

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

1

Análisis comparativo del comportamiento esfuerzo-deformación en pozos horizontales en Shales utilizando modelos elásticos lineales y no lineales.

Jorge Andrés Ardila Pardo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

PhD. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías físico-mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Expreso mis más sinceros agradecimientos a Dios y a todas las personas que pudieron haber aportado en el desarrollo de esta investigación, en especial a mi director el ING. Vladimir Merchán, quien siempre estuvo presente para poder culminar los objetivos propuestos y poder clarificar cualquier duda o dificultad. Finalmente agradecer a mi familia y compañeros por el constante apoyo brindado durante este trayecto.

Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Metodología	17
2.1 Análisis de los conceptos teóricos fundamentales de la geomecánica y su influencia en pozos petrolíferos.	17
2.2 Análisis, comprensión e interpretación de tres diferentes modelos constitutivos de roca.	18
2.3 Uso del software GID y Code_bright.	20
2.4 Planteamiento de las simulaciones numéricas.	21
2.5 Ejecución de las simulaciones numéricas y obtención e interpretación de los resultados.	25
3. Análisis de resultados	30
3.1 Resultados de las simulaciones para el modelo elástico-lineal.....	30
3.1.1. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en el módulo de Young.	35
3.1.2. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en la densidad de lodos.	39
3.2. Resultados de las simulaciones para el modelo Argilita.....	45
3.2.1. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en el módulo de Young del modelo Argilita.	46
3.2.2. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en la densidad de lodos del modelo Argilita.	48

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

4

3.3 Análisis comparativo de la respuesta en deformación entre el modelo elástico-lineal y el modelo Argilita.....	56
4. Conclusiones.....	60
Referencias Bibliográficas.....	62

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Valores de desplazamientos en metros en el eje x para el modelo elástico-lineal con densidad de lodos 1.68 g/cc y un valor del 100% del módulo de Young.....</i>	31
Tabla 2. <i>Valores de esfuerzos en Mega pascales en el eje x para el modelo elástico-lineal con densidad de lodos 1.68g/cc y un valor del 100% del módulo de Young.....</i>	33
Tabla 3. <i>Ejemplo de valores de desplazamientos en el eje X correspondientes a las curvas de la figura 37.....</i>	55

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Curva de esfuerzo-deformación.</i>	20
Figura 2. <i>Geometría del modelo. Esquema creado a partir de coordenadas en el espacio.</i>	21
Figura 3. <i>Modelo con aplicación de esfuerzos in-situ y restricciones en desplazamientos para el intervalo 1.</i>	23
Figura 4. <i>Modelo con aplicación de esfuerzos en las paredes del pozo correspondiente al intervalo 2.</i>	24
Figura 5. <i>Ilustración de la malla generada del cuerpo de suelo.</i>	26
Figura 6. <i>Ejemplo de alineamiento horizontal en un modelo corrido para visualización de las deformaciones del suelo.</i>	28
Figura 7. <i>Gráfico de datos con las respuestas en deformación a través de la longitud del alineamiento.</i>	29
Figura 8. <i>Curva de desplazamientos respecto al alineamiento horizontal correspondiente a la tabla 1.</i>	31
Figura 9 <i>Curva de esfuerzos respecto al alineamiento horizontal correspondiente a la tabla 2.</i> 33	
Figura 10. <i>Concentración de esfuerzos en el eje X en el cuerpo de suelo.</i>	34
Figura 11. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	35
Figura 12. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.68 g/cc.</i>	36

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

7

Figura 13. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.90 g/cc.</i>	36
Figura 14. <i>Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	37
Figura 15. <i>Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.68 g/cc.</i>	38
Figura 16. <i>Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.90 g/cc.</i>	38
Figura 17. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 100%.</i>	39
Figura 18. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 75%.</i>	40
Figura 19. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 50%.</i>	40
Figura 20. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 25%.</i>	41
Figura 21. <i>Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 100%.</i>	42
Figura 22. <i>Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 75%.</i>	42
Figura 23. <i>Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 50%.</i>	43

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

8

Figura 24. <i>Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 25%.</i>	43
Figura 25. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada coeficiente de Poisson y densidad de lodos de 1.68 g/cc.</i>	44
Figura 26. <i>Curvas de los esfuerzos en el eje X copiladas para cada coeficiente de Poisson y densidad de lodos de 1.68g/cc.</i>	45
Figura 27. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	46
Figura 28. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.68 g/cc.</i>	47
Figura 29. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.90 g/cc.</i>	47
Figura 30. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 100%.</i>	48
Figura 31. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 75%.</i>	48
Figura 32. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 50%.</i>	49
Figura 33. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 25%.</i>	50
Figura 34. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young, anisotropía de 0.8 y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	51

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

9

Figura 35. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young, anisotropía de 1.0 y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	51
Figura 36. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young, anisotropía de 1.15 y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	52
Figura 37. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada valor de anisotropía, módulo de Young del 100% y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	53
Figura 38. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada valor de anisotropía, módulo de Young del 75% y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	53
Figura 39. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada valor de anisotropía, módulo de Young del 50% y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	54
Figura 40. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada valor de anisotropía, módulo de Young del 25% y densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	54
Figura 41. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada modelo constitutivo de roca, módulo de Young del 100% y una densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	56
Figura 42. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada modelo constitutivo de roca, módulo de Young del 75% y una densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	57
Figura 43. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada modelo constitutivo de roca, módulo de Young del 50% y una densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	57
Figura 44. <i>Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada modelo constitutivo de roca, módulo de Young del 25% y una densidad de lodos de 1.50 g/cc.</i>	58

Resumen

Título: Análisis comparativo del comportamiento esfuerzo-deformación en pozos horizontales en Shales utilizando modelos elásticos lineales y no lineales.

Autor: Jorge Andrés Ardila Pardo

Palabras Clave: Esfuerzo, deformación, suelo, anisotropía, falla, software, estabilidad.

Descripción: Este proyecto de investigación tiene la finalidad de establecer un análisis comparativo de diferentes modelos constitutivos de roca en relación con su comportamiento esfuerzo-deformación, teniendo como base la variabilidad de diferentes parámetros de la misma. Para el desarrollo del análisis se tuvieron en cuenta dos procesos fundamentales con el fin de determinar un modelo más avanzado de roca: primero, aplicar y conocer los conceptos teóricos de la geomecánica y hacer uso de esta como la disciplina acorde para interpretar y desarrollar el análisis en cuestión y segundo, desarrollar un modelo en software de estudio de suelos con elementos finitos y capaz de simular y discretizar suficientes puntos que demuestren el comportamiento mecánico de la roca bajo la acción de diferentes cargas y parámetros del suelo. Por ello, se estudiaron puntos clave en las propiedades elástico-plásticas y anisotropía del suelo, así como los criterios de falla en el escenario de un pozo petrolífero a cierta profundidad en roca shale, sometido a una presión de lodos y analizado según las condiciones de estabilidad a las que podría verse envuelto. La precisión y posibilidad de mejorar las respuestas en deformación en cada simulación evidencian, a través de los resultados, un buen uso y ventaja de la modelación en software al poder construir los parámetros del modelo deseado, además de un correcto análisis de

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

11

los comportamientos elástico-lineal y elástico-no lineal luego de poder construir la interfaz de la roca Argilita, la cual fue de interés durante todo el proyecto.

Abstract

Title: Comparative analysis of stress-strain behavior in horizontal wells in Shales using linear and non-linear elastic models.

Author(s): Jorge Andrés Ardila Pardo

Key Words: Stress, strain, soil, anisotropy, failure, software, stability.

Description: This research project aims to establish a comparative analysis of different rock constitutive models in relation to their stress-strain behavior based on the variability of different rock parameters. For the analysis development, two fundamental processes were taken into account in order to determine a more advanced rock model: first, apply and know the theoretical concepts of geomechanics and make use of it as the appropriate discipline to interpret and develop the analysis in question and second, to develop a soil study software model with finite elements and capable to simulate and discretize enough points to demonstrate the mechanical behavior of the rock under the action of different loads and soil parameters. That is why key points in the elastic-plastic properties and anisotropy of the soil were studied, as well as the failure criteria in the scenario of an oil well at a certain depth in shale rock, subjected to mud pressure and analyzed according to the stability conditions to which it could be involved. The precision and possibility of improving the deformation responses in each simulation shows, through the results, a good use and advantage of software modeling by being able to build the parameters of the desired model, in addition to a correct analysis of the elastic-linear and elastic-nonlinear behaviors after being able to build the interface of the Argillite rock, which was of interest throughout the project.

Introducción

Las ramas y diferentes campos de la ingeniería civil han sido importantes referentes base y de aplicación en diversos procesos de ingeniería que de manera importante se han querido llevar a cabo para mejorar el entorno que nos rodea. La civilización humana al cambiar las condiciones del entorno entra primeramente en contacto con el suelo y con el pasar de los años, a través de la ingeniería y otros campos de estudio, complementa todo el conocimiento posible para estudiar, modificar y aprovechar la tierra sobre la que se encuentra. Por ello, en el último siglo se conforman las disciplinas modernas ligadas al estudio del suelo, por ejemplo, la mecánica de suelos, geomecánica y geotecnia; cada una con su respectivo enfoque.

La Geomecánica es una disciplina que estudia la mecánica de las rocas y analiza comportamientos de las rocas y suelos bajo condiciones de esfuerzos y deformaciones. Esta disciplina al nacer como una aplicación a diferentes diseños y propósitos, que involucran estudio de comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos, permite establecer complementariamente diferentes criterios de rotura como, por ejemplo, el criterio de falla de Mohr-Coulomb y así formular condiciones elásticas, que permiten explicar la deformabilidad de los suelos bajo esfuerzos que se aplicaran en la superficie o por acción gravitacional. En particular, durante los últimos 20 años, la geomecánica ha sido materia de estudio y aplicación en diferentes situaciones para optimizar procesos de extracción en la industria petrolera en dos aspectos fundamentales: en primera medida, para estudiar las condiciones de estabilidad durante los procesos de perforación, por otra parte, para establecer las propiedades mecánicas y condiciones hidráulicas de la roca con fines de estimulación (mejorar la productividad del reservorio), por ejemplo, se realiza en pozos

con hidrocarburos, donde se deben analizar ciertos componentes mecánicos del suelo que puedan influir de manera importante en los procesos.

Uno de los aspectos que presentan mayor incertidumbre dentro del análisis geo mecánico para aplicaciones en la industria petrolera, está relacionado con la determinación del esfuerzo horizontal máximo, normalmente se surten procesos iterativos para calcular este componente de esfuerzos, pero se requiere contar con una investigación del subsuelo detallada que incluye registros de pozo, pruebas de mecánica de roca e imágenes de pozo para llevar a cabo el proceso de calibración mencionado. En este proyecto se propone un análisis alternativo consistente en el cálculo de deformaciones de las paredes de un pozo horizontal, a partir de análisis numéricos con elementos finitos. Para llevar a cabo estos cálculos es necesario definir un modelo de comportamiento mecánico de la roca. Dentro de estas consideraciones, se define la importancia de conocer y comparar distintos modelos de roca: elástico-lineal, elástico-no lineal y elástico-no lineal con criterio de rotura, que por sus propiedades puedan describir de manera más aproximada el comportamiento de formación de las paredes del pozo a cierta profundidad y de respectivo diseño.

La estabilidad mecánica en los procesos de perforación evita que problemas de deformación, derrumbes y restricciones se presenten obligando a realizar nuevas trayectorias de perforación y diseño, lo que se traduce en mayor empleo de costos y tiempo. El análisis y comparación propuesta para diferentes modelos de roca optimiza estas variables, obteniendo la estabilidad mecánica deseada. Dado que la inestabilidad es un factor de riesgo, el modelo de roca que se escoja tiene una influencia directa sobre la aproximación en términos de estabilidad, por lo tanto, en este proyecto se analizará el efecto de la tipología del modelo utilizado para el

comportamiento de la roca y se propone utilizar los siguientes modelos: 1. Elástico-lineal 2. Elástico-no lineal-bilineal 3. Argilita (No lineal, rotura), donde es de interés llegar a formular un comportamiento no lineal que permita la rotura. Además, es de interés regular la incertidumbre que generan los esfuerzos horizontales ya que estos influyen en los procesos de producción de los reservorios al poder obtener mayores precisiones en los cálculos. Así, la principal propuesta surge de la posibilidad de realizar un conjunto de simulaciones numéricas en cada escenario y modelo de roca para comparar los resultados obtenidos referentes al comportamiento mecánico de un pozo.

En el presente trabajo se aprovechan los aspectos fundamentales de la geomecánica y junto al desarrollo tecnológico que presentan los softwares de modelamiento de suelos, se optimizan los procesos de estudio. En este caso, el interés se centra en realizar un análisis comparativo de la respuesta esfuerzo-deformación de un pozo horizontal en roca arcillosa utilizando diferentes modelos constitutivos elásticos lineales y no lineales, evaluando la influencia de la anisotropía de esfuerzos in-situ, comparando las zonas de daño resultado del análisis por los diferentes modelos constitutivos y estableciendo la influencia de la presión de lodos en la perforación del pozo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo de la respuesta esfuerzo-deformación de un pozo horizontal en roca arcillosa utilizando diferentes modelos constitutivos elásticos lineales y no lineales.

1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la influencia de la anisotropía de esfuerzos in-situ sobre las deformaciones de pared del pozo horizontal.
- Comparar las zonas de daño resultado del análisis por los diferentes modelos constitutivos.
- Establecer la influencia de la presión de lodo de perforación en el comportamiento esfuerzo deformación del pozo.

2. Metodología

2.1 Análisis de los conceptos teóricos fundamentales de la geomecánica y su influencia en pozos petrolíferos.

Se estudiaron los conceptos acordes y necesarios de la geomecánica para llevar a cabo un análisis que permita entender los modelos constitutivos posibles de roca que se encuentran en las paredes de pozo. Se dispuso al igual, comprender el comportamiento mecánico caracterizado y a cuantificar en base a los problemas las variables propuestas. Por ello, se estudiaron las propiedades elásticas de los subsuelos, condiciones de esfuerzo en ellos y comportamientos de la presión de fluidos en los cuerpos rocosos.

Los materiales elásticos tienen como propiedad unas condiciones físicas y mecánicas que les permiten deformarse bajo la acción de esfuerzos y volver a la forma original al retirarse. La elasticidad, es una propiedad de un material ideal y es posible vincularla con los materiales que se utilizan en ingeniería, incluyendo a las rocas en mayor o menor grado, en función de cuanto estos materiales se acercan al ideal

Esto depende de tres factores principales: homogeneidad, isotropía y continuidad, los cuales puede ser definidos dentro de ciertos límites, la homogeneidad como una caracterización de la continuidad física de un cuerpo, la isotropía como una medida de las propiedades direccionales de un material y la continuidad determinándola según algunos casos por medio de la porosidad y la cantidad de fallas en un cuerpo rocoso.

Las condiciones de esfuerzo a las que pueden ser sometidas las rocas son diferentes según la dirección de aplicación de la carga. El término, hace referencia a la aplicación de una carga

distribuida sobre un área de contacto y dependiendo de esta el esfuerzo puede reconocerse en tres diferentes tipos: de compresión, de tensión y de cizalla. Sin embargo, existen variedades en la tipología según su dirección o distribución. Los esfuerzos de compresión ocurren cuando los cuerpos rocosos se comprimen por fuerzas rígidas hacia el cuerpo, los esfuerzos de tensión son el resultado de las fuerzas que actúan a lo largo de la misma línea del cuerpo rocoso en dirección contraria u opuesta. Este tipo de esfuerzo separa o contribuye a la fisura de las rocas y el esfuerzo de cizalla es aquel que actúa en paralelo y en direcciones opuestas para generar una deformación por desplazamiento.

La presión de fluidos, por su parte, es también llamada densidad de lodos y puede ser representado como un líquido o sustancia de distintas combinaciones y propiedades físicas y químicas. Este se caracteriza por ser el principal generador de presiones hidrostáticas en un pozo y las deformaciones de pared.

2.2 Análisis, comprensión e interpretación de tres diferentes modelos constitutivos de roca.

Se seleccionaron en base a los objetivos propuestos, los modelos de roca, Elástico-lineal, Elástico-no lineal-bilineal y Argilita para posteriormente comparar los resultados producto de las siguientes fases metodológicas. Esto con el fin de tener claridad en caso de establecerse un modelo avanzado que se adhiera a las mejores condiciones de estabilidad de un pozo horizontal. El análisis de los modelos antes de ser trabajados permitió comprender que contenía cada escenario y como se describía.

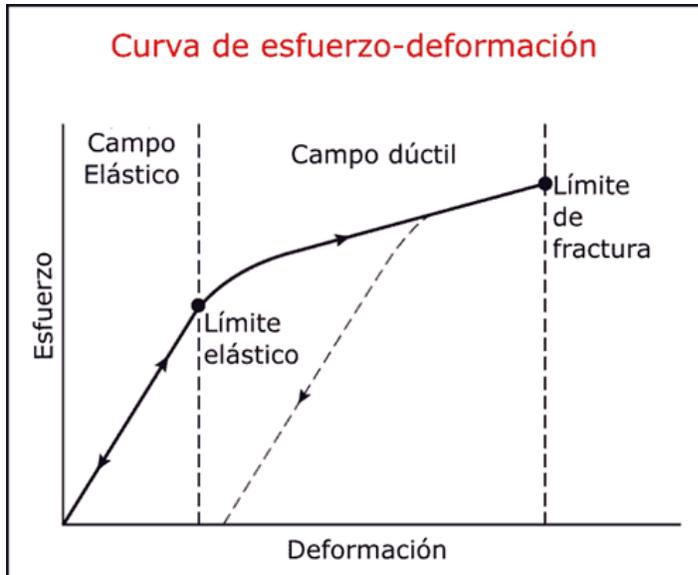
Un modelo de elasticidad lineal determina cuerpos elásticos lineales con pequeñas deformaciones para representar una variación lineal, la cual cuenta con un solo módulo de

elasticidad. Este modelo no permite la rotura en los cuerpos y en procesos naturales de descarga de esfuerzos, el rango elástico lineal deja que las deformaciones sean recuperables.

Un modelo de elasticidad no lineal describe una relación lineal hasta un límite elástico, para luego entrar en un campo dúctil donde las deformaciones aumentan considerablemente para aumentos de esfuerzos pequeños. En este modelo se puede llegar también a un límite de fractura permitiendo la rotura de un cuerpo sólido y da paso a que el rango elástico no lineal permita deformaciones no recuperables en procesos de descarga. Condiciones de porosidad se pueden encontrar en el cuerpo rocoso para estas condiciones de variación de esfuerzo deformación. Por otra parte, el modelo de elasticidad bilineal representa gráficamente dos variaciones lineales y por ende dos módulos elásticos. En el primer campo elástico, las deformaciones son pequeñas para aumentos de esfuerzo y en el segundo campo las deformaciones son grandes para aumentos de esfuerzo.

El modelo Argilita permite que distintos parámetros de rotura se den para cuerpos rocosos conformados por la Argilita, una roca sedimentaria compacta caracterizada por ser un esquisto con fisuras poco desarrolladas. Al haber un límite de rotura, previamente el modelo genera deformaciones aceleradas para aumentos de esfuerzo, describiendo un comportamiento no lineal. Así mismo, se establece que las deformaciones no son recuperables para este modelo en caso de presentarse procesos naturales de descarga.

Figura 1 Curva de esfuerzo-deformación.



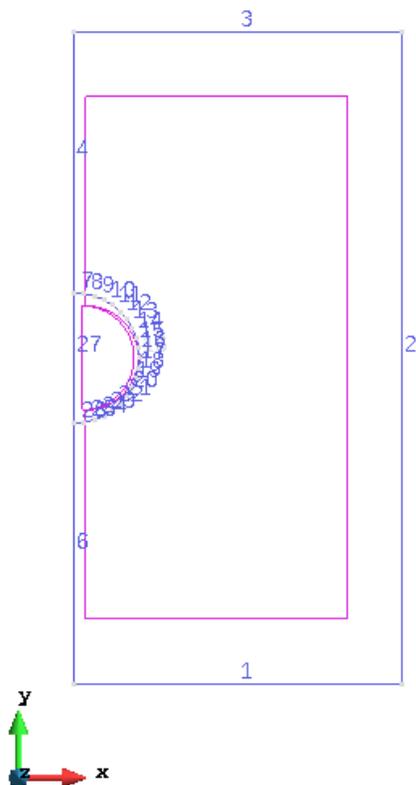
2.3 Uso del software **GID** y **Code_bright**.

Se utilizó este material avanzado de apoyo en los procesos de cálculo para la realización del proyecto dada la posibilidad de establecer modelos geométricos, asignación de diversos materiales, condiciones de frontera, intervalos de análisis y problemas mecánicos aplicables mediante el uso del método de elementos finitos. El método es aplicable gracias a la interacción y procesamiento entre (GID) y (Code_bright). Como metodología se iniciaron ejercicios de ejemplo en el software para entender el proceso y manejo como lo son, problemas mecánicos en cimientos superficiales, hidráulica de canales y demás. Posteriormente, con la especialización del software se construyó el modelo y problema a estudiar.

Como se puede evidenciar en la figura 2. Se desarrolló la geometría del modelo, esta mediante el uso de coordenadas dando así las longitudes y características del suelo y el pozo. Debido a los alcances del software fue posible dibujar la geometría del pozo horizontal en forma

poligonal y como un medio círculo de respectivo diámetro aprovechando la simetría del problema. De igual forma, se enumeraron las líneas que componen el dibujo para la posterior asignación de propiedades y poder diferenciarlas. En el caso de las paredes del pozo, se obtuvieron diversas enumeraciones, dado que el medio círculo es un polígono formado por la unión de líneas rectas.

Figura 2. Geometría del modelo. Esquema creado a partir de coordenadas en el espacio.



2.4 Planteamiento de las simulaciones numéricas.

Previo a correr los resultados del modelo construido, se analizaron los procesos iterativos que con el software se pudieron realizar. Se establecieron los valores de coordenadas de la localización de la perforación, geometría del entorno y del pozo y su profundidad. Se plantearon las iteraciones y/o simulaciones numéricas luego de definir los parámetros.

Para el primer planteamiento, al contar con la geometría del modelo, se comenzó atribuyéndole los parámetros del material shale al suelo y al suelo de perforación. Para el modelo elástico-lineal, se determinó un valor específico para el módulo de Young de 18615 Mpa caracterizando el comportamiento del material como elástico y se determinó un valor para el coeficiente de Poisson de 0.22, estableciendo una relación para las diferentes deformaciones de la roca. En el caso de los modelos no lineales, se definieron los parámetros de la roca Argilita, módulo de Young para una diferente matriz y diferentes coeficientes relacionados a la succión, cohesión y fricción.

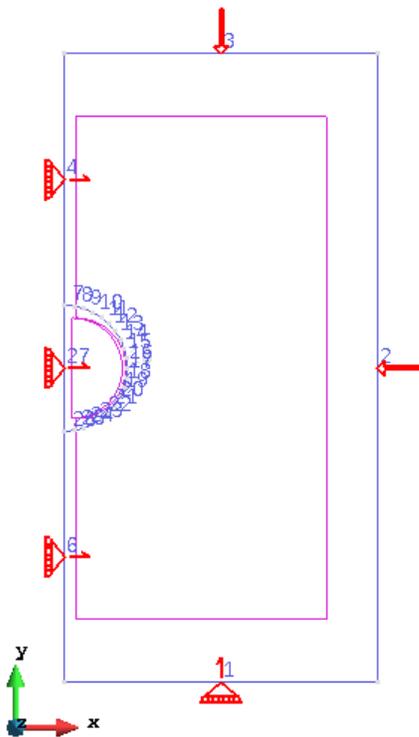
Se plantearon dos intervalos para el problema, las unidades de discretización fueron días y se establecieron dos intervalos de 0 a 100 y de 100 a 148 días. El primero, representa las condiciones de esfuerzo in-situ, la presión de agua existente y la continuidad del suelo al no haber sido perforado aun el pozo y el segundo, representa las condiciones de esfuerzos, en este caso con valores puntuales de carga en las paredes del pozo ya perforado para la representación de la presión de lodos tomando tres densidades diferentes de análisis: 1.50 g/cc, 1.68 g/cc y 1.90 g/cc.

Posteriormente se definieron los datos del problema elástico-lineal y elástico-no lineal relacionados a la ecuación de comportamiento y desarrollo mecánico del problema, así como las iteraciones, el equilibrio de esfuerzos y el balance de masa de agua.

Se plantearon seguidamente las condiciones del problema, entre ellas, las condiciones de borde y las incógnitas iniciales. No se analizaron fuerzas o condiciones nodales, se aplicaron esfuerzos para condiciones de línea y superficie. Como se evidencia en la figura 3, se aplicaron

las respectivas cargas de esfuerzos in-situ para el intervalo 1 correspondientes a 74.67 Mpa en la dirección X y 64.93 Mpa en la dirección Y con unas restricciones de desplazamiento.

Figura 3. Modelo con aplicación de esfuerzos in-situ y restricciones en desplazamientos para el intervalo 1.



Se aplicó además, presión de agua con un valor de 58.68 Mpa y una porosidad inicial de 0.4 sobre las condiciones de la superficie del suelo.

Para el intervalo 2, se mantuvieron las mismas condiciones de borde, pero la perforación se desarrolló aplicando esfuerzos puntuales sobre las paredes del pozo para representar la presión de lodos, de esta manera, se idealizó la excavación y se eliminaron las restricciones de desplazamiento en esa localización, tal como se muestra en la figura 4.

Por último, para plantear la simulación correspondiente a la evaluación de la anisotropía, se modificaron en las condiciones de línea del problema elástico-no lineal, referente al modelo Argilita, los esfuerzos in-situ vertical y horizontal en cada intervalo, esto para cada densidad de lodos. Los modelos anisotrópicos se corrieron para una evaluación del esfuerzo horizontal sobre el esfuerzo vertical y una relación de 0.8, 1.0 y 1.15 para este cociente.

$$\frac{S_H}{S_V} = 0.8, 1.0, 1.15. \quad (1)$$

Siguiendo este análisis, el esfuerzo horizontal (Mpa) es el valor que cambia para dar con las siguientes relaciones.

$$\frac{51.94}{64.93} = 0.8 \quad (2)$$

$$\frac{64.93}{64.93} = 1.0 \quad (3)$$

$$\frac{74.61}{64.93} = 0.8 \quad (4)$$

Una vez se determinaron las simulaciones, se estableció un último análisis que consiste en la variación del módulo de Young para cada planteamiento del modelo elástico-lineal y Argilita y la variación del coeficiente de Poisson para los planteamientos del modelo elástico-lineal, esta última debido a la primera influencia que se evidencio con la variación del coeficiente. Las variaciones que se trabajaron corresponden al análisis del 100%, 75%, 50% y 25% del módulo de Young. En el caso del Coeficiente de Poisson se variaron los valores dentro del rango en el que comúnmente se comportan los materiales rocosos proponiendo valores de 0.35, 0.30, 0.25, 0.22 y 0.20.

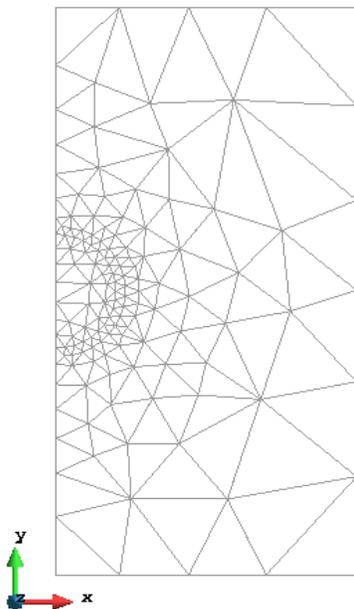
2.5 Ejecución de las simulaciones numéricas y obtención e interpretación de los resultados.

Luego de definir y plantear las simulaciones numéricas, se ejecutó el programa GID y Code_bright para la obtención de los valores de deformación y esfuerzos de cada modelo

constitutivo, bajo los efectos de las propiedades y comportamientos mecánicos del subsuelo trabajado, esfuerzos in-situ presentados y balance de presiones hidrostáticas gracias a los fluidos de perforación. Se interpretó cuáles fueron los resultados esperados o favorables del escenario para establecer un modelo más avanzado para la estabilidad mecánica del pozo.

Para ello, se tuvieron en cuenta dos ejecuciones importantes en el programa. Primero, generar una malla del modelo geométrico la cual se obtiene de entrar el tamaño de los elementos, estos en distribución triangular para discretizar la superficie. Se generó la malla para cada planteamiento y se obtuvo el número de nodos, número de elementos triangulares y demás parámetros de la malla la cual es ilustrada en la figura 5. La función del software de correr las simulaciones por el método de elementos finitos es descrita en este proceso al poder dividir la masa del suelo en unidades discretas.

Figura 5. *Ilustración de la malla generada del cuerpo de suelo.*

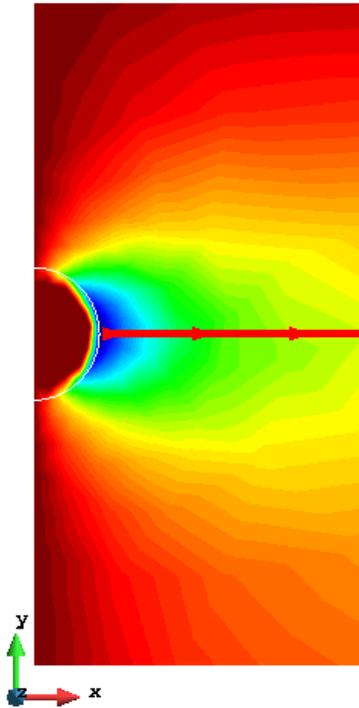


La segunda ejecución, previa a correr los modelos, consiste en la opción de cálculo del software, en donde las iteraciones se llevan a cabo en un determinado periodo de tiempo según las ecuaciones planteadas para el problema y los parámetros mecánicos.

Una vez calculado el sistema, se dispuso a correr las simulaciones ejecutando la opción de postproceso del software GID, en donde es posible visualizar las diferentes respuestas y poder variarlas en los periodos de intervalo planteados en el preproceso para analizar la cinemática del comportamiento mecánico del suelo.

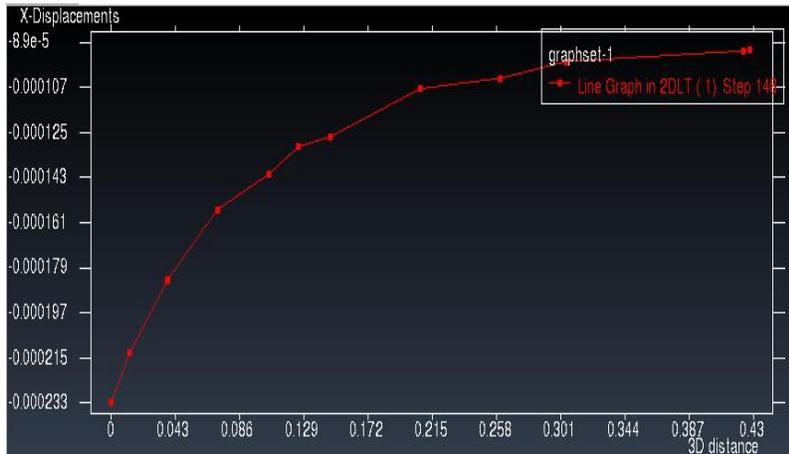
Conforme a los objetivos del problema se obtuvieron los resultados de desplazamientos y esfuerzos en el eje X y el eje Y, siendo posible la cuantificación de la interfaz visual en el programa. Para la interpretación de los resultados, se trazó por medio de la función del software de generar gráficos de análisis sobre las respuestas en el cuerpo del suelo, una línea recta horizontal que va desde un poco más a la derecha de la pared de pozo, hasta el extremo derecho del cuerpo en toda la mitad de su longitud vertical, como se puede evidenciar en la figura 6. Este alineamiento arroja las variaciones de la respuesta mecánica seleccionada, por medio del gráfico ilustrado en la figura 7 a través de toda su longitud y es generado a partir de unas coordenadas para mayor exactitud en el trazado. Los datos de esta grafica se exportaron a una tabla de Excel para un mejor manejo y análisis de los resultados. Al exportar los datos de cada planteamiento y cada simulación fue posible compilar las respuestas en curvas almacenadas en un solo gráfico y dar finalmente con el análisis comparativo de los modelos constitutivos de roca, la cual es la finalidad del proyecto.

Figura 6. *Ejemplo de alineamiento horizontal en un modelo corrido para visualización de las deformaciones del suelo.*



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 7. Gráfico de datos con las respuestas en deformación a través de la longitud del alineamiento.



3. Análisis de resultados

Para el análisis comparativo, en cada planteamiento y simulación, se obtuvieron individualmente los resultados de esfuerzo y deformación para cada variación del módulo de Young y coeficiente de Poisson. Se evidencio qué variaciones serían significativas en la zona perturbada próxima a la pared del pozo y qué otras variaciones no implicarían cambios importantes en los resultados.

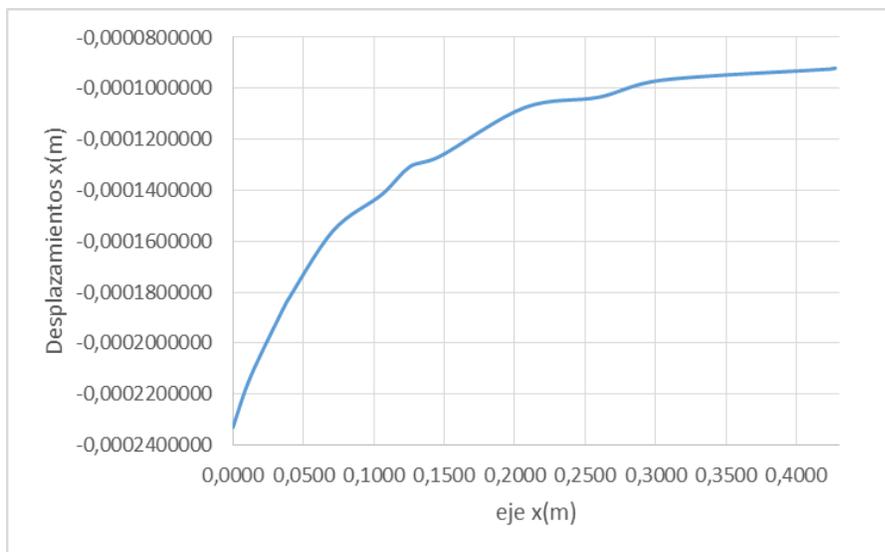
3.1 Resultados de las simulaciones para el modelo elástico-lineal.

De las tres densidades de lodo distintas, se corrió la primera simulación numérica para la densidad de 1.68 g/cc, con el fin de analizar el comportamiento inicial de los desplazamientos en el eje X y en el eje Y y los esfuerzos en el eje X y en el eje Y. En la tabla 1 y la figura 8 se registran los resultados de las deformaciones, en el eje X para el 100% del módulo de Young, correspondiente a 18615 Mpa y para la densidad de lodos mencionada.

Tabla 1. Valores de desplazamientos en metros en el eje x para el modelo elástico-lineal con densidad de lodos 1.68 g/cc y un valor del 100% del módulo de Young.

CURVA DESPLAZAMIENTOS XX	
X(m)	Uxx(m)
0,0000	-0,0002330618
0,0126	-0,0002130252
0,0378	-0,0001841523
0,0379	-0,0001839977
0,0380	-0,0001839054
0,0711	-0,0001558444
0,1056	-0,0001416778
0,1257	-0,0001306517
0,1470	-0,0001266590
0,2071	-0,0001075045
0,2604	-0,0001033810
0,3049	-0,0000967331
0,4233	-0,0000924207
0,4275	-0,0000920628

Figura 8. Curva de desplazamientos respecto al alineamiento horizontal correspondiente a la tabla 1.



Como se puede evidenciar, el alineamiento arroja 14 coordenadas del eje del trazo para cada respectivo desplazamiento. De esta manera se analizaron las curvas de los diferentes planteamientos y compilaciones a lo largo del proyecto.

Respecto a los datos obtenidos se pudo observar que al recorrer cuerpo de suelo de izquierda a derecha, es decir el sentido del alineamiento, los desplazamientos disminuían (el signo negativo indica la dirección de los desplazamientos). Es decir, disminuían conforme se alejaba de la pared del pozo. La zona de daño se localiza en las zonas aledañas a la excavación. Esta concentración se puede demostrar en la figura 6 anterior.

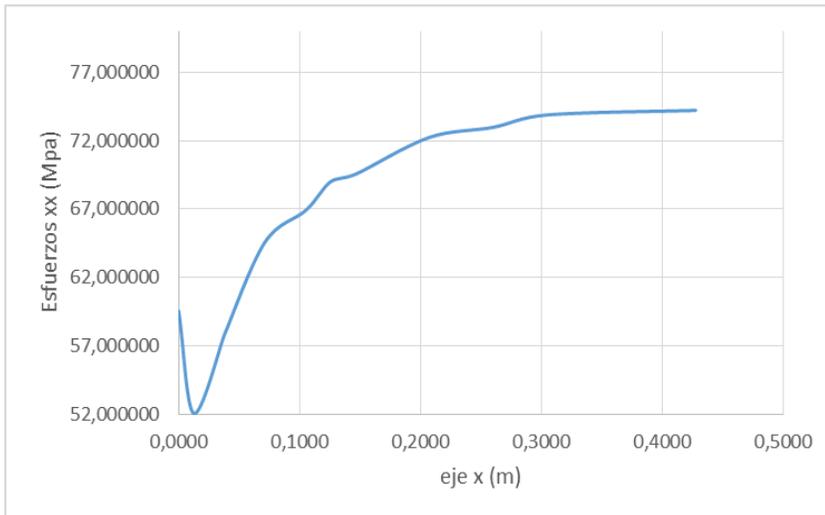
Al analizar los esfuerzos en el eje X, obtenidos para el mismo alineamiento, se encuentra una considerable concentración de esfuerzos en las zonas aledañas a la excavación, de manera exacta a la derecha de la pared del pozo, luego una disminución y para el resto del trayecto un aumento de los valores. Esta tendencia, descrita por las tensiones internas a las que se somete la roca al aplicar las cargas.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Tabla 2. Valores de esfuerzos en Mega pascales en el eje x para el modelo elástico-lineal con densidad de lodos 1.68g/cc y un valor del 100% del módulo de Young.

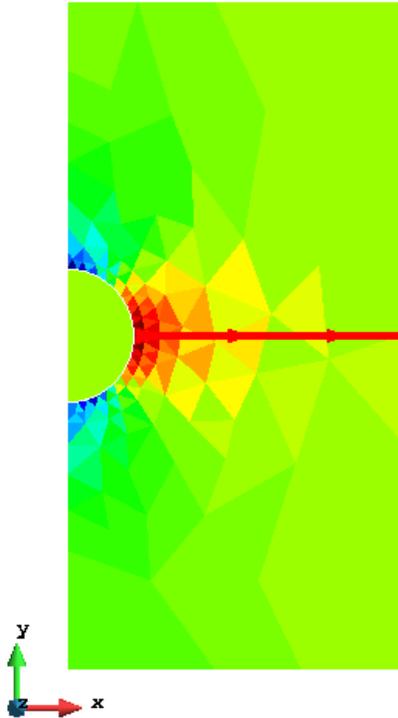
CURVA ESFUERZOS XX	
X(m)	Sxx(Mpa)
0,0000	59,533726
0,0126	52,044968
0,0378	57,794868
0,0379	57,826668
0,0380	57,848087
0,0711	64,551331
0,1056	66,941681
0,1257	69,000969
0,1470	69,573250
0,2071	72,235367
0,2604	72,981392
0,3049	73,889275
0,4233	74,206169
0,4275	74,223083

Figura 9 Curva de esfuerzos respecto al alineamiento horizontal correspondiente a la tabla 2.



Nota: La zona perturbada de esfuerzos se concentra en la misma zona como se muestra en la figura 10.

Figura 10. *Concentración de esfuerzos en el eje X en el cuerpo de suelo.*

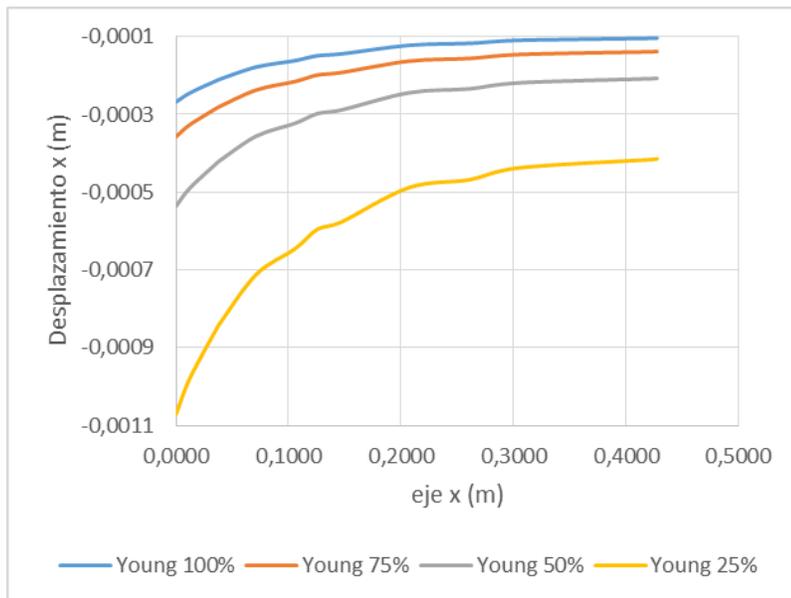


Estos mismos datos, tablas, curvas y gráficos fueron obtenidos y estudiados para las distintas variaciones del módulo de Young, el coeficiente de Poisson y para cada densidad de lodos. Así fue posible la compilación y el análisis comparativo para el modelo elástico-lineal. Es de mencionar que, si bien también se obtuvieron los resultados para los desplazamientos en el eje Y y los esfuerzos para el mismo eje, estos no se compilaron para el análisis debido al interés y objetivo de la investigación relacionado con la incertidumbre de los esfuerzos horizontales máximos para el análisis de estabilidad y futuros métodos de calibración.

3.1.1. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en el módulo de Young.

Como se planteó previamente, se agruparon las curvas correspondientes a la influencia de los valores del 100%, 75%, 50% y 25% del módulo de Young, respectivamente, 18615 Mpa, 13961.25 Mpa, 9307.5 Mpa y 4653.75 Mpa. Se realizó el análisis de curvas para cada densidad de lodos.

Figura 11. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.50 g/cc.



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 12. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.68 g/cc.

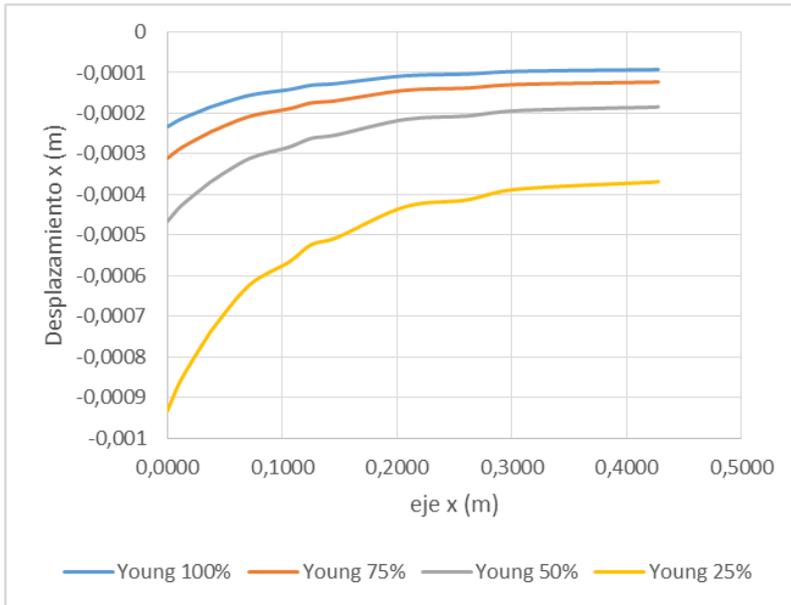
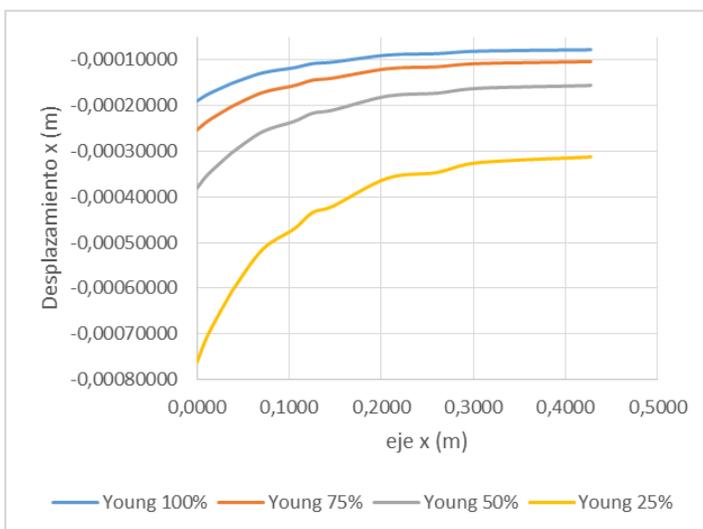


Figura 13. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.90 g/cc.

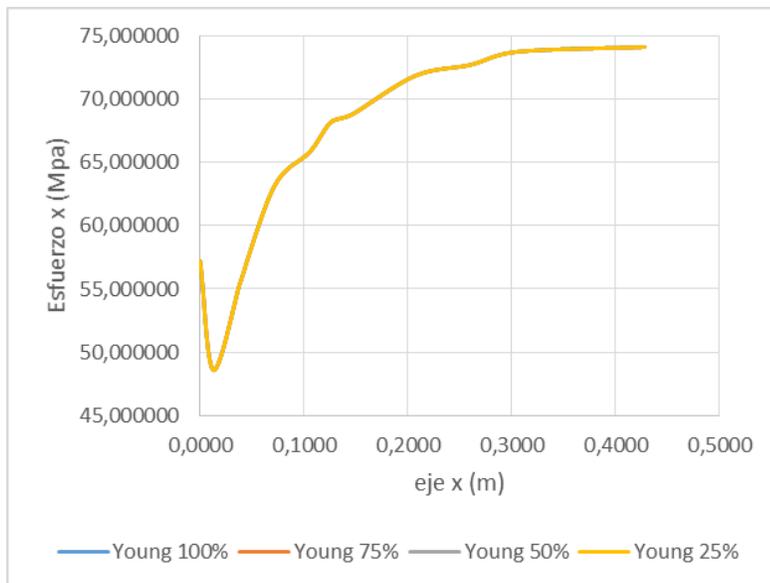


ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Como se puede observar, el rango de desplazamientos varía entre 0.0001 m y 0.0011 m; es decir, entre 0.1mm y 1.1mm y el valor del módulo que arroja los menores desplazamientos es el 100% de este. Mientras que para el 25% del valor se registran los mayores desplazamientos. Se pudo constatar nuevamente que un suelo de propiedad elástico-lineal e isótropo presenta un mejor comportamiento mecánico referente a la estabilidad del pozo cuando el valor del módulo de Young es mayor y se caracteriza por ser más rígido.

Con el objetivo de analizar los esfuerzos en el eje X se agruparon las respectivas curvas para las variaciones del módulo de Young propuestas y para cada densidad de lodos.

Figura 14. Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.50 g/cc.



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 15. Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.68 g/cc.

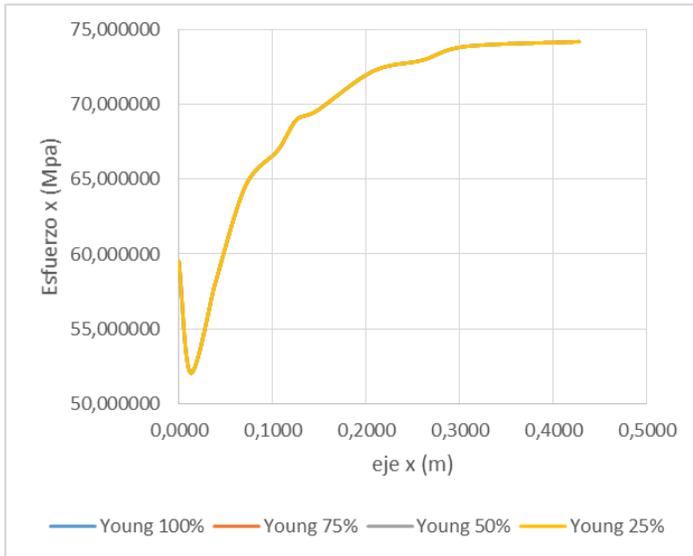
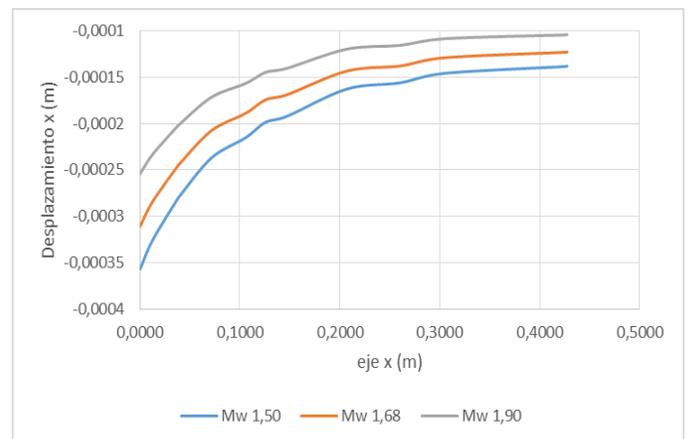
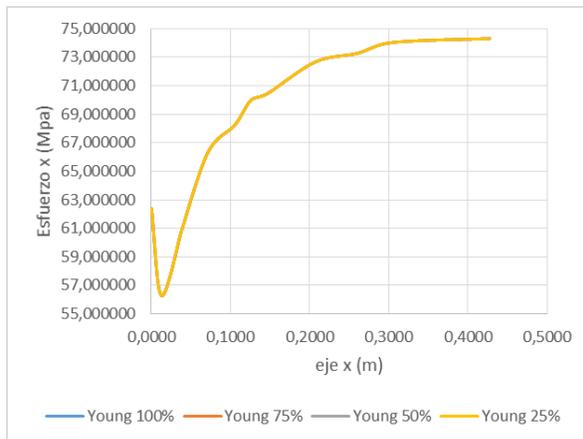


Figura 16. Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.90 g/cc.



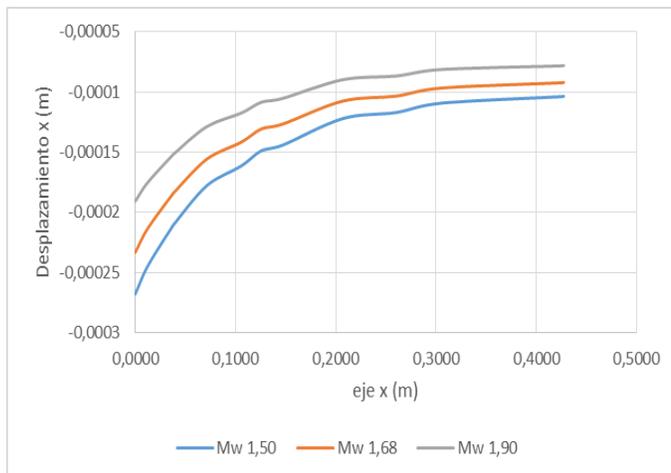
Como se puede observar en el escenario de los esfuerzos, y si bien, cada densidad de lodos cambia el rango de los esfuerzos presentes, la variación del módulo de Young o disminución de su valor no influye en los resultados, ratificando la independencia de esta constante sobre los esfuerzos

siempre y cuando no se exceda el límite elástico del suelo. El rango general de la concentración de esfuerzos en el cuerpo varía entre 48 Mpa y 75 Mpa.

3.1.2. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en la densidad de lodos.

Complementariamente se realizó el análisis de manera transversal agrupando las tres densidades de lodo $Mw_1 = 1.50$ g/cc, $Mw_2 = 1.68$ g/cc y $Mw_3 = 1.90$ g/cc, esta vez para cada módulo de Young.

Figura 17. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 100%.



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 18. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 75%.

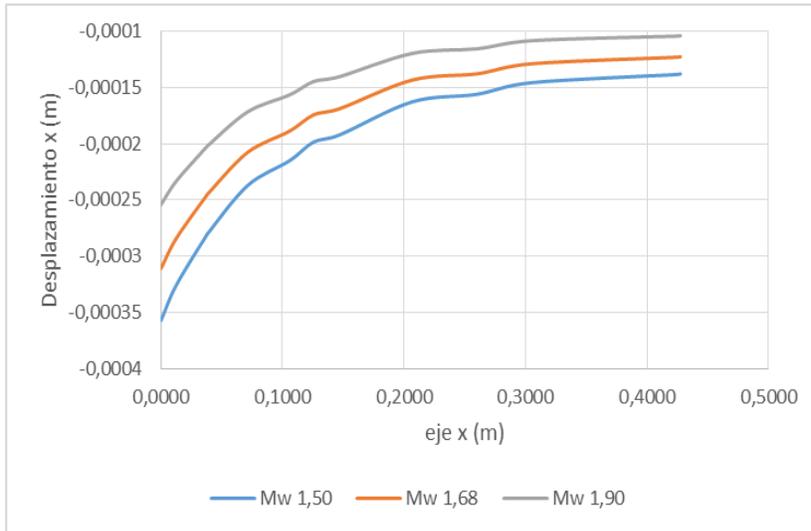


Figura 19. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 50%.

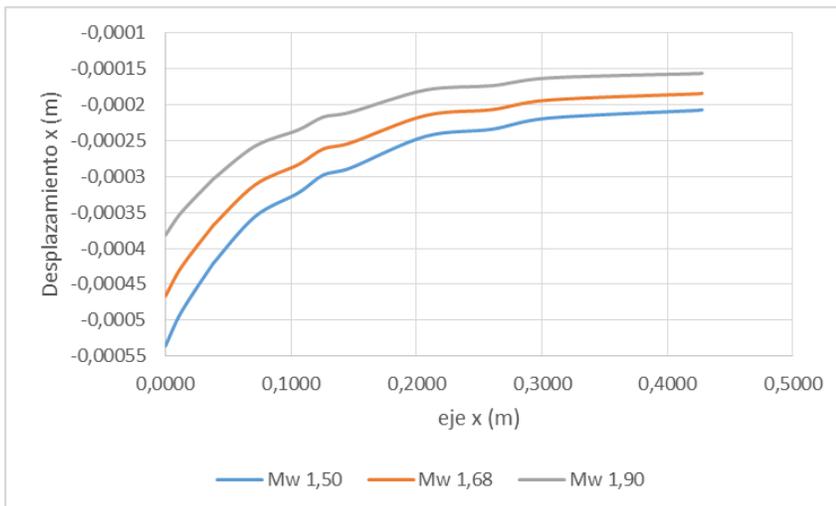
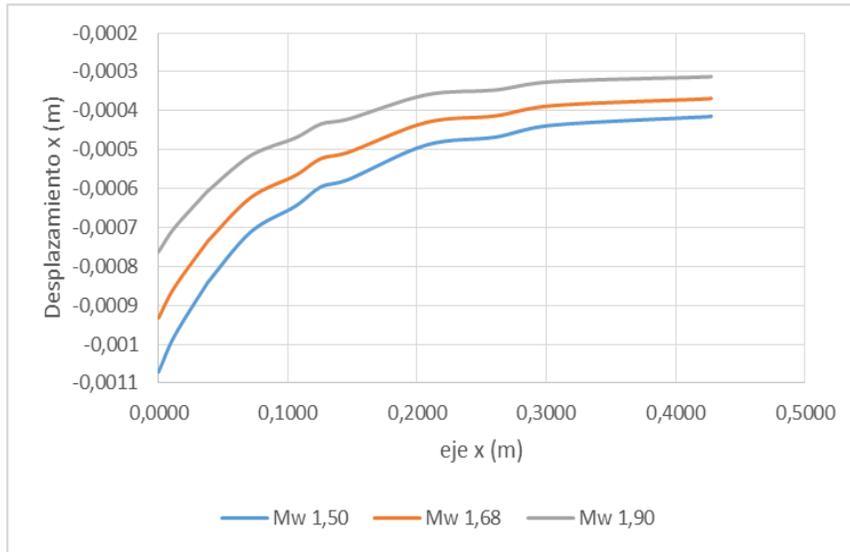


Figura 20. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 25%.



La influencia de la densidad de lodos sobre los desplazamientos horizontales recae en que para una mayor presión, los desplazamientos son menores como ocurre para cada módulo de Young. Este comportamiento particular, responde al efecto que genera el balance de presiones hidrostáticas sobre las paredes del pozo. Además, el rango de desplazamientos varía entre 0.00007 m y 0.0011 m, es decir, entre 0.07mm y 1.1 mm.

Siguiendo el objetivo de analizar los esfuerzos en el eje X, se agruparon las respectivas curvas para las variaciones en la densidad de lodos propuestas y para cada módulo de Young.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 21. Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 100%.

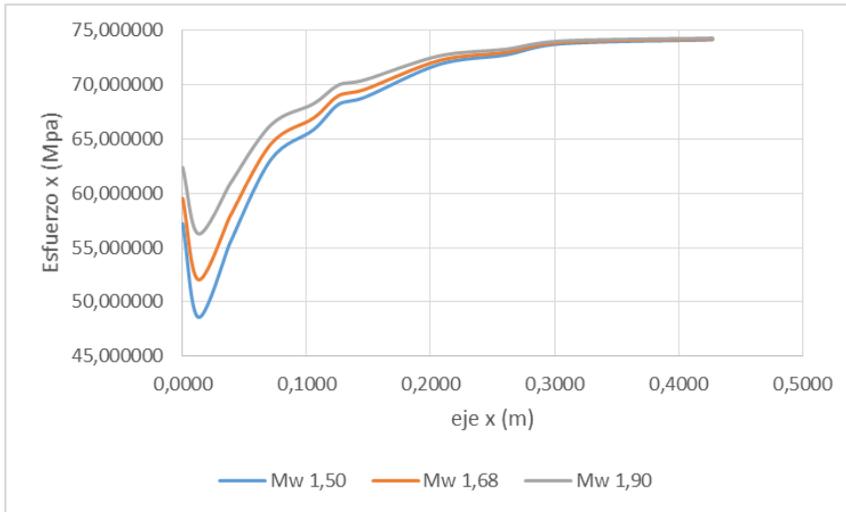
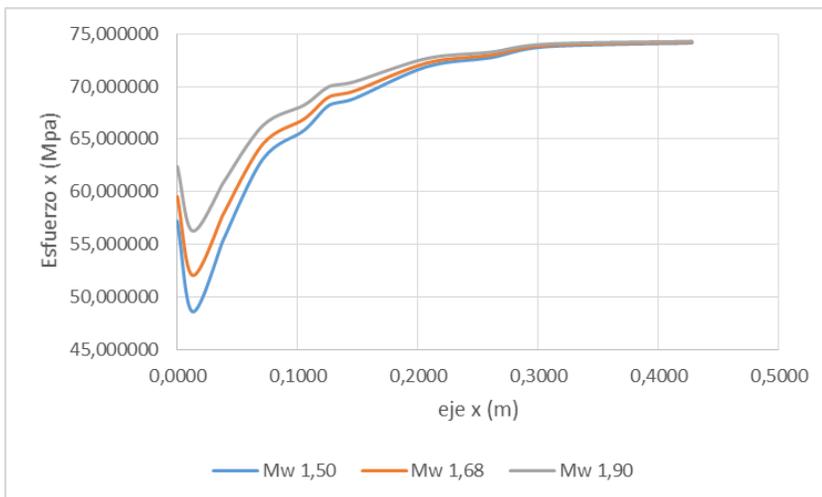


Figura 22. Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 75%.



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 23. Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 50%.

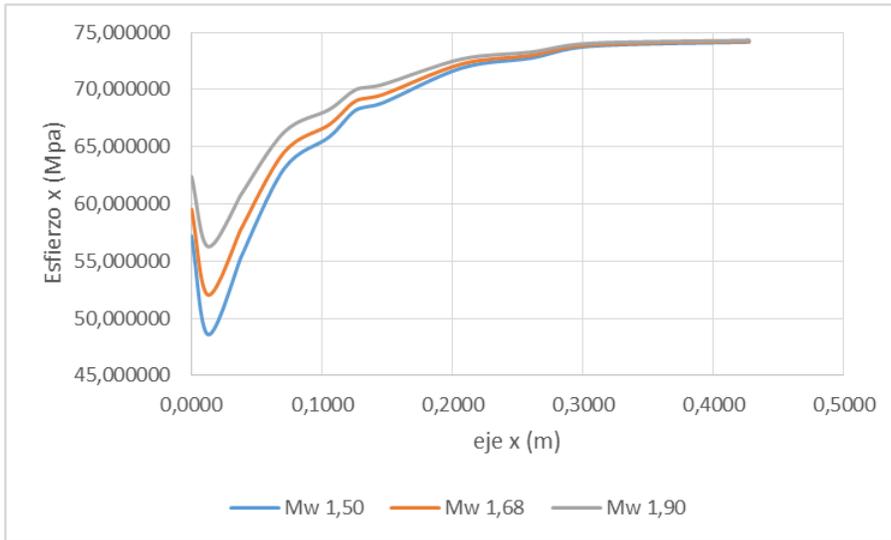
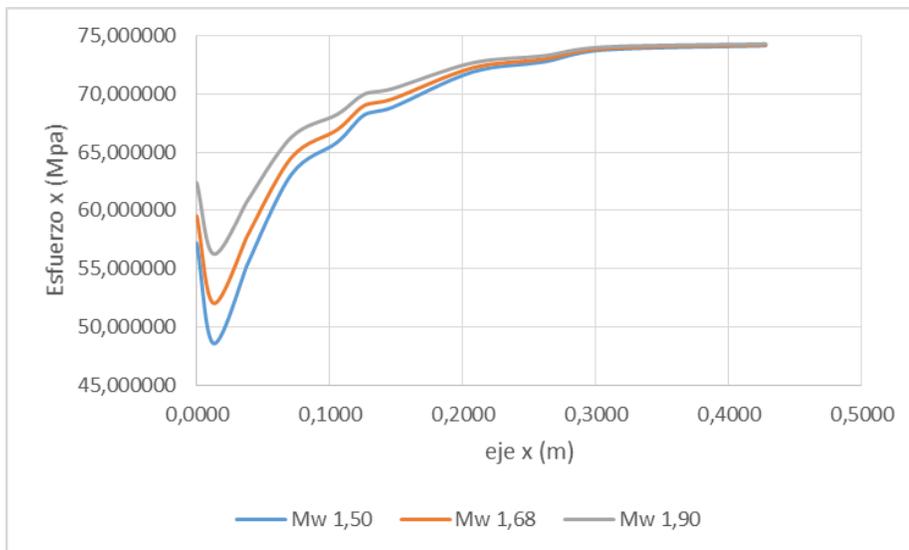


Figura 24. Curvas de los esfuerzos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 25%.



A diferencia de la nula variación en los esfuerzos para cada módulo de Young, como se demuestra con el mismo rango de esfuerzos para las cuatro figuras anteriores, si hay una influencia de la densidad de lodos aplicada sobre la concentración de esfuerzos y para una presión mayor los valores aumentan. El rango se encuentra al igual entre 48 Mpa y 75 Mpa.

3.1.2. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en el coeficiente de Poisson.

Este planteamiento se desarrolló con la densidad de lodos $Mw_2 = 1.68 \text{ g/cc}$, la cual fue con la que se trabajó inicialmente. Se realizó el análisis únicamente para este valor debido a la baja influencia que se demuestra sobre los desplazamientos y esfuerzos horizontales respecto la influencia del módulo de Young. Se limitó entonces el análisis para esta densidad y una variación del coeficiente comprendida para 0.35, 0.30, 0.25, 0.22 y 0.20.

Figura 25. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada coeficiente de Poisson y densidad de lodos de 1.68 g/cc.

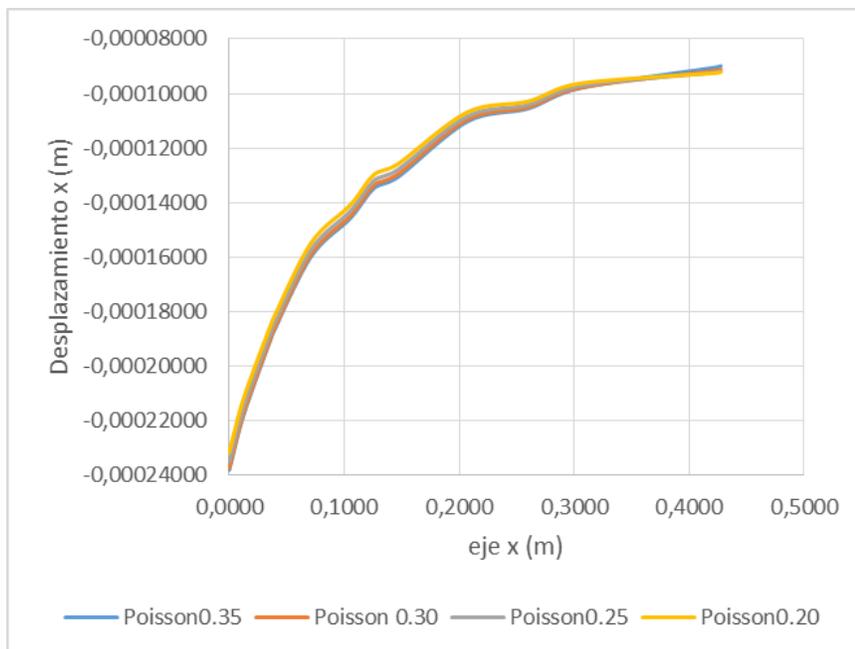
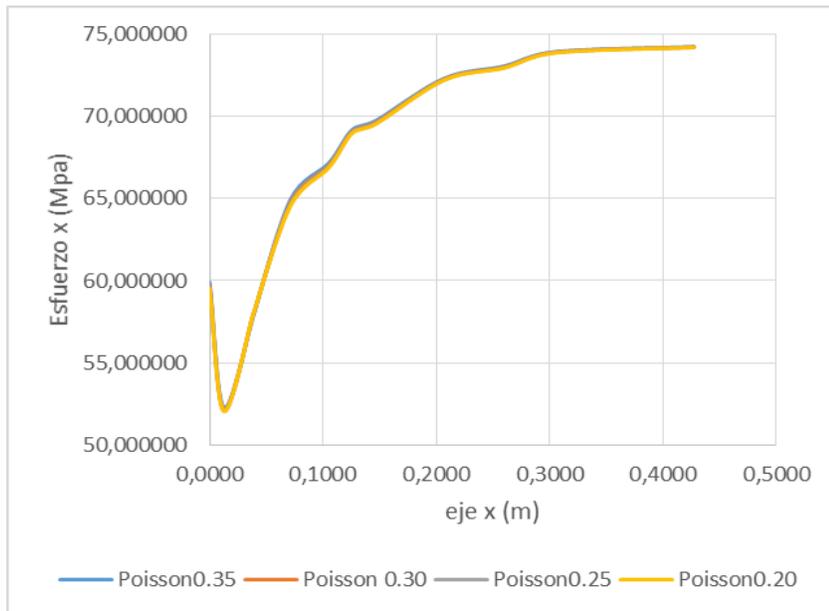


Figura 26. Curvas de los esfuerzos en el eje X copiladas para cada coeficiente de Poisson y densidad de lodos de 1.68g/cc.



Como se puede observar, la influencia sobre los desplazamientos y esfuerzos registra una variación considerablemente baja. Se encontró que para cada densidad la tendencia era similar, por lo que no se tuvo en cuenta esta variación para las posteriores simulaciones del modelo elástico-no lineal Argilita. Cabe recordar que los siguientes planteamientos se desarrollaron para un coeficiente de 0.22

3.2. Resultados de las simulaciones para el modelo Argilita.

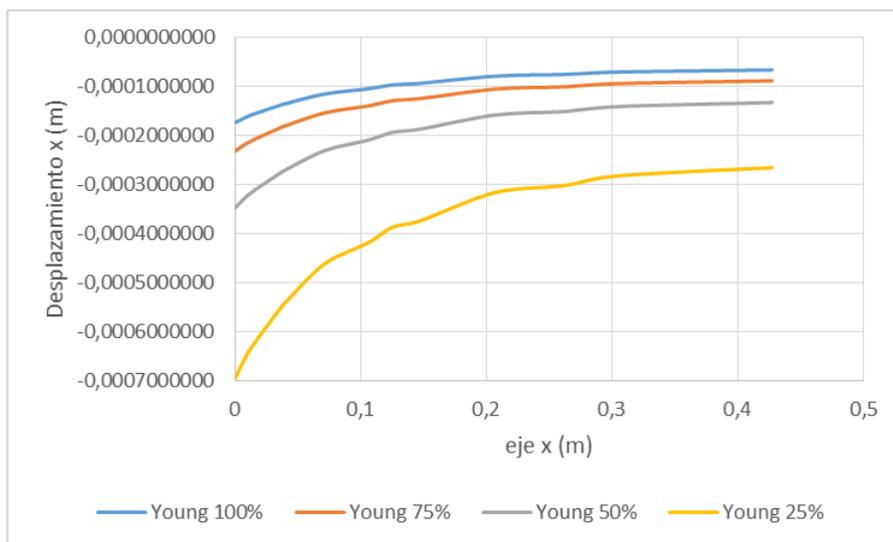
Para las simulaciones del modelo Argilita, se obtuvo una tendencia similar en la distribución de los desplazamientos y esfuerzos para el alineamiento horizontal como se muestra en las figuras 8 y 9. La zona perturbada de esfuerzos, se localiza en las mismas zonas aledañas a la perforación y lo mismo lo hace la zona de daño producto de los desplazamientos como se puede evidenciar en la figura 10. Es por ello, que el análisis de interés se realizó solamente sobre las curvas de desplazamiento

horizontal agrupadas para cada módulo de Young y densidad de lodos al conocer la variación e incidencia de los esfuerzos. Además, se evaluó la influencia de la anisotropía de esfuerzos sobre los desplazamientos horizontales.

3.2.1. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en el módulo de Young del modelo Argilita.

Se realizó el mismo planteamiento del modelo elástico-lineal y se agruparon las curvas correspondientes a la influencia de los valores del 100%, 75%, 50% y 25% del módulo de Young. Se realizó el análisis de curvas para cada densidad de lodos.

Figura 27. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.50 g/cc.



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 28. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.68 g/cc.

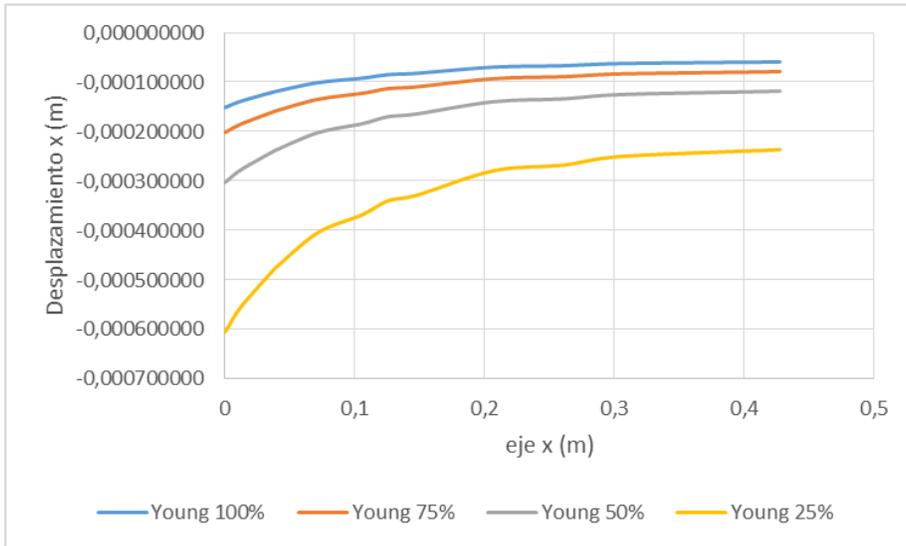
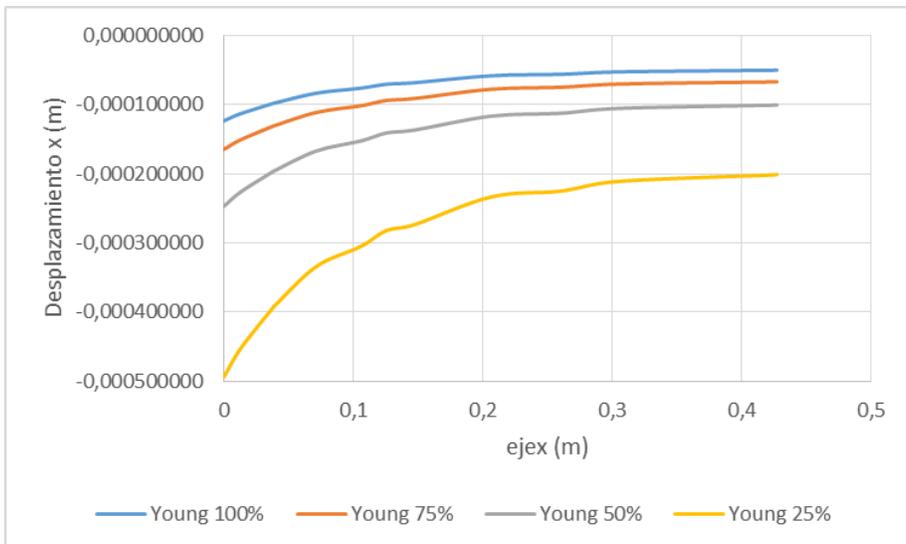


Figura 29. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young y densidad de lodos de 1.90 g/cc.



Se puede evidenciar que la variación en el módulo de Young para el modelo Argilita sigue influyendo sobre los desplazamientos horizontales, de manera que el valor del 100% del módulo indica los menores desplazamientos y que el valor del 25% indica mayores desplazamientos. El rango de desplazamientos varía entre 0.00005 m y 0.0007 m, es decir, entre 0.05 mm y 0.7 mm.

3.2.2. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en la densidad de lodos del modelo Argilita.

Complementariamente se realizó el análisis de manera transversal para el modelo Argilita agrupando las tres densidades de lodo $Mw_1 = 1.50$ g/cc, $Mw_2 = 1.68$ g/cc y $Mw_3 = 1.90$ g/cc, esta vez para cada módulo de Young.

Figura 30. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 100%.

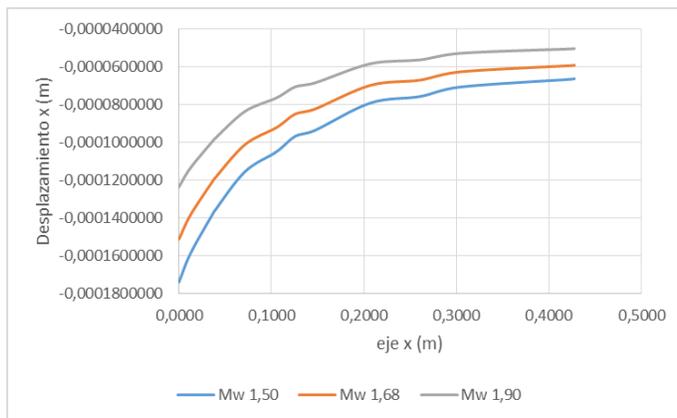


Figura 31. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 75%.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

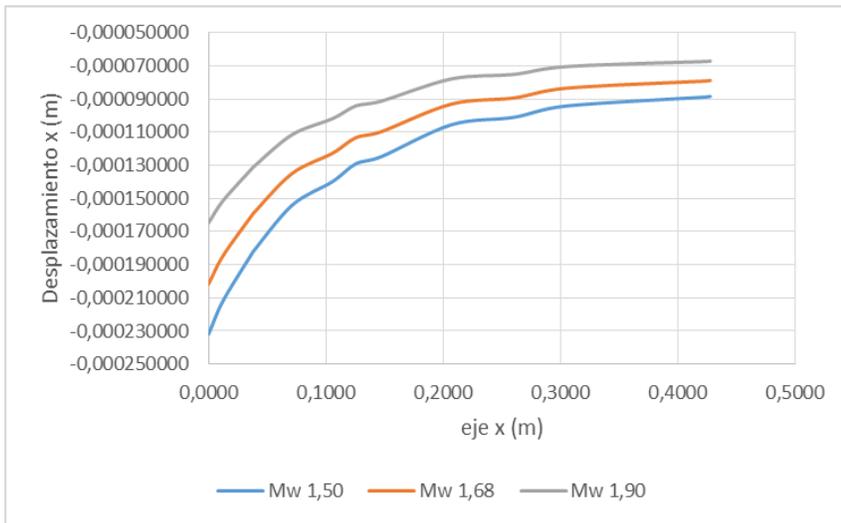


Figura 32. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 50%.

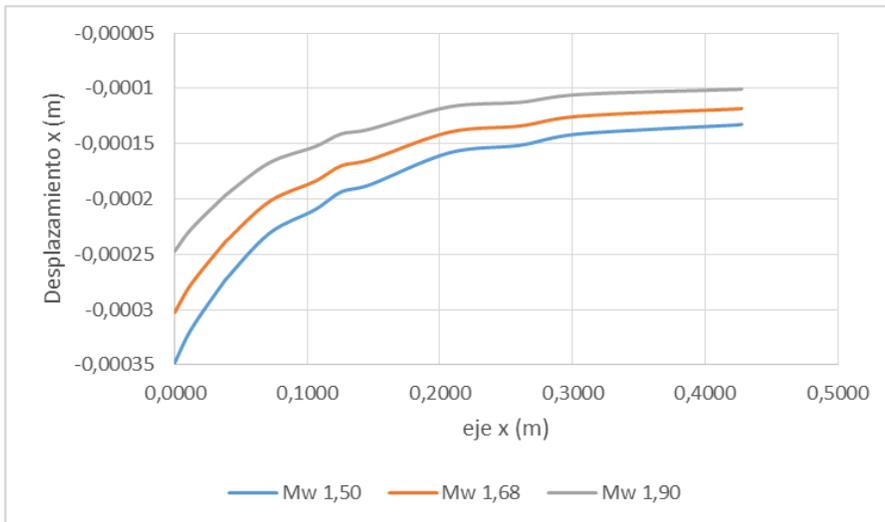
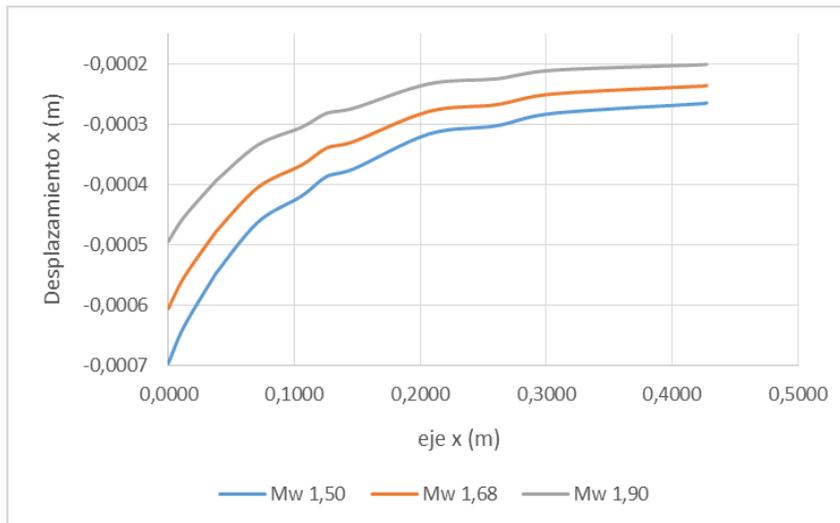


Figura 33. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada densidad de lodos y módulo de Young del 25%.



La influencia de la densidad de lodos sobre los desplazamientos horizontales en este modelo describe un comportamiento similar al del elástico-lineal, dado que para una mayor presión de lodos, se registran menores desplazamientos. En efecto, el rango de desplazamientos si varía con respecto al modelo, análisis que se realizó seguidamente, y este varía entre 0.00005 m y 0.0007 m, es decir, entre 0.05mm y 0.7 mm.

3.2.3. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en el módulo de Young respecto a la anisotropía de esfuerzos del modelo Argilita.

Como se mencionaba en el planteamiento de las simulaciones, el último análisis interno de los modelos constitutivos correspondía a evaluar la influencia de la anisotropía de esfuerzos in-situ sobre las deformaciones horizontales en la pared del pozo. Por lo tanto, se agruparon las curvas de desplazamientos correspondientes a cada módulo de Young para los valores 0.8, 1.0 y 1.15 de anisotropía y en el escenario de una densidad de lodos de 1.50 g/cc.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 34. *Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young, anisotropía de 0.8 y densidad de lodos de 1.50 g/cc.*

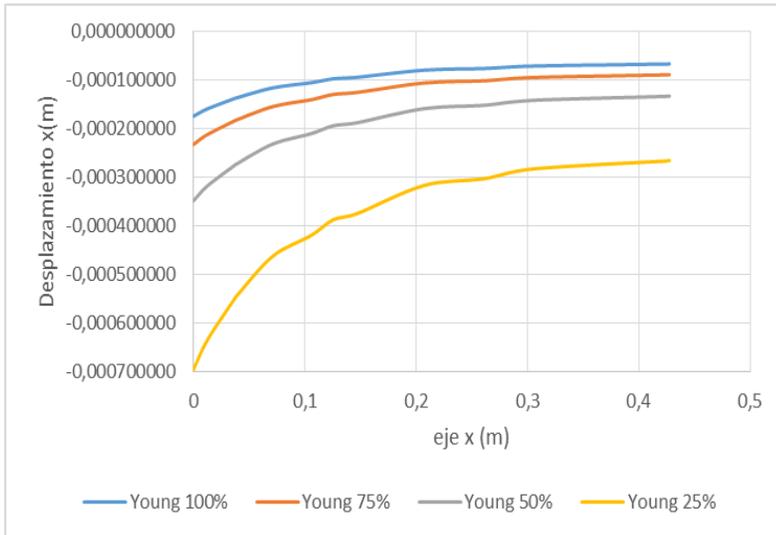


Figura 35. *Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young, anisotropía de 1.0 y densidad de lodos de 1.50 g/cc.*

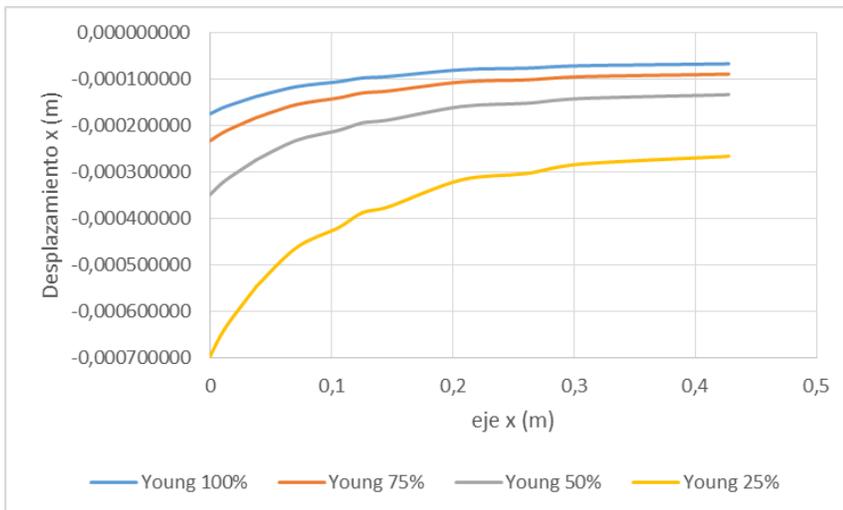
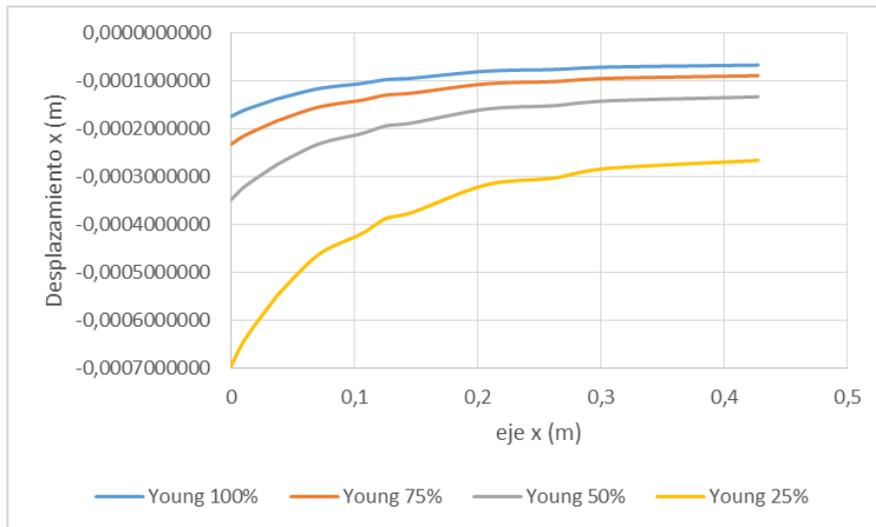


Figura 36. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada módulo de Young, anisotropía de 1.15 y densidad de lodos de 1.50 g/cc.



Se puede evidenciar el mismo comportamiento de los demás planteamientos en el cual un mayor módulo de Young registra los menores desplazamientos. Sin embargo, el rango general en el que se encuentran los desplazamientos para cada valor de anisotropía se comporta de manera particular y se analizó seguidamente. Este rango se encuentra entre 0.00006 m y 0.0007 m, es decir, entre 0.06 mm y 0.7 mm.

3.2.4. Análisis de curvas compiladas para las variaciones en la anisotropía de esfuerzos respecto al módulo de Young del modelo Argilita.

El análisis complementario consiste entonces, en agrupar las curvas de desplazamientos horizontales correspondientes a cada valor de anisotropía para cada porcentaje del módulo de Young en el mismo escenario de una densidad de lodos de 1.50 g/cc.

Figura 37. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada valor de anisotropía, módulo de Young del 100% y densidad de lodos de 1.50 g/cc.

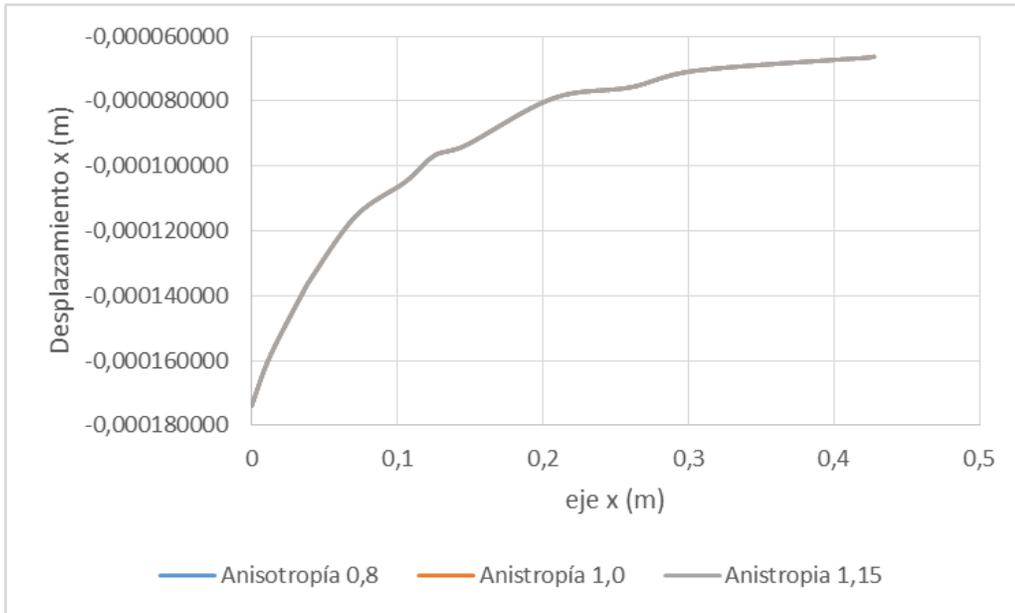
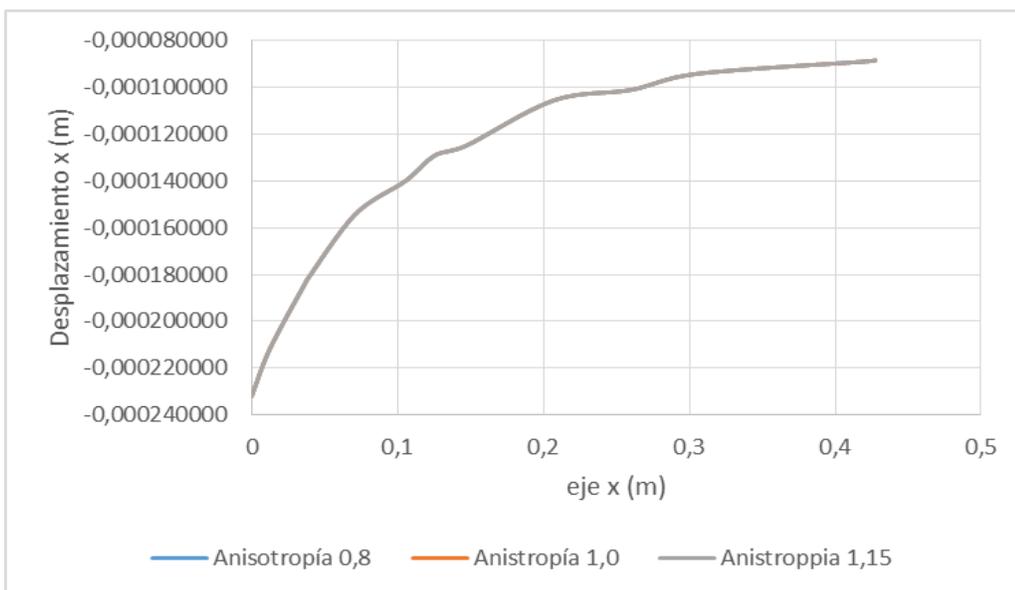


Figura 38. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada valor de anisotropía, módulo de Young del 75% y densidad de lodos de 1.50 g/cc.



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Figura 39. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada valor de anisotropía, módulo de Young del 50% y densidad de lodos de 1.50 g/cc.

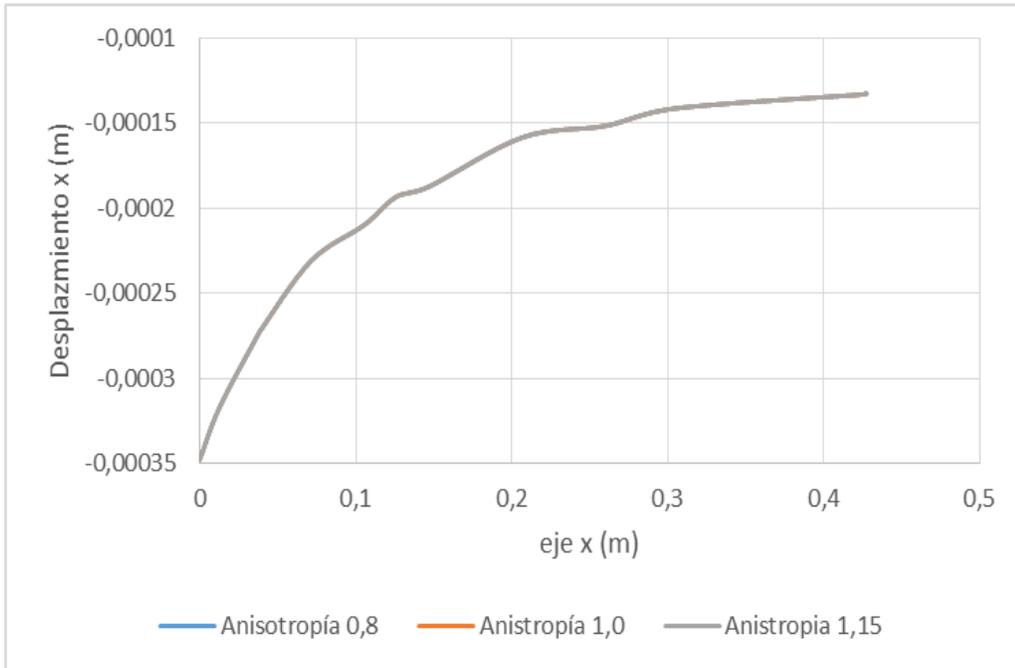
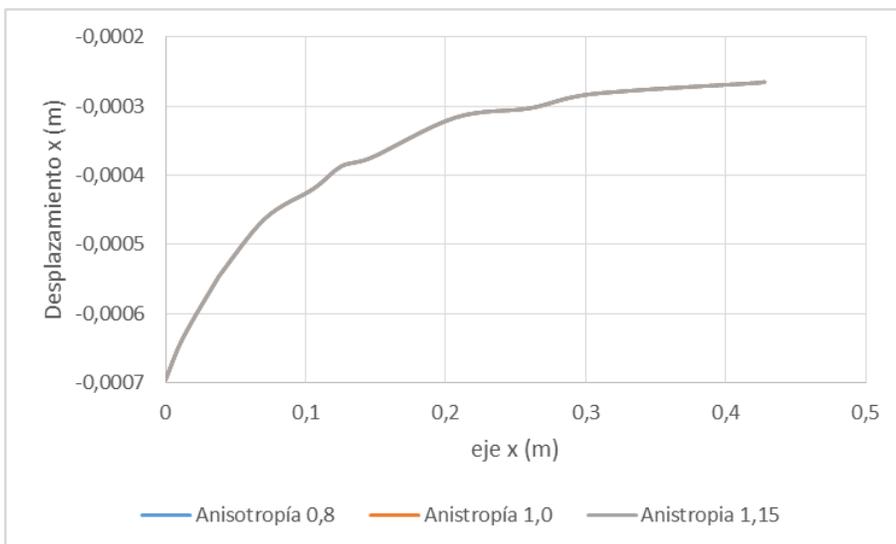


Figura 40. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada valor de anisotropía, módulo de Young del 25% y densidad de lodos de 1.50 g/cc.



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

Para este comportamiento en particular, se describen nulos cambios al variar la anisotropía de esfuerzos. Esto ocurre también para la densidad de lodos de 1.68 g/cc y 1.90g/cc y es debido a que las variaciones son demasiado mínimas y ocurren a partir de la séptima cifra decimal de los valores de desplazamiento como se puede ver en el ejemplo de la tabla 3.

Tabla 3. Ejemplo de valores de desplazamientos en el eje X correspondientes a las curvas de la figura 37.

X(m)	Desplazamiento x (m)		
	Anisotropía 0,8	Anisotropía 1,0	Anisotropía 1,15
0	-0,000173966	-0,000173966	-0,000173966
0,0126	-0,000158676	-0,000158676	-0,000158676
0,0378	-0,000136780	-0,000136780	-0,000136780
0,0379	-0,000136664	-0,000136664	-0,000136664
0,038	-0,000136594	-0,000136594	-0,000136594
0,0711	-0,000115603	-0,000115603	-0,000115603
0,1056	-0,000104891	-0,000104891	-0,000104891
0,1257	-0,000096706	-0,000096706	-0,000096706
0,147	-0,000093647	-0,000093647	-0,000093647
0,2071	-0,000079125	-0,000079125	-0,000079125
0,2604	-0,000075752	-0,000075752	-0,000075752
0,3049	-0,000070634	-0,000070634	-0,000070634
0,4233	-0,000066587	-0,000066587	-0,000066587
0,4275	-0,000066294	-0,000066294	-0,000066294

Como se puede observar en las Figuras 37 a 40, las diferentes condiciones de anisotropía SH_{max}/S_v no presentan influencia en el comportamiento de los desplazamientos horizontales en la pared de pozo. Lo anterior, probablemente asociado a que las condiciones en campo lejano no se conservan en las cercanías del pozo, al contrario, ocurre una redistribución del estado de esfuerzos, que en principio puede ocasionar la pérdida de su influencia en el campo de desplazamientos. Por

otra parte, es claro que la competencia entre el módulo elástico y la presión ejercida en las paredes del pozo, son los parámetros principales que controlan los desplazamientos.

3.3 Análisis comparativo de la respuesta en deformación entre el modelo elástico-lineal y el modelo Argilita.

Para dar respuesta al planteamiento principal, se agruparon las curvas de desplazamiento correspondientes al modelo elástico-lineal y al modelo Argilita para cada módulo de Young en una densidad de lodos específica con el fin de establecer qué respuesta es mejor en deformación. Este comportamiento describe qué modelo constitutivo de roca permite las condiciones de estabilidad deseadas y qué parámetros mecánicos mejoran el modelo o establecen uno más avanzado para este escenario.

Figura 41. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada modelo constitutivo de roca, módulo de Young del 100% y una densidad de lodos de 1.50 g/cc.

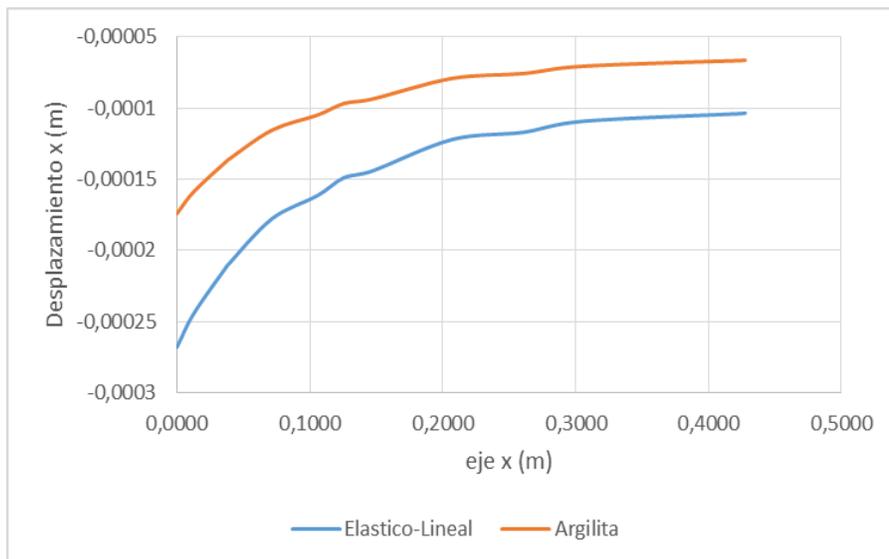


Figura 42. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada modelo constitutivo de roca, módulo de Young del 75% y una densidad de lodos de 1.50 g/cc.

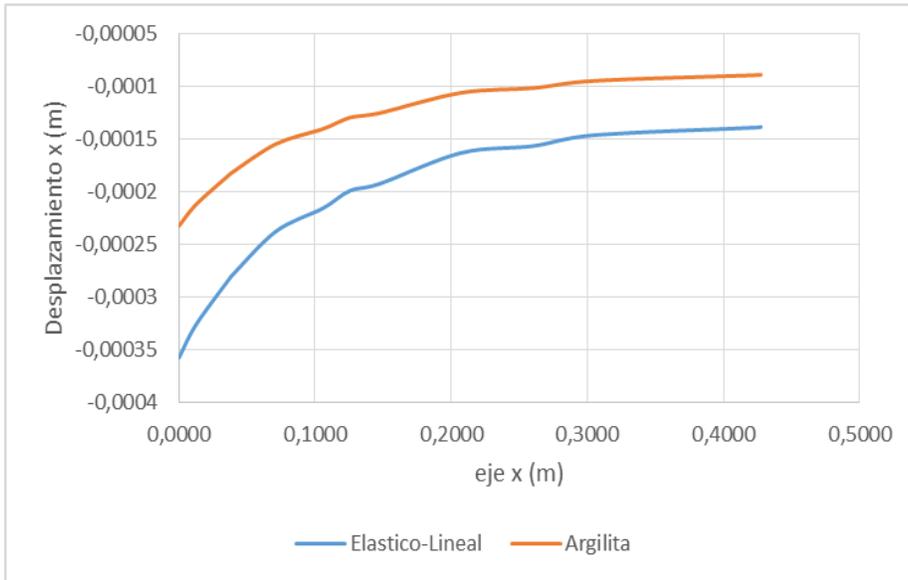


Figura 43. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada modelo constitutivo de roca, módulo de Young del 50% y una densidad de lodos de 1.50 g/cc.

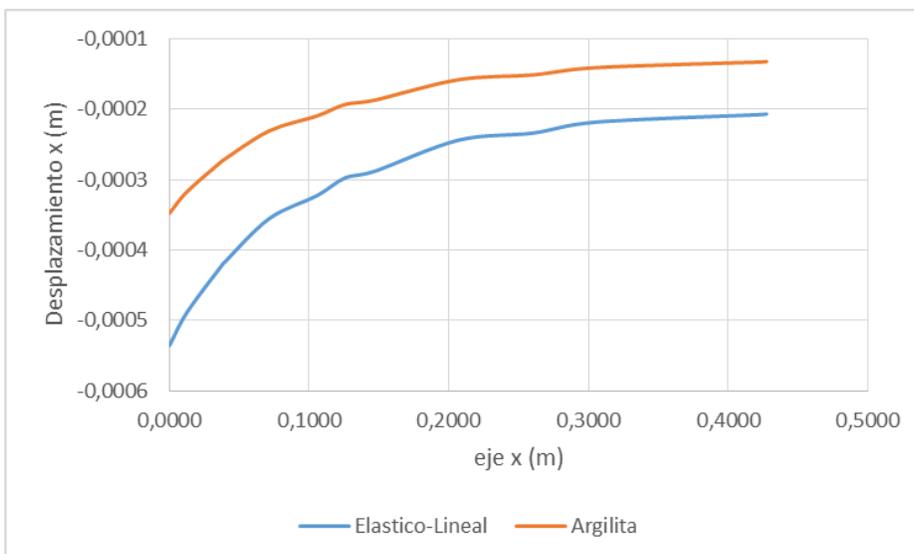
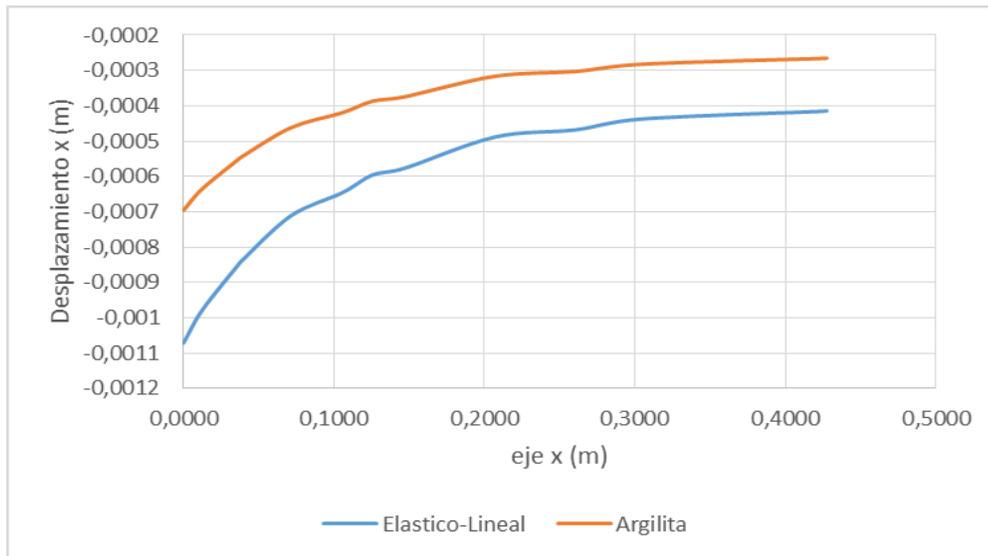


Figura 44. Curvas de los desplazamientos en el eje X compiladas para cada modelo constitutivo de roca, módulo de Young del 25% y una densidad de lodos de 1.50 g/cc.



Como se puede evidenciar en las figuras 40 a 44, el modelo elástico-no lineal de interés en la investigación que corresponde a la roca Argilita es el que mejor comportamiento tiene frente a las deformaciones existentes, esto es gracias a que sus desplazamientos horizontales en la zona de daño y a través de todo el alineamiento de análisis son considerablemente menores. Por ejemplo, en la agrupación de curvas de la figura 44 donde se encuentra la mayor diferencia de desplazamientos entre los modelos, se encontró que los desplazamientos en el primer punto del alineamiento de análisis junto a la pared del pozo (zona de daño) para el modelo elástico-lineal corresponde a 0.00107112 m, para el modelo Argilita corresponde a 0.000695429 m, es decir, 1.07112 mm y 0.695429 mm respectivamente. La diferencia de estos dos valores es de 0.375691 mm para una reducción del 35.07% en el valor de desplazamiento horizontal para estos datos de ejemplo. Aunque en magnitud estos desplazamientos son considerablemente pequeños para idealizar las afectaciones que pueda sufrir la geometría del pozo, son equivalentes a los esfuerzos aplicados sobre el cuerpo de suelo los

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN POZOS HORIZONTALES EN SHALES UTILIZANDO MODELOS ELÁSTICOS LINEALES Y NO LINEALES.

59

cuales correspondían a 64.93 Mpa de esfuerzo vertical y a 74.61 Mpa de esfuerzo horizontal. En un escenario de esfuerzos más grandes los desplazamientos tendrían una respuesta inmediata mayor, pero con la misma tendencia a la encontrada en la investigación y una diferencia exactamente igual entre los dos modelos de roca trabajados.

4. Conclusiones

Tal y como se ha podido comprobar, el Software GID y el procesador Code_bright dentro de sus limitaciones presenta una alternativa bastante útil para el estudio de suelos. La extensión del programa referente a la capacidad de análisis por el método de elementos finitos y a los procesos iterativos que se pueden ajustar junto a las demás herramientas, evidencia un cálculo preciso de los resultados, la sensibilidad de estas respuestas se refleja en la facilidad de modificar los parámetros y valores del problema planteado, así como las condiciones, intervalos y demás propiedades. Una de las mayores ventajas del software GID es que permite modelar la geometría y plantear los problemas de una manera sencilla. Además, maneja una interfaz que se adapta fácilmente, que permite correr y visualizar las simulaciones detalladamente.

Este proyecto de investigación tuvo como objetivo realizar un análisis comparativo de la respuesta esfuerzo-deformación de un pozo horizontal en roca arcillosa, utilizando diferentes modelos constitutivos elástico-lineales y elástico-no lineales. A partir del análisis comparativo entre el modelo Argilita y el modelo elástico lineal, se sugiere que la zona de influencia donde ocurren los principales cambios en los desplazamientos es similar para los dos modelos y que la distancia máxima aproximada donde ocurren estos cambios en el campo de desplazamientos se encuentra a un radio aproximado de 0.40 m desde la cara del pozo. Como resultado, se pudo concluir que el mejoramiento de la roca es posible si se modifican los parámetros mecánicos del modelo, estableciendo una propiedad elástica y de cierta rigidez en el suelo como ocurrió con el modelo Argilita de comportamiento elástico-no lineal. Adicionalmente, se pudo constatar que este modelo Argilita de interés con sus respectivas propiedades, fue el que mejor comportamiento presentó en relación con la estabilidad mecánica de un pozo horizontal, gracias a la respuesta obtenida referente a los menores

desplazamientos posibles. Este análisis permitió una solución complementaria a la regulación de la incertidumbre que generan los esfuerzos horizontales, al haber calculado las deformaciones de pared del pozo con una respectiva equivalencia en la magnitud de los esfuerzos aplicados.

A analizar los objetivos específicos del problema, se pudo establecer que la investigación demostró la influencia de la anisotropía de los esfuerzos in-situ, sobre las deformaciones en la zona de daño, donde no hay una afectación considerable en la respuesta para los tres valores de anisotropía propuestos. Esto, probablemente a la redistribución de los esfuerzos y el impacto que ello generó sobre el campo de desplazamientos, donde las condiciones eran distintas para el campo lejano y la zona cercana a la perforación. Por otra parte, se pudo evidenciar que no hay influencia de la relación de Poisson en la respuesta elástica del material en términos de desplazamientos.

Para cerrar, se pudo concluir que es posible evaluar la influencia de la presión de lodos en el pozo al establecer unas condiciones distintas en la zona de perforación. Los resultados sugieren que existe una influencia directa de la densidad de lodo aplicada a las paredes del pozo, sobre la distribución de los desplazamientos. Sin embargo, las diferencias están del orden de las décimas de milímetro. De esta manera, su influencia demostró en las simulaciones que para una mayor densidad, menores eran los desplazamientos al equilibrar y balancear las presiones hidrostáticas.

Referencias Bibliográficas

- Jejen, P. y Lucich, G. (2018). “Diseño de una metodología para el seguimiento de la estabilidad mecánica durante la perforación de uno pozo en el campo castilla”, *Fundación universidad de América*, pp. 35-37
- Canoba, C. y Fraga, H. (2004). “Propiedades elásticas de las rocas (traducción)”, *Universidad nacional del rosario*, pp. 5
- Méndez, A. (2013). *Taller de hidrocarburos en Lutitas. Gas Shale – Aspectos generales* [Diapositivas]. Instituto mexicano del petróleo. <http://www.oilproduction.net/files/Aspectos-de-Produccion.pdf>
- Pérez, A. (2018). “Coeficiente de Poisson”, *Universitat Jaume I-Castellón-España*, [Enciclopedia virtual]. Área de ingeniería mecánica-Dpto. ingeniería mecánica y construcción. http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm
- Thomsen, L. (2002). “Entendimiento de la anisotropía sísmica en exploración y explotación”. *Boletín AMGE*, pp. 41(4)