

## La geomecánica

John Cook

Asesor científico

La geomecánica es el estudio de cómo se deforman los suelos y las rocas, hasta terminar a veces en su falla, en respuesta a los cambios de esfuerzos, presión, temperatura y otros parámetros ambientales. En la industria petrolera, la geomecánica tiende a enfocarse en las rocas, pero la distinción se vuelve confusa porque las rocas no consolidadas pueden comportarse como sólidos.

La geomecánica es una ciencia relativamente joven y más joven aún en cuanto a su aplicación en la industria del petróleo y el gas. Sin embargo, es aplicable a casi todos los aspectos de la extracción del petróleo, desde la exploración hasta la producción y el abandono de los pozos, y a través de todas las escalas, desde una escala tan pequeña como la acción de los cortadores individuales de una barrena de un compuesto policristalino de diamante (PDC), pasando por las operaciones de disparos y perforación de pozos, hasta una escala tan grande como la del modelado de cuencas y campos petroleros. En los últimos 30 años, la geomecánica ha pasado a desempeñar un rol cada vez más importante en las operaciones de perforación, terminación y producción de pozos. Y esta tendencia continúa conforme los operadores buscan producir petróleo y gas de lutitas, en las que la anisotropía mecánica, es decir, la variación de las propiedades mecánicas con la orientación, desempeña un rol vital.

A escala de pozo, la geomecánica resulta esencial para comprender cómo las barrenas de perforación remueven las rocas y caracterizar la estabilidad de los pozos, predecir la estabilidad de los túneles de los disparos, y diseñar y monitorear los programas de estimulación por fracturamiento hidráulico. A escala de yacimiento, la geomecánica ayuda a modelar el movimiento de los fluidos y a predecir cómo la remoción o la inyección de fluidos produce cambios en la permeabilidad, la presión del fluido y los esfuerzos locales de las rocas, que pueden generar efectos significativos en el rendimiento de los yacimientos. Los ingenieros utilizan el modelado geomecánico con el fin de pronosticar y cuantificar estos efectos para las decisiones adoptadas durante toda la vida productiva de los yacimientos, tales como el posicionamiento y la terminación de pozos nuevos, el mejoramiento y la continuidad de la producción, la minimización de los riesgos y la implementación de nuevas inversiones.

La selección del tipo y el diseño correctos de la barrena para optimizar la velocidad de penetración y la vida útil de la barrena es vital para la perforación de pozos económicamente efectivos. La geomecánica de la destrucción de las rocas situadas por debajo de la barrena es compleja debido a los altos índices de deformación y las elevadas temperaturas, los múltiples mecanismos de deformación y las interacciones entre la barrena, el fluido de perforación y la formación. Diversos enfoques especiales han sido adoptados para comprender y mejorar el rendimiento de las barrenas, y desde la década de 1960 se utilizan métodos de interpretación, tales como el de la energía específica mecánica; es decir, la energía utilizada para remover una unidad de

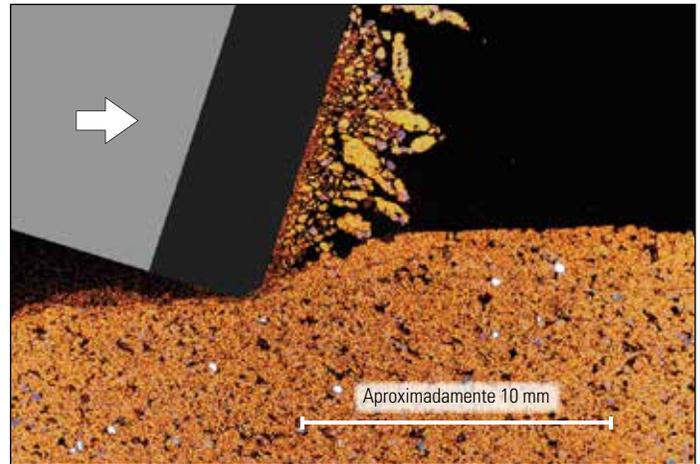


Figura 1. Corte de la roca. La acción de un cortador de PDC que ara la arenisca (anaranjado) se muestra en una sección transversal de la cual se generó una imagen utilizando el escaneo microCT. La localización y la dirección de movimiento del carburo de tungsteno (gris) y el cortador de diamante (negro) se muestran en forma esquemática. La sección exhibe la deformación —trituración, desagregación y fisuración por fragilidad— inducida por el cortador.

volumen de roca, con el fin de relacionar el rendimiento de la perforación con la resistencia de las rocas. Los avances registrados recientemente en los métodos de investigación relacionados con la geomecánica están comenzando a revelar con mayor detalle los factores, tales como el equilibrio entre la trituración, la desagregación y la fisuración por fragilidad o astillado, que controlan las cargas ejercidas sobre el cortador, su comportamiento en términos de desgaste y la naturaleza de los detritos rocosos (Figura 1).

La geomecánica también desempeña un rol importante en la comprensión de la estabilidad y la integridad del pozo durante la perforación. La presencia del pozo y la presión del fluido de perforación inducen cambios en el estado de los esfuerzos o en la roca. Como resultado, la roca que rodea el pozo puede fallar si los esfuerzos redistribuidos superan la resistencia de la roca. La fisuración por tracción se produce si la presión del lodo se vuelve demasiado alta y genera tensión en la pared del pozo. Las ovalizaciones por ruptura de la pared del pozo, que ocurren si la presión del lodo se vuelve muy baja, son regiones de ensanchamiento en los lados opuestos de un pozo, en las que se ha producido fisuración por cizalladura y la roca fracturada ha sido removida con la barrena, los estabilizadores o el flujo de lodo. Estas fallas pueden producir problemas de atascamiento de la tubería, pérdida de circulación y otros problemas de perforación, pero también pueden constituir una fuente de información valiosa acerca de las magnitudes y las orientaciones de los esfuerzos.

Traducción del artículo publicado en *Dilfield Review* 28, no. 1 (Enero de 2016).

Copyright © 2016 Schlumberger.

Mediante el cómputo de los cambios de esfuerzos producidos alrededor de un pozo planificado y su comparación con la resistencia de la roca, los ingenieros pueden generar un programa de densidad del lodo para el pozo. Normalmente, la densidad del lodo debe ser suficientemente alta como para suprimir la falla por cizalladura y el influjo de fluidos y suficientemente baja como para evitar la falla por tracción y la pérdida de circulación. Si bien existen técnicas matemáticas establecidas para calcular los criterios de fallas y esfuerzos, que se aplican en forma rutinaria, las vinculaciones entre la falla de la roca y los problemas de perforación no están tan bien establecidas. Por otra parte, algunos otros modos de falla, tales como la falla del plano de estratificación, aún no pueden predecirse de manera confiable (Figura 2). En consecuencia, para el control efectivo de la estabilidad del pozo, especialmente a lo largo de trayectorias desafiantes, se necesita el monitoreo en tiempo real de las condiciones del pozo y la predicción, previa a la perforación, del programa de presión de lodo requerido.

Un desafío para el modelado y las predicciones geomecánicas es la disponibilidad de datos de entrada, principalmente la resistencia de la roca y los esfuerzos locales. La resistencia de la roca es fácil de medir en muestras de núcleos, en el laboratorio, pero el proceso requiere mucho tiempo y es costoso, y los resultados generalmente sirven para los pozos futuros pero no para el pozo en el que se trabaja en ese momento. En consecuencia, se invierte un esfuerzo considerable en la derivación de los valores de resistencia de las rocas a partir de datos LWD, datos sísmicos y datos adquiridos con herramientas operadas con cable. La menor precisión se compensa con una cobertura espacial a lo largo del pozo mayor que la cobertura disponible con los datos de núcleos.

Estos datos se interpolan o se extrapolan para cubrir las secciones de interés de los pozos nuevos o se utilizan para mejorar las predicciones para el pozo en el que se trabaja en ese momento. Los mismos datos pueden utilizarse además en los modelos geológicos de la historia de sepultamiento para construir perfiles verticales de los esfuerzos locales, que luego se comparan y se calibran con las mediciones de esfuerzos discretos de un pozo. Más recientemente, las herramientas sísmicas de avanzada han permitido la estimación de la resistencia de la roca y de algunos componentes de los esfuerzos locales como datos de entrada para los modelos geomecánicos.

Los eventos tales como la sismicidad inducida, registrada en la década de 1970 en el campo Rangely, de Colorado, EUA, y la compactación y posterior subsidencia acaecidos en la década de 1980 en el campo Ekofisk del Mar del Norte, en el área marina de Noruega, ayudaron a los ingenieros a percatarse del rol desempeñado por la geomecánica a escala de yacimiento. Ahora, el examen de los cambios geomecánicos a esta escala se ha vuelto rutinario gracias al desarrollo de los programas de análisis por el método de elementos finitos, que han sido optimizados para las estructuras geológicas y el comportamiento mecánico de las rocas (Figura 3). Poblar estos modelos con los datos de rocas puede constituir un desafío, pero dado que la cuadrícula com-

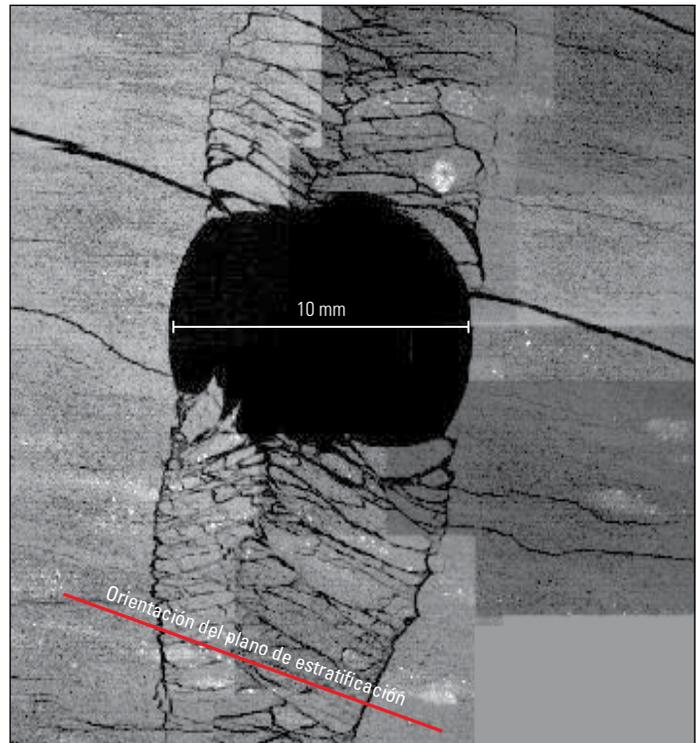


Figura 2. Falla impredecible del pozo. Un modelo de laboratorio muestra la falla del plano de estratificación en un pozo perforado en sentido paralelo a la estratificación en una lutita fisible. El esfuerzo aplicado en la muestra es el mismo en todas las direcciones, a pesar de la direccionalidad de la falla. Esta geometría es similar a la geometría de las fallas observadas en los techos de las minas en las rocas fisibles, si bien en las minas la fuerza motriz es la fuerza de gravedad en lugar de los esfuerzos locales. La presión de pozo necesaria para prevenir este tipo de falla de la roca no puede ser estimada actualmente de manera confiable.

putacional es gruesa, dicha acción se puede efectuar utilizando datos sísmicos. Una vez poblado el modelo, puede estimarse la respuesta mecánica del yacimiento y de los estratos de sobrecarga para una diversidad de operaciones, incluidas las de producción, inyección y fracturamiento. El modelo puede ser calibrado o refinado con levantamientos sísmicos adquiridos con la técnica de repetición o técnica de lapsos de tiempo y con el agregado de datos a medida que se perforan pozos nuevos. Los operadores pueden utilizar este tipo de información para estimar la presión de inyección utilizada en las estimulaciones por fracturamiento hidráulico con el riesgo de generar una brecha en un sello del yacimiento o pueden predecir el gradiente de fractura, después de un periodo de producción, permitiendo la perforación segura y efectiva de pozos de relleno.

Los tratamientos de estimulación por fracturamiento hidráulico, una de las primeras aplicaciones con la utilización de métodos geomecánicos en el campo petrolero, sigue siendo un área de desarrollo importante. La explotación de los yacimientos de lutitas ha producido un incremento del interés en la anisotropía mecánica de las rocas, que no fue ampliamente apreciada hasta aproximadamente el año 2000. A fin de formular predicciones mejoradas de la geometría y el crecimiento de las fracturas, los modelos de esfuerzos y resistencia y las interpretaciones de las mediciones sísmicas y de resistividad deben ser modificados para dar cuenta de la anisotropía. Y los avances introducidos en las herramientas de adquisición de registros sísmicos y en las técnicas de interpretación lo han hecho posible.

Una característica común a todas estas áreas es el modelo mecánico del subsuelo (MEM), que constituye una recolección de los datos necesarios para efectuar predicciones cuantitativas y cualitativas del ambiente geomecánico del subsuelo. Estos datos incluyen los esfuerzos presentes en el subsuelo, la presión de poro, las propiedades elásticas, la resistencia y la estructura de las rocas, y datos no numéricos, tales como la presencia de un intenso fracturamiento natural. Un modelo MEM puede ser simple o complejo, grande o pequeño, y 1D, 2D, 3D o 4D —las tres dimensiones espaciales más el tiempo— según la complejidad del campo y los fenómenos de interés. El rasgo característico más importante de un modelo MEM es que sus datos se relacionan con las rocas que están siendo perforadas, fracturadas o afectadas de otro modo por las operaciones de campo, más que por un pozo en particular o un conjunto de pozos. Una segunda característica es que ha sido diseñado para ser actualizado a medida que se dispone de nuevos datos provenientes de las operaciones en curso. Las fuentes de datos para un modelo MEM comprenden cualquier fuente que proporcione información sobre el comportamiento mecánico y el comportamiento de los esfuerzos e incluyen registros LWD y registros adquiridos con herramientas operadas con cable, núcleos, desmoronamientos y recortes, la geología regional y todo tipo de sismicidad.

Los desafíos actuales para la geomecánica son, entre otros, el mejoramiento de los siguientes elementos:

- las fuentes de datos para la predicción de las propiedades de las rocas y los esfuerzos locales
- la utilización de la información anisotrópica para la predicción de la deformación durante la explotación de los recursos no convencionales
- el tratamiento de los desplazamientos de las fallas y las fracturas en los modelos numéricos.

Además de ayudar a mejorar la aplicación de la geomecánica en los diversos sectores de la industria, los ingenieros deben comprender mejor las relaciones existentes entre la falla de la roca y las fallas operacionales para los problemas de inestabilidad de los pozos y producción de arena.

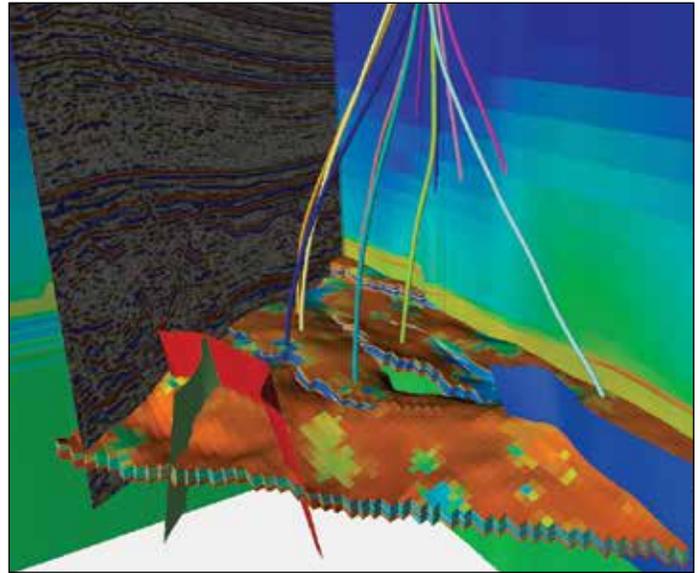


Figura 3. Simulación acoplada. Se muestra un modelo geomecánico de un yacimiento (fondo) con el conjunto de datos sísmicos (izquierda) utilizado para construirlo. Los datos para la refinación del modelo fueron adquiridos en diversos pozos (líneas de colores), que se utilizaron para modelar los cambios producidos con el tiempo como resultado de eventos tales como el agotamiento. Se muestran varias fallas (planos de colores) y el tope de la unidad prospectiva de interés (superficie marrón). Los bordes son los límites del modelo o discontinuidades del yacimiento causadas por las fallas. Los modelos geomecánicos pueden combinarse con los modelos de simulación de yacimientos para predecir cómo afectará la producción el rendimiento del yacimiento, la integridad de los pozos o la integridad de la roca de cubierta.

La geomecánica en el campo petrolero ha recorrido un largo camino desde sus inicios como un accesorio de la adquisición de registros sísmicos. Hoy es reconocida como una parte importante de casi todos los aspectos de la extracción de petróleo y ha sido crucial para el mejoramiento de la eficiencia y la reducción de los costos. La aplicación de la geomecánica en nuevos tipos de yacimientos y en yacimientos maduros, y su integración en los flujos de trabajo de los operadores, junto con la introducción de nuevas mediciones y técnicas, garantizará la continuidad de su rol en la industria. A partir de ahora, su impacto operacional será cada vez mayor. La aplicación de la geomecánica para la revitalización de los campos maduros es imperativa e incidirá en actividades tales como la perforación de pozos de relleno, la mitigación de la compactación y el refracturamiento.