

# OPTIMIZACIÓN DE LAS CEMENTACIONES PRIMARIAS EN EL YACIMIENTO EL TRAPIAL

**Daniel Aquino, Roberto Tello, Norberto Briggiler y Manuel Veiga**  
**Chevron San Jorge S.A y BJ Services S.A.**

## Abstract

Las prácticas históricamente exitosas para las cementaciones de pozos en el yacimiento El Trapial han debido ser modificadas para atender a desafíos de reciente aparición como la necesidad de anillos de cemento más altos y pérdidas severas de circulación; y para atender a la permanente preocupación por mejorar la seguridad y la protección del ambiente y la salud.

Diversos cambios se introdujeron, como el uso de aditivos multipropósito para reducir densidad, empleo de colchones y lodo nitrogenado, empleo de microesferas cerámicas para casos especiales, sustitución de colchones por alternativas amigables con la salud, el ambiente y la seguridad, reemplazo de un producto importado de alto impacto en costos por una alternativa local, y un sistema costo-efectivo para control de pérdidas severas durante la perforación.

Las conclusiones puntualizan las claves para los éxitos obtenidos basados en nuevas tecnologías. Además enfatizan la importancia en los buenos resultados del estrecho trabajo en equipo entre representantes de las compañías operadora y de servicio y la necesidad de abandonar el paradigma de la alta resistencia a la compresión por el concepto de cemento flexible, dúctil, soportado por el empleo de simuladores de esfuerzos a que se ve sometido el pozo durante su vida útil.

## Introducción

El yacimiento El Trapial se encuentra en la Cuenca Neuquina, 220 km. al noroeste de la ciudad de Neuquén, siendo Rincón de los Sauces la ciudad más cercana al yacimiento, a 56 km. al noreste.

A principios del año 2000, un estudio del yacimiento mostró que existía mejora de las reservas recuperables y por consiguiente de la recuperada final estimada en caso de aplicarse un cambio del esquema de explotación. Ello condujo a la perforación de pozos “infill” con el fin de transformar a El Trapial de un yacimiento con espaciamiento de 60 acres (24.3 ha) e inyección mediante líneas alternadas a un yacimiento con espaciamiento de 23 acres (9.3 ha) e inyección según esquema tipo “seven-spot” invertido. Para satisfacer dicho objetivo se llevan perforados 240 pozos en el período que abarca de mediados de 2000 a finales del 2002.

Los pozos alcanzan profundidades que oscilan entre los 1300 y 1500 metros y tienen principalmente como objetivos las formaciones Troncoso Inferior (porosidad promedio de 17.3 % y permeabilidad neta entre 70 md [ $0.07 \mu\text{m}^2$ ] y 120 md [ $0.12 \mu\text{m}^2$ ]), Agrio Superior (porosidad promedio de 16.3 % y permeabilidad neta entre 30 [ $0.03 \mu\text{m}^2$ ] y 60 md [ $0.06 \mu\text{m}^2$ ]) y Avilé (porosidad promedio de 16.1 % y permeabilidad neta entre 45 [ $0.04 \mu\text{m}^2$ ] y 70 md [ $0.07 \mu\text{m}^2$ ]). Para cementar aislando todas estas zonas se requieren anillos de cemento de 200 a 300 m de altura.

A comienzos del año 2001 se comenzó a incluir como objetivo secundario las formaciones Rayoso Evaporítico y Rayoso Clástico (Yellow Section). Para cubrir estas zonas la altura de los anillos de cemento tuvieron que extenderse hasta 600 y 800 m por lo que esto presentó un nuevo desafío en el diseño de las cementaciones.

Debido a la gran cantidad y cercanía de pozos que se encuentran en producción en el yacimiento y por la inyección de agua que se está realizando en las formaciones, es frecuente encontrar en un mismo pozo zonas de presiones tanto superiores (por la inyección de agua) como inferiores (depletadas) a las presiones originales en el yacimiento. Esto hace que cada diseño de cementación sea un reto para los ingenieros de la compañía operadora y los especialistas de la compañía de servicio.

Históricamente, las prácticas de cementación empleadas en el yacimiento se han traducido en muy buenos resultados de cementación de cañerías de aislación. Sin embargo, aún con estos antecedentes exitosos, la cementación primaria continúa planteando desafíos. Zonas de pérdidas de circulación, cambio en las presiones porales originales o la necesidad de columnas de cemento más altas requieren modificar los criterios de diseño tradicionales. Otro reto es la permanente necesidad de minimizar el impacto ambiental e incrementar más aún la seguridad. Además, siempre tiene vigencia el continuo mejoramiento técnico y la optimización de costos.

El presente trabajo describe diversas acciones que permitieron avanzar para atender a los nuevos desafíos y la optimización de los trabajos. El diseño de las lechadas fue modificado para obtener varios fines: reducción de la densidad por el potencial de pérdidas, mejora de las propiedades mecánicas (flexibilidad) del cemento para incrementar la vida útil, y reducción de costo. El objetivo fue logrado con la introducción de aditivos multipropósito de reciente desarrollo, soportando el análisis con un simulador de respuesta del cemento a distintos tipos de esfuerzo.

También se modificaron los colchones con diversos objetivos, por un lado el empleo de colchones espumados y/o colchones reactivos permitió evitar pérdidas de circulación en escenarios particularmente difíciles. Por otro lado, la aplicación de tecnología innovadora en el tipo y secuencia de colchones redujo el impacto ambiental, incrementó la seguridad y disminuyó el costo, manteniendo la calidad de resultados.

### **Escenario de perforación y cementaciones convencionales**

Un pozo tipo del yacimiento El Trapial consiste en la perforación del tramo para cañería guía de 9 5/8" (244.5 mm) hasta 120 m de profundidad con trépano tricono de 12 1/4" (311 mm) utilizando lodo base agua, donde se cubren con cemento las arenas acuíferas de la zona hasta boca de pozo.

El tramo siguiente se perfora con trépano de 8 3/4" (222 mm) utilizando lodo emulsión inversa (O/W = 60/40) de densidad promedio 0,98 / 1,020 g/mL. El interés geológico histórico en este yacimiento son los horizontes Fm. Troncoso Inferior, Fm. Agrio Superior y Fm. Avilé. Esta sección se entuba con casing de 7" (178 mm) de 23 lb/pie (34.2 kg/m) y 26 lb/pie (38.7 kg/m), utilizando zapato y collar flotador. El objetivo de la cementación de esta sección es cubrir con muy buena calidad de cemento desde el fondo del pozo hasta 100 m por encima del tope de la zona productiva (Fm. Troncoso Inferior). La columna estratigráfica típica se presenta en la fig. 1.

Debido a que durante la etapa de terminación de estos pozos se realiza la fracturación hidráulica de las formaciones productivas, se debe garantizar una buena aislación entre las mismas con el objeto de poder estimularlas por separado, evitando comunicaciones entre estas zonas y/o arenas acuíferas cercanas.

En el yacimiento El Trapial hay más de 500 pozos perforados. Actualmente se perforan y terminan un promedio de 100 pozos al año con dos o tres equipos de perforación en forma permanente y tres equipos de terminación. Este nivel de actividad permite evaluar rápidamente los resultados de las mejoras o cambios introducidos en el diseño de la cementación y así realizar los ajustes necesarios para los siguientes trabajos. Otro hecho importante es que los perfiles de cemento se corren tan pronto pasa el tiempo de fragüe del cemento, lo cual hace que el control de calidad de cada operación y diseño sea ágil y oportuno.

La cementación tradicional de un pozo procura aislar adecuadamente los intervalos productivos denominados Fm. Avilé, Fm. Agrio Superior y Fm. Troncoso Inferior. La profundidad final de los pozos varía entre 1300 y 1500 m y la altura de los anillos de cemento oscilaban en promedio entre 200 m y 300 m.

Los trabajos de cementación consistían en el bombeo de un colchón de 50 bbl de gasoil, 39 bbl de lechada removedora de densidad 1,35 g/mL y una lechada principal de tipo convencional, de densidad 1,870 g/mL, aditivada para tener muy bajo filtrado y una bombeabilidad entre 180 y 200 minutos. Más detalles de sus propiedades se encuentran en la tabla 1 (lechada A).

En este tipo de cementaciones los gradientes dinámicos máximos en el tope de Troncoso Inferior eran de 0,54 psi/ft (12.2 kPa/m). Los resultados de los trabajos eran sistemáticamente buenos.

### **Necesidad de anillos mas altos por nuevas zonas de interés**

A mediados del año 2001, se planteó la necesidad geológica de aislar con cemento un intervalo mucho más largo que el usual, cubriendo las formaciones “Rayoso Clástico” y “Rayoso Evaporítico” además de las nombradas anteriormente. Esto trajo como consecuencia levantar anillos de cemento cuya altura variaba entre 600 y 800 m, con la restricción de no superar gradientes dinámicos de 0.54 psi/ft (12.2kPa/m) en el tope de la formación Troncoso Inferior (aproximadamente en 1000 m de profundidad).

Para afrontar esta necesidad se estudiaron diversas alternativas con un simulador de resistencia del cemento (referencias 1 y 2), teniendo en cuenta la necesidad de fracturar las formaciones como parte de la terminación. Como resultado del análisis, se decidió el empleo de lechadas alivianadas con un aditivo multipropósito (AMP), que es un silicato de aluminio reactivo de origen mineral y procesado, cuyo empleo en lechadas de cemento ofrece varios beneficios:

- Reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante el proceso de hidratación del cemento, formando aluminato de calcio y silicato de calcio, productos que aceleran la fase de adherencia de la matriz del cemento, o sea provee desarrollo temprano de resistencia.
- Incrementan significativamente la resistencia final de las lechadas para iguales condiciones de densidad y relación de agua..
- En particular, mejoran las resistencias a la tracción (RT) y flexión (RF) del cemento, produciendo un fragüe mas elástico y dúctil del mismo (referencia 3)
- Limita la reacción álcali-sílice provocando un incremento de la resistencia a los sulfatos.
- Contribuye al control de filtrado en lechadas livianas (extendidas)
- Ayuda a minimizar la migración del gas a través de la matriz del cemento permitiendo una aislación hidráulica.

Se ensayaron distintas lechadas en laboratorio y la que cumplió con las propiedades requeridas, con una densidad de 1.65 g/mL, se utilizó con éxito en varios pozos del yacimiento. Con este tipo de diseños se dejó de exagerar la importancia de la resistencia a la compresión (RC) del cemento, dando relevancia a las ideas renovadoras de utilizar cementos con buenas propiedades mecánicas. En otros términos, el concepto de cemento “flexible”, donde no se pone énfasis en valores absolutos de resistencia sino en mayores relaciones RT/RC y RF/RC, además de buenas propiedades elásticas (bajo módulo de Young) (referencias 1, 2 y 3). Las propiedades más importantes de la lechada empleada se resumen en la Tabla 1 (lechada B). Nótese por ejemplo las mejores relaciones RT/RC, RF/RC y menor módulo de Young.

En el análisis con simulador de esfuerzos durante la vida del pozo, se encontró que el cemento fraguado, de menor resistencia pero más elástico que la lechada convencional, soportaba holgadamente un tratamiento de fracturación hidráulica tanto en la propia zona productiva como en las barreras por encima y debajo de la arenisca.

Esta lechada liviana no sólo ofreció mejores propiedades y la solución del problema de levantar anillos más altos, sino que también resultó más económica que la lechada convencional (hasta diciembre de 2001, según se analiza más adelante). Evaluando además los resultados obtenidos en los trabajos que empleaban lechadas alivianadas utilizando AMP, se concluyó que la mejor alternativa técnico - económica era seguir empleando este tipo de lechadas en la cementación de pozos “tipo” del yacimiento, aún cuando no se requiriera menor densidad.

### **Aparición de pérdidas severas de circulación: colchones y lodo espumados con nitrógeno**

Un nuevo desafío que se sumó a la necesidad de anillos de cemento largos, fue la aparición de algunos pozos con pérdidas severas de circulación en el tramo intermedio del anillo de cemento requerido. Esto hizo que inicialmente se utilizaran dispositivos de cementación en dos etapas y en

algunos casos el uso de packers inflables debajo de los dispositivos para aislar mecánicamente una etapa de la otra.

El uso de esta técnica incrementó el costo de la perforación (costo del dispositivo de segunda etapa y horas extras de equipo y servicios) y de la terminación (tiempo de rotación del dispositivo). El empleo del dispositivo también representaba un elemento adicional de posible falla durante la operación.

Para simplificar la cementación primaria, realizarla en una sola etapa y reducir los costos se resolvió emplear una lechada de 1,65 g/mL como la descrita en el punto anterior, acompañada por el empleo de colchones espumados con nitrógeno. Con el fin de bajar significativamente el gradiente de presiones, la cantidad de nitrógeno agregado a los colchones mientras son bombeados es de 100 scf/bbl ( $180 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) a 150 scf/bbl ( $270 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ). En el programa de colchones espumados se incluyó también el uso de un colchón obturante basado en fluidos reactivos que disminuyen la permeabilidad de las zonas ladronas.

Hubo casos aún más difíciles, en los cuales la zona de pérdidas de circulación fue obturada durante la perforación pero luego las admisiones se produjeron nuevamente al iniciar la circulación previa a la cementación con el casing en el fondo. Estas situaciones se salvaron aliviando con nitrógeno también el lodo de perforación y recuperando la circulación antes de comenzar la operación de cementación.

A título de ejemplo, para la cementación del pozo ET-428 se realizaron, en estrecha colaboración entre los ingenieros de perforación de la compañía operadora y los representantes de la compañía de servicios, simulaciones minuciosas del trabajo empleando alternativas de colchones y/o lodo espumado. Los resultados obtenidos, que se detallan en la tabla 2 mostraron que en esta operación el gradiente de presiones máximo en el zapato durante la operación de cementación no superó 0,49 psi/ft (11.1 kPa/m).

Para facilitar la estabilidad de lodo nitrogenado y colchones espumados se realizaron en laboratorio los ensayos necesarios para identificar aditivos espumígenos que satisfagan las necesidades mínimas para el lodo de perforación (emulsión inversa) y también los colchones empleados.

Debe destacarse que otra de las opciones consideradas para resolver los problemas de pérdidas severas de circulación sin necesidad de recurrir a dispositivos de doble etapa fue el empleo de cemento espumado. Sin embargo se concluyó que no era la alternativa más apropiada en la situación a atender (no se levanta anillo de cemento hasta superficie). El cemento espumado requiere que se coloque por encima una lechada “casquete” (cap slurry) no espumada o algún medio equivalente (colchón muy viscoso por ejemplo) para mantener la estabilidad termodinámica y que el nitrógeno no pierda el equilibrio y se escape por desbalance de presiones (independientemente de aditivos estabilizadores (ver referencia 4, por ej.). La presencia de una lechada “casquete” aumenta la presión hidrostática a punto tal que demanda densidades muy bajas de cemento espumado en las condiciones de los pozos en análisis, con resultados de reducir su competencia para aislar y resistir los esfuerzos posteriores a que se verá expuesto el cemento (incluyendo la fraturación hidráulica como parte de la terminación). A esto hay que añadir que una operación con cemento espumado es de ejecución más compleja con varios factores adicionales que siempre son potenciales causas de fracaso. Se debe señalar, a este respecto, que si el objetivo hubiera sido levantar anillo de cemento hasta superficie el uso de cemento espumado podría ser una alternativa con más probabilidades de aplicación.

En síntesis, amén del empleo de lechadas livianas de nuevo tipo, el espumado de colchones y la nitrogenación del lodo representó una alternativa sencilla, de ejecución controlable, que permitió un significativo ahorro al evitar el empleo de dispositivos de segunda etapa con los costos directos e indirectos asociados. La calidad del cemento logrado continuó siendo excelente.

### **Pérdidas severas acompañadas por presiones porales altas en las zonas superiores.**

Debido a que el yacimiento está en un proceso de inyección de agua, hay zonas en que el nivel de Troncoso Inferior presenta gradientes de presión poral mayores que los promedios para la zona (mayores incluso que los originales). Esto resulta en que en algunos pozos el uso de colchones espumados haga que la presión anular sea muy cercana a la poral en el momento que los colchones pasan frente a esta zona.

Existía así el potencial de que durante la cementación se produjeran problemas de desbalance frente a las zonas presurizadas (ingreso de agua o de hidrocarburos). El posible ingreso de agua al anular incrementaría la presión hidrostática, reduciendo la efectividad de alivianar colchones con nitrógeno. En consecuencia se contemplaron diversas alternativas de diseño para evitar el empleo de cementación en dos etapas y el uso de colchones espumados.

Dados los excelentes resultados de la lechada B (uso de AMP), se decidió disminuir aún más la densidad hasta 1,51g/mL incrementando la concentración de AMP y utilizando micro esferas cerámicas (MEC).

El uso de MEC como alivianante adicional, cuya densidad es de sólo 0,7 g/mL, permite lograr muy bajas densidades de lechada manteniendo la posibilidad de control de filtrado, reología y otras propiedades sin el exagerado uso de los aditivos correspondientes. El empleo de MEC está especialmente recomendado para los trabajos donde se requieran bajos valores de presión en el anular y buenos valores de resistencia. El diseño completo de lechada, que incluye aditivo multipropósito AMP, resulta también en cemento fraguado de características flexibles y dúctiles para soportar adecuadamente los esfuerzos a que se verá sometido el pozo durante su vida útil según se comentara en una sección anterior. Las propiedades de la lechada se detalla en la Tabla 1 como lechada C. Se aprecian también en este caso las mejores propiedades de flexibilidad y elasticidad del cemento, que permiten resistir adecuadamente los esfuerzos de una fractura hidráulica según se analizó con el simulador correspondientes.

Con esta lechada se pudo cementar con éxito este tipo de pozos demandante, sin recurrir a operación en dos etapas, utilizando colchones convencionales (sin nitrógeno) y así mantener durante toda la operación de cementación el gradiente de presión en el anular dentro del estrecho margen entre el gradiente de fractura en zonas débiles (a mayor profundidad) y el gradiente de presión poral en zonas presurizadas (en formaciones más someras).

Corresponde señalar que el empleo de MEC incrementa los costos de lechada, aunque no tanto como si se empleara sin el AMP para obtener la misma densidad. Sin embargo, este incremento de costo está sobradamente compensado por el ahorro que representa realizar el trabajo en una sola etapa según se expresó anteriormente.

Como ejemplo de los excelentes resultados típicos obtenidos en la cementación, fueren cuales fueren las condiciones del pozo, la figura 2 muestra un tramo del registro de cemento del pozo ET-520, correspondiente a la formación Troncoso y la anhidrita que tiene por encima, unos 100 m por debajo del tope de cemento solicitado. El trabajo fue realizado con una lechada muy liviana como la descrita en esta sección (microesferas cerámicas y aditivo multipropósito) y empleando un programa de colchones nitrogenados. Obsérvese en el registro la claridad de la respuesta de formación en la pista de densidad variable, que evidencian una excelente adhesión cemento/formación (las huellas paralelas cuasi-rectas son típicas de la anhidrita).

Como una alternativa extra ante los severos problemas de pérdidas de circulación que se manifestaron en algunos pozos del yacimiento, se ensayó una lechada todavía más liviana con el empleo de MEC en conjunto con el AMP en mayores proporciones, lográndose muy buenas propiedades con densidad de 1,38 g/mL. Las características se detallan en la tabla 1 (lechada D)

En todos los casos señalados hasta ahora, para el diseño de la operaciones se recurre en forma sistemática a la simulación con software apropiado donde se busca lograr un adecuado control de las presiones durante toda la operación. En este sentido se simulan a menudo diversas opciones para evaluar en cada caso la mejor forma de realizar el trabajo.



## **Reducción del costo de lechadas con AMP nacional**

Motivados por el interés de obtener siempre la mejor ecuación técnico - económica para los trabajos desarrollados en el yacimiento, y como consecuencia de la situación económica iniciada en diciembre de 2001 en la República Argentina, se desarrollaron materiales de origen nacional para el reemplazo de similares importados. En otros términos se procuró relativizar el costo de productos importados con respecto a la tasa de cambio con el dólar, lo que generó un impacto inmediato en los costos de las operaciones. En aquel momento el ítem de mayor impacto en el costo del servicio de cementación pasó a ser el costo del aditivo AMP de origen importado.

En consecuencia se destinó un esfuerzo significativo para buscar una alternativa nacional. Con este fin se investigaron diversas alternativas de minerales que por su composición química permitieran un procesamiento práctico (para no incrementar costos excesivamente) y resultara en un silicato de aluminio de propiedades similares al AMP importado. Tras un prolongado programa de pruebas en el Laboratorio Regional de la compañía de servicios, y el soporte del Laboratorio Central Corporativo, se definió un sustituto similar al AMP: aditivo multipropósito nacional (AMPN). Este material posee similares efectos al AMP en todos sus aspectos: facilidad para diseño de lechadas livianas de filtrado controlado, ayuda en control de gas, etc. En especial, otorga propiedades mecánicas superiores al cemento fraguado que ofrecen mejor resistencia a los esfuerzos a que se verá sometido el cemento, comenzando por la fracturación hidráulica, de modo de prolongar su vida útil.

La única diferencia significativa entre ambos aditivos multipropósito es el costo: el AMPN cuesta un 53 % menos que el AMP.

La lechada E en la tabla 1 muestra las principales propiedades de un ejemplo de formulación con este aditivo, del tipo más empleado actualmente en el yacimiento. Nótese la similitud de propiedades con las de la lechada B, preparada con AMP importado.

## **Evolución de los programas de colchones**

Al igual que el caso del cemento, ha habido una evolución en los programas de colchones empleados para limpiar el lodo emulsión inversa del anular y preparar el mismo para posteriormente alojar la lechada de cemento, amén de la nitrogenación ya discutida para circunstancias especiales.

Durante muchos años se empleó una secuencia de 50 bbl (8 m<sup>3</sup>) de gasoil seguidos de 39 bbl (6,2 m<sup>3</sup>) de lechada removedora de densidad 1,35 g/mL según fuera antes descripta. El objetivo era diluir con el gasoil la emulsión inversa y remover los residuos oleosos que el lodo inverso deja en las paredes del pozo. La función de la lechada removedora era realizar una limpieza mecánica adicional, actuar como espaciadora, prevenir problemas de incompatibilidad con el cemento y acuahumectar dentro de lo posible las paredes del pozo antes de la colocación de la lechada principal. La buena calidad del cemento obtenido avalaba el empleo de este programa de colchones.

Sin embargo, en un intento por reducir las posibles causas de daño durante la perforación y terminación del pozo, siguiendo instrucciones de un experto de la compañía operadora, se investigaron en el laboratorio con ensayos especiales diversas posibilidades. Como resultado, se adoptó un nuevo programa de colchones consistente en un colchón mecánico (gasoil gelificado) y un espaciador turbulento consistente en una emulsión de fase externa acuosa y cuya fase interna (oleosa) estaba compuesta por gasoil y solvente aromático (xileno-tolueno); surfactantes apropiados dan estabilidad a la emulsión y acuahumectan las paredes (en la medida de que ello es posible en presencia de solvente aromático).

Con el objeto de reducir el impacto ambiental, minimizar los riesgos de seguridad asociados al empleo y manipulación de fluidos base gasoil y especialmente solventes aromáticos, reducir los costos operativos y basados en los resultados de laboratorio de remoción y compatibilidad de fluidos de perforación, colchones y lechadas de cemento, se recomendó el empleo de un novedoso tipo de colchón químico. La base de esta nueva tecnología es un material biodegradable, no tóxico (MBNT) que constituye una alternativa a los solventes (especialmente aromáticos). Es un material basado en terpenos con el agregado de un paquete de surfactantes amigable con el ambiente. El colchón químico se puede formular con concentraciones variables de MBNT (2 a 6 % típicamente)

según ensayos de eficiencia de limpieza sobre muestras del lodo a tratar. Con frecuencia, no requiere el empleo de surfactantes adicionales para una adecuada limpieza y compatibilidad. Además, no tiene el riesgo para la salud del personal de operaciones asociado al empleo de aromáticos.

Así, el programa de colchones actualmente empleado consiste en un pequeño volumen de gasoil, con el objeto de diluir el lodo de perforación, seguido de un volumen de colchón químico base MBNT. Como características importantes, ayuda a dejar la paredes del pozo fuertemente acuohumectadas lo que contribuye al éxito de la cementación. No ocurre lo mismo con fluidos que contienen solventes aromáticos. El sistema es compatible con los fluidos presentes en el pozo y no causa emulsiones. Otro punto importante a tener en cuenta es que durante el bombeo de este nuevo colchón químico (no inflamable), se puede reciprocarse la cañería ya que no se estaría bombeando fluido base petróleo.

Es importante resaltar que el nuevo programa de colchones empleado reemplazó con idéntica excelencia (en cuanto a limpieza del espacio anular) a los programas previamente utilizados, con la ventaja de no contener solventes aromáticos y resultar por lo tanto muy superior desde el punto de vista de preservación de la salud, protección del medio ambiente e incremento de la seguridad en las operaciones y en el manipuleo, tanto en locación por parte del personal de la compañía de servicios de bombeo como en el retorno por anular por parte del personal de la compañía perforadora.

No deja de ser importante también la mención de que se obtuvo una importante reducción del costo del programa de colchones. Contribuye a ello el costo reducido del MBNT que es producido en el ámbito del MercoSur por la compañía de servicios de bombeo. Para tener una idea del impacto económico del nuevo programa de colchones (base MBNT), teniendo en cuenta costos de cemento, productos, gasoil, etc., hay que señalar una comparación de costos relativos de los diferentes programas es la siguiente:

- Secuencia convencional gasoil seguido de lechada removedora: costo usado como base 100
- Secuencia gasoil gelificado seguido de emulsión turbulenta: costo relativo 212 (112 % de incremento)
- Secuencia volumen reducido de gasoil seguido de colchón químico base MBNT: costo relativo 87 (13 % de reducción)

### **Pérdidas severas de circulación durante la perforación**

Se han presentado, en diversas oportunidades, casos de pozos con pérdidas severas de circulación que se tornaron totales en ciertas profundidades. El empleo de materiales para pérdidas de circulación convencionales no dio resultados en el control de pérdidas.

La compañía de servicios de bombeo ofreció un sistema extremadamente efectivo para este tipo de situaciones, de acuerdo a numerosas aplicaciones exitosas en todo el mundo. Sin embargo, uno de los componentes del sistema es particularmente costoso (importado).

Se inició un estudio en laboratorio de posibles alternativas, basadas en el empleo de cemento Portland. El sistema finalmente propuesto consiste básicamente en una lechada de cemento, que contiene además un polisacárido que se puede reticular al alto pH de la lechada con un complejo órgano-borato. Este fluido reduce rápidamente la admisión de la zona ladrona una vez que se introduce en ésta, y gradualmente incrementa su consistencia con el tiempo hasta que se logra un mínimo fragüe que permite detener, o al menos reducir significativamente, las pérdidas totales. La velocidad de espesamiento es ajustable por medio de aditivos y la efectividad se puede mejorar con la incorporación de materiales para control de pérdidas convencionales (por ejemplo mica). Dado el mínimo fragüe que se produce, el remanente que queda en el pozo es muy rápidamente “rotado” para continuar con la perforación del tramo.

Al momento de redactar este trabajo, el sistema ya se había aplicado satisfactoriamente en dos pozos.

## **Futuro**

Aún con estos resultados exitosos, la cementación primaria continúa planteando desafíos. Tal el caso de pérdidas de circulación durante la perforación o la necesidad de columnas de cemento más altas que requieren modificar sustancialmente los programas usuales, situaciones para las que ya se cuenta con alternativas aún no empleadas (por ejemplo lechadas aún más livianas). Otro desafío es la permanente necesidad de minimizar el impacto ambiental de materiales e incrementar más la seguridad. Además, siempre tiene vigencia la optimización técnica y la reducción de costos.

En este sentido, continúa en marcha el ajuste de la química del sistema para obturación de pérdidas severas de modo de incrementar más aún su efectividad y ampliar el rango de aplicación.

Por otro lado se ha contemplado la posibilidad del reemplazo de las MEC utilizadas en las lechadas de cemento más livianas, cuyo costo de uso es elevado. Está en ejecución el estudio de formulaciones con productos de origen local que pueda reemplazar con similar efectividad y costos competitivos el material de origen importado. Ya se han identificado posibilidades muy prometedoras, al punto de que se considera que el proyecto se encuentra en la etapa de ensayos finales de laboratorio y próximo a la primer prueba de campo..

## **Conclusiones**

1. La optimización permanente, entendida como revisión continua de diseños y la aplicación de las técnicas y tecnologías más apropiadas, ha permitido resolver satisfactoriamente múltiples desafíos para las cementaciones de aislación que han aparecido en los últimos años, al par de reducir los costos e incrementar la seguridad y la protección de la salud y el ambiente.
2. El proceso de optimización requiere la estrecha colaboración e interacción entre los especialistas de perforación de la compañía operadora y los representantes técnicos de la compañía de servicios. El trabajo en equipo para el análisis de problemas, incluyendo el estudio de posibilidades alternativas con simulador de la operación, permite encontrar soluciones más prácticas y efectivas para cada situación en concreto, como es el caso del empleo del nitrogenado de colchones y/o lodo en vez del empleo de lechadas espumadas.
3. Las soluciones obtenidas han requerido el abandono del paradigma de la alta resistencia a la compresión, para sustituirlo por el énfasis en cementos más flexibles, dúctiles asociados a las propiedades que realmente importan para soportar satisfactoriamente los distintos tipos de esfuerzos. Más que los valores absolutos de resistencias, importa obtener buenas relaciones entre resistencias a la tracción y flexión comparadas con la resistencia a la compresión. En otros términos, buenas propiedades elásticas (por ejemplo menores módulos de Young).
4. El uso de un simulador apropiado facilita tanto el proceso de diseño de lechadas (disminuye el sustancial esfuerzo destinado a ensayos de laboratorio) como el análisis de los esfuerzos a que se verá sometido comparados con las propiedades del cemento.
5. La aplicación de un nuevo tipo de aditivo multipropósito ha facilitado la obtención de soluciones costo-efectivas para los diversos retos planteados por la cementación.
6. Se ha reemplazado el uso de programas de colchones convencionales, con fluidos que atentan contra la salud, el ambiente y la seguridad sobre la base de la introducción de un material biodegradable, no tóxico empleado en colchones base agua, con menores costos que los programas anteriores y manteniendo la muy buena calidad de resultados.
7. La búsqueda de alternativas locales para materiales y sistemas de alto impacto en el costo ha permitido el desarrollo de materiales y sistemas locales con resultados muy buenos, similares a los obtenidos con materiales importados (caso aditivo multipropósito) o con efectividad satisfactoria (sistema original local para obturación de pérdidas).

## **Reconocimientos**

Los autores desean expresar su reconocimiento a Chevron San Jorge S.R.L. y a BJ Services S.A. por el permiso de publicar este trabajo. El agradecimiento también se extiende a todas las personas que colaboraron en el extenso trabajo de laboratorio, que realizaron los diseños y el



análisis de alternativas, como así también al personal de las distintas Compañías que con diligencia participaron en los trabajos de campo.

**Referencias:**

1. Di Lullo, G. y Briggiler N.; “Simulador de resistencia del cemento, incluyendo propiedades mecánicas en el diseño para reducir costo de perforación”, Congreso Producción 2000, Puerto Iguazú, Argentina, mayo 2002
2. Di Lullo, G. y Rae, , “Cements for Long Term Isolation – Design Optimization by Computer Modelling and Prediction”, IADC/SPE 62745, Kuala Lumpur, Malasia, Septiembre 2000. Resumen publicado en JPT, Agosto 2001.
3. Mueller, D. “An Evaluation of well cements for use in High Stress Environments”, Hart’s Petroleum Engineer International, abril 1998
4. Briggiler, N.; “Diseño de cementaciones con espuma de nitrógeno”, Primer Simposio Argentino de Cementación de Pozos, Comodoro Rivadavia (Argentina), 1985.

**TABLA 1: PROPIEDADES DE LECHADAS Y CEMENTO FRAGUADO**

<b>Lechada</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
Densidad, g/mL	1,87	1,65	1,51	1,38	1,65
Temperatura estática de fondo, °C	60	60	60	60	60
<b>Composición</b>					
Cemento	Clase G	Clase G	Clase G	Clase G	Clase G
Reductor de filtrado PVA, %	0,7	1,2	1,2	1,2	1,2
Dispersante, %	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Reductor de filtrado CMHEC, %	0,1	-	-	-	-
CaCO <sub>3</sub> (agente de puenteo), %	4,0	-	-	-	-
Antiespumante, %	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Extendedor químico	-	0,8	1,0	1,0	1,0
AMP (aditivo multipropósito), %	-	5,0	8,0	15,0	-
MEC (microesferas cerámicas), %	-	-	8,0	24,0	-
AMPN (AMP nacional), %	-	-	-	-	6,0
Relación Agua/Cemento, %	47	76	90	105	76
Rendimiento, L/bolsa <sup>(1)</sup>	40,7	55,7	69,1	83,3	56,0
<b>Costo relativo lechadas (lech.A=100)<sup>(2)</sup></b>	100	100,9	116,0	134,0	92,9
<b>Propiedades lechada</b>					
Agua libre, cm <sup>3</sup>	0	0,2	0,15	0	0,4
Reología	Media	Baja	Baja	Media	Baja
Filtrado, cm <sup>3</sup> /30 min	21	23	15	80	34
Tiempo de espesamiento, min	360	180	210	265	170
<b>Propiedades mecánicas cemento</b>					
Resistencia a la compresión 24 h, psi	3000	2240	1340	1020	2120
Resistencia a la compresión 48 h, psi	3400	2930	2400	1770	2950
Resistencia a la tracción estim., psi	410	370	310	230	380
Resistencia a la flexión estim, psi	1010	960	790	590	990
Módulo de Young, Mpsi	1.07	0.94	0,80	0.63	0,95
Relación de Poisson, adim.	0.21	0.22	0.23	0.23	0.23
Relación RT/RC, adim	0.121	0.126	0.129	0,130	0.129
Relación RF/RC, adim	0.297	0.328	0.329	0,333	0,336
Amplitud CBL estimada, mV	6.1	6,8	8.0	10,2	6,8

Notas a la Tabla 1:

- (1) Equivalencias con unidades SI se indican después de la tabla 2 para simplificar la presentación
- (2) El costo relativo toma como base 100 el de la lechada más o menos “tipo”, convencionalmente empleada en el yacimiento. Se calcularon a costos actuales, sin tener en cuenta la variación de costos relativos previa a diciembre 2001, fecha a partir de la actual se modificó sustancialmente la incidencia de algunos componentes.

**TABLA 2: GRADIENTES DE PRESIÓN ESPUMANDO COLCHONES Y/O LODO**

	Alternativas analizadas		
	Espumando lodo y colchón	Espumando sólo lodo	Espumando sólo colchón
Gradiente de presión en el zapato (1200 m) , circulación previa a cementar.	0.560 psi/ft	0.560 psi/ft	0.560 psi/ft
Gradiente de presión en el zapato (1200 m) al final de desplazamiento de cemento	0.487 psi/ft	0.566 psi/ft (el lodo espumado sale totalmente del pozo)	0.487 psi/ft (los colchones espumados permanecen en el en el pozo)
Densidad de lechada usada	1.650 g/mL	1.650 g/mL	1.650 g/mL

Nota : Equivalencias con unidades SI se presentan en la tabla de equivalencias indicada a continuación para simplificar la presentación

**Factores de conversión SI (International system of Units)**

L/bolsa	x	2.0 E-02	=	L/kg
pulgada	x	2.54 E+00	=	cm
psi	x	6.895 E-04	=	kPa
psi/ft	x	2.262 E+01	=	kPa/m
Mpsi	x	6.895 E-04	=	MPa

**FIGURA 1: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA TÍPICA POZOS EL TRAPIAL**

TOPS (m)	UNITS	TARG.	CASINGS DESIGN
393,0	Nouquen Group	P	1
463,0	Clartie Payara		
557,0			
299,0	Yellow Section		
786,0			
70,0	Evaporitic Payara	P	
917,0			
-61,0	La Tarca		
943,0		P	
-87,0	Upper Trancara		
1006,0		P	
-150,0	Lower Trancara		
1028,0		P	
-172,0	Upper Aquia		
1321,0		P	
-465,0	Avile		
1344,0		P	
-488,0	Lower Aquia		
1390 m	TD		2
CASING DESIGN:		Hole	
1. 9 5/8" @ 130 m		1. 12 1/4" Bit	
2. 7" @ 1390 m		2. 8 3/4" Bit	

