

EXPERIENCIAS EN EL USO DE SISTEMAS POLIMÉRICOS EN AISLACIÓN DE POZOS

L. García Eiler¹, luciana.garciaeiler@ypftecnologia.com; S. Rivelli Lavallen¹, sofia.rivelli.l@ypftecnologia.com; M. Sanz¹, manuel.r.sanz@ypftecnologia.com; L. Sanz¹, leandro.a.sanz@ypftecnologia.com; M. Mucci¹, marcela.mucci@ypftecnologia.com; W. Morris¹, walter.morris@ypftecnologia.com. L. Arribillaga², lucas.m.arribillaga@ypf.com y J. Gimutky², jose.gimutky@ypf.com

¹ YPF Tecnología S.A.

² YPF S.A.

Sinopsis

La cementación de pozos *O&G* tiene como función principal proporcionar un sello hidráulico para reestablecer la aislación de los estratos contactados durante la perforación. De esta forma se impide la comunicación de fluidos entre las zonas productivas del pozo evitando la migración no controlada de hidrocarburos hacia la superficie. Además, esta operación tiene como objetivo brindar estabilidad mecánica a las cañerías de entubación (*casing*) y protegerlas contra la corrosión.

Históricamente se han empleado lechadas de cemento Portland para la aislación de pozos. Conforme se complejizaban los requerimientos en la cementación, estas lechadas se han optimizado mediante la incorporación de aditivos o bien, modificando el cemento base; sin embargo, en muchos casos las soluciones planteadas no han permitido garantizar una correcta aislación en escenarios complejos.

En la actualidad, se presentan desafíos tecnológicos que impulsan la búsqueda y/o el desarrollo de materiales alternativos que permitan lograr aislaciones efectivas y duraderas bajo condiciones cada vez más críticas. En los últimos años, se ha trabajado en el diseño de materiales poliméricos que permiten generar barreras efectivas, reduciendo los fenómenos de comunicación entre punzado, microanillos y presión anular sostenida (PAS) asociada a fallas en la cementación. Dichos sistemas presentan mejores propiedades mecánicas (elasticidad, tenacidad y adherencia), reologías adecuadas, y tiempos de bombeabilidad y densidades ajustables a los requerimientos de cada aplicación.

Las tareas iniciales consistieron en la búsqueda de sistemas poliméricos y su evaluación, siguiendo los lineamientos de la norma API 10B para cementos. Se caracterizaron los materiales a partir del diseño de experimentos ad-hoc y de ensayos propuestos por normas para evaluar materiales alternativos orientados al abandono de pozos de *O&G*. En la segunda etapa, se realizaron pruebas a escala taller y campo para ajustar procedimientos operativos, incluyendo pruebas de presión, de mezcla y bombeo, con mixer de cementación, y equipo diseñado para remediación de anulares.

Hasta hoy, se han realizado más de diez operaciones de campo que permitieron validar la tecnología. Entre dichas aplicaciones se pueden destacar las aislaciones primarias tipo *BullHeading*, remediaciones de anulares con PAS y reparación de cabezales. En el presente trabajo se exponen las lecciones aprendidas durante el proceso de implementación y optimización de sistemas poliméricos utilizados para reestablecer la aislación de las barreras de pozos NoC y Convencionales.

Compartir estas experiencias podría servir como base para otros desarrollos, además de impulsar el uso de esta tecnología en nuevas aplicaciones.

Introducción

Una de las operaciones más críticas durante la etapa constructiva de un pozo petrolero y/o gasífero es la cementación de las cañerías de entubación. Esta actividad tiene por objetivo brindar un sello hidráulico entre los diversos estratos perforados y el pozo, con la finalidad de impedir la comunicación no deseada de los fluidos e impartir estabilidad mecánica al pozo ^[1].

Desde hace más de un siglo se utilizan lechadas de cemento Portland para aislar zonas en pozos petroleros y, desde entonces, se ha convertido en el material más utilizado en la cementación de pozos. Conforme aumentó la criticidad de las operaciones de cementación, se requirió mayor flexibilidad en el rendimiento del material a utilizar, por ello, se crearon distintas clases de cementos y variedad de aditivos ^[2]. En los últimos años han aparecido antecedentes donde se incorporan resinas, principalmente epoxis y látex, a las lechadas de cemento para conferirle al compuesto mejores propiedades mecánicas, de adherencia y consolidación de formaciones ^[3]. A pesar de la aparición de nuevos materiales, los sistemas utilizados en la completación de pozos petroleros siguen manteniendo al cemento Portland como el componente base de la operación. Sin embargo, conforme se ha avanzado en el desarrollo de materiales poliméricos, su aplicación como material de aislación en pozos se ha ido extendiendo ^[4].

En línea con lo expuesto, se han desarrollado sistemas poliméricos que cumplen los requerimientos para ser utilizados como material de sello en diversas aplicaciones de la industria. En el presente trabajo se exponen tres casos de estudio vinculados a diversas aplicaciones para este tipo de sistemas.

Objetivo

El objetivo del presente trabajo radica en detallar las lecciones aprendidas durante los procesos de prueba, implementación y optimización de sistemas poliméricos, empleados para generar o reestablecer la hermeticidad de las barreras de pozos NoC y Convencionales.

Desarrollo de formulaciones

A lo largo del proyecto se evaluaron matrices poliméricas de diferentes naturalezas y diversos aditivos, entre los que se pueden indicar modificadores reológicos y *fillers*.

Contemplando los requerimientos de las operaciones, factores técnico-económicos y performance de los materiales obtenidos, se seleccionaron los sistemas base epoxi densificados y base polibutadieno, como formulaciones óptimas a nivel laboratorio con el fin de poder avanzar con pruebas a mayor escala.

La caracterización completa de la formulación E14,8 (base epoxi densificada), a escala laboratorio, se realizó siguiendo los lineamientos de la norma API 10B y de normas internacionales que contemplan la utilización de materiales alternativos como barrera. En el *paper Rivelli et.al.* ^[5] se presentan los resultados obtenidos a nivel laboratorio, los cuales se sintetizan en las Tablas 1 y 2.

Propiedades bajo norma API 10B		Formulación
		E14,8
Densidad	g/cm ³	1,77
Consistencia inicial	Bc	22
Tiempo de bombeabilidad	min	142
Viscosidad a 25°C	cP	308,9
Viscosidad a 60°C	cP	165,6
Sedimentación	%	0,5

Tabla 1. Propiedades más relevantes de la formulación E14,8 determinadas bajo norma API 10B. ^[5]

Propiedades mecánicas		Formulación		
		EP	E14,8	Cemento 14,8
Ensayo de tracción				
Módulo de Young	psi	$15,7 \times 10^3 \pm 3,5 \times 10^3$	$3,7 \times 10^3 \pm 0,3 \times 10^3$	$4,2 \times 10^6 \pm 0,5 \times 10^6$
Resistencia a la tracción	psi	1650 ± 69	384 ± 20	253 ± 20
Deformación última	%	$46,0 \pm 3,8$	$16,0 \pm 0,5$	.
Ensayo de compresión				
Resistencia a la compresión	psi	$14,5 \times 10^3 \pm 870$	2441 ± 196	2520 ± 20
Deformación última	%	$57,0 \pm 4,0$	$33,0 \pm 4,0$	$1,8 \pm 0,1$
Ensayo de adherencia				
Resistencia a la adherencia por corte	psi	1409	278	-

Tabla 2. Resultados de ensayos de propiedades mecánicas de las formulaciones de interés. ^[5]

Considerando los resultados obtenidos en laboratorio, se avanzó con las pruebas en taller para validar la eficiencia de la tecnología a una mayor escala y en diferentes aplicaciones, que se detallan en los casos de estudio presentados a continuación.

Caso de estudio #1- Remediación de cabezales

Pruebas de patio

Como se explicará en la sección Operación en campo de este apartado, en la primera intervención realizada se utiliza la resina epoxi pura (EP) sin agregado de cargas ni extendedor, debido a sus

propiedades mecánicas y de adherencia. A partir de los resultados obtenidos, se realiza el análisis y se plantea una hipótesis de falla, la cual sirve de disparador para diseñar formulaciones que pueden garantizar la eficiencia de sello buscada.

Con el objetivo de validar estas formulaciones, previo a la intervención en el pozo, se realizan pruebas de taller simulando las condiciones de sello interno requeridas para remediar la fuga del pozo RC1. Estas pruebas se realizaron en las instalaciones de una compañía proveedora de productos y servicios.

Para llevarlas a cabo, se confeccionan dos probetas utilizando *Pup Joint* de 2^{7/8}”, en las que se vierte sistema de resina generando un tapón interno (Figura 1). Se evaluaron dos configuraciones, en la primera un tapón de resina base epoxi y en la otra un tapón colado en tándem de un sistema base epoxi seguido de una formulación base polibutadieno.



Figura 1. Probetas para prueba de patio remediación de cabezales.

Para la ejecución de las pruebas de presión se coloca una tapa de árbol de surgencia de 2^{9/16}” en un extremo de la probeta. El otro queda libre y sellado con el tapón de resina (Figura 2).



Figura 2. Probeta con conexión para presurización.

Se conecta una línea de agua a presión mediante un acople en el árbol de surgencia. Se purga y se presuriza escalonadamente a intervalos de 500 psi, los cuales permanecen constantes por 3 minutos. Las presiones máximas registradas para las probetas con sistema epoxi y con la combinación de materiales fueron 2400 psi y 3200 psi, respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos se decide intervenir el cabezal del pozo RC1 con la configuración que contempla la combinación de ambos sistemas.

Operación en campo

Como consecuencia de la presencia de fugas en el colgador de casing de 5^{1/2}” en el cabezal del pozo RC1, se solicita la búsqueda de una solución a esta problemática. A partir de un análisis técnico- económico, se decide avanzar con la colocación de un tapón con resina en la sección B. Inicialmente se plantea, para esta operación, la utilización de la resina epoxi pura (EP) sin

agregado de cargas ni extendedor, debido a sus propiedades mecánicas y de adherencia. A continuación, se detalla el procedimiento operativo empleado:

1. Se controla la presión de pozo y se verifica que este se encuentre sin presión.
2. Se destorqua la sección C, se retira de la bodega y se realizan tareas de limpieza de la sección B (anular).
3. Se coloca el niple, la reducción y se completa el nivel de fluido en la sección A.
4. Se formula el sistema polimérico mezclando los dos componentes en proporciones adecuadas hasta obtener un sistema homogéneo.
5. Se vierte en la sección B (anular) dejando en reposo por dos horas. Se retira el empaquetador de 5^{1/2}" de la sección C.
6. Se monta la sección C y se espera el fragüe de la resina.

Posteriormente, se realiza la prueba hidráulica obteniendo resultados negativos. Al desmontar el cabezal se observa la formación de un anillo como consecuencia del despegue entre la resina y la tubería. Se decide analizar la causa de la falla, haciendo foco en el efecto térmico generado, debido a la exotermicidad de la reacción de entrecruzamiento de la resina. La hipótesis planteada supone que el calor generado durante el proceso de curado provoca una variación significativa de volumen, tanto de la resina como del material metálico que la rodea, la cual al enfriarse genera una contracción volumétrica. Según se reporta en la literatura ^[6], el fenómeno de expansión y contracción de las resinas epoxi depende de la temperatura que alcanza el material durante el curado y de la velocidad de calentamiento.

Entre las medidas reportadas en la literatura para mitigar el fenómeno de contracción de las resinas epoxi ^[6], se encuentra el agregado de cargas sólidas. Se llevaron a cabo pruebas a escala laboratorio y taller para evaluar y validar las nuevas formulaciones para esta operación. Finalmente, se optó por la aplicación en tándem de dos capas de materiales poliméricos de diferentes naturalezas químicas. En la zona inferior se vierte una formulación base epoxi con incorporación de una concentración óptima de carga (agente de sostén cerámico), la cual permitió minimizar los efectos de contracción volumétrica por curado; mientras que en la sección superior se coloca una formulación base polibutadieno (comportamiento elastomérico).

A continuación, se indica la secuencia operativa empleada durante la segunda aplicación de la resina para sello de cabezales.

1. La intervención se realiza sin equipo.
2. Se desmonta la sección C y la válvula maestra.
3. Se verifica el estado del espacio anular entre el *casing* de 5^{1/2}" y el carretel de 13 ^{3/8}" x 11" (sección B).
4. Se realiza la limpieza de la resina colocada en el espacio anular durante la operación previa.
5. Se conecta la salida a la sección A y se completa.
6. Se prepara la resina para completar el espacio anular en dos etapas. En la capa inferior se coloca la formulación base epoxi con incorporación de *filler* y en la capa superior el sistema base polibutadieno.
7. Se completa el anular entre el *casing* de 5^{1/2}" y la sección B con resina manteniendo la válvula lateral de la sección A cerrada.
8. Se espera el curado de la resina y se verifica que se mantenga el nivel en el espacio anular durante dos horas.
9. Se monta la sección C sin empaquetador secundario y se espera el fragüe de la resina.

Posteriormente, se realiza la prueba hidráulica para verificar la hermeticidad del sello. Esta consiste en llenar y presurizar de manera escalonada el cabezal a 500 y 1000 psi durante 10 min con la sección A cerrada, tal como se observa en la Figura 3.

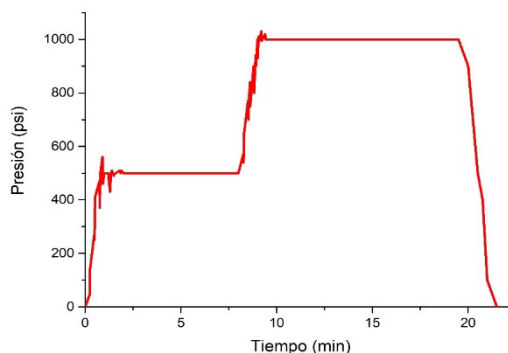


Figura 3. Carta de presión de la prueba hidráulica en el pozo RC1.

Como se puede concluir a partir de los resultados de la prueba hidráulica presentada en la Figura 3, la configuración en tándem, de los sistemas epoxi y polibutadieno, es capaz de sellar fugas internas en componentes de cabezales robustos.

Lecciones aprendidas

A partir de las pruebas de taller y de los pilotos de campo, fue posible arribar a una serie de lecciones aprendidas que permiten lograr operaciones de remediación de cabezales más seguras y eficientes.

Respecto a los materiales a emplear en las operaciones, para sellos internos de cabezales robustos se recomienda la utilización de la combinación de sistemas base epoxi y polibutadieno. Adicionalmente, la formulación de resina epoxi debe contar con un material de carga (por ejemplo, agente de sostén cerámico) que permita contrarrestar el efecto de contracción volumétrica por curado y ajustar la densidad del material final.

En lo que respecta a la operación, se recomienda llevar a cabo la limpieza de las superficies que estarán en contacto con la resina con el fin de eliminar residuos que puedan afectar la adherencia entre materiales. Adicionalmente, en caso de ser posible, realizar una preparación superficial del material del cabezal, con el fin de aumentar la rugosidad, y como consecuencia incrementar la adherencia del polímero con la sección metálica.

Caso de estudio #2- Cementación primaria tipo *BullHeading*

Pruebas de patio

Para minimizar riesgos e imprevistos que puedan surgir en un piloto de campo, se decide realizar una prueba de patio en la base operativa de una compañía de servicio. Este ensayo tiene dos objetivos principales. Por un lado, evaluar el procedimiento de mezcla y bombeo de la formulación de resina epoxi densificada, empleando equipos específicos que se utilizarían en futuras operaciones de cementaciones *BullHeading*. Por otro lado, determinar la eficiencia del sistema de limpieza, diseñado específicamente para este producto, en los equipos y en las líneas de conducción de fluidos utilizadas.

Para la ejecución de la prueba, se acordó preparar un volumen de mezcla de 10 bbl de la formulación base epoxi de densidad 16 ppg, dado que dicha cantidad de mezcla es representativa de la empleada durante una operación de bombeo en modalidad *BullHeading*. Adicionalmente, en esta etapa del ensayo a escala, se planteó evaluar la calidad del material que se obtiene al realizar mezcla del sistema en *batch* u *on the fly* (OTF).

A continuación, se presenta el procedimiento empleado para la presente prueba de patio:

1. Se prepara el sistema de limpieza en uno de los tanques del *mixer*. Para ello se trasvasan las proporciones adecuadas de *cleaner* y agua; y posteriormente se agita hasta homogenizar.
2. El sistema de resina se prepara en el otro tanque del *mixer*. Para ello se trasvasa el componente base de la resina y el modificador reológico; posteriormente se agita hasta homogenizar. Inicialmente el trasvase se lleva a cabo por gravedad. El tiempo que demoraba esta operación era superior a una hora.
3. Se procede a incorporar gradualmente la baritina empleando el sistema neumático del *bulk*. Durante este proceso, se extrajeron muestras del sistema para evaluar la densidad, empleando una balanza de lodo. La densidad final de la mezcla fue 16,1 ppg. En apariencia, el fluido presentaba una viscosidad mayor a la observada previamente en ensayos de laboratorio.
4. La incorporación del entrecruzante se lleva a cabo en dos modalidades:
 - a. Dosificación a la pasada (OTF). Se calibra la bomba para dosificar un caudal adecuado y, posteriormente, se trasvasa el aditivo al tanque dosificador del cementador. Se define realizar el bombeo de un volumen total de mezcla de 5 bbl a un caudal de 1 bpm. Se toma una muestra de 5 l de la formulación en la línea de descarga al contenedor. Esta muestra fue empleada para preparar probetas y caracterizar las propiedades mecánicas del material.
 - b. Mezcla en *batch*. A los 5 bbl restantes de mezcla se le agrega el volumen adecuando de entrecruzante y se agita hasta homogeneizar. Se realiza el bombeo a un caudal de 1 bpm. Se toma una nueva muestra en la descarga al contenedor. Como en el caso anterior, esta fue empleada para preparar probetas y caracterizar el material.

En ambos casos, el bombeo se realizó a través de una línea de alta presión de 2" de diámetro. Adicionalmente, se coloca una válvula de aguja, antes de la descarga al contenedor, para generar una contra presión que simule las condiciones de bombeo en campo. Inicialmente, la válvula fue cerrada de manera de generar una presión de 300 psi al bombear agua a 1 bpm. Sin embargo, al comenzar el bombeo de resina, la presión se incrementó a 850 psi, como consecuencia de la variación de viscosidad, debiendo liberar el cierre de la válvula.

Se prosiguió con la evaluación del sistema de limpieza en los equipos (*mixer* y cementador) y líneas utilizadas para la mezcla y el bombeo. Para ello, se trasvasa el fluido de limpieza al tanque del *mixer* utilizado para la prueba y se incrementa el régimen de agitación. Posteriormente se bombea este fluido al cementador y de este a los contenedores a través de las líneas de alta.

A partir de las dos pruebas efectuadas, y realizando un análisis de las muestras tomadas, se pudo concluir que independientemente de la forma de incorporación del entrecruzante, fue posible realizar el correcto mezclado y bombeo de la formulación polimérica. Para las pruebas de campo, se decide avanzar con la mezcla en *batch* con el fin de simplificar la operación, asegurar la incorporación de la proporción correcta de entrecruzante y la homogeneidad de la mezcla final.

Finalmente, luego de la inspección de las líneas y equipos, se pudo corroborar la buena eficiencia del *cleaner* desarrollado, para remover los residuos del sistema polimérico que quedan adheridos a las paredes del equipamiento. Es importante mencionar que el agua no es apta para remover los residuos poliméricos de estos sistemas.

Operaciones en campo

A lo largo de la etapa de pilotos de campo, se ejecutaron cinco operaciones de bombeo de resina para cementación primaria (tipo *BullHeading*) de forma exitosa, utilizando la formulación de resina epoxi densificada E14,8. Adicionalmente, es importante indicar que para la realización de estas aplicaciones se emplearon los equipos convencionales de cementación, tanto para el mezclado como para el bombeo de la formulación polimérica. En la Figura 4 se puede visualizar el *layout* de los equipos empleados para pilotos de campo de cementación primaria tipo *BullHeading*.

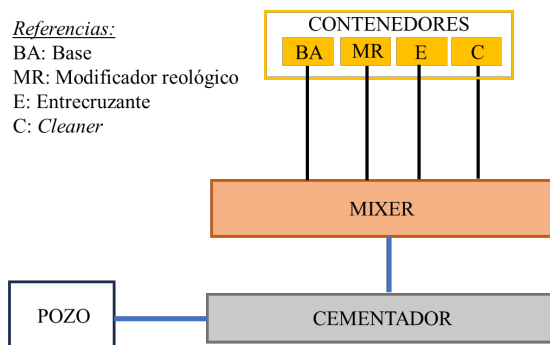


Figura 4. *Layout* de los equipos empleados para pilotos de campo de cementación primaria tipo *BullHeading*.

La información más relevante asociada a la etapa de pilotos de campo de operaciones de *BullHeading* se sintetiza en la Tabla 3. En la misma se indica el tipo de pozo, volumen y configuración de la resina bombeada, así como observaciones particulares de cada aplicación.

Operaciones <i>BullHeading</i>					
ID pozo	Tipo de pozo	Volumen bombeado	Configuración resina bombeada	Centralizadores	Observaciones
BH1	Slim	10,5 bbl	A la cabeza	40, 5"x6.75"	Perfil ultra-sónico
BH2	Slim	10,5 bbl	A la cabeza	No	Perfil sónico
BH3	Slim	10,5 bbl	Sándwich	40, 5"x6.75"	-
BH4	Fat	21 bbl	Sándwich	No	-
BH5	Fat ⁺⁺	24,5 bbl	Sándwich	No	-

Tabla 3. Operaciones *BullHeading* realizadas durante la etapa de validación en campo de la formulación E14,8.

Tras la operación en el pozo BH1, se corrieron perfiles ultrasónicos pre y post fractura, con el fin de comparar la integridad de la barrera, luego de someter a los materiales a altos esfuerzos radiales. Se realizó un análisis multivariable de dichos perfiles, los cuales se encuentran presentados e interpretados en el *paper Rivelli et.al.*^[5]. A modo de resumen, es posible mencionar que existe un cambio en los perfiles acústicos pre y post fractura de la zona asociada al cemento, lo cual indica un deterioro del material y, por consiguiente, una pérdida de adherencia e integridad. Por otro lado, no se observan alteraciones significativas, al comparar los perfiles pre y post fractura asociados a la zona de resina, lo que demuestra que no existe pérdida de acoplamiento luego de la etapa de terminación. Adicionalmente, es posible indicar que, hasta la actualidad, en el pozo BH1 no se presentan problemas de PAS.

En los pilotos de campo se utilizaron diferentes configuraciones de bombeo de resina y cemento para evaluar la eficiencia de la aislación que generan cada una. Debido a que las 5 aplicaciones en campo resultaron exitosas, es posible concluir que los dos tipos de configuraciones de bombeo planteadas generan sellos herméticos.

Lecciones aprendidas

A partir de las pruebas de taller y de los pilotos de campo fue posible arribar a una serie de lecciones aprendidas que permiten asegurar operaciones, de cementaciones primarias tipo *BullHeading*, seguras y eficientes.

A continuación, se listan los aprendizajes asociados a la parte operativa de la aplicación. El primer punto por considerar es el equipamiento empleado para realizar el trasvase de resina al *mixer*. Para optimizar los tiempos de trasvase en la operación se utilizó una bomba neumática de alta potencia y caudal.

El segundo punto por considerar se asocia con la incorporación de baritina como densificante. Se recomienda, previo a la operación, pesar la cantidad necesaria de *filler* para el volumen a bombear (afectada por un factor de seguridad) y cargar el *bulk* con este material. Durante la operación, la dosificación del material se realiza con dicho equipo y se controla la densidad del sistema con la balanza de lodo. La aplicación de la presente recomendación reduce los tiempos de preparación y asegura la densidad final de la formulación.

La tercera consideración se vincula con la temperatura a la cual se encuentra la base de la resina al momento de la incorporación del entrecruzante. Debido a que la resina, con la adición del densificante, se encuentra en constante agitación, se produce el calentamiento viscoso del fluido y esto tiene como consecuencia la disminución del tiempo de bombeabilidad de la formulación. Por lo tanto, se recomienda no realizar la recirculación del fluido y mezclar a bajo régimen. Paralelamente, se aconseja llevar el control de temperatura del sistema. En el caso de que la temperatura de la mezcla supere los 40°C, reevaluar con el responsable de la operación las modificaciones en los tiempos de mezclado, con el fin de llevar a cabo un bombeo seguro.

La cuarta lección aprendida se relaciona con la dosificación y el tiempo de agregado del *crosslinker*. A partir de las pruebas de patio, se definió la mezcla de la formulación en *batch*, con el fin garantizar la correcta incorporación de entrecruzante, generar una mezcla más homogénea y asegurar las propiedades finales del material que se obtiene. Adicionalmente, uno de los aspectos operativos de mezcla más críticos es la incorporación del entrecruzante, la cual debe realizarse una vez que el circuito completo se encuentre en condiciones de empezar el bombeo. Hay que considerar que desde el momento en el que se agrega el *crosslinker* a la mezcla, comienza a correr el tiempo de bombeabilidad de la formulación; por lo tanto, una adición temprana de este componente puede ocasionar un fragüe prematuro, comprometiendo el éxito de la operación y seguridad de los equipos.

El último punto de interés se asocia con la limpieza de los equipos. Se recomienda la utilización del *cleaner* diseñado específicamente para este producto, ya que a partir de las pruebas realizadas es posible garantizar la correcta remoción de residuos. En los pilotos de campo se probó la posibilidad de reúso de este fluido y se concluyó que el limpiador puede reutilizarse al menos una vez.

Caso de estudio #3- Remediación de anulares

Pruebas de patio

Para llevar a cabo las operaciones de remediación de anulares una compañía de servicios diseñó y fabricó un equipo de mezclado y bombeo específico.

Para probar la factibilidad de bombeo de la formulación de resina E14,8 y el sistema de limpieza, se realizó una prueba de patio previa a las operaciones. Los resultados obtenidos infieren que es posible realizar los ajustes necesarios que se requieran previo a las operaciones de campo.

El esquema de los componentes del equipo y conexiones se puede observar en la Figura 5. Sintetizando, el equipamiento diseñado consta de dos tolvas con capacidad de 200 l y un agitador mecánico solidario a cada tolva, con un controlador de velocidad.

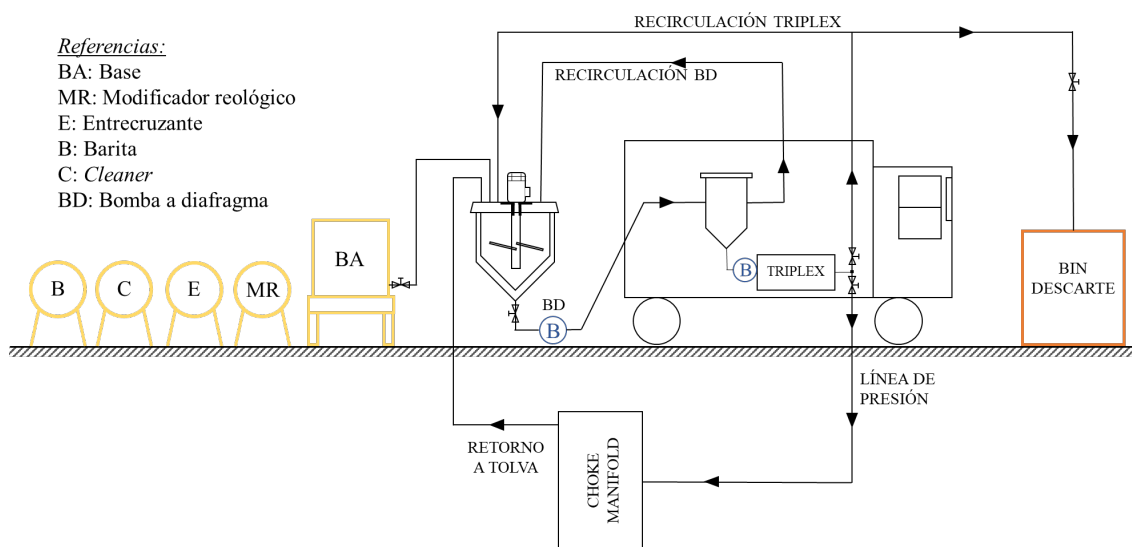


Figura 5. Esquema de conexiones para prueba de patio.

A continuación, se presenta el procedimiento empleado para formular 200 l de sistema E14,8 en prueba de patio, lo cual se asocia con la capacidad máxima de sistema que se puede preparar en cada tolva:

1. Se agrega la totalidad del componente base y el modificador reológico.
2. Se incorpora la mitad de la cantidad de baritina necesaria (la dosificación se realiza por peso utilizando balanza digital). Se mezcla hasta homogeneizar.
3. Se ejecuta la primera prueba de bombeo, sin la incorporación del entrecruzante, pasando a través del *manifold*. En esta etapa se registran 1300 psi de contrapresión para un régimen de 1340 rpm circulando durante 10 min y manteniendo agitación constante en tolva. Se obtiene resultado satisfactorio, debido a que el bombeo se realiza de forma continua sin cavitación.
4. En una segunda etapa, y a modo de simular la densidad final sin utilizar entrecruzante, se incorpora en la mezcla la cantidad de baritina teórica. Se homogeniza y se bombea a través del *manifold* retornando a la tolva. En este caso se registran 2000 psi de contrapresión a un régimen de 1360 rpm y se logra recircular sin restricciones operativas. Se observa un incremento de temperatura en la resina y se registran vapores emanados de la tolva.
5. Se agrega la baritina restante y el entrecruzante para alcanzar el valor final de 14,8 ppg. Se bombea la mezcla, recirculando 5 min, alcanzando los 1650 psi de contrapresión al mismo régimen.
6. Finalizada la prueba de bombeo se retira la resina del circuito y se dispone en un bin de descarte.
7. Se vierte el *cleaner* en la tolva para realizar la limpieza del circuito. Al intentar recircular, se registra falta de flujo en la manguera de expulsión de la bomba. Surge la hipótesis de obstrucción del orificio del *manifold*, por lo que se lo elimina del circuito para que la manguera de la bomba descargue directamente en la tolva.
8. Con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema de limpieza, se recircula el *cleaner* puro y, posteriormente, en dilución 1:1 con agua dulce. Luego de recircular por 10 min se retira el sistema del circuito. Luego de los dos periodos de limpieza se da por concluido el ensayo.

Las pruebas se consideran satisfactorias, ya que el equipo permitió la mezcla y bombeo de la formulación evaluada.

Se presume que los inconvenientes presentados se debieron a la continua recirculación que generó incrementos de temperatura luego de incorporado el entrecruzante, acelerando el proceso de fragüe.

Operaciones en campo

Se detalla la información técnica de seis operaciones de remediación de anulares. Uno de los pozos se intervino en contingencia durante la etapa de perforación y cinco en etapa de producción, empleando la formulación E14,8 y utilizando el equipo fabricado por la empresa de productos y servicios mencionada anteriormente. En cada uno, finalizada la intervención, se reestablece la integridad de la instalación.

En la Figura 6 se puede visualizar el *layout* de los equipos y materiales empleados en pilotos de campo para remediación de anulares.

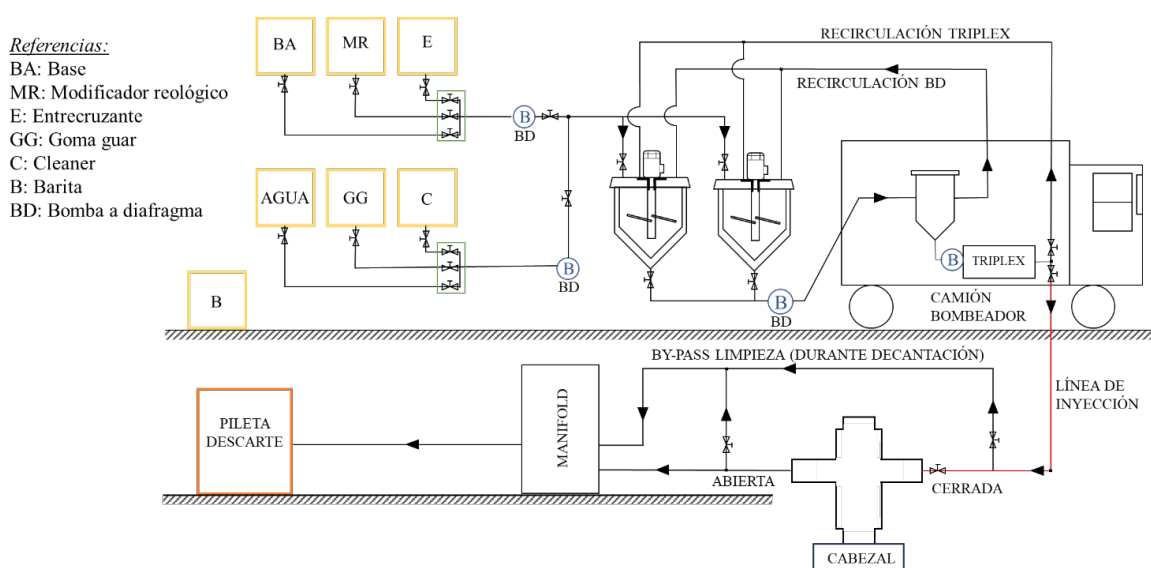


Figura 6. *Layout* de los equipos empleados para pilotos de campo de remediación de anulares.

La metodología de bombeo empleada consiste en un proceso cíclico de inyección forzada y purga. El desfogue se realiza al alcanzar una presión máxima definida en función del equipamiento y las condiciones de pozo. Al completar el volumen total del tratamiento, diseñado en función de la altura de anillo requerida, se mantiene la presión hasta alcanzar el fragüe de la resina.

La información más relevante asociada a la etapa de pilotos de campo de operaciones de remediación de anulares se resume en la Tabla 4, en la que se detalla la fase, la altura, el volumen de anillo colocado y el número de *batch* bombeado.

Operaciones Remediación de Anulares				
ID pozo	Fase	Altura de anillo teórica (m)	Volumen de resina (l)	Nº <i>Batch</i> bombeado
RA1	Perforación	175	2164	25
RA2	Producción	101	735	4
RA3	Producción	101	735	4
RA4	Producción	107	1320	6
RA5	Producción	206	2550	14
RA6	Producción	115	2300	12

Tabla 4. Operaciones de remediación de anulares realizadas durante la etapa de validación en campo de la formulación E14,8.

Para estas operaciones se sigue el orden y consideraciones de mezclado detalladas a continuación:

1. Se coloca el componente base en el tanque de mezcla. Para facilitar su trasvase viene premezclado con una parte del modificador reológico. De todas maneras, debe utilizarse una bomba.
2. Se incorpora la segunda parte del modificador reológico manteniendo la agitación mecánica del sistema y se incorpora el material densificante.
3. Se acondiciona el equipamiento de superficie y los parámetros de pozo para iniciar el bombeo.
4. Se agrega el entrecruzante al tanque mezclador manteniendo la agitación hasta que se observa una mezcla homogénea.
5. Se inicia el bombeo.

Con el objetivo de garantizar una correcta homogenización, se decide mezclar el sistema en la tolva y, adicionalmente, realizar la recirculación del fluido. Durante este proceso, es importante controlar la temperatura de la formulación, debido a que puede producirse un incremento de esta por fricción. La temperatura de la mezcla no debe superar los 40°C previo a la incorporación del entrecruzante. Esta recomendación surge porque incrementos de temperatura aceleran la reacción de entrecruzamiento disminuyendo el tiempo de bombeabilidad.

A continuación, se sintetiza la secuencia operativa de inyección:

1. Se realizan inyecciones sucesivas del sistema de resina hacia el espacio anular hasta presiones límites seguras, previamente definidas para cada caso.
2. Cada *batch* inyectado decantará en el espacio anular.
3. Se aplica el número de ciclos necesarios para alcanzar el volumen que cubra la altura de anillo según diseño.
4. Finalizado el bombeo del último *batch* se procede a la limpieza interior del cabezal.
5. Se deja presurizado el sistema en espera de fragüe de la resina. Se recomienda un período de 48 horas.

Una variable importante en este tipo de intervenciones es la limpieza de los accesos al cabezal a través de la sección B, al igual que los componentes existentes en el espacio anular de esta sección.

Una vez finalizado el bombeo, el sistema de resina quedará inmovilizado y el material remanente en la sección B deberá ser removido de dicha zona. Para ello se ha previsto una limpieza que incluye el bombeo de dos sistemas:

1. Inicialmente se bombea un espaciador mecánico de alta viscosidad, el que remueve el mayor volumen de resina de la sección B. Este será agua gelificada con goma guar en concentración de 60 libras por cada 1000 galones (pptg). Se prepara en el mismo *mixer* en donde se prepara la mezcla de resina.
2. Posteriormente se utiliza el *cleaner* diseñado para estos sistemas probado en las pruebas de patio. El volumen a emplear depende de la operación, deberá ser suficiente como para permitir la circulación garantizando la limpieza de todo el circuito.

Lecciones aprendidas

A partir de las pruebas de patio y de los pilotos de campo fue posible arribar a una serie de lecciones aprendidas que permiten asegurar operaciones, de remediación de anulares, seguras y eficientes.

En lo que respecta al equipo de mezclado, bombeo e inyección, este permitió realizar las operaciones, pero se detectaron como puntos a mejorar, mantener la lubricación permanente de la bomba triplex durante el bombeo, con el fin de proteger las empaquetaduras y evitar la decantación del material densificante. Finalmente, se recomienda colocar un caudalímetro en la salida de la bomba neumática para asegurar la correcta dosificación de los componentes.

Por otro lado, en cuanto a la dosificación y mezclado, se recomienda colocar en altura el bin que contiene la base polimérica para facilitar el trasvase hacia el *manifold*; así como también ubicar los bins de almacenamiento para llevar a cabo el control de las concentraciones de cada componente. Finalmente, se considera importante controlar la temperatura del sistema durante el proceso de mezclado e inyección, con el fin de que los tiempos de bombeabilidad se mantengan acorde a los requerimientos de la operación.

Conclusiones

Las intervenciones, con los sistemas poliméricos mencionados, demuestran ser efectivas para dar solución a ciertas problemáticas de hermeticidad de pozos NoC y Convencionales planteadas por la industria O&G.

A lo largo del desarrollo se han logrado llevar a cabo, de manera exitosa, operaciones de aislación primaria tipo *BullHeading*, remediación de cabezales y reparaciones de anulares con PAS. El camino recorrido le permitió al equipo técnico visualizar oportunidades de mejora en los procesos, trabajar sobre su optimización e implementación, logrando así operaciones más seguras y eficientes.

Referencias

- [1] *Well cementing*. NELSON, Erik B. (ed.). Newnes, 1990.

- [2] *Fundamentos de la Cementación de Pozos*. Schlumberger. 2, 2012, Vol. 24.
- [3] *Use of Polymers Resins for Surface Annulus Isolation Enhancement*. Elyas, O., y otros. 2018, SPE 192266 MS.
- [4] *Innovative Epoxy Resin Formulation for Downhole Casing Repair Applications*. Abdullah Al-Yami; y otros. 2018, SPE 193328 MS
- [5] *Sustained Annulus Pressure in NoC wells. Prevention and Remediation using polymeric isolating material*. Rivelli Lavallen S., y otros. 2023, SPE 212580 MS
- [6] *Investigation of viscoelasticity and cure shrinkage in an epoxy resin during processing*. Shimizu, T., Koinuma, H., Nagai, K. 2011, 18th International Conference on Composite Materials.

Agradecimientos

Nos parece importante destacar la predisposición, el compromiso y desempeño en las operaciones de patio y campo de las compañías de servicio Moto Mecánica Argentina S.A. y Calfrac Well Services Ltd.; así como también agradecer a ISI *Oilfield Chemicals* S.R.L., nuestro socio tecnológico en el proyecto, por el acompañamiento permanente a lo largo de todo el proceso de desarrollo e implementación.

Resumen CV

Luciana García Eiler

Título y lugar de estudio: Ingeniera Civil de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata.

Trayectoria: En el periodo 2009-2012 se desempeñó como becaria en el centro de Investigaciones Viales LEMaC de la UTN FRLP. Desde 2014 trabaja en YPF Tecnología en proyectos de investigación y desarrollo relacionados a fluidos de perforación, fluidos de fractura, alternativas al tratamiento de recortes de perforación y materiales para aislamiento de pozos.

Cargo actual en la empresa: Tecnóloga - Misión Tecnologías Upstream - YPF Tecnología S.A.

Sofía Rivelli Lavallen

Título y lugar de estudio: Ingeniería en Materiales, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Trayectoria: En el periodo 2016-2017 llevó a cabo una estadía en una Universidad de Saarland y una pasantía en el sector de R&D de la empresa Dillinger Hütte (Alemania). Desde 2018 trabaja en YPF Tecnología S.A en proyectos de investigación y desarrollo relacionados a fluidos de fractura, agentes de sostén y materiales alternativos para aislación de pozos. Actualmente se encuentra realizando un Doctorado en Ingeniería en la Universidad de Buenos Aires.

Cargo actual en la empresa: Tecnóloga - Misión Tecnologías Upstream - YPF Tecnología S.A.

Leandro Sanz

Título y lugar de estudio: Técnico Químico – ET Ing. Otto Krause / Ingeniería Industrial (En curso) – Universidad Nacional Arturo Jauretche.

Trayectoria: Ingresó a YPF Tecnología en el año 2014 como analista de laboratorio en el área de Métodos Analíticos, especializándose en Espectroscopía de Emisión Óptica, Análisis Elemental y Cromatografía Gaseosa aplicados a proyectos vinculados al Downstream y Upstream hasta el año 2019.

Desde 2019, se desempeña en la Misión Tecnologías Upstream, participando activamente y liderando proyectos vinculados a desarrollo de fluidos de perforación y sistemas de control de pérdidas de circulación.

Cargo actual en la empresa: Analista de Laboratorio - Misión Tecnologías Upstream - YPF Tecnología S.A.

Manuel Sanz

Título y lugar de estudio: Ingeniero en Petróleo – Universidad Nacional Arturo Jauretche.

Trayectoria: Ingresó a Y-TEC en 2014 como analista de laboratorio de lubricantes y derivados, participando en proyectos relacionados al downstream y realizando ensayos de caracterización de crudos y aceites lubricantes. Desde 2018 hasta principios de 2024 se desempeñó como referente del laboratorio de perforación y workover. Actualmente trabaja en proyectos de investigación y desarrollo relacionados a daño a la formación, fluidos de perforación, cementación e intervención de pozos.

Cargo actual en la empresa: Tecnólogo - Misión Tecnologías Upstream - YPF Tecnología S.A.

Marcela Mucci

Título y lugar de estudio: Ingeniera en Petróleo de la Universidad Nacional del Comahue y cursó la Maestría en Economía y Política Energética y Ambiental.

Trayectoria: Más de 30 años como profesional en la industria, especialmente operativa. Fue Jefa de Laboratorio en BJ Services y San Antonio Internacional. Tiene más de 25 años de docencia en la Universidad Nacional del Comahue en materias como Perforación, Ingeniería de Reservorios y Estimulación de Pozos, en el ITBA y en la UBA. Capacitadora para empresas Operadoras durante más de 30 años. Autora de numerosos trabajos técnicos nacionales e internacionales y de dos libros (2007 y 2021), Advisor en Ingeniería de WO en YPF.

Cargo actual en la empresa: Tecnóloga - Misión Tecnologías Upstream - YPF Tecnología S.A.

Walter Morris

Título y lugar de estudio: Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP). Master en Ciencia e Ingeniería de la University of South Florida, EE.UU., Doctor en Ciencia de los Materiales de UNMdP.

Trayectoria: Entre 1996 y 2000 realizó su trabajo de tesis doctoral en la Div. Corrosión de INTEMA y en el área de Materiales del Centro Atómico Constituyentes - CNEA.

Más de 20 años de experiencia en la industria del Oil & Gas. Entre 2000 y 2012 ocupó la posición de Product Champion de Desarrollo en San Antonio Internacional. Desde 2012 a la fecha trabaja en Y-TEC, inicialmente como Product Champion de Materiales y luego como Gerente de Ingeniería y Materiales.

Cuenta con más de 80 publicaciones en revistas científicas y del ambiente de Oil & Gas y 4 patentes de invención.

Cargo actual en la empresa: Líder - Misión Tecnologías Upstream - YPF Tecnología S.A.

Lucas Arribillaga

Título y lugar de estudio: Ingeniero Químico con Orientación en Petroquímica de la Universidad Nacional de Cuyo.

Trayectoria: Profesional con más de 10 años en la industria O&G, área Completion & Workover tanto en operaciones convencionales como No Convencionales.

Cargo Actual: Ingeniero de Terminación & Workover – Secondee Pluspetrol.

José Gimutky

Título y lugar de estudio: Ingeniero Industrial con orientación Mecánica de la Universidad Nacional del Comahue.

Trayectoria: Desde el año 1996 se desempeña en la industria. En el periodo 1996-2003 trabajó como Ingeniero de Campo Sr y jefe de Ingeniería en el área de cementación y estimulación de Nowasco Americas y BJ. De 2003 a 2018 se desempeñó como Ingeniero de Perforación Jr. y Especialista de Cementación en PAE. Ingresó a YPF en 2018 para desempeñarse como especialista en cementación transversal.

Cargo actual en la empresa: Especialista en Cementación en YPF S.A.