

Incidencia de las propiedades geomecánicas en el comportamiento esfuerzo-deformación de un pozo horizontal.

Héctor Andrés Mora Carvajal y Aldahir Alfonso Ramos Alarcón

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Dedicado a mis padres Alfonso Ramos y Cecilia Alarcón por su gran esfuerzo y cariño para verme salir adelante y hacerme ser una mejor persona cada día, los quiero con todo mi corazón.

Aldahir Alfonso Ramos Alarcón

Dedicado a mis padres Sebastián y María Helena, por ser la definición más fiel de amor puro y apoyo incondicional, por todo el esfuerzo y dedicación que han puesto en mí. A mi hermana Sara Sofia, por su cariño sincero y por ser la persona que motiva a ser mejor cada día

Héctor Andrés Mora Carvajal

Agradecimientos

Doy gracias a Dios ante todo por brindarme a una familia llena de mucho amor que está conmigo en los buenos y malos momentos. Gracias al Ingeniero Vladimir Ernesto Merchán Jaimes por estar acompañándonos a lo largo de este proyecto y estar pendiente del mismo.

Gracias a mi abuela María de Jesús por brindarme amor y una vivienda a lo largo de mi carrera universitaria.

Aldahir Alfonso Ramos Alarcón

Agradecer enormemente a la Universidad industrial de Santander, en especial a la escuela de ingeniería civil y a todos sus miembros por poner a disposición su talento humano e instalaciones durante toda mi formación profesional en esta maravillosa rama de la ingeniería.

A nuestro director el ingeniero Vladimir Merchán por su tiempo, conocimiento y acompañamiento constante brindado durante el desarrollo de toda esta investigación.

A mi familia por todo el respaldo necesario en el proceso y culminación de esta etapa de mi vida.

Héctor Andrés Mora Carvajal

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos	14
2. Marco referencial	15
2.1 pozo	15
2.2 Pozo horizontal	15
2.3 Geomecánica	15
2.4 Geomecánica aplicada a yacimientos	16
2.5 Inestabilidad del pozo	16
2.5.1 Efectos mecánicos	17
2.5.2 Efectos químicos	17
2.6 Factores que afectan la estabilidad del pozo	17
2.7 Presión de poros	19
2.8 Coeficiente de Poisson	19
2.9 Elasticidad	20
2.10 Esfuerzo	20

2.11 Esfuerzos in-situ.....	21
2.12 Fluido de perforación.....	22
2.13 Deformación.	23
2.14 Permeabilidad.	23
2.15 Anisotropía.....	23
2.16 Anisotropía intrínseca.	24
3. Metodología.....	25
3.1 Aspectos de diseño: Geometría del pozo y condiciones de contorno.....	25
3.2 Propiedades de la roca.	27
3.3 Generación de la malla y cálculo de la simulación.....	28
3.4 Post-proceso.....	29
4. Análisis de resultados.	31
4.1 Resultados típicos del análisis.	31
4.2 Influencia del estado de esfuerzos.	34
4.3 Influencia del módulo elástico.....	37
4.4 Influencia de la densidad de lodo.....	40
4.5 Variaciones en la geometría del pozo.....	43
5. Conclusiones.....	46
Referencias bibliográficas.....	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resumen de la geometría y las condiciones iniciales del modelo	26
Tabla 2. Resumen de las propiedades mecánicas de la roca modelada	28

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Tipos de falla en un pozo debido a la redistribución de esfuerzos.	18
Figura 2. Dirección de esfuerzos que afectan la seccion transversal del pozo.	21
Figura 3. Condiciones de contorno incluidas en el modelo.	27
Figura 4. Propiedades mecánicas de la roca.	28
Figura 5. Malla generada en el programa computacional GID.	29
Figura 6 Cortes horizontal y vertical generados en el programa computacional GID para la comparación entre modelos.	30
Figura 7. Desplazamientos horizontales en el pozo. Modelo con $E1=18615$ [MPa] y $SH_{max}=1.15*S_v$	31
Figura 8. Desplazamientos verticales en el pozo. Modelo con $E1=18615$ [MPa] y $SH_{max}=1.15*S_v$	32
Figura 9. Esfuerzos horizontales en el pozo. Modelo con $E1=18615$ [MPa] y $SH_{max}=1.15*S_v$	32
Figura 10. Esfuerzos verticales en el pozo. Modelo con $E1=18615$ [MPa] y $SH_{max}=1.15*S_v$	33

Lista de Gráficas

	Pág.
Gráfica 1. Desplazamientos horizontales a lo largo del corte A-A' en los distintos modelos, variando el esfuerzo horizontal máximo (S_{hmax}).....	35
Gráfica 2. Desplazamientos verticales a lo largo del corte B-B' en los distintos modelos, variando el S_{Hmax}	36
Gráfica 3. Esfuerzos horizontales a lo largo del corte A-A' en los distintos modelos, variando el S_{hmax}	36
Gráfica 4. Desplazamientos horizontales a lo largo del corte A-A' en los diferentes modelos, variando el módulo elástico (E).....	38
Gráfica 5. Desplazamientos verticales a lo largo del corte B-B' en los diferentes modelos, variando el módulo elástico (E).....	39
Gráfica 6. Esfuerzos en el eje X a lo largo del corte A-A' en los diferentes modelos, variando el módulo elástico (E).....	39
Gráfica 7. Deformaciones horizontales a lo largo del corte A-A' en los diferentes modelos, variando la densidad de lodo (PL).	41
Gráfica 8. Deformaciones verticales a lo largo del eje B-B' en los diferentes modelos, variando la densidad de lodo (PL).	42

Gráfica 9. Esfuerzos en el eje X a lo largo del corte A-A' en los diferentes modelos, variando la densidad de lodo (PL).	42
Gráfica 10. Comparación entre modelos de la geometría del pozo al variar el SHmax.	44
Gráfica 11. Comparación entre modelos de la geometría del pozo al variar el módulo elástico (E).	44
Gráfica 12. Comparación entre modelos de la geometría del pozo al variar la densidad de lodo (PL).	45

Resumen

Título: Incidencia de las propiedades geomecánicas en el comportamiento esfuerzo-deformación de un pozo horizontal*

Autores: Héctor Andrés Mora Carvajal, Aldahir Alfonso Ramos Alarcón**

Palabras clave: roca, deformación, esfuerzo, geometría, perforación, software, simulación.

DESCRIPCION:

El documento presentado a continuación tiene como fin mostrar el comportamiento de una sección transversal tipo de un pozo horizontal convencional al ser sometido a distintas condiciones de esfuerzos, adicionalmente se realizaron variaciones en las propiedades del material de la roca y en las propiedades del fluido de perforación con el fin de comparar las deformaciones en la pared del pozo en cada uno de los modelos realizados. Para la simulación de estos modelos se recurrió a la interacción de dos programas computacionales: Por una parte, el software GID (CINME, 2020) como un CAD para generar las condiciones geométricas, asignar materiales, establecer intervalos de análisis y condiciones de frontera; por otra parte, el programa Code-Bright (Olivella, Gens, Carrera y Alonso, 1996) como procesador de datos por medio de la aplicación del método de los elementos finitos (MEF), capaz de realizar análisis TermoHidro-Mecánicos acoplados en medios geológicos. Los resultados nos muestran que, aunque los 3 factores variables analizados alteran los resultados de las simulaciones, las deformaciones en el pozo no logran ser lo suficientemente considerables para cambiar radicalmente la geometría del pozo; de igual forma, se concluye que para este estudio en específico, las variables de módulo elástico y esfuerzo horizontal máximo (SHmax) influyen más en el pozo que el fluido de perforación utilizado.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Abstract

Title: Incidence of geomechanical properties on the stress-strain behavior of a horizontal well*.

Author(s): Hector Andres Mora Carvajal, Aldahir Alfonso Ramos Alarcon **

Key words: rock, strain, stress, geometry, drilling, software, simulation.

Description:

The document presented below aims to show the behavior of a typical cross section of a conventional horizontal well when subjected to different stress conditions, additionally variations were made in the properties of the rock material and in the properties of the drilling fluid to compare the deformations in the wall of the well in each of the models made. For the simulation of these models, the interaction of two computer programs was used: On the one hand, the GID software (CINME, 2020) as a CAD to generate geometric conditions, assign materials, establish analysis intervals and boundary conditions; on the other hand, the Code-Bright program (Olivella, Gens, Carrera and Alonso, 1996) as a data processor through the application of the finite element method (FEM), capable of performing coupled ThermoHydro-Mechanical analyzes in geological media. The results show us that, although the 3 variable factors analyzed alter the results of the simulations, the deformations of the well are not considerable enough to radically change the geometry of the well; Likewise, it is concluded that for this specific study, the variables of elastic modulus and maximum horizontal stress (SHmax) influence the well more than the drilling fluid used.

* Degree Work

** School of Physical-Mechanical Engineering, School of Civil Engineering. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Introducción

La geomecánica es la disciplina que integra la mecánica de rocas, la geofísica y la geología, para cuantificar la respuesta de la tierra a cambios de los esfuerzos. Dentro de los variados campos de la ingeniería que hoy en día involucran la geomecánica como ciencia útil en sus estudios, se destaca la exploración y explotación de petróleo donde principalmente es aplicada para abordar temas de estabilidad mecánica en la perforación de pozos.

Los problemas de inestabilidad están relacionados con derrumbes de la formación, tortuosidad, y restricciones en su perforación que en ocasiones conllevan como última acción remedial a la realización de sidetracks (nueva trayectoria de perforación) (Jejen y Lucich, 2018). Actualmente, la ejecución de pozos horizontales para el desarrollo de reservorios no convencionales genera la necesidad de comprender el comportamiento esfuerzo-deformación de estos pozos debido a que representan dos retos fundamentales. Por una parte, se debe asegurar la condición de estabilidad con la dificultad que uno de los esfuerzos actuantes, el esfuerzo horizontal máximo tiene una alta incertidumbre en su determinación y por otra parte que las condiciones de producción del reservorio están asociadas a las condiciones del régimen de esfuerzos del reservorio, por tanto, a mayor aproximación en el cálculo del régimen se pueden tomar decisiones tempranas para el desarrollo o no de ciertas áreas de un campo específico.

Por lo anterior, para la necesidad de reducir estos problemas de estabilidad de pozos se propone en este proyecto realizar una serie de modelos geomecánicos con simulaciones numéricas en 2D (asumiendo condiciones planas de deformación) para estudiar las diferentes interacciones y principales factores que influyen en el comportamiento mecánico de la sección transversal de esta tipología de pozos con el objetivo de resolver los dos retos planteados.

Finalmente, vale la pena mencionar que dentro del análisis se tendrá una atención especial en estudiar la influencia de la magnitud del esfuerzo horizontal máximo (S_H), dado que es el parámetro que presenta mayor incertidumbre dentro del cálculo del modelo debido a la ausencia – hasta ahora- de puntos calibradores con determinación directa.

Para la determinación del esfuerzo horizontal máximo (S_H) se usará una herramienta computacional basada en el método de elementos finitos (MEF) y se buscará la calibración del modelo mediante la realización de procesos iterativos. Se espera que con este estudio se puedan identificar patrones de comportamiento que permitan mejorar la predicción del esfuerzo horizontal máximo (S_H) y con esto encontrar mejores soluciones de ingeniería para diagnosticar problemas y prever posibles fallas en proyectos que involucren la utilización de pozos horizontales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el estado de deformaciones en la sección transversal de un pozo horizontal, en roca tipo shale para diferentes condiciones de esfuerzos y propiedades mecánicas.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar la anisotropía de esfuerzos sobre las deformaciones en la sección transversal de un pozo horizontal.

Realizar un análisis de sensibilidad de las propiedades elásticas sobre las deformaciones en la pared del pozo horizontal.

Evaluar las deformaciones de la pared del pozo horizontal para diferentes presiones de lodo de perforación.

2. Marco referencial

2.1 Pozo

Es una obra de ingeniería basada en la perforación efectuada en el subsuelo, encaminada a poner en contacto un yacimiento de recursos con la superficie para la posterior explotación de estos. No hay una clasificación típica de los tipos de pozos pues existen diversas maneras de clasificarlos según su objetivo, ubicación, trayectoria y función (Méndez, 2013). De manera general se abordará el problema exclusivamente en pozos de trayectoria horizontal o simplemente pozos horizontales.

2.2 Pozo horizontal

Los pozos horizontales son aquellos donde el contacto entre el pozo productor y la formación de interés es horizontal. Las técnicas existentes inician la perforación vertical y dependiendo del radio de curvatura aplicado se alcanza la perforación horizontal. Desde la década de los 40 ha sido considerada la utilización de pozos horizontales, sin embargo, a pesar de que se demostraba la posibilidad técnica, la factibilidad económica impedía su uso (Martínez, 1995).

2.3 Geomecánica

La geomecánica se puede definir etimológicamente como la mecánica de la Tierra, a partir del prefijo geo- antepuesto a la palabra mecánica. A su vez, esta última tiene como acepción una parte de la física que trata del equilibrio y del movimiento de los cuerpos sometidos a cualquier fuerza. Así, se puede definir a la geomecánica como el estudio del equilibrio y movimiento de la Tierra como efecto de algunas fuerzas. La geomecánica estudia la interacción de las rocas, los esfuerzos, las presiones y las temperaturas, para resolver problemas en campos de petróleo (Jejen y Lucich, 2018).

2.4 Geomecánica aplicada a yacimientos

En el análisis integrado de los estados de esfuerzos, presión de poros (presión del fluido dentro de los poros de la roca), propiedades físicas de los yacimientos, fallas, rocas sello y fracturas naturales, que suponen un entendimiento de la interacción entre las prácticas de producción e ingeniería y las condiciones geomecánicas con el fin de crear e implementar modelos que predigan el comportamiento del yacimiento y del pozo en particular, para desarrollar y emplear las estrategias más apropiadas que posibiliten obtener una mejor condición de estabilidad del pozo.

2.5 Inestabilidad del pozo

La inestabilidad del pozo es el principal contratiempo con el que un ingeniero se encuentra durante la perforación del pozo y a causa de ello se genera un tiempo improductivo, lo que consecuentemente lleva a sobrecargar el mismo. Las causas de la inestabilidad del pozo suelen clasificarse en:

2.5.1 Efectos mecánicos

Generalmente un pozo falla por exceso de fuerzas de tensión y esfuerzos de corte en la formación, por lo tanto, estos factores deben ser considerados en la evaluación de la estabilidad del pozo durante el proceso de perforación.

2.5.2 Efectos químicos

Los efectos químicos que surgen de la interacción perjudicial entre la roca, generalmente rocas arcillosas con minerales expansivos, y el fluido de perforación pueden ocasionar diferentes problemas en la estabilidad del pozo. Este trabajo debe establecerse con el fin de realizar un análisis integrado de la estabilidad del pozo teniendo en cuenta que:

- Cuando se perfora un pozo, cambia el estado inicial de los esfuerzos.
- Hay redistribución de los esfuerzos en las inmediaciones del pozo.
- Si se generan cambios significativos de esfuerzos sobre la roca estos pueden llegar a generar la falla de la misma.

2.6 Factores que afectan la estabilidad del pozo

El objetivo de analizar la estabilidad del pozo es investigar su potencial de inestabilidad para calcular el estado de redistribución de los esfuerzos y comparar esto con un modelo de falla.

Algunos factores que afectan la estabilidad del pozo son:

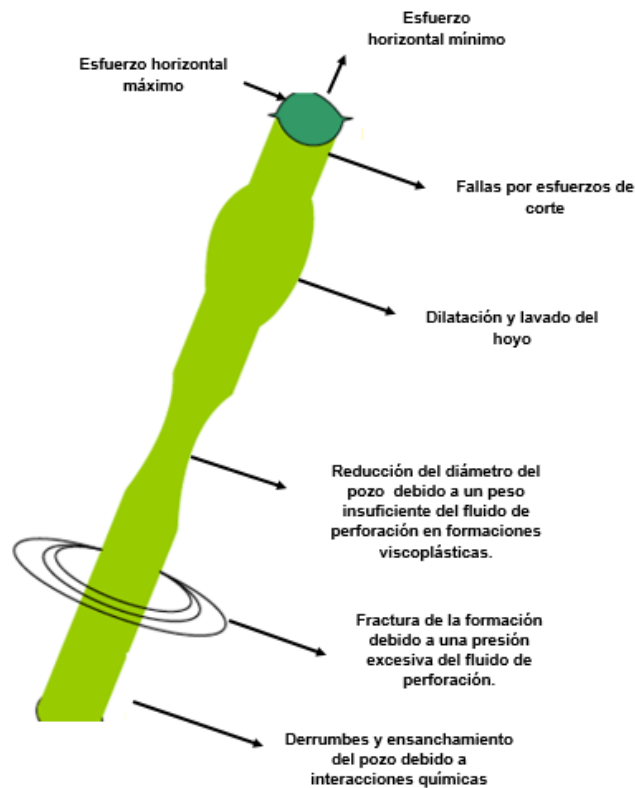
- Las propiedades mecánicas de la roca.

- La orientación y magnitud de los esfuerzos en el suelo de perforación.
- La presión de poro.
- La presión del fluido de perforación.

Se debe tener en cuenta que la magnitud y orientación de los esfuerzos internos del suelo cambian con el buzamiento estructural de la formación.

Figura 1.

Tipos de falla en un pozo debido a la redistribución de esfuerzos



Nota: Perfoblogger. “Ingeniería de perforación”. Recuperado de <https://perfoblogger.wordpress.com/tag/ingenieria-de-perforacion/>

2.7 Presión de poros

La presión intersticial, también conocido como la presión de poro o presión neutra, se refiere a la presión del fluido que se mantiene dentro de las partículas de un suelo. La presión de poro es una variable independiente y su magnitud no está relacionada con el esfuerzo normal total. Se considera que la presión de poro puede mejorar la capacidad de carga de un suelo parcialmente saturado, mientras que la presión entre los espacios del suelo sea baja en comparación de la presión fuera del suelo. La baja presión entre los vacíos del suelo crea succión debido a la diferencia de presiones que hace que las partículas se junten, haciendo que el suelo pueda resistir mayor carga.

2.8 Coeficiente de Poisson

Es la fracción de la deformación axial que es transmitida a la dirección radial cuando una fuerza F es aplicada. Debido a que la compresión axial produce una expansión lateral, la Razón de Poisson cuenta con un signo negativo; esto se debe a que, en la geomecánica, la convención de signos indica que la deformación es positiva si se trata de una compresión y es negativa si la deformación es de carácter expansiva. Por definición, la Razón de Poisson es siempre menor a 0.5, con valores promedio en un rango entre 0.2 y 0.35. Este parámetro es adimensional (Antolinez y Bohórquez, 2018).

2.9 Elasticidad

La mayoría de los materiales tiene una habilidad para resistir y recuperarse de las deformaciones producidas por fuerzas externas. Esta habilidad es llamada teoría de elasticidad lineal (García, 2006).

Esta teoría plantea la existencia de una relación lineal entre las fuerzas externas y las correspondientes deformaciones que experimenta un cuerpo cuando los cambios en las fuerzas son los suficientemente pequeños. En 1676, Robert Hooke estableció que la fuerza aplicada a cualquier cuerpo elástico es proporcional a la deformación, es decir:

$$\sigma = E * \varepsilon$$

La región de validez de esta teoría ocasionalmente es excedida en situaciones prácticas con el fin de facilitar un poco el análisis, en este trabajo se tiene como base esta teoría de elasticidad lineal (García, 2006).

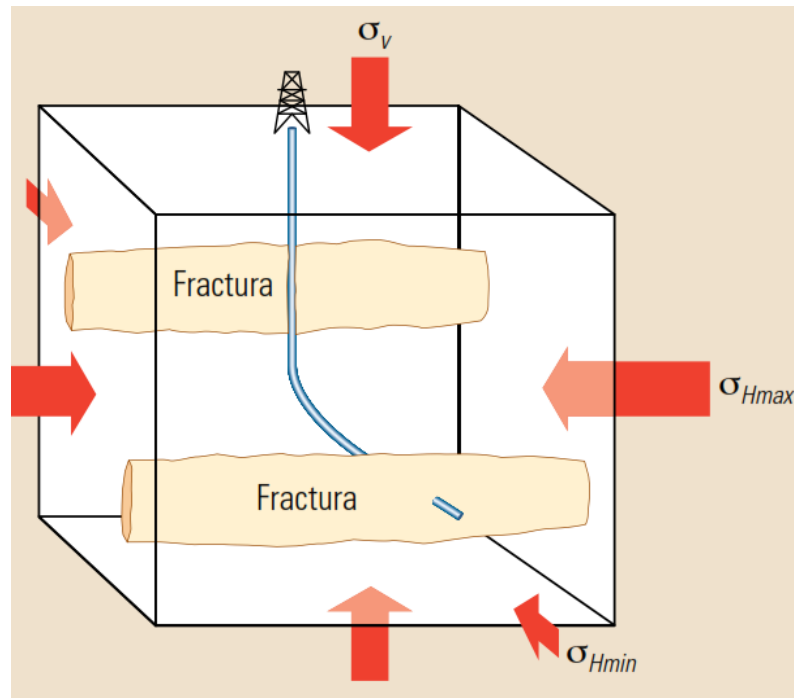
2.10 Esfuerzo

El esfuerzo o la intensidad de la distribución de fuerzas internas, se define como la relación entre una fuerza que actúa sobre un área dada. Se reconocen tres tipos de esfuerzos principales: los esfuerzos de tensión son aquellos que tienden a estirar o alargar el material, esfuerzos de compresión que tienden a reducir las dimensiones del material, y los esfuerzos de cizalla, que actúan en dirección oblicua a la dirección del esfuerzo principal (no cambian la geometría del

material). Los esfuerzos frecuentemente son expresados en Pa (pascal= $1\text{N}/\text{m}^2$), bar., atmósfera o Psi (Lbs/pulg²). [5]

Figura 2.

Dirección de esfuerzos que afectan la sección transversal del pozo



Nota: Richard Nolen. (2013). “Definición del concepto de Fracturamiento hidráulico”. Recuperado de <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/defining-hydraulics-spanish>

2.11 Esfuerzos in-situ

Las formaciones de roca en el subsuelo se encuentran bajo la acción de esfuerzos compresivos y/o de tensión. Estos esfuerzos se denominan *in situ* y generalmente pueden ser descompuestos en tres componentes llamados esfuerzo vertical o de sobrecarga, horizontal máximo y horizontal mínimo, los cuales son perpendiculares entre sí (García, 2006).

Para el caso del análisis de la sección transversal de un pozo horizontal se evalúa el esfuerzo vertical debido a la sobrecarga y el esfuerzo horizontal máximo.

2.12 Fluido de perforación

El fluido de perforación o la densidad de lodo como comúnmente se le llama, puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas, como, por ejemplo: aire o gas, agua, petróleo o combinaciones de agua y aceite con determinado porcentaje de sólidos.

Los ingenieros diseñan los fluidos de perforación para controlar las presiones del subsuelo, minimizar el daño de la formación, minimizar la posibilidad de pérdida de circulación, controlar la erosión del pozo y optimizar los parámetros de perforación, tales como la velocidad de penetración y la limpieza del pozo (Williamson, 2013).

La densidad del lodo es la fuente principal de presión hidrostática en un pozo. Durante su circulación a través del pozo, el lodo contribuye a la generación de una presión en el pozo que puede expresarse en términos de la densidad de circulación equivalente (ECD), en esta circulación equivalente se dan dos límites, el límite superior, está representado por el gradiente de fractura [presión con la que inicia la fractura] y límite inferior, está determinado por la presión de poro, por debajo de la cual el flujo de fluidos de formación en el pozo produce problemas tan severos de inestabilidad mecánica que las operaciones deben ser modificadas.

El rango entre el límite superior e inferior es la ventana de densidad de lodo, en estos límites inciden las orientaciones y magnitudes de los esfuerzos locales presentes en la roca, la presión de poro, la resistencia de la roca.

2.13 Deformación

La deformación de un sistema rocoso se da por cambio de posición, orientación, forma y volumen con relación a una condición inicial y a un sistema de referencia. La deformación, indica la variación de longitud entre dos partículas en dos estados distintos. La deformación resultante de esfuerzo de tensión y compresión se expresa como deformación longitudinal o por cambio del ángulo entre dos direcciones inicialmente ortogonales (Zumaya, 2017).

2.14 Permeabilidad

La permeabilidad mide la facilidad con la que los fluidos fluyen a través de las rocas. La permeabilidad de las rocas depende básicamente de la porosidad conectada o efectiva y del tamaño del poro. En general, rocas con mucha porosidad y poros de gran tamaño presentan una alta permeabilidad (Benavente, Berbabéu y Cañaveras, 2004).

2.15 Anisotropía

Para el cálculo de las deformaciones en pozos horizontales, una condición inicial es la comprensión de la anisotropía del material. Según Casagrande y Carrillo (Oda, 1993), se pueden distinguir dos tipos de anisotropía: inherente e inducida. La anisotropía inherente es producida por la sedimentación natural de las partículas durante el proceso de formación del material. La anisotropía inducida obedece a la acomodación de las partículas como producto de la aplicación de todo tipo de esfuerzos que excedan el límite elástico del material. En pocas palabras, la anisotropía de la roca determina la dirección general de la fractura (Tauta y Ortiz, 2006).

Un material es anisótropo cuando sus propiedades dependen de la orientación de sus mediciones, los grados de anisotropía pueden ser diferentes para diversos parámetros que describen la misma roca.

2.16 Anisotropía intrínseca

Las propiedades de transporte o flujo en pozos horizontales con una dirección específica asociada, que son anisotrópicas son:

- Permeabilidad.
- Conductividad térmica.
- Resistividad.
- Dispersividad.

Para un buen diseño de perforación de un pozo y su probable fractura hidráulica es necesario tener una buena base en el análisis de su geomecánica.

3. Metodología

3.1 Aspectos de diseño: Geometría del pozo y condiciones de contorno

La geometría empleada corresponde a la de una sección transversal típica de un pozo horizontal, el pozo que se modeló es circular de radio igual a 4.25 [in] o 0.10795 [m], el área correspondiente a la roca donde se excavó el pozo se representó por medio de un cuadrado con base igual a 1.0785 [m]. Debido a las condiciones de simetría del modelo y con el objetivo de ahorrar tiempo computacional en la realización de este, la geometría final con la cual se realizó la simulación corresponde a la mitad de la sección transversal explicada anteriormente. El pozo se encuentra a una profundidad de 2760 [m].

La ejecución del problema se divide en 2 tiempos (intervalos): Un primer intervalo de “equilibrio” de la roca con duración de 100 horas, donde se le permite al programa cargar las condiciones naturales del terreno (propiedades de la roca y condiciones de contorno) además de establecer la condición geostática de la roca; posteriormente, un segundo intervalo de 48 horas donde se realiza el proceso de excavación del pozo y el fluido de perforación es aplicado para el sostenimiento de las paredes por presión hidrostática.

Dentro de las condiciones de contorno (Ver figura 3 y tabla 1) se contemplaron la restricción del desplazamiento vertical y horizontal del modelo; de igual manera se incluyeron las condiciones de esfuerzo vertical y esfuerzo horizontal máximo (SHmax). Se tomó un gradiente de esfuerzo vertical de 1.04 [psi/ft] y una profundidad del pozo de 9055 [ft] o 2760 [m], obteniendo un

esfuerzo vertical a dicha profundidad de 9417.32 [psi] o 64.93 [MPa]; para el esfuerzo horizontal se plantearon 4 valores correspondientes a 0.85, 1.0, 1.05 y 1.15 veces el valor de esfuerzo vertical con el fin de observar las variaciones en los resultados de la simulaciones, variaciones generadas por un parámetro con tanta incertidumbre en la vida real como lo es este esfuerzo; adicionalmente, se contempló una presión de fluido interno de 58.68 [MPa] presente en la roca y una porosidad inicial del 0.1; por último, se asignó un valor de presión de lodo de 45.47 [MPa] en un primer instante y posteriormente se disminuyó a 40 [MPa] con el fin de analizar la sensibilidad del modelo, esta presión es radial y afecta en toda la circunferencia de la pared del pozo.

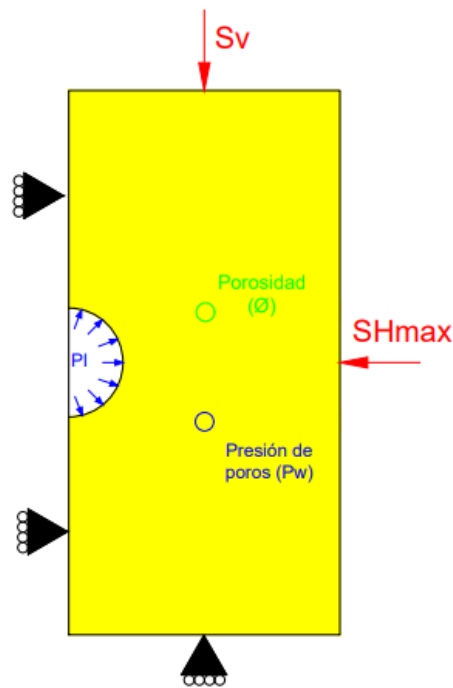
Tabla 1.

Resumen de la geometría y las condiciones iniciales del modelo

Condiciones iniciales del problema	
Radio pozo [m]	0,10795
Área de roca [m²]	1.0795 ²
Condición	Valor [MPa]
Esf. vertical Sv	64,93
Esf.Hzta 1 (SH1= 0,85*Sv)	55,19
Esf.Hzta 2 (SH2=*Sv)	64,93
Esf.Hzta 3 (SH3=1.05*Sv)	68,18
Esf.Hzta 4 (SH4=1.15*Sv)	74,67
Presión fluido interno	58,68
Presión de lodo 1	45,47
Presión de lodo 2	40

Figura 3.

Condiciones de contorno incluidas en el modelo

**3.2 Propiedades de la roca**

En este proyecto, se ha escogido como primera aproximación, trabajar con un modelo constitutivo elástico, lineal e isotrópico con las siguientes propiedades: módulo elástico variable entre modelos con el fin de observar la sensibilidad en este aspecto, estos fueron de 18615 [MPa], 9307 [MPa] y 4654[MPa]; se utilizó un módulo de Poisson fijo de 0.22.

El valor designado para estas propiedades corresponde a datos aproximados de la literatura para rocas tipo shale productoras de petróleo.

A continuación, en la figura 4 y tabla 2 se encuentran esquematizadas y tabuladas las propiedades de roca tenidas en cuenta durante el planteamiento del problema.

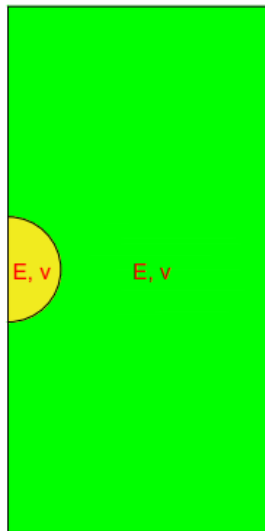
Tabla 1

Resumen de las propiedades mecánicas de la roca modelada.

Propiedades de la roca	
Propiedad	Valor [MPa]
Mod.Elástico 1 (E1)	18615
Mod.Elástico 2 (E2)	9307
Mod.Elástico 3 (E3)	4654
Coef. De Poisson (ν)	0,22

Figura 4

Propiedades mecánicas de la roca



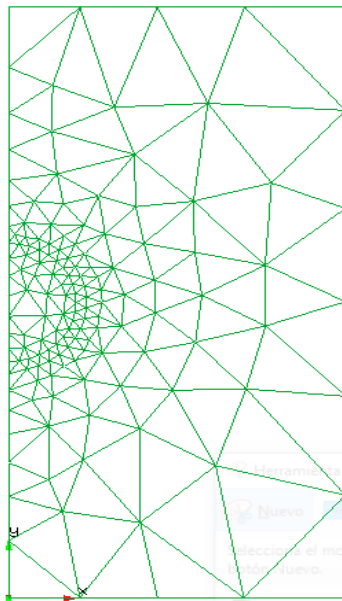
3.3 Generación de la malla y cálculo de la simulación

Al momento de generar el mallado de la sección transversal del pozo, el programa GiD tiene por defecto una corrección de tamaños de los elementos según la forma a mallar, es decir que tiene en cuenta las discretizaciones de elementos más pequeños donde note que su geometría es más

reducida, es por esto por lo que el modelo cuenta con diferencia de tamaños alrededor del pozo y en los extremos alejados del mismo. En el presente proyecto GiD le proporciona a cada elemento y nodo generado de la malla todas las condiciones iniciales impuestas, así como también las propiedades o características de los materiales asignados anteriormente, debido a esto si hay un cambio en alguna de estas condiciones el proceso de mallado deberá ser generado nuevamente (Ver figura 5).

Figura 5.

Malla generada en el programa computacional GiD



3.4 Post-proceso

Una vez generada la malla impuesta con sus respectivas condiciones se deberá calcular el problema, el cual el post-procesador Code Bright realizará a fin de visualizar los resultados obtenidos. Luego de procesar la información, GiD mostrará una figura de intensidades de color, indicando que el programa ya realizó sus respectivos cálculos, estos resultados de la simulación numérica pueden ser observados en términos de esfuerzos, desplazamientos, porosidad, presión.

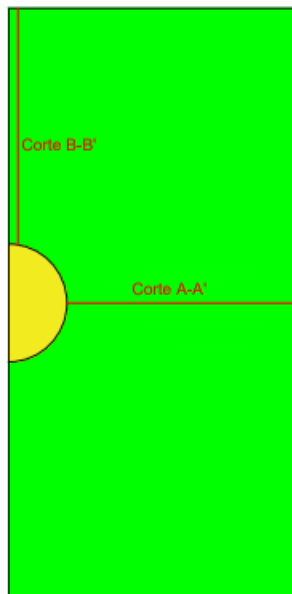
GiD muestra todos los valores mínimos y máximos de cada uno de los nodos de la malla a fin de determinar sus direcciones y magnitudes ya sea en variables vectoriales o matriciales, igualmente representa todas estas variables mediante isosuperficies, permitiendo visualizar todos los resultados de la malla volumétrica y los conjuntos de superficies mediante un suavizado de colores en la figura.

Con el fin de realizar un análisis comparativo entre modelos, se plantean dos cortes en los modelos (ver figura 6); un corte horizontal comprendido entre la pared derecha del pozo y la frontera derecha del modelo (Corte A-A'); y un corte vertical comprendido entre un punto ubicado en la parte superior de la pared del pozo y la frontera superior del modelo (Corte B-B').

El programa computacional GiD permite extraer información sobre los esfuerzos y deformaciones que se presentan a lo largo de los ejes dibujados, los resultados serán tabulados y presentados en gráficas para una mejor apreciación de los resultados.

Figura 6.

Cortes horizontal y vertical generados en el programa computacional GiD para la comparación entre modelos



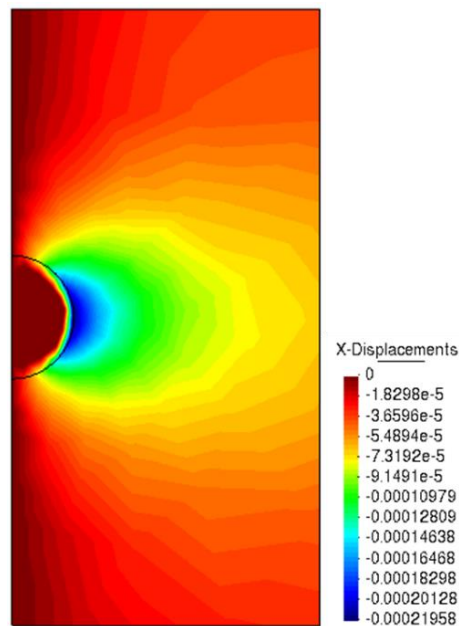
4. Análisis de resultados

4.1 Resultados típicos del análisis.

En la figura 7 se puede observar los desplazamientos horizontales presentados en la roca, más exactamente en el área adyacente al pozo horizontal. Los mayores desplazamientos se encontraron en las fronteras laterales del pozo y se extienden hasta una zona aproximadamente equivalente a 0,5 veces el radio del pozo, posteriormente disminuyen progresivamente hasta alcanzar valores similares a los de las zonas superior e inferior del pozo.

Figura 7.

*Desplazamientos horizontales en el pozo. Modelo con $EI=18615$ [MPa] y $SH_{max}=1.15*S_v$*

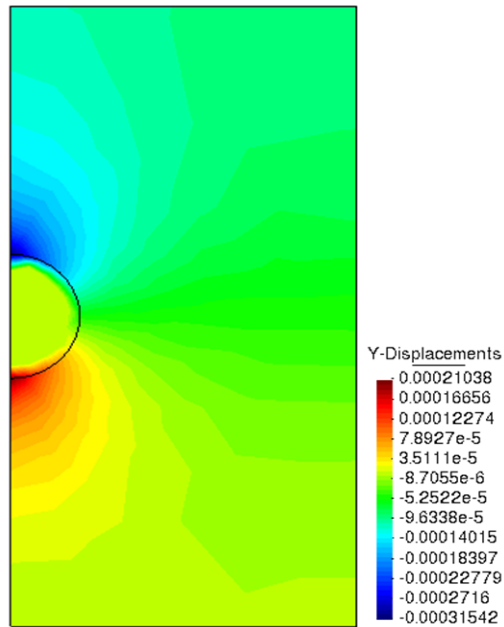


Los desplazamientos verticales en el modelo se visualizan en la figura 8, se puede observar que

estos desplazamientos están principalmente distribuidos en las fronteras superior e inferior del pozo, son zonas donde se esperan que existan las mayores deformaciones verticales.

Figura 8.

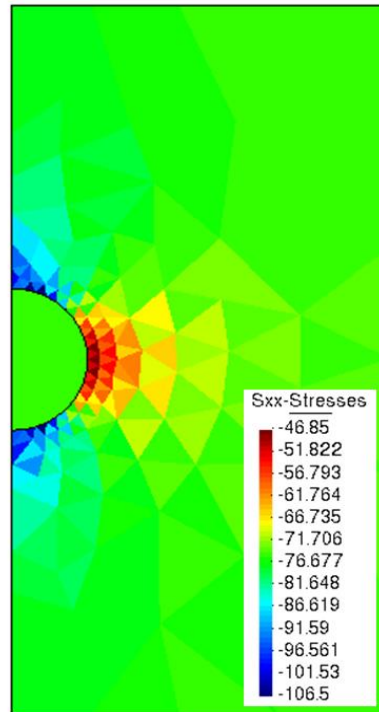
*Desplazamientos verticales en el pozo. Modelo con $EI=18615$ [MPa] y $SH_{max}=1.15*S_v$*



En la figura 9 se observa la distribución de los esfuerzos horizontales en el modelo, curiosamente llama la atención que por efectos del proceso de excavación se presenta una concentración de esfuerzos horizontales en el techo y base del pozo y se presenta una reducción del SH_{max} en la pared lateral, incluyendo una zona de daño de longitud al menos de 0.18 [m] dentro del macizo rocoso.

Figura 9.

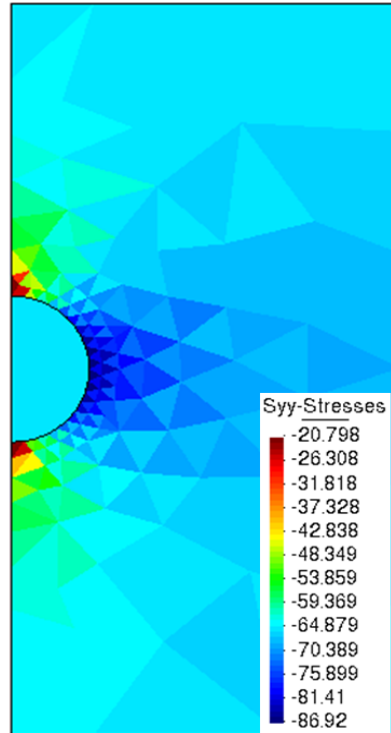
*Esfuerzos horizontales en el pozo. Modelo con $EI=18615$ [MPa] y $SH_{max}=1.15*S_v$*



De forma similar, para el análisis de la distribución del esfuerzo vertical (ver figura 10), se puede observar una concentración de esfuerzos en la zona central de la pared del pozo pasando de 64.93MPa a 81 MPa en promedio y una reducción del S_v en el techo y base del pozo, pasando de 64.93MPa a 20.7 MPa aproximadamente.

Figura 10.

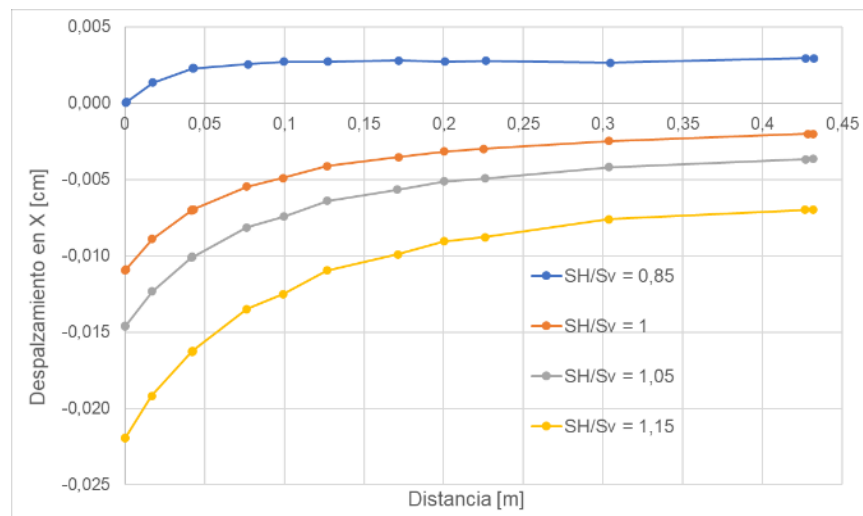
*Esfuerzos verticales en el pozo. Modelo con $EI=18615$ [MPa] y $SH_{max}=1.15*S_v$*



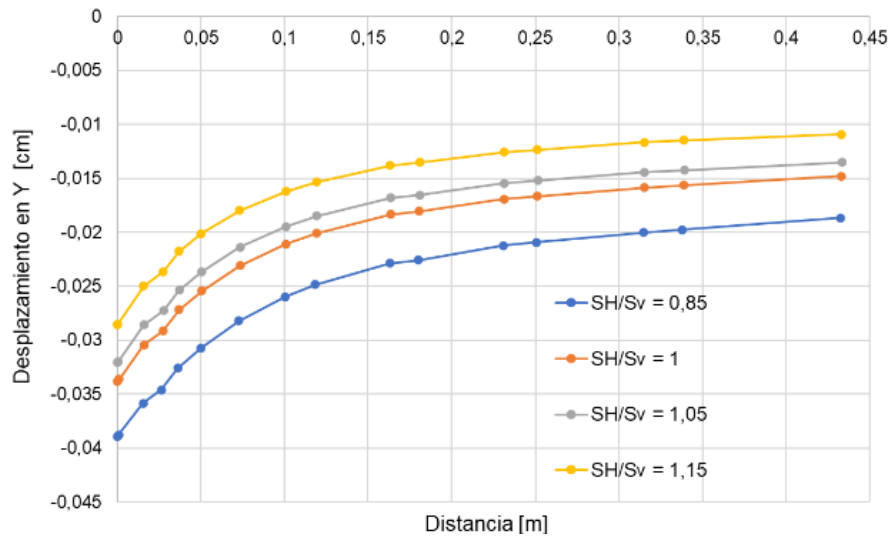
4.2 Influencia del estado de esfuerzos

Cuando se habla del estado de esfuerzos de las rocas, se está haciendo referencia a la orientación y magnitud de los esfuerzos in-situ presentes antes de perforar, como lo son los esfuerzos verticales que están asociados al peso de los estratos suprayacentes a un punto de análisis; y los esfuerzos horizontales que pueden estar influenciados por las propiedades de la roca y las condiciones tectónicas, como es este caso donde existe una anisotropía horizontal muy marcada por estos efectos. En otras palabras, el esfuerzo horizontal mínimo es normalmente muy inferior al esfuerzo horizontal máximo ($S_{hmin} < S_{Hmax}$). En el presente proyecto al realizar la perforación estos esfuerzos locales se alteran, promoviendo un nuevo estado de esfuerzos alrededor del pozo, razón por la cual el objetivo se centró en la necesidad de desarrollar modelos mecánicos que permitieran observar el comportamiento de estos con diferentes esfuerzos de

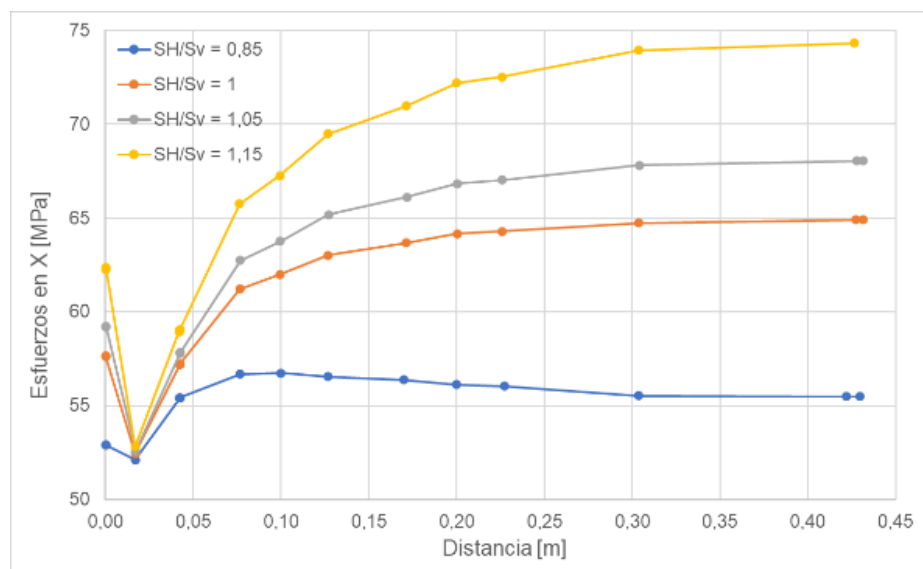
anisotropía vertical (SH_{max}/S_v); cabe resaltar que en esta serie de modelos, no se presenta la influencia del esfuerzo horizontal mínimo Sh_{min} , dado que la dirección del pozo coincide con este esfuerzo, por tanto, es perpendicular al dominio del modelo y no influye en el campo de esfuerzos en un modelo 2D. Por lo anterior, la interacción solo se presenta entre el esfuerzo vertical y el esfuerzo horizontal máximo. Además estos modelos son de gran importancia para observar el estado de esfuerzos presentes en una formación con diferentes variaciones de parámetros como lo fue la porosidad inicial, presión de lodo y presión interna del fluido a fin de determinar la orientación y magnitud de las deformaciones en la sección transversal del pozo, conocer estas magnitudes y orientaciones son esenciales para un buen diseño de un pozo, debido a que si estos esfuerzos inducidos superan la resistencia de la roca, pueden originarse problemas de inestabilidad en el pozo. En este proyecto se tomaron cuatro modelos de anisotropía de esfuerzos (SH_{max}/S_v) con sus respectivas condiciones de diseño con el propósito de determinar las diferencias de magnitudes de sus esfuerzos y desplazamientos en cada nodo.



Gráfica 1. Desplazamientos horizontales a lo largo del corte A-A' en los distintos modelos, variando el esfuerzo horizontal máximo (SH_{max})



Gráfica 2. Desplazamientos verticales a lo largo del corte B-B' en los distintos modelos, variando el SHmax



Gráfica 3. Esfuerzos horizontales a lo largo del corte A-A' en los distintos modelos, variando el Shmax

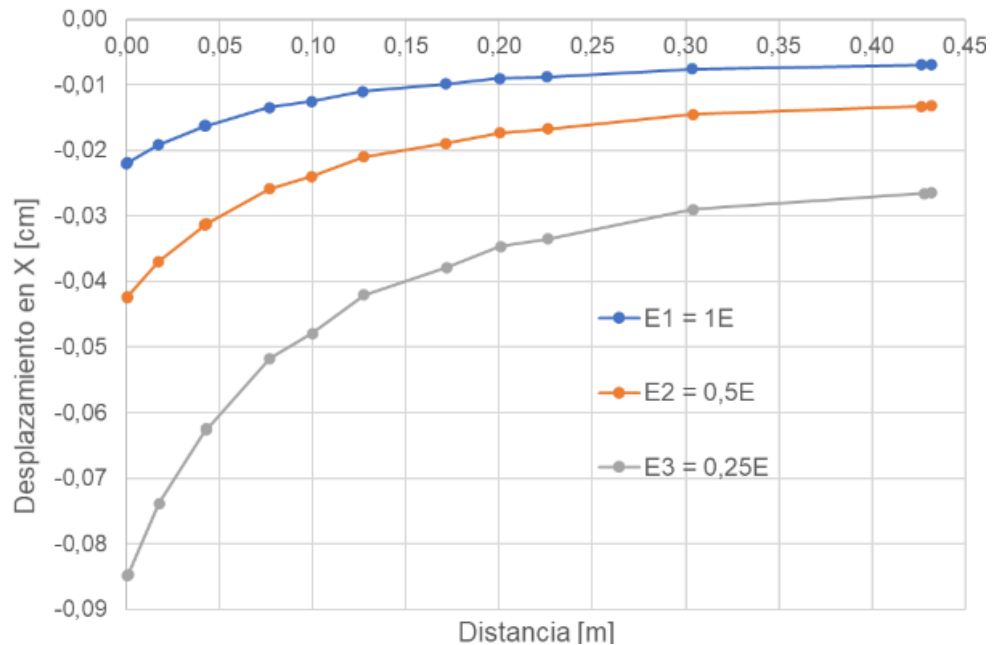
En la gráfica 1 a lo largo del corte A-A' se logran apreciar desplazamientos de tracción para los modelos 2, 3 y 4; sin embargo, el modelo 1 presenta un desplazamiento casi nulo (5×10^{-7} [m]) en la pared del pozo y que aumenta hasta alcanzar los $2,93 \times 10^{-5}$ [m], debido a que este es el modelo con el menor valor de esfuerzo horizontal máximo (SHmax). El mayor desplazamiento horizontal es de $2,2 \times 10^{-4}$ [m] y se da en el modelo 4 justo en la pared del pozo. De manera general se puede decir que, para los 4 modelos, la zona de mayores desplazamientos está comprendida entre la pared del pozo hasta una distancia equivalente a 1,85 veces su radio, pues a partir de esta, el desplazamiento es aproximadamente constante.

En la gráfica 2, ya hablando de los esfuerzos encontrados a lo largo del corte, se afirma que el modelo 4 es el que presenta mayores esfuerzos horizontales, siendo 74,3 [MPa] el de mayor magnitud. Para los 4 modelos, este esfuerzo aumenta a medida que nos alejamos de la pared del pozo y curiosamente encontramos un punto común en los 4 modelos, donde el esfuerzo es bastante similar (alrededor de los 52,5 [MPa]) y se da en la misma posición (0,16 veces el radio del pozo).

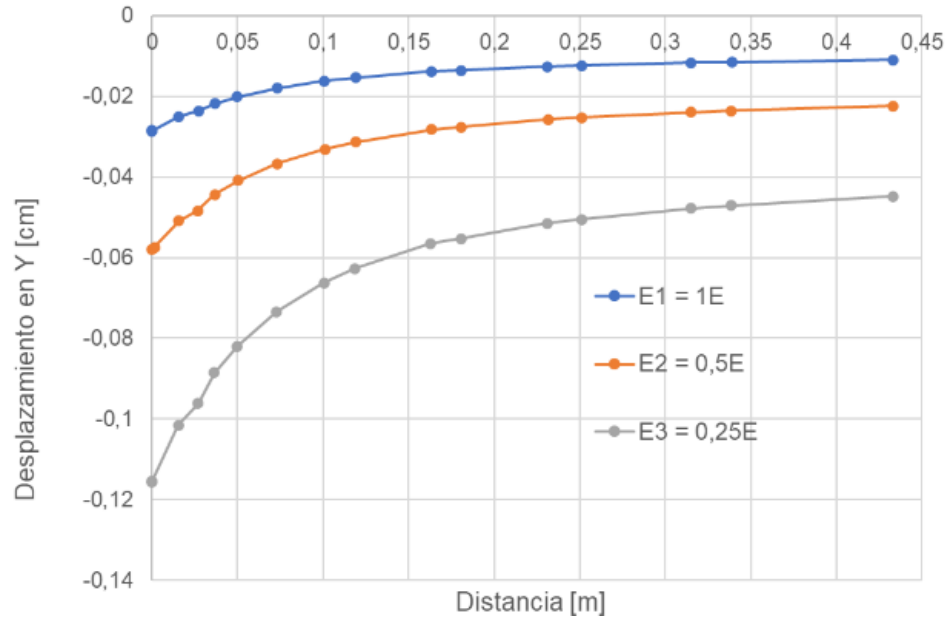
Por último, en la gráfica 3 se aprecia que los mayores desplazamientos verticales se dan en el modelo 1 (menor valor de SHmax) y cercanos a la pared del pozo, siendo 0,00389 [m] el de mayor magnitud. De manera similar al corte A-A', la zona donde se presentan los mayores desplazamientos verticales está comprendida entre la pared del pozo y una distancia equivalente a 2 veces el radio del pozo.

4.3 Influencia del módulo elástico

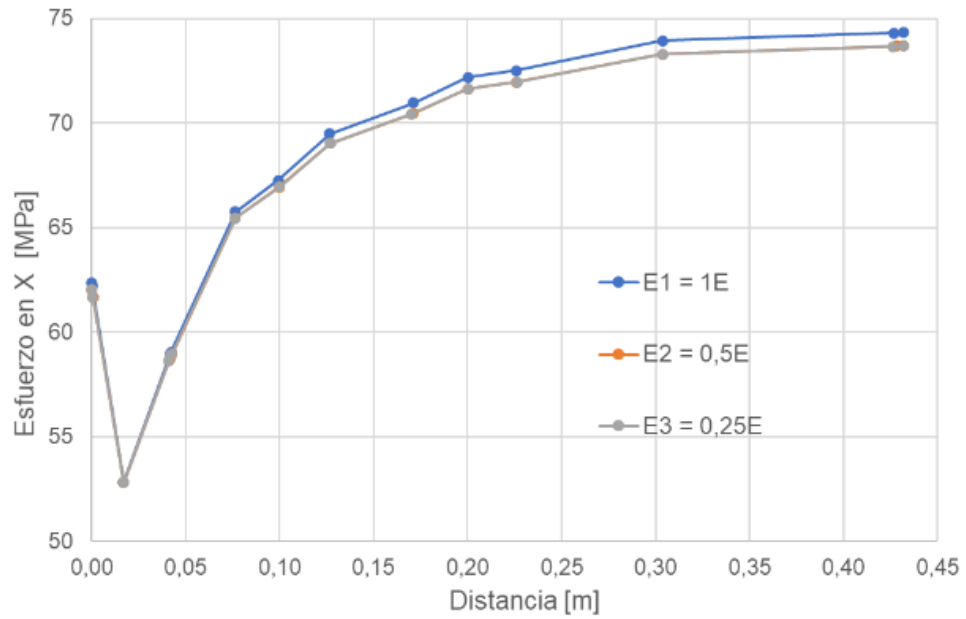
El módulo de elasticidad o módulo de Young es conocido como un parámetro importante en la evaluación de la deformación de las rocas bajo diferentes condiciones de esfuerzo [5], este módulo es la relación entre el esfuerzo perpendicular al material y la deformación del mismo, esto quiere decir que a mayor modulo elástico, menor será la deformación resultando un menor movimiento de la sección transversal del pozo. En este proyecto, el módulo de Young fue variado de E1:18615.85 Mpa100% a E2: 9307,5 MPa50% y E3: 4653.75 MPa 25%, para determinar los esfuerzos y los desplazamientos Uxx, Uyy máximos y mínimos sobre la sección transversal del pozo observando los siguientes resultados:



Gráfica 4. Desplazamientos horizontales a lo largo del corte A-A' en los diferentes modelos, variando el módulo elástico (E)



Gráfica 5. Desplazamientos verticales a lo largo del corte B-B' en los diferentes modelos, variando el módulo elástico (E)



Gráfica 6. Esfuerzos en el eje X a lo largo del corte A-A' en los diferentes modelos, variando el módulo elástico (E)

En la gráfica 4, se logra apreciar a lo largo del corte A-A' que los desplazamientos en los 3 modelos comparados son de tracción; el mayor desplazamiento observado se presenta en el modelo con menor módulo elástico, este tiene una magnitud de $8,48 \times 10^{-4}$ [m] y se presenta justo en la pared del pozo. Se puede inferir que las variaciones de desplazamientos entre los modelos son inversamente proporcionales al módulo elástico utilizado, pues si este módulo se disminuye a la mitad, los desplazamientos aumentan el doble.

Continuando con la gráfica 5 en el corte B-B' se presentan desplazamientos de tracción para los 3 modelos, siendo el modelo con menor módulo elástico el que presenta desplazamientos más grandes, el mayor valor de desplazamiento es de 0,00115 [m] y se presenta en la pared del pozo. Al igual que los desplazamientos horizontales descritos anteriormente, la relación entre estos desplazamientos y el módulo elástico, es inversamente proporcional.

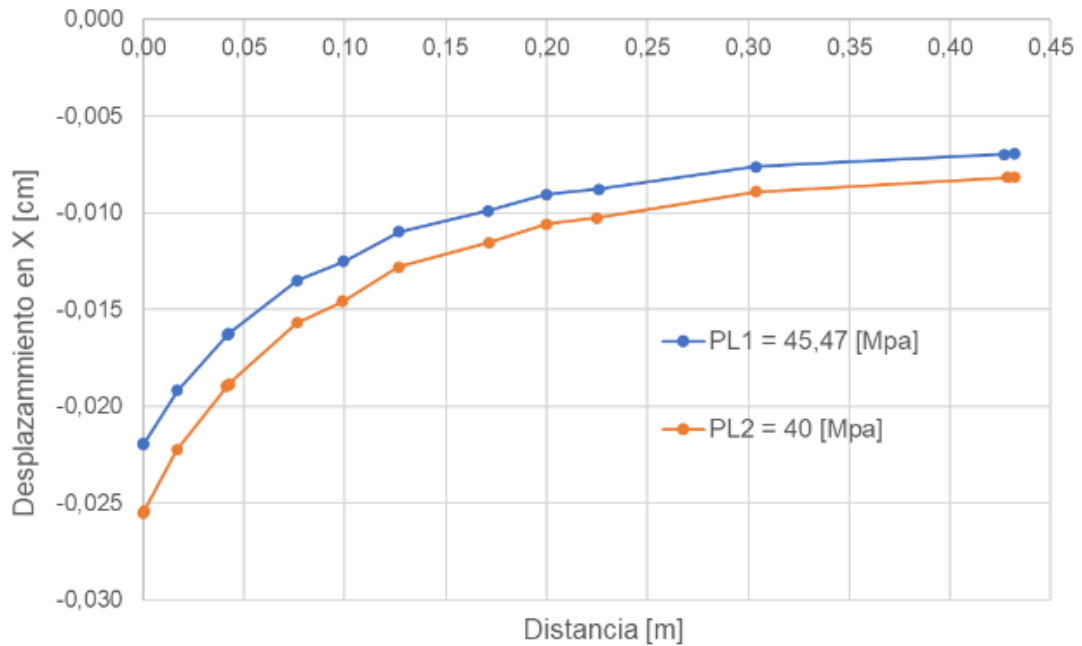
Observando la gráfica 6, de los esfuerzos presentados a lo largo del corte A-A' se puede afirmar que las variaciones del esfuerzo entre modelos son casi imperceptibles, las 3 funciones que describen este comportamiento son bastante similares.

Otra relación que usamos para nuestro modelo elástico lineal fue la relación de Poisson, con valor de 0,22, la cual asegura que, si un material es sometido a un esfuerzo longitudinal, este tendrá su respectiva deformación lateral la cual será perpendicular al esfuerzo aplicado.

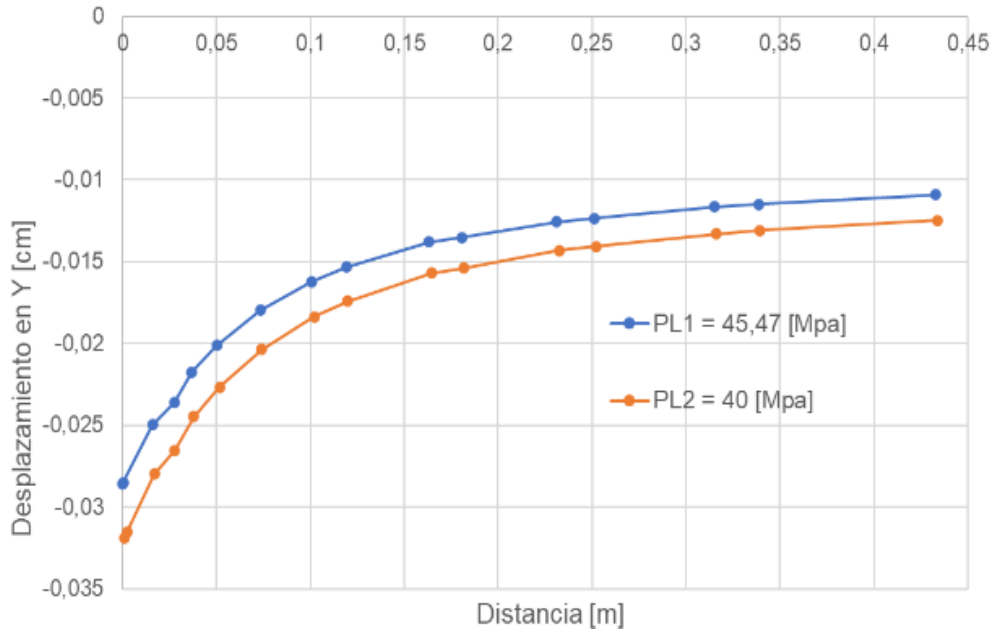
4.4 Influencia de la densidad de lodo

El fluido usado durante la etapa de perforación de un pozo es conocido como lodo de perforación; siendo este como uno de los factores más importantes que existe durante el proceso

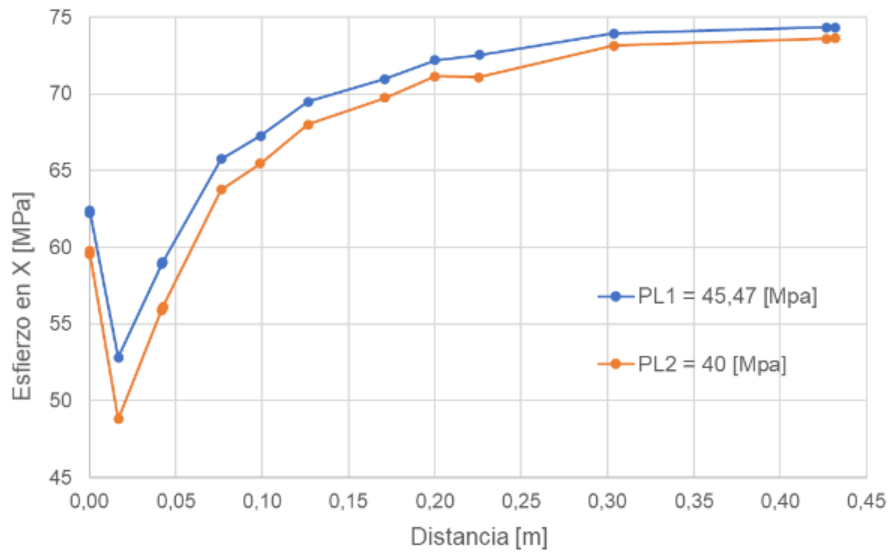
en la perforación (Williamson, 2013). Algunas de las funciones más importantes que ejerce el lodo durante la perforación son el control de las presiones de cada capa de formación y con ello la estabilidad en las paredes del agujero, entre otras. En el presente modelo luego de ingresar los datos del módulo elástico (E: 18615.85 MPa) Y la relación de Poisson (V: 0.22), se usó un gradiente de densidad de lodo de 0.72828 psi/ft (45.469MPa), luego variándolo a 40MPa para determinar los esfuerzos y los desplazamientos Uxx, Uyy máximos y mínimos sobre la sección transversal del pozo observando los siguientes resultados.



Gráfica 7. Deformaciones horizontales a lo largo del corte A-A' en los diferentes modelos, variando la densidad de lodo (PL)



Gráfica 8. Deformaciones verticales a lo largo del eje B-B' en los diferentes modelos, variando la densidad de lodo (PL)

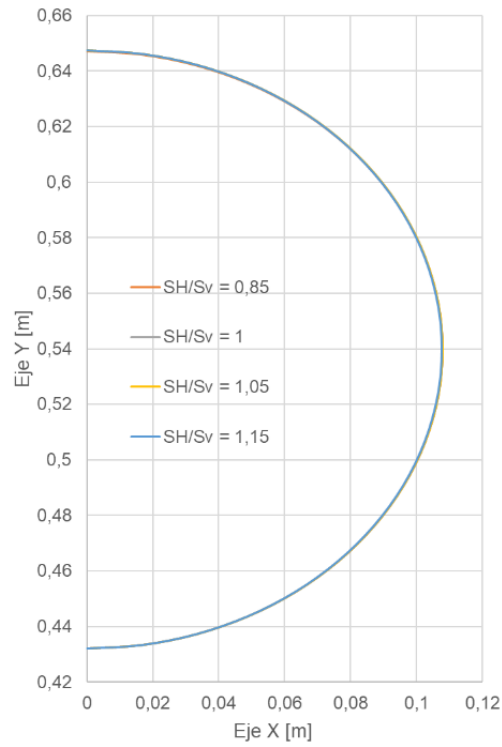


Gráfica 9. Esfuerzos en el eje X a lo largo del corte A-A' en los diferentes modelos, variando la densidad de lodo (PL)

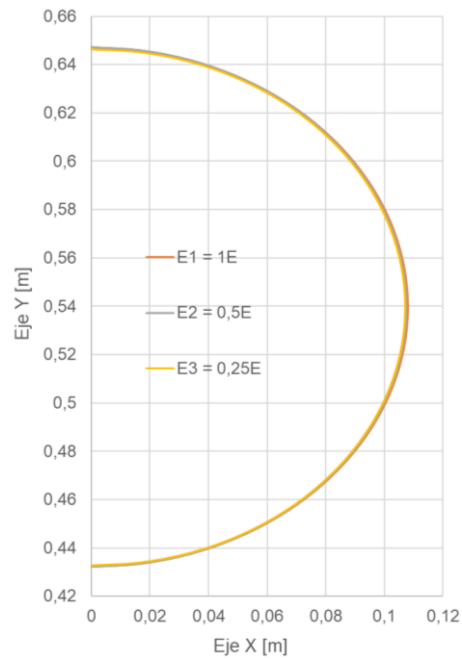
En la gráfica 7, sobre corte A-A' se observan desplazamientos de tracción en ambos modelos comparados, el desplazamiento de mayor magnitud es de $2,55 \times 10^{-4}$ [m] y se presenta en la pared del pozo del modelo con menor valor de presión de lodo. Se puede afirmar que la zona donde existe la mayor variación en desplazamientos es la comprendida entre la pared de pozo y hasta una distancia equivalente a 2,04 veces el radio de la perforación. De la gráfica 9, se observa un comportamiento similar en ambos modelos, siendo el modelo con mayor valor de presión de lodo el que presenta valores levemente superiores, el mayor valor de esfuerzo encontrado es de 74,3 [MPa] y se encuentra a una distancia de 0,4318 [m] (4 veces el radio de pozo). Concluyendo con la gráfica 8, se logran observar desplazamientos verticales en la pared del pozo hasta de 0,000319 [m] para el modelo de menor valor de presión de lodo, estos desplazamientos son aproximadamente constantes a partir de una distancia de 0,232 [m] (2,14 veces del radio) de la pared del pozo.

4.5 Variaciones en la geometría del pozo.

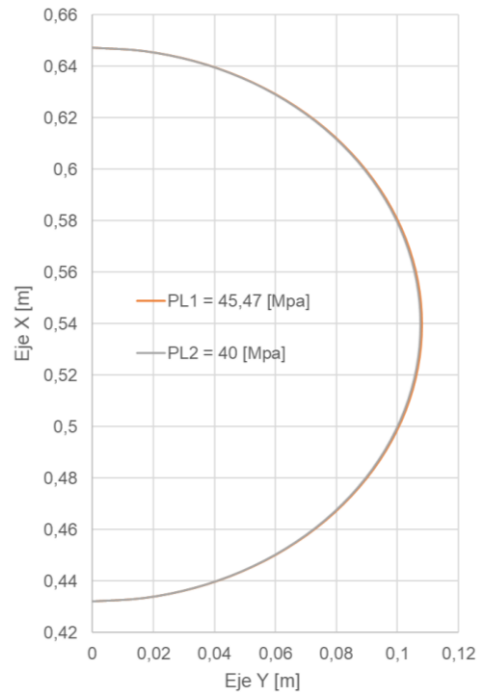
A continuación, en las gráficas 10, 11 y 12, se presentan gráficas donde se comparan las distintas geometrías obtenidas tras la simulación de los modelos en el programa.



Gráfica 10. Comparación entre modelos de la geometría del pozo al variar el SH_{max}



Gráfica 11. Comparación entre modelos de la geometría del pozo al variar el módulo elástico (E)



Gráfica 12. Comparación entre modelos de la geometría del pozo al variar la densidad de lodo (PL)

Como se pudo observar en los apartados anteriores, a pesar de que entre modelos se pueden identificar algunas diferencias en los resultados obtenidos, estas variaciones no logran ser lo suficientemente significativas para alterar la geometría original del pozo. El modelamiento realizado en el programa nos confirma que el modelo planteado no es lo suficientemente sensible a las variaciones de esfuerzo horizontal máximo (SHmax), módulo de elasticidad (E), ni a la presión de lodo (PL) escogidas para lograr cambios a simple vista en la geometría del pozo

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos y presentados en las gráficas contenidas en este documento, las deformaciones observadas en las paredes de un pozo horizontal se ven afectadas por factores como los esfuerzos a los cuales está sometido, las propiedades y características de la roca donde se realiza la perforación y la densidad de lodo del fluido utilizado en el proceso, sin embargo, el modelo es más sensible a unos factores que a otros.

Al variar el esfuerzo horizontal al cual está sometido el modelo, se observa que para un esfuerzo horizontal equivalente a 0,85 veces el esfuerzo vertical el pozo va a tender a ensancharse mientras que para el resto de las variaciones, el pozo tiende a achatarse.

Se concluye, además, que la relación entre las deformaciones y el módulo de elasticidad es inversamente proporcional, las deformaciones aumentan en la misma proporción que se disminuye el módulo de elasticidad del suelo. Sin embargo, las variaciones de módulo elástico hechas en los modelos poco alteran los resultados relacionados con los esfuerzos horizontales presentes en la roca.

De los factores variables utilizados en este proyecto, es la anisotropía de esfuerzos la más sensible al modelo planteado; por otro lado, la variable densidad de lodo es la que menores variaciones presenta. Sin embargo, en ningún modelo se considera que su geometría inicial sufrió cambios considerables ($<1\text{mm}$).

Se identificó una “zona crítica” común en todos los modelos realizados, está comprendida entre la pared del pozo y 1,5 veces el radio de la perforación es en esta zona donde la masa de roca presenta mayores variaciones en desplazamientos y esfuerzos.

A partir de una distancia aproximada entre las paredes del pozo y 2,5 veces el radio de este, se puede afirmar que la masa de roca logra un equilibrio o alcanza su estado natural pues las deformaciones horizontales y verticales; y los esfuerzos horizontales son aproximadamente constantes a partir de este límite.

Existe un punto común en todos los modelos a una distancia aproximada de 0,16 veces el radio del pozo, allí se reducen significativamente los esfuerzos horizontales, este fenómeno probablemente este asociado a la necesidad del programa de alcanzar una condición de equilibrio y de redistribución de esfuerzos.

Referencias bibliográficas

GiD Software. (10 de diciembre de 2020a). *The personal pre and post processor. c2020. Barcelona (Spain): CIMNE*. Recuperado de: www.gidhome.com.

Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., and Alonso, E. E. (1996). *Numerical Formulation for a Simulator (CODE_BRIGTH) for the Coupled Analysis of Saline Media*, Eng. Comput,

Méndez, A. (2013). Taller de hidrocarburos en Lutitas. Gas Shale – Aspectos generales [Diapositivas]. Instituto mexicano del petróleo. Recuperado de: <http://www.oilproduction.net/files/Aspectos-de-Produccion.pdf>

Martinez, P. y Moncayo, E. (1995). *Fluidos de perforación en pozos horizontales*. Escuela superior politécnica del litoral, pp. 1-5

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. 35-44

Antolinez, J. y Bohórquez, C. (2018). *Evaluación del impacto de los parámetros geomecánicos en procesos de estimulaciones hidráulicas masivas en la formación la luna (cuenca valle medio del Magdalena)*, Fundación universidad de América, pp. 45-76

García, M. (2006). *Determinación de la orientación y magnitud del esfuerzo máximo horizontal a partir del modelamiento de breakouts en la zona del piedemonte llanero colombiano*. Universidad industrial de Santander, pp. 4-26

Williamson, D. (2013). *Fundamento de los fluidos de perforación*. Oilfield Review, 25(1), pp. 67-69.

Zumaya, P. (2017). *Geomecánica aplicada a la perforación de pozos petroleros*. Instituto politécnico nacional, pp. 1-16

Benavente, D. Bernabéu, A. y Cañaveras, J. (2004). *Estudio de propiedades físicas de las rocas*. Enseñanza de las ciencias de la tierra, pp. 62-68

Tauta, J. Ortiz, O y Leal, A. (2006). *Anisotropía de esfuerzos y resistencia al corte de arenas - stress anisotropy and shear strength of sands*. Univ. Mil. Nueva Granada, vol. 16, no. 1, pp. 54–62.