

ELIMINACIÓN DE PRESIÓN ANULAR SOSTENIDA (SAP) MEDIANTE EMPAQUETADOR CON ANCLA DE METAL EXPANDIBLE COMO BARRERA MECÁNICA EN YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES: APLICACIÓN EN POZOS DE VACA MUERTA.

Jorge Torres - jorge.a.torres@ypf.com, Cristian Bahl - cristian.bahl@ypf.com
YPF S.A.

José Angel López - jlopez@welltec.com, Marcelo Batocchio - mbatocchio@welltec.com,
Yosafat Esquitin – yesqutiin@welltec.com
Welltec

Sinopsis

El desarrollo de la formación no convencional Vaca Muerta exige programas de fracturamiento hidráulico de complejidad creciente. Desde el inicio de la explotación en 2012, el número de etapas de fractura por pozo ha aumentado significativamente, alcanzando un promedio de 60 etapas. Para generar los canales de flujo e iniciar las fracturas, se requieren presiones de superficie de hasta 11,500 psi. La longitud promedio de las secciones horizontales, >3,500 metros, también añade complejidad a las operaciones de perforación y terminación.

En este contexto, se ha ejecutado un protocolo de validación tecnológica para utilizar una solución a largo plazo que elimine la necesidad de cemento como barrera contra la Presión Anular Sostenida (SAP) en pozos de Vaca Muerta. El SAP, un fenómeno que afecta aproximadamente al 35% de los pozos de petróleo y gas a nivel mundial (Farag, Mahmoud, 2015), ocurre cuando la barrera anular de cemento se deteriora debido a las tensiones inducidas por los ciclos de compresión y expansión durante las operaciones de fractura. Esto puede resultar en contaminación de acuíferos, emisiones de gases de efecto invernadero y, en casos extremos, pérdida de control del pozo.

Durante el proyecto llevado a cabo en 12 pozos, se validó localmente el Empaquetador de Metal Expandible (MEP por sus siglas en ingles), una tecnología probada globalmente, que ha evolucionado con la incorporación de un nuevo componente: el Ancla de Metal Expandible (WEA por sus siglas en ingles). El WEA, en conjunto con el MEP, permite lograr un sello anular eficaz y resistente a las cargas axiales que un pozo experimenta como resultado de los diversos ciclos de presurización y térmicos a los que se somete.

Este documento detalla la aplicación de las tecnologías WEA y MEP, mostrando cómo elimina la necesidad de cementación para el sellado anular entre las tuberías de producción e intermedia. Se describe el proceso completo, desde la selección y calificación de la tecnología hasta la planificación, implementación y resultados obtenidos en múltiples pozos.

La implementación exitosa durante la etapa de perforación de esta tecnología representa un avance significativo en la construcción de pozos en Vaca Muerta ya que podría significar una reducción en los costos y riesgos operativos asociados con las operaciones remediales, y al reemplazar las barreras de cemento tradicionales, obtenemos una solución tecnológica rentable, más segura y con menor impacto ambiental.

Introducción

El proceso de construcción de pozo en la industria petrolera puede verse afectado por una cantidad de variables que pueden inducir altos costos de remediación para las operadoras. En este contexto, la integridad de los pozos ha generado, en los últimos veinte años, pérdidas que ascienden a miles de millones de dólares, al tiempo que ha presentado riesgos significativos para la salud, la seguridad y el medio ambiente, que van desde la contaminación de acuíferos y mares con hidrocarburos, gases de efecto invernadero, y en casos extremos catástrofes por explosiones.

Uno de los desafíos más comunes en la construcción de un pozo es la presión anular sostenida (SAP). Este fenómeno se define como la presión en la sección anular del pozo que puede medirse en superficie y que tiende a incrementarse de manera natural una vez que se ha desfogado. Este fenómeno se debe a la migración de gas de formaciones que generalmente se transmiten a través de micro anillos o canalizaciones en el cemento. Se estima que este fenómeno afecta aproximadamente al 35% de los pozos a nivel mundial (Frag, Mahmoud, 2015).

A lo largo de los años, se ha demostrado que la SAP puede ser una fuente de emisiones de metano, las cuales tienen un impacto negativo en el cambio climático, incluso superior al de las emisiones de CO₂.

Es por esta razón que el desarrollo de métodos efectivos y confiables para eliminar y controlar el SAP es fundamental para garantizar una producción de hidrocarburos segura y sostenible durante la vida útil de los pozos. A lo largo de más de 100 años de evolución en los métodos de construcción de pozos desde el primer descubrimiento de hidrocarburos, se han propuesto diversos elementos para establecer barreras efectivas que ayuden a la prevención de SAP. Entre estos métodos, el cemento se ha consolidado como la opción más convencional para crear una barrera contra la presión anular sostenida (Sociedad Histórica Americana de Petróleo y Gas en 2015).

Si bien el uso de cemento como barrera principal en la construcción de pozos es ampliamente aceptado en la industria, la realidad es que los procesos de extracción de hidrocarburos se han vuelto cada vez más desafiantes y complejos, requiriendo cementaciones complejas; de igual manera en pozos no convencionales, los múltiples ciclos de fractura tienden a someter el cemento en la sección anular a estrés, comprometiendo así la integridad del pozo y potencialmente conduciendo al fenómeno de SAP.

Las secciones laterales de mayor alcance, que pueden extenderse hasta 6,000 metros en algunos casos, junto con los reservorios depletados y los pozos cada vez más profundos, han incrementado la complejidad del proceso de construcción de pozos en comparación con los desafíos que la industria enfrentaba en décadas anteriores. En este contexto, la industria requiere métodos más confiables, efectivos y eficientes para lograr la integridad anular, sin descuidar objetivos como la seguridad y la reducción de la huella de carbono.

En los últimos años, se ha desarrollado una solución de sello anular basada en tecnología de empaque de metal expandible (MEP por sus siglas en inglés), que se presenta como un método efectivo y alternativo a la opción tradicional del cemento. Su construcción robusta, capacidad de aislamiento y simplicidad en la implementación, permiten su fácil integración en cualquier pozo.

Durante los ciclos de fractura y los cambios térmicos en el pozo, se generan cargas axiales que requieren de un sistema de anclaje para evitar movimientos del MEP, para prevenir estos movimientos, los MEP se han complementado con una ancla anular expandible (WEA por sus siglas en inglés), ofreciendo a la industria una alternativa robusta y efectiva para garantizar un sello anular eficaz sin la necesidad de utilizar cemento.

El presente trabajo describe el proceso de desarrollo de la tecnología de MEP y WEA, tanto en su solución de sello anular como en el sistema de anclaje, presentando los detalles de instalación en dos pozos perforados con el objetivo de alcanzar la formación Vaca Muerta, así como los resultados y beneficios proporcionados por esta tecnología.

Solución optimizada para prevención de SAP, maximizando el rendimiento del proceso de construcción de pozo en Vaca Muerta

Uno de los principales operadores desarrollando el yacimiento No Convencional, Vaca Muerta, en la cuenca Neuquina, ha experimentado en los últimos años eventos de SAP. Este tipo de desafíos suelen requerir costosas soluciones de remediación para restituir la integridad de pozo; razón por la que un proceso de construcción de pozo que sea efectivo y eficiente es clave al momento de maximizar los recursos para alcanzar la mayor rentabilidad operativa.

Actualmente el proceso de construcción de pozo que ha desarrollado la operadora consta de una cementación en dos etapas:

- Etapa #1: Cementación de rama horizontal a través de un proceso de cementación primaria hasta alcanzar una profundidad cercana al “landing point”.
- Etapa #2: Cementación via “Bullheading” de sección vertical, entre las cañerías de producción e intermedia.

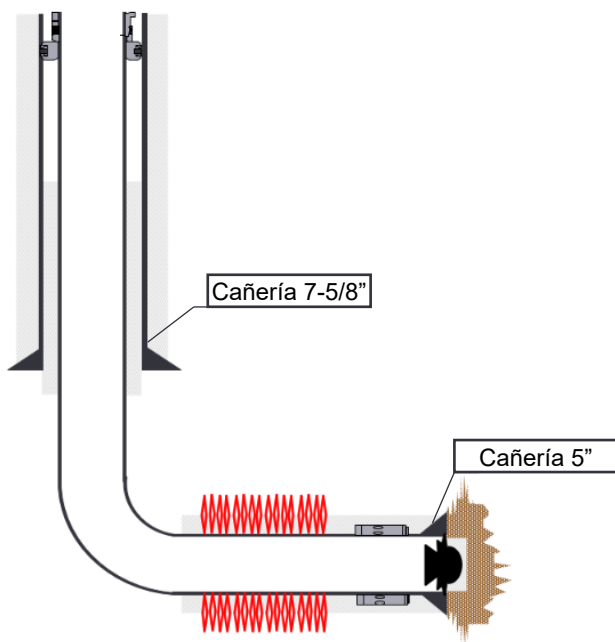
Este método de construcción de pozo ha sido adoptado en un esfuerzo por mitigar los eventos de deformación de cañería, derivados de los esfuerzos generados como consecuencia del proceso de fracturamiento hidráulico de múltiples etapas. Son precisamente los diversos ciclos de presurización y enfriamiento a los que se somete la cañería durante la etapa de terminación de pozo los responsables de inducir fisuras en la columna de cemento entre las cañerías de producción e intermedia, lo que en muchos casos conlleva a SAP.

Estos desafíos han motivado a la operadora a ejecutar un protocolo de validación de tecnología, para certificar una solución innovadora capaz de generar una barrera mecánica que permita aislar el espacio anular en la sección entubada del pozo con capacidad de sello V0 (Hermético al gas), para prevenir la presencia de SAP a través del espacio anular.

El protocolo inició con el diseño y desarrollo de una camisa metálica expandible acompañada de un sistema de compensación y cuerpo de válvulas capaz de garantizar un sello efectivo de los puertos de expansión, restaurando las capacidades máximas de estallido y colapso de la cañería.

Durante la etapa inicial del protocolo, se instaló un MEP dentro de la sección de vertical de cemento, para proveer una barrera mecánica adicional con el fin de “asegurar” la integridad en el anular entre la cañería de producción de 5” y la intermedia, de 7-5/8”. Tanto el MEP como el cemento funcionarían en conjunto para conformar una barrera que garantice la hermeticidad del anular para prevenir la migración de gasa superficie, según sea el caso, donde el MEP ofrece una solución probada para el aislamiento del espacio anular mientras que la columna de cemento le infiere al sistema la capacidad para manejar las diversas cargas axiales a los que se somete el pozo durante las diversas etapas de terminación y puesta en producción.

Esquema estándar de construcción de pozo



Esquema de construcción de pozo empleando MEP

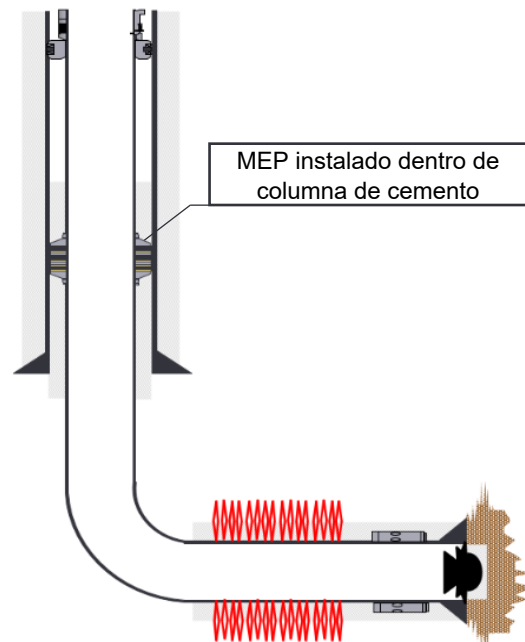


Figura 1. Ejemplo de aplicación para instalación de MEP para aseguramiento de cemento

Descripción general del Metal Expandable Packer (MEP)

El MEP utiliza una camisa metálica expandible, ensamblada alrededor del diámetro exterior de la cañería base que se emplea típicamente en el proceso de construcción de pozo. Esta camisa consta de un diseño totalmente metálico con múltiples sellos redundantes para un aislamiento anular, la capacidad de diferencial puede ser soportada por cualquiera de estos sellos y una característica única de los MEP es que no reducen su capacidad de diferencial con el incremento en su expansión diametral.

Son calificados bajo el estándar ISO14310 (API11D1) y con un grado de validación de sello V0, y diseñados para ofrecer un desempeño operacional que permita reducir los costos asociados a fallas y mitigar riesgos durante la etapa de construcción del pozo.

El MEP se activa hidráulicamente desde superficie, sin componentes móviles; la figura 2 muestra la camisa metálica exterior y los elementos de sellado redundantes a lo largo de la misma. La expansión hidráulica se ejecuta aplicando presión interna en la cañería y transmitiéndose a través del puerto de expansión, hasta asegurar el contacto con la pared interna de la cañería intermedia.

La metalurgia empleada para la construcción del sistema considera los escenarios de corrosión a largo plazo resultantes de la exposición a fluidos de perforación, fluidos de terminación, estimulaciones y el entorno de producción. En función de los ambientes más complejos y/o corrosivos a los que puedan exponerse los MEP, se utilizarán materiales en la construcción del sistema de sellado con aleaciones como NiCr, Inconel y SAF 2507 y con elementos sellantes de HNBR o Aflas.

El sistema de sellado está diseñado de tal manera que la presión utilizada para expandir la camisa expandible energiza los conjuntos de sellos, creando un área de contacto metal con metal, y con múltiples sellos elastómeros.

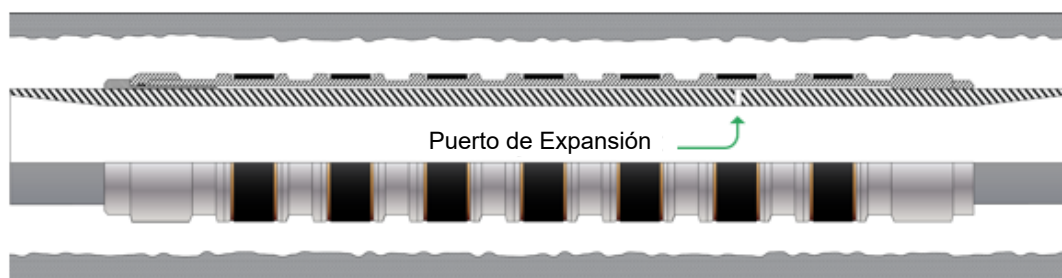


Figura 2. Sección transversal del sistema de sellado de metal expandible ensamblado en caño base previo a la expansión.

Durante la expansión hidráulica, la camisa metálica expandible pasa de una fase elástica a una fase plástica que crece radialmente y se ajusta a la superficie de la pared interna del revestimiento o formación, dependiendo del escenario de instalación, hasta garantizar un contacto efectivo desplazando cualquier volumen de líquido hacia los extremos. Figura 3.

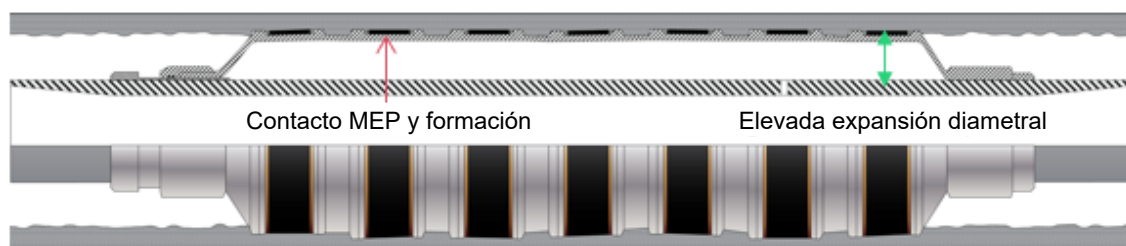


Figura 3. Sección transversal del sistema de sellado de metal expandible ensamblado en caño base posterior a la expansión.

La presión de expansión necesaria para alcanzar la efectiva deformación de la camisa metálica es una función del grado del material, espesor de pared y diámetro del MEP. El material empleado durante la fabricación es una aleación de alta ductilidad que se endurece a medida que se expande, incrementando su resistencia al colapso.

Los MEP no entrapan el fluido una vez expandidos, ya que los cambios térmicos en el pozo podrían generar cambios en la presión interna del MEP, por lo que se ha integrado un sistema de compensación anular, que permite transmitir la máxima presión en el anular, al interior del MEP. Esto ayuda a tener un sello efectivo a la más alta presión, sin poner en riesgo de colapso al MEP, lo que le permite soportar presiones diferenciales muy altas. Para la aplicación descrita en el presente documento, el MEP está calificado para manejar un diferencial de presión máximo de 6000 psi.

Descripción general de Cuerpo de Válvulas

En conjunto con la camisa del MEP, el producto final se conforma por un cuerpo de válvulas. Dichas válvulas proveen características únicas en función de las condiciones particulares de pozo. En términos generales, las funciones más empleadas en los cuerpos de válvulas son:

1. Protección para evitar la expansión prematura de MEP
2. Restitución de las propiedades mecánicas de pozo
3. Protección en caso de estallido de camisa por sobre expansión (aplicación en hoyo abierto)
4. Compensación de espacio anular y camisa expandible

El cuerpo de válvulas diseñado y empleado durante la ejecución del protocolo de validación con aplicación en Vaca Muerta, del que se muestra un esquemático básico en la Figura 4, está compuesto por un total de tres (3) válvulas. El propósito principal de estas válvulas es:

- **Válvula de protección:** previene la expansión prematura del MEP bloqueando el canal de flujo entre el interior de la cañería base y la camisa metálica externa. Adicionalmente, proporciona un canal de comunicación entre el interior de la camisa metálica y el espacio anular para evitar colapsos parciales y/o totales de la camisa durante el proceso de entubación de pozo.
- **Válvula de restitución de las propiedades de la cañería:** restaura la integridad de la cañería al bloquear el canal de flujo entre el interior de la cañería base y la camisa metálica, una vez se ha completado el proceso de expansión de la camisa.
- **Válvula de compensación:** una vez completado el proceso de deformación plástica de la camisa metálica, esta válvula se activará comunicando el interior de la camisa metálica expandida con el anular de mayor presión. Este mecanismo es clave para evitar el colapso del MEP expandido al ser expuesto a presión anular.

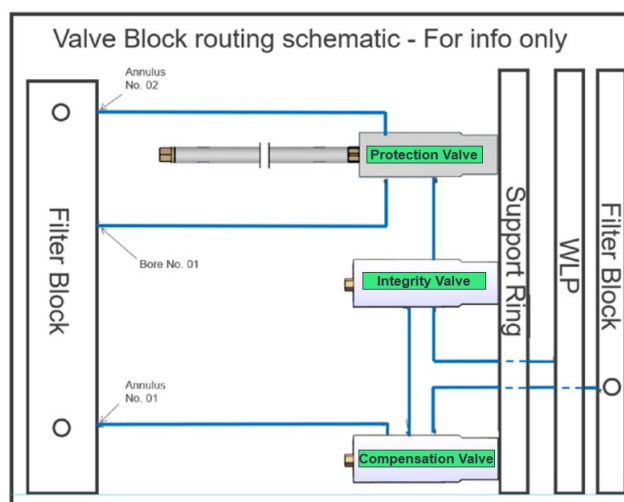


Figura 4. Esquemático ejemplo para cuerpo de válvulas utilizado en MEP con objetivo Vaca Muerta



Figura 5. Sistema de sellado, Metal Expandable Packer, con 3 sellos redundantes listo para ser instalado en pozo.

Desarrollo del protocolo, identificación de nueva necesidad

Ha medida que se completan las diversas instalaciones de MEP para el aseguramiento de cemento, como parte del proyecto de validación tecnológica, se identificó una nueva necesidad a partir de los resultados obtenidos. Durante la ejecución del protocolo inicial se validó la correcta aplicación de la tecnología como un “aliado” en el proceso de construcción de pozo para complementar el proceso de cementación y garantizar una barrera anular efectiva capaz de mantener su capacidad de sello anular aún bajo los más extremos etapas de desarrollo del pozo.

Sin embargo, en un esfuerzo por hacer más efectivo el proceso de construcción y maximizar los recursos disponibles, se identificó una nueva necesidad; poder contar con la implementación de la tecnología de metal expandible de manera que no requiera la utilización de la columna de cemento como sostén para el manejo de las diversas cargas axiales que se generan durante la vida útil del pozo.

En función de lo solicitado, se inició un proceso de evaluación para el desarrollo de una alternativa tecnológica que permitiera alcanzar el objetivo planteado, donde se requiere lo siguiente:

- Entender el perfil de cargas axiales a las que se ve sometido el pozo durante las diversas etapas del proceso de construcción (Prueba de cañería, apertura de camisa iniciadora, fracturamiento hidráulico y puesta en producción).
- Desarrollar una alternativa que mejore las capacidades de anclado de la solución actualmente empleada, que permita prescindir del cemento como elemento de contención axial.

Para la definición del perfil de carga, a través de software especializado, se modela un “pozo tipo” que permita la simulación de carga axial para diversas condiciones de pozo definidas en función del proceso típico de construcción de pozo que la operadora lleva a cabo.

El siguiente esquema de pozo se utilizó para la simulación de carga:

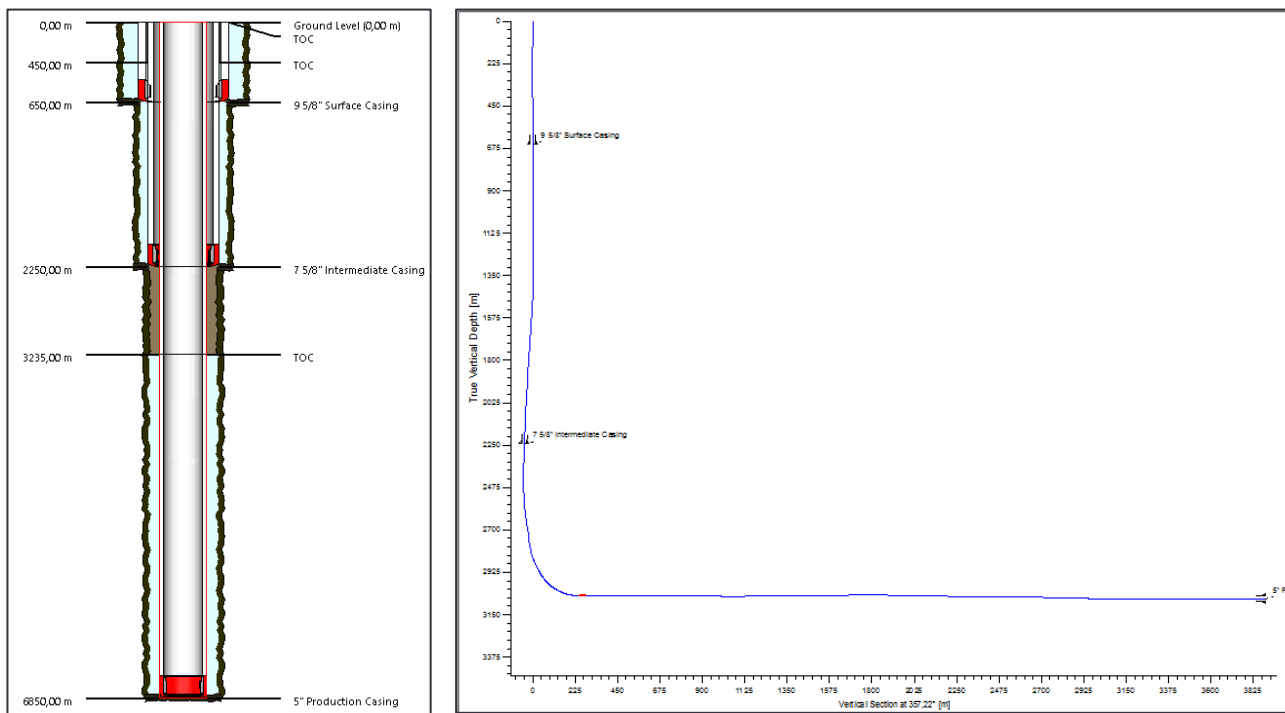


Figura 6. Esquema de pozo verticalizado, empleando durante la simulación de tensiones.

El perfil de desviación del pozo tipo, considerando que el objetivo es validar una solución que pueda ser aplicada para la construcción de pozo con objetivo Vaca Muerta, es un perfil de pozo horizontal. Esto implica que una sección del pozo a simular tendrá una rama lateral, a 90 grados de desviación. Para el propósito del ejercicio de validación se he tomado como referencia el siguiente perfil de desviación, que se muestra en la figura 6.

Se plantean entonces, 4 escenarios de carga para el análisis a realizar:

- **Escenario #1. Prueba de Integridad de cañería.**
- **Escenario #2. Fracturamiento hidráulico por cañería.**
- **Escenario #3. Arenamiento prematuro.**
- **Escenario #4. Arenamiento prematuro – 2.**
- **Producción del pozo.**

Como resultado del análisis, e obtuvo el perfil de carga axial de la figura 7. Considerando que las profundidades estimadas de instalación podrían variar entre los 1,000 mt y 1,500 mt verticales, resultando en una solución que permita manejar una carga axial máxima de 280K lbs.

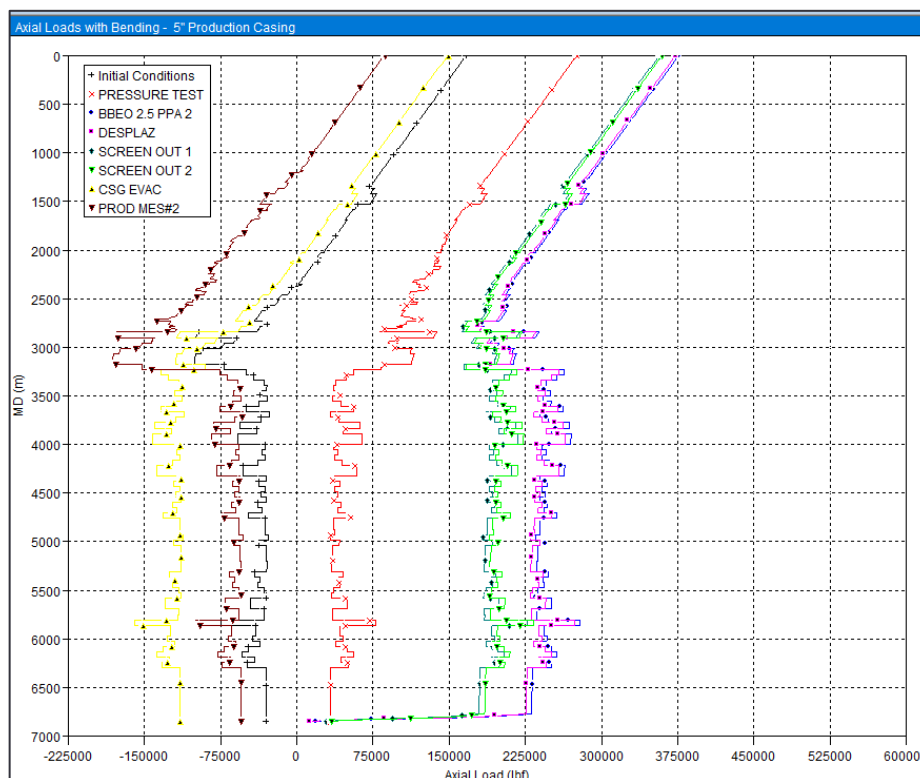


Figura 7. Perfil de carga axial obtenido como resultado de la simulación de tensiones.

Diseño de solución y calificación de MEP y WEA

Con la comprensión del perfil de cargas axiales para la cual sería requerido el desarrollo de la solución para el anclado, se toma el principio de funcionamiento del MEP sobre un enfoque ligeramente distinto. En lugar de emplear sellos elastómeros redundantes, tal como lo utiliza el MEP, se emplean anillos de anclados compuestos de una aleación metálica.

Estos anillos de anclado, con “dientes” capaces de incrustarse en la pared interna de la cañería intermedia ofrecen la capacidad de anclado necesaria para evitar que las cargas axiales generadas en el sentido del flujo generen algún movimiento del conjunto que pudiera comprometer la capacidad de sello V0 característica del MEP.

El estándar al que están calificados los empacadores de metal expandible se basa en las normas ISO y API para equipos de fondo de pozo (ISO14310/API11D1). Los procesos de calificación se realizan en entornos de presión y temperatura controladas, lo que permite que el conjunto MEP + WEAWEA se someta a múltiples ciclos de presión en un escenario Caliente/Frío/Caliente. El proceso específico de calificación de producto se ejecuta con una presurización interna del ensamble para su expansión a 75° C y hasta 6,000 psi, antes de iniciar diversos ciclos de variación térmica entre los 25° C y los 125° C.

Todos los parámetros de prueba se basan en las condiciones del pozo y, una vez calificado, el conjunto MEP + WEAWEA puede ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones dentro de los parámetros calificados. Todo este proceso general de calificación se describe más detalladamente en el SPE-196227-MS - Metal Expandable Annular Sealing Systems for High Pressure Open Hole.

Una de las últimas modificaciones realizadas para el diseño definitivo de la alternativa “cementless”, contempla el rediseño del cuerpo de válvulas que acompaña el conjunto MEP + WEA. El reemplazo de la columna de cemento trae consigo un desafío adicional; la integridad mecánica del pozo depende ahora de la integridad mecánica del conjunto de camisas metálicas que conforman la solución. Es por esta razón que se requiere una mejora en el cuerpo de válvulas que conforma el sistema para que, en el evento potencial de ruptura de alguna de las camisas, se pueda garantizar la correcta hermeticidad entre directa y anular.

Para ello se ha reconfigurado el cuerpo de válvulas descrito previamente, para incorporar un mecanismo de respaldo para el bloqueo del canal de comunicación entre directa y el interior de las camisas metálicas. De esta manera el nuevo cuerpo de válvulas incorporado en el conjunto MEP + WEA está constituido tal como se muestra en la figura 10.

En este arreglo optimizado de válvulas, con la inclusión tanto de una segunda válvula de protección como de un canal de flujo de respaldo entre directa y el interior del conjunto de camisas, ofrece un mecanismo de respaldo para el bloqueo del canal de comunicación directa-camisa. Este mecanismo de respaldo será activado siempre que el diferencial de presión entre la directa y el interior del conjunto de camisas metálicas no alcance el diferencial de presión necesario para la correcta activación del MEP + WEA o falle súbitamente durante el proceso de expansión plástica.

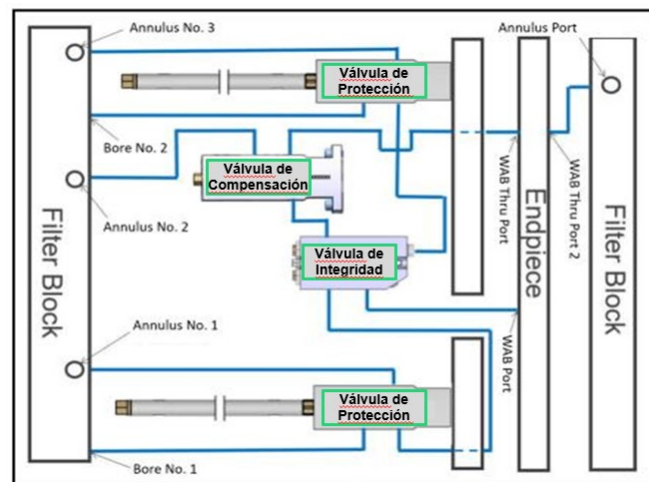


Figura 10. Esquemático de cuerpo de válvulas utilizado en conjunto MEP + WEA, para aplicación sin cemento.

Planeación y ejecución de MEP + WEA

El modelo de construcción propuesto a partir de la implementación de la solución diseñada y el reemplazo del cemento como barrera mecánica obligan a una cuidadosa planificación y un extenso análisis de riesgos del trabajo, realizado con todas las compañías involucradas en el proceso de construcción de pozo para garantizar el despliegue correcto del MEP + WEA. Durante el análisis del trabajo, se definieron también las contingencias que se implementarán en caso de ser necesario.

Dado el resultado del análisis de riesgo, la empresa operadora adopto un enfoque conservador en cuanto a la ejecución de las dos instalaciones construidas como parte del proceso de validación de tecnología, por lo que se opta por un esquema de instalaciones de manera progresiva:

- Primera Instalación:
 - o Inclusión de conjunto MEP + WEA en conjunto con un overlap de cemento, con tope por debajo de la profundidad de instalación.
 - o Cementación a ser realizada en una sola etapa.
- Segunda instalación:
 - o Inclusión de conjunto MEP + WEA sin cemento en la sección vertical de pozo.
 - o Cementación a ser realizada en una sola etapa, hasta alcanzar el landing point del pozo garantizando que la curva del pozo y a la sección vertical del mismo quedan libres de cemento.

Con base en los procedimientos operativos estándar empleados durante toda la ejecución del protocolo de validación tecnológica, se analizaron en detalle los siguientes procesos:

- Análisis de trabajo en función de los requisitos comunicados por operadora.
- Procedimiento de Operación Estándar (SOP) detallado en función de las condiciones de pozo informadas.
- Análisis de Riesgos de Trabajo (JRA) y medidas de mitigación.
- Proceso de instalación y expansión de MEP + WEA según SOP.
- Prueba final de conjunto MEP + WEA.

Como parte del proceso de planeación, se comunicó a las diversas partes interesadas todas las especificaciones con respecto a la velocidad de bajada en pozo (RIH), la velocidad de rotación de la cañería, el torque máximo, máximo caudal de circulación y presión máxima de circulación.

Característica	Especificación
Máxima velocidad de bajada	73 ft/min (22 m/min)
Rotación máxima permitida	10 rpm
Máximo torque permitido sobre Packer	8,673 lb/ft
Caudal máximo de circulación	8 bpm
Presión de circulación máxima	2,400 psi

Tabla 1. Parámetro límite para corrida de MEP + WEA en pozo.

Se resumen a continuación los detalles operativos más resaltantes de las dos instalaciones ejecutadas para la provisión de MEP + WEA

Instalación #1: 634WEA (MEP+WEA) con overlap de cemento parcial en la sección vertical de pozo

Con la premisa de verificar las características mecánicas y comportamiento de este nuevo producto diseñado para generar sello anular sin el soporte mecánico del cemento, desde la operadora se solicitó realizar para la primera instalación un overlap de cemento a través de cementación en una etapa hasta alcanzar unos 200 mts por sobre el zapato de la cañería intermedia.

De esta manera, bajo el escenario de mayor riesgo (entiéndase potencial falla del 634WEA) la construcción de pozo se vería resguardada con una contingencia para garantizar el sello anular a través de dicha columna de cemento fraguado.

Durante esta primera instalación del 634WEA, el sistema fue posicionado a una profundidad de 1,150 mts y pudo ser expandido sin ningún tipo de retrasos operacionales o incidentes asociados al mismo. Una vez instalado, el equipo de perforación se trasladó al siguiente pozo dentro de su programa de perforación mientras que la operación de expansión del 634WEA fue realizada a través del equipo de cementación de manera offline.

La operación de cementación se ejecutó en esta oportunidad de manera convencional, en una sola etapa, con volúmenes bombeados que pretenden garantizar la integridad mecánica del zapato de 7-5/8". Una vez completado el desplazamiento respectivo de lodo de perforación y el bombeo de las diversas lechadas correspondientes, se realiza el bombeo tapón de desplazamiento hasta asegurar aislar directa para el proceso de expansión del 634WEA

Para la expansión, se realizaron dos ciclos de presurización por directa. El detalle de los ciclos de presión se puede observar en la figura 11.

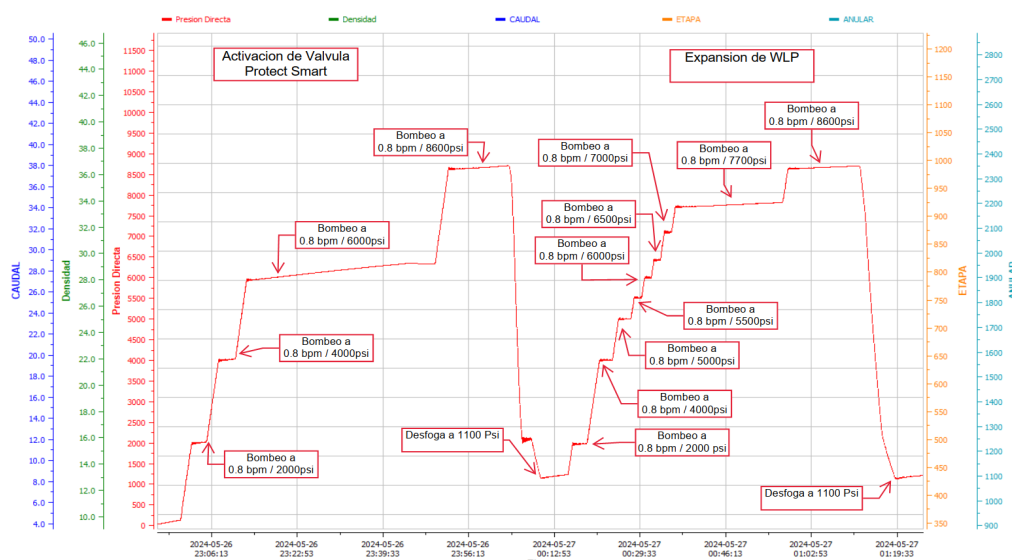


Figura 11. Ciclos de presurización realizados para expansión del conjunto 634WEA.

La operación se ejecutó de manera eficiente, sin incidentes de HSE o calidad ni pérdida de tiempo.

Una vez transcurrido el tiempo estimado de fraguado para el overlap de cemento en la sección vertical de pozo, se realiza el desfogue controlado de la presión en anular. Se consigue un resultado final de 0 psi en anular de pozo.

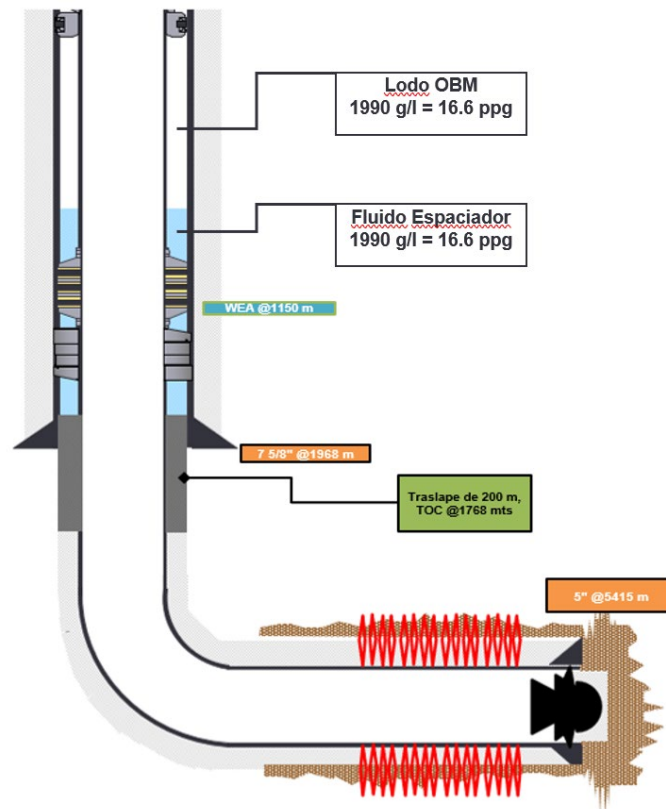


Figura 12. Esquema final de pozo para primera instalación de 634WEA.

Instalación #2: 634WEA sin cemento en sección vertical de pozo.

En función de los resultados obtenidos durante la primera instalación de 634WEA y la mejor comprensión del funcionamiento del sistema de parte del departamento de ingeniería de la operadora; se realiza la segunda instalación de la solución desarrollada, en esta oportunidad sin ningún tipo de cemento en el tramo vertical del pozo.

De esta manera, la planeación del servicio se realiza de manera muy similar que la completada para la primera instalación; sin embargo, se considera una lechada de cemento con tope teórico en el landing point del pozo, aun dentro de la sección horizontal del mismo.

En esta segunda instalación, el sistema fue posicionado a una profundidad de 1,200 mts y pudo ser expandido sin ningún tipo de retrasos operacionales o incidentes asociados al mismo.

Se completan dos ciclos de presurización por directa, con un valor máximo de 8,800 psi, para realizar la correspondiente activación de las válvulas que conforman el sistema y la expansión mecánica de las camisas metálicas. El detalle de los ciclos de presión se puede observar en la figura 13.

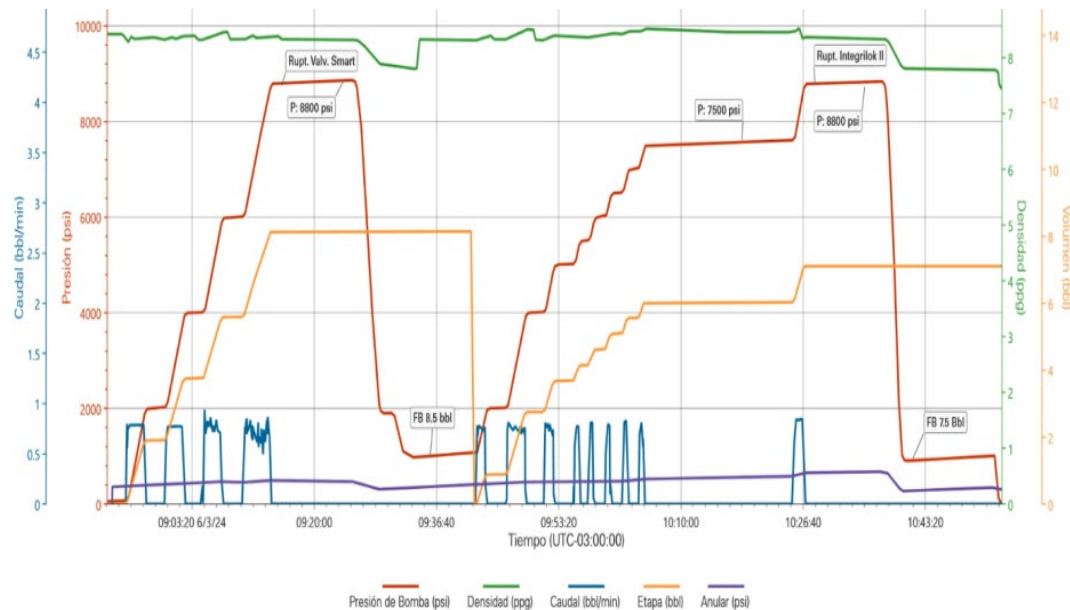


Figura 13. Esquema final de pozo para primera instalación de 634WEA.

De manera similar, esta segunda operación se ejecutó de manera eficiente, sin incidentes de HSE o calidad ni pérdida de tiempo. Y se constata correcta instalación de 634WEA a través del desfogue controlado de presión en anular hasta alcanzar 0 psi.

Verificación final de instalación

Semanas después de la instalación de productos en los pozos descritos, se llevan a cabo un par de maniobras en pozo como parte del programa de pre-frac en vista de confirmar el correcto sello anular mecánico a través de la implementación de la tecnología 634WEA.

Es entonces como, previo al inicio del proceso de fracturamiento hidráulico, se completan las siguientes verificaciones en cada uno de los dos pozos intervenidos previamente:

- A. Registro de calidad de cemento (Cement Bond Log, CBL)
- B. Presurización de anular para confirmar estanqueidad

Durante la etapa de diseño de la solución no se consideraba la necesidad de manejar fuerzas generadas en la dirección contraria al flujo de fluidos en pozo. El punto B descrito anteriormente, requirió el análisis a detalle del sistema de anclaje para cargas generadas por la prueba en anular.

Considerando lo anterior, el departamento de ingeniería encargado del desarrollo, definió un procedimiento de verificación por presurización de espacio anular hasta un valor máximo de 400 psi. Dicha presurización se realizó en escalones progresivos hasta alcanzar el valor máximo obteniendo una confirmación positiva una vez se sostenga dicha presión por espacio de 15 minutos.

Las figuras 14 y 15, respectivamente, muestran los resultados obtenidos como parte del proceso de presurización anular en ambos pozos. Como puede constatarse a través de las gráficas generadas por el sistema de adquisición, en ambos casos se alcanza la hermeticidad necesaria para validar la correcta instalación del 634WEA.



Figura 14. Presurización por anular, hasta alcanzar 400 psi, en primer pozo con 634WEA

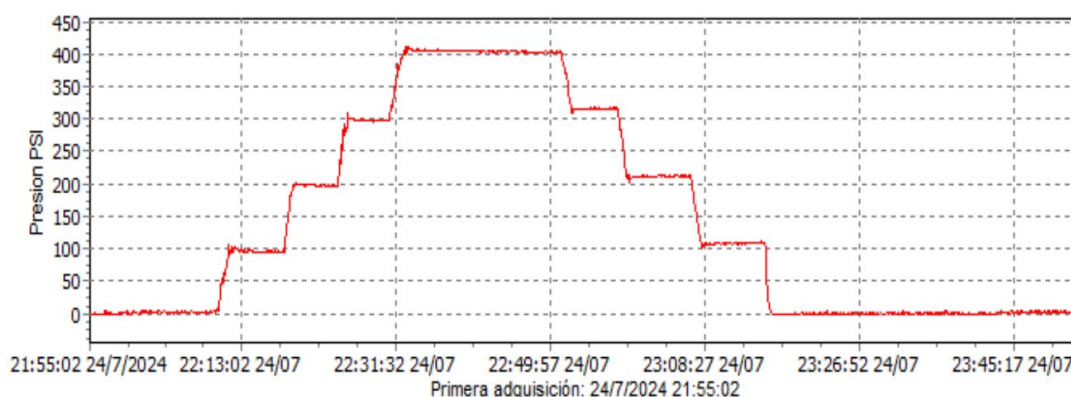


Figura 15. Presurización por anular, hasta alcanzar 400 psi, en segundo pozo con 634WEA

Adicionalmente se completan en ambos pozos registros de calidad de cemento (CBL), como evidencia de ubicación en pozo e indicación cualitativa de sello en sección anular de pozo. Las figuras 16 y 17 muestran una sección del registro realizado, donde se constata la profundidad final de instalación de 634WEA. Partiendo de la comprensión de que estas instalaciones se realizaron sin el resguardo de la columna de cemento en la parte posterior de la cañería, se evidencia la posición del 634WEA a través de la disminución de la amplitud en el registro CBL y el cambio en el patrón Chevron para la columna VDL.

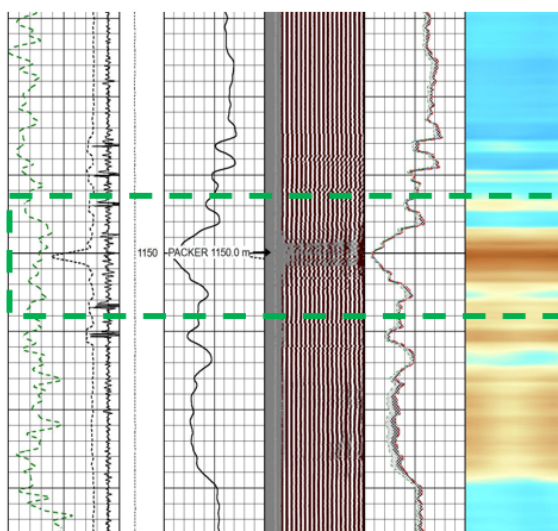


Figura 16. Registro CBL-VDL en primer pozo con 634WEA. Posición de empaquetador confirmada a 1150 mts de profundidad.

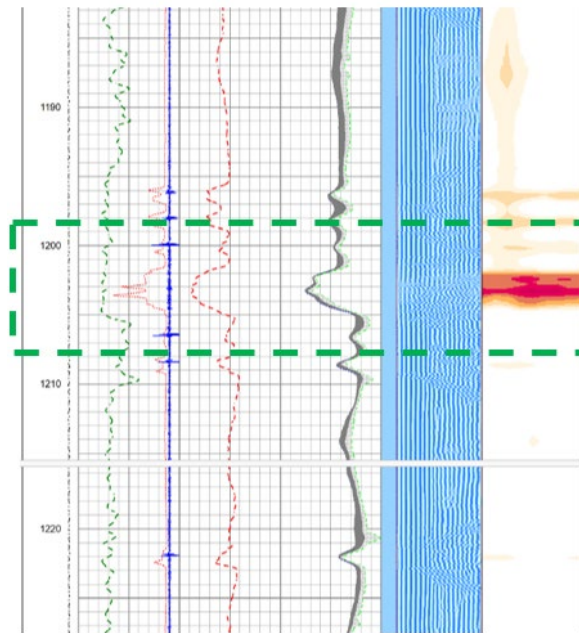


Figura 17. Registro CBL-VDL en segundo pozo con 634WEA. Posición de empaquetador confirmada a 1202 mts de profundidad.

Esto evidencia la correcta instalación y sello anular generado por parte del conjunto 634WEA antes de dar inicio al proceso de fracturamiento hidráulico. Sin embargo, como ya se había identificado durante la etapa de diseño, la mayor sollicitación de cargas para el conjunto se realizaría durante las operaciones de prueba de casing y el fracturamiento.

Es por este motivo que, durante las últimas etapas (más someras) del proceso de fracturamiento hidráulico en ambos pozos se realiza un monitoreo de la presión en anular mientras que las mencionadas etapas son ejecutadas. Entendiendo que bajo el esquema de construcción de pozo propuesto la única barrera anular en pozo es la provista por el conjunto 634WEA, es de interés poder entender el comportamiento anular durante la etapa de mayor sollicitación de esfuerzos para el pozo.

El resultado registrado a través de sensores de presión conectados al anular se puede observar en las figuras 18 y 19; con un valor máximo de registrado de 15 psi y 50 psi respectivamente. Evidenciando que no existe migración de presión a través del espacio anular durante el proceso de fracturamiento hidráulico.

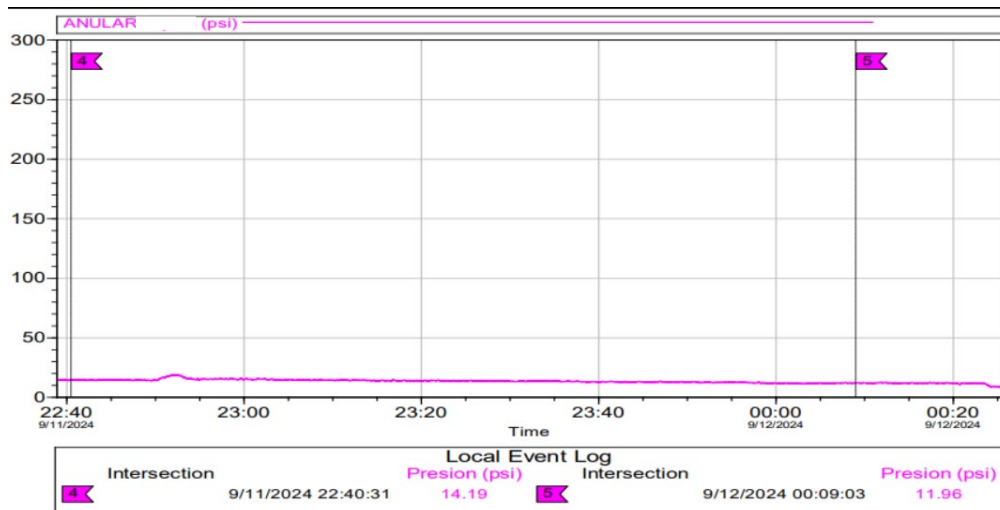


Figura 18. Comportamiento de presión anular durante ejecución de etapa de fractura, Pozo #1.

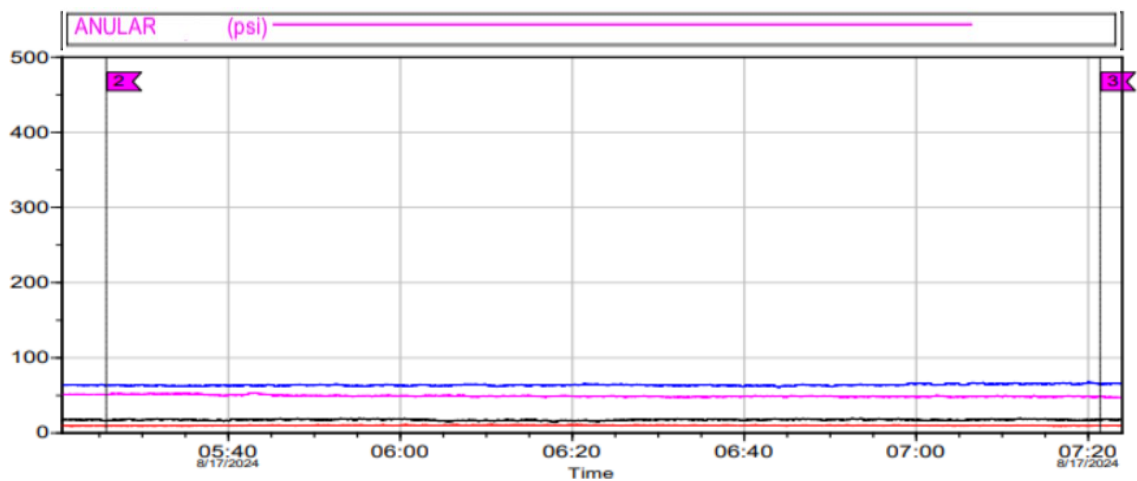


Figura 19. Comportamiento de presión anular durante ejecución de etapa de fractura, Pozo #2.

Beneficios de la implementación de tecnología MEP

- **Evaluación económica:**

La evaluación económica para la implementación de la tecnología de aseguramiento de espacio anular, una vez comparado con los valores de mercado para la construcción de pozo con objetivo Vaca Muerta, representa una reducción total del costo de construcción promedio para pozos que han registrado Presión Anular Sostenida de hasta un 60%.

Esta evaluación económica considera las siguientes etapas dentro del proceso constructivo y de remediación:

- Cementación primaria
- Cementación bullheading
- Proceso de expansión del conjunto MEP & Anclas
- Cementación remedial (promedio)
- Inversión asociada a tecnología para Aislamiento Anular (MEP & Anclas)

En algunos casos, este beneficio económico se puede traducir en un ahorro significativo alcanzando valores por sobre los 300,000 USD.

- **Tiempo Operativo:**

El reemplazo de cemento en la sección vertical de pozo, usualmente realizado a través del método de bombeo vía Bullheading, supone una reducción de tiempo operativo para el set “offline” de cementación de 1.5 hrs.

- **Presión máxima para expansión de MEP & Ancla:**

La nueva condición de pozo para la expansión del conjunto MEP & Anclas, con una columna anular libre de fluido de cementación y la libertad de poder ubicar dicho conjunto sin la limitación asociada al tope de cemento, permiten una reducción del 10% en la presión en superficie necesaria para la correcta expansión de la camisa metálica y activación de las diversas válvulas que conforman el sistema.

Conclusiones

El comportamiento registrado de presión en el anular, durante y después de completado el fracturamiento hidráulico del pozo, confirman la efectividad de la tecnología innovadora propuesta, para garantizar el sello anular reemplazando la tradicional columna de cemento.

La adición del conjunto 634WEA, como alternativa para el proceso de construcción de pozos de la operadora, ha ayudado a garantizar que no se haya registrado ningún evento SAP en la superficie a través del espacio anular generado entre la tubería de revestimiento de 5" y 7-5/8", independientemente de los ciclos de presión y temperatura a los que se somete el pozo durante su vida productiva.

La ejecución de las instalaciones realizadas ha demostrado que el tiempo de operación del perforador no se ve afectado por la incorporación del 634WEA en la arquitectura del pozo. Esto, junto con el hecho de que el proceso de expansión de las camisas metálicas se ejecuta con equipos de cementación "offline", ayuda a la maximización de la utilización del perforador para completar la construcción del pozo.

El proceso general de expansión del conjunto, a través de presurización por directa, es más amigable con el medio ambiente en comparación del proceso necesario para la expansión de empacadores hinchables donde es necesario realizar el desplazamiento de diésel o salmuera para que los mismos reaccionen.

Nomenclatura

SAP = Sustained Annular Pressure (Presión Anular Sostenida)

HNBR = Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber

MEP = Metal Expandable Packer

WEA = Well Expandable Anchor (Ancla de Metal Expandible)

RIH = Running In Hole

FEA = Finite Element Analysis

HSE = Health, Safety and Environment

CBL = Cement Bond Log

VDL = Variable Density Log

Agradecimientos

Los autores del presente trabajo desean agradecer a YPF SA (YPF) por aprobar el artículo, a los ingenieros de YPF que tuvieron un aporte significativo en el desarrollo de las diversas instalaciones descritas, a los muchos clientes cuyo uso de productos metálicos expandibles también ha contribuido al desarrollo de la tecnología y esta solución y a la gerencia de Welltec por permitir la publicación de este artículo.

Referencias

P. Hazel; H. Singh; J. Bårdsen; R. Vasques; R. Percy; N. Hannah; Open Hole Sealing System Provide Zonal Isolation for High Pressure Acid Stimulation within a Chalk Reservoir. Paper SPE 166391 presentado en el Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September–2 October 2013

Hans Plessing; Michael Macdonald Arnskov; A novel well MEP solution alternative to swellable casing Sealing system. Paper SPE-145931 presentado en el Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia, 20–22 September 2011.

Pedro Maciel; Ricardo Vasques; A novel metal expandable well MEP for high delta pressure cementless open hole completions. Paper IBP2255_14 presentado en el Rio Oil & Gas Expo and Conference, held between September 15-18, 2014

Yosafat Esquitin; Brian Schwanitz; Guido Moreno; Natalia Avella; Oscar Henao; Metal Expandable Annular Sealing Systems for High Pressure Open Hole Zonal Isolation and Stimulation, Paper SPE-196227-MS presentado en el SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Calgary, Alberta, Canada, 30 Sep - 2 October 2019.

Jan Sæby; Norske Shell; Sustained Casing Pressure Guideline; WI Workshop Presentation 26th May, 2011

CV Autor Principal

Título y lugar de estudio: Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, Barcelona. Venezuela

Trayectoria:

Inicié mi carrera en la industria del O&G en 2009 como ingeniero de campo de Wireline para la empresa Schlumberger. Luego de 3 años, me uní al equipo de trabajo de Welltec en 2012 donde desempeñé funciones de ingeniero de campo en países como Venezuela, Estados Unidos, México, Colombia, Trinidad y Argentina. Entre 2018 y 2022 desempeñé la función de Service Delivery Manager al frente de las operaciones en Argentina, para migrar a mi actual posición de Account Manager para enero de 2023.

Cargo actual en la empresa: Account Manager para Welltec Argentina