

USO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN UN MODELO DE POZO.

Diana Milena Ochoa Suárez¹, Juliana Vivas²
Elkin Rodolfo Santafé Rangel³.

RESUMEN

Las actividades de perforación y producción de hidrocarburos pueden verse obstaculizadas por el estado de esfuerzos y deformaciones, que en la mayoría de los casos pueden generar inestabilidad en el mismo. Teniendo en cuenta las condiciones y propiedades del pozo es posible crear un modelo que reproduzca su estado geomecánico permitiendo reducir las incertidumbres durante la perforación. Para hacer esto en el presente trabajo se utiliza el software comercial ANSYS como herramienta computacional de diseño, el cual se basa en el método de elementos finitos y permite el análisis de esfuerzo y tensión.

Uno de los principales problemas que enfrentan durante el diseño de modelos en 3D es la falta de simetría debido a que las propiedades sobre el eje vertical pueden variar enormemente. Para este modelo se utiliza inicialmente, para llevar a cabo un análisis preliminar, un modelo de material elástico. El resultado se puede ver en 3D: deformaciones sufridas por el lado del pozo y perfiles de tensión en dirección radial y axial a través del eje del pozo.

Palabras clave: estabilidad de pozo, elemento finito, modelo elástico, perfil de deformación, perfil de esfuerzos, medio continuo.

ABSTRAC

The drilling activities and production of hydrocarbons can be hindered by the state of stress and strain, which in most cases may create instability in the well. Taking into account the conditions and properties of the well is possible to create a model that reproduces its geomechanical been possible to reduce the uncertainty when drilling. To do this in the present work we use the commercial software ANSYS as design computational tool, which is based on the finite element method and allows analysis of the stress and tension.

One of the main problems faced during the design of 3D models is the lack of symmetry due to the properties on the vertical axis can vary greatly. For this model is used initially to conduct a preliminary analysis of elastic material model. The result can be seen in 3D deformations suffered by the side of the well and pressure profiles in radial and axial direction through the axis of the well.

Keywords: wellbore stability, finite element, elastic model, deformation profile, straint profile, stress profile, continuous medium.

Ingeniera de petróleos. Grupo de Investigación en Tecnologías Alternativas para Hidrocarburos – GITAH (Universidad Industrial de Santander – UIS).

Ingeniera de petróleos. Grupo de Investigación en Tecnologías Alternativas para Hidrocarburos – GITAH (Universidad Industrial de Santander – UIS).

Ingeniero de petróleos. M,Sc. Grupo de Investigación en Tecnologías Alternativas para Hidrocarburos – GITAH (Universidad Industrial de Santander – UIS).

INTRODUCCIÓN

La formulación de diversas teorías para determinar el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a diferentes tipos de fuerzas es de suma importancia. Entre estas teorías se encuentran la elástica, la plástica y la visco-elástica. Dichas teorías tienen una fuerte afinidad con el comportamiento del material que compone el subsuelo terrestre, aunque es posible que las acumulaciones de material sedimentario por efecto de la diagénesis den origen a composiciones de material muy heterogéneas, siendo esto un verdadero reto desde el punto de vista de modelamiento computacional.

A lo largo del presente trabajo, se expondrá una serie de conceptos preliminares introduciendo al método de elementos finitos como técnica de modelamiento escogida para este tipo de problema. Posteriormente se presentará una metodología básica que permitirá realizar modelos en 3D y algunas pruebas realizadas con datos de un pozo real.

EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) —sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema— en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se denomina «malla».

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas, las deformaciones y tensiones, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica de ingeniería los métodos numéricos (y en particular, los elementos finitos), se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

EL INTERÉS DE LA GEOMECAÍNICA

Básicamente el interés general de cualquier análisis geomecánico es lograr establecer cual es el perfil de esfuerzos y deformaciones a partir de un estado de cargas aplicado a una región particular. De este análisis se puede derivar, si el modelo de material lo permite, un potencial de fractura e incluso intuir una posible ruta de migración de fluidos si el medio se encuentra saturado.

En el caso particular de la geomecánica de pozo, la magnitud y dirección de los esfuerzos van a definir la trayectoria de mayor estabilidad para pozos que tengan desviaciones o que sean horizontales. Igualmente, el desprendimiento de la formación así como los diseños de fracturas hidráulicas requieren de un adecuado conocimiento de la resistencia mecánica de la roca.

La inestabilidad de pozo puede ocurrir como resultado de tres efectos:

- Efectos mecánicos
- Efectos químicos
- Combinación de los dos anteriores

Efectos mecánicos. Como lo muestran las Figuras 1a. y 1b., los efectos mecánicos están usualmente relacionados a un inadecuado peso del lodo (muy alto o muy bajo) o a una inapropiada práctica de perforación (tasa de perforación, efectos de vibración, torque y arrastre, prácticas pobres y alta frecuencia de viajes).

Efectos químicos. Los efectos químicos están relacionados con la interacción entre el tipo de lodo y la formación que está siendo perforada, siendo producto de un inapropiado tipo de lodo o de una inadecuada inhibición de la roca. Sin embargo, estos efectos pueden ocurrir principalmente en formaciones de shale y de sal. En estos dos casos, la interacción con el agua es la causa de la inestabilidad. Por esta razón la inestabilidad

química normalmente es minimizada usando lodos base aceite. Cuando los shale reaccionan con el agua ellos pueden deformarse, hincharse y agrietarse. Estos efectos pueden causar un gran rango de problemas operacionales tales como reducción del tamaño del hueco, ensanchamiento del hueco, atascamiento de la broca o derrumbe de la formación.

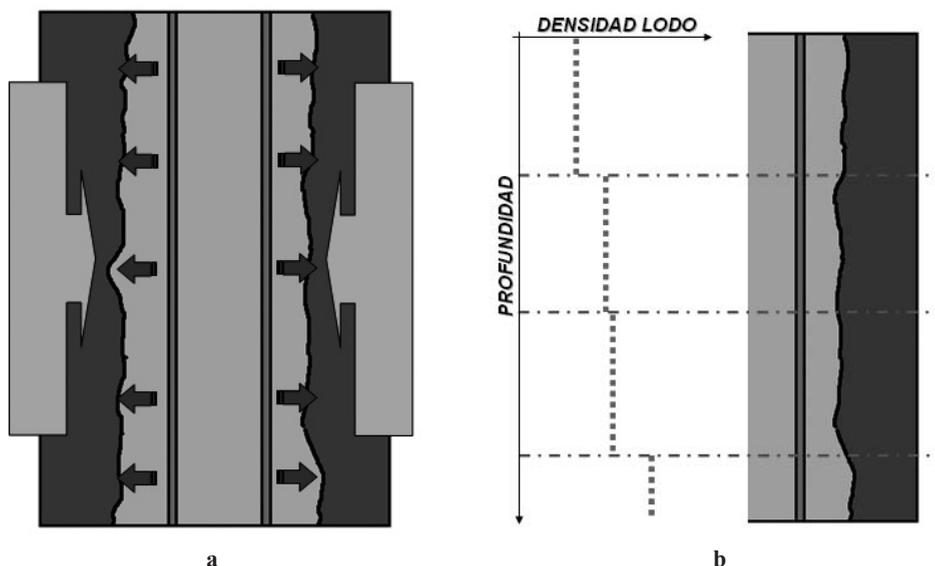


Figura 1. En a) se aprecia que la formación posee una sobrecarga de fuerzas que debe ser compensada por el peso del lodo. En b) se observa como la densidad del lodo debe ir cambiando en profundidad para lograr este propósito.

En la experiencia recogida por la industria se han logrado determinar cuatro factores que influyen en la estabilidad del pozo a saber:

- Orientación y magnitud del campo de esfuerzos in situ.
- Mecánica de la roca y propiedades de resistencia.
- Presiones de poro.
- Presión de lodo.

Dentro de otros aspectos que afectan la estabilidad del pozo se puede resaltar la estructura litológica de la formación, la reología del lodo y los efectos térmicos.

UTILIDAD DEL MEF EN ANÁLISIS GEOMECÁNICO DE POZO.

La utilidad de esta técnica en el análisis de estabilidad de pozo se sustenta en el hecho de que existe todo un esquema riguroso ya desarrollado para problemas

mecánicos en elementos finitos. El uso de mallas regulares no es una restricción dentro de los modelos ya que la formulación por elementos finitos permite el uso casi libre de geometrías de enmallado, en donde las triangulaciones son las que tienen una fuerte tendencia de uso cuando a problemas 2D se refiere. En la Figura 2 se puede apreciar un elemento típico para la discretización del dominio de interés. El elemento seleccionado para el análisis posee 6 nodos (puntos señalados con letras); cada uno de estos permite obtener un punto de solución lo que mejora la capacidad de interpolación de la respuesta.

La Figura 2 muestra cómo se usa este elemento para ilustrar el fenómeno de ovalización de la cara del pozo sobre un dominio elástico y bajo el estado de cargas expuesto. El esfuerzo insitu calculado obedece a la suma del gradiente litostático (1 psi/ft) y de presión de poro (0,44 psi/ft) para una zona de arena limpia a 6000 ft de profundidad con un módulo de Young (E) igual a 1885,49 psi y una relación de Poisson (ν) igual a 0,3.

El esfuerzo horizontal mínimo y máximo se calcularon a la profundidad usando gradientes de 0,71 psi/ft y 1,5 psi/ft. Todos los gradientes asumidos se tomaron como representativos de la zona del piedemonte llanero. La Figura 3 expone visualmente el resultado del proceso de cálculo de esfuerzos y deformaciones ante las cargas aplicadas.

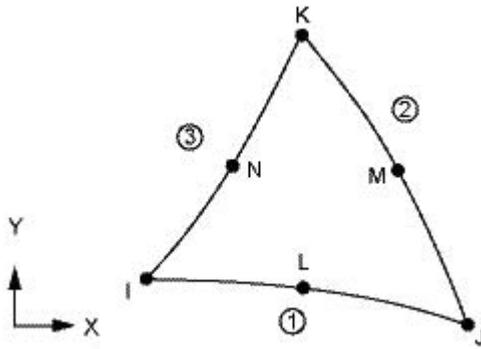


Figura 2. Ejemplo de un elemento finito utilizado para análisis estructural

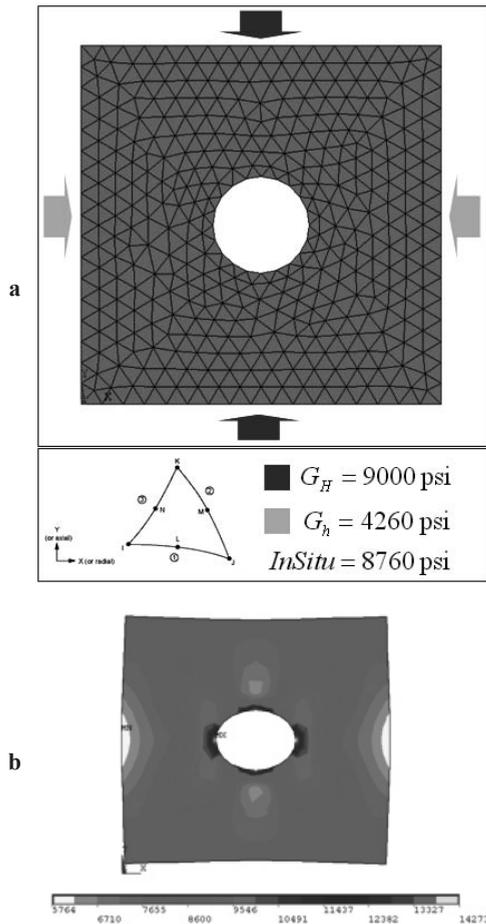


Figura 3. a. Estado de cargas aplicadas al modelo. b. Efecto de la ovalización, producto de las cargas aplicadas.

METODOLOGÍA DE MODELAMIENTO

1. Creando la geometría. Los pozos productores de hidrocarburos poseen a menudo trayectorias que no son completamente verticales y los esfuerzos aplicados se pueden distribuir en diferentes direcciones asociadas a la trayectoria del pozo. En el presente trabajo se utiliza la metodología de modelamiento geométrico propuesta por Zambrano (2008) en la cual se utilizan splines para suavizar la trayectoria del pozo y una malla regular. La base de la metodología es el uso de la información de profundidad perforada y profundidad real del pozo de donde se establecen unos «puntos clave» o *keypoints*. Estos normalmente coinciden con los cambios de material que presenta el modelo. Cada límite definido por un *keypoint*, va a determinar la aparición de un volumen y este volumen a su vez, representará el material de interés a modelar (Figura 4).

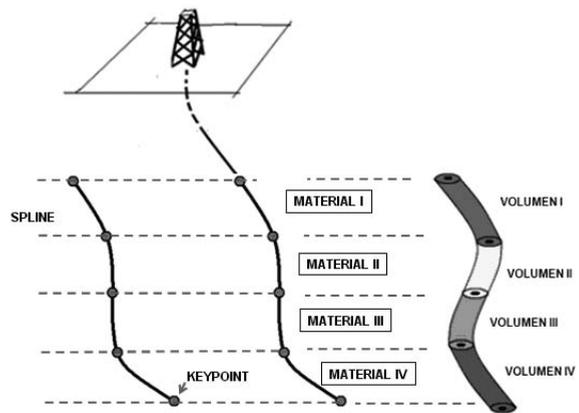


Figura 4. Detalle del primer paso de modelamiento geométrico en 3D. Se aprecia la construcción del eje axial del pozo con el interpolador spline y la construcción de volúmenes representativos para cada zona perforada.

2. Definiendo el tipo de material y aplicando cargas.

Una vez se ha establecido la geometría del modelo, se procede a diseñar el tipo de material en función de sus propiedades y de su modelo. A nivel de formaciones geológicas, los comportamientos de material característicos que describen el medio son:

- Elástico perfecto
- Viscoso
- Viscoelástico
- Elástico perfectamente plástico

Para incluir estas características dentro del modelo se puede seguir la metodología expuesta en la Figura 6. Generalmente en problemas que se solucionan por MEF,

refiriendo la mecánica de sólidos deformables, es común que se calculen desplazamientos a partir de fuerzas aplicadas o perfiles de esfuerzos a partir de deformaciones. En este caso, el sistema de cargas que se acondiciona sobre el modelo es propio de evento geodinámico que tenga ocurrencia.

3. Solución Numérica. Uno de los principales problemas que se puede llegar a tener con la obtención de la solución numérica de un modelo de elementos finitos, es la aparición de singularidades en la solución. Una singularidad ocurre cuando se obtiene un valor de solución nodal que está muy por encima o muy por debajo de los valores calculados en los nodos vecinos sin que la tendencia general así lo indique. Esto ocurre generalmente cuando se tienen sistemas de enmallado de mala calidad o cuando las restricciones y demás

condiciones de frontera en el modelo no han sido establecidas adecuadamente.

Los tiempos de cómputo para esta clase de sistemas pueden ser muy altos dependiendo de la dimensión del problema (2D o 3D) y del nivel de dispersión que se tenga en la matriz de rigidez resultante. En la Figura 5 se muestran dos tipos de dispersión asociadas a esta matriz. Nótese que generalmente lo que se busca es que la matriz quede con la mayor cantidad de términos hacia la diagonal principal para que sea propensa a tener solución. Normalmente, parte de la rigurosidad de un algoritmo completo de solución de problemas con elementos finitos, añaden un componente que controla estos aspectos. Es así como un algoritmo de reordenamiento nodal puede superar el problema inicialmente.

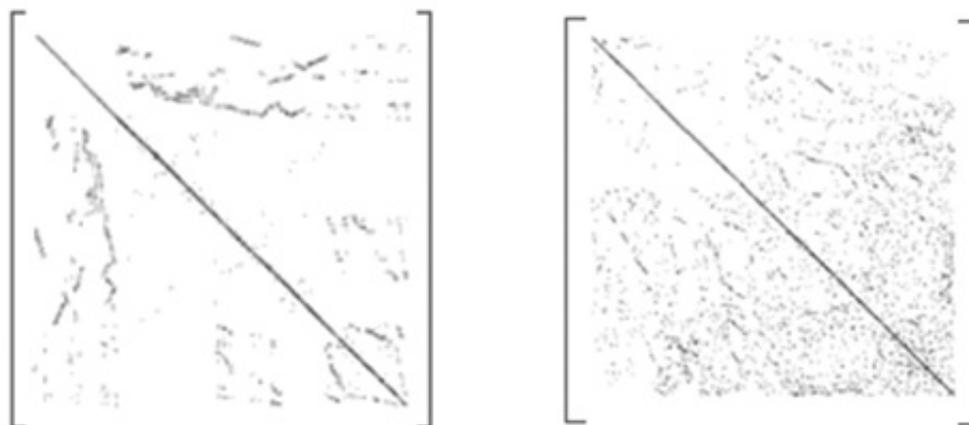


Figura 5. Matriz de rigidez

En la figura 5 se puede apreciar la densidad y el grado de dispersión de las matrices de rigidez resultantes de un modelo por elementos finitos. A la izquierda se tiene un sistema con 1200 incógnitas y a la derecha uno con 12350. Para el modelo de pozo mostrado en el artículo el sistema resultante fué de aproximadamente 535000 incógnitas.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El modelo construido es 3D e implementa la metodología expuesta. En la Figura 7, se puede apreciar los «puntos clave» establecidos para el pozo GITAHI y lo intrincado de su trayectoria; en total al modelo lo componen 15 materiales. El volumen se genera con una extensión radial de 3 veces su radio (Figura 8a.) como espacio de interés para apreciar las deformaciones y campo de esfuerzos experimentados, esta distancia no obedece a ninguna regla física, sino

que supone por cierta experiencia de campo, que este valor es un radio suficiente para apreciar el cambio de los esfuerzos. Para efectos de la discretización se utilizó un elemento hexaédrico (Figura 8b.) con capacidad para distorsionar la posición de los nodos de las aristas. Esto lo hace más adaptable a geometrías irregulares y para este caso particular, a los cambios de dirección del pozo en profundidad. Los detalles de la malla final se pueden apreciar en la Figura 9.

Una vez se ha logrado diseñar la geometría, se establece el modelo de material; el modelo escogido fué el modelo elástico. Un primer conjunto de valores de frontera se aplican en la cara interna del pozo, siendo estos los que representan la variación del lodo de perforación diseñado (Figura 10). Aplicado este grupo de condiciones, ahora se instalan las cargas de los esfuerzos concentrados en el sitio (*in situ*) y se anulan los desplazamientos en la cara externa del pozo.

Ya instaladas las cargas se ejecuta la rutina de solución y se obtienen los perfiles de deformación (Figura 11) y esfuerzo (Figura 12) los cuales indican efectivamente que los mayores desplazamientos se encuentran a nivel

de la cara del pozo y que los esfuerzos horizontales máximo y mínimo se ubican a lo largo de la línea de trayectoria del pozo, presentando una clara variación en profundidad dada la geometría del modelo (Figura 13).



Figura 6. Metodología de carga del modelo para definición del análisis de esfuerzos y deformaciones

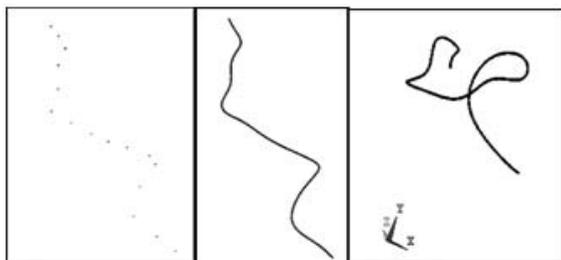


Figura 7. Resultado de aplicar la primera etapa de modelamiento geométrico sobre el pozo GITAH1 (protegiendo la información de los datos del pozo real).

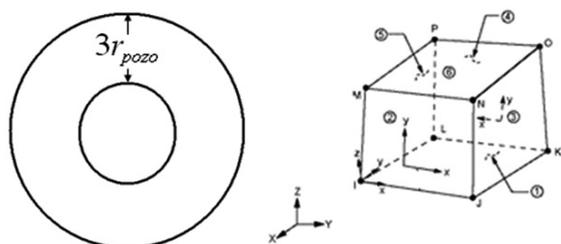


Figura 8. a. Detalle de la zona de análisis extendida para efectos del modelamiento, b. Tipo de elemento tomado para la construcción del modelo.

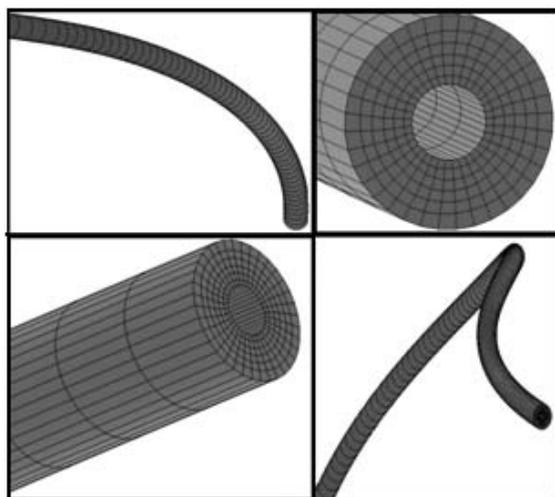


Figura 9. Detalle de la malla final obtenida para el modelo con elementos finitos.

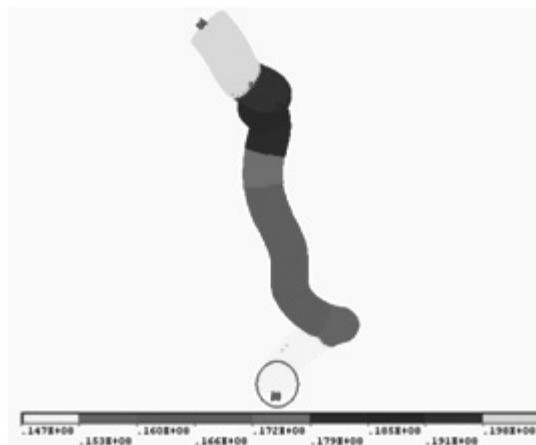


Figura 10. Aplicación del peso del lodo a la cara interna del pozo.

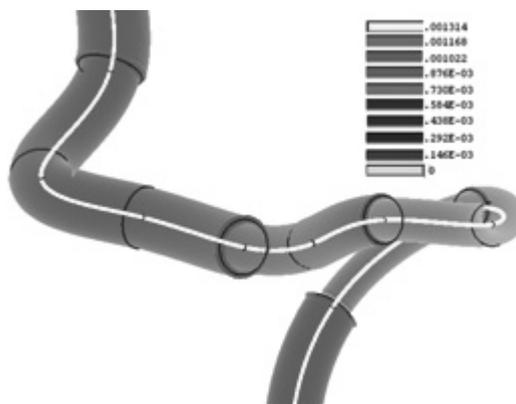


Figura 11. Perfiles de deformación obtenidos para el modelo en una zona de interés.



Figura 12. Perfiles de esfuerzo obtenidos para el modelo en una zona de interés.

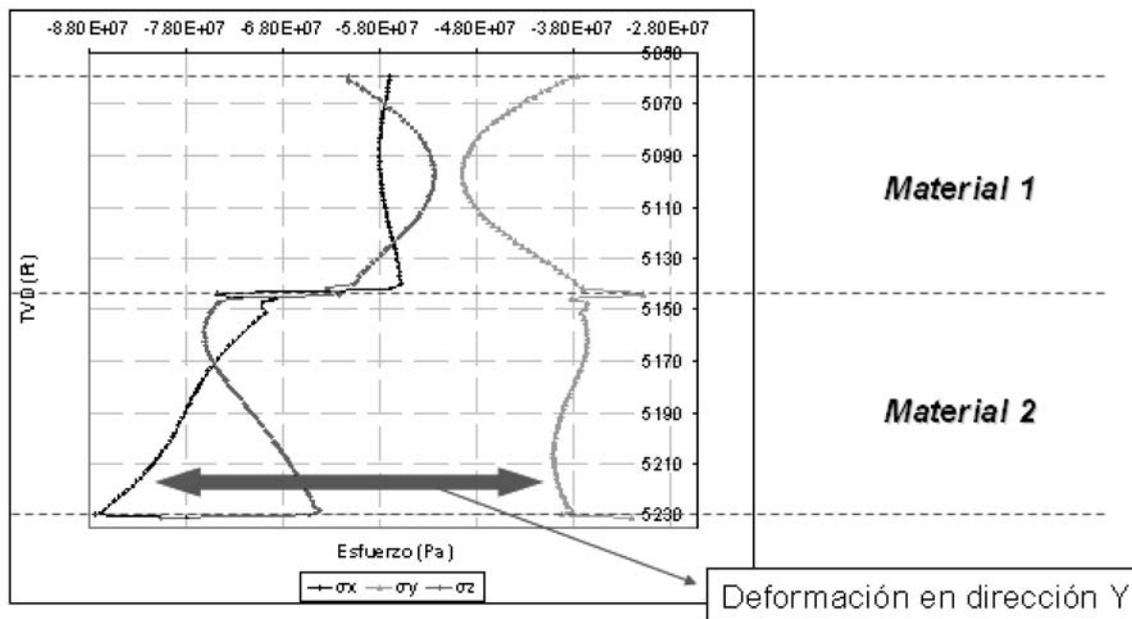


Figura 13. Variación en profundidad de los tres esfuerzos principales.

CONCLUSIONES

1. La implementación de la metodología para la construcción del modelo tridimensional del pozo es fundamental para el análisis geomecánico del mismo porque relaciona cada material que se está perforando con su inmediatamente anterior y así establece un modelo heterogéneo a partir de materiales homogéneos en sí mismos.
2. Debido a la creación de bucles en el software, lo cual permite aprovechar las relaciones de enumeración de las líneas, se puede construir el modelo tridimensional de forma automática, así como también el enmallado, la aplicación de la presión de lodo y las restricciones.
3. El método de los elementos finitos se presenta como otra alternativa de análisis de modelamiento numérico para establecer el estado de esfuerzos y deformaciones de un pozo de petróleo.

AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Industrial de Santander y al Grupo de Investigación en Tecnologías Alternativas para Hidrocarburos – GITAH por generar los espacios para que esta clase de trabajos puedan desarrollarse dentro del marco de investigación en busca de nuevas soluciones para la industria.

Al Ingeniero Edward Zambrano por transmitir su conocimiento e incentivar la continuidad en esta temática.

REFERENCIAS

1. Anderson, E.M. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain, Oliver and Boyd, Edinburgh, 1951.
2. Beer, Ferdinand P. and Johnston E. Russell, Mecánica De Materiales, McGraw-Hill, 1982.
3. Chen, X. C.P Tan and C.M Haberfield. A Comprehensive Practical Approach for Wellbore Instability Management. SPE 48898, 1998.
4. Chen, X. C.P Tan and C.M Haberfield. Wellbore Stability Analysis Guidelines for Practical Well Design. SPE 20058, 1996.
5. Coronel, Iván Leonardo, y Tarazona, Darwin Mateus. Evaluación de los mecanismos de falla que conducen a la inestabilidad de pozo, Bucaramanga: Convenio UIS-ICP, 2004.
6. Fjær, E., Holt, M. R., Horsrud, P., Raaen, I., Risnes, R., Petroleum related rock mechanics. Elsevier Science Publishers, 1992.

7. Gómez Vanegas, César Augusto, y Bolívar, Rafael Santamaría. Análisis de estabilidad de pozo utilizando el software pbore, Bucaramanga: Convenio UIS-ICP, 2004.
8. Hutton, D. V. Fundamentals of finite element analysis. Singapore: McGraw-Hill, 2004.
9. Maury, V. y Sauzay, J. Boreholes Instability: Case Histories, Rock Mechanics Approach and Results”. Artículo SPE 16051, 1987.
10. Mora Guerrero, LeninAlberto, y Villadiego Atencio, Darwin Oswaldo. Desarrollo de una herramienta para analizar la inestabilidad de pozo, mediante el uso de la teoría elástica y poroelástica: Aplicación al Piedemonte Colombiano. Bucaramanga: Convenio UIS-ICP, 2005.
11. Sánchez, M. y Vásquez, A. Introducción a la Geomecánica Petrolera. Caracas Venezuela. 1997.
12. Tiab, D. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. Gulf Publishing Co, 1996.
13. Zambrano, E. Análisis geomecánico de un pozo de petróleo usando el método de elementos finitos. Abril 2008.

Fecha de recepción: Marzo de 2009

Fecha de aceptación: Junio de 2009