-383 Liu X, Birchwood R, Hooyman P. A new analytical solution for wellbore creep in soft sediments and salt. American Rock Mechanics Association. Vol. 11, pp 1-2
- [8] Carter, N. L., S. T. Horseman, J. E. Russell and J. Handin. 1993. Rheology of Rocksalt. Journal of Structural Geology Vol. 15, No. 9/10, pp. 1257 to 1271.

[9] Lao, K., Bruno, M., & Serajian, V. (2012). Analysis of Salt Creep and Well Casing Damage in High Pressure and High Temperature Enviroments. Offshore Technology Conference, (23654), 2.

[10] Wenjing, L., Tao, W., Zhide, W., & Liu, Z. (2017). Micromechanical Modeling of Impact of Temperature on Salt Rock Creep Behavior. American Rock Mechanics Association, 17(28), 2.

[11] Carter, N.L. and F. D. Hansen. 1983. Creep of rock salt. *Tectonophysics*. 92 (4): 275-333.

[12] Costa, A., Poiate Jr., E., Gonçalves, C., & Falcão, J. (2010). Geomechanics applied to the well design through salt layers in Brazil: A History of success. *American Rock Mechanics Association*, 10(239), 2-3.

[13] Fokker, P. (2018). *The Behaviour of Salt Cavern* (Ph.D). Universidad Técnica de Delft.

[14] Willson, S., Fossum, A., & Fredrich, J. (2002). Assessment of Salt Loading on Well Casings. *IADC/SPE Drilling Conference*. doi: 10.2118/74562-ms

[15] Mackay, F., Inoue, N., & Fontoura, S. (2008). Geomechanical Effects of a 3D Vertical Salt Well Drilling by FEA. *ARMA 08-041*, (42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, held in San Francisco, June 29- July 2, 2008), 4.

[16] Zhu, C., Pouya, A., Arson, C., Ding, J., Chester, F., & Chester, J. (2016). Micro-mechanical analysis of salt creep tests with a joint-enriched Finite Element

model. *ARMA 16-239, 50th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in Houston, Texas, USA, 26-29 June 2016*, 2-3.

[17] Cornet, J., Dabrowski, M., & Schmid, D. (2018). Long term creep closure of salt cavities. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences*, 103, 96-106. doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.01.025

[18] Firme, P., Roehl, D., Romanel, C., Poiate jr, E., & Costa, A. (2014). Creep constitutive modeling applied to the stability of pre salt wellbores through salt layers. *ARMA*, 14(7459), 2,3.

[19] Liang, W., Zhang, C., Gao, H., Yang, X., Xu, S., & Zhao, Y. (2012). Experiments on mechanical properties of salt rocks under cyclic loading. *Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering*, 4(1), 54-61. doi: 10.3724/sp.j.1235.2012.00054

[20] Fjar, E., Holt, R., Raaen, A., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). *Petroleum Related Rock Mechanics* (2nd ed., p. 50). Burlington: Elsevier.

[21] SPE 24605-Barker J.W., Feland K.W., Tsao Y-H., Drilling Long Salt Sections Along the U.S Gulf Coast, SPE Drilling & Completion, presented at the 1992 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Washington,DC, Oct. 4-7.

[22] Yi, H., Zhou, H., Wang, R., Liu, D., & Ding, J. (2018). On the Relationship between Creep Strain and Permeability of Granite: Experiment and Model Investigation. *Energies*, 11(10), 2859. doi: 10.3390/en11102859

[23] SPE 76805 Settari, A. (2002, August 1). Reservoir Compaction. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/76805-JPT.

[24] Ariagno, C., & Moreno, D. (2014). *Unidad N°5: Elasticidad*. PDF.

[25] *Chapter 9. Creep*. [Ebook] (1st ed., pp. 1-9). Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/ce6e/a36fa8d80638fc5c97cb2583f3729781fa9a.pdf>

- [26] Fombuena, V., Boronat, T., Sánchez-Nácher, L., García-Sanoguera, D., & Balart, R. (2017). Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. *Modelling In Science Education And Learning*, 10(1), 137. doi: 10.4995/msel.2017.6315
- [27] Montes, J., Cuevas, F., & Cintas, J. (2014). *Ciencia e Ingeniería de Materiales* (1st ed., pp. 437-439). Madrid: Paraninfo.
- [28] Jackson, M., & Hudec, M. *Salt Tectonics* (1st ed., pp. 424-456). Cambridge, England, UK: Cambridge University.
- [29] Fredrich, J. T., Coblenz, D., Fossum, A. F., & Thorne, B. J. (2003, January 1). Stress Perturbations Adjacent to Salt Bodies in the Deepwater Gulf of Mexico. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/84554-MS
- [30] Orozco, S. O., Fontoura, S. A. B., & Inoue, N. (2013, January 1). Numerical 3D Stability Analysis of Wells Drilled Through Salt Zones. American Rock Mechanics Association.
- [31] Adachi, J. I., Nagy, Z. R., Sayers, C. M., Smith, M. F., & Becker, D. F. (2012, January 1). Drilling Adjacent to Salt Bodies: Definition of Mud Weight Window and Pore Pressure Using Numerical Models and Fast Well Planning Tool. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/159739-MS
- [32] Koupriantchik, D., Hunt, S. P., & Meyers, A. G. (2005, January 1). Geomechanical Modeling of Salt Diapirs: A Field Scale Analysis For a 3D Salt Structure From the North Sea. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [33] MidasNFX. *Understand different mesh types* [Ebook] (1st ed., pp. 4,5).
- [34] Dusseault Systems. (2017). ABAQUS Documentation (Version 2017) [Windows].

- [35] Cruz Vargas, R. (2012). *Modelado y análisis de una dovela metálica de un puente atirantado con el método de elementos finitos*. (Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [36] Ochoa Suárez, D., Vivas, J., & Santafé Rangel, E. (2009). USO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN UN MODELO DE POZO. *El Reventón Energético*, (1), 28.
- [37] Abaqus Analysis User's Manual (6.10). (2019). Retrieved from <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/books/usb/default.htm?startat=pt07ch30s03aus107.html>
- [38] Shen, X., Bai, M., & Standifird, W. (2012). *Drilling and completion in petroleum engineering, Chapter 4 Numerical scheme for calculation of shear failure gradient of wellbore and its applications*(1st ed., pp. 57-78). Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema.
- [39] Shiyuan, L. (2012). "Numerical Studies of the Deformation of Salt Bodies with embedded Carbonate Stringers" (Ph.D). Faculty of Georesources and Materials Engineering of the RWTH Aachen University, Germany.