

Empaques de grava en pozos horizontales de alta productividad

Syed Ali
Rick Dickerson
Chevron
Houston, Texas, EUA

Clive Bennett
BP
Londres, Inglaterra

Pat Bixenman
Mehmet Parlar
Colin Price-Smith
Rosharon, Texas

Steve Cooper
BP
Aberdeen, Escocia

Jean Desroches
Sugar Land, Texas

Bill Foxenberg
M-I Drilling Fluids
Houston, Texas

Keith Godwin
Stone Energy Corporation
Lafayette, Luisiana, EUA

Tim McPike
Shell International E&P
Rijswijk, Holanda

Enzo Pitoni
Giuseppe Ripa
Eni Agip
Milán, Italia

Bill Steven
Texaco
Warri, Nigeria

Dave Tiffin
BP
Houston, Texas

Juan Troncoso
Repsol-YPF
Yakarta, Indonesia

Para aumentar la productividad y reducir los costos y la complejidad, los pozos horizontales se terminan con frecuencia sin tuberías de revestimiento frente a las zonas de interés. Se han utilizado tubos filtro en pozos abiertos, pero los operadores están recurriendo cada vez más al empaque de grava de largos intervalos para estabilizar los pozos, realizar terminaciones más confiables y atenuar los problemas relacionados con la producción de arena, tales como la erosión, y el manejo y la eliminación de la arena en la superficie.

De los yacimientos no consolidados, junto con el gas, el petróleo y el agua, se pueden producir granos de arena sueltos y partículas finas como las arcillas. La instalación de terminaciones para controlar la producción de arena sin sacrificar la productividad, el control del flujo, o las reservas recuperables resulta difícil y costosa; hasta \$3 millones o más en las áreas marinas. Los costos de los posteriores tratamientos para disminuir el daño y de las intervenciones correctivas futuras son también extremadamente altos; hasta \$1 millón por trabajo en pozos submarinos y en aguas profundas. Los operadores necesitan medidas confiables para el control de la producción de arena, implementadas correctamente desde el primer momento, especialmente para los tramos horizontales terminados a pozo abierto frente a formaciones de alta permeabilidad.

La producción de arena depende de la resistencia de las rocas, de los esfuerzos en sitio, de los fluidos producidos y de los cambios en las tasas de flujo respecto de la caída de presión. Las altas tasas de producción, el aumento del esfuerzo efectivo debido al agotamiento, y la irrupción del agua contribuyen a la producción de arena. Los problemas asociados con la producción de arena abarcan desde su manejo y eliminación en la superficie hasta la erosión de los equipos de subsuelo o de superficie y la pérdida del control del pozo.¹ Si la arena produce fallas

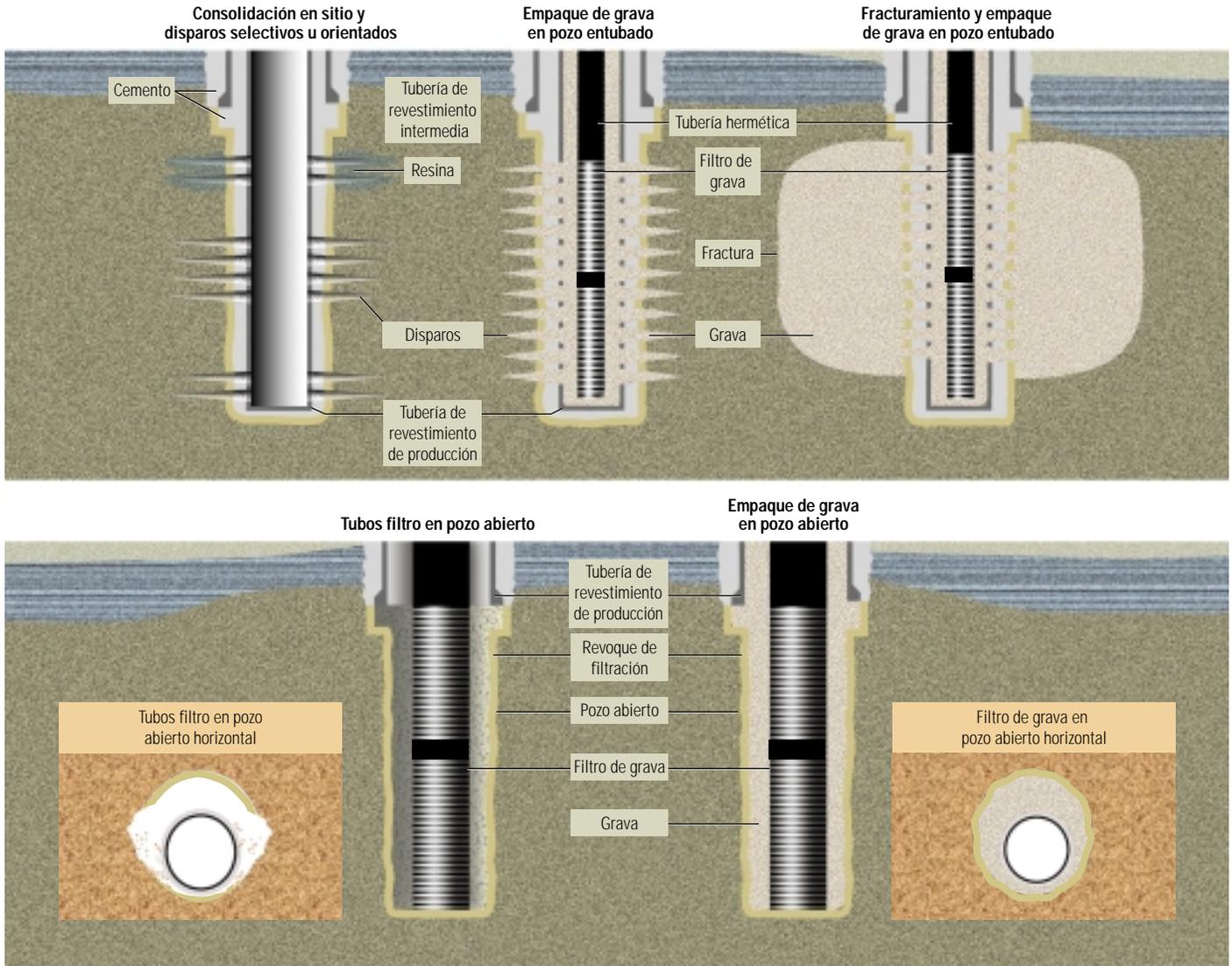
en los tubulares o en las herramientas de terminación, la producción y la recuperación de reservas se pueden ver postergadas, e incluso pérdidas cuando los costos para desviar o reperfilar un pozo son prohibitivos.

Los operadores utilizan diversas técnicas para reducir al mínimo la cantidad de arena en los fluidos producidos ([página siguiente](#)). Entre los métodos de control de producción de arena se incluyen la limitación del flujo del pozo a velocidades inferiores a las del comienzo de la producción de arena, la consolidación en sitio, los disparos selectivos u orientados, el empaque de grava y el fracturamiento combinado con empaque de grava.² El fracturamiento combinado con empaque de grava combina fracturas hidráulicas cortas y anchas, o de longitud limitada (TSO, por sus siglas en inglés), con el empaque de grava. Para controlar la producción de arena en terminaciones a pozos abiertos, los operadores utilizan tubos filtro (entiéndase filtros de grava sin empaque, esto es, cedazos solitarios), empaque de grava, fracturamiento combinado con empaque de grava y, recientemente, filtros de grava expansibles (véase "Técnicas emergentes de control de producción de arena," [página 74](#)).

Restringir la producción, si bien resultaba positivo en el pasado, influye en forma negativa en la rentabilidad del pozo y no es posible en la economía actual, especialmente en los pozos de

ClearPAC, MudSOLV, NODAL, QUANTUM y SandCADE son marcas de Schlumberger. AIPAC y Alternate Path son marcas de ExxonMobil; se ha otorgado la licencia de esta tecnología exclusivamente a Schlumberger.

Por su colaboración en la preparación de este artículo, se agradece a Hal Riordan, Houston, Texas, EUA, y Ray Tibbles, Rosharon, Texas.



^ Control de la producción de arena. Los disparos selectivos u orientados evitan las zonas débiles y minimizan la producción de arena; la tubería de revestimiento cementada ofrece un positivo aislamiento de las formaciones. El empaque de grava en los pozos entubados permite el control de la producción de arena en formaciones laminadas, arenas de menor calidad o pozos verticales marginalmente económicos. El fracturamiento combinado con empaque de grava combina la estimulación y el control de la producción de arena en espesores apilados o yacimientos con granos pobremente clasificados y de baja transmisibilidad. En pozos entubados, los tubos filtro controlan la arena en formaciones "limpias" con grandes granos bien clasificados y en pozos con corta vida productiva. Los empaques de grava o fracturas combinadas con empaques de grava mantienen la productividad o inyectividad por más tiempo que los tubos filtro en formaciones "sucias" con granos pobremente clasificados, en pozos de alta tasa de producción con mayor transmisibilidad y grandes reservas, y en terminaciones en aguas profundas o submarinas de alto riesgo y alto costo.

alto costo y altas tasas de producción. La consolidación en sitio bloquea los granos de arena en el lugar mediante la inyección de resinas y catalizadores en las formaciones, generalmente a través de disparos en el revestimiento. El emplazamiento químico y la derivación a través de extensas zonas y de los disparos son difíciles. Los disparos selectivos y orientados tienen como objetivo impedir la producción de arena, al evitar los intervalos débilmente consolidados o alinear los disparos con los esfuerzos máximos en la formación para aumentar la estabilidad de los mismos.³

1. Carlsson J, Gurley D, King G, Price-Smith C y Walters F: "Sand Control: Why and How?," *Oilfield Review* 4, no. 4 (Octubre de 1992): 41-53.
2. El fracturamiento hidráulico utiliza fluidos especiales inyectados a presiones mayores que los esfuerzos de rotura de la formación para crear dos alas de fractura, o grietas opuestas 180°, alejándose de la pared del pozo. Estas alas de fractura se propagan en forma perpendicular al esfuerzo mínimo de las rocas en un plano preferencial de fracturamiento (PPF, por sus siglas en inglés). Al mantenerse abiertas mediante un apuntalante, estas vías conductoras aumentan el radio efectivo del pozo, permitiendo que un flujo lineal ingrese en las fracturas y luego hacia el pozo. Los apuntalantes comunes se producen en forma natural, o son de arena recubierta con resina, bauxita de alta resistencia o sintéticos de cerámica y seleccionados mediante tamizado según las mallas norteamericanas estándar.

En el fracturamiento estándar, la punta de la fractura es el área final que se cubre con apuntalante. Un tratamiento diseñado para controlar la longitud de la fractura (TSO, por sus siglas en inglés), provoca que el apuntalante se empaque, o forme una obturación, cerca de la parte final de la fractura en las primeras etapas del tratamiento. A medida que se bombea más fluido cargado con apuntalante, las fracturas ya no se pueden propagar más profundamente dentro de la formación y comienzan a extenderse o ampliarse rápidamente. Esta técnica crea una vía más ancha y conductora puesto que se concentra mayor cantidad de apuntalante cerca del pozo.

3. Behrmann L, Brook JE, Farrant S, Fayard A, Venkiteraman A, Brown A, Michel C, Noordermeer A, Smith P y Underdown D: "Técnicas de diseño de los disparos para optimizar la productividad," *Oilfield Review* 12, no. 1 (Primavera de 2000): 54-79.

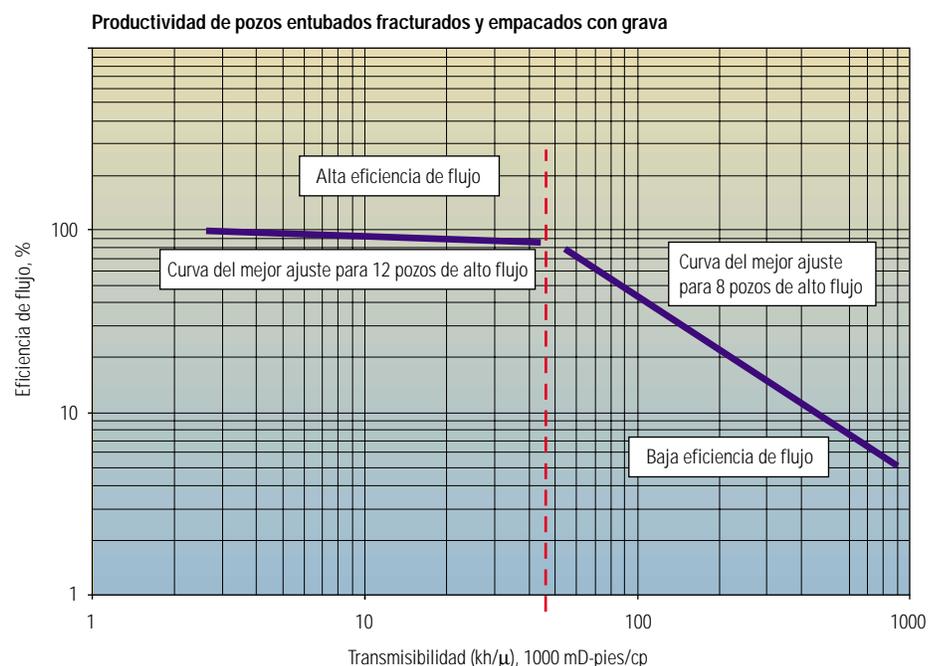
El empaque de grava—método de control de producción de arena efectivo y ampliamente utilizado—coloca gránulos, o grava, alrededor de filtros mecánicos, o filtros de grava metálicos, dentro de los pozos abiertos o entubados con disparos.⁴ La “grava” es arena natural redonda y limpia o material sintético lo suficientemente pequeño como para excluir los granos y algunas partículas finas de los fluidos producidos, pero lo suficientemente grande como para mantenerse en su lugar mediante los filtros de grava. Se bombea una lechada de fluido de transporte y grava en los disparos y en el espacio anular que existe entre los filtros de grava y el pozo abierto o entubado con disparos. La grava se deposita a medida que el fluido de transporte se pierde en las formaciones o circula de regreso a la superficie a través de los filtros de grava.

En algunas áreas y bajo ciertas condiciones de la formación, los tubos filtro pueden ser una alternativa al empaque de grava o al fracturamiento combinado con empaque de grava. La productividad inicial de las terminaciones con tubos filtro es normalmente buena, pero con el tiempo los sólidos pueden taponar los filtros. Por el contrario, los empaques de grava tienden a mantener la productividad y la integridad del control de la producción de arena por períodos más largos, debido a la mayor estabilidad del pozo. Sin embargo, muchas terminaciones con tubos filtro no excluyen adecuadamente la arena. Otros pozos terminados sin empaque de grava no han fallado completamente, pero producen a menores tasas debido a que los tubos filtro resultan taponados o erosionados.

En consecuencia, hay una tendencia entre los operadores a utilizar el empaque de grava para proteger los filtros de grava y lograr mejores ter-

minaciones de pozos. Dimensionar la grava cubriendo correcta y completamente el espacio anular, estabiliza las formaciones y protege los filtros de grava de la erosión y del taponado gradual. Sin embargo, las operaciones estándar de perforación y empaque de grava pueden atrapar lodo y residuos de fluidos de transporte entre la grava y las formaciones, o dentro del empaque de grava, dañando las permeabilidades del yacimiento y del empaque. El daño inducido por las terminaciones produce una alta caída de presión para la iniciación del flujo y una menor productividad después del empaque de grava. Esto rige especialmente cuando se utilizan sistemas de fluidos convencionales de bajo costo, sin importar su rendimiento.

Este artículo detalla el empaque de grava de pozos horizontales abiertos. Se examinan las medidas de control de producción de arena, incluidos los tubos filtro, el empaque con agua y la tecnología Alternate Path, o filtro de grava con tubos de derivación. Se analizan los desafíos y los últimos desarrollos en materia de fluidos de transporte y la remoción del revoque de filtración (enjarre, costra). Historias de casos demuestran la efectividad de los métodos más modernos de limpieza del pozo, incluidos los productos químicos, los procedimientos y las herramientas. También se incluyen la simulación del emplazamiento de grava bombeando por encima de la presión de fracturamiento, o con fluidos a base de aceite, así como también los filtros de grava expandibles.



4. Sherlock-Willis TM, Morales RH y Price P: “A Global Perspective on Sand Control Treatments,” artículo de la SPE 50652, presentado en la Conferencia Europea sobre el Petróleo de la SPE, La Haya, Holanda, 20 al 22 de octubre de 1998.

Parlar M y Albino EH: “Challenges, Accomplishments, and Recent Developments in Gravel Packing,” *Journal of Petroleum Technology* 52, no. 1 (Enero de 2000): 50-58.

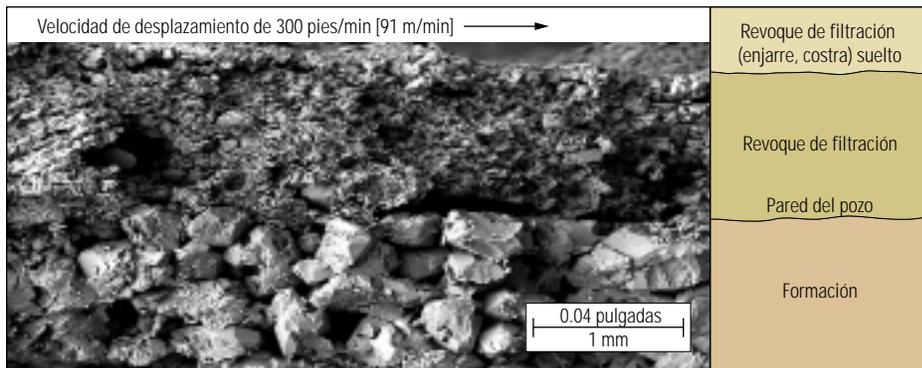
¿Pozo abierto o entubado? Los datos de producción demostraron el efecto del revestimiento con disparos en el rendimiento del flujo de entrada al pozo. En yacimientos con menor transmisibilidad—permeabilidad multiplicada por el espesor neto (kh), dividida por la viscosidad del fluido (μ)—menor a unos 40,000 mD-pies/cp, la eficiencia de flujo es alta en las terminaciones de pozos entubados con disparos y con fracturas combinadas con empaque de grava para el control de la producción de arena y la estimulación. Sin embargo, en pozos de alta tasa de flujo, los beneficios de la estimulación se pueden perder cuando la capacidad de flujo (kh) del yacimiento es alta o la viscosidad del fluido es baja debido a que el flujo es estrangulado por los disparos. En formaciones con kh/μ mayor a 40,000 mD-pies/cp, los operadores deben considerar terminaciones a pozo abierto y, en lo posible, secciones horizontales frente a los intervalos productivos para evitar la reducción de la eficiencia de flujo, como consecuencia de las restricciones y turbulencia causadas por los disparos. Los tubos filtro, los empaques de grava en pozos abiertos y los filtros de grava que se expanden contra las paredes del pozo son opciones para controlar la producción de arena en yacimientos con alta transmisibilidad.

¿Pozos entubados o abiertos?

La perforación de pozos horizontales y de gran ángulo es común cuando se trata de pozos nuevos y de reentrada, incluso en los yacimientos que requieren terminaciones diseñadas para controlar la producción de arena. Las terminaciones a pozo entubado son poco comunes en los pozos horizontales porque la cementación de la tubería de revestimiento es difícil, los costos de los disparos son más altos, y para lograr un empaque de grava eficiente, la limpieza de los disparos normalmente es problemática. Asimismo, los pozos horizontales abiertos son menos sensibles al daño de la perforación y de la terminación debido a que las áreas de ingreso del flujo son significativamente más grandes. Sin embargo, las secciones horizontales se perforan con un fluido de perforación del yacimiento (RDF, por sus siglas en inglés) especial que contiene polímeros para aumentar la viscosidad, agentes obturantes como el carbonato de calcio [CaCO₃], o sal de cloruro de sodio [NaCl] y aditivos (normalmente almidón u otro polímero) destinados a controlar las pérdidas de fluido (derecha).⁵

Mientras mayor sea la porción del yacimiento expuesta en un pozo, mayor será la productividad e inyectividad y menores la caída de presión y las tasas del flujo en la formación. Las menores caídas de presión y las menores velocidades de los fluidos minimizan la producción de arena en algunas formaciones. Dado que los disparos en pozos entubados y la turbulencia del flujo limitan la productividad, particularmente en pozos de altas tasas de producción, los operadores normalmente efectúan terminaciones a pozo abierto en los tramos horizontales para obtener una productividad óptima.⁶ En base a la transmisibilidad del yacimiento—permeabilidad multiplicada por espesor (kh), dividida por la viscosidad del fluido (μ)—BP evaluó la productividad de los pozos entubados, fracturados y posteriormente empacados con grava en términos de la eficiencia de flujo (página anterior).⁷

A medida que aumenta la viscosidad del fluido del yacimiento o disminuyen la permeabilidad y la relación entre el espesor neto y el total—menos espesor productivo, más limo y más lutita—los operadores pueden necesitar recurrir al fracturamiento hidráulico combinado



▲Revoque de filtración. Un fluido de perforación del yacimiento (RDF, por sus siglas en inglés) correctamente formulado y acondicionado deposita un revoque de filtración de lodo delgado y de baja permeabilidad en las paredes del pozo que no invade en forma profunda las formaciones. Los componentes incluyen polímeros para aumentar la viscosidad, agentes densificantes y obturantes, y aditivos de control de pérdidas de fluidos que se sellan dentro de unos pocos diámetros de granos de la formación, para reducir al mínimo la invasión de fluidos y de partículas en los intervalos productivos. Salmueras base, sales, CaCO₃ y barita son agentes densificantes comunes. Los agentes obturantes y los aditivos de control de pérdidas de fluidos se empaquetan frente a la pared del pozo. El acondicionamiento correcto del fluido RDF y los desplazamientos del pozo remueven el material del RDF suelto y minimizan el espesor del revoque de filtración.

con empaque de grava, como técnica de estimulación y control de la producción de arena en yacimientos laminados o multicapa. A medida que disminuye la viscosidad del fluido del yacimiento o aumentan la permeabilidad de la formación y la relación entre el espesor neto y el total—más espesor productivo, menos limo y menos lutita—los disparos en la tubería de revestimiento reducen la eficiencia de la producción y podrían no obtenerse los beneficios de la estimulación, porque el flujo es estrangulado por los disparos.

En las formaciones de alta permeabilidad y de alta productividad, los operadores deben considerar las terminaciones a pozo abierto con secciones

horizontales o de gran ángulo en los yacimientos, y tubos filtro, empaques de grava o filtros de grava expandibles para el control de la producción de arena. Las terminaciones a pozo abierto que requieren control de la producción de arena prácticamente se han duplicado desde 1997 hasta el año 2000. De estos pozos, aproximadamente el 20% tenían empaque de grava en 1997 y 1998, en comparación con el 40% en el año 2000. Se prevé que esta tendencia continúe, y se aproxime al 60% en el año 2003.⁸ El control de la producción de arena en terminaciones a pozo abierto de secciones largas y horizontales requiere nuevas tecnologías, ingeniería detallada, planificación avanzada y una cuidadosa ejecución.

5. Houwen O, Ladva H, Meeten G, Reid P y Williamson D: "A New Slogan for Drilling Fluids Engineers," *Oilfield Review* 9, no. 1 (Primavera de 1997): 2-16.

6. Tiffin D, Stevens B, Park E, Elliott F y Gilchrist J: "Evaluation of Filter Cake Flowback in Sand Control Completions," artículo de la SPE 68933, presentado en la Conferencia Europea sobre Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, 21 y 22 de mayo de 2001.

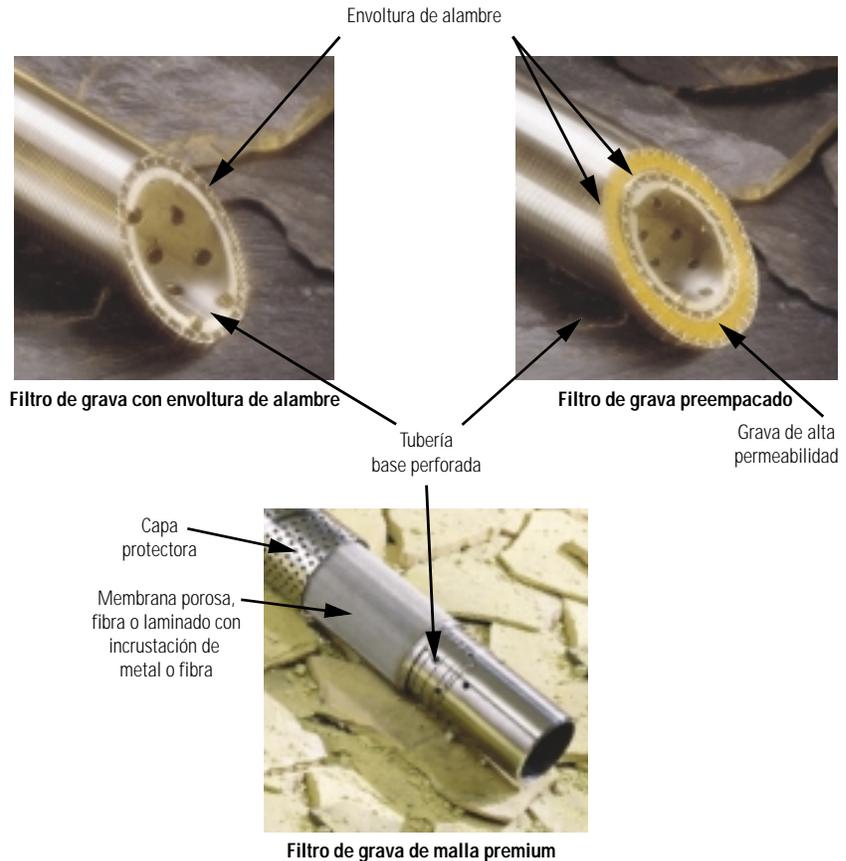
7. Bennett CL: "Sand Control Design for Open Hole Completions," presentación como parte del Programa del Conferencista Distinguido de la SPE, septiembre de 1999 a mayo de 2000.

8. Parlar M, Bennett CL, Gilchrist J, Elliott F, Troncoso J, Price-Smith C, Brady M, Tibbles RJ, Kelkar S, Hoxha B y Foxenberg WE: "Emerging Techniques in Gravel Packing Open-Hole Horizontal Completions in High-Performance Wells," artículo de la SPE 64412, presentado en la Conferencia y Exhibición sobre Petróleo y Gas del Pacífico Asiático de la SPE, Brisbane, Queensland, Australia, 16 al 18 de octubre de 2000.

¿Tubos filtro o empaque de grava?

En la década de 1980 y principios de 1990, los tubos filtro eran la principal alternativa para el control de la producción de arena para terminaciones a pozo abierto de secciones horizontales. No se consideraba factible el empaque de grava de largas secciones. Los operadores instalaban filtros de grava convencionales con envoltura de alambre en los pozos abiertos sin empaque de grava, pero con el tiempo adoptaron los diseños de malla premium y preempacadas para lograr un mayor rendimiento y más confiabilidad (derecha).

Debido a las áreas más grandes de entrada de flujo, la productividad inicial de las terminaciones horizontales con tubos filtro es normalmente mayor y las velocidades de flujo por unidad de longitud del pozo son menores que en los pozos verticales. Sin embargo, muchas terminaciones con tubos filtro pierden productividad dado que los sólidos de las formaciones taponan los filtros, y con el tiempo fallan por la mayor producción de arena debido a la erosión causada por la alta velocidad en las áreas restantes abiertas de los filtros de grava. Al comienzo, los tubos filtro se bajaban en ambientes con lodo no acondicionado, en vez de hacerlo en medio de fluidos de terminación limpios y filtrados. El mal filtrado y el pobre acondicionamiento del fluido, los desplazamientos inadecuados después de la perforación y antes de la instalación de los filtros de grava, y la falta de limpieza del revoque de filtración redundaron en el taponado de los filtros de grava y en una baja productividad.



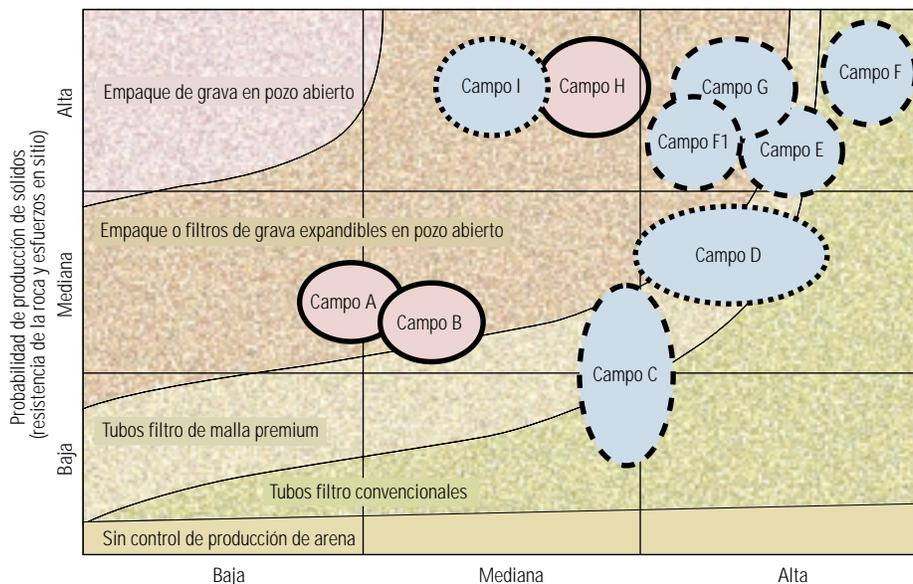
▲ Filtros de grava para el control de la producción de arena (Cortesía de U.S. Filter/Johnson Screens). Los filtros de grava con envoltura de alambre—el diseño más común—por lo general constan de una tubería base perforada o ranurada con filtros de alambre espaciados para retener tamaños específicos de grava. En las primeras versiones, los fluidos fluían sólo a través de aberturas en la tubería base, de modo que se agregaban aristas, o rebordes, para formar un espacio anular pequeño que permitiera aumentar la capacidad de flujo y reducir la obturación. Los filtros de grava preempacados están fabricados con grava revestida de resina de alta permeabilidad entre dos capas de filtros con envoltura de alambre. Los diseños de filtros de grava de malla premium utilizan un medio de tela de alambre especial alrededor del filtro de grava con envoltura de alambre. Estos filtros de grava normalmente incluyen un aro protector con orificios perforados para una mayor protección durante la instalación o bien, tienen orificios para reducir la erosión causada por los granos de arena y las partículas finas que impactan directamente en el filtro interno a alta velocidad.

La instalación de filtros de grava en pozos abiertos sin empaque de grava es exitosa en muchos pozos, pero la eficiencia y la confiabilidad varían.⁹ Inicialmente, los porcentajes de fallas promediaban entre el 50 y el 65% para las terminaciones con tubos filtro, pero disminuyeron a casi un 20% a medida que mejoraron las técnicas de limpieza y los fluidos de perforación.¹⁰ Los pozos con limos y lutitas reactivas siguen teniendo altos porcentajes de fallas provocadas por la producción de arena y por la menor productividad debido a la obturación de los tubos filtro. En el Mar del Norte, los factores de recuperación para los pozos terminados con tubos filtro generalmente satisfacen las expectativas; las fallas en el control de la producción de arena han sido bajas, sin embargo, han aumentado con el

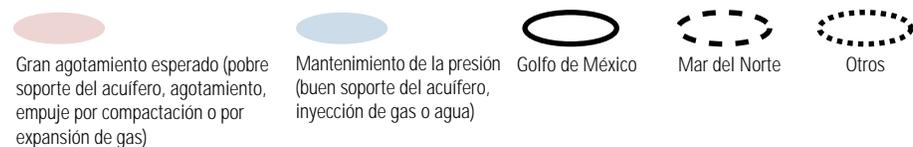
tiempo. A pesar de ello, algunos pozos terminados con tubos filtro tienen porcentajes restringidos de producción debido a la producción de arena, la obturación y la erosión de los filtros de grava, pero no se clasifican como fallas.

Las compañías operadoras y los proveedores de servicios siguen desarrollando pautas y definiendo criterios para seleccionar las técnicas de control de producción de arena en los pozos abiertos horizontales (próxima página, arriba). La elección entre tubos filtro y empaque de grava depende de la permeabilidad de la formación, del contenido de arcillas y finos, de los tamaños de los granos y de la clasificación de las partículas, además de la estabilidad del pozo y del número de intervalos de limos y lutitas expuestos a las secciones abiertas del pozo.

9. Richard BM, Montagna JM y Penberthy WL Jr : "Horizontal Completions—2 Stand-Alone Screens Vary in Effectiveness," *Oil & Gas Journal* 95, no. 32 (11 de agosto de 1997): 63-69.
10. Bennett C, Gilchrist JM, Pitoni E, Burton RC, Hodge RM, Troncoso J, Ali SA, Dickerson R, Price-Smith C y Parlar M: "Design Methodology for Selection of Horizontal Open-Hole Sand Control Completions Supported by Field Case Histories," artículo de la SPE 65140, presentado en la Conferencia Europea sobre Petróleo de la SPE, París, Francia, 24 y 25 de octubre de 2000.
11. Perdue JM: "Completion Experts Study Gulf of Mexico Horizontal Screen Failures," *Petroleum Engineer International* 69, no. 6 (Junio de 1996): 31-32.
McLarty J: "How to Complete a Horizontal Well in the Gulf of Mexico: Operators Share Experiences," *Petroleum Engineer International* 70, no. 11 (Noviembre de 1997): 63-70.
Base de datos interna de pozos horizontales de Schlumberger.
12. Tiffin DL, King GE, Larese RE y Britt LK: "New Criteria for Gravel and Screen Selection for Sand Control," artículo de la SPE 39437, presentado en el Simposio Internacional de la SPE sobre Control del Daño de la Formación, Lafayette, Luisiana, EUA, 18 y 19 de febrero de 1998. Bennett et al, referencia 10.
13. La designación "D" en el análisis de las distribuciones de los tamaños de los granos es la abertura de la malla que retiene un porcentaje acumulado específico de partículas. Por ejemplo, D_{50} es la abertura de la malla, en milímetros, pulgadas o micrones (μm) por sobre la cual el 50% de las partículas de la formación o de la grava—arena o apuntalante sintético—es retenido.



Calidad de la arena (espesor neto, clasificación y uniformidad de las partículas, homogeneidad y permeabilidad de la formación)



¿ Tubos filtro o empaque de grava en pozo abierto? Una gráfica de interrelación de la probabilidad de producción de sólidos con respecto a la calidad de la arena de la formación, ayuda a los operadores a desarrollar pautas para evaluar y seleccionar métodos de terminación. Los pozos en yacimientos de baja a mediana calidad con una alta probabilidad de producir arena pueden necesitar terminaciones a pozo abierto con empaques de grava, pero los pozos en areniscas de alta calidad con similar probabilidad de producción de arena se pueden terminar con tubos filtro con envoltura de alambre convencionales, o preempacados, o de malla premium. En los yacimientos con inyección de gas o agua, o con grandes acuíferos que mantienen la presión y con arenas de calidad mediana a alta, las terminaciones con tubos filtro pueden ser adecuadas, mientras que en yacimientos de calidad similar con agotamiento, o empuje por compactación, pueden requerir empaque de grava.

Criterios de uso de tubos filtro y empaques de grava en el diseño de las terminaciones

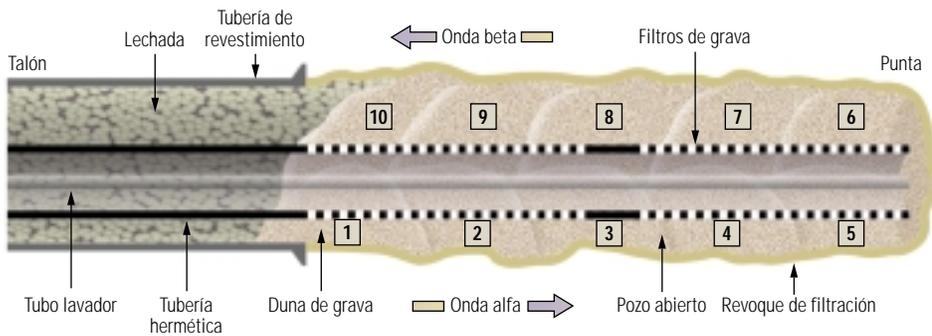
Características de la formación			Tipo de terminación
Coefficiente de clasificación D_{10}/D_{95}	Coefficiente de uniformidad D_{40}/D_{90}	Contenido de finos inferior a $44 \mu\text{m}$	
Inferior a 10	Inferior a 3	Inferior a 2%	Filtros de grava con envoltura de alambre o preempacados
Inferior a 10	Inferior a 5	Inferior a 5%	Filtros de grava de malla premium
Superior a 10	Superior a 5	Superior a 5%	Pozo abierto con empaque de grava

^ Criterios de selección de los filtros de grava y de los empaques de grava. A medida que las formaciones son menos uniformes, la selección del tipo de terminación requiere la consideración de parámetros distintos a los tamaños medios de los granos (D_{50}) del análisis granulométrico. El coeficiente de clasificación D_{10}/D_{95} , el coeficiente de uniformidad D_{40}/D_{90} y el porcentaje de partículas de $44 \mu\text{m}$ y de menor tamaño, determinan la calidad de la formación e influyen en los diseños de los filtros de grava y de los empaques de grava. Por ejemplo, probablemente sean la mejor elección las terminaciones con empaque de grava a pozo abierto en aquellos pozos con un coeficiente de clasificación superior a 10, un coeficiente de uniformidad mayor a 5 y un contenido de finos de 44 micrones superior al 5%.

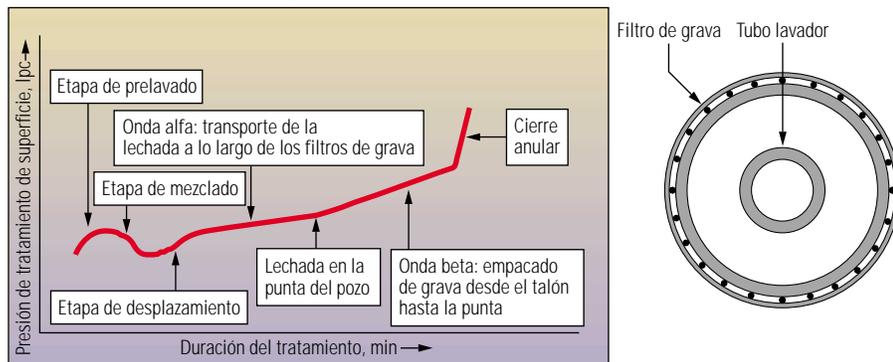
La mayoría de las terminaciones con tubos filtro en los pozos horizontales del Golfo de México falla durante los primeros tres años de producción, y el tiempo promedio para las fallas de estas terminaciones en el Mar del Norte es alrededor de tres a cuatro años.¹¹ Si las velocidades del flujo no son altas y la vida productiva esperada es de dos a tres años, los tubos filtro pueden ser una buena solución para los pozos con reservas limitadas, debido a los menores costos de instalación. Además de la resistencia y la permeabilidad de las rocas, los factores determinantes en la elección de los filtros de grava y la grava son la clasificación del tamaño de los granos de la formación, y la uniformidad y el contenido de finos (abajo a la izquierda).¹² La uniformidad es una indicación de la variación de tamaños más grandes a más pequeños en los granos de la formación. La clasificación es una medida del rango de partículas finas a gruesas en la formación.

Si el riesgo de que se produzca arena es limitado, se pueden usar tubos filtro en arenas "limpias" (bajo contenido de finos) y homogéneas con buena relación entre el espesor neto y el total, y granos grandes uniformemente clasificados—tamaños medianos (D_{50}) mayores a $200 \mu\text{m}$ —como los del Mar del Norte.¹³ En el caso de las areniscas débiles con granos de mediano tamaño—tamaño mediano (D_{50}) de alrededor de $125 \mu\text{m}$ —los principales factores que se deben considerar son la uniformidad del tamaño de los granos y el contenido de finos. Si las formaciones tienen granos mal clasificados o un contenido de finos superior al 5%, los operadores deberán considerar el empaque de grava para detener la erosión provocada por la arena y la obturación de los filtros de grava con la migración de finos.

Las areniscas débilmente consolidadas con granos pequeños, como las de muchas formaciones del Golfo de México, por lo general contienen altos porcentajes de finos y arcillas dispersas—partículas inferiores a $44 \mu\text{m}$ —que hacen poco prácticos a los tubos filtro. Los pozos en formaciones no consolidadas "sucias" (alto contenido de finos) o no homogéneas con baja permeabilidad y granos pequeños mal clasificados—tamaños medianos (D_{50}) de alrededor de $80 \mu\text{m}$ —deben terminarse con empaques de grava porque los tubos filtro podrían no mantener la productividad, ni permitir un control de la producción de arena confiable a largo plazo. Los tratamientos de fracturamiento combinados con empaque de grava también son una opción.



Típica respuesta de presión de tratamiento de superficie para empaque con agua



▲ **Empaque con agua.** Los empaques de grava con fluidos de baja viscosidad, normalmente salmuera, se basan en el depósito de grava alrededor de los filtros de grava en el lado bajo del espacio anular, mientras que la lechada con bajas concentraciones de grava se mueve en flujo turbulento a lo largo de la parte superior (*parte superior e inferior derecha*). El pozo se debe sellar con un revoque de filtración del fluido RDF para reducir al mínimo las pérdidas de fluido. Si la circulación—el fluido retorna a la superficie—se mantiene, la grava circula hacia el extremo final, o punta, de las secciones horizontales en una onda “alfa” (1 a 5). Si la lechada se deshidrata y cesa el empaque posterior en los intervalos con grandes pérdidas de fluido, la grava llena el espacio anular y forma una obturación. El resultado es un empaque incompleto más allá de ese punto. Después de que se produce la obturación o que la grava llega a la punta, el empaque regresa al comienzo, o talón, de una sección horizontal en una onda “beta” (6 a 10). Las presiones de tratamiento de superficie brindan una indicación de la forma en que se están desarrollando los tratamientos de empaque con agua (*parte inferior izquierda*).

En los pozos de altas tasas de producción y alto costo, las intervenciones correctivas costosas pueden afectar la rentabilidad del campo y del proyecto en general. De hecho, la mayoría de los contratos de distribución de gas contempla altas multas por no cumplir con las cuotas de producción. Para estas terminaciones sensibles al costo y al riesgo, la incertidumbre y los históricamente altos porcentajes de fallas con los tubos filtro justifican el uso de empaques de grava.

A menos que las formaciones tengan granos bien clasificados y extremadamente limpios, los pozos de producción e inyección submarinos que pueden producir arena y la mayor parte de los pozos en aguas profundas—más de 1000 a 2000 pies [305 a 610 m]—deben terminarse con empaques de grava para evitar las intervenciones correctivas de alto costo, especialmente cuando hay grandes volúmenes de reservas en juego. Los pozos de gas de alta producción también necesitan empaques de grava cuando la

producción de arena y la erosión de los filtros de grava afectan la seguridad.

Los tubos filtro pueden justificarse en ciertas aplicaciones:

- pozos que no son submarinos con una corta vida productiva y colapso uniforme del pozo, independientemente de su producción
- pozos que no son submarinos y de baja producción, con pocos intervalos de limos o lutitas y con colapso parcial o sin colapso del pozo
- pozos de inyección que no son submarinos con un espacio anular pequeño entre el filtro de grava y el pozo que limita el flujo alrededor de los filtros de grava.

La rentabilidad marginal, las limitaciones de inversión de capital, los posibles daños en las terminaciones o la reducción de la productividad y la pérdida del aislamiento de las formaciones, son las razones para no colocar empaques de grava en los pozos horizontales terminados a

pozo abierto. Sin embargo, la mayoría de los operadores concuerda en que se prefieren los empaques de grava en los pozos horizontales terminados a pozo abierto para reducir las fallas relacionadas con la producción de arena y minimizar la caída de la productividad asociada con las mismas. Los pozos de alta presión y alta temperatura (HPHT, por sus siglas en inglés) pueden ser la excepción, debido a las limitaciones de rendimiento y compatibilidad de los fluidos. Estas aplicaciones de control de la producción de arena de pozos HPHT presentan desafíos para los ingenieros de terminación de pozos y actualmente están bajo evaluación.

¿Empaque con agua o filtros de grava Alternate Path?

El uso de empaques de grava en terminaciones a pozo abierto ha evolucionado a medida que los operadores y las compañías de servicios han adquirido experiencia y una mayor comprensión acerca del daño de las terminaciones y del empaquetamiento de grava en los pozos horizontales. Si se requiere empaque de grava, los operadores deben elegir entre dos técnicas probadas en el campo que se encuentran actualmente disponibles para la terminación de largas secciones de pozos abiertos; éstas son el empaque con agua y los filtros de grava Alternate Path.

El empaque con agua utiliza bajas concentraciones de grava—0.5 a 2 libras de apuntalante agregado (ppa) por galón [0.06 a 0.2 g/cm³]—transportada por fluidos de baja viscosidad, normalmente salmuera (*izquierda*).¹⁴

El lado bajo del espacio anular se empaqueta primero hasta que la grava llega al extremo final, también llamado punta, o hasta que la grava se desborda y forma una obturación debido a las grandes pérdidas de fluido. Las fuerzas gravitacionales dominan esta onda “alfa,” de modo que la grava se asienta como las dunas de arena soplada por el viento en una playa hasta alcanzar una altura de equilibrio. Si el flujo de fluido permanece por sobre la velocidad crítica para el transporte de partículas, la grava descenderá por una sección horizontal hasta la punta.

Una vez que se detiene la onda alfa, una segunda onda, u onda “beta,” cubre el espacio anular por el lado superior hacia atrás y hacia el comienzo de la sección horizontal, también llamada talón, desde la punta o desde una obturación. La onda beta requiere una velocidad de fluido suficiente para mantener un flujo turbulento y mover la grava a lo largo de la parte superior del espacio anular. Esta onda continúa hasta

que el espacio entre el empaque y la formación se hace relativamente pequeño para el tamaño de la partícula de grava. Se requiere un revocoque de filtración de baja permeabilidad para impedir la pérdida de fluido hacia las formaciones, mantener la altura de equilibrio de la grava, evitar la obturación de la grava, que conduce a un empaque incompleto, y permitir que los filtros de grava se instalen sin que se atasquen por presión diferencial. El menor flujo anular que resulta de la pérdida de fluido por la erosión del revocoque de filtración o de exceder la presión de fracturamiento, aumenta la altura de la grava aguas abajo y la posibilidad de obturación prematura, así como los vacíos en el empaque.

El empaque con agua depende en gran medida de la integridad del revocoque de filtración y puede no empacar completamente el espacio anular, lo que puede crear incertidumbre acerca del éxito y de la consistencia de la terminación. Por esta razón, se usa un fluido RDF especial y cuidadosamente diseñado para perforar secciones del yacimiento que serán terminadas a pozo abierto. Un RDF debe formar un revocoque de filtración delgado y de baja permeabilidad que sea frágil, pero capaz de soportar la erosión mientras se bombea la grava. Estas características hacen que el revocoque de filtración sea más fácil de remover o, al menos, menos dañino para la permeabilidad de la formación.¹⁵

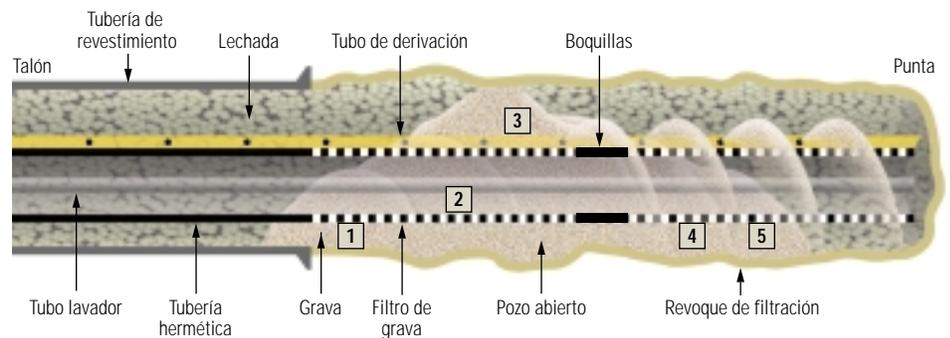
En caso de que se requieran tratamientos de limpieza, éstos deben seguir el empaque con agua para mantener la integridad del revocoque de filtración mientras se coloca la grava. En yacimientos con baja relación entre el espesor neto y el total, los intervalos de limos y lutitas expuestos a los fluidos de terminación pueden ser ero-

sionados y transportados por el flujo de alta velocidad por largos períodos, posiblemente reduciendo la permeabilidad final de los empaques de grava. El uso de filtros de grava preempacados o de malla premium para controlar la producción de arena en caso de un empaque incompleto, compensa en cierta forma las limitaciones del empaque con agua. Sin embargo, se necesitaba un método más confiable.

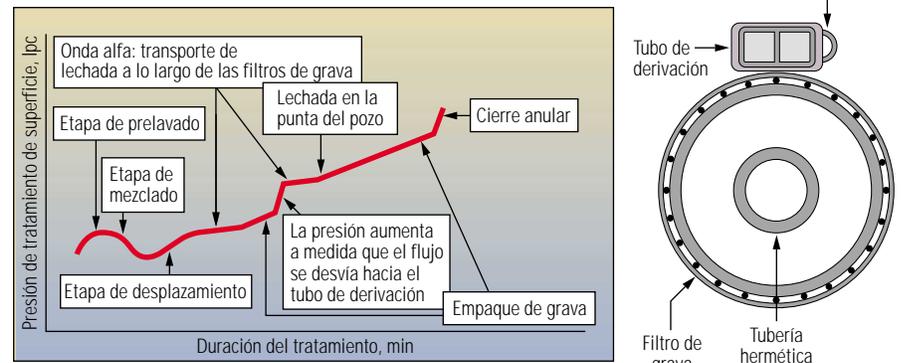
Los empaques de grava con filtros de grava Alternate Path utilizan tubos de derivación por fuera de los filtros de grava y altas concentraciones de grava—4 a 8 ppa [0.48 a 0.96 g/cm³]—en fluidos de transporte viscosos, para asegurar empaques de grava completos por debajo de las obturaciones que se forman entre los filtros de grava y la tubería de revestimiento o las paredes del pozo (abajo).¹⁶ A diferencia del empaque con agua, esta técnica no depende de la integridad del revocoque de filtración. Si se forma una obturación de grava anular, la presión en el espacio anular aumenta y la lechada se desvía hacia los

tubos de derivación, la única vía de flujo abierta. Los tubos de derivación tienen conductos para que la lechada se desvíe del pozo colapsado, de los empacadores inflables externos, o de las obturaciones de grava anulares en la parte superior de los intervalos o junto a las zonas con altas pérdidas de fluido.¹⁷

Las pruebas a gran escala que simulan pérdidas de fluido extremadamente altas demostraron que un solo tubo de derivación podría empacar intervalos horizontales de 2000 pies, incluso sin retornos de fluido hacia la superficie.¹⁸ Los ingenieros adaptaron los filtros de grava Alternate Path para pozos abiertos más largos con el diseño de boquillas y tubos de derivación que reducen la acumulación de grava dentro de los tubos de derivación, mediante el uso de fluidos no dañinos con buena capacidad de transporte de grava y la instalación de protectores de los tubos con orificios perforados alrededor de todo el conjunto para ayudar a centralizar los filtros de grava y proteger los tubos de derivación.



Típica respuesta de presión de tratamiento de superficie para filtros de grava con tubos de derivación



▲ Empaques de grava con filtros de grava Alternate Path. Esta tecnología asegura un empaque de grava completo alrededor de los filtros de grava en una sección horizontal entera. Los tubos de derivación conectados por fuera de los filtros de grava proveen conductos para que la lechada se desvíe de las obturaciones de grava y llene los vacíos en el espacio anular (*parte superior y parte inferior derecha*). Los tubos de derivación no dependen del revocoque de filtración para impedir las pérdidas de fluido. Si el espacio anular entre los filtros de grava y los empaques del pozo abierto se tapona prematuramente (3), la lechada se desvía hacia los tubos de derivación y el empaque de grava prosigue hacia la punta, aun cuando no haya retorno del fluido, o circulación hacia la superficie (4 y 5). La velocidad de bombeo por lo general disminuye una vez que comienza el flujo a través de los tubos de derivación y aumenta la presión debido al menor diámetro de dichos tubos (*parte inferior izquierda*).

14. Parlar y Albino, referencia 4.
 Penberthy Jr WL, Bickham KL y Nguyen HT: "Horizontal Completions—Conclusion: Gravel Packing Prevents Productivity Decline," *Oil & Gas Journal* 95, no. 35 (1 de septiembre de 1997): 56-60.
 15. Pitoni E, Ballard DA y Kelly RM: "Changes in Solids Composition of Reservoir Drill in Fluids During Drilling and the Impact on Filter Cake Properties," artículo de la SPE 54753, presentado en la Conferencia Europea sobre Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, 31 de mayo al 1 de junio de 1999.
 16. Jones LG, Yeh CS, Yates TJ, Bryant DW, Doolittle MW y Healy JC: "Alternate Path Gravel Packing," artículo de la SPE 22796, presentado en la 66 Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Dallas, Texas, EUA, 6 al 9 de octubre de 1991.
 17. La tecnología de filtro de grava con tubos de derivación fue desarrollada por Mobil (actualmente ExxonMobil), a fines de la década de 1980 y comienzos de la década de 1990, y se ha entregado bajo licencia a Schlumberger.
 18. Jones LG, Tibbles RJ, Myers L, Bryant D, Hardin J y Hurst G: "Gravel Packing Horizontal Wellbores with Leak-Off Using Shunts," artículo de la SPE 38640, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, San Antonio, Texas, EUA, Octubre 5-8, 1997.

La grava no gira fácilmente hacia orificios de salida pequeños, de modo que boquillas en gran ángulo que se extienden hacia la corriente de flujo reducen la tendencia a la decantación de la grava y a su concentración dentro de los tubos de derivación. Los tubos de derivación con orificios, o boquillas, sirven como tubos de empaque. Para intervalos extremadamente largos, se conectan tubos de derivación de transporte sin orificios de salida a lo largo de todo el conjunto de filtros de grava para limitar la deshidratación de la lechada mediante la reducción de las pérdidas del fluido de transporte en el espacio anular, y dirigir la lechada hacia los tubos de empaque a razón de 4 a 6 bbl/min [0.6 a 0.9 m³/min].

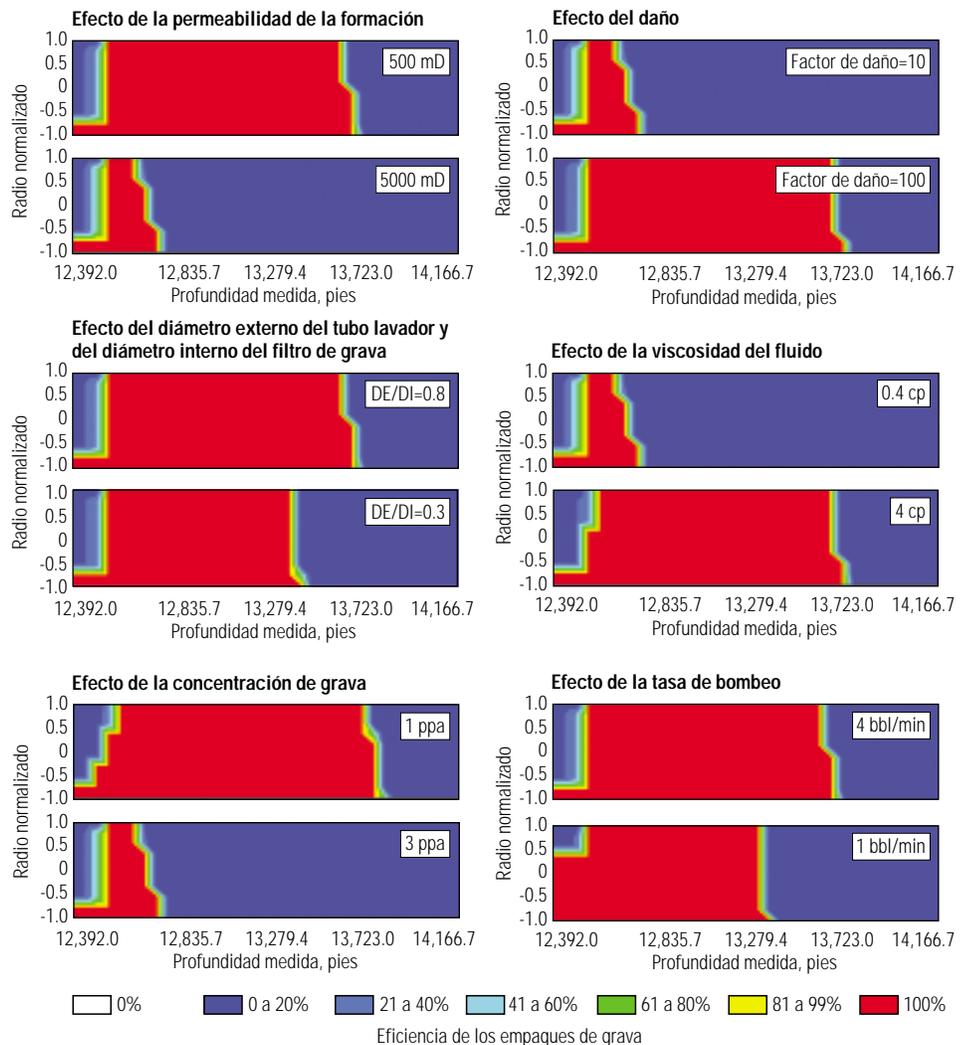
Los tubos de transporte se conectan a los tubos de empaque mediante un tubo distribuidor en cada empalme de los filtros de grava. La lechada fluye hacia abajo por los tubos de empaque o desde los tubos de transporte hacia los tubos de empaque y sale a través de boquillas de carburo resistentes al desgaste, para empaquetar los vacíos detrás de los filtros de grava a 0.5 a 2 bbl/min [0.08 a 0.3 m³/min]. También se pueden conectar tubos de transporte a la tubería hermética que se encuentra en la parte de arriba de un conjunto de filtros de grava, para que la lechada pueda pasar en caso de que el orificio colapse o se forme una obturación de grava en la parte superior del intervalo.

Simulación de emplazamiento de grava

Las herramientas computacionales son parte integrante del diseño de tratamientos para el control de la producción de arena que reducen los reacondicionamientos correctivos y las fallas de terminaciones. La simulación de procesos de emplazamiento de grava permite realizar análisis de sensibilidad con diversos parámetros de emplazamiento de grava (*derecha*). Estas herramientas de simulación ayudan a los operadores a evaluar los intervalos de terminación, los fluidos de transporte, los tamaños y las concentraciones de grava, las tasas de bombeo, las pérdidas de fluidos hacia la formación y los retornos a la

superficie. Las simulaciones también se utilizan para optimizar los tubos lavadores, los filtros de grava y las configuraciones de las herramientas de servicio.¹⁹ Por ejemplo, el programa de computación SandCADE incluye seis módulos— simulación de emplazamiento de grava para empaque con agua y con tubos de derivación,

programación de bombeo, simulador de fracturamiento combinado con empaque de grava, movimientos de la tubería y cálculos de la hidráulica del empacador, y análisis de torsión y arrastre— que proveen la información necesaria para diseñar, ejecutar y evaluar los tratamientos de empaque con agua y con tubos de derivación.



^ Simulación del emplazamiento de grava. El riesgo de obturación de grava aumenta a medida que aumenta la permeabilidad de la formación y la longitud de los intervalos, o disminuye la viscosidad de los fluidos del yacimiento. Los factores que influyen en el empaque de grava, tales como las características de la formación, las pérdidas de fluidos, las configuraciones de los filtros de grava, las herramientas de terminación del pozo y los parámetros del tratamiento, se pueden modelar con el uso de programas de computación. La eficiencia del empaque disminuye a medida que aumenta la permeabilidad de la formación (*parte superior izquierda*). El revoque de filtración de baja permeabilidad, o el alto factor de daño, reducen las pérdidas de fluidos y aumentan la eficiencia del empaque (*parte superior derecha*). El fluido de transporte tiende a desviarse hacia el espacio anular interno a medida que aumenta el espacio entre el tubo lavador y el filtro de grava—la relación entre el diámetro externo (DE) del tubo lavador y el diámetro interno (DI) del filtro de grava—lo que hace disminuir la eficiencia del empaque (*centro, a la izquierda*). Si bien la diferencia puede ser grande, no es significativa en este ejemplo. El aumento de la viscosidad del fluido de transporte para reducir las pérdidas de fluidos puede mejorar las características de transporte de la grava y la eficiencia del empaque (*centro, a la derecha*). Se puede producir una obturación anular temprana a medida que aumentan las concentraciones de grava (*parte inferior izquierda*). La eficiencia del empaque disminuye a medida que disminuyen las tasas de bombeo y aumentan las pérdidas de fluidos (*parte inferior derecha*).

19. Karlstad S, Sherlock-Willis T, Rajan S, Samsonsen B y Monstad PA: "An Evaluation and Design Approach to Gravel-Pack Treatments in the Gullfaks Field," artículo de la SPE 48978, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EUA, 27 al 30 de septiembre de 1998.

20. Sherlock-Willis T, Romero J y Rajan S: "A Coupled Wellbore-Hydraulic Fracture Simulator for Rigorous Analysis of Frac-Pack Applications," artículo de la SPE 39477, presentado en el Simposio Internacional sobre Control de Daño de la Formación de la SPE, Lafayette, Luisiana, EUA, 18 al 19 de febrero de 1998.

Los cálculos del emplazamiento de grava se basan en un simulador de pozo pseudo-tridimensional, capaz de modelar empaques de grava en pozos entubados o abiertos, horizontales o verticales. Se ha desarrollado un modelo basado en conceptos similares para simular la colocación de empaques de grava mediante filtros de grava Alternate Path con tubos de derivación. Los tratamientos se pueden diseñar con herramientas de servicio en modo de inyección forzada o circulante. En el modo circulante, también se puede modelar la presión de la válvula de superficie, o de estrangulación, y la velocidad de retorno del fluido. El módulo de programación de bombeo utiliza los requisitos específicos del trabajo y datos, tales como la tasa de bombeo, la concentración de grava y los parámetros de fracturas para generar tratamientos de emplazamiento de grava, reduciendo así la cantidad de repeticiones que se necesitan para obtener programas de bombeo satisfactorios.

En el pasado, los fracturamientos combinados con empaques de grava, que por lo general fallaban debido a un desborde prematuro de grava, eran diseñados únicamente utilizando simuladores de fracturamiento hidráulico que no consideraban las herramientas de terminación de fondo de pozo; tales como reducciones de los empacadores, tuberías herméticas, filtros de grava y tubos lavadores. Los usuarios ahora pueden efectuar diseños para controlar la longitud de la fractura y simular tratamientos de fracturamiento combinados con empaques de grava con un simulador recientemente desarrollado que acopla el pozo a la fractura hidráulica.²⁰ Este simulador modificado, basado en un simulador de fracturamiento hidráulico pseudo-tridimensional, calcula parámetros tales como la distribución de grava en las fracturas, la altura de las fracturas, y el flujo del fluido bidimensional como condiciones de borde para el simulador de pozo pseudo-tridimensional.

El flujo de la lechada se simula junto con los efectos de la inclinación del pozo, la decantación y la obturación de grava alrededor de los filtros de grava, y el flujo del fluido a través de las mismas. Asimismo, el simulador de fractura avanzado permite efectuar diseños para controlar la longitud de la fractura en formaciones de alta permeabilidad. También se puede modelar la inducción de la obturación de grava en los pozos mediante la reducción deliberada de la tasa de bombeo, o el desplazamiento de la herramienta de servicio al final de los tratamientos.

Una vez que se obtiene un programa de bombeo definitivo, el módulo de movimiento de la tubería calcula la fricción, el pandeo, los efectos de sondeo y los efectos térmicos. Además, permite a los usuarios diseñar conjuntos de sellos de los empacadores que compensan el potencial movimiento tubular. Los cálculos de la hidráulica del empacador ayudan a generar procedimientos para bajar empacadores a utilizar en tratamientos de empaque de grava de manera segura y evitar la liberación prematura. Los análisis de torque y arrastre proporcionan estimaciones para bajar de manera segura conjuntos de terminación hasta la profundidad final sin quedar atascados ni dañar los componentes.

Empaque con agua en China

Durante mayo de 2001, Schlumberger terminó un pozo marino de petróleo en la Bahía de Bo Hai en China, donde el operador había perforado un pozo de 8½ pulgadas, a ser terminado con un empaque de grava. No se informaron pérdidas de fluido durante la perforación de una sección horizontal de 634 m [2080 pies]. Se realizaron varias simulaciones de diseño con el programa SandCADE para optimizar los procedimientos de empaque con agua en pozos abiertos (abajo). Las simulaciones de emplazamiento de grava indicaron que una tubería de 3½ pulgadas reduciría al mínimo la decantación de grava y mejoraría la eficiencia de bombeo.

Se modelaron velocidades de bombeo de 3 a 8 bbl/min [0.5 a 1.25 m³/min] para determinar la eficiencia de empaque. Tanto a 7 y 8 bbl/min [1.1 y 1.25 m³/min] las altas presiones y las pérdidas de fluidos tuvieron como resultado una obtura-

ción de grava y una eficiencia de empaque de 58 y 88%, respectivamente. Sin pérdidas y con retornos completos en la superficie, las tasas de bombeo de 3 a 6 bbl/min [0.95 m³/min] dieron como resultado una eficiencia de empaque del 100%, pero 3 bbl/min se consideró demasiado bajo, debido a la posibilidad de decantación de la grava en lugares bajos a lo largo del perfil del pozo horizontal.

Se seleccionó el empaque con agua a 5 bbl/min [0.8 m³/min]. Ésta era la tasa más alta con el menor riesgo de obturación que podía proporcionar un empaque completo. El siguiente paso consistió en determinar las pérdidas de fluido permisibles, mediante la variación del factor de daño o de la permeabilidad de la formación en el pozo abierto, de 5 mD y sin pérdidas a 350 mD y alrededor de 2 bbl/min [0.3 m³/min] de retornos de fluidos. La onda alfa se detuvo cuando las tasas de retorno disminuyeron a menos de 2 bbl/min, y los retornos de menos de 3 bbl/min fueron considerados inaceptables por el operador debido al posible aumento de las pérdidas por la erosión del revoque de filtración.

La simulación y el monitoreo del torque y del arrastre durante la bajada y la extracción de la sarta de perforación para desplazar el RDF con fluidos libres de sólidos, ayudaron al operador a determinar los factores de fricción en la tubería de revestimiento y en el pozo abierto. Estos datos se utilizaron en el módulo de torque y arrastre del programa SandCADE para establecer límites horizontales de las diversas sarts de trabajo. Este análisis predijo el posible pandeo de los tubulares de 3½ pulgadas durante la instalación del filtro de grava.

Tasa de flujo, bbl/min	Concentración de grava, ppa	Tiempo total de bombeo, min	Eficiencia de empaque de grava, %	Altura de la duna, pulgadas	Iniciación de onda beta, min	Presión de circulación, lpc	Presión de superficie, lpc
8	0.5	205	68	1.5	28	2625	2863
7	0.5	280	88	2.0	83	2000	2016
6	0.5	369	100	2.8	158	1465	1647
5	0.5	450	100	4.9	254	1020	1151
4	0.5	570	100	5.8	390	650	733
3	0.5	759	100	6.8	536	340	391

^ Diseño del empaque con agua. Antes de empacar con agua una sección de 2080 pies [634 m] de un pozo horizontal en la Bahía Bo Hai, China, se efectuaron varias simulaciones por computadora para optimizar el diseño. Las tasas de bombeo se modelaron en incrementos de 1bbl/min [0.16 m³/min], de 3 a 8 bbl/min [0.5 a 1.25 m³/min] con una concentración de grava constante de 0.5 ppa. A 7 bbl/min [1.1 m³/min] y más, se forman nodos de grava durante la propagación de las ondas alfa debido a las altas presiones diferenciales entre el espacio anular formado por el filtro de grava y el pozo abierto, y el espacio anular entre el tubo lavador y el filtro de grava. Los nodos se continúan desarrollando y se producen obturaciones de grava en el talón del pozo mientras la presión aumenta durante la propagación de la onda beta. Se siguen formando obturaciones incluso a 6 bbl/min. A 3 bbl/min, la eficiencia de empaque es del 100%, pero la altura de la onda alfa es cercana al 80% del volumen del espacio anular. Bombear a 5 bbl/min [0.8 m³/min] se traduce en un empaque completo con una altura de onda alfa anular del 55%.

A pesar de las precauciones adicionales, se produjeron problemas de pandeo como se anticipó mientras se intentaba instalar filtros de grava con sargas de perforación de 3½ pulgadas, de modo que se extrajo el conjunto de filtros de grava y se volvió a bajar con tubería de perforación de 5 pulgadas. Se llevó a cabo un tratamiento de empaque con agua después de comenzar a trabajar nuevamente con la sarga de 3½ pulgadas. Para verificar la circulación, se establecieron retornos de fluidos de 4.7 bbl/min [0.75 m³/min] bombeando la salmuera filtrada a 5 bbl/min antes de emplazar grava con una lechada de 0.5 ppa. Al bombear durante 11 horas a 5 bbl/min se obtuvo una eficiencia de empaque estimada de 158% basada en el volumen de un pozo de 8½ pulgadas de diámetro. Se aplicó un tratamiento de limpieza posterior al empaque para disolver el revoque de filtración restante.

Empaque con tubos de derivación en Kazakhstán

El empaque de grava con filtros de grava Alternate Path se puede extender a secciones abiertas extremadamente largas de pozos horizontales mediante modificaciones específicas y una cuidadosa ingeniería. El Campo Buzachi del Norte, en Kazakhstán Occidental, cerca del Mar Caspio, está a 300 km [190 millas] al norte de Aktau, la ciudad más cercana, y es operado por Texaco. En 1999, el Pozo NB4Z fue uno de los primeros pozos horizontales perforados en este yacimiento de areniscas poco consolidadas y poco profundas, que produce petróleo relativamente viscoso. El emplazamiento de empaque de grava en una sección abierta de 3000 pies [914 m] de un pozo de 8½ pulgadas, requería una cantidad de grava estimada en 85,000 lbm [38,560 kg]. Esto indujo a Texaco a evaluar terminaciones que incluyen empaques con agua y con tubos de derivación (arriba a la derecha).²¹

La sección horizontal NB4Z era mucho más larga que en las terminaciones anteriores en las que se habían utilizado filtros de grava con tubos de derivación de 1100 pies [335 m], de modo que se optimizaron los diseños de filtros de grava y los programas de bombeo para mejorar la eficiencia,

	Empaque con agua	Empaque con tubos de derivación
Masa de grava con 20% de exceso, lbm	102,000	102,000
Tiempo de bajada del filtro de grava, hr	9	15
Tiempo de bajada y extracción del tubo lavador, hr	8	0
Tiempo de bombeo de grava, hr	15	3
Tiempo total de terminación, hr	29	18
Concentración de grava, ppa	0.5	6
Volumen de fluido, bbl	4857	405

< Comparación entre el empaque con agua y el empaque con tubos de derivación. Texaco escogió la tecnología Alternate Path para el pozo NB4Z en el Campo Buzachi del Norte, Kazakhstán, porque los requisitos de tiempo de terminación y volumen de fluido eran considerablemente menores que los del empaque con agua. Ensamblar y operar filtros de grava con tubos de derivación requiere tiempo adicional, pero el tiempo de bombeo se reduce en un 80% puesto que la concentración de grava es mucho más alta. El tiempo total de terminación con empaque con tubos de derivación, es 30% menor que con el empaque con agua. Los volúmenes de fluido de empaque con tubos de derivación son de 10 a 20% de los requeridos por el empaque con agua. En este caso, resultó menor al 10%, lo cual es importante en áreas remotas con suministro limitado de agua.

reducir el tiempo de instalación, y permitir mayores velocidades de bombeo. El diseño AIPAC consistió de dos tubos de transporte largos que se separaban en cada empalme de los filtros de grava para alimentar dos tubos de empaque (próxima página). Esta configuración redujo el número de conexiones de tubos de derivación en un 50% y redujo la posibilidad de pérdidas de fluido y la deshidratación de la lechada en los filtros de grava.

La grava se bombeó en modo de circulación—espacio anular abierto—sin tubos lavadores dentro de los filtros de grava. Cuando la grava llegó a la parte superior del filtro de grava, la lechada se deshidrató inmediatamente mientras el fluido de transporte se fugaba por el filtro de grava y se formaba una obturación anular en la parte superior de la sección horizontal. La lechada se desvió a los tubos de derivación y prosiguió el empaque de grava. El tratamiento se efectuó a 4 bbl/min hasta que la grava mojada causó problemas de mezclado y se tuvo que disminuir la velocidad para que el mezclador pudiera seguir operando. La presión de tratamiento de superficie aumentó durante todo el trabajo y fue lo suficientemente alta como para sobrepasar el esfuerzo de fracturamiento. Sin embargo, no se produjo la rotura de la formación debido a la fricción en los tubos de derivación.

La tecnología de tubos de derivación fue clave para la ejecución exitosa de este empaque de grava en una sección horizontal abiertamente larga en un área remota. El empaque de grava sin tubo lavador redundó en un ahorro del tiempo de instalación y una conexión roscada especial aseguró la alineación correcta del tubo de derivación. De 100 empalmes de los filtros de grava, 97 se alinearon exactamente la primera vez. El armado de los filtros de grava y la velocidad de bajada fue de casi seis conexiones por hora. Se logró un completo empaque de grava, emplazando un 33% más de grava del volumen anular teórico. La producción inicial del pozo llegó a 34 B/D [5 m³/d] de agua y 1257 B/D [200 m³/d] de petróleo, tres veces la producción promedio en este campo de una terminación horizontal con tubería de revestimiento ranurada.

Para escoger entre los métodos de empaque con agua y empaque con tubos de derivación, los operadores tuvieron que evaluar la logística, los riesgos y los costos de cada aplicación. Ambas técnicas se habían utilizado con éxito en largos tramos horizontales con empaque de grava. En secciones largas, el porcentaje de éxito mediante empaque con agua es de alrededor del 70%, mientras que con el empaque con tubos de derivación, es superior al 95%.²² El éxito está relacionado principalmente con el contenido de lutita y la reactividad de la lutita con los fluidos de perforación y terminación, con la longitud de la sección del yacimiento y con la permeabilidad de la formación. Cuando se efectúan empaques de grava con los filtros de grava Alternate Path, se puede remover el revoque de filtración durante las operaciones de empaque de grava, porque no se requiere un pozo sellado.

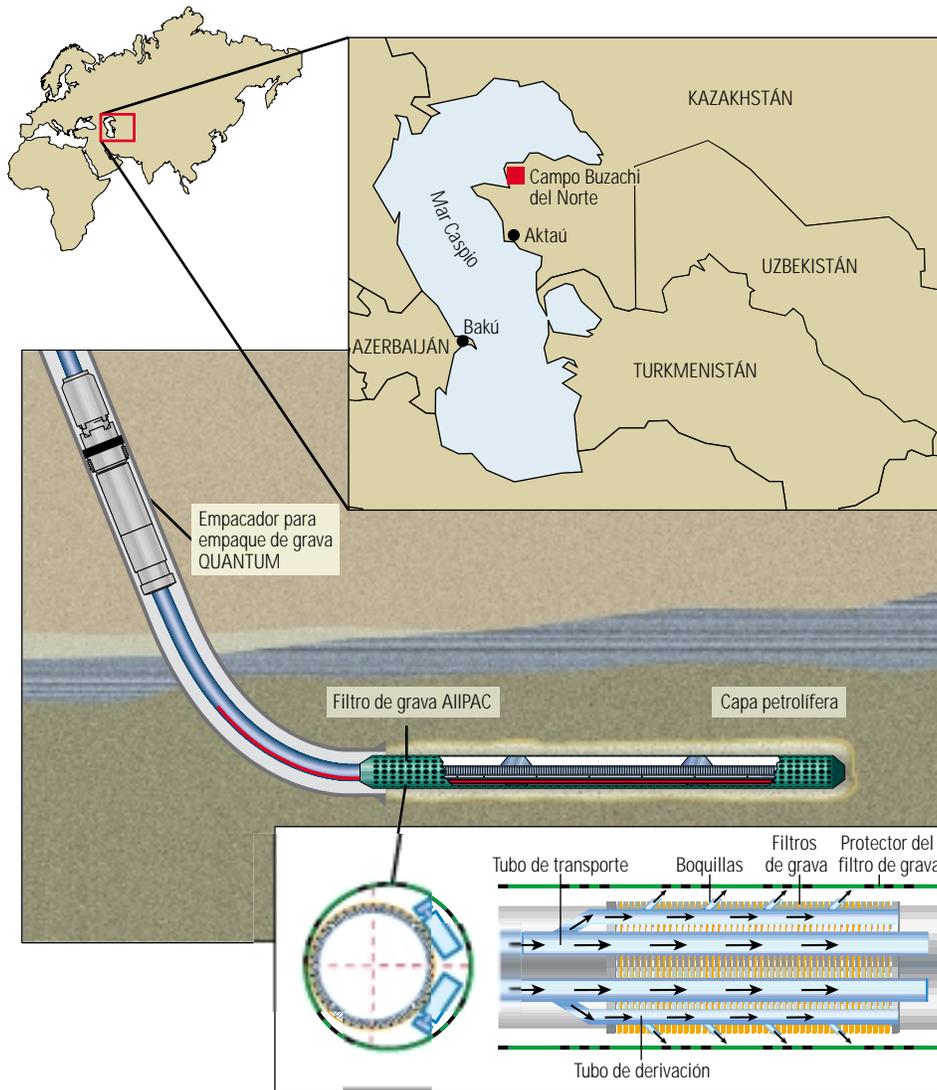
21. Tibbles R, Blessen E, Qian X, Steven B, Pardo C, Hurst G, Kubota R y Mysko P: "Design and Execution of a 3000-ft Horizontal Gravel-Packed Completion (A Kazakhstan Case History)," artículo de la SPE 64410, presentado en la Conferencia y Exhibición de Petróleo y Gas del Pacífico Asiático de la SPE, Brisbane, Queensland, Australia, 16 al 18 de octubre de 2000.

22. Bennett et al, referencia 10.

23. Smejkal KD y Penberthy WL Jr: "Horizontal Completions—1 Proper Drilling, Displacing Critical for Open Hole Completions," *Oil & Gas Journal* 95, no. 29 (21 de julio de 1997): 71-78.

Foxenberg WE y Lockett CD: "Displacement Technology to Ensure a Clean Well Bore," *Petroleum Engineer International* 71, no. 10 (Octubre de 1998): 23-28.

Price-Smith C, Bennett C, Ali SA, Hodge RM, Burton RC y Parlar M: "Open Hole Horizontal Well Cleanup in Sand Control Completions: State of the Art in Field Practice and Laboratory Development," artículo de la SPE 50673, presentado en la Conferencia Europea del Petróleo de la SPE, La Haya, Holanda, 20 al 22 de octubre de 1998.



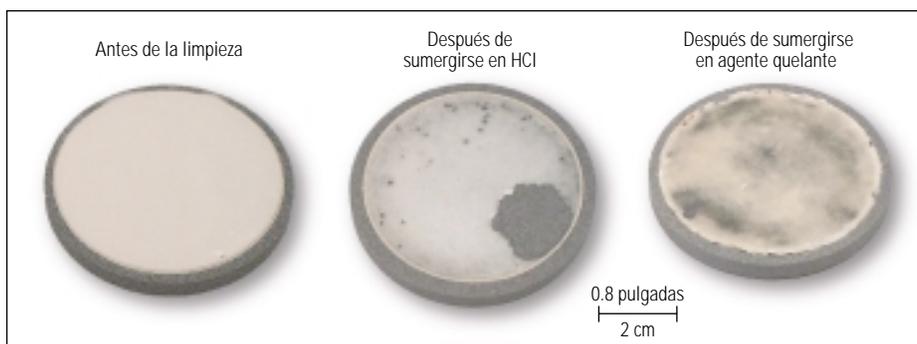
^ Diseño Alternate Path para el Campo Buzachi del Norte en Kazakhstán (*inserto superior*). Los filtros de grava AIPAC para el pozo de Texaco constaron de dos grandes tubos de transporte que se separaban en cada empalme del filtro de grava para alimentar los tubos de empaque (*inserto inferior*). Esta configuración disminuyó el número de conexiones de derivación en un 50% y redujo considerablemente las pérdidas de fluido y la posibilidad de deshidratación de la lechada en la sección abierta del pozo de 3000 pies.

Remoción del revoque de filtración

La obturación del empaque de grava durante la producción depende en gran medida de la limpieza del revoque de filtración del RDF. Las decisiones acerca de la limpieza del revoque de filtración dependen del tipo de filtro de grava, del tamaño de grava y del diseño del pozo; terminación con tubos filtro o con empaque de grava, un pozo de producción o de inyección. Si se requiere limpieza, los ingenieros deben decidir los componentes del revoque de filtración que removerán. Las técnicas de limpieza del revoque de filtración varían desde un contraflujo y producción sin limpieza hasta agresivos procedimientos de desplazamiento y tratamientos químicos en múltiples etapas efectuados con tubería flexible.²³

El revoque de filtración formado por el RDF contiene polímeros, agentes obturantes y densificantes, aditivos para controlar las pérdidas de fluido, así como partículas sólidas de la perforación. Los ácidos, oxidantes o enzimas de alfaamilasa remueven los aditivos de pérdidas de fluido, normalmente almidón u otros polímeros. Los agentes obturantes, normalmente carbonato de calcio o sal de cloruro de sodio, son disueltos por ácidos o salmueras no saturadas, respectivamente. Cuando no hay partículas sólidas de la perforación, las pruebas de laboratorio indican que el efecto del revoque de filtración en la productividad de los empaques de grava es insignificante.

La remoción del revoque de filtración, ya sea formando pequeños orificios o mediante descalcificación, se puede lograr a través del contraflujo durante la producción, si el pozo es relativamente estable. No es necesario la rotura total del polímero. Por lo general, cierta reducción de la resistencia del gel es suficiente para inducir el flujo a bajos diferenciales de presión. Sin embargo, el contraflujo a menudo puede ser problemático, especialmente con tamaños pequeños de grava, filtros de grava de malla premium o preempacados, y bajas caídas de presión.



▲ Limpieza del revoque de filtración. Mediante pruebas de laboratorio en pequeña escala se evaluó el revoque de filtración que se formó en los núcleos por un fluido de perforación del yacimiento con CaCO_3 , almidón y polímero antes de la limpieza (*izquierda*) y después de la limpieza con ácido clorhídrico [HCl] o una solución de agente quelante (CAS, por sus siglas en inglés) a 180°F [82°C]. Existe un único trayecto conductor dominante tras sumergirlo en ácido HCl (*centro*) y una remoción uniforme del revoque de filtración con la solución CAS (*derecha*).

El revoque de filtración que contiene partículas sólidas del fluido de perforación puede requerir altas caídas de presión—mayores a 200 lpc [1.38 MPa]—para iniciar el flujo cuando el revoque de filtración queda atrapado entre la grava y la formación. Además, la permeabilidad retenida después del contraflujo puede ser extremadamente baja; menos del 1% de la permeabilidad original del yacimiento.²⁴ Los resultados de las pruebas y los datos de campo sugieren que la mayor parte de los empaques de grava en pozos horizontales abiertos requiere algún tipo de limpieza.²⁵

El contraflujo sin limpieza química es viable en ciertas terminaciones horizontales largas a pozo abierto, pero se necesitan más datos de registros de producción para cuantificar su efecto a largo plazo en el manejo del yacimiento. La irrupción prematura de agua o gas, o la conificación en áreas en que se forman pequeños orificios, o donde el revoque de filtración se descama pueden hacer que los pozos dejen de ser rentables antes de que se produzcan todas las reservas recuperables. La limpieza no uniforme tiene riesgos similares.

Las enzimas y oxidantes que atacan solamente el almidón y los polímeros, o los ácidos que

disuelven los agentes obturantes de CaCO_3 y rompen los geles polímeros, limpian los componentes del revoque de filtración. Debido a que las fracciones de almidón en formulaciones de RDF son mucho mayores que las de los polímeros, sólo sacando el almidón del revoque de filtración se reduce significativamente la presión de la iniciación del flujo y el deterioro de la permeabilidad. Las enzimas u oxidantes se pueden utilizar al final del tratamiento, durante el desplazamiento de la lechada para remover el almidón y los polímeros, sin embargo, dejan los agentes obturantes. Los tratamientos convencionales para la remoción del revoque de filtración en terminaciones con empaque de grava normalmente incluyen tratamientos de oxidante de un solo paso, enzima y ácido, o de enzima de dos pasos y soluciones de oxidantes, seguidas de ácido.

Hasta hace poco, estos tratamientos se realizaban con tubería flexible tras empaquetar con grava y después de bajar la tubería de producción, requiriendo un segundo viaje de entrada y salida del pozo. El servicio MudSOLV incluye nuevos sistemas para remover el revoque de filtración que combinan una solución de agente quelante (CAS, por sus siglas en inglés) con una enzima para ata-

car el almidón y el CaCO_3 simultáneamente, pero en forma lenta para una limpieza más uniforme del pozo durante o después del empaque de grava (*arriba*).²⁶

Los resultados de las pruebas indican que la remoción del revoque de filtración—el momento en que se produce un pronunciado aumento de las pérdidas de fluido con impregnaciones sobrealanceadas—mediante una solución CAS es de un orden de magnitud más lento que cuando se utiliza ácido clorhídrico [HCl], y que los tiempos de remoción se pueden controlar agregando más enzima, o un surfactante viscoelástico (VES, por sus siglas en inglés) para aumentar la viscosidad (*próxima página, arriba*). Esta baja velocidad de reacción permite emplazar un sistema de una solución CAS y enzima en largos pozos horizontales sin crear zonas ladronas en los puntos de contacto iniciales, algo común cuando se usa ácido HCl.

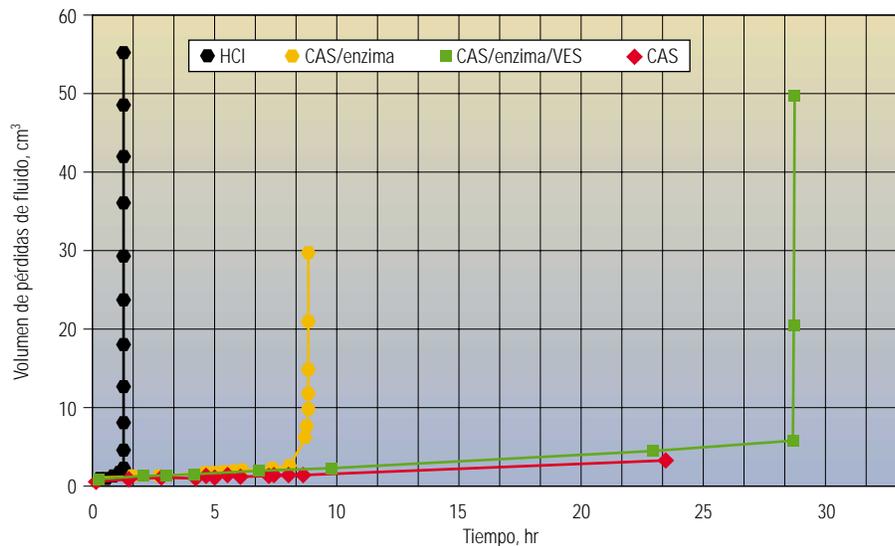
La invasión de sólidos en las formaciones durante la remoción del revoque de filtración, un riesgo inherente a los tratamientos convencionales de dos pasos con enzimas u oxidantes combinados con ácido, se minimiza o elimina mediante el impregnado balanceado con soluciones CAS.

24. Hodge RM, Augustine BG, Burton RC, Sanders WW y Atkinson DJ: "Evaluation and Selection of Drill-In Fluid Candidates to Minimize Formation Damage," *SPE Drilling and Completion* 12, no. 3 (Septiembre de 1997): 174-179.
Burton RC y Hodge RM: "The Impact of Formation Damage and Completion Impairment on Horizontal Well Productivity," artículo de la SPE 49097, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EUA, 27 al 30 de septiembre de 1998.
Price-Smith et al, referencia 23.

25. Brady ME, Bradbury AJ, Sehgal G, Brand F, Ali SA, Bennett CL, Gilchrist JM, Troncoso J, Price-Smith C, Foxenberg WE y Parlar M: "Filtercake Cleanup in Open-Hole Gravel-Packed Completions: A Necessity or a Myth?," artículo de la SPE 63232, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Dallas, Texas, EUA, 1 al 4 de octubre de 2000.

26. Parlar M, Tibbles RJ, Chang FF, Fu D, Morris L, Davison M, Vinod PS y Wierenga A: "Laboratory Development of a Novel, Simultaneous Cake-Cleanup and Gravel-Packing System for Long, Highly-Deviated or Horizontal Open-Hole Completions," artículo de la SPE 50651, presentado en la Conferencia Europea del Petróleo de la SPE, La Haya, Holanda, 20 al 22 de octubre de 1998.

Brady ME, Ali SA, Price-Smith C, Sehgal G, Hill D y Parlar M: "Near Wellbore Cleanup in Openhole Horizontal Sand Control Completions: Laboratory Experiments," artículo de la SPE 58785, presentado en el Simposio Internacional sobre Daño de la Formación de la SPE, Lafayette, Luisiana, EUA, 23 y 24 de febrero de 2000.
Stanley FO, Rae P y Troncoso JC: "Single-Step Enzyme Treatment Enhances Production Capacity on Horizontal Wells," artículo de las SPE/IADC 52818, presentado en la Conferencia sobre Perforación de las SPE/IADC, Amsterdam, Holanda, 9 al 11 de marzo de 1999.



^ Velocidad de reacción. Los aumentos repentinos de las pérdidas de fluido durante las impregnaciones sobrealimentadas de laboratorio indican que la remoción del revoque de filtración con soluciones de agentes quelantes (CAS) son de un orden de magnitud inferior a cuando se utiliza ácido HCl. Las velocidades de reacción para las soluciones combinadas de CAS y enzimas se miden en horas, permitiendo que estos sistemas se emplacen en secciones abiertas de pozos horizontales sin crear zonas ladronas ni altas pérdidas de fluido. Las velocidades de reacción se controlan agregando una solución CAS, enzima o un surfactante viscoelástico (VES, por sus siglas en inglés). Agregar un surfactante VES para una mayor viscosidad o más solución CAS disminuye las velocidades de reacción; en cambio, agregar enzima aumenta las velocidades de reacción.

Este nuevo enfoque evita muchos problemas del lodo y de compatibilidad que se producen cuando ácidos fuertes hacen contacto con algunos crudos, así como también minimiza las dificultades asociadas con la manipulación de ácidos en zonas marinas. Otra consideración importante es la corrosión de los filtros de grava cuando se permite que productos químicos se impregnen por largo tiempo. Las pruebas de muestras de filtros de grava metálicas expuestas a ácido HCl y solución CAS indican que las tasas de corrosión en presencia de agentes quelantes son mucho más bajas que en presencia de ácido HCl (derecha).

En el pasado, los tratamientos para remover el revoque de filtración se realizaban después de instalar los filtros de grava y los empaques de grava, independientemente del método de emplazamiento de la grava. Este enfoque implicaba sacar la tubería de producción y los tubos lavadores—entrando al pozo y saliendo del mismo—para desplazar el fluido de transporte de los filtros de grava y los productos químicos que atacan componentes específicos del revoque de filtración.

Este proceso es lento y caro, especialmente cuando se requieren largos períodos de impregnación para que las enzimas u oxidantes reaccio-

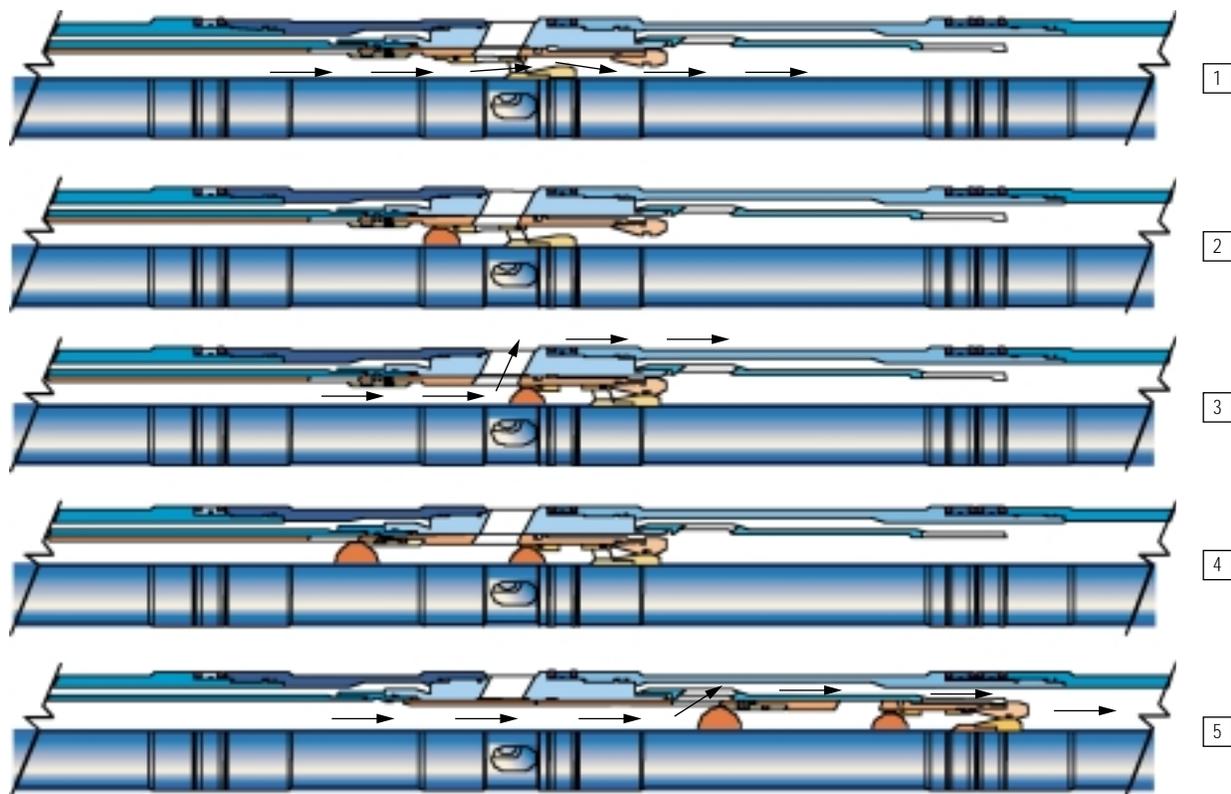
nen con almidón y polímeros en el revoque de filtración. La razón de esta práctica se debe a la incapacidad de circular después del empaque de grava con arreglos de fondo de pozo convencionales. Asimismo, si un revoque de filtración de baja permeabilidad estuviera intacto, bombear soluciones rompedoras y directamente a la sección abierta del pozo, podría ser difícil y produciría una remoción ineficiente y no uniforme del revoque de filtración.

Una simple modificación mecánica de bajo costo provee una vía de circulación hacia el fondo del pozo por la tubería de bombeo y el tubo lavador, de regreso por el espacio anular que existe entre el tubo lavador y los filtros de grava, y hacia la superficie a través del espacio anular entre la tubería de revestimiento y la tubería de trabajo. La nueva herramienta de servicio MudSOLV utiliza el tubo lavador dentro de los filtros de grava para colocar soluciones rompedoras de lenta

Material del filtro de grava	Velocidad de corrosión, lbm/pies ²	
	7.5% de HCl con 1% de inhibidor	CAS con 0.2% de inhibidor
Acero al carbono J-55	0.0110	0.0037
Acero al cromo 13	0.0130	0.0001
Acero 316-L	0.0580	0.0007

Aberturas de los filtros de grava, μm		
Antes de la exposición	150	150
Después de la exposición	250	150

^ Velocidad de corrosión. Las aberturas de los filtros de grava no cambiaron cuando fueron expuestas a una solución CAS en pruebas de laboratorio, pero el ácido HCl aumentó las aberturas de 150 a 250 μm. Esto es suficiente como para afectar negativamente el control de la producción de arena y la integridad de la terminación del pozo cuando se impregnan por tiempos prolongados a altas temperaturas después del empaque de grava.



^ Herramienta de servicio para circular o forzar empaques y para la limpieza posterior al empaque. La herramienta MudSOLV, que ha sido desarrollada recientemente, permite la circulación en tubos lavadores internos después de operaciones de empaque con agua o empaque con tubos de derivación—posición 1: bajándola al pozo; posición 2: lanzamiento de una pequeña bola; posición 3: aumento de la presión para abrir un cruce para el empaque de grava; posición 4: lanzamiento de una bola más grande; posición 5: aumento de la presión para deshabilitar el cruce del empaque de grava y habilitar un nuevo cruce para circulación. Esta modificación permite colocar productos químicos en los tubos filtro o empaques de grava para la posterior impregnación, inyección o circulación, eliminando la necesidad de tratamientos de limpieza con tuberías flexibles. Otra aplicación consiste en desplazar filtros de grava con salmuera tras utilizar ácidos en los fluidos de transporte para remover el revoque de filtración.

reacción con el objetivo de efectuar la limpieza del revoque de filtración inmediatamente después del empaque de grava (arriba).²⁷ Los rompedores de reacción lenta como los oxidantes, enzimas o enzimas combinadas con una solución CAS se pueden colocar en las secciones horizontales sin una pérdida significativa de circulación para la remoción más uniforme del revoque de filtración en mucho menos tiempo que los tratamientos convencionales de limpieza con tubería flexible.

Este enfoque elimina la necesidad de tubería flexible y permite que las soluciones rompedoras se impregnen mientras los pozos se preparan para su puesta en producción, normalmente uno a dos días para bajar y extraer la tubería de producción. Los filtros de grava de control de producción de arena están expuestas a productos químicos por largo tiempo y, dependiendo de su metalurgia, la corrosión puede producir pérdida de la integridad del control de la producción de arena si se deja que fluidos como el ácido HCl se impregnen durante estas aplicaciones.

En principio, la limpieza del revoque de filtración con rompedores de reacción lenta, como las enzimas, se puede realizar durante las operaciones de empaque con agua, pero esto aumenta la incertidumbre acerca de la integridad del revoque de filtración. Agregar rompedores de reacción lenta durante la propagación de ondas las beta previstas, aminora este riesgo en cierta medida, pero usualmente no elimina completamente el riesgo de inducir pérdidas y una obturación prematura. Es posible remover el revoque de

filtración mientras se lleva a cabo el empaque con grava, pero los tratamientos de limpieza se efectúan con posterioridad por varias razones.

En primer lugar, el empaque con agua requiere un revoque de filtración eficaz para mantener la velocidad de lechada crítica para el transporte de grava y evitar que las ondas alfa se detengan debido a las pérdidas de fluidos hacia las formaciones y a la deshidratación de la lechada. Por lo tanto, la limpieza del revoque de filtración antes del empaque con agua no es una

27. Parlar et al, referencia 26.

Brady et al, referencia 26.

Parlar et al, referencia 8.

28. Barrilleaux MF, Ratterman EE y Penberthy WL Jr: "Gravel Pack Procedures for Productivity and Longevity," artículo de la SPE 31089, Simposio Internacional de la SPE sobre Control del Daño de la Formación, Lafayette, Luisiana, EUA, EUA, 14 y 15 de febrero de 1996.

Penberthy et al, referencia 14.

29. Becker TE y Gardiner HN: "Drill-In Fluid Filter Cake Behavior During the Gravel-Packing of Horizontal Intervals—A Laboratory Simulation," artículo de la SPE 50715, presentado en el Simposio Internacional de la SPE sobre la Química de los Campos Petrolíferos, Houston, Texas, EUA, 16 al 19 de febrero de 1999.

Johnson MH, Ashton JP y Nguyen H: "The Effects of Erosion Velocity on Filter-Cake Stability During Gravel Placement of Openhole Horizontal Gravel-Pack Completions," artículo de la SPE 23773, presentado en el Simposio Internacional de la SPE sobre Control del Daño de la Formación, Lafayette, Luisiana, EUA, 26 y 27 de febrero de 1992.

30. Brady et al, referencia 26.

31. Parlar et al, referencia 26.

Parlar et al, referencia 8.

32. Saldungaray PM, Troncoso JC y Santoso BT: "Simultaneous Gravel Packing and Filter Cake Removal in Horizontal Wells Applying Shunt Tubes and Novel Carrier and Breaker Fluid," artículo de la SPE 68205, presentado en la Exposición de Petróleo de Medio Oriente de la SPE, Bahrain, 17 al 20 de marzo de 2001.

opción viable.²⁸ En segundo lugar, el desgaste y la abrasión causados por la lechada de grava en flujo turbulento sobre una velocidad crítica, puede erosionar el revoque de filtración y aumentar las pérdidas de fluidos.²⁹ Las pruebas indican que los tiempos de disolución del revoque de filtración disminuyen significativamente a medida que se reduce el espesor del mismo, y son considerablemente menores que los tiempos requeridos para empaquetar con grava secciones horizontales extremadamente largas.³⁰ Finalmente, los fluidos VES gelificados en soluciones de enzimas, en una solución CAS, o en ambas para el empaque con tubos de derivación y la remoción del revoque de filtración simultáneamente, sólo han sido desarrollados y aplicados recientemente en el campo.³¹

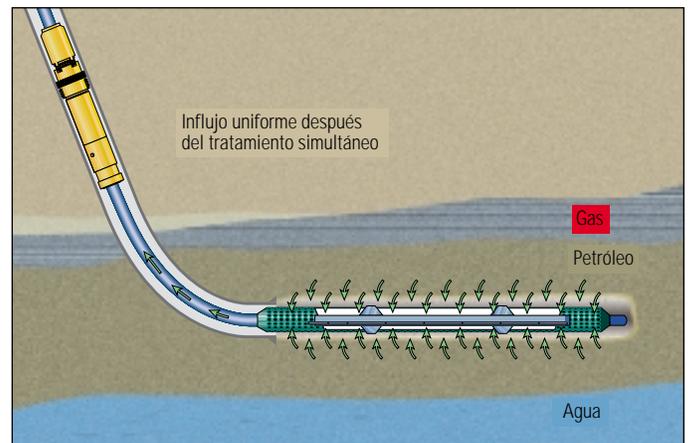
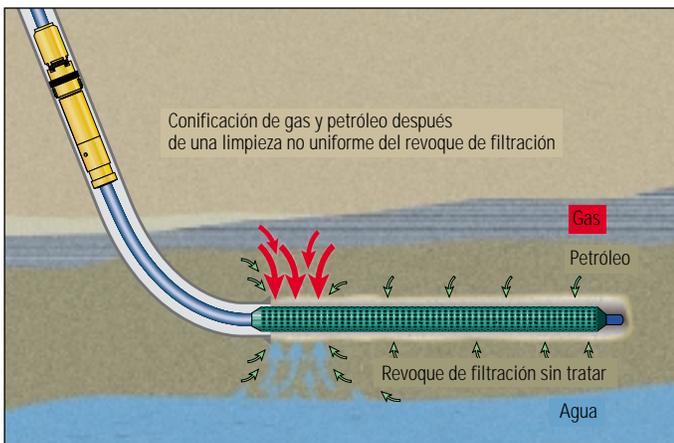
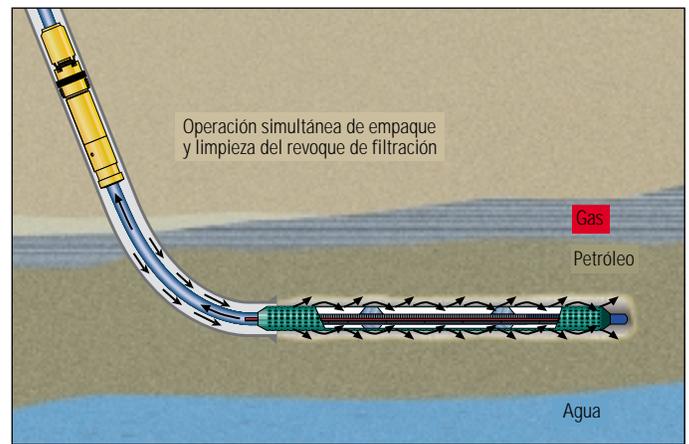
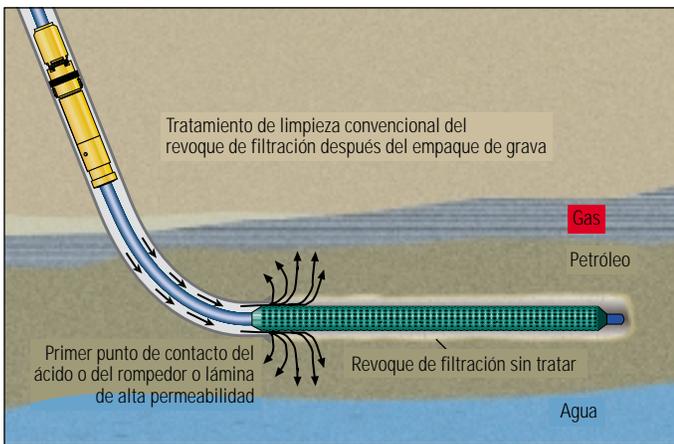
El empaque con tubos de derivación es independiente de la condición del revoque de filtración externo, lo que permite combinar fluidos rompedores de reacción lenta con fluidos de transporte para el empaque de grava y la limpieza del revoque de filtración en un solo paso. Los fluidos rompedores se pueden seleccionar para apuntar a componentes específicos del revoque de filtración, sin afectar las propiedades del fluido de transporte. La limpieza y el empaque de grava con tubos de derivación llevados a cabo de manera simultánea, aseguran el contacto del fluido rompedor en todo el espacio anular y a través de todo el empaque de grava.

¿Por qué perforar largas secciones de pozos horizontales abiertos y luego aceptar un flujo limitado o no uniforme? En comparación con las

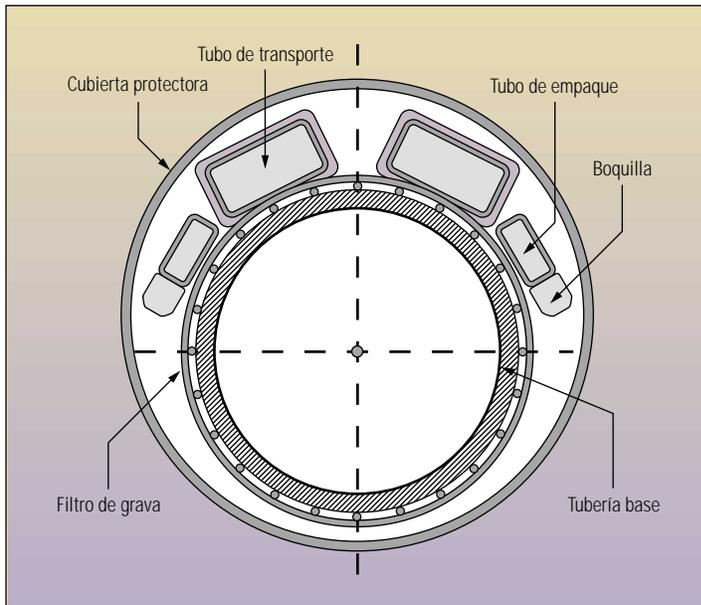
técnicas convencionales de limpieza, el empaque de grava y la remoción del revoque de filtración simultáneos mejoran la productividad del empaque de grava y minimizan el riesgo de irrupciones de agua y de gas o la conificación (abajo). Este método reduce los costos al disminuir los volúmenes de fluidos requeridos y eliminar los posteriores tratamientos de limpieza con tubería flexible.

Empaque de grava y limpieza en un solo paso

En 1999, Repsol-YPF y Schlumberger analizaron las prácticas de construcción de pozos y los datos de producción del Campo Widuri en el Mar de Java indonesio, cerca del sudeste de Sumatra.³² El objetivo era optimizar las terminaciones de los



^ Limpieza simultánea del revoque de filtración. El bombeo de químicos agresivos, como el ácido HCl directamente hacia el fondo por la tubería de producción, por lo general remueve el revoque de filtración en el punto de primer contacto, causando una pérdida preferencial de fluidos en tal ubicación (*arriba a la izquierda*). La remoción localizada del revoque de filtración deja gran parte del pozo sin tratar, con el revoque de filtración intacto. La menor área resultante de entrada de flujo puede inducir a irrupciones de agua y gas, o la conificación (*abajo a la izquierda*). La colocación de soluciones rompedoras a través de los filtros de grava con tubería flexible es más eficaz, pero también requiere volúmenes de fluidos y costos adicionales, en comparación con la tarea de empaquetar la grava y remover el revoque de filtración en un solo paso. El uso de la herramienta MudSOLV de empaque de grava y limpieza simultánea, en conjunto con filtros de grava Alternate Path asegura que sustancias químicas menos agresivas o con reacciones más lentas tomen contacto con el revoque de filtración alrededor del espacio anular a lo largo de todo el pozo (*arriba a la derecha*). Como resultado, el proceso de limpieza es más eficiente, se reducen el diferencial de presión para la iniciación del flujo y las caídas de presión durante la producción. Además, la entrada de fluidos a lo largo de las secciones abiertas del pozo horizontal es más uniforme (*abajo a la derecha*).



▲ Filtros de grava ALIPAC utilizadas en el Campo Widuri. El conjunto de filtros de grava con tubos de derivación consistió de 12 filtros de grava con envoltura de alambre en una tubería base de 4½", con cuatro tubos de derivación y una cubierta protectora de los tubos de 7 pulgadas de diámetro. Se utilizaron dos tubos de derivación como tubos de transporte, y dos con boquillas de carburo cada 6 pies como tubos de empaque. Los tubos de derivación fueron ubicados excéntricamente a lo largo de los filtros de grava para minimizar el diámetro general. La cubierta protege y centraliza los filtros de grava en el pozo abierto para asegurar que al menos 0.8 pulgadas [2 cm] de grava sean colocadas dentro de la cubierta en el lado bajo del espacio anular.

pozos en la formación Talang Akar, un depósito fluvial no consolidado con granos de tamaño medio, alta permeabilidad y con una alta tendencia a producir arena. Este campo fue desarrollado con pozos verticales y de alto ángulo hasta 1996, cuando se perforaron y terminaron los primeros pozos horizontales con tubos filtro de mallas premium.

En 1997, se utilizó por primera vez el empaque con agua para empaquetar con grava secciones abiertas del pozo, utilizando salmuera y bajas concentraciones de grava, de 0.5 a 1 ppa [0.12 g/cm³]. La eficacia del empaque con grava—la grava emplazada versus el volumen estimado del pozo—en 15 terminaciones con empaque con agua efectuadas hasta principios de 1998 fue del 71%, pero algunos trabajos alcanzaron el 100%. Desde entonces, más de 60 pozos horizontales han sido perforados y terminados mediante empaque con agua. Sin embargo, algunos de estos pozos posteriormente produjeron arena y tuvieron fallas en las bombas eléctricas sumergibles. Los datos de los registros de producción y las imágenes de una cámara de fondo de pozo sugirieron que la producción de arena podría estar erosionando los filtros de grava y dañando las bombas de fondo de pozo.

En 1998, los ingenieros de Repsol-YPF implementaron una serie de mejoras al empaque con agua. Se utilizó un fluido RDF con un revoque de filtración de baja permeabilidad para minimizar las pérdidas de fluidos. La integridad del revoque de filtración fue confirmada mediante el establecimiento de la circulación con anterioridad al empaque de grava. Después del bombeo de la grava, se removió el revoque de filtración mediante tratamientos químicos aplicados con tubería flexible. Para fines de 1999, estos procedimientos habían aumentado la eficiencia promedio del empaque de grava en un 89%, con sólo un caso de producción de arena.

Para mejorar aún más las terminaciones, Schlumberger recomendó el empaque de grava y la remoción del revoque de filtración de manera simultánea, utilizando un fluido de transporte MudSOLV libre de sólidos y polímeros con surfactante viscoelástico ClearPAC y filtros de grava con tubos de derivación ALIPAC (arriba). Esta técnica reduce costos de equipo de perforación, de tubería flexible y de fluidos al eliminar los tratamientos de limpieza post-empaque. Debido a que la tecnología Alternate Path asegura empaques completos, también puede eliminar la necesidad

de filtros de grava con malla premium como elemento de respaldo para el control de la producción de arena.

La formulación final equilibró las concentraciones de soluciones CAS, enzimas y surfactantes VES para proporcionar suficiente viscosidad para el transporte de la grava, pero no tanta como para causar una difusión lenta a través del revoque de filtración. El uso de este fluido para remover el revoque de filtración formado en los núcleos sintéticos de 1 a 2 darcys con el fluido RDF propuesto, tuvo como resultado un 92% de retención de permeabilidad.

Se implementó el empaque de grava y la limpieza del revoque de filtración de manera simultánea en el pozo Aida 10. Este pozo, característico del Campo Widuri, se perforó para drenar 45 pies [14 m] de arena de 2 a 5 darcys de permeabilidad, 29% de porosidad, 5% de contenido de arcilla y granos de tamaño medio que requerían una malla de grava 20/40. El yacimiento tiene alta transmisibilidad y un acuífero que provee un fuerte empuje, lo que en general conduce a rápidas irrupciones de agua y a un corte de agua superior al 90%. Una vez que se penetró el intervalo objetivo, se fijó una tubería de revestimiento de 9½ pulgadas, justo encima de la zona productiva antes de que se reanudara la perforación. Sin embargo, la tubería de revestimiento fue cementada, inadvertidamente, 100 pies [30 m] por encima del objetivo en el pozo Aida 10, dejando expuestos 60 pies [18 m] de carbón y lutita. La sección horizontal de 651 pies [198 m] fue perforada con CaCO₃, almidón y polímero RDF.

La lutita y el carbón expuestos también fueron una razón para utilizar filtros de grava con tubos de derivación. Debido a que el empaque con tubos de derivación procede desde el talón a la punta del pozo, los intervalos de carbón y lutita están expuestos al fluido de transporte sólo hasta que se empaquetan las arenas adyacentes. Esto contrasta con la exposición durante un proceso de empaque con agua a medida que la onda alfa avanza desde el talón hacia la punta del pozo, seguida de una onda beta desde la punta hasta el talón. Además, los tubos de derivación permiten el desvío anular del pozo abierto en caso de que las capas de carbón y lutita colapsen.

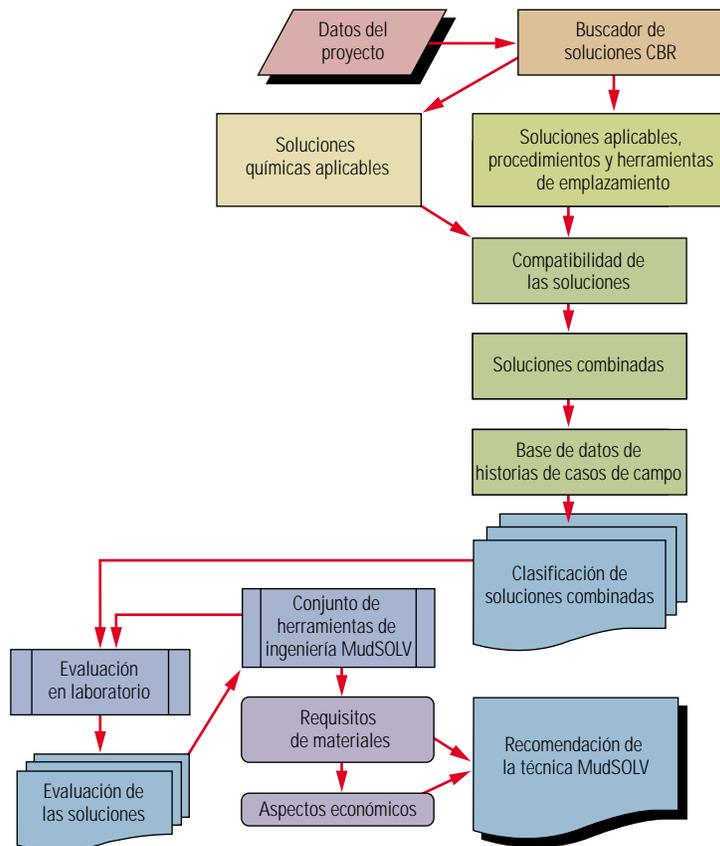
33. Mason SD, Houwen OH, Freeman MA, Brady ME, Foxenberg WE, Price-Smith CJ y Parlar M: "e-Methodology for Selection of Wellbore Cleanup Techniques in Open-Hole Horizontal Completions," artículo de la SPE 68957, presentado en la Conferencia Europea de la SPE sobre Daño de la Formación, La Haya, Holanda, 21 al 22 de mayo de 2001.

Antes de bombear grava en abril de 2000, las pruebas de circulación a 8 bbl/min [1.3 m³/min] indicaban pérdidas totales con cero retorno de fluidos a la superficie. Con el objetivo de mantener simplicidad operacional y lograr una densidad homogénea, la lechada se mezcló por tandas y fue bombeada a 6 bbl/min. Inicialmente, casi no hubo presión de superficie, pero una vez que comenzó el desplazamiento, la presión de tratamiento aumentó a 200 lpc [0.14 MPa]; el primer indicio en superficie de la obturación de la grava y del flujo desviándose a los tubos de derivación. La velocidad de bombeo se redujo gradualmente a medida que la presión aumentaba. La presión

de bombeo alcanzó 2300 lpc [15.9 MPa] y siguió en ese valor por varios minutos mientras la lechada fluía por los tubos de derivación y llenaba los vacíos alrededor de los filtros de grava.

Repsol-YPF evaluó este tratamiento sobre la base de la eficiencia del empaque y del índice de productividad (IP), utilizando parámetros de referencia de 10 pozos terminados en el mismo yacimiento durante 1999. Estos pozos tenían una eficiencia de empaque del 93% y un IP de 97 bbl/lpc-D [2.2 m³/kPa-d]. Los 20,700 lbm [9390 kg] de grava emplazada superaban el volumen anular teórico en un 12%. Sobre la base del exceso de grava y de la presión de superficie, el

equipo a cargo de la terminación concluyó que el pozo abierto había sido empaçado completamente. El pozo produjo más de 13,000 B/D [2070 m³/d] de fluido total con un corte de agua del 40 al 60% y sin arena tras la instalación de una bomba eléctrica sumergible. El IP del pozo Aida 10 superó los 409 B/lpc-D [9.4 m³/kPa-d], siendo sustancialmente más alto que el de pozos anteriores de este campo, terminados con empaque con agua. Un aumento relativamente lento en la producción de agua, en comparación con terminaciones de pozos anteriores, indica una caída de presión más uniforme y más baja a lo largo de la sección abierta del pozo. Hasta la fecha, no ha habido producción de arena y se ha cumplido el objetivo de mejorar la productividad. Estos resultados indican que es posible el empaque con tubos de derivación y la limpieza de manera simultánea, sin por ello poner en riesgo la productividad del pozo y sin requerir circulación ni un revoque de filtración resistente para asegurar el emplazamiento de la grava.



^ Identificación y selección de las técnicas de limpieza. Un enfoque sistemático de la tecnología MudSOLV para la remoción del revoque de filtración en tramos horizontales terminados a pozo abierto, utiliza un programa de computación de razonamiento según casos (CBR, por sus siglas en inglés) y de predicción de productividad, junto con simples herramientas disponibles en la Internet para efectuar estimaciones volumétricas y de costos. El proceso MudSOLV es un sistema de consultas con tablas que permite comparar escenarios con casos almacenados en la base de conocimientos, la cual posee dos bases de casos distintas; una para las opciones aplicables de química de fluidos, y otra para las opciones de herramientas, emplazamiento de grava y procedimientos. Una verificación de compatibilidad resuelve las incompatibilidades entre las combinaciones de estas bases de casos y las clasifica para proporcionar las recomendaciones finales. Para actualizar constantemente la base de conocimientos, el programa CBR se apoya en bases de datos de experiencias de campo y resultados de pruebas de laboratorio.

Metodología de diseño y selección

Las compañías petroleras y los proveedores de servicios han establecido aplicaciones y limitaciones técnicas para los métodos de emplazamiento de grava, las herramientas de fondo de pozo y la química de los fluidos. Sin embargo, puesto que el número de soluciones potenciales es elevado, la selección de las mejores opciones de empaque de grava y limpieza del revoque de filtración requiere conocimiento y experiencia de campo mundial en temas que abarcan desde fluidos de perforación, terminación y estimulación de pozos hasta la ingeniería de terminación de pozos y las operaciones en la localización del pozo.

La experiencia obtenida en los últimos cuatro años es la base para un riguroso enfoque de selección de los métodos de limpieza del revoque de filtración.³³ Hoy se encuentra disponible el programa de computación de razonamiento según casos (CBR, por sus siglas en inglés) para asimilar el conocimiento y la experiencia de empaque de grava, e identificar las técnicas aplicables para un conjunto dado de condiciones y parámetros de pozos. El programa CBR racionaliza el número de opciones de remoción del revoque de filtración, eliminando alternativas sobre la base de las limitaciones técnicas establecidas y clasificando las opciones restantes en base a la información aportada por expertos y por las bases de datos de historias de casos de campo y de laboratorio (izquierda).

Los ingenieros responden a preguntas cuyas respuestas son “sí” o “no” sobre casos individuales, parámetros y condiciones del pozo; variables de terminación; herramientas de fondo de pozo y técnicas de limpieza del revoque de filtración. El sistema usa estas respuestas para conseguir un ajuste razonable entre un pozo en particular y los casos almacenados en la base de conocimientos CBR, planteando preguntas adicionales, según sea necesario, para refinar más aún el nivel de

ajuste o reducir el número de métodos de limpieza aplicables. Cada respuesta tiene un impacto en la aplicabilidad del caso, eliminando algunos y elevando o bajando el nivel de otros. De este modo, los escenarios posibles se ajustan rápidamente al menor número posible de opciones de remoción del revoque de filtración y luego se pueden clasificar las diferentes opciones.

Debido al costo de la remoción del revoque de filtración, a menudo puede ser necesario efectuar

un análisis de laboratorio para decidir entre el contraflujo por sí solo y varios tratamientos de limpieza química. Para evitar pruebas innecesarias, se buscan en una base de datos de laboratorio los datos aplicables existentes para las tres mejores soluciones potenciales. Si no existen suficientes datos disponibles, se llevan a cabo más pruebas. La presión de iniciación del flujo y los datos de permeabilidad retenida se ingresan al programa de computación de análisis NODAL o a sofisticados simuladores de yacimientos para predecir las tasas de producción, evaluar los costos versus los beneficios, e identificar la solución técnica y económicamente más adecuada para un par dado de fluidos de perforación y de terminación.³⁴

34. El análisis NODAL combina la capacidad de un yacimiento de producir fluidos hacia el pozo con la capacidad de las tuberías de producción de conducir el fluido hasta la superficie. El nombre de la técnica refleja las ubicaciones discretas—nodos—en donde ecuaciones independientes describen el flujo de entrada y de salida, relacionando las pérdidas de presión y las velocidades de los fluidos desde los límites externos del yacimiento hacia la tubería de producción, pasando por los elementos de terminación, y a través de las instalaciones de superficie hasta los tanques de almacenamiento. Este método permite calcular las tasas de producción que los pozos son capaces de entregar y ayuda a determinar los efectos del daño, de los disparos, de las estimulaciones, de la presión de boca del pozo o del separador, y de los tamaños de las tuberías y de los reguladores de flujo. También es posible estimar la producción futura, en base a parámetros del pozo y del yacimiento.

Consultas CBR	Respuesta
¿Es práctico acondicionar el fluido RDF en las zarandas vibratoras para evitar taponamiento o daños?	Sí
¿Se instalarán en el pozo filtros de grava de malla premium o preempacados?	No
¿Existe riesgo significativo de dañar o fijar el empacador prematuramente mientras se bajan las herramientas de terminación del pozo en medio del RDF utilizado?	No
¿Se puede formular la salmuera de terminación con una densidad suficiente para el control del pozo?	Sí
¿Es probable que se requiera circulación de fluido para bajar las herramientas de terminación hasta la profundidad total (PT)?	No
¿Se ha bajado este conjunto de herramientas de terminación en este campo con salmuera en el pozo abierto y con pérdidas aceptables, tras perforar con el RDF propuesto?	Sí
¿Es probable que se encuentre un arrastre que pueda llegar a impedir la bajada de las herramientas de terminación hasta la PT?	No
¿Pasará un RDF limpio y sin usar a través de las herramientas de terminación sin causar taponamientos?	Sí
¿Se puede formular un fluido viscoso que sea compatible con el revoque de filtración del fluido RDF?	Sí
¿Se puede formular un fluido viscoso que sea compatible con los fluidos de la formación?	Sí
¿Hay instalaciones para cortar y filtrar de manera eficiente un fluido viscoso?	Sí
¿Se puede formular una salmuera de terminación que sea compatible con el revoque de filtración del fluido RDF?	Sí
¿Se puede formular una salmuera de terminación que sea compatible con los fluidos de la formación?	Sí
¿Se tendrá la capacidad de colocar fluidos en el intervalo abierto del pozo después de instalar las herramientas de terminación?	Sí
¿Existen herramientas disponibles que permitan la colocación, o la circulación, de los fluidos de tratamiento de limpieza tras la instalación de las herramientas de terminación?	Sí
¿Se empacará el pozo con grava?	Sí
¿Será el fluido de transporte del empaque de grava un aceite no acuoso o un fluido sintético?	No
¿Será empacado con grava el pozo a través de un proceso que utiliza un fluido viscoso?	Sí
¿Será ensanchado el pozo abierto?	Sí
¿Se usarán en la terminación filtros de grava con tubos de derivación?	Sí
¿Se terminará el pozo mediante empaque con agua?	No
¿Será ésta una terminación a pozo abierto, con caños filtro o con tubería de revestimiento ranurada?	No
¿Se ha descartado el uso de un fluido de desplazamiento viscoso y claro?	No
¿Se conoce la composición genérica del fluido viscoso y claro que podría usarse como fluido de desplazamiento?	Sí
¿Se ha descartado el uso de salmuera de terminación como fluido de desplazamiento?	No
¿Se conoce la composición genérica de la salmuera de terminación que podría utilizarse como fluido de desplazamiento?	Sí

Resultado: posibles soluciones
Antes de bajar los filtros de grava: Desplazamiento 1) fluido RDF acondicionado o 2) fluido RDF no utilizado o 3) fluido viscoso libre de sólidos o 4) salmuera de terminación. Opciones de emplazamiento de grava y limpieza: 1) simultánea o 2) limpieza post-empaque de grava.

< Consulta sobre el desplazamiento y el emplazamiento de grava, y potenciales soluciones del programa CBR para las terminaciones de pozos en el Campo Harding del Mar del Norte. La solución más rentable que no taponó los filtros de grava ni pone en riesgo la estabilidad del pozo, consistió en dejar un fluido RDF acondicionado en la sección abierta del pozo. El empaque de grava con remoción simultánea del revoque de filtración y la limpieza post-empaque fueron las opciones identificadas para la remoción del revoque de filtración, para el caso de empaque de grava con fluido de transporte tipo VES.

Empaque de grava en pozos del Mar del Norte

Muchos pozos operados por BP en el Campo Harding del Mar del Norte requieren medidas de control de producción de arena. Partes de este yacimiento están formadas por secuencias de arenas con cerca de un 40% de lutitas. Los intervalos productivos son areniscas no consolidadas de 3 a 4 darcys, definidas y bien ordenadas, con tamaño de grano medio de 250 μm D_{50} , y un coeficiente de uniformidad, D_{40}/D_{90} , de 2. Las lutitas

están compuestas por arcilla altamente reactiva, cuyo espesor varía de unos cuantos metros a menos de un milímetro. El análisis granulométrico de las arenas y de las lutitas combinadas indica un alto contenido de finos pobremente ordenados.

Debido a la baja relación entre el espesor neto y el total de las zonas productivas y al alto contenido de finos, BP seleccionó el empaque de grava con filtros de grava Alternate Path para asegurar un completo empaque de grava. Para

facilitar el empaque de grava con tubos de derivación, se especificó un fluido de transporte VES, libre de polímeros y con características de bajo daño y baja fricción. La metodología CBR identificó el fluido RDF acondicionado, el RDF no utilizado, los fluidos viscosos libres de sólidos y la salmuera de terminación como cuatro potenciales opciones de desplazamiento antes de bajar los filtros de grava ([página anterior](#)).

BP prohíbe el ácido clorhídrico y los ácidos orgánicos debido a los potenciales puntos bajos en pozos horizontales, en los que los fluidos estancados pueden causar corrosión. Por ello, las enzimas de etapa única, los oxidantes de etapa única y la combinación de soluciones CAS y enzimas son las únicas opciones químicas disponibles ([izquierda](#)). Los tres casos químicos son aplicables para tratamientos post-empaque, pero requerían tubería flexible para el emplazamiento, debido a que la herramienta de servicio MudSOLV no estaba disponible para circulación inmediata después del empaque de grava. Los costos químicos fueron aproximadamente los mismos para la limpieza simultánea y post-empaque, de modo que los costos de la tubería flexible y de los equipos de perforación hicieron del empaque de grava y la limpieza simultánea del revoque de filtración la opción más económica.

Después del análisis, quedaron tres opciones: iniciar el flujo en el pozo y producir sin limpieza del revoque de filtración, y el emplazamiento de grava y la limpieza de manera simultánea con enzima sola o bien, utilizando solución CAS con enzima en el fluido de transporte. Las pruebas de laboratorio proveyeron las presiones de iniciación de flujo y las permeabilidades retenidas para estas tres opciones, que se incorporaron a los simuladores

< Consultas sobre la química de los fluidos y la limpieza del revoque de filtración y las potenciales soluciones del programa CBR para las terminaciones de pozos en el Campo Harding del Mar del Norte. El análisis de los casos químicos almacenados en la base de datos indicó como opciones potenciales a las enzimas de una sola etapa, oxidantes de una sola etapa y la combinación de soluciones CAS y enzimas. La incompatibilidad con un surfactante VES eliminó los oxidantes para el empaque de grava y la remoción del revoque de filtración de manera simultánea, dejando como potenciales soluciones al contraflujo sin limpieza, a las enzimas por sí solas o a la combinación de solución CAS y enzimas.

Consultas de CBR	Respuesta
¿Se necesita una salmuera divalente (Ca, Mg, Zn) como fluido de transporte rompedor para aumentar la densidad equivalente del fluido requerida?	No
¿Son los agentes obturantes o las partículas sólidas en el fluido RDF principalmente CaCO_3 ?	Sí
¿Son los agentes obturantes o las partículas sólidas en el fluido RDF principalmente sal tamizada?	No
¿Es probable que haya puntos bajos en la terminación en donde el fluido rompedor se pueda acumular y permanecer por períodos mayores a los fijados para el comienzo de la inyección o la producción?	Sí
¿Es la mineralogía de la formación (zeolitas, sideritas, cloritas) sensible a los ácidos minerales?	No
¿Es el fluido de la formación incompatible con el ácido HCl?	No
¿Hay calcitas (carbonatos) en la formación que sean incompatibles con el ácido fórmico en altas concentraciones?	No
¿Prohíbe el operador el uso de ácido HCl?	Sí
¿Prohíbe el operador el uso de ácidos orgánicos?	Sí
¿Contendrá el fluido RDF una cantidad significativa de polímero de poli(acrilamida parcialmente hidrolizada (PHPA, por sus siglas en inglés)?	No
¿Se encuentra la arenisca del intervalo del pozo abierto con un material de cementación de carbonatos?	No
¿Pueden las instalaciones de superficie—separadores y calentadores—manejar ácidos?	No
¿Será el pozo un inyector sin etapa previa de producción?	No
¿Es la formación sensible a un inhibidor de corrosión de ácidos? (Si no sabe, llame a un experto.)	No
¿Es el fluido RDF un fluido sintético a base de aceite?	No
¿Se encuentra el pH del fluido de transporte entre 3 y 10?	Sí
¿Hay almidón en el fluido RDF?	Sí
¿Hay xantano en el fluido RDF?	Sí
¿Hay escleroglucano en el fluido RDF?	No
¿Tiene el gas seco de producción poco o ningún condensado de petróleo?	No
¿Es la salmuera de transporte deseada o requerida compatible con el surfactante VES?	Sí
¿Han demostrado los fluidos del yacimiento una tendencia a formar emulsiones con el surfactante VES?	No
¿Es aplicable una herramienta de circulación post-empaque de grava para las operaciones de empaque de grava?	No
¿Es la temperatura de fondo de pozo superior a 250°F [121°C]?	No

Resultado: posibles soluciones

Sustancias químicas aplicables para la limpieza del revoque de filtración: 1) ninguna (contraflujo) o 2) enzima o 3) oxidante o 4) solución CAS y tratamientos de enzimas

Procedimiento y combinación química para: Empaque de grava y remoción del revoque de filtración de manera simultánea con 1) surfactante VES y enzima o 2) surfactante VES, solución CAS y enzima.

Procedimiento y combinación química para: Remoción del revoque de filtración post-empaque de grava con 1) oxidante o 2) surfactante VES y enzima o 3) surfactante VES, solución CAS y enzima

Requisito para el emplazamiento: Tubería flexible

para predecir las tasas de producción (abajo, a la derecha). Los pronósticos de producción fueron esencialmente los mismos, independientemente del tratamiento químico o del contraflujo sin limpieza, pero se garantizaba cierta remoción del revoque de filtración porque la entrada de flujo en la sección horizontal podría no ser uniforme y podría conducir a la conificación de agua o de gas y reducir la vida útil del pozo.

Después de asentar un revestimiento de 7½ pulgadas en el primer pozo en el que se empleó este procedimiento, se perforaron alrededor de 300 pies [91 m] de 8½ pulgadas con una inclinación de 75°, con el mismo lodo a base de aceite sintético que se utilizó en secciones superiores del pozo. Este fluido de perforación se desplazó con un fluido RDF de formiato de sodio y potasio que incluía polímero, almidón y CaCO₃, y la sección abierta del pozo fue ensanchada de 8½ a 10 pulgadas [22 a 25 cm].

El fluido RDF se filtró a 63 µm a través de un tamiz vibrador calibre 230 antes de correr un filtro de grava de envoltura de alambres, con tubos de derivación y cubierta protectora de 4½ pulgadas, con aberturas calibre 16 de 400 µm para impedir la obturación del filtro de grava. Los ingenieros de lodo probaron el fluido RDF en un filtro de grava de muestra, dentro de una celda modificada destinada a evaluar las pérdidas de fluido para asegurarse de que no se produjera obturación.

Después de bajar los filtros de grava hasta la profundidad total, la sección abierta del pozo fue desplazada con salmuera de NaCl filtrada, se fijó el empacador superior, y se cambió la herramienta de servicio a la posición circulante. Se inyectó grava a 5 bbl/min en un fluido de transporte VES con enzimas para disolver los polímeros del revoque de filtración hasta que se produjera la obturación de grava. Cuando el flujo se desvió hacia los tubos de derivación, la velocidad de bombeo se redujo a 2 bbl/min.

Se inyectó un total de 180 bbl [28 m³] de lechada en una hora, indicando un empaque completo en base a los cálculos del calibre del pozo. El empaque con agua con concentraciones más bajas de grava habría requerido tres horas y media, y la eficiencia de empaque de grava hubiese sido cuestionable. BP realizó una serie de pruebas de incremento de presión después del empaque de grava. Éstas indicaron que el factor de daño mecánico había mejorado de 5.5 a 2.7 durante las primeras ocho semanas de producción. El factor de daño para los empaques de grava en pozos abiertos en yacimientos arcillosos es normalmente de alrededor de 8, de modo que la producción de petróleo de este pozo, de 7700 B/D [1224 m³/d] fue un 30% superior al promedio.³⁵

Empaque de grava bombeando por sobre la presión de fracturamiento

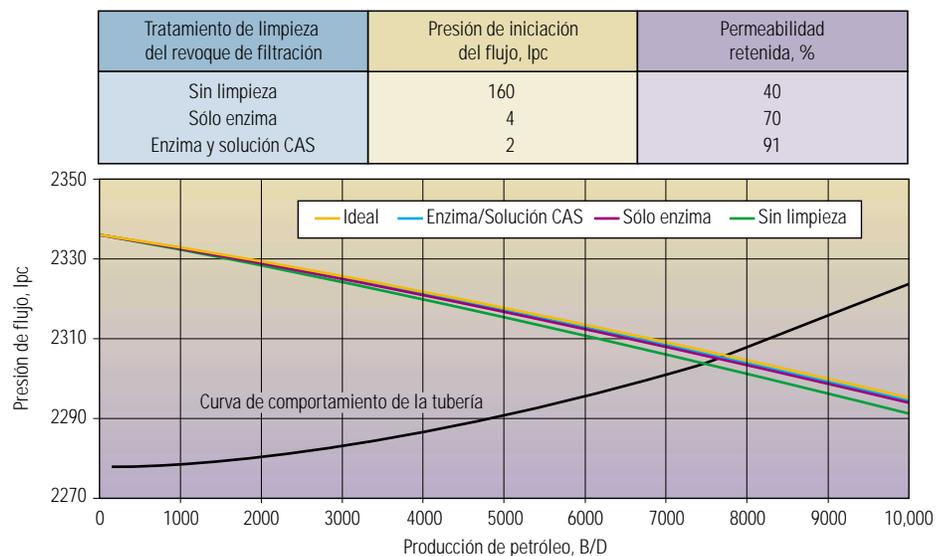
Durante el empaque con agua, se evita el fracturamiento para mantener la integridad del revoque de filtración y minimizar las pérdidas de fluido. Sin embargo, inyectar lechada por sobre la presión de fracturamiento de la formación permite el emplazamiento con filtros de grava Alternate Path. Además de romper a través del revoque de filtración externo e interno que no se remueve con los tratamientos químicos, los beneficios potenciales incluyen estimulación adicional para mejorar la productividad o la inyectividad y reducir la posibilidad de obturación, especialmente en pozos inyectoros en los que la mayor área de flujo extiende la vida útil del pozo.³⁶

A diferencia del fracturamiento y del fracturamiento combinado con empaque de grava convencionales, este proceso no inicia y propaga fracturas con colchones de fluidos libres de sólidos o con altas concentraciones de grava para extender las fracturas. En cambio, requiere sólo que la presión de iniciación de la fractura sea excedida mientras se bombea y emplaza grava. Esta técnica es un método sencillo y efectivo en materia de costos, que no tiene la complejidad de los tratamientos de fracturamientos combinados con empaque de grava y de los métodos de generación de múltiples fracturas.

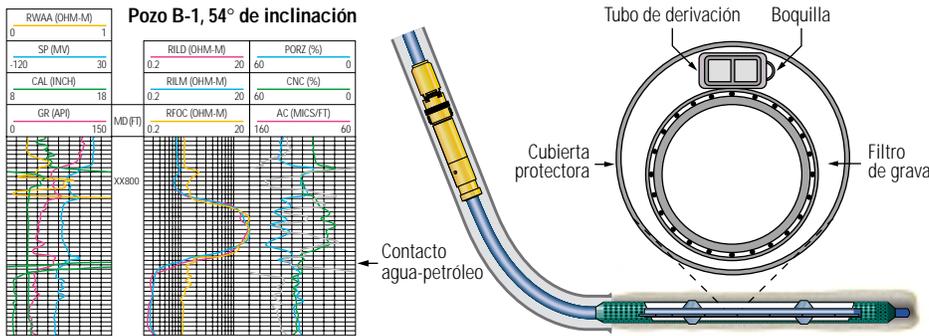
El empaque de grava bombeando por sobre la presión de fracturamiento utiliza fluidos viscosos

bombeados de manera forzada. La deshidratación de la lechada se produce una vez que se alcanza la presión de fracturamiento, y una pequeña porción penetra el revoque de filtración y la formación. Las altas pérdidas de fluido hacia las fracturas creadas provocan que la grava se acumule rápidamente y empaque el espacio anular en esa sección. La lechada se desvía a través de un tubo de transporte hacia otra sección abierta del pozo, iniciando así múltiples fracturas a lo largo del pozo (página siguiente, abajo). Si no hay aislamiento en el espacio anular entre los tubos lavadores y el tubo base, la lechada se puede deshidratar entre los filtros de grava y el pozo abierto, permitiendo que el fluido de transporte se pierda en secciones fracturadas con anterioridad.

Cierto grado de aislamiento anular entre los tubos lavadores y el tubo base del filtro de grava a intervalos seleccionados, impide la deshidratación de la lechada de grava a través de los filtros de grava y previene las pérdidas de fluido en las secciones que ya estaban fracturadas y empacadas. Esta disposición de la herramienta de fondo permite el empaque de grava selectivo de algunos intervalos y el fracturamiento de otros. Con el uso de dispositivos de aislamiento, los operadores pueden ahora empaquetar con grava cerca del talón del pozo en modo circulante, y empaquetar fracturas cerca de la punta del pozo en el modo forzado, si así se deseara.



▲ Presión de iniciación de flujo (FIP, por sus siglas en inglés) y permeabilidad retenida en terminaciones de pozos en el Campo Harding del Mar del Norte (arriba). Los cálculos de producción del análisis NODAL (abajo) fueron casi los mismos para el contraflujo solo (verde) o con remoción química del revoque de filtración utilizando sólo enzima (morado), o una solución CAS con una enzima (azul), comparado con el comportamiento ideal de la formación (anaranjado), indicando que podría no necesitarse una solución CAS para remover los agentes obturadores. El contraflujo con limpieza del revoque de filtración produce una FIP de 160 lpc [1,1 MPa], mucho mayor que el límite en la caída de presión de 40 lpc [275 kPa] establecido por BP. La caída de presión estimada fue de alrededor de 32 lpc [220 kPa] sin limpieza, de modo que el costo incremental de un tratamiento con enzima se justificaba para asegurarse de que la FIP estuviera por debajo del límite impuesto.



Un proceso similar, la reinyección de los recorres de perforación, genera múltiples fracturas alrededor de los puntos de inyección y demuestra la factibilidad del empaque de grava bombeando por sobre la presión de fracturamiento. El bombeo de grava por sobre la presión de fracturamiento ha sido exitoso en terminaciones de pozos entubados en el Mar del Norte, en el Golfo de México, y en África Occidental para lograr factores de daño posteriores al empaque similares a los de los fracturamientos combinados con empaque de grava convencionales más grandes. En yacimientos con alta presión de fondo de pozo, esta técnica elimina la necesidad de densificar los fluidos base para controlar el pozo. Cuando se bombea grava de

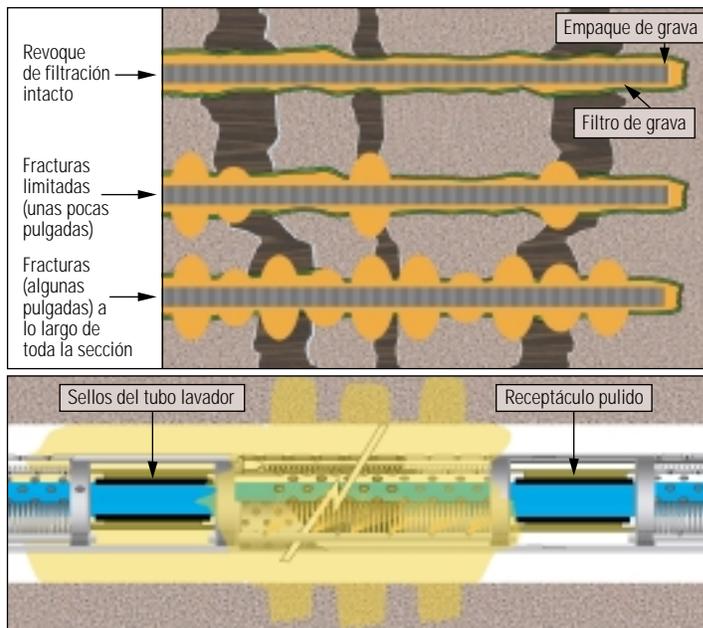
manera forzada no se circula fluido en el espacio anular, y es posible utilizar cualquier fluido densificante, incluidos los aceites gelificados livianos o las salmueras de baja densidad.

Stone Energy Corporation perforó un nuevo pozo desde el Pozo B-1 para desarrollar reservas en la parte alta de la estructura en el Golfo de México cerca de Luisiana, EUA.³⁷ A partir de septiembre de 1993, el pozo original B-1 produjo desde la zona más profunda de las arenas objetivo hasta febrero de 2000, cuando cesó la producción de gas debido a las altas producciones de agua. La zona objetivo consta de dos arenas separadas por una lutita delgada. La arena superior es de grano fino con una permeabilidad esti-

◀ Emplazamiento de grava bombeando por sobre la presión de fracturamiento, Golfo de México. Stone Energy Corporation seleccionó el empaque de grava y la limpieza del revoque de filtración de manera simultánea en lugar de la terminación con tubos filtro para el pozo desviado B-1 en el Golfo de México, con el fin de evitar la obturación y la erosión durante la irrupción de agua. El operador no quiso efectuar un fracturamiento combinado con un empaque de grava cerca del agua (*izquierda*), sino que decidió emplazar la grava bombeando por sobre la presión de fracturamiento en la sección abierta horizontal de 277 pies [84-m], utilizando filtros de grava AIPAC con un tubo de derivación para asegurar la conductividad de la formación (*derecha*). La utilización de fluido ClearPAC y MudSOLV con solución CAS y enzimas para el empaque de grava y la disolución del almidón y del CaCO₃ de manera simultánea, permitió un empaque de grava efectivo y una entrada de flujo uniforme, minimizando la conificación de agua.

mada de 150 mD, una saturación de agua de 60% y 6 pies [1.8 m] de espesor neto. La arena inferior es limpia con granos grandes, una permeabilidad de 1000 mD, una saturación de agua de 10% y 16 pies de espesor neto por encima de la zona de agua. Este pozo desviado se terminó con una sección horizontal de 277 pies [84 m] dentro de la arena inferior.

Debido a la posible producción de arena y al fuerte empuje del acuífero de fondo, Stone Energy quería terminar el pozo con un empaque de grava que minimizara la conificación de agua y maximizara la recuperación de reservas sin la remoción del revoque de filtración con tubería flexible ni estimulación correctiva. La limpieza simultánea del empaque de grava y del revoque de filtración usando un fluido de transporte de solución MudSOLV y ClearPAC VES con una solución CAS y enzima para disolver el almidón y el CaCO₃ cumplió estos objetivos. Se eliminó una terminación de tubos filtro, por el riesgo de obturación y erosión del filtro de grava después de la irrupción del agua. Un conjunto de filtros de grava AIPAC con un tubo de derivación redujo el riesgo de un empaque incompleto, eliminó la necesidad de agentes para evitar las pérdidas de circulación antes del empaque de grava, y permitió utilizar filtros de grava con envoltura de alambre en lugar de filtros de grava de malla premium (*arriba*).



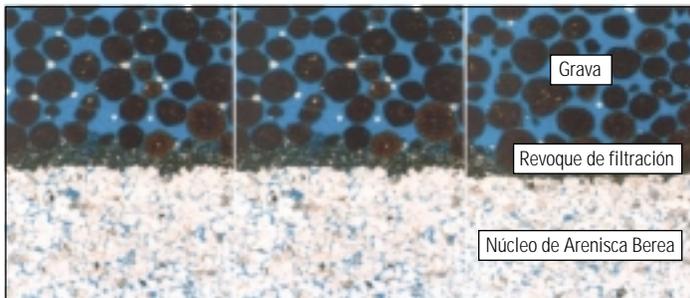
▲ Empaque de grava bombeando por sobre la presión de fracturamiento. Dos elementos esenciales del equipo de fondo de pozo facilitan el emplazamiento de la grava bombeando por sobre la presión de fracturamiento de la formación. Los filtros de grava con tubos de derivación que cuentan con tubos de empaque y de transporte aseguran que se inicien múltiples fracturas a lo largo de extensas secciones abiertas horizontales del pozo (*arriba*). Para evitar las pérdidas de fluidos hacia secciones anteriormente fracturadas e impulsar las fracturas múltiples, se colocan sellos en el tubo lavador interno para que coincidan con los receptáculos de agujeros pulidos en los filtros de grava, aislando el espacio anular entre el tubo lavador y los filtros de grava a lo largo de intervalos discretos (*abajo*).

35. McKay G, Bennett CL y Gilchrist JM: "High Angle OHGPs in Sand/Shale Sequences: A Case History Using a Formate Drill-In Fluid," artículo de la SPE 58731, presentado en el Simposio Internacional de la SPE sobre Daño de la Formación, Lafayette, Luisiana, EUA, 23 y 24 de febrero de 2000.

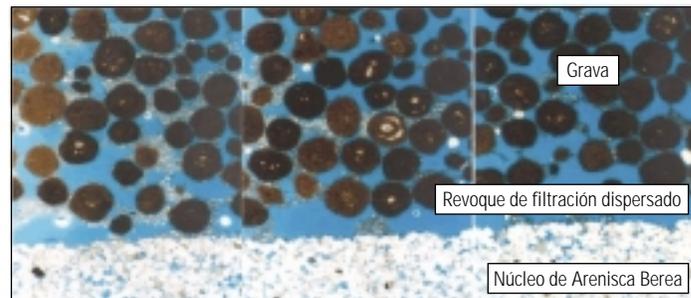
36. Parlar et al, referencia 8.

37. Godwin K, Gadiyar B and Riordan H: "Simultaneous Gravel Packing and Filtercake Cleanup with Shunt Tubes in Open-Hole Completions: A Case History from the Gulf of México," artículo de la SPE 71672, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EUA, 30 de septiembre al 3 de octubre de 2001.

Revoque de filtración de un fluido a base de agua después del contraflujo



Revoque de filtración sintético de un fluido a base de aceite después del contraflujo



^ Comparación de la remoción de revoque de filtración de un fluido a base de agua y a otro base de aceite. En evaluaciones de laboratorio, las fotografías de secciones delgadas de un revoque de filtración frente a grava artificial muestran diferencias significativas tras la limpieza con oxidante y contraflujo. El revoque de filtración del fluido a base de agua sigue intacto en lo esencial (*izquierda*). La permeabilidad retenida se determina a través de pequeños orificios o canales. Por lo común, el revoque de filtración del fluido a base de aceite es más delgado y fácil de remover, y a menudo no requiere tratamientos adicionales de limpieza. El mecanismo de limpieza para el revoque de filtración del fluido a base de aceite es esencialmente distinto al del revoque de filtración del fluido a base de agua; prácticamente todo el revoque de filtración se saca de la cara del núcleo y se dispersa en los espacios porosos de la grava o a través de la misma (*derecha*).

El equipo de terminación no deseaba el fracturamiento combinado con empaque de grava en zonas cercanas al agua. Por lo tanto, decidió empacar con grava bombeando por sobre la presión de fracturamiento para mejorar la conductividad de la formación. El empaque con tubos de derivación no se basa en la integridad del revoque de filtración, de modo que se emplazó grava con la herramienta de servicio fijada en posición de inyección forzada para aumentar la probabilidad de fracturar a bajas tasas de inyección.

El tratamiento se efectuó bombeando a 5 bbl/min, por debajo de la capacidad de bombeo de un solo tubo de derivación de 6 bbl/min. Después de que se bombeó el 40% de la lechada, la presión de superficie aumentó a 3400 lpc [23 MPa] cuando se produjo una obturación de grava en el espacio anular. En este punto del tratamiento, se desvió lechada hacia el tubo de derivación, la presión de bombeo cayó a 2000 lpc [14 MPa] y se continuó con el empaque. Tras emplazar el 75% de la grava, el trabajo se completó con la herramienta de servicio fijada en posición de circulación para asegurar un empaque completo en la parte superior de los filtros de grava.

Más del 150% del volumen de grava requerido para llenar el espacio anular calculado se emplazó alrededor de los filtros de grava y de la tubería hermética. La producción inicial de gas fue de 15 MMpc/D [430.000 m³/d] sin agua. No fue necesaria la remoción del revoque de filtración tras la terminación. Con el análisis NODAL se logró un ajuste entre los datos reales y teóricos de producción con una permeabilidad de la formación de 1000 mD y un factor de daño de cero, indicando una eficiencia de flujo cercana al 100%. Cinco meses después de la terminación, comenzó la producción de agua, y la producción de gas comenzó a disminuir a medida que la producción de agua aumentaba. Después de 14 meses, el pozo des-

viado B-1 producía gas libre de arena, fluyendo a 2.5 MMpc/D [72.000 m³/d] con 2300 B/D [365 m³/d] de agua y recuperando 4 Tpc [143 millones de m³] de gas, la mayor parte de las reservas estimadas. La limpieza uniforme del revoque de filtración contribuyó a un drenaje eficiente a lo largo de la cima estructural de este yacimiento.

Técnicas emergentes de control de producción de arena

A menudo los ingenieros de perforación prefieren fluidos de perforación sintéticos a base de aceite por sobre aquéllos a base de agua para obtener una mayor lubricación, mayores velocidades de penetración, una mejor estabilidad del pozo y una superior estabilización de las lutitas, especialmente para pozos horizontales o de alto ángulo.³⁸ Además de la amplia experiencia de empaque de grava con fluidos de terminación y perforación a base de agua, los ingenieros de terminación prefieren un fluido RDF a base de agua debido a las emulsiones o lodos que se suelen formar con ciertos sistemas a base de aceite y ciertos crudos. Por otro lado, los fluidos de transporte sintéticos a base de aceite capaces de controlar las presiones del pozo durante el empaque de grava no se encontraban disponibles hasta hace muy poco tiempo.

Los fluidos de transporte a base de agua requieren que los operadores cambien de un fluido RDF a base de aceite a uno a base de agua en secciones del yacimiento o antes del empaque de grava. En el pozo abierto, este cambio es costoso, implica procedimientos de desplazamiento que algunas veces son ineficaces y requiere complejos procedimientos de manejo de fluidos en equipos de perforación. En muchos casos, las secciones superiores del pozo se perforan con un fluido RDF a base de aceite, pero las secciones del yacimiento se perforan con un fluido RDF a base de agua, lo que también requiere un desplazamiento.

Los datos de laboratorio y de campo indican que los diferenciales de presión para el descañado del revoque de filtración de fluido a base de aceite y el contraflujo son menores, la limpieza es más fácil y las permeabilidades retenidas son mayores que para el revoque de filtración de fluido a base de agua (*arriba*).³⁹ Sin embargo, las presiones de levantamiento varían cuando la grava es pequeña y la permeabilidad de la formación cambia a lo largo del pozo. En yacimientos heterogéneos con una significativa variación de permeabilidad, el contraflujo sin limpieza puede provocar perfiles de producción desiguales e irrupciones prematuras de agua o de gas. Del mismo modo que en el caso del revoque de filtración de fluido a base de agua, la combinación de químicos de limpieza con fluidos de transporte en lugar de utilizar el contraflujo mejora la productividad, de modo que es deseable tener sistemas de empaque de grava y limpieza del revoque de filtración simultáneos para los fluidos RDF a base de aceite.⁴⁰

Sin embargo, los agentes obturantes y densificantes en el revoque de filtración de los fluidos RDF a base de aceite están recubiertos con una fase de aceite que contiene surfactantes que favorecen la mojabilidad del aceite para formar emulsiones de aceite externo.⁴¹ Esto convierte a las partículas de CaCO₃ prácticamente en inertes a los ácidos y las hace difíciles de remover. Para resolver este problema, hoy existe un fluido RDF sintético a base de aceite que se invierte a una emulsión de agua externa y convierte a las partículas de CaCO₃ a mojables por agua cuando son expuestas a una solución modificadora del pH. Con surfactantes específicos, el fluido RDF a base de aceite se formula como una emulsión de aceite externo por encima de un determinado pH y como emulsiones de agua externa por debajo de éste. Al igual que el empaque de grava y la remoción del

revoque de filtración en forma simultánea para pozos perforados con un fluido RDF a base de agua, esta formulación química sensible al pH elimina la necesidad de una limpieza separada.

Tantos los fluidos a base de agua como los a base de aceite proporcionan una excelente limpieza del revoque de filtración en pozos perforados con un fluido RDF sintético a base de aceite, siempre y cuando la reología sea adecuada para empaque de grava con filtros de grava con tubos de derivación y la fase acuosa contenga un modificador de pH y un disolvente del agente obturante. Las emulsiones de aceite externo, preferiblemente con el mismo tipo de salmuera y aceite base en la fase acuosa interna que el fluido RDF sintético a base de aceite, son otra alternativa de fluidos de transporte. En este caso, la fase interna del fluido de transporte contiene un modificador de pH y un disolvente del agente obturante tal como una solución CAS o un ácido.

Los tubos filtro, el empaque de grava y el fracturamiento combinado con empaque de grava no son las únicas opciones para estabilizar los pozos abiertos. Los filtros de grava expandibles que tienen un diámetro reducido que se expande contra la pared del pozo después de bajarse al pozo, parecen ofrecer algunas ventajas (arriba, a la derecha).⁴² La teoría de la mecánica de las rocas indica que si los filtros de grava ejercen fuerza contra las paredes del pozo, los filtros de grava expandibles pueden prevenir la producción de arena, ya que se requieren mayores fuerzas de compactación para iniciar la falla en la roca y comenzar la producción de arena en la interfaz formación-pared del pozo.

Estos filtros de grava eliminan el empaque de grava, reducen los costos de construcción de pozos al permitir la perforación de pozos de menor diámetro y proporcionan mayores diámetros interiores para una mejor capacidad de intervención, una mayor capacidad de flujo y,

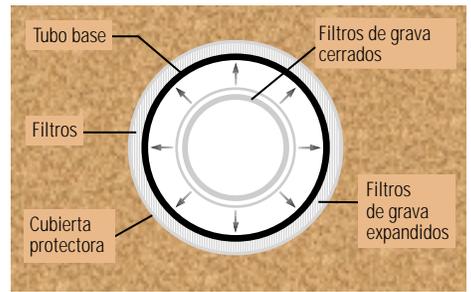
posiblemente, un mejor aislamiento de las formaciones que las terminaciones convencionales con un espacio anular abierto o con empaque de grava convencional. Los filtros de grava expandibles también proporcionan un método viable para controlar la producción de arena en yacimientos de altas presiones y temperaturas en el momento de la terminación del pozo.

Un punto preocupante es que puede permanecer un espacio anular pequeño incluso después de la instalación de los filtros de grava como resultado de pozos socavados y agrandados o de una expansión inadecuada. Si este espacio anular es lo suficientemente grande y existe a lo largo de un extenso intervalo continuo, podría reducir la eficacia del filtro de grava expandible, llevándola al nivel de la de los tubos filtro. Un diseño de filtro de grava que se expanda de manera satisfactoria y que se acomode al pozo es lo más deseable.

Otro tema de preocupación es la eficacia de la limpieza del revoque de filtración después de que los filtros de grava se expanden. Pero, las pruebas realizadas hasta el momento indican que los filtros de grava presionados contra el revoque de filtración no inhiben la limpieza y el contraflujo, siempre y cuando los sólidos del fluido RDF tengan el tamaño correcto y los fluidos estén acondicionados de manera adecuada.⁴³ Esta preocupación también se puede manejar mediante el uso de fluidos de limpieza del revoque de filtración que tengan una reacción lenta una vez que los filtros de grava estén instalados.

El comportamiento a largo plazo de los filtros de grava expandibles como método efectivo de control de producción de arena aún está en evaluación. Las pruebas de laboratorio y los estudios de campo están definiendo los parámetros de formación y las condiciones de yacimiento en las que esta tecnología se puede aplicar de mejor manera. La experiencia de campo con filtros de

Filtros de grava expandibles aptos para pozo abierto



^ Vista superior de los filtros de grava expandibles en el pozo abierto. Para reducir el diámetro inicial, las capas superpuestas de los filtros quedan entre un tubo base ranurado y una cubierta protectora del tubo con agujeros perforados. Luego de que se bajan los filtros de grava al pozo, se empuja un mandril a través del ensamble, expandiendo las ranuras del tubo base, los filtros y los agujeros en la cubierta externa contra la pared del pozo, con el fin de proporcionar integridad al control de la producción de arena. Las capas de los filtros se abren deslizándose una encima de la otra, y el diámetro externo aumenta casi un 50%.

grava expandibles es limitada, pero el número de historias de casos está aumentando. A noviembre de 2000, Weatherford, actualmente el único proveedor de este tipo de filtro de grava, ha instalado cerca de 23,000 pies [7000 m] de filtros de grava expandibles en cerca de 25 pozos.⁴⁴

Mediante el trabajo conjunto, las compañías operadoras y los proveedores de servicios han logrado avances significativos en cuanto a herramientas de fondo de pozo, métodos para empaquetamiento de grava, y química de fluidos de perforación y terminación durante los últimos cinco años. Como resultado, la tecnología de control de producción de arena para terminaciones a pozo abierto ha mejorado notablemente, desde los tubos filtro y el empaque de grava hasta la limpieza simultánea del revoque de filtración, los filtros de grava expandibles y el fracturamiento combinado con empaque de grava.

Un mejor entendimiento de las aplicaciones de varias técnicas de control de producción de arena, en base al desempeño en el campo, está ayudando a los operadores a optimizar la productividad, a lograr una alta recuperación de reservas por pozo y a realizar terminaciones confiables con mínimas intervenciones correctivas. Sin embargo, aún se deben enfrentar desafíos de gran envergadura, tales como aumentar la exploración y el desarrollo en aguas profundas y el número de terminaciones submarinas. La integración de la geología y la petrofísica con las ingenierías de producción, de instalaciones de superficie, de terminación, de perforación y de yacimientos, es un elemento clave para la predicción actual y futura de la producción de arena y el éxito en el control de la misma. —MET

38. Gilchrist JM, Sutton LW Jr y Elliott FJ: "Advancing Horizontal Well Sand Control Technology: An OHGP Using Synthetic OBM," artículo de la SPE 48976, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EUA, 27 al 30 de septiembre de 1998.

Chambers MR, Hebert DB y Shuchart CE: "Successful Application of Oil-Based Drilling Fluids in Subsea Horizontal, Gravel-Packed Wells in West Africa," artículo de la SPE 58743, presentado en el Simposio Internacional sobre Control del Daño de la Formación de la SPE, Lafayette, Luisiana, EUA, 23 y 24 de febrero de 2000.

39. Tiffin et al, referencia 6.

40. Price-Smith C, Parlar M, Kelkar S, Brady M, Hoxha B, Tibbles RJ, Green T y Foxenberg B: "Laboratory Development of a Novel, Synthetic Oil-Based Reservoir Drilling and Gravel-Pack Fluid System That Allows Simultaneous Gravel Packing and Cake-Cleanup in Open-Hole Completions," artículo de la SPE 64399, presentado en la Conferencia y Exhibición del Petróleo y del Gas del Pacífico Asiático de la SPE, Brisbane, Queensland, Australia, 16 al 18 de octubre de 2000.
Kelkar S, Parlar M, Price-Smith C, Hurst G, Brady M y Morris L: "Development of an Oil-Based Gravel-Pack

Carrier Fluid," artículo de la SPE 64978, presentado en el Simposio Internacional de la SPE de Química Petrolera, Houston, Texas, EUA, 13 al 16 de febrero de 2001.

Ladva HKJ, Brady ME, Sehgal P, Kelkar S, Cerasi P, Daccord G, Foxenberg WE, Price-Smith C, Howard P y Parlar M: "Use of Oil-Based Reservoir Drilling Fluids in Open-Hole Horizontal Gravel-Packed Completions: Damage Mechanisms and How to Avoid Them," artículo de la SPE 68959, presentado en la Conferencia Europea sobre Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, 21 y 22 de mayo de 2001.

41. Las emulsiones de aceite externo o de agua en aceite contienen una fase interna de gotitas de agua o salmuera dispersas en una fase externa de aceite o hidrocarburo sintético. Las emulsiones de agua externa, o aceite en agua, contienen una fase interna de gotitas de aceite o hidrocarburo sintético en una fase externa de agua o salmuera.

42. Tiffin et al, referencia 6.

43. Tiffin et al, referencia 6.

44. Sanford BD, Terry C, Bednarz MJ, Palmer C y Mauldin DB: "Expandable Sand Screen Alternative to Fracture-Packing Sand Control," *Offshore* 61, no. 6 (Junio de 2001): 78-81, 106.