



Estudio integrado para **solucionar** **la estabilidad** durante la perforación y terminación en Cañadón Amarillo (Mendoza)

Por *Raúl Alejandro Varela, Gabriel Berkovi y Francisco de Borja Latorre Lafont*, YPF S.A.

En este trabajo se describen los problemas de abandono de pozos por aprisionamientos y de cementación durante la terminación de pozos, lo cual motivó un análisis integrado de los eventos de perforación, terminación y mecánica de rocas para comprender su comportamiento durante la perforación.

Este trabajo fue seleccionado en el 2° Congreso Latinoamericano de Perforación, Terminación, Reparación y Servicio de Pozos, 2015.



El área Cañadón Amarillo se encuentra al norte de la Cuenca Neuquina, provincia de Mendoza. En los últimos años esta zona presentó un aumento en la actividad de perforación, que trajo aparejado problemas de abandono de pozos por aprisionamientos y problemas de cementación en las formaciones de interés durante la terminación.

Estos problemas motivaron un análisis integrado de los eventos de perforación, terminación y mecánica de rocas para comprender el comportamiento durante la perforación y poder generar las recomendaciones a fin de mejorar las prácticas de perforación y terminación.

En Cañadón Amarillo hay pozos con diferentes objetivos geológicos que integran el Grupo Cuyo, es decir, una unidad compleja de carbonatos, arcillas y sedimentos evaporíticos. Este Grupo está compuesto por las formaciones Bardas Blancas, Los Molles y Lajas. Otras formaciones productoras son Barda Negra, compuesta por carbonato naturalmente fracturado; finalmente la formación más productiva del área es Tordillo, compuesta por arena con diferentes características sedimentarias.

En este artículo se presentan el flujo de trabajo, los resultados y los beneficios del proyecto llevado a cabo para el entendimiento y la resolución de los problemas de perforación y terminación.

La primera fase del proyecto consistió en dos procesos paralelos, por un lado, la recopilación de información realizada por ingenieros de perforación donde se analizaron los eventos de perforación y terminación; y por el otro, la compilación de registros de pozos y la confección de modelos geomecánicos unidimensionales (1DGM) para cada pozo estudiado. La calibración final de estos modelos se basó en los eventos de perforación y peso de lodo utilizado; integrando la información de cada pozo se obtuvo el modelo más representativo para el área Cañadón Amarillo.

La segunda fase del proyecto fue la recomendación y la validación del modelo. La recomendación se basó en la “ventana” de lodo de perforación y posición de las cañerías de terminación. La validación del modelo consistió en verificar que la densidad del lodo de perforación utilizada se encontraba en el rango de densidad propuesto y que la terminación del pozo mejoraba respecto de la normalmente utilizada. A su vez, se sugirió la adquisición de registros completos para la actualización de los modelos, la caracterización de reservorio y la optimización de terminación.

Una vez validado el modelo de perforación se aplicó al desarrollo del campo, lo cual redundó en grandes ahorros en los costos de perforación y terminación.

Aprisionamientos

El incremento de la actividad de perforación en el área Cañadón Amarillo (Figura 1) debido a la demanda de energía en el nivel nacional causó problemas operativos, como aprisionamientos, pérdidas de fluidos de perforación y resistencias en los pozos y en algunos de ellos se llegó a su abandono.

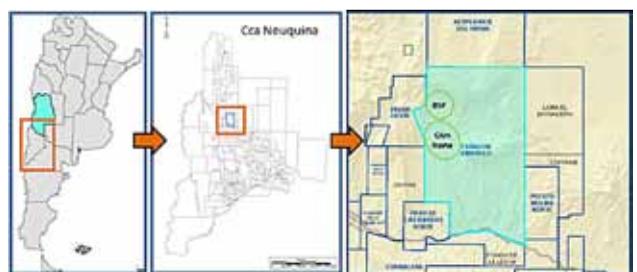


Figura 1. Ubicación geográfica del proyecto.

Debido a la frecuencia en la pérdida de pozos se propuso la realización de un análisis de geomecánica y eventos de perforación, el cual en principio ayudaría a comprender los motivos de las pérdidas de tiempo operativas (NPT) en los pozos y, en consecuencia, la pérdida de algunos pozos.



Figura 2. Símbolos de eventos/riesgos para el modelo geomecánico.

Además una problemática planteada al grupo de estudios fue la terminación, ya que la calidad de la cementación de las formaciones Bardas Blancas y Lajas es baja, y se debió intervenir para repararla, lo cual afectó la productividad.

Para ello se presenta la evaluación realizada sobre la calidad de cementación y la forma en que se abordó la problemática y se recomendó y aplicó la misma.

La última y no menos importante de las problemáticas que se presentaron en el desarrollo de este proyecto fue la selección del tipo de trépanos para los pozos de Cañadón Amarillo, lo cual se presenta en un último apartado junto con la evaluación realizada y los resultados obtenidos.

Para el entendimiento de la problemática se decidió llevar a cabo un estudio en fases. Estas fases consistieron en

la recolección de información, la categorización de la información, la compilación, el relevamiento de los eventos de perforación, la terminación de pozos y los cálculos geomecánicos. Los parámetros geomecánicos, representativos de lo ocurrido en cada pozo perforado sobre la base de un único modelo geomecánico, se calibraron según la información relevada por perforación. Y la propuesta y posterior actualización de los modelos para la confirmación o mejora del modelo pre perforación.

La fase 1 consistió en el análisis de los eventos de perforación y terminación; la compilación de eventos de perforación relevantes para geomecánica se basa en riesgos asociados a la pérdida de tiempo (NPT) por la interacción con la roca; por ejemplo, pérdidas parciales o totales, apriamientos de la sarta, influjos de gas en la columna de lodo y derrumbe de la formación, entre otros (Figura 2).

Para la terminación se releva el estado mecánico de cada pozo de correlación y se evalúa la profundidad de asentamiento de las cañerías, esto permite evaluar históricamente el análisis realizado para la toma de decisión de la posición de cada zapato y los problemas asociados a la perforación posterior.

Los modelos geomecánicos unidimensionales (1DGM) de los pozos de correlación se basan en cálculos de los parámetros elásticos, la resistencia de roca y los esfuerzos a partir de registros continuos de pozos. Los principales registros utilizados son Sónico Compresional (DT), Sónico de Cizalla (DTS) y el registro de densidad de roca total (RHOB), así como la interpretación petrofísica, rayos gamma (GR), resistividad (RES), caliper (CAL) e imagen de pozo en caso de existir.

El flujo de trabajo (Figura 3) se compone de tres pasos principales, donde se analizan los pozos de correlación con sus modelos correspondientes, y se recomienda la ventana de lodo operativa y segura para perforación, así como las recomendaciones de maniobras para las operaciones donde se detectaron la mayor cantidad de riesgos.



Figura 3. Flujo de trabajo modelo geomecánico para la estabilidad de perforación.

Luego se realiza la calibración del modelo basado en los perfiles originales del pozo objetivo, esto permite asegurar que el modelo geomecánico preperforación se ajusta al modelo con perfiles reales y con los eventos operativos del pozo objetivo.

Finalmente se realiza la calibración del modelo geomecánico (1DGM) con los ensayos de presión del pozo, cartas de fractura y ensayos geomecánicos de laboratorio en caso de existir. Todo este modelo se calibra indirectamente con el análisis de derrumbes del pozo y el estado del calíper asociados a los esfuerzos cercanos al pozo.

La fase 2 consta de la realización de la propuesta de perforación y terminación. Del análisis realizado en la fase 1 se obtiene una ventana de lodo operativa preperforación, esta predicción presenta un grado de incertidumbre que depende del grado de información de los pozos de correlación.

La ventana de lodo propuesta consta de las curvas en gramos/litros de presión poral, la falla por cizalla, el mínimo esfuerzo principal y la presión de rotura de la formación a pozo abierto. También se adjuntan las densidades de lodo mínima y máxima recomendadas para la perforación segura y estable del pozo.

Una vez perforado el pozo, se procede al perfilaje con las herramientas recomendadas para la posterior actualización de la ventana de lodo y recomendación de terminación.

Desarrollo

Fase 1

Eventos de perforación y terminación

Se relevaron los eventos de perforación y la terminación correspondiente de seis pozos de correlación representativos del pozo objetivo.

Los eventos de perforación de mayor presencia y relevancia son las tracciones y resistencias, y en segundo lugar, las pérdidas parciales y algunas totales.

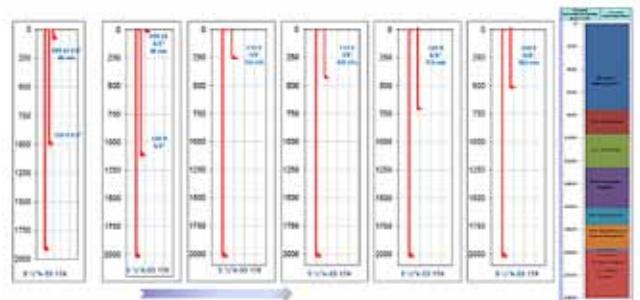


Figura 4. Análisis de posición de cañerías en los pozos analizados.

El estado mecánico de los pozos de correlación (Figura 4) demuestra la variación de profundidades a la hora de asentar las cañerías de aislamiento. Esto se debe a los diferentes objetivos de perforación.

Modelos geomecánicos unidimensionales 1DGM

Se realizó el modelo para cada uno de los pozos de correlación. El modelo geomecánico consiste en los cálculos de los siguientes parámetros:

- Propiedades elásticas
 - Módulo de Young
 - Relación de Poisson
 - Módulo de Cizalla
 - Módulo de compresibilidad
- Resistencia de roca
 - Resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS)
 - Resistencia a la rotura por tensión
 - Ángulo de fricción interna
- Presión poral
 - Presión poral normal
 - Sobrepresión en arcillas
 - Presión en zonas productivas
- Esfuerzos principales

- Dirección de esfuerzos horizontales
- Cuantificación de sobrecarga
- Cuantificación de esfuerzos horizontales
- Análisis de falla
 - Presión de falla por cizalla
 - Presión de rotura

Para la correcta caracterización de los parámetros descriptos, se realizó la mecánica estratigráfica de los pozos, luego se calcularon las propiedades elásticas dinámicas obtenidas con los perfiles de pozo, sísmico compresional y cizalla, y registro de densidad. Para la inversión del dato dinámico a estático, se utilizó la petrofísica de cada pozo. Para los valores de resistencia de roca, se usaron correlaciones de la literatura según el tipo de roca analizada, utilizando la mecánica estratigráfica, en este caso, arena, arcilla y carbonato. Cabe aclarar que al momento del estudio no existen ensayos de geomecánica de laboratorio para la calibración de los parámetros elásticos y de resistencia de roca.

La sobrecarga, es decir, el peso de las formaciones con respecto a la profundidad, se calculó integrando el perfil de densidad total de formación. Los pozos de correlación tienen registros de densidad de formación a partir de los 500 m de profundidad en promedio, para el resto del tramo sin registros se realizó una curva de densidad sintética extrapolada a la superficie.

La densidad extrapolada se expresa con la siguiente ecuación:

$$\rho_b = \rho_{GF} + A_o (TVD - AG)^\alpha$$

Donde

- ρ_b Densidad de la formación [g/cm^3]
- ρ_{GF} Densidad en la superficie [g/cm^3]
- TVD TVD [m]
- AG Capa aire (Air Gap)
- A_o y α Parámetros de ajuste

Una vez que se tienen los registros de densidad completos para cada pozo, se obtiene la sobrecarga a partir de la ecuación integral de la densidad con respecto a la profundidad, con la siguiente ecuación:

$$S_v = \int_{Z=1}^{Z=n} \rho dz$$

La estimación de los valores de presión poral se realizó usando los registros de sísmico compresional, ajustándola con los valores de densidad de lodo y eventos de perforación como gasificaciones e influjos.

Se utilizó una presión poral normal de 0,433 psi/ft, y la ecuación de Eaton para las arcillas. Se compuso una presión poral para cada uno de los pozos, utilizando los mismos parámetros de Eaton y ajustes, teniendo un modelo de presión poral consistente para todos los pozos analizados.

Para el cálculo de esfuerzos se utilizaron las ecuaciones de poro elasticidad isotrópica:

$$\sigma_h = \alpha P_p + \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1 - \nu^2} \epsilon_h + \frac{E \cdot \nu}{1 - \nu^2} \epsilon_H$$

$$\sigma_H = \alpha P_p + \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1 - \nu^2} \epsilon_H + \frac{E \cdot \nu}{1 - \nu^2} \epsilon_h$$

Finalmente, se realizó el análisis de falla por pozo, que permitió la calibración indirecta del modelo geomecánico para Cañadón Amarillo.

El análisis de falla se utilizó para terminar el ajuste de los parámetros calculados previamente, que representan de la mejor manera los eventos ocurridos en el pozo durante las etapas de perforación y de completación.

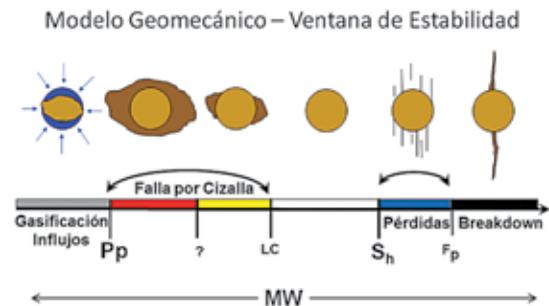


Figura 5. Definición ventana de estabilidad.

En la figura 5 se muestran los estados de estabilidad y de seguridad de un pozo, la escala de lodos está representada en lodo equivalente. A continuación se describe cada tipo de evento.

Zona de influjos: área gris. Un peso de lodo por debajo de los límites de esta curva permitirá la entrada de gas o hidrocarburo al pozo, de esta forma se generan grandes eventos de influjos de gas, debido a que la presión poral presenta niveles superiores al peso de densidad de lodo.

Zona de falla por Cizalla: áreas amarilla y roja. Depende del nivel de daño o de ovalización. El límite rojo corresponde al comienzo del colapso de la roca que está relacionado con el mínimo peso de lodo que previene los eventos de falla por cizalla.

Zona estable: área blanca es la zona estable y segura de perforación. Esta zona evita todo tipo de riesgos, tanto la presión poral y las fallas por cizallas, así como las pérdidas parciales y totales de lodo.

Zona de pérdidas (fracturas naturales): área azul. Representa el menor límite donde las fracturas naturales pre-existentes pueden ser abiertas por la presión ejercida por la columna de lodo permitiendo al fluido de perforación fluir en la formación (pérdidas parciales). Esta zona es el valor del gradiente de fractura.

Zona de fractura (fracturas inducidas): área negra. Esta zona se alcanza cuando el peso de lodo supera la resistencia a la tensión de la roca permitiendo la formación de fracturas inducidas que se propagarán dentro de la formación con la posibilidad de generar pérdidas totales.

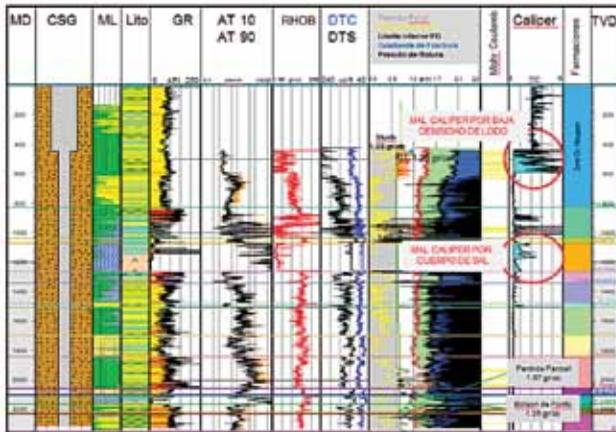


Figura 6. Análisis geomecánico y ventana de lodo - Pozo #1.

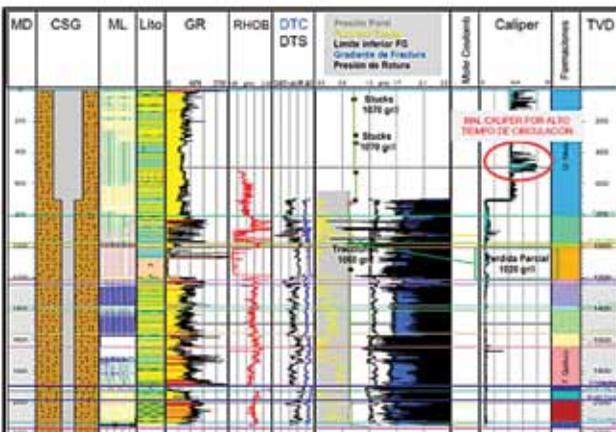


Figura 7. Análisis geomecánico y ventana de lodo - Pozo #2.

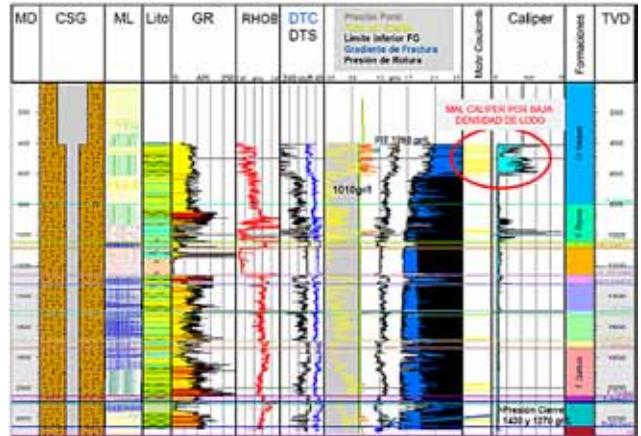


Figura 8. Análisis geomecánico y ventana de lodo - Pozo #3.

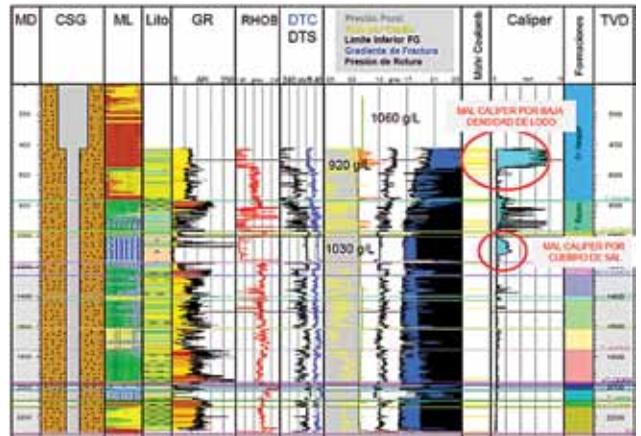


Figura 9. Análisis geomecánico y ventana de lodo - Pozo #4.

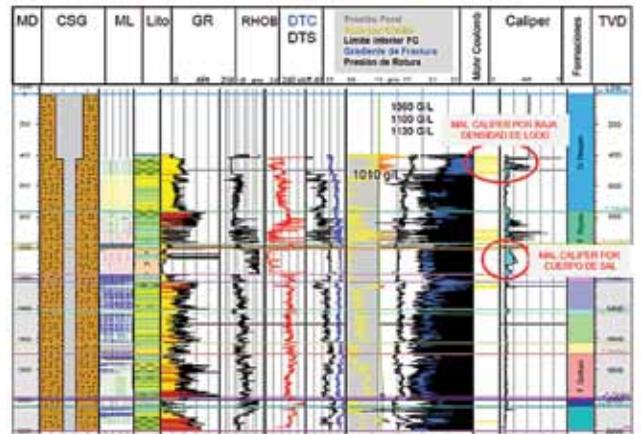


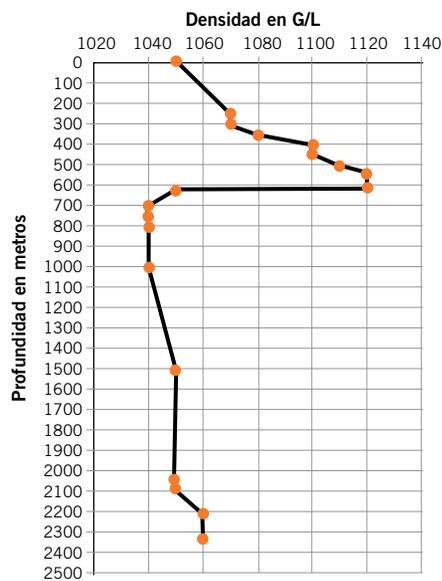
Figura 10. Análisis geomecánico y ventana de lodo - Pozo #5.

El estudio de geomecánica completo de cada pozo con su análisis de falla correspondiente se presenta en las figuras 6, 7, 8, 9 y 10.

Fase 2

Propuesta de perforación y terminación

La propuesta de perforación para el pozo objetivo (Figura 11), presenta la densidad de lodo recomendada y planificada para la perforación del pozo objetivo.



Plan vs. real

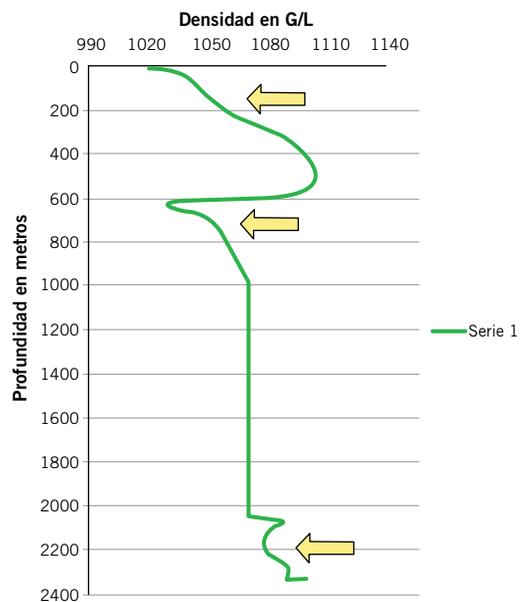


Figura 11. Densidad Planeada versus Densidad Real.

La ventana de lodo propuesta consta de las curvas en gramos/litros de presión poral, falla por cizalla, mínimo esfuerzo principal y presión de rotura de la formación a pozo abierto. También a la misma se adjuntan las densidades de lodo mínima y máxima recomendada para la perforación segura y estable del pozo.

La planificación de la perforación se sustentó en el modelo desarrollado y consistió de los siguientes pasos:

1. Perforar con trépano PDC 12 1/4" y un estabilizador (1/16" menor) un portamecha de distancia a trépano hasta los 400 m.
2. Maniobra de calibre en los 200 m.
3. Hasta los 300 m lodo bentonítico, luego lodo inhibidor.
4. Maniobra de calibre luego de los 400 m para retirar estabilizador y luego perforar liso hasta los 610 m.
5. Control de muestras de *cutting* cada 30 m (fotos con escala, figura 12 y figura 13).
6. Aplicación de curva de densidades.
7. Densidad (550-600 gpm).
8. Colocación de direccional luego de los 1200 m si hay tendencia a desviación.

Tramo guía de muestras de *cuttings*



Figura 12. Muestras de derrumbes y recortes de pozos de correlación para el análisis morfológico de derrumbes de formación.

En cuanto al lodo para el tramo guía se programó en dos tramos:

- De superficie a 300 m lodo bentonítico con adición de hidróxido de calcio (para minimizar la incorporación de arcillas reactivas, lubricantes y tensioactivos),

Tramo guía de muestras de *cuttings*



Figura 13. Muestras de derrumbes y recortes del pozo objetivo para el análisis morfológico de derrumbes de formación en tiempo real.

comenzando con densidad de 1040 g/l y terminando con 1080 g/l hasta los 300 m.

- El segundo tramo, de 300 m a 610 m, se realiza un incremento de la densidad desde 1080 g/l hasta 1120 g/l adicionando a la base ya utilizada Marpac Gold HV, Biodrill y Marcat.

El esquema de pozo final se presenta en la figura 14 con una guía 9 5/8" a 610 m de profundidad vertical y un *casing* de 5 1/2" a profundidad final de 2300 m aproximadamente.

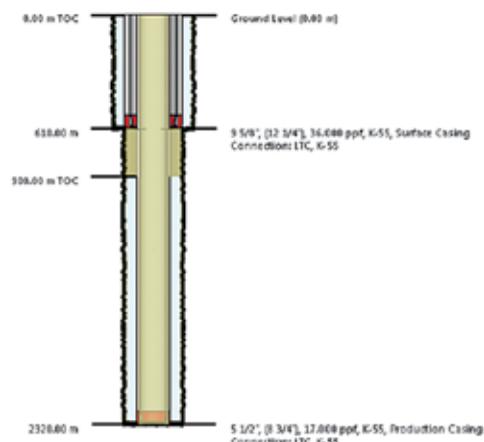


Figura 14. Estado mecánico programa en base a geomecánica.

Diseño de lechadas de cementación en pozos profundos

Un problema frecuente en el yacimiento Cañadón Amarillo fue la calidad en la terminación, ya que la cementación en los pozos más profundos no presentaba buena calidad. En el siguiente apartado se detallan los cambios realizados en las lechadas de cementación, los cuales contribuyeron a mejorar los resultados de los perfiles para corroborar la integridad del pozo al momento de ser estimulados en la etapa de terminación. Estos cambios disminuyeron las reparaciones antes de ser fracturados además de reducir costos y aumentar la producción de los pozos de Cañadón Amarillo.

A continuación se detallan los cambios y el análisis para la obtención de mejores resultados en las cementaciones de pozos de Cañadón Amarillo profundos (2300 metros MD). Estos pozos deben ser cementados en dos etapas debido al bajo gradiente de fractura de la zona de interés.

Los problemas observados en diversos pozos fueron los siguientes:

Pozo #1. La problemática fue la zona productiva, la cual tiene bajos gradientes de fractura. El pozo se entubó con casing de 7" y al momento de cementar, el espacio reducido entre la pared del pozo 8 3/4" y casing, generó presiones que excedieron las de fractura de las formaciones de interés. Esto llevó a que en próximos pozos se utilizara CSG de producción de Ø 5,5"-17 lbs/ft ayudando a reducir la presión dinámica ejercida durante la cementación.

Pozo #2. El proceso de cementación del tramo aislación ocurrió bajo las condiciones de un lodo degradado. La compañía de cementación aduce en ese momento contaminación de CO₂ en las zonas de formaciones con calizas principalmente de Mulichinco y Barda Negra. En comparación con el pozo #1, hubo circulación en todo momento y no se registraron pérdidas por permeabilidad durante la perforación. Se detectaron zonas sin cemento (Figura 15).

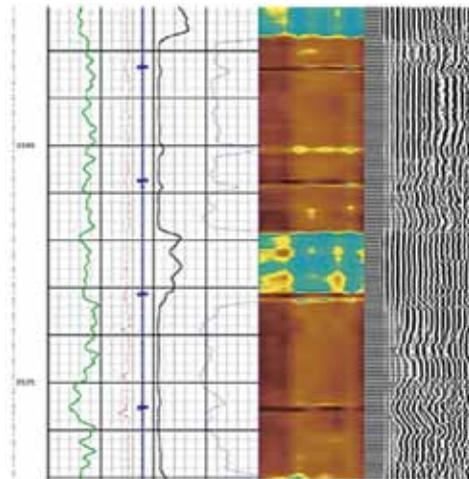


Figura 15. Mala cementación del Pozo #2.

Pozo #3. Para la cementación de la primera etapa se cambió la densidad de la lechada desde 1307 g/l a 1517 g/l. Estos cambios de densidades se concluyeron al ver las presiones de las operaciones de fractura de la formación Barda Negra la cual no coincidía con el gradiente establecido en la prognosis.

Pozo #4. Se utilizan dos lechadas de distinta densidad en la primera etapa. Además, se adiciona Rafaelita, un ma-

terial usado para controlar pérdidas de circulación durante las cementaciones en la industria petrolera. Está compuesto de pequeños granos (malla 8-60) de un hidrocarburo negro, que se obtiene de la naturaleza, conocido como Rafaelita; su incorporación produce una mezcla de menor densidad sin el agregado de agua adicional, debido a que tiene un peso específico muy cercano al valor del agua.

Otro controlador de pérdidas utilizado es el denominado técnicamente *Crassostrea Gigas* (Figura 16) que consiste en conchillas de origen marino de distinta granulometría con el objetivo de taponar las fisuras de las formaciones carbonáticas.

Los volúmenes que se indican surgen del cálculo para lograr equalizar presiones, asumiendo un diámetro de pozo de 9 in y densidades homogéneas tanto dentro como fuera del sondeo, teniendo en cuenta BHA (176 m), HW (55 m) y sondeo (188 m). Esto debe ajustarse según la densidad que alcanzará el colchón preparado con 20 kg/m³ de Marcross que se ubicará en la región anular. El BHA no debe tener motor de fondo, *prodrift* ni estabilizador. Hasta el momento durante la circulación en las maniobras de entubado de pozo nunca ha retornado este producto en zarandas.

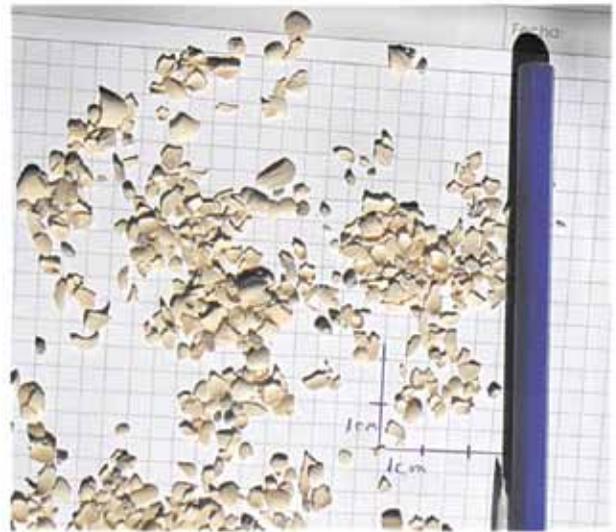


Figura 16. Muestras de *Crassostrea Gigas* aplicado para la mejora de cementación.

Conclusiones

Geomecánica:

- La colocación de la cañería guía a una profundidad tal de manera de aislar el mayor porcentaje de lutitas desmoronables del Grupo Neuquén tuvo un efecto positivo y decisivo en la estabilidad de perforación base agua.
- El análisis de posición de cañerías y de pesos de lodos utilizados fue fundamental para las decisiones a tomar en los diseños pre perforación.
- La toma de información en tiempo real como fotografías de recortes y derrumbes cada una cantidad de metros definida por programa optimiza la mitigación del aprisionamiento por derrumbe.
- Resulta de vital importancia la comunicación entre la cabina de control geológico, ingeniero de lodos, equipo perforador, *company man* e Ingeniería.

Cementación:

- Densidad de la lechada de primera Etapa: 1650-1700 g/l.
- TOC: en la base de la Formación Mulichinco.
- 15% de Rafaelita.
- Utilización de *Crassostrea Gigas*.

Trépanos:

- No hay formaciones duras, utilización de cortadores de 19 mm en trépanos (figuras 17 y 18).

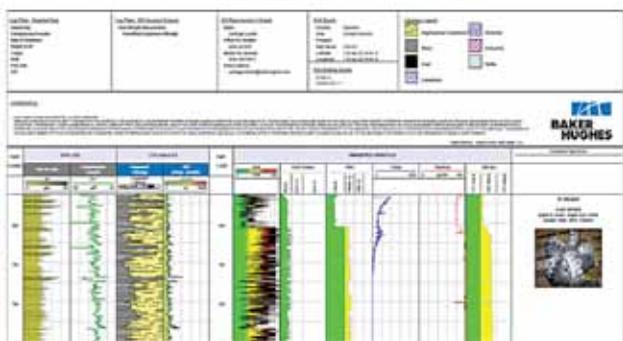
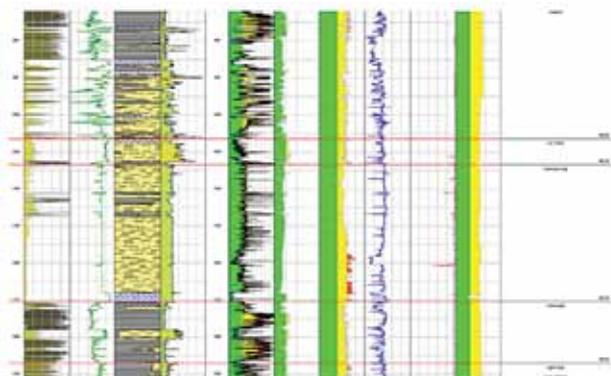


Figura 17. Análisis de compresibilidad acústica por formación en donde se muestra que las formaciones no son duras.

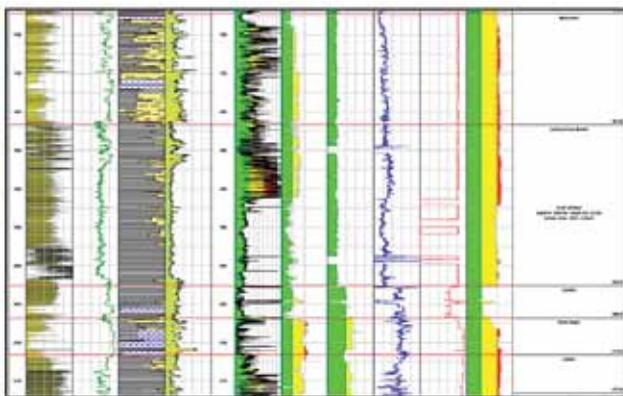


Figura 18. Análisis de compresibilidad acústica por formación en donde se muestra que las formaciones no son duras.

- Seguimientos continuos de parámetros de perforación, WOB, ROP, Caudal, RPM.
- Sin restricción de peso en trépano. No se registraron inclinaciones mayores a 6°.
- El incremento de ángulo se da en las Halitas principalmente de la Formación Huitrin – Troncoso superior (1000-1200 m).

Otras conclusiones:

- Ahorros de costos de estudios geomecánicos tercerizados.

- Integración del grupo de estudios y perforación generando conocimientos adquiridos para la compañía y la consolidación de la información.
- Mejora en los tiempos de perforación y terminación (Figura 19).

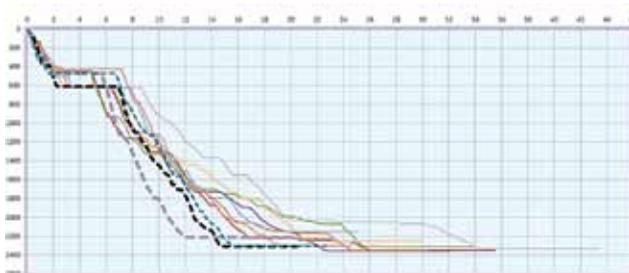


Figura 19. Curva de avance de pozos. En línea punteada los perforados bajo las premisas establecidas.

- Reducción de los costos de perforación y terminación (Figura 20).

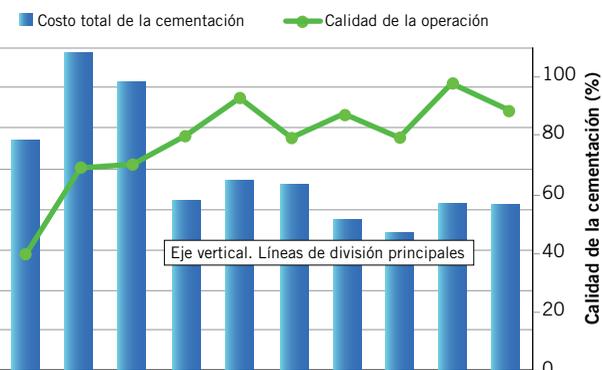


Figura 20. Comparación de costos de cementación y calidad de operación.

- Mejora en resultados de cementación (Figura 21) en los niveles productores usando *crassostrea gigas*.

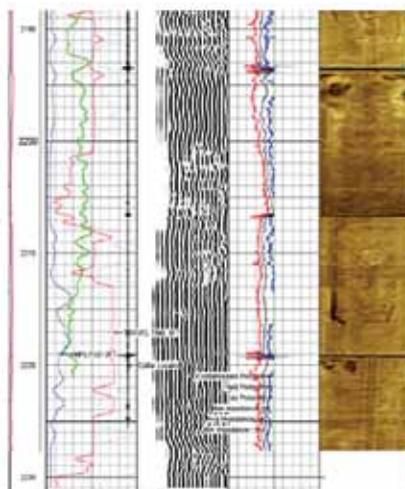


Figura 21. Mejora en la cementación de los pozos en la zona de interés.

Agradecimientos

Los autores agradecen a YPF S.A. por autorizar la publicación parcial del trabajo realizado para el proyecto Cañadón Amarillo, así como las lecciones aprendidas y aplicadas con éxito al proyecto.