

Técnicas de diseño de los disparos para optimizar la productividad

Para poder establecer una comunicación con las zonas de petróleo y de gas no basta con abrir orificios en el revestidor de acero utilizando las pistolas (o cañones) y los métodos de transporte ofrecidos en un catálogo de servicios. La tecnología de disparo basada en las propiedades promedio de la formación y en el comportamiento de las cargas huecas, hoy en día, se está reemplazando por un enfoque más orientado a las necesidades específicas. El diseño de los disparos constituye una parte integral del planeamiento de la completación, en el que se tienen en cuenta las condiciones del yacimiento, las características de la formación y las exigencias del pozo.

Larry Behrmann
James E. Brooks
Simon Farrant
Alfredo Fayard
Adi Venkitaraman
Rosharon, Texas, EE.UU.

Andrew Brown
Charlie Michel
Alwyn Noordermeer
BP Amoco
Sunbury on Thames, Inglaterra

Phil Smith
BP Amoco
Houston, Texas

David Underdown
Chevron Production & Technology Company
Houston, Texas

Las completaciones con disparos desempeñan un papel fundamental en la producción de hidrocarburos. Desde las pruebas de pozos para la evaluación del yacimiento hasta la completación e intervención de remediación, el disparo es un elemento clave para el éxito de la exploración, la producción económica de petróleo y gas, la productividad del pozo a largo plazo y la recuperación eficiente de los hidrocarburos. El proceso de disparo genera en forma instantánea orificios—disparos—en el revestidor de acero, en el cemento circundante y en la formación (próxima página).

Tanto la productividad como la inyectividad del pozo dependen fundamentalmente de la caída de presión en las cercanías del hueco, la cual habitualmente se computa a través del factor de daño. Este último depende del tipo de completación, del daño de la formación y de los parámetros de los disparos. En el pasado, los disparos a menudo consistían simplemente en orificios realizados en el acero del revestidor con cortadores mecánicos (antes de 1932), mediante el disparo de balas (a partir de 1932), por bombeo de abrasivos (desde 1958) o, más comúnmente, detonando explosivos con cargas huecas especiales fabricadas específicamente para los campos petroleros (a partir de 1948).¹ Lejos de ser simple, el disparo constituye un elemento complejo dentro de la completación del pozo, que cobra mayor importancia gracias a las investigaciones contemporáneas y a la comprensión de sus principios básicos.

La desviación con respecto a la simetría reduce el rendimiento de las cargas huecas. En lo que respecta a la penetración y al tamaño del orificio, la optimización de los diseños y la precisión en su fabricación contribuyen al perfeccionamiento de las cargas huecas. Por otra parte, la confiabilidad de las cargas está garantizada por un estricto control de calidad. En consecuencia, las pruebas de disparo son cada vez más consistentes y trasladables a las condiciones de fondo a los efectos de proyectar rendimientos y estimar productividades.

Entre los muchos avances realizados en la tecnología de disparo se encuentran las nuevas cargas de penetración profunda que incrementan la productividad del hueco al penetrar la zona invadida, y las cargas de orificio grande para empaques de grava. El aumento del rendimiento por unidad de explosivo significa un incremento en la eficiencia de estas cargas de alto rendimiento. En los últimos dos años, las cargas mejoradas han alcanzado profundidades de penetración y áreas de flujo mucho más grandes que las obtenidas con la tecnología utilizada anteriormente. También se han desarrollado otras técnicas que permiten controlar los residuos, en especial en pozos con gran desviación o en pozos horizontales, reduciendo el tamaño de los detritos o reteniéndolos dentro de las pistolas o cañones.

Se agradece la colaboración de Jim Almaquer, Bobby Carroll, John Corben, Janet Denney, Brenden Grove, Brad Hoffman, Manish Kothari, Jason Mai, Sam Musachia, Bob Parrott, Mark Vella, Ian Walton y Wenbo Yang, Rosharon, Texas, EE.UU.; y Andy Martin, Aberdeen, Escocia.

Bigshot, CIRP (Inserción de la Completación y Recuperación bajo Presión), CleanSHOT, Enerjet, FIV (Válvula de Aislamiento de la Formación), GunStack, HSD (Cañones de Alta Densidad de Disparos), HyperJet, IRIS (Sistema Inteligente de Implementación Remota), NODAL, PERFPAC, Pivot Gun, PowerFlow, PowerJet, QUANTUM, S.A.F.E. (Equipo de Disparo Activado por Impacto), Secure, SPAN (software de Análisis de Operaciones de Disparo de Schlumberger), UltraJet, UltraPack y X-Tools son marcas de Schlumberger.

El disparo es el único modo de establecer túneles de conducción que sirven de enlace entre los yacimientos de petróleo y gas y los huecos revestidos con acero que llegan hasta la superficie. Sin embargo, el disparo también daña la permeabilidad de la formación alrededor de los túneles de los disparos. Tanto el daño como los parámetros de los disparos—la penetración en la formación, el tamaño del orificio, el número de disparos y el ángulo entre los orificios—tienen un impacto significativo sobre la caída de presión en las cercanías del pozo y, por lo tanto, sobre la producción. La optimización de estos parámetros y la disminución del daño inducido constituyen aspectos importantes del disparo. Las investigaciones actuales confirman que para poder remover, parcial o totalmente el daño y los detritos de los disparos, en ciertos casos, es esencial que exista un cierto desbalance, es decir que la presión dentro del hueco antes del disparo sea menor que la presión de la formación (presión inversa).

Las técnicas modernas de disparo no se pueden separar de otros servicios que mejoran la productividad del pozo, como la fracturación, la acidificación y el control o prevención de la producción de arena.²

Además de ser conductos para el ingreso del flujo de petróleo y gas, los orificios proporcionan puntos uniformes para la inyección de agua, gas, ácido, geles con agentes de sostén, que se utilizan para las estimulaciones por fracturación hidráulica, y los fluidos que emplazan la grava para el control de la producción de arena en formaciones débiles y no consolidadas.³ En otras aplicaciones para el manejo de arena, los disparos proporcionan la cantidad necesaria de orificios estables, con la orientación y el tamaño adecuados para impedir la producción de arena.

Los métodos de transporte de las pistolas también se han mantenido actualizados a la par de la tecnología y las técnicas de disparo. A fines de la década 70 y principios de la del 80, las estrategias de disparo se limitaban a la utilización de pistolas más pequeñas que se bajaban a través de la tubería de producción o cañones más grandes que se bajaban a través del revestidor, transportados principalmente con cable de acero. Las cargas de cada tipo y tamaño de cañón se diseñaban con el fin de lograr el tamaño máximo del orificio, o bien una penetración profunda. A mediados de los años ochenta, se ampliaron las opciones de transporte de los cañones. A partir de entonces, los cañones bajados junto con la tubería de producción (TCP, por sus siglas en Inglés) ya no están limitados a un sector reducido del mercado y se han convertido en un elemento esencial de muchas completaciones de pozos y en una importante herramienta para efectuar disparos.⁴

> Disparo moderno. La detonación controlada de cargas explosivas huecas, diseñadas y fabricadas especialmente, crea trayectorias que van desde el pozo a la formación, atravesando el revestidor de acero, el cemento y la roca del yacimiento de manera que los fluidos puedan fluir o ser levantados hacia la superficie.

1. Behrmann L, Huber K, McDonald B, Couët B, Dees J, Folse R, Handren P, Schmidt J y Snider P: "Quo Vadis, Extreme Overbalance?" *Oilfield Review* 8, no. 3 (Otoño de 1996): 18-33.

2. Martin A: "Choosing The Right Gun," *Petroleum Engineer International* 71, no. 10 (Octubre de 1998): 59-72.

3. Como agente de sostén se utiliza arena natural o arena cubierta de resinas y bauxita de alta resistencia o cerámica sintética, clasificada por tamaño de grano de acuerdo con el estándar americano de las zarandas.

La grava está formada por arena sumamente limpia, de grano redondo y cuidadosamente seleccionada, ya que debe ser lo suficientemente pequeña para actuar como filtro y prevenir la producción de partículas de la formación, pero al mismo tiempo lo suficientemente grande para mantenerse en su posición dentro de los intervalos productivos detrás de una malla ranurada.

4. Cosad C: "Choosing a Perforation Strategy," *Oilfield Review* 4, no. 4 (Octubre de 1992): 54-69.

Además de la tubería flexible, las líneas de arrastre y las unidades para entubar contra presión (unidades snubbing), los sistemas disponibles hoy en día permiten correr sartas de cañones de gran longitud en pozos activos bajo presión. Estos sistemas de disparo y transporte de los mismos también realizan otras funciones de complejidad variable, como por ejemplo liberar y dejar caer los cañones, colocar los empacadores y abrir y cerrar las válvulas. En el futuro, las cargas se podrían incorporar y bajar directamente con el equipo de completación durante la construcción del pozo.

En este artículo se examinan los aspectos principales de los disparos, incluyendo algunos elementos de física básica, las nuevas cargas y métodos de fabricación, la disminución del daño provocado por los disparos, la optimización de los parámetros claves, las técnicas de disparo para completaciones naturales, estimuladas o con control de producción de arena, además de la seguridad y los métodos de transporte de los cañones. También se detallan las razones por las cuales es necesario tener en cuenta las exigencias específicas de las formaciones, los pozos y las completaciones para seleccionar las distintas técnicas de disparo. A través de diversos ejem-

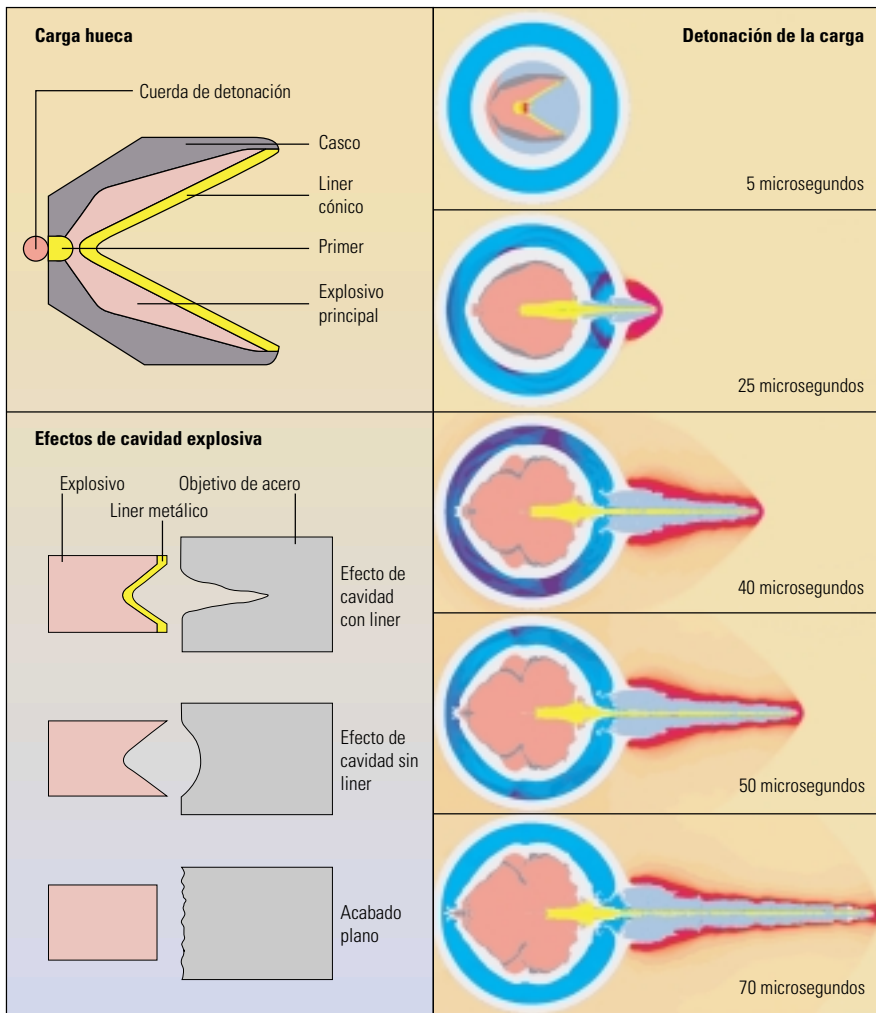
plos, se demuestra que los diseños especiales para yacimientos específicos y la interacción de los disparos contribuyen a maximizar el rendimiento del pozo.

Dinámica de las cargas huecas

Los disparos se efectúan en menos de un segundo por medio de cargas huecas que utilizan un efecto de cavidad explosiva, basada en la tecnología de las armas militares, con un revestimiento de partículas metálicas prensadas (liner) para aumentar la penetración (izquierda). Las cargas consisten de un explosivo de alta sensibilidad y pureza (primer), un casco, un liner cónico y altamente explosivo conectado con una cuerda de disparo. Cada componente debe estar fabricado con tolerancias exactas. El diseño y la fabricación de estas cargas huecas se realiza en el Centro de Completaciones de Yacimientos de Schlumberger (SRC) con sede en Rosharon, Texas, EE.UU., donde también se prueban de acuerdo con estrictos estándares de calidad.

Una cuerda de disparo activa el detonador y el explosivo principal. El liner colapsa y se forma un chorro de alta velocidad de partículas de metal fluidizado que es impulsado a lo largo del eje de la carga. Este chorro de gran potencia consta de una punta más rápida y una cola más lenta. La punta viaja a aproximadamente 7 km/seg [4,4 millas/seg] mientras que la cola se mueve más lentamente, a menos de 1 km/seg [0,6 millas/seg]. Este gradiente de velocidad hace que el chorro se alargue de manera que atraviese el revestidor, el cemento y la formación. Los chorros de las cargas erosionan hasta que consumen toda su energía al alcanzar el extremo del túnel de disparo.

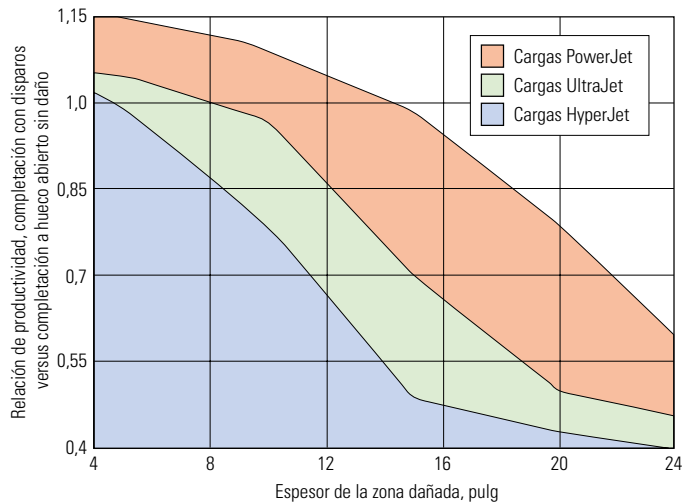
Los chorros actúan como varillas de alta velocidad y con un alto poder de expansión. En lugar de recurrir al estallido, la combustión, la perforación o el desgaste con abrasivos, la penetración se logra mediante una presión de impacto sumamente elevada; 3×10^6 lpc [20 GPa] sobre el revestidor y 300.000 lpc [2 GPa] sobre las formaciones. Estas enormes presiones de impacto hacen que el acero, el cemento, la roca y los fluidos del poro fluyan en forma plástica hacia afuera. El rebote elástico daña la roca, deja granos de la formación pulverizados y residuos en los túneles de los orificios recientemente creados.



^ Una fracción de segundo. En un proceso que dura microsegundos, millones de dólares y meses, o años de preparación llegan a su fin cuando el disparo abre un túnel para que los hidrocarburos fluyan dentro del pozo. Las cargas huecas, que tienen la capacidad de liberar energía en forma instantánea en un explosivo, utilizan un efecto de cavidad y un liner metálico para maximizar la penetración (*abajo a la izquierda*). Las cargas huecas constan de cuatro componentes básicos: primer, explosivo principal, liner cónico y casco (*arriba a la izquierda*). Una onda explosiva corre a lo largo de la cuerda de disparo, activa el detonador y hace detonar el explosivo principal. Una detonación avanza en forma esférica, alcanzando presiones de $7,5 \times 10^6$ lpc [50 Gpa] antes de alcanzar el vértice del liner. El casco de la carga se expande, el liner colapsa y forma un chorro de alta velocidad de partículas de metal fluidizado que es impulsado a lo largo del eje de la carga (*derecha*).

5. Klotz JA, Krueger RF y Pye DS: "Effect of Perforation Damage on Well Productivity," *Journal of Petroleum Technology* 26 (Noviembre de 1974): 1303.

6. El 25 de noviembre de 1998, un cañón cargado con cargas nuevas PowerJet de penetración profunda disparado sobre un blanco API alcanzó un promedio de penetración de 54,1 pulgadas [37 cm].



▲ Disparo de alto rendimiento. Este gráfico muestra la relación de la productividad en una completación con disparos con respecto a la completación a hueco abierto y no dañada para varias profundidades de invasión de la formación. En una zona dañada de 16 pulgadas, con un cañón de Alta Densidad de Disparo HSD de 3% pulgadas y cargas PowerJet se obtuvo más del doble de productividad que con las cargas de penetración profunda HyperJet y UltraJet utilizadas anteriormente.

Diseño y comportamiento de las cargas

Las cargas huecas están diseñadas para generar combinaciones óptimas en lo que respecta al tamaño del orificio y a la penetración, utilizando un mínimo de material explosivo. Un chorro asimétrico o torcido provoca una reducción en el rendimiento de la carga, por lo cual los chorros se deben formar exactamente de acuerdo con las especificaciones del diseño. En consecuencia, la efectividad de las cargas huecas depende de la simetría de las mismas y de las características del chorro. Para lograr mayor penetración, es necesario emitir chorros prolongados en forma constante con perfiles de velocidad óptimos. El perfil de velocidad se debe establecer entre ambos extremos del chorro y los chorros de las cargas deben viajar con la mayor velocidad posible. Si el perfil de velocidad es incorrecto, la penetración disminuye.

El tamaño del orificio está relacionado con la forma del chorro. Anteriormente, se utilizaban liners de metal sólido, a menudo de cobre, para generar chorros de alta densidad y orificios grandes, lo cual producía restos de metal que taponaban los orificios. Se pensaba que este fenómeno se compensaba con el diámetro de los orificios y la alta permeabilidad de las formaciones en las que se utilizaban las cargas de orificio grande. La nueva tecnología para eliminar los restos de metal y maximizar el área abierta al flujo (AOF, por sus siglas en Inglés) ha reconsiderado este enfoque. Si bien todavía se siguen utilizando los liners de cobre sólido en algunas

cargas que producen orificios grandes, los diseños más recientes permiten generar los chorros de las cargas sin dejar ningún resto de metal sólido.

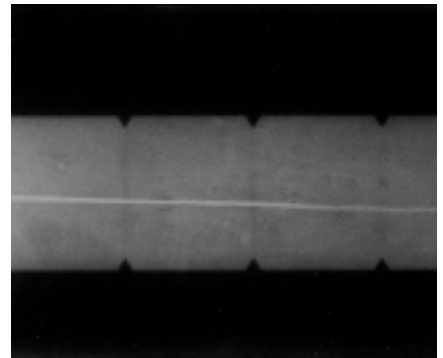
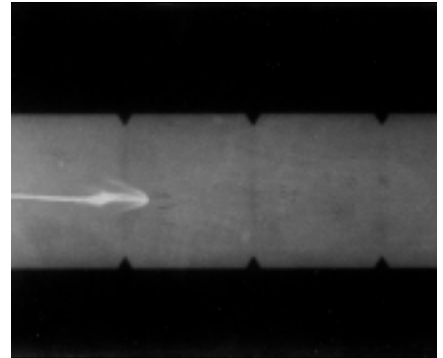
Penetración profunda—La invasión de los fluidos de perforación y completación puede oscilar entre pocas pulgadas a varios pies. Cuando el daño de la formación es severo y los disparos no atraviesan la zona invadida, la caída de presión es elevada y la productividad se ve reducida.⁵ Los disparos que atraviesan el daño incrementan el radio efectivo del hueco e interceptan mayor cantidad de fracturas naturales, si las hubiera. La penetración más profunda también reduce la caída de presión en los intervalos con disparos para prevenir o reducir la producción de arena. Las cargas PowerJet son las últimas y más eficientes disponibles y han sido diseñadas y fabricadas para superar el rendimiento de otras cargas por al menos un 20 a 30% en núcleos de areniscas de gran resistencia ([arriba a la izquierda](#)).

Existen nuevos diseños de liners—en lo que respecta a los materiales y su geometría—que logran un mayor rendimiento en cuanto a la penetración ([arriba a la derecha](#)). Los liners de las cargas PowerJet están realizados con materiales pulverizados de alta densidad que generan máxima longitud de descarga y mayores presiones de impacto para maximizar la penetración.⁶

Si bien es sabido que los liners de alta densidad producen una penetración más profunda, resulta difícil trabajar con estos materiales. Los adelantos recientes respecto a las posibilidades de fabricación permiten producir liners de alta

densidad en forma constante. Dichos adelantos incluyen el uso de procedimientos estrictos y continuados, de herramientas de precisión y un mayor control de calidad (*véase "Fabricación y prueba de las cargas", página 66*).

Por otra parte, las cargas se prueban disparándolas sobre diferentes materiales—núcleos de areniscas de gran resistencia, concreto estándar y concreto conforme a las especificaciones fijadas por la Sección 1 del Instituto Americano del Petróleo (API)—de manera que el rendimiento no sea optimizado sólo para los blancos de concreto.



▲ Penetración profunda. Para garantizar la optimización del rendimiento sobre blancos que no sean concreto, las cargas huecas se prueban con diferentes materiales: areniscas de gran resistencia, concreto estándar y concreto acorde con la Sección 1 del API. Sin embargo, los diseños y los materiales mejorados proporcionan la mayor parte del aumento en la penetración. En comparación con las cargas de penetración profunda (*arriba*), la nueva línea de liners de materiales pulverizados de alta densidad PowerJet y la nueva geometría utilizada, dan como resultado una velocidad y una longitud óptimas del chorro además de presiones de impacto sumamente elevadas (*abajo*).

En las rocas de gran resistencia, la penetración se ve reducida hasta en un 75% en comparación con los resultados obtenidos sobre el concreto estándar según la Sección 1 del API. Sin embargo, las cargas se pueden fabricar especialmente para adecuarse a formaciones específicas.⁷ Durante el desarrollo de las cargas PowerJet, se inició un proyecto para optimizar la eficiencia de las completaciones en formaciones de areniscas duras en América del Sur. El objetivo consistía en aumentar la penetración de los disparos en areniscas cuya resistencia a la compresión era de 25.000 lpc [172 MPa]. En estos yacimientos con alta permeabilidad, la porosidad es moderada y las gargantas de los poros son grandes, lo cual contribuye al daño provocado por el fluido. El bajo nivel de penetración combinado con la invasión profunda, resultó en una baja productividad de los disparos que no atravesaban la zona dañada.

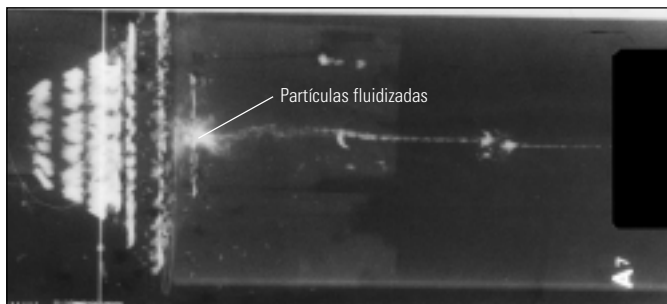
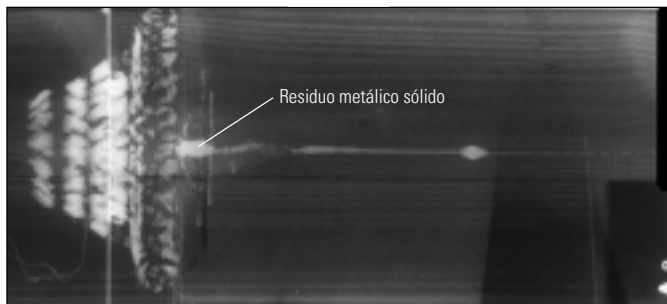
Para mejorar la producción, se utilizó un sistema dividido en tres etapas. Se reformularon los

fluidos de perforación con el fin de reducir la invasión y el daño, se duplicó el número de disparos y se diseñaron cargas especiales para aumentar la penetración. En un primer paso se rediseñó sólo la geometría del liner, lo cual aumentó la penetración de 12,8 a 14 pulgadas [32 a 36 cm]. Sin embargo, todavía no se había alcanzado el objetivo de 16 pulgadas [40 cm]. La penetración aumentó a 15,9 pulgadas optimizando el diseño de la carga explosiva. En las pruebas de campo las cargas especiales permitieron mejorar la producción y la inyección. En un pozo inyector de gas abierto a razón de cuatro disparos por pie con cargas optimizadas se superó el rendimiento de otros inyectores que tenían 12 disparos por pie realizados con cargas convencionales.

En Australia, dos pozos revestidos con cañerías de 7 pulgadas fueron reabiertos a través de la tubería de producción con pistolas de 2½ pulgadas utilizando cargas PowerJet; la producción aumentó de 300 a 780 bppd [48 a 124 m³/d] y de 470 a 1550 bppd [75 a 246 m³/d]. En otro

caso, un operador en Europa redisparó varios pozos con cargas PowerJet para mejorar la productividad y reducir la producción de arena. Antes de esta operación se producían más de 20 litros [2,7 gal] de arena por día, mientras que la presión en el cabezal del pozo era de 2000 lpc [13,8 MPa] y las tasas de producción de gas superaban los 2 millones m³/día [70,6 millones pcs/día]. Después del redisparo, se logró producir gas libre de arena a razón de 2,5 millones m³/día a una presión de superficie de 2700 lpc [18,6 MPa]. La eficiencia es importante no sólo para los pozos productores, sino también para los inyectores. En el sector noruego del Mar del Norte, al redisparar un pozo inyector con cargas PowerJet, la inyectividad del gas aumentó nueve veces, de 17,6 a 159 millones pcs/día [500,000 a 4,5 millones m³/d].

Orificios grandes, menos detritos y optimización de la resistencia del revestidor—La geometría exclusiva del liner de las cargas huecas es también la base de las cargas PowerFlow, que generan orificios grandes sin dejar restos de metal sólido (izquierda). Al aumentar el área de flujo mejora el emplazamiento de la grava para el control de la producción de arena y se reducen las restricciones de la caída de presión causada por la turbulencia característica de los pozos con altas tasas de producción, especialmente en los productores de gas. Un método de empaque único patentado por Schlumberger, que incluye cargas huecas PowerFlow, genera el área más grande abierta al flujo disponible en la industria, deja al revestidor con una mayor resistencia remanente y minimiza la cantidad de detritos.⁸



^ Orificios grandes. Anteriormente, los liners sólidos que generaban residuos metálicos se utilizaban para producir orificios grandes. Se creía que el taponamiento de los disparos era compensado por los orificios de diámetro grande y la elevada permeabilidad de la formación. La tecnología que permite eliminar los restos de metales sólidos y maximiza el tamaño del orificio, o el área de flujo, ha reconsiderado esta teoría. Los liners exclusivos constituyen la base de estas cargas PowerFlow. La fotografía de rayos X muestra la formación del chorro de las cargas UltraPack (arriba) y PowerFlow (abajo). Mientras que el residuo sólido de una carga UltraPack es de gran tamaño, la carga PowerFlow genera sólo un chorro fluidizado de partículas metálicas.

7. Smith PS, Behrmann LA y Yang W: "Improvements in Perforating Performance in High Compressive Strength Rocks," artículo de la SPE 38141, presentado en la Conferencia Europea de Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, Junio 2-3, 1997.
8. Brooks JE, Lands JF, Lendermon GM, Lopez de Cardenas JE y Parrott RA: "Perforating Gun Including a Unique High Shot Density Packing Arrangement," Patente de EE.UU., No. 5.673.760 (Octubre 7, 1997).
El 8 de octubre de 1999, un cañón de 7 pulgadas cargado con cargas PowerFlow a razón de 18 disparos por pie, efectuó orificios de 1,14 pulgadas [2,89 cm] de diámetro y estableció un récord mundial de área abierta al flujo en el revestidor de 18,5 pulg²/pie [391,6 cm²/m].
9. Javora PH, Ali SA y Miller M: "Controlled Debris Perforating Systems: Prevention of an Unexpected Source of Formation Damage," artículo de la SPE 58758, presentado en el Simposio Internacional sobre Control del Daño de la Formación de la SPE, Lafayette, Luisiana, EE.UU., Febrero 23-24, 2000.
10. Behrmann LA, Pucknell JK, Bishop SR y Hsia T-Y: "Measurement of Additional Skin Resulting From Perforation Damage," artículo de la SPE 22809, presentado en la Conferencia y Exhibición Anual de la SPE No 66, Dallas, Texas, EE.UU., Octubre 6-9, 1991.

Los detritos resultantes de las operaciones de disparo deberían ser minimizados, ya que constituyen un peligro para la integridad del pozo y la producción. Los restos de los cañones y de las cargas huecas aumentan el riesgo de aprisionamiento, se acumulan en el fondo en los pozos verticales, mientras que en los pozos desviados pueden no alcanzar el fondo o pueden llegar a la superficie y dañar los equipos de producción. Para controlar los detritos se utilizan dos estrategias:

El sistema convencional utiliza cascos de zinc que se quiebran en pequeñas partículas solubles en ácidos, que también se pueden hacer circular hacia afuera. Una posible desventaja del zinc es que produce daño a la formación.⁹ Las pruebas de laboratorio indican que los fluidos ricos en cloruros y el gas que se filtra en un pozo inactivo pueden combinarse y precipitar un sólido a partir de los restos de zinc que puede atascar los cañones. Otra desventaja son las vibraciones adicionales de los cañones provocadas por la energía que se libera cuando el zinc se consume parcialmente durante la detonación de la carga.

Debido a estas desventajas, los operadores están dejando de utilizar las cargas con cascos de zinc que producen pequeños detritos. El método de empaque patentado, por Schlumberger, donde los cascos de acero se fragmentan en trozos grandes que se mantienen en el tubo transportador del cañón, se está convirtiendo en la opción preferida (*derecha*).

Los cañones más recientes que generan mayor área abierta al flujo, dejan el revestidor con disparos con una mayor resistencia remanente y producen menor cantidad de detritos, constituyen ejemplos de soluciones especiales para disparar pozos con alta tasa de flujo y empacados con grava. En 1998, Conoco solicitó un área abierta al flujo mayor de la que se encontraba disponible hasta el momento con cualquier cañón comercial, destinadas a aquellos proyectos distribuidos por el mundo que requieren altas tasas de producción para garantizar su viabilidad comercial. Para satisfacer este requerimiento, Schlumberger desarrolló un cañón PowerFlow de 7 pulgadas para un revestidor de 9 $\frac{5}{8}$ que produce un área abierta al flujo un 47% mayor que la obtenida con los cañones de orificio grande disponibles anteriormente y un 31% más que los del competidor que más se le aproximaba.

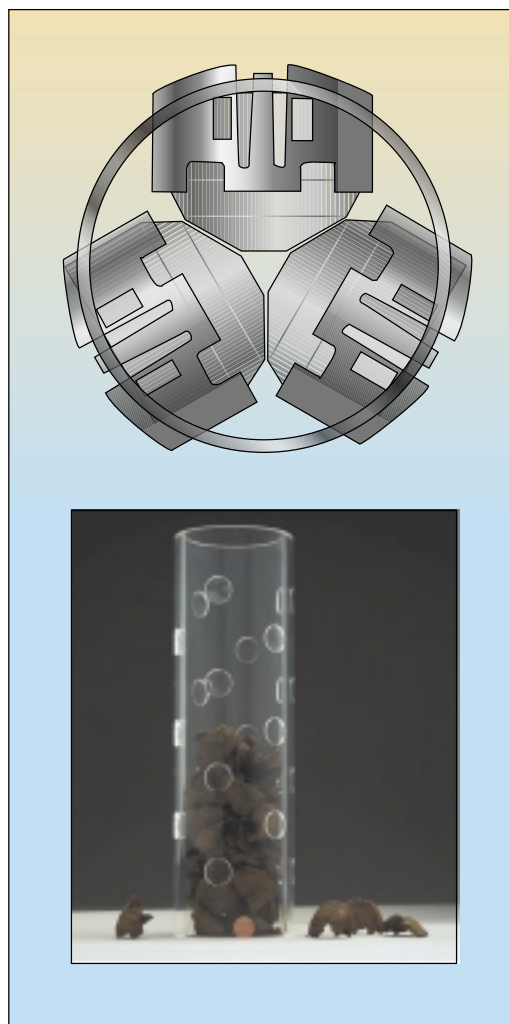
Al garantizar la adecuada resistencia del revestidor después del disparo, los cañones PowerFlow más nuevos también responden a un aspecto cada vez más importante en el diseño de la completación; la compactación de la formación a medida que se agota la presión del yacimiento

que puede provocar el colapso del revestidor. Los cálculos con elementos finitos para un revestidor de 9 $\frac{5}{8}$ pulgadas abierto con el cañón de 7 pulgadas mencionado, indican que la resistencia al colapso del revestidor alcanza el 78% del valor original de un revestidor sin disparos.

Permeabilidad dañada

Un efecto secundario y poco conveniente del disparo es el daño adicional, que se traduce en una zona de baja permeabilidad alrededor de los disparos. El flujo a través de un solo disparo y los

resultados de laboratorio del permeámetro radial confirmaron y cuantificaron este componente del daño inducido por los disparos.¹⁰ El daño puede comprender tres elementos: una zona triturada, la migración de partículas finas de la formación y la presencia de detritos dentro de los túneles de los disparos. Las presiones de la onda de vibración desde la cara de la roca hasta el extremo de los disparos fragmentan la roca adyacente y los granos de la matriz de la fractura, lo cual daña la permeabilidad in situ especialmente al reducir el tamaño de las gar-



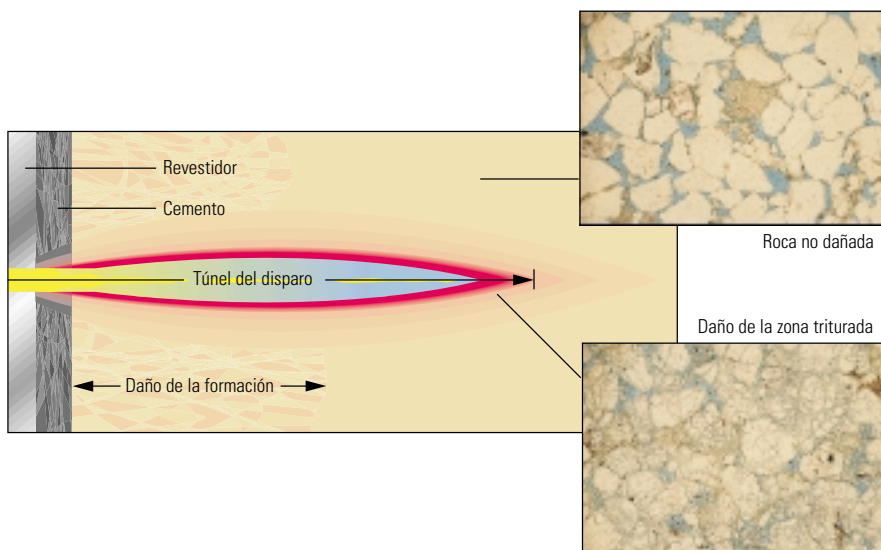
^ Control de los detritos. Un sistema de empaque patentado por Schlumberger permite disminuir el riesgo de que los detritos abandonen el cañón (*arriba*). Las cargas huecas se colocan en la posición más cercana posible conforme al tamaño del cañón y la densidad de disparo, de manera tal que no se puedan expandir. El confinamiento estrecho hace que los cascos se quiebren en grandes trozos que permanecen dentro del cañón (*abajo*). El hecho de que los orificios de salida del transportador del cañón sean pequeños también minimiza la cantidad de residuos que pueden escapar.

gargantas de los poros (derecha). También se han observado en el laboratorio la migración de las pequeñas partículas generadas por la fragmentación del grano, la disgregación de las arcillas y los detritos de las cargas que bloquean las gargantas de los poros y reducen aún más la permeabilidad.

Los estudios muestran que el daño inducido aumenta cuando las cargas explosivas son más grandes.¹¹ El alcance del daño provocado por el disparo depende de la litología, la resistencia de la roca, la porosidad, la compresibilidad del fluido alojado en los poros, el contenido de arcilla, el tamaño del grano de la formación y el diseño de las cargas huecas.¹² La investigación junto con la simulación numérica permiten una mejor comprensión del daño de la permeabilidad en los pozos con disparos, lo cual puede servir para mejorar los diseños de las completaciones.¹³

La porosidad de la zona triturada, por lo general, no se ve afectada por el disparo. Al menos en las rocas saturadas, la densidad y la porosidad alrededor de los disparos son bastante similares a las que se observan en la matriz no dañada. Si bien el disparo produce modificaciones sobre las tensiones de la roca y las propiedades mecánicas, no compacta la formación como se creía anteriormente. Además de los derivados de los explosivos, otro mecanismo de daño posible es la inyección transitoria de los fluidos del pozo que pueden provocar problemas de permeabilidad relativa.

En las rocas extremadamente duras, las microfisuras creadas durante el disparo pueden servir como trayectorias que en realidad son más permeables que la formación y son capaces de puentear el daño provocado por los disparos. Con 3000 lpc [20,7 MPa] de desbalance, en algunos núcleos de yacimientos y de rocas de afloramiento



^ Daño provocado por los disparos. Alrededor de los túneles de los disparos se crea una zona de permeabilidad reducida debido al chorro de las cargas huecas. Las presiones de la onda de vibración pulverizan la roca adyacente, fracturan los granos de la matriz, quiebran la cementación intergranular y despegan las partículas de arcilla. La fragmentación de la formación alrededor de los disparos daña la permeabilidad en sitio, en especial al tamaño de la garganta del poro. Las fotomicrografías muestran la roca no dañada (figura superior) comparada con la microfracturación que se observa en una zona triturada de un disparo (figura inferior).

de gran resistencia, se han medido valores de factor de daño negativos equivalentes a los de un tratamiento de estimulación.¹⁴ Sin embargo, el daño inducido por las vibraciones en la mayoría de los casos contribuye al factor de daño total, restringe el rendimiento del pozo y puede atenuar las incrementos de producción relacionados con otros parámetros de los disparos tales como el número de los mismos, el tamaño del hueco, el ángulo entre los disparos y su penetración.

La zona triturada puede limitar tanto la productividad como la inyectividad. Los finos y los detritos restringen la inyectividad y aumentan la

presión de bombeo, con lo cual disminuyen los volúmenes de inyección y se deteriora el emplazamiento o la distribución de la grava y los agentes de sostén para el control de producción de arena o para los tratamientos de fracturación hidráulica.¹⁵ La erosión de la zona triturada junto con la remoción de los detritos en los disparos por medio del flujo desde la formación resultan esenciales para disminuir el daño causado por los disparos y garantizar el éxito del pozo en todos los yacimientos, a menos que sean muy prolíficos.

Reducción del daño provocado por los disparos

Anteriormente, los disparos se realizaban con lodos o fluidos de alta densidad en condiciones de presión balanceada o de sobrepresión. Hoy en día, es más común utilizar el desbalance para minimizar o eliminar el daño causado por los disparos. Los términos desbalance (o presión inversa), balanceada, sobrepresión y sobrepresión extrema (EOB, por sus siglas en Inglés) se refieren a las diferencias de presión entre el hueco y el yacimiento antes de disparar. Existe un desbalance cuando la presión dentro del pozo es menor que la presión de la formación, en cambio, cuando ambas presiones son equivalentes se describe como condiciones de presión balanceada. La sobrepresión ocurre cuando la presión del pozo es superior a la presión del yacimiento.

11. Pucknell JK y Behrmann LA: "An Investigation of the Damaged Zone Created by Perforating," artículo de la SPE 22811, presentado en la Conferencia y Exhibición Anual No 66 de la SPE, Dallas, Texas, EE.UU., Octubre 6-9, 1991.
 12. Swift RP, Behrmann LA, Halleck P y Krogh KE: "Micro-Mechanical Modeling of Perforating Shock Damage," artículo de la SPE 39458, presentado en el Simposio Internacional sobre Daño de la Formación de la SPE, Lafayette, Luisiana, EE.UU., Febrero 18-19, 1998.
 13. Behrmann LA, Li JL, Venkitaraman A y Li H: "Borehole Dynamics During Underbalanced Perforating," artículo de la SPE 38139, presentado en la Conferencia Europea sobre Control del Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, Junio 2-3, 1997.
 14. Blosser WR: "An Assessment of Perforating Performance for High Compressive Strength Non-Homogeneous Sandstones," artículo de la SPE 30082, presentado en la Conferencia Europea sobre Control del Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, Mayo 15-16, 1995.
 15. Behrmann LA y McDonald B: "Underbalance or Extreme Overbalance," artículo de la SPE 31083, presentado en el Simposio Internacional sobre Control del Daño de la Formación de la SPE, Lafayette, Luisiana, EE.UU., Febrero 14-15, 1996; también en *SPE Production & Facilities* (Agosto de 1999): 187-196.

16. Behrmann et al, referencia 1.
 17. Bell WT: "Perforating Underbalanced—Evolving Techniques," *Journal of Petroleum Technology* 36 (Octubre de 1984): 1653-1652.
 18. King GE, Anderson A y Bingham M: "A Field Study of Underbalance Pressures Necessary to Obtain Clean Perforations Using Tubing-Conveyed Perforating," artículo de la SPE 14321, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 60 de la SPE, Las Vegas, Nevada, EE.UU., Septiembre 22-25, 1985.
 19. Crawford HR: "Underbalanced Perforating Design," artículo de la SPE 19749, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 64 de la SPE, San Antonio, Texas, EE.UU., Octubre 8-11, 1989.
 20. Tariq SM: "New, Generalized Criteria for Determining the Level of Underbalance for Obtaining Clean Perforations," artículo de la SPE 20636, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 65 de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EE.UU., Septiembre 23-26, 1990.
 21. Hsia T-Y y Behrmann LA: "Perforating Skins as a Function of Rock Permeability and Underbalance," artículo de la SPE 22810, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 66 de la SPE, Dallas, Texas, EE.UU., Octubre 6-9, 1991.

Sobrepresión extrema significa que la presión del pozo excede en gran medida la resistencia de la roca, lo cual produce la iniciación de una fractura o el quiebre de la presión. Tanto la sobrepresión extrema como la fracturación tratan de puntear el daño.¹⁶

El potencial de los disparos en condiciones de desbalance fue reconocido recién en la década del 60. En los pozos agujereados con desbalance se notaba una tendencia al incremento de la producción. En la década del 70 y principios de los 80, los investigadores reconocieron que la eficiencia del flujo en las completaciones con disparos aumentaba cuando se utilizaban presiones con mayor desbalance. Los estudios demostraron que el flujo inmediatamente posterior al disparo limpiaba los disparos y entonces se recomendaron distintos criterios de desbalance.¹⁷ A partir de entonces se han investigado diversos aspectos de los disparos utilizando datos obtenidos en el campo y el laboratorio, los cuales refuerzan constantemente las ventajas derivadas de un flujo inicial para erosionar las zonas trituradas por los disparos y arrastrar los detritos resultantes.

En un estudio realizado por Amoco en 1985 se evaluaron 90 pozos que fueron acidificados después de ser agujereados con cañones bajados con las tuberías de producción en condiciones de desbalance y se estableció una correlación entre la productividad y la permeabilidad para fijar criterios mínimos de desbalance.¹⁸ Los resultados no indicaban que no existiera daño derivado de los disparos, sólo que la acidificación no era necesaria ni tan efectiva si el desbalance era suficiente. Este estudio fue la fuente principal de

datos de campo para correlacionar el desbalance con la permeabilidad del yacimiento y el rendimiento de los disparos.

A partir de estos datos, en 1989 se calcularon las presiones de desbalance mínimas y máximas basadas en la producción potencial de arena a partir de las velocidades sónicas para los pozos de gas.¹⁹ El estudio original de Amoco se volvió a analizar junto con los nuevos datos.²⁰ A los efectos de considerar la permeabilidad, la viscosidad y la densidad del fluido, las ecuaciones de desbalance mínimo se basaban en la velocidad del fluido y en el flujo turbulento a través de los disparos. La desventaja era que este modelo requería conocer el espesor de la zona dañada, el diámetro del túnel en la roca y la viscosidad del fluido. Por otra parte, los resultados de las pruebas recientes no demuestran que el desbalance dependa de la viscosidad.

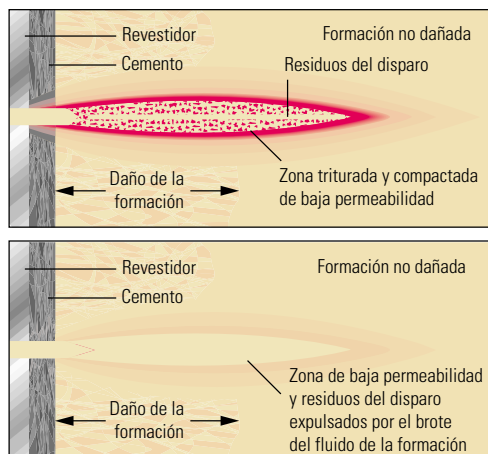
Estos modelos implican que el flujo después de un brote temprano y transitorio, incluyendo el flujo en un estado pseudo estable o los pozos fluyentes después de los disparos, es menos importante con respecto a la limpieza del túnel. Sin embargo, el flujo posterior al disparo puede transportar algunos finos hacia el pozo y limpiar mejor los disparos.²¹ En algunos casos, esto explica la limitada producción de arena que se observa cuando los pozos son puestos en producción.

Se cree que la magnitud y duración de la oleada inicial de presión determinan la limpieza del daño de la zona triturada. El flujo instantáneo minimiza la invasión del fluido, afloja la roca dañada y barre los detritos de roca que se encuentran en los túneles de los disparos (*abajo*). Cuánto se afloja el material depende principal-

mente de la magnitud del desbalance. Al brote de alta velocidad le sigue un flujo pseudo estable, que resulta menos efectivo porque las tasas y las fuerzas de arrastre asociadas son menores que las generadas durante la oleada transitoria inicial. El volumen del fluido y el flujo que le sucede más adelante se consideran secundarios.

Los desbalances de presión necesarios para lograr una limpieza efectiva de los disparos y reducir el daño de la permeabilidad se han cuantificado mediante pruebas de un solo disparo y pruebas de flujo que proporcionan una comprensión básica del mecanismo de reducción del daño.²² Inmediatamente después de disparar en condiciones de desbalance, se produce una descompresión instantánea de los fluidos del yacimiento alrededor del disparo. En este momento, las fuerzas dinámicas—diferencial de presión y arrastre—que reducen el daño de la permeabilidad erosionando y removiendo los granos de la formación fracturada de las paredes de los túneles son más pronunciadas.

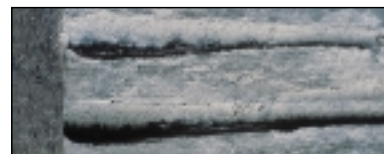
Las velocidades de la oleada transitoria dependen del desbalance y de la permeabilidad de la formación. El diferencial de presión necesario para crear orificios limpios y efectivos depende de la permeabilidad, la porosidad y la resistencia de la roca además del tipo y el tamaño de la carga. Por ejemplo, las cargas de penetración profunda causan menos daño que las cargas que producen grandes orificios. Cuando el desbalance se encuentra por debajo del nivel óptimo, el daño de los disparos y la tasa de flujo por disparo resultan variables, y la mayor parte de los datos sugiere que para poder minimizar o eliminar el daño provocado por los disparos, las presiones de desbalance deben ser superiores a las que se utilizan habitualmente en los campos petroleros.²³



Disparo balanceado



Disparo con presión inversa de 3000 lpc



^ Disparo en desbalance. En un disparo con sobrepresión o condiciones de presión balanceada sin limpieza y antes del flujo, el túnel está taponado por los fragmentos de roca y los detritos (*arriba*). El flujo de producción puede remover algunos residuos, pero buena parte de la zona triturada de baja permeabilidad se mantiene. La oleada inicial generada por un desbalance adecuado durante el disparo permite barrer los detritos y erosionar la zona triturada (*abajo*).

22. Behrmann et al, referencia 10.

Hsia y Behrmann, referencia 21.

Pucknell y Behrmann, referencia 11.

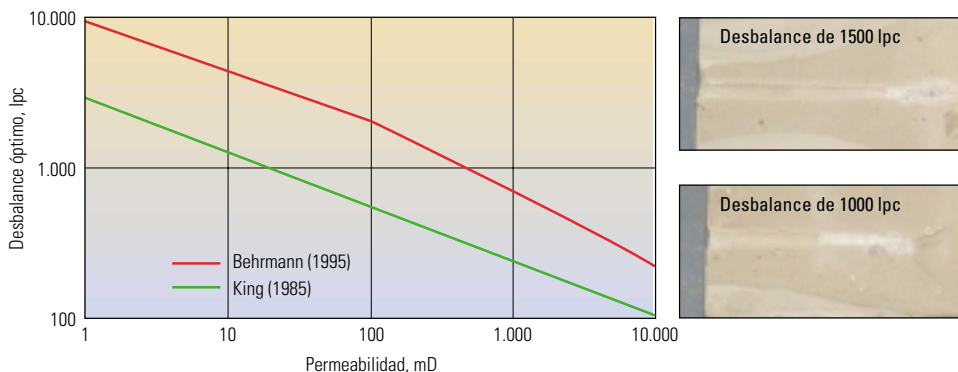
Behrmann LA, Pucknell JK y Bishop SR: "Effects of Underbalance and Effective Stress on Perforation Damage in Weak Sandstone: Initial Results," artículo de la SPE 24770, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 67 de la SPE, Washington DC, EE.UU., Octubre 4-7, 1992.

Bartusiak R, Behrmann LA y Halleck PM: "Experimental Investigation of Surge Flow Velocity and Volume Needed to Obtain Perforation Cleanup," artículo de la SPE 26896, presentado en la Conferencia y Exhibición Regional Oriental de la SPE, Pittsburgh, Pennsylvania, EE.UU., Noviembre 2-4, 1993. También en *Journal of Petroleum Science and Engineering* 17 (1997): 19-28.

23. Behrmann et al, referencia 10.

Mason JN, Dees JM y Kessler N: "Block Tests Model the Near-Wellbore in a Perforated Sandstone," artículo de la SPE 28554, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 69 de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EE.UU., Septiembre 25-28, 1994.

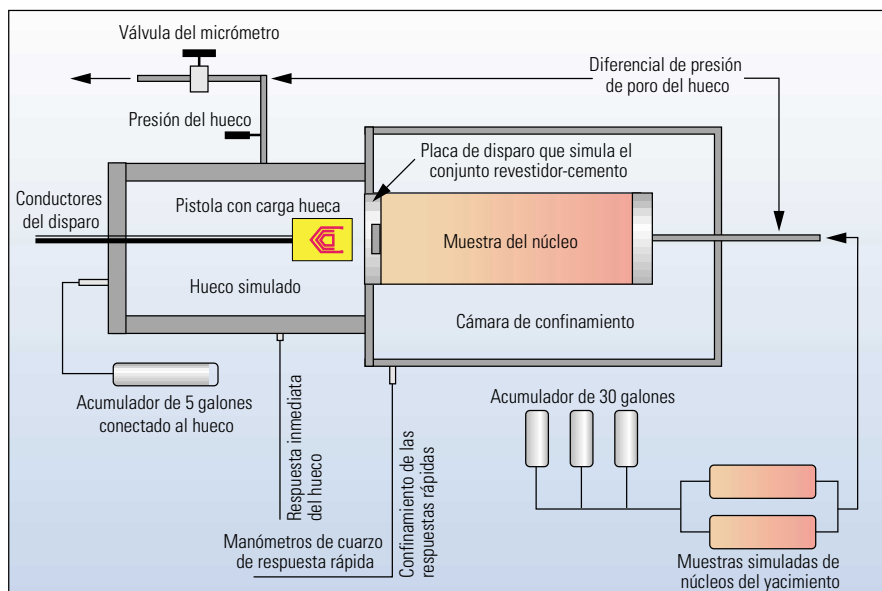
Desbalance óptimo versus permeabilidad



> Criterios de desbalance. El desbalance es ampliamente aceptado como el método más eficiente para obtener disparos limpios. Los criterios de desbalance óptimo de presión han aumentado en forma substancial a lo largo de la última década como resultado de cientos de pruebas de laboratorio. Las observaciones de campo realizadas por King et al desarrollaron criterios basados en la eficiencia de la acidización de las areniscas. Behrmann estableció una correlación entre los datos de laboratorio y la fuerza de arrastre viscoso para remover las partículas finas (*izquierda*). Las pruebas de laboratorio confirman que para limpiar los disparos se necesita un mayor nivel de desbalance (*derecha*).



Laboratorio de avanzada para el estudio del disparo de núcleos



^ Pruebas de flujo en disparos individuales. El laboratorio avanzado de flujo perteneciente al SRC incluye dos contenedores para investigar el flujo en los disparos en condiciones que incluyen la sobrepresión en el fondo y la presión de poro y del hueco (*arriba*). Un contenedor está destinado a los núcleos de hasta 7 pulgadas de diámetro y 18 pulgadas de longitud, mientras que el otro admite núcleos de hasta 11,5 pulgadas de diámetro y 24 pulgadas de longitud. Esta disposición permite realizar pruebas de flujo a través de núcleos de afloramientos o de yacimientos orientados desde la posición horizontal a la vertical (*abajo*).

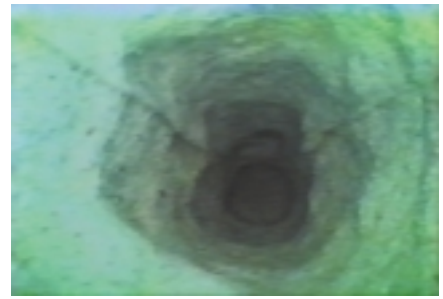
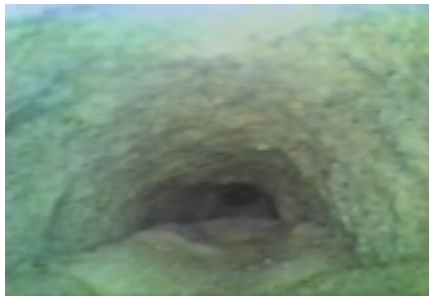
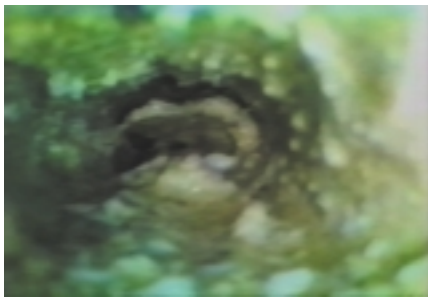
Si bien en un primer momento se produce un flujo turbulento con los fluidos de baja viscosidad, los resultados de las pruebas indican que la turbulencia no es una condición necesaria para la limpieza del orificio. En cambio, la limpieza del daño de la permeabilidad alrededor del disparo hoy se relaciona con el arrastre viscoso.²⁴ Los factores principales son el diferencial de presión y el flujo radial subsiguiente, transitorio y ligeramente compresible, ya sea laminar o turbulento, que constituía el punto de partida para obtener ecuaciones semiempíricas de desbalance y factor de daño con los datos históricos.

Cuando se combinan las ecuaciones empíricas y teóricas obtenidas, se puede calcular el desbalance óptimo para daño o factor de daño nulo en caso de que se utilice un desbalance inferior al óptimo. El factor de daño provocado por un solo disparo se puede utilizar en simuladores de flujo para obtener el factor de daño total del disparo y evaluar o comparar las diferentes opciones de disparo. Esta metodología, que hoy en día constituye el criterio más ampliamente aceptado para calcular el desbalance necesario para obtener orificios con factor de daño cero, surge como resultado de más de una década de investigaciones en aras de la optimización de la limpieza de los disparos. Cuando se calculan con este método los valores de desbalance necesarios son de dos a cuatro veces más grandes que los que resultan de los criterios utilizados previamente (*arriba*).

Debido a que el desbalance impacta el rendimiento de los disparos y la productividad del pozo, resulta esencial entender la dinámica de los fluidos involucrados. Si se comprende

24. Behrmann LA: "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage," artículo de la SPE 30081, presentado en la Conferencia Europea sobre Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, Mayo 15-16, 1995; también en *SPE Drilling & Completion* (Septiembre de 1996): 173-177.

25. Behrmann et al, referencia 13.



^ Video del flujo en el laboratorio. El flujo en los disparos se puede examinar en forma visual con una sonda de video a color mientras los núcleos se encuentran sometidos a tensión hidrostática. A la izquierda se observa un orificio lleno de material pulverizado de la formación y rodeado de granos fragmentados de cuarzo. En el centro aparece un orificio sin fragmentación, pero el material pulverizado permanece en el fondo del túnel. A la derecha se observa un orificio libre de material de relleno.

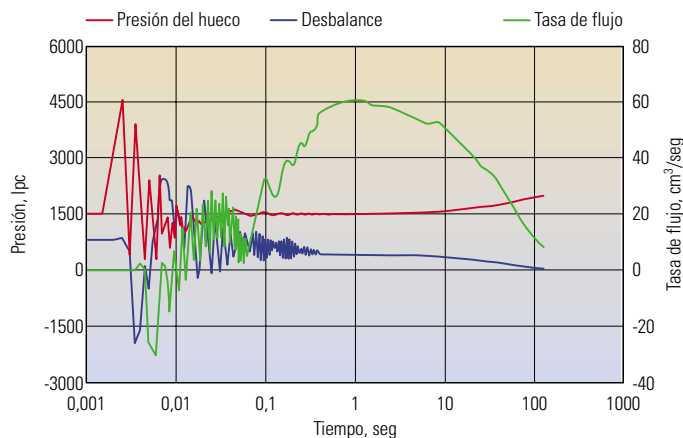
cómo actúan las vibraciones, las presiones y el flujo de los fluidos, se podrá seleccionar un nivel de desbalance óptimo y diseñar las herramientas de fondo adecuadas. El laboratorio de flujo avanzado que se encuentra en el SRC incluye dos contenedores de pruebas para investigar el flujo en los disparos y otras operaciones de completación bajo condiciones de fondo que incluyen tensiones de sobrecarga, además de la presión de poro y del hueco (página previa, abajo).

Esta disposición les permite a los investigadores disparar y fluir por un solo disparo en afloramientos o núcleos del yacimiento orientados

desde una posición horizontal hasta la vertical con cualquier sistema de disparo. El flujo bifásico de petróleo y agua y el flujo de gas seco se pueden evaluar a tasas constantes con un registro continuo de las mediciones de presión absoluta y diferencial. Los orificios se pueden examinar con una sonda provista de un video a color durante el flujo a través del núcleo mientras se encuentra bajo tensión hidrostática (arriba). También se pueden evaluar otras operaciones, como la inyección de grava y la acidificación. La dinámica del hueco se puede simular para medir las presiones transitorias, la oleada inicial y las vibraciones causada por los disparos.

La tasa y la duración de la oleada inicial se controlan por el desbalance inicial, la permeabilidad de la formación, el daño provocado por los disparos, la profundidad del daño de la formación en las proximidades del hueco y la naturaleza de los fluidos del hueco y del yacimiento. Los datos transitorios obtenidos inmediatamente después del disparo, no adquiridos previamente debido al costo y a la dificultad de obtener estas mediciones, les permiten a los investigadores comprender el mecanismo de los disparos en condiciones de desbalance (abajo).²⁵ La presión del hueco, el diferencial de presión entre el yacimiento y el hueco, y los datos de oleada inicial registrados con resoluciones de milisegundos, indican un corto período de inyección en los disparos asociado con una sobrepresión transitoria debida a la inyección de los gases de detonación provenientes del cañón. La magnitud del diferencial de presión que impulsa la inyección de este fluido depende del tamaño de la carga y de la permeabilidad de la muestra de la roca.

El disparo en condiciones de desbalance ha evolucionado como resultado de las investigaciones realizadas con el fin de pronosticar el diferencial de presión para minimizar el daño provocado por los disparos. Sin embargo, se debe evaluar la probabilidad de que exista producción de arena, el colapso del revestidor, los movimientos del cañón y el aprisionamiento de las herramientas, con respecto a los beneficios potenciales. Los lineamientos del diseño incluyen el desbalance mínimo de presión necesario para la limpieza del disparo, el desbalance de presión máximo para evitar el arenamiento y los colchones de fluido—una columna de gas o de líquido—o anclajes mecánicos para minimizar el movimiento de la herramienta.



^ Respuestas típicas de disparo con desbalance de presión y tasas de flujo en función del tiempo. Los datos fueron obtenidos a razón de 2000 muestras/seg en pruebas de flujo con disparo individual, bajo condiciones simuladas de fondo respecto de la tensión efectiva, la presión del pozo y del yacimiento. Después de la detonación, la presión del pozo (rojo) aumenta y el desbalance (azul) disminuye, lo cual permite cierto flujo (verde) dentro de los disparos. A medida que los gases de detonación entran en solución y el cañón vacío se llena de fluido, la presión del hueco vuelve a caer provocando una oleada inicial transitoria dentro del pozo. Se considera que este flujo inicial reduce el daño y la caída de permeabilidad en la zona triturada. Luego de la oleada inicial transitoria de alta velocidad sobreviene una oleada en estado pseudo estable, que podría arrastrar la roca suelta y los detritos de las cargas hacia el pozo y limpiar los disparos. La oleada continúa hasta que las presiones del pozo y del yacimiento se igualan; es decir se alcanzan condiciones de desbalance cero o balance. Estas mismas respuestas ocurren en condiciones de balance y de sobrepresión, con la excepción de que en los disparos de presión balanceada no se produce una oleada y, cuando existen condiciones de sobrepresión, el flujo proviene del pozo y se dirige hacia la formación.

Optimización de los parámetros del disparo

La remoción del daño y la limpieza de los disparos constituyen elementos importantes dentro del diseño de los disparos y la ejecución de los mismos, pero también se deben tener en cuenta el diámetro y la longitud del túnel dentro de la formación, la densidad de disparo o el número de orificios especificados como disparos por pie (dpp), la orientación o fase de los disparos—el ángulo existente entre los orificios—y el tamaño del orificio de entrada en el revestidor y en el cemento (abajo). La caída de presión provocada por el daño del disparo depende de dos parámetros fundamentales: la permeabilidad de la formación y el espesor de la zona triturada.

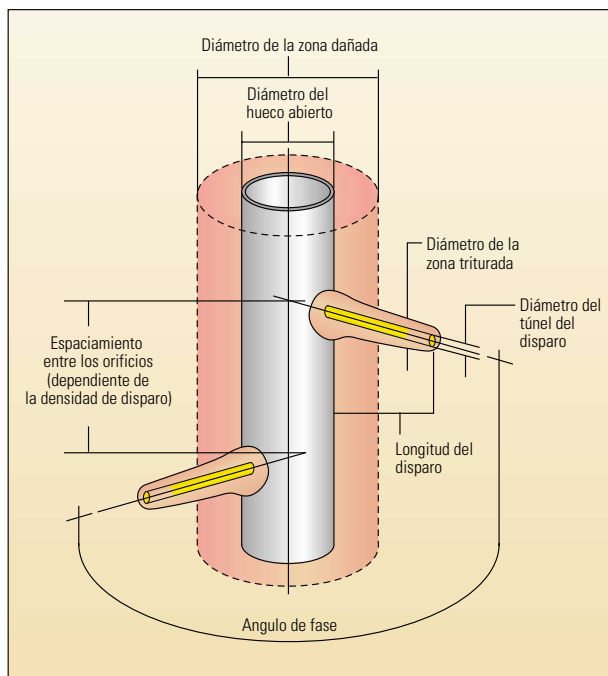
Las completaciones de pozos presentan diferentes requerimientos con respecto a los disparos. Después del disparo, algunos pozos producen naturalmente grandes volúmenes y no necesitan estimulación ni manejo de la arena durante la completación. Estas completaciones naturales están asociadas con areniscas permeables, de alta porosidad y gran resistencia y con carbonatos con poco daño de la formación y una adecuada conductividad de la matriz. La longitud y densidad de los disparos constituyen los parámetros predominantes que dictaminan la productividad en estas aplicaciones. Los disparos deben atravesar el daño inducido por la perforación y la invasión de los fluidos. Como regla práctica, para establecer una conexión efectiva

con la roca no dañada, es necesario lograr una penetración profunda, que atraviese por lo menos el 50% del daño.

La densidad de disparo y la orientación o fase también desempeñan roles importantes. El aumento de la densidad de disparo reduce el daño provocado por los disparos y los pozos producen a presiones inferiores. Si las formaciones son laminadas o tienen un alto grado de anisotropía—grandes diferencias entre las permeabilidades verticales y horizontales—es necesario que la densidad de disparo sea elevada. A medida que el factor de daño se aproxima a cero, la densidad de disparo adquiere mayor importancia. Las cargas orientadas reducen la caída de presión cerca del pozo al proporcionar conductos de flujo en todas las caras del pozo. En el caso de las formaciones naturalmente fracturadas, la orientación múltiple de las cargas de penetración profunda permite interceptar un mayor número de fracturas. Si las fracturas naturales son paralelas, los disparos orientados resultan más convenientes.

Si bien resulta útil para calcular la productividad del pozo y evaluar el efecto de los parámetros del disparo entre los diferentes cañones, el análisis computarizado algunas veces empaña la interacción y la importancia relativa de los parámetros correspondientes, ya que al agrupar ciertos parámetros se ponen de manifiesto las dependencias subyacentes entre los mismos. Este tipo de análisis permitió desarrollar un método simple para estimar la productividad de las completaciones naturales con disparos.²⁶ Al combinar los parámetros del disparo y de la formación en un grupo único adimensional, se obtiene un cálculo rápido de la productividad sobre diversas variables que coinciden con los cálculos analíticos establecidos en los programas de computación disponibles en el mercado.

Este método, aplicable para los disparos que atraviesan el daño de la formación en un esquema en forma de espiral, considera que las principales variables que rigen la productividad son: la longitud del disparo, la densidad de disparo, el diámetro del túnel, el diámetro en la



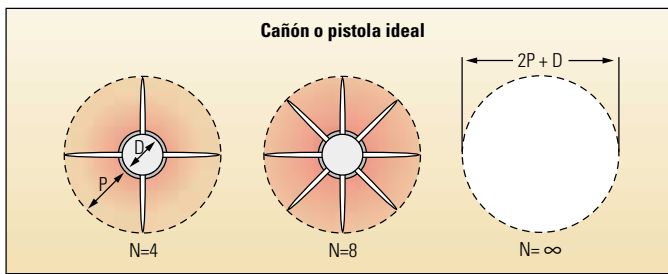
26. Brooks JE: "A Simple Method for Estimating Well Productivity," artículo de la SPE 38148, presentado en la Conferencia Europea sobre Daño de la Formación, La Haya, Holanda, Junio 2-3, 1997.

27. En la fracturación hidráulica, se inyecta un fluido a presiones superiores a la tensión de ruptura de la formación para crear una fractura, que se extiende en direcciones opuestas desde el pozo. Las alas de la fractura se propagan en forma perpendicular al plano de mínima tensión de la roca, en un plano preferencial de fracturación. Un agente de sostén, que por lo general es arena, hace que se mantengan abiertos estos conductos que aumentan la efectividad del radio del pozo, permitiendo el flujo lineal dentro de la fractura y hacia el pozo. En los tratamientos de la matriz, se inyecta un ácido por debajo de las presiones de fracturación para disolver el daño inducido o natural que taponan las gargantas de los poros. La fracturación ácida que, por lo general, no incluye el uso de agentes de sostén, establece la conductividad en los carbonatos por erosión ácida diferencial de superficies no uniformes que mantienen las fracturas abiertas.

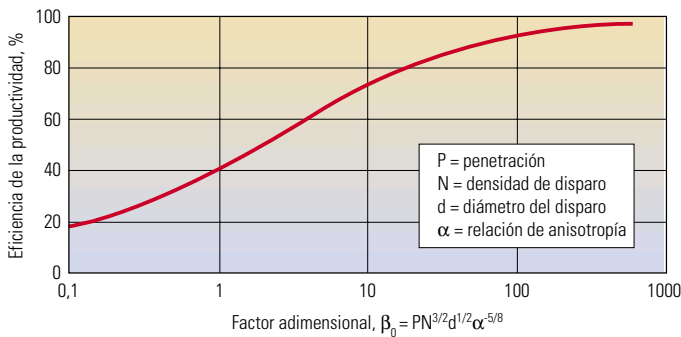
28. Una entrada limitada implica bajas densidades de disparo—1 dpp o menos—en una o más zonas con resistencias y permeabilidades diferentes para garantizar el emplazamiento uniforme del ácido o del agente de sostén al limitar los diferenciales de presión entre los intervalos agujereados. El objetivo consiste en maximizar los resultados de la estimulación. Se pueden utilizar selladores de goma para bloquear los disparos abiertos y aislar los intervalos una vez que han sido estimulados, de manera que se pueda tratar el próximo intervalo. Dado que los disparos deben estar completamente sellados, el diámetro del orificio y la uniformidad son importantes.

29. Behrmann et al, referencia 1.

▲ **Parámetros del disparo.** Para que resulten efectivos, los disparos deben atravesar el daño inducido por la perforación y la invasión del fluido en el pozo. El rendimiento de las cargas huecas se define por el tamaño del orificio de entrada en el revestidor y la longitud del túnel. La productividad del pozo, sin embargo, se rige por el daño de la formación, la longitud del orificio, la densidad de disparo, el daño provocado por el disparo que se mantiene después del brote generado por el desbalance, y la relación entre las permeabilidades verticales y horizontales (anisotropía). La densidad de disparo es el número de orificios especificados en disparos por pie (dpp). La orientación o fase es el ángulo entre los orificios.



^ Un método simple para estimar la productividad del pozo. La productividad máxima de un pozo se define por un cañón ideal con densidad de disparo infinita, que agranda el diámetro efectivo del hueco (D) por la longitud del orificio, o profundidad de penetración (P). En las completaciones naturales, este límite teórico de flujo se utiliza para definir la eficiencia del sistema de disparo para aquellos orificios que atraviesan el daño de la formación siguiendo un esquema en forma de espiral.



^ La eficiencia de la productividad comparada con el factor adimensional de disparo.

pared del hueco, el daño local de la formación alrededor del pozo, el daño de permeabilidad inducido por los disparos y la anisotropía de la permeabilidad. La máxima relación teórica de productividad del pozo se define por medio de un cañón ideal con densidad de disparo infinita que permite agrandar el radio del hueco por una distancia equivalente a la penetración del disparo (arriba). Así se establece la productividad teórica que se puede obtener para una completación natural con disparos y se define la eficiencia de productividad máxima de los sistemas de disparo en términos de un factor adimensional. La aplicación práctica de este método reside en determinar el efecto de los parámetros, combinados, el desbalance, el mejoramiento de la productividad y los parámetros económicos de las operaciones de disparo.

Resulta evidente que tanto la penetración como la densidad de disparo son importantes para las completaciones naturales. La penetración tiene un efecto proporcional que aumenta a medida que el disparo atraviesa el daño de la formación. La densidad de disparo tiene un efecto exponencial de 1.5. Por otra parte, teniendo en cuenta que el daño provocado por el disparo es inversamente proporcional al factor adimensional, se debería reducir cuando se dispara con el diferencial adecuado de desbalance de presión.

En los casos en que no se puede alcanzar una penetración profunda, una densidad de disparo elevada resulta particularmente efectiva. En las completaciones naturales, el diámetro del túnel en la formación es el menos importante de los parámetros del disparo y, por lo general, se produce un aumento del tamaño del orificio en detrimento de la penetración. Un aumento del 10% en el diámetro significa una disminución de la penetración de alrededor del 20%, mientras que el factor adimensional se reduce en un 15%. Otra razón que lleva a restar importancia al tamaño del orificio cuando se seleccionan cañones para las completaciones naturales es que los chorros de las cargas que abren huecos grandes también pueden provocar daño adicional.

Cuando el flujo se ve reducido debido a la anisotropía elevada, al daño causado por los disparos o al daño de la formación, se puede solucionar parcialmente seleccionando un cañón con el mayor factor adimensional, ya sea por penetración profunda, alta densidad de disparo, reducción del daño por desbalance o una combinación de estos factores. Las mejores estrategias son aquellas que proporcionan niveles de eficiencia de la productividad cercanos al 100% (arriba, figura inferior).

Completaciones estimuladas

Los tratamientos de fracturación y acidificación, en forma individual o combinados, estimulan la productividad del pozo.²⁷ Para que la estimulación de un pozo resulte efectiva es necesario que exista una comunicación en la mayor cantidad posible de los disparos, razón por la cual las operaciones de disparo se realizan con un desbalance óptimo, con técnicas de entrada limitada, o bien utilizando esferas sellantes o pares de empacadores de conexión que desvían el curso de los fluidos de estimulación en forma mecánica, para garantizar que los disparos se encuentren abiertos.²⁸ En lugar de crear fracturas hidráulicas largas en una formación, la sobrepresión extrema también constituye una opción para mejorar la comunicación entre los disparos y el yacimiento. Se puede disparar en condiciones de extrema sobrepresión antes de realizar la estimulación por fracturación para reducir la presión de ruptura.²⁹

Dado que la fracturación hidráulica a menudo se realiza en zonas de baja permeabilidad, el desbalance mínimo necesario para eliminar el daño provocado por los disparos puede resultar sumamente elevado. Por otra parte, para garantizar la remoción del daño de los disparos y los detritos se requiere un desbalance máximo y, si el daño no se elimina, los residuos pueden formar un revoque que limita la inyectividad de los disparos. El flujo entrante, por lo general, no se ve afectado, pero la restricción puede provocar el aumento de las presiones durante la inyección. Si el daño del disparo no se remueve antes de la fracturación, podría ser necesario realizar una acidificación.

Cuando se seleccionan cargas huecas para aplicaciones de fracturación se deben balancear los beneficios de la penetración y el tamaño del hueco. Si bien puede ocurrir que no sea necesario que los disparos penetren más de seis pulgadas dentro de la formación, los orificios deben tener el tamaño adecuado para evitar los desbordes del agente de sostén, u obturación en los disparos o cerca de los mismos. El desborde prematuro limita la longitud de la fractura y los volúmenes del agente de sostén que se pueden colocar. Para prevenir los desbordes cuando se utiliza agente de sostén con concentraciones entre moderadas y altas, el diámetro del disparo debe ser por lo menos seis veces mayor que el diámetro promedio de las partículas de agente de sostén. En realidad, se prefiere utilizar un diámetro que sea de 8 a 10 veces superior que el diámetro promedio de las partículas para compensar posibles variaciones en el rendimiento de las cargas y la posición del cañón.

(continúa en la página 68)

Fabricación y prueba de las cargas

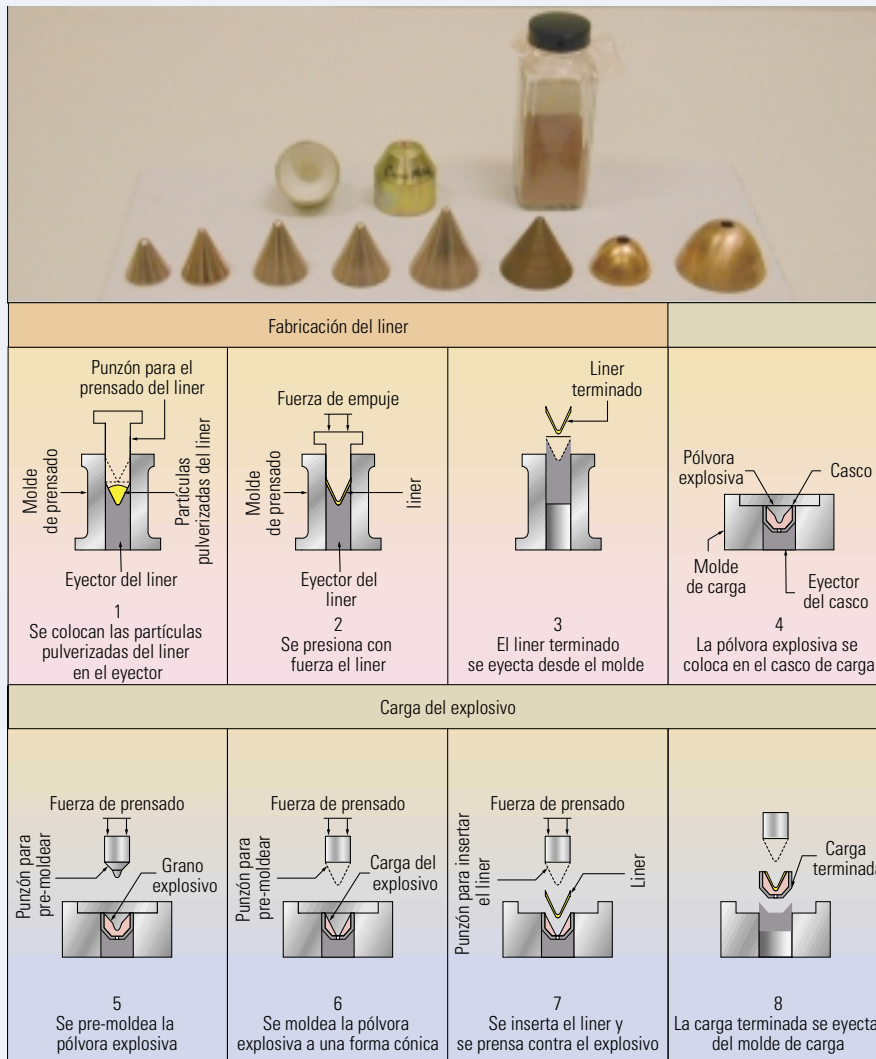
En la mayor parte de las cargas utilizadas por Schlumberger los liners sólidos han sido reemplazados por mezclas de partículas metálicas pulverizadas y prensadas, inhibidores de corrosión y lubricantes que facilitan el fluir de las partículas pulverizadas. En el Centro de Completaciones de Yacimientos de Schlumberger (SRC) con sede en Rosharon, Texas, los liners y las cargas se producen en una serie de operaciones de prensado (*abajo*). Con los componentes pulverizados se forma un cono utilizando un punzón mecánico. Por lo general, se utilizan partículas pulverizadas de cobre, tungsteno, estaño, zinc y plomo para producir la densidad de chorro y la velocidad necesarias, que son las propiedades críticas para el rendimiento de los disparos. El explosivo principal se vierte en un

casco, se nivela y se prensa con una gran carga para lograr la densidad óptima. Por último, se prensa un liner en el explosivo para completar la carga.

Si bien parece simple desde un punto de vista conceptual, la fabricación de las cargas huecas requiere una gran precisión. Los componentes de la carga—el casco, el primer, el explosivo y el liner—deben ajustarse a estrictos estándares de calidad y deben ser fabricados con niveles de tolerancia muy estrictos para garantizar que los chorros perforantes se formen exactamente de acuerdo con las especificaciones del diseño. El colapso de un liner no uniforme provoca irregularidades en las densidades, las formas y los perfiles de velocidad de las descargas, lo cual perjudica el tamaño y la



^ **Herramientas de fabricación.** Para mantener la tolerancia correcta, Schlumberger produce y mantiene matrices, punzones mecánicos y equipos de precisión para los que existe un taller de maquinarias interno con los últimos adelantos tecnológicos.



forma del orificio, y reduce drásticamente el rendimiento. Para mantener las tolerancias correctas, las herramientas de fabricación de gran precisión se construyen y se mantienen en un taller de maquinarias de última generación (*arriba*). Por medio de operaciones de prensado computarizadas se garantiza un alto nivel de calidad y se minimizan las posibles variaciones.

La fabricación de las cargas está controlada por computadora, pero existe intervención humana en el manejo de los liners, la verificación de la existencia de grietas, las inspecciones visuales y la limpieza de las herramientas. Los técnicos fabrican y empaquetan millones de cargas por año. Se utiliza un sistema de trabajo en equipo con funciones localizadas en una sola área, lo cual facilita la eficiencia de la fabricación y permite optimizar el rendimiento de las cargas. El proceso de fabricación se acelera mediante la organización en áreas de trabajo divididas en varios compartimientos, lo cual proporciona la flexibilidad necesaria para poder ajustarse a los frecuentes cambios en los

< **Fabricación de las cargas huecas.** Hoy en día, la mayor parte de los liners son mezclas de partículas metálicas pulverizadas, inhibidores de corrosión y lubricantes que facilitan el fluir de las partículas pulverizadas (*arriba*). En una serie de operaciones de prensado, estas partículas pulverizadas toman la forma de un cono utilizando un punzón y un molde mecánicos (*centro*—pasos 1-3). El armado de una carga hueca consiste en colocar un primer en la base de un casco y verter el explosivo principal (*centro*—paso 4). A continuación, el explosivo principal se nivela y se prensa con grandes cargas hasta alcanzar la densidad óptima (*abajo*—pasos 5 y 6). La carga se completa presionando un liner dentro del explosivo (*abajo*—pasos 7 y 8).



^ **Funciones de la fabricación.** Los equipos de técnicos capacitados arman y empaican millones de cargas por año. Para facilitar la fabricación eficiente y de alta calidad y el comportamiento óptimo de las cargas, las operaciones de prensado del liner y recargado de las cargas se concentran en un solo lugar (*arriba*). Las áreas de trabajo divididas en varios compartimientos otorgan flexibilidad y la capacidad de responder en forma rápida a las necesidades cambiantes de las operaciones de disparo. Una habitación de pesaje especial se utiliza para controlar cuidadosamente el contenido explosivo de las cargas huecas (*abajo*).



^ **Garantía de calidad.** Se mantiene un estricto control de todos los materiales desde los cascos de acero y las partículas metálicas pulverizadas hasta los explosivos y las herramientas mecánicas utilizadas para fabricar las cargas. Un despliegue en tiempo real les permite a los técnicos identificar rápidamente las desviaciones ocurridas en el proceso de fabricación y una base de datos registra cada una de las cargas. Estos registros se utilizan para supervisar las operaciones diarias y permiten cuantificar los avances del proceso de manera tal que los nuevos procedimientos que afecten el rendimiento de los disparos puedan ser implementados en todo el proceso de fabricación de otras cargas.

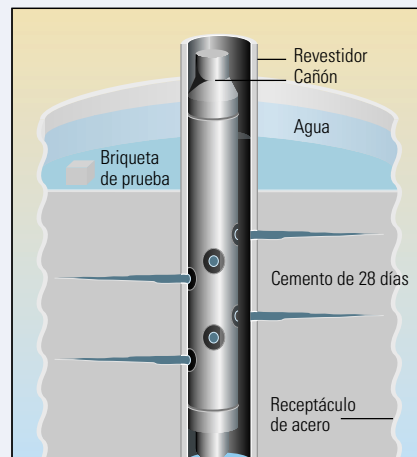
requerimientos de las completaciones de los pozos (*izquierda*). Los parámetros de fabricación se despliegan en tiempo real para poder detectar posibles desviaciones durante el proceso.

El control de calidad se mantiene sobre todos los materiales utilizados en la fabricación de las cargas, desde los cascos y las partículas metálicas pulverizadas hasta los explosivos. El control de todas las cargas se realiza por medio de una base de datos que incluye los números de serie, tarjetas de historial, diseños asociados e información histórica (*abajo*). Estos registros permiten controlar día a día la calidad de producción de las cargas huecas y resalta las mejoras de fabricación que influyen en el rendimiento de las cargas. Por ejemplo, ciertos procedimientos iniciados mientras se desarrollaban nuevas cargas de penetración profunda fueron implementados en otras cargas, con lo cual se logró mejorar su rendimiento.

Los sistemas de disparo se prueban de acuerdo con los procedimientos determinados por la norma RP 43, 5ta. Edición de la Sección 1 del Instituto Americano del Petróleo (API).¹ Las nuevas normas RP 19B son compatibles con la RP 43, pero se exige una mayor revisión para prevenir inconsistencias en los blancos de disparo.² La arena utilizada en los blancos de concreto se especifica como mallado americano 16/30. Este cambio, que se encuentra en proceso de implementación, fue aprobado recientemente con el fin de solucionar discrepancias en las pruebas de profundidad de penetración originadas en las grandes variaciones en los tamaños de los granos de arena utilizados para fabricar los blancos de concreto.³

Schlumberger realiza las pruebas API en el SRC sobre grandes blancos de concreto (*derecha*). Estas pruebas incluyen la certificación de nuevas cargas, además de la recertificación periódica, para garantizar que los datos publicados representen efectivamente las cargas que se están produciendo en ese momento. Las instalaciones donde se realizan las pruebas API también se utilizan para pruebas especiales de los clientes que incluyen blancos del tipo de los incluidos en la Sección 1 del API. Resultan de gran interés las pruebas especiales que comprenden diversas geometrías del revestidor o de la completación que no se encuentran dentro de la configuración estándar de la norma RP 43 del API.

(continúa en la próxima página)



^ **Pruebas de las cargas huecas.** En el centro SRC, Schlumberger lleva a cabo las pruebas API sobre grandes blancos de concreto (*arriba*). Las pruebas incluyen tanto la certificación de nuevas cargas como la recertificación periódica de las cargas existentes. Las instalaciones de pruebas API se utilizan para pruebas especiales de clientes que incluyen blancos del tipo de los comprendidos en la Sección 1 del API y pruebas que involucren distintas configuraciones de revestidores y completaciones de pozos que difieran de las que se ajustan a la configuración RP 43 del API (*abajo*). Las compañías petroleras utilizan estas instalaciones y el resto del SRC en forma habitual para llevar a cabo pruebas especiales.

1. El Instituto Americano del Petróleo (API) consulta con la industria del petróleo y el gas, considera las sugerencias y la información que recibe de las compañías de servicios, los operadores y las organizaciones científicas y recomienda procedimientos para equilibrar las necesidades, la tecnología y las opiniones de los proveedores de servicios dentro de la industria petrolera.

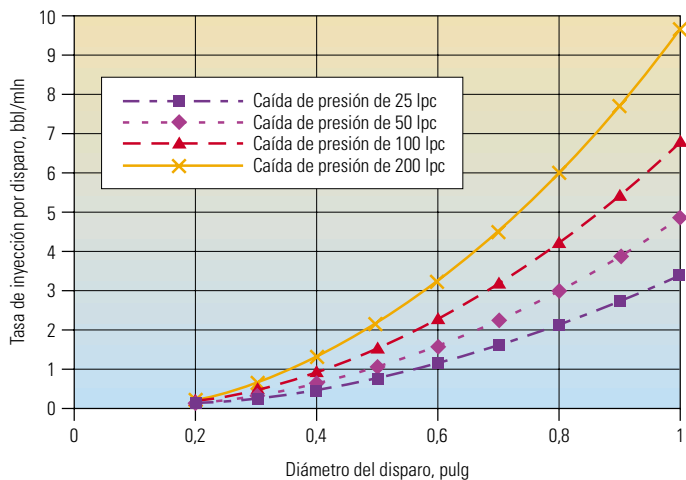
2. La norma RP 19R, Primera Edición, del API es una versión revisada de la RP 19B, según la cual las pruebas se programan y se registran en el API y pueden ser presenciadas por terceros. La norma RP 19R tiene la ventaja de que las compañías fabricantes se comprometen a programar y registrar las pruebas, las que merecen un mayor grado de confianza que durante la vigencia de la norma RP 43.

3. Brooks JE, Yang W y Behrmann LA: "Effect of Sand-Grain Size on Perforator Performance," artículo de la SPE 39457, presentado en el Simposio Internacional sobre Control del Daño de la Formación de la SPE, Lafayette, Luisiana, EE.UU., Febrero 18-19, 1998.

En los comienzos de un nuevo ciclo de producción, se dispara un mínimo de dos cargas sobre los blancos construidos de acuerdo con los estándares de Schlumberger utilizando transportadores de cañones reales en un claro (stand-off) de agua que simula las condiciones de fondo. Estos blancos de concreto tienen una resistencia a la compresión mínima de 5000 lpc [34,5 MPa]. La penetración esperada se calcula sobre la base de la Sección 1 del API y se establece una exigencia de penetración mínima para la fabricación. La producción completa comienza una vez que los resultados de las pruebas indican que se han superado los requerimientos mínimos. Para controlar la calidad de la carga se realizan mediciones repetidas de la penetración total del blanco y del tamaño mínimo y máximo del orificio de entrada.

Durante el ciclo de fabricación, se realizan pruebas periódicas para confirmar que se están respetando las especificaciones de funcionamiento establecidas con respecto a los estándares de penetración y tamaño del orificio. Las muestras se prueban cada 240 cargas en los ciclos largos y cada 120 cargas en los ciclos más cortos asociados con las cargas de alta temperatura. Para verificar la integridad del casco y el liner se realiza una prueba de vibración o caída, y también se comprueba la sensibilidad de la transferencia balística. Se realizan mediciones detalladas acerca de todos los componentes sobre grupos de cargas escogidas en forma aleatoria. Se almacenan algunas cargas de cada ciclo de fabricación con el fin de realizar auditorías. Durante este período, se extraen cargas de los bunkers de almacenamiento y se disparan a intervalos regulares para comprobar los efectos de envejecimiento de las cargas. Las auditorías internas también verifican el funcionamiento correcto de las cargas.

Las instalaciones del SRC destinadas a realizar pruebas, si bien se utilizan principalmente para evaluar las cargas nuevas y calificar los equipos de disparo, también están disponibles para que las compañías petroleras hagan uso de las mismas para el planeamiento de las completaciones y el análisis de condiciones de pozos difíciles. Además de mejorar el rendimiento de los cañones, la posibilidad de realizar pruebas estándares y especiales les permite a los investigadores y a los clientes adquirir confianza en las técnicas de disparo, verificando que los sistemas funcionen en forma continua en las condiciones de temperatura y presión registradas a lo largo de toda la operación.



^ Tasa de inyección comparada con el diámetro del orificio para un fluido de fracturación a base de agua. El tamaño mínimo del orificio y la densidad de disparo para los diseños de estimulación por fracturación dependen de la tasa de inyección por disparo requerida, de las limitaciones de presión en la superficie, de las propiedades de los fluidos, de los tamaños de las tuberías de las completaciones, de la pérdida por fricción aceptable en los disparos y del diámetro del orificio de entrada.

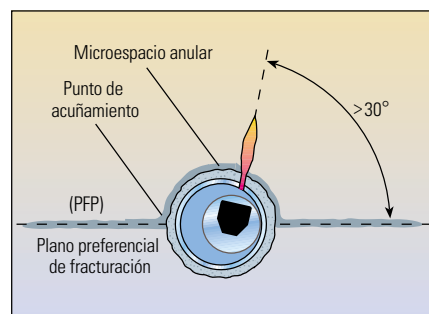
Los disparos constituyen el punto donde la presión se pone en contacto con la formación y se inician las fracturas. Con excepción de las técnicas de entrada limitada y de las que usan agentes divergentes, es importante diseñar los disparos de manera tal que se minimice la caída de presión en todos ellos durante el bombeo y la producción subsiguiente, incluyendo las pérdidas por fricción en los disparos, los puntos de acuñamiento del microespacio anular y las tortuosidades provocadas por fracturas curvadas y fracturas múltiples o asimétricas.

Las tasas de inyección de los fluidos afectan directamente el bombeo en la superficie y las presiones de iniciación de la fractura. Las tasas y las presiones elevadas promueven la iniciación de la fractura en sitios individuales. Cuando las tasas son bajas, la presión de inyección se reduce y las fracturas se pueden iniciar a partir de los disparos y puntos discretos alrededor del pozo. La densidad de disparo se calcula durante el diseño de la fractura. Una densidad de disparo mínima depende de varios factores: la tasa de inyección necesaria por disparo, las limitaciones de la presión en la superficie, las propiedades de los fluidos, los tamaños de las tuberías de completación, la pérdida de presión por fricción aceptable de los disparos y el diámetro del orificio de entrada (arriba).

En algunos casos, después de la cementación, las pruebas de integridad de la presión en el revestidor, el desplazamiento de los fluidos de perforación o de completación, o bien como consecuencia de las operaciones de disparo y bombeo que debilitan la adherencia hidráulica

entre el cemento y la formación (abajo) se crea un microespacio anular, lo que se debería evitar debido a los puntos de acuñamiento, o restricciones de flujo, resultantes.

Si existiera un microespacio anular o la posibilidad de inducirlo a partir de los disparos, se deben considerar varios factores.³⁰ Para minimizar los puntos de acuñamiento y reducir la tortuosidad de la trayectoria del flujo, los pozos con inclinaciones inferiores a 30° deberían ser agujereados con cañones de 180° de fase dentro de los 10° con respecto al plano preferencial de fracturación (PFP, por sus siglas en Inglés). La dirección del PFP se puede inferir a partir de la geología local o los registros de pozos.³¹



^ Puntos de acuñamiento. Un microespacio anular se origina por el debilitamiento de la adherencia hidráulica entre el cemento y la formación. Debido a las tortuosidades, la restricción del flujo y el aumento de presión que acompañan a los microespacios anulares, estos últimos y los puntos de acuñamiento relacionados con los mismos se deberían evitar. Si el ángulo entre los disparos y el PFP es superior a 30°, se inicia una fractura.

En las pruebas de laboratorio realizadas a gran escala sobre la iniciación de la fractura a través de los disparos reales, se observa que los sitios de iniciación de las fracturas se encuentran, por lo general, en la base de los disparos y en la intersección del PFP con el hueco.³² El sitio de iniciación de la fractura depende de la orientación de los disparos en relación con el PFP. Cuando este ángulo es mayor de 30°, las fracturas ocurren en los lugares donde no existen disparos. Si una fractura no se inicia en los disparos, el fluido y el agente de sostén deben atravesar la interfase entre el cemento y la formación para llegar a una fractura, con lo cual aumentan las presiones de tratamiento, puede ocurrir un desborde prematuro

y existe la posibilidad de que se produzcan fracturas múltiples o asimétricas.

La orientación o fase de los disparos también es importante en la fracturación. La tortuosidad a partir de la trayectoria curvada de una fractura resulta de una falta de alineación entre la orientación del cañón y el PFP. Los disparos orientados tienden a crear fracturas múltiples. Todos estos factores provocan el incremento de las presiones de fracturación.³³

Los pozos verticales con inclinaciones menores de 30° se deberían disparar con cañones de 180° de fase, dentro de los 10° con respecto al PFP para aumentar el número de disparos abiertos a una fractura, maximizar la amplitud de la fractura cerca del pozo y reducir la presión de iniciación de la fractura, o de punto de

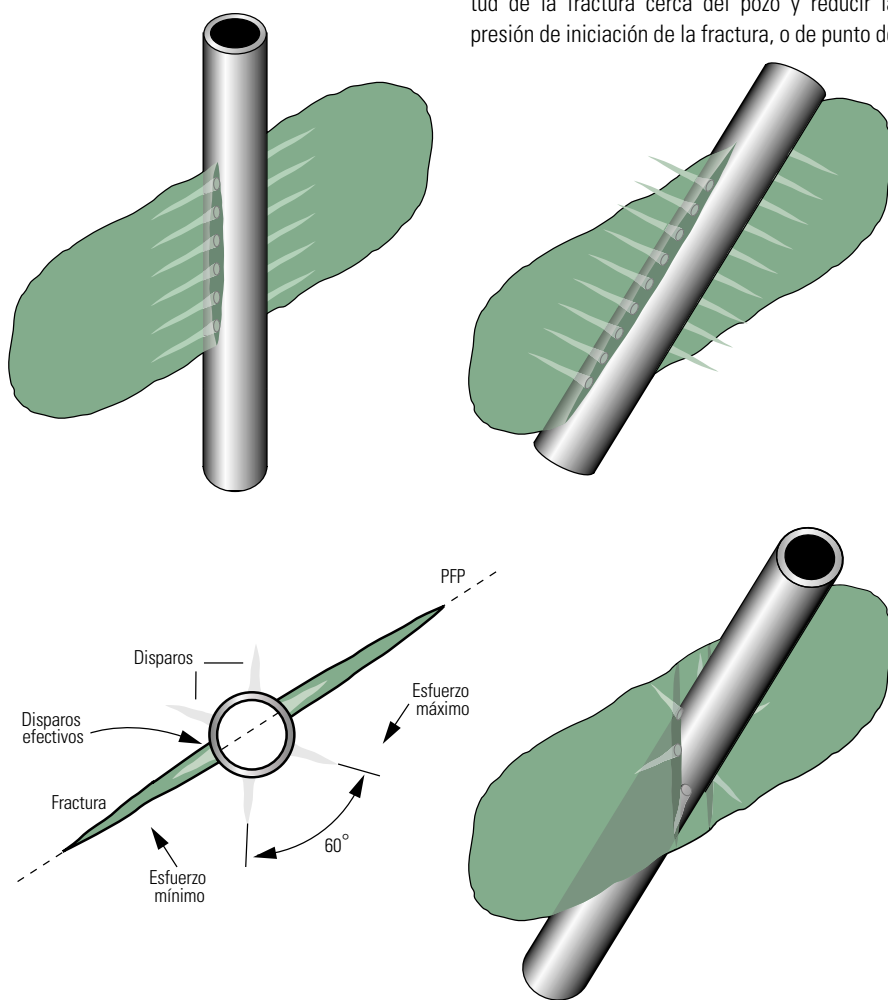
ruptura. Si no se conoce la dirección del PFP, o si no es posible determinar la orientación, se recomienda un ángulo de 60° o 120°.

Cuando la inclinación del pozo es mayor de 30° y un hueco se encuentra dentro del PFP o cerca del mismo, se recomienda utilizar los cañones con un ángulo de 180° orientados para disparar hacia arriba y hacia abajo. Se puede utilizar la Herramienta de Disparo Orientada por Cable de Acero (WOPT, por sus siglas en Inglés) para orientar cañones bajados con cable de acero en pozos verticales y no verticales. Por otra parte, se encuentran disponibles varios métodos alternativos para orientar los cañones TCP. A medida que los huecos se alejan del PFP, los intervalos agujereados deberían disminuir, por lo cual puede resultar más efectivo utilizar un ángulo de 60° en lugar de 180° (izquierda).

En el caso de pozos muy desviados y pozos horizontales, en los que el ángulo entre el hueco y el PFP supera los 75°, los disparos se deben concentrar en un área reducida y utilizar una densidad de disparo máxima con ángulos de orientación que optimicen la comunicación con una fractura dominante en cada intervalo.

Manejo de la producción de arena: ¿control o prevención?

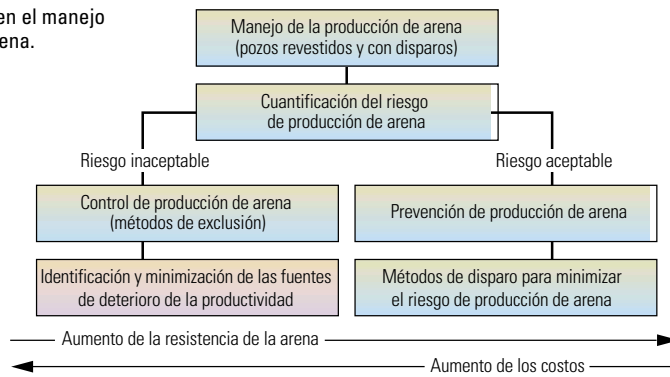
Dependiendo de la resistencia de la formación, las tensiones de los disparos, la tasa de flujo y el tipo de fluido, la arena se puede producir con el petróleo, el gas y el agua cuando la tasa de flujo es suficientemente elevada y existen granos de la formación no consolidados o sueltos en los disparos o alrededor de los mismos. Las causas principales de la producción de arena son los cambios en la tasa de flujo relacionados con la caída de presión, el aumento de la tensión efectiva debido al agotamiento de las reservas y el aumento de la producción de agua con el transcurso del tiempo.



^ Fracturación de pozos verticales y pozos muy inclinados. En los intervalos verticales y en los huecos con inclinaciones inferiores a 30°, se recomienda utilizar los cañones con una fase de 180° dentro de los 10° con respecto al plano preferencial de fracturación (PFP) (arriba a la izquierda). Si no se conoce la dirección del PFP, se debe optar por una orientación de 60° y altas densidades de disparo (abajo a la izquierda). Si la inclinación del pozo supera los 30° y el hueco se encuentra dentro del PFP o cerca del mismo, se deben utilizar cañones con una fase de 180° para disparar hacia arriba y hacia abajo (arriba a la derecha). A medida que los huecos se alejan del PFP, los intervalos agujereados deberían disminuir, por lo cual puede resultar más efectivo utilizar un ángulo de 60° en lugar de 180° (abajo a la derecha). Los disparos se deberán concentrar en intervalos cortos con máxima densidad de disparo y la orientación necesaria para optimizar la comunicación con una fractura dominante en cada intervalo.

30. Behrmann LA y Nolte KG: "Perforating Requirements for Fracture Stimulation," artículo de la SPE 39453, presentado en el Simposio Internacional sobre Control del Daño de la Formación de la SPE, Lafayette, Luisiana, EE.UU., Febrero 18-19, 1998.
31. Brice A, Endo T, Hoyle D, Codazzi D, Esmeroy C, Hsu K, Denoo S, Mueller MC, Plona T, Shenoy R y Sinha B: "New Directions in Sonic Logging," *Oilfield Review* 10, no. 1 (Primavera de 1998): 40-55.
32. Behrmann LA y Elbel JL: "Effect of Perforations on Fracture Initiation," artículo de la SPE 20661, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 65 de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EE.UU., Septiembre 23-26, 1990.
33. Romero J, Mack MG y Elbel JL: "Theoretical Model and Numerical Investigation of Near-Wellbore Effects in Hydraulic Fracturing," artículo de la SPE 30506, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 70 de la SPE, Dallas, Texas, EE.UU., Octubre 22-25, 1995.

> Arbol de decisiones en el manejo de la producción de arena.



Para controlar la producción de arena se utilizan métodos mecánicos que la excluyen de los fluidos producidos. Las técnicas de prevención tratan de minimizar o eliminar la cantidad de arena producida, además de reducir su impacto sin utilizar métodos de exclusión mecánicos. La selección entre estas opciones depende de la estabilidad de los disparos y de la formación y además se tiene en cuenta si existe la posibilidad de predecir el fracaso de la operación de disparo. La esencia del manejo de la producción de arena es la cuantificación del riesgo de producción, lo cual les permite a los operadores decidir si se debe implementar un sistema de control o de prevención y cómo y cuándo hacerlo (arriba).

Existen diversos métodos que permiten predecir la estabilidad del túnel de los disparos a lo largo de la vida de un pozo. Los modelos teóricos de estabilidad del hueco adaptados a los disparos resultan útiles a medida que se modifican las condiciones de tensión debido a la caída de la presión y al agotamiento de las reservas.³⁴ Los métodos experimentales comprenden pruebas de núcleos del yacimiento o de rocas de afloramientos con propiedades similares.³⁵ Los criterios para pronosticar la producción de arena basados en el historial de producción, que es la técnica más ampliamente utilizada, confían en la experiencia obtenida en otros pozos y la correlación de la resistencia de la roca para calibrar los modelos teóricos y poder seleccionar entre los sistemas de control o prevención.³⁶

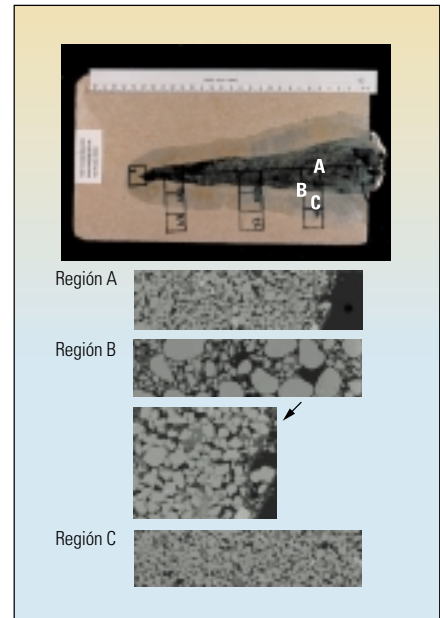
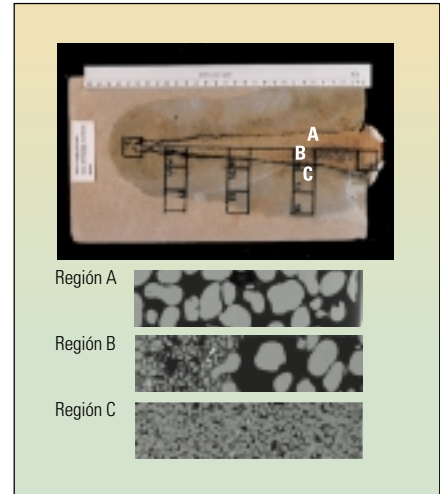
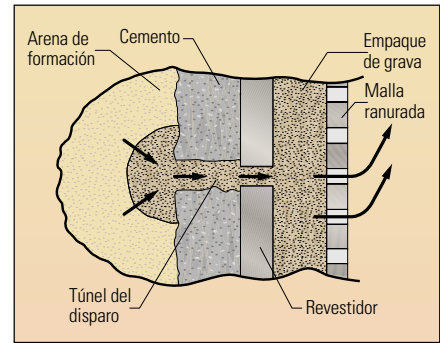
El disparo como sistema de control, parte de la suposición de que la producción de arena es inevitable y que será necesario colocar empaques de grava, fracturas empacadas u otras técnicas mecánicas para eliminar la arena del flujo de producción. El disparo debe tener en cuenta el nivel de desbalance adecuado para minimizar la caída de presión, y remover toda la arena suelta para limpiar los túneles de los disparos y poder realizar un emplazamiento óptimo de la grava. Como sistema de prevención, el diseño de los disparos

tiende a evitar la producción de arena a lo largo de la vida de un pozo. Una decisión correcta afecta tanto los costos iniciales como la tasa de producción y la recuperación total del pozo.

Requisitos del control de la producción de arena

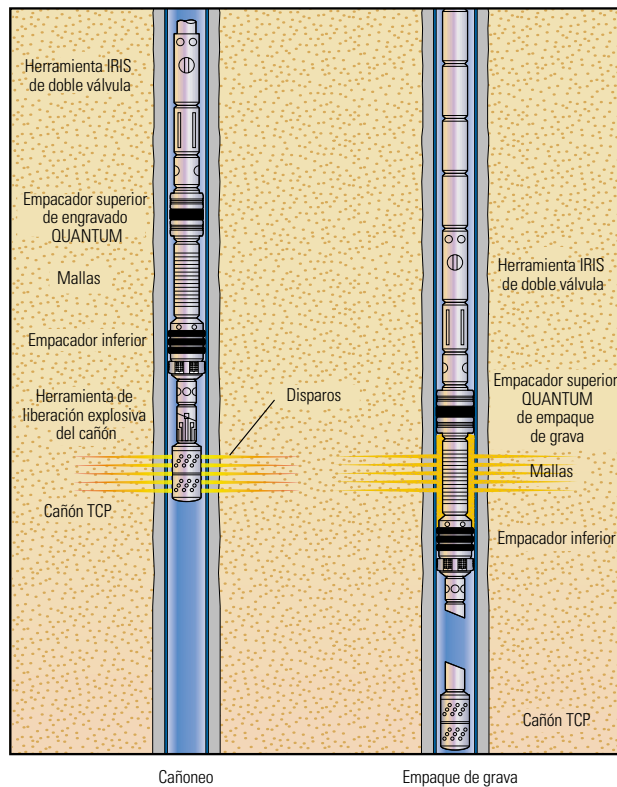
Habitualmente se cree que en las formaciones débiles y no consolidadas no existen disparos abiertos en la formación, con lo cual la única abertura para emplazar la grava sería el hueco que atraviesa el revestidor y el cemento. Esta teoría general sostiene que si las formaciones son débiles y se produce arena junto con hidrocarburos, existen pocas posibilidades de que existan túneles abiertos. Sin embargo, tanto las pruebas de un solo disparo como las de disparos múltiples demuestran que esa regla no se cumple en todos los casos. Por el contrario, la investigación indica que la definición de los disparos en las arenas débiles depende fundamentalmente de la resistencia de la roca, pero también de otros factores, como la tensión efectiva, el desbalance, la distancia entre los disparos adyacentes y los fluidos en los espacios de los poros y en el hueco.

Cuando los túneles de los disparos no están definidos, el objetivo de disparar para realizar operaciones convencionales con empaques de grava consiste en minimizar la caída de presión en todo el hueco relleno de grava en el revestidor y el cemento. Esa caída de presión está determinada por el área total abierta al flujo—el área de huecos individuales multiplicada por el número total de disparos—, la permeabilidad de la grava y la tasa de flujo por disparo. En las pruebas realizadas sobre muestras de núcleos se observa que cuando los túneles se encuentran definidos, los residuos y los finos de la formación pueden perjudicar la permeabilidad de la grava (derecha). El objetivo consiste en minimizar el daño inducido y el deterioro del empaque de grava.



^ Disparos para el control de la producción de arena. Se supone que los túneles de los disparos no están definidos y tienen poca o ninguna abertura en las formaciones débiles (arriba). Un orificio ideal limpiado a mano en el laboratorio no presenta ningún residuo de roca inducido por el disparo y los detritos y la grava colocada casi no se mezclan entre sí, como se observa en las imágenes obtenidas con el microscopio de escaneo de electrones (SEM, por sus siglas en Inglés) (centro). En una prueba de un solo disparo, los detritos del disparo se mezclan con la grava y taponan el empaque (abajo).

Antes de colocar el empaque de grava se debe eliminar el daño de los disparos, los finos de la formación y los detritos de las cargas, para lo cual los mejores métodos consisten en disparar con un desbalance de presión y activar el flujo. Para evitar el colapso del orificio y una producción catastrófica de arena durante el disparo, se deberá seleccionar el máximo desbalance de presión. Si se dispara con el orificio de superficie abierto se garantiza que el flujo posterior al disparo transporte los residuos hacia el hueco. Se deben tomar las precauciones necesarias para manejar la producción transitoria de arena que se produce en la superficie hasta que los disparos se limpian totalmente. Cuando la caída de presión y la tasa de flujo por disparo son bajas, se pueden utilizar cargas de penetración profunda. Este tipo de cargas causan menos daño localizado y menor cantidad de residuos y proporcionan un radio efectivo del hueco más grande, lo que reduce la caída de presión. Como ocurre en las aplicaciones de fracturación, el diámetro de los disparos debe ser entre 8 y 10 veces superior que el diámetro de la grava.



34. Bruce S: "A Mechanical Stability Log," artículo de la SPE 19942, presentado en la Conferencia de Perforación de las IADC/SPE, Houston, Texas, EE.UU., Febrero 27-Marzo 2, 1990.

Weingarten J y Perkins T: "Prediction of Sand Production in Gas Wells: Methods and Gulf of Mexico Case Studies," artículo de la SPE 24797, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 67 de la SPE, Washington, DC, EE.UU., Octubre 4-7, 1992.

van den Hoek PJ, Hertogh GMM, Kooijman AP, de Bree P, Kenter CJ y Papamichos E: "A New Concept of Sand Production Prediction: Theory and Laboratory Experiments," artículo de la SPE 36418, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 71 de la SPE, Denver, Colorado, EE.UU., Octubre 6-9, 1996.

Kooijman AP, van den Hoek PJ, de Bree P, Kenter CJ, Zheng Z y Khodaverdian M: "Horizontal Wellbore Stability and Sand Production in Weakly Consolidated Sandstones," artículo de la SPE 36419, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 71 de la SPE, Denver, Colorado, EE.UU., Octubre 6-9, 1996.

Blok RHJ, Welling RWF, Behrmann LA y Venkitaraman A: "Experimental Investigation of the Influence of Perforating on Gravel-Pack Impairment," artículo de la SPE 36481, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 71 de la SPE, Denver, Colorado, EE.UU., Octubre 6-9, 1996.

35. Behrman L, Willson SM, de Bree P y Presles C: "Field Implications from Full-Scale Sand Production Experiments," artículo de la SPE 38639, presentado en la Conferencia Técnica y Exhibición Anual No 72 de la SPE, San Antonio, Texas, EE.UU., Octubre 5-8, 1997.

Presles C y Cruessot M: "A Sand Failure Test Can Cut Both Completion Costs and the Number of Development Wells," artículo de la SPE 38186, presentado en la Conferencia Europea sobre Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, Junio 2-3, 1997.

36. Venkitaraman A, Li H, Leonard AJ y Bowden PR: "Experimental Investigation of Sanding Propensity for the Andrew Completion," artículo de la SPE 50387, presentado en la Conferencia Internacional sobre Tecnología de Pozos Horizontales de la SPE, Calgary, Alberta, Canadá, Noviembre 1-4, 1998.

37. Mason et al, referencia 23.

38. Behrmann y Nolte, referencia 30.

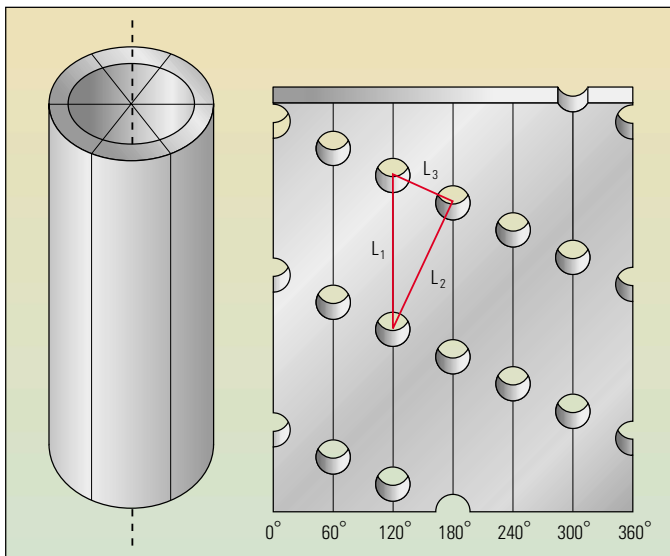
▲ Empaque de grava en una sola operación. Un equipamiento habitual para el sistema PERFPAC incluye un cañón TCP con liberación automática del explosivo, un empacador de fondo, mallas para el control de arena, un empacador de grava con una válvula charnela, sondas de presión y registradores, cabeza de disparo y una válvula de pruebas para sarta de perforación doble. Los cañones TCP se posicionan, se disparan, se liberan y desechan (*izquierda*). A continuación se vuelve a posicionar el equipo de manera que las mallas se encuentren frente al intervalo agujereado (*derecha*). Se coloca el empacador superior QUANTUM de empaque de grava y se inyecta grava por detrás de la malla. Luego se desengancha la sarta de trabajo, y se dejan las mallas empacadas en el lugar correspondiente. Las operaciones se realizan en un ambiente controlado para que las formaciones no se vean expuestas a sobrepresión, LCM o fluidos perjudiciales.

Durante las operaciones para el control hidrostático del pozo se debería evitar exponer las formaciones a fluidos de completaciones perjudiciales o a materiales de control de pérdidas de circulación (LCM, por sus siglas en Inglés) y a los químicos. El daño en los disparos abiertos se observó en diversas pruebas realizadas en bloques de areniscas Berea que fueron agujereados, abiertos al flujo, taponados con LCM y luego reabiertos al flujo.³⁷ Cuando se debe matar un pozo, es mejor utilizar salmueras no perjudiciales o solventes mutuos.

En el método convencional de empaque de grava dentro del revestidor es necesario realizar tres operaciones: colocar un empacador de fondo, disparar y hacer circular grava por detrás de las mallas de empaque. Las desventajas de este sistema consisten en la larga duración de las operaciones y la potencial formación de daño provocado por la pérdida de fluido o LCM. En la

actualidad, se pueden operar los cañones y los accesorios de la operación de empaque de grava en un solo paso. El sistema PERFPAC es un método destinado al control de arena en una sola operación que limita la pérdida de fluidos, reduce el daño de la formación y permite ahorrar tiempo (*arriba*).

Además de los empaques de grava internos, los disparos desempeñan un papel importante en las aplicaciones externas para el control de arena, como fracturas empacadas y los empaques de grava sin mallas.³⁸ Las exigencias de los disparos con respecto a las fracturas empacadas son las mismas que para los empaques de grava internos, ya que es más importante minimizar la caída de presión a través del empaque y controlar la producción de arena que crear fracturas largas. Sin embargo, para crear un empaque externo es importante lograr un emplazamiento correcto del agente de sostén.



^ Optimización de la fase para la prevención de la producción de arena. La fase real de los disparos en la formación depende del radio del hueco y de la densidad de disparo. Un nuevo método desarrollado y patentado por Schlumberger permite diseñar cañones con un ángulo de fase que maximiza las distancias (L_1 , L_2 y L_3) entre los orificios. El objetivo de una densidad de disparo determinada consiste en preservar la formación involucrada tanto como sea posible sin perjudicar la tasa de flujo por disparo.

Los orificios grandes con alta densidad de disparo—12, 16, 18 ó 21 dpp—y ángulo de orientación de 60° ó 45° maximizan el área de flujo e impiden el desborde del agente de sostén, u obturación, en los disparos.

En los empaques de grava sin mallas, la formación se consolida con resinas y luego se fractura. El agente de sostén inyectado en la fractura impide la producción de arena de la formación. Debido a que el agente de sostén no rellena los disparos, los requisitos de la operación de disparo son más parecidos a los de las estimulaciones convencionales por fracturación hidráulica: la longitud del intervalo agujereado debe ser limitada; los disparos que no se comunican con la fractura pueden producir arena y deben ser eliminados o minimizados; el diámetro del orificio debe ser de 8 a 10 veces más grande que el diámetro del agente de sostén y los disparos con una fase comprendida entre 0 y 180° se deben orientar dentro de los 30° del PFP.

Prevención de la producción de arena

La producción de arena en las formaciones no consolidadas y en algunas formaciones consolidadas pero débiles se origina en el colapso del túnel o en la falla de la formación entre los disparos. Para evitar problemas subsiguientes que podrían perjudicar la productividad y rentabilidad y limitar las opciones de intervención en los

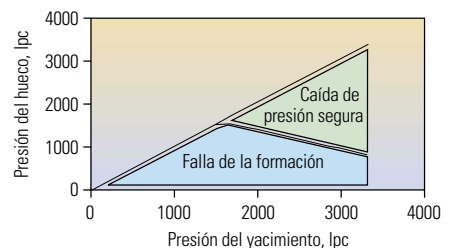
pozos, las medidas de prevención de la producción de arena deben tener en cuenta los cambios ocurridos en las tasas de producción, el estado de tensiones de la formación y la producción de agua. Una vez que se determinan la estabilidad de la formación y los umbrales de la falla del disparo por medio de simulaciones, pruebas de laboratorio o análisis de datos históricos, los métodos de disparo se utilizan para minimizar la producción de arena.³⁹ El uso de sistemas de prevención implica la aceptación de un riesgo relativamente bajo de producción de arena.

Las cargas de hueco grande más poderosas, el ángulo de fase y un nivel excesivo de desbalance contribuyen al aumento del daño provocado por los disparos y a que se produzcan fallas entre los mismos. Para prevenir la producción de arena, el diseño de los disparos debe tratar de minimizar la caída de presión en los intervalos agujereados y la tasa de flujo por disparo. Por otra parte, los disparos deben encontrarse a la mayor distancia posible entre sí. Cuando existe un gran contraste de tensiones en la formación y se conocen las direcciones de los esfuerzos, los disparos orientados utilizando diversos sistemas pueden incrementar la estabilidad de los túneles aprovechando las direcciones de los esfuerzos mínimos.⁴⁰ El disparo selectivo puede evitar las zonas o las formaciones débiles por completo.

Debido a que los disparos de diámetro reducido son más estables que aquellos creados por cargas de hueco grande, para la prevención de arena se recomienda utilizar las cargas de penetración profunda. Esto también minimiza el daño ocasionado por el disparo, otorga mayor estabilidad durante la caída de presión y el agotamiento, y aumenta la distancia entre los disparos. Cuando se utilizan densidades de disparo más elevadas, la caída de presión, la tasa de flujo y las fuerzas de arrastre de cada disparo se mantienen por debajo del valor crítico y se minimiza la erosión de la formación.

El disparo con desbalance óptimo reduce el daño y evita el arenamiento provocado por fallas catastróficas del túnel que podrían atascar los cañones. Las simulaciones de estabilidad de los disparos permiten determinar los límites de desbalance que mantienen la caída de presión por debajo del límite crítico de falla de la formación. Las técnicas que utilizan un solo disparo y las pruebas de flujo efectuadas sobre los núcleos, pueden confirmar cuáles son los valores de desbalance que permiten prevenir el transporte de arena, cuantificar el impacto del incremento en la producción de agua y, por lo general, verificar la estabilidad de la formación y del disparo (abajo).

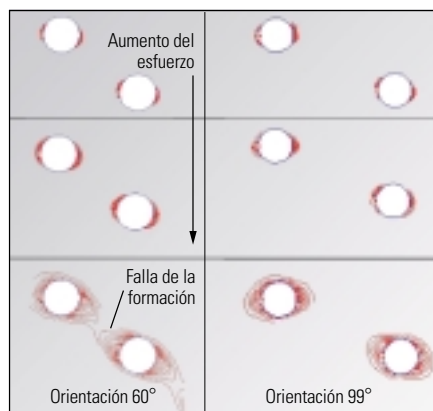
Además de la inestabilidad del disparo individual, la vinculación entre las zonas de falla alrededor de los disparos adyacentes, determinada por la distancia entre los disparos, lleva al colapso de la formación y a la producción de arena. Cuando los huecos son más pequeños y la densidad de disparo es menor aumenta el espaciamiento de los disparos, pero se produce el efecto indeseado de que se incrementa la tasa de flujo y la caída de presión por cada disparo, lo cual hace aumentar el transporte de material proveniente de la falla de la formación y puede provocar producción de arena.



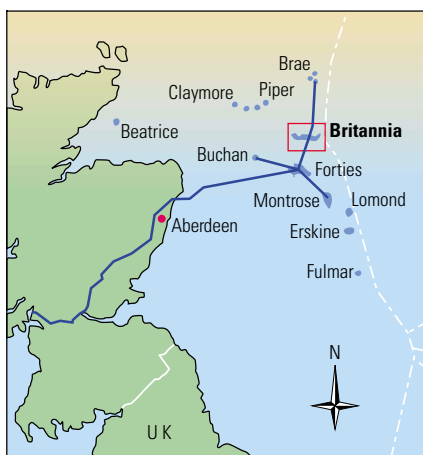
^ Estabilidad del orificio. Para la prevención de arena, el análisis de estabilidad puede determinar una envolvente operativa segura para la caída de presión durante la producción que servirá para prevenir la falla del orificio y la vinculación de las zonas de falla alrededor de los disparos adyacentes.

Se ha desarrollado un método para diseñar cañones con la fase óptima y la distancia máxima entre los orificios destinado a reducir aún más el riesgo de colapsos en la formación entre los disparos (página previa, arriba).⁴¹ Al ajustar el ángulo de fase para un radio de hueco dado y una densidad de disparo determinada, se puede incrementar la distancia entre los disparos para evitar la interacción entre los disparos adyacentes. La optimización de la fase minimiza las interferencias y la vinculación con las zonas dañadas adyacentes, lo cual reduce el riesgo de falla de la formación sin perjudicar la tasa de flujo por cada disparo.

La efectividad de utilizar un ángulo de fase óptimo quedó demostrada en el campo Magnus de BP Amoco ubicado en el Mar del Norte. La estrategia original consistía en utilizar cañones con 6 dpp y un ángulo de fase de 60° (abajo). En 1997, se cambió por un ángulo óptimo de 99° manteniendo la misma densidad de disparo y tipo de carga. Los pozos agujereados con los nuevos cañones tuvieron menos problemas relacionados con la producción de arena. El aumento del espaciamiento de los disparos para lograr el ángulo óptimo del cañón resulta fundamental comparado con el ángulo estándar. En el caso del campo Magnus, suponiendo que se utiliza un cañón centralizado, se incrementó el espaciamiento mínimo entre los disparos de 4,88 a 7,61 pulgadas [12,4 a 19,4 cm]—un aumento del 56%—mediante el cambio de fase de 60 a 99°.



^ Fase óptima. La fase óptima fue utilizada con todo éxito en el campo Magnus de BP Amoco en el Mar del Norte para impedir la falla de la formación entre los disparos. La estrategia comprendía cañones de 3 3/8 pulgadas con 6 dpp con un ángulo de fase de 60° (izquierda). En 1997 se cambió a 99° manteniendo la misma densidad de disparo (derecha). Los pozos agujereados con los nuevos cañones tuvieron menos problemas relacionados con la producción de arena.



^ Ubicación del campo Britannia.

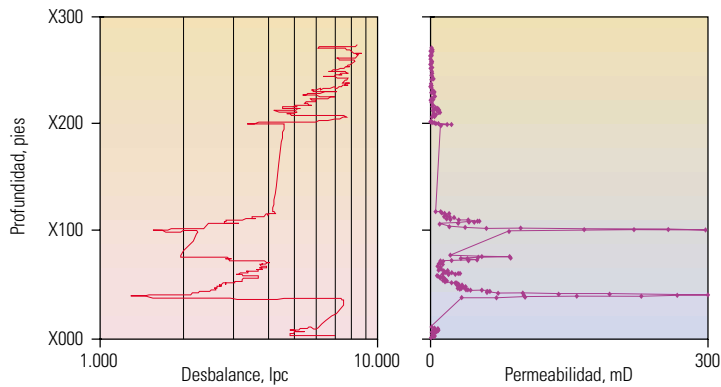
En las aplicaciones para prevención de producción de arena se prefiere utilizar el desbalance y el ángulo de fase óptimos junto con cargas de penetración profunda. Los cañones con densidad de disparo ultraelevada con penetración profunda también se han utilizado para prevenir el arenamiento en rocas débiles pero consolidadas. De todos modos, a pesar del uso de técnicas de disparo para la prevención de arena, el flujo de producción puede transportar volúmenes limitados de detritos desde las zonas trituradas y los túneles de los disparos. Como en el caso del control de arena, es necesario tener en cuenta la producción transitoria de arena en la superficie hasta que se logra la limpieza completa de los disparos.

Una estrategia global de disparo

El campo Britannia es un yacimiento de gas ubicado en el Mar del Norte y operado por Conoco y Chevron (izquierda). Antes de que los pozos fueran completados, las principales preocupaciones eran la producción potencial de arena—estabilidad de los disparos—y el nivel de desbalance de presión óptimo durante el disparo para minimizar o eliminar el daño ocasionado por el disparo. Para determinar cuáles eran las condiciones óptimas de desbalance se utilizaron modelos teóricos sobre la base de las propiedades de la formación derivadas de los registros. Con la información detallada de los registros de permeabilidad, se llevaron a cabo numerosas simulaciones para evaluar los cañones, las cargas, las densidades de disparo y las estrategias de disparo. A partir de estas simulaciones, los diseños finales de las completaciones incluyeron diseños específicos de cargas y densidades de disparo para las diversas secciones de la formación, en lugar de utilizar las propiedades promedio para determinar los parámetros de los disparos.⁴²

En líneas generales, los cuatro aspectos fundamentales de los disparos que tienen mayor impacto sobre la productividad y desempeñan un rol importante en cuanto al éxito de la completación del pozo son: las dimensiones del disparo (longitud y diámetro), la densidad de disparo, los ángulos de fase y el nivel de daño provocado por los disparos. Para seleccionar los parámetros del sistema de cañón para la optimización de la completación, se realizó un análisis teórico de la eficiencia de la completación por medio de programas de análisis de comportamiento del pozo o análisis NODAL. En el estudio del campo Britannia, también se tuvieron en cuenta las variaciones de la litología. Mediante el uso de los datos de registros y núcleos se pudo determinar la productividad de las distintas capas individuales tomando como base la conductividad y el daño de la formación. Se

39. Venkitaraman A, Behrmann LA y Noordermeer AH: "Perforating Requirements for Sand Prevention," artículo de la SPE 58788, presentado en el Simposio Internacional de la SPE sobre Control del Daño de la Formación, Lafayette, Luisiana, EE.UU., Febrero 23-24, 2000.
40. Sulbaran AL, Carbonell RS y López-de-Cárdenas JE: "Oriented Perforating for Sand Prevention," artículo de la SPE 57954, presentado en la Conferencia Europea sobre Daño de la Formación de la SPE, La Haya, Holanda, Mayo 31- Junio 1, 1999.
41. Behrmann LA: "Apparatus y Method for Determining an Optimum Phase Angle for Phased Charges in a Perforating Gun to Maximize Distances Between Perforations in a Formation," Patente de EE.UU., No. 5.392.857 (Febrero 28, 1995).
42. Underdown DR, Jenkins WH, Pitts A, Venkitaraman A y Li H: "Optimizing Perforating Strategy in Well Completions to Maximize Productivity," artículo de la SPE 58772, presentado en el Simposio Internacional de la SPE sobre Control del Daño de la Formación, Lafayette, Luisiana, EE.UU., Febrero 23-24, 2000.



Zona	Espesor de la formación, pies	Permeabilidad, mD	Esfuerzo ilimitado, lpc	Porosidad, %	Caída de presión, lpc (tasa, MMpc/D)			
					Tasa 1	Tasa 2	Tasa 3	Tasa 4
B	10,5	98,56	8928	1,77	227 (20)	822 (40)	1739 (60)	3401 (80)
C	10	20,3	9346	13,54	259 (5)	643 (10)	1181 (15)	1935 (20)

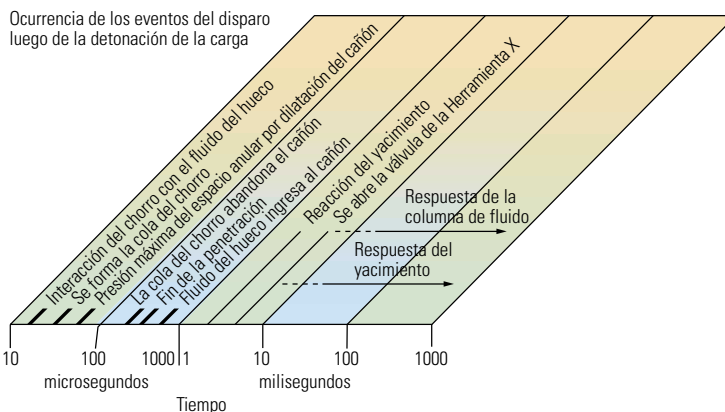
Espesor del daño alrededor del hueco, pulg	Índice de productividad, MMpc/D/100 lpc			
	Zona B (98,56 mD)		Zona C (20,3 mD)	
	5 dpp, carga A	12 dpp, carga X	5 dpp, carga A	12 dpp, carga X
2	no se aplica	no se aplica	0,796	0,897
4	4,91	4,99	0,646	0,711
6	4,38	4,40	0,573	0,619
8	4,03	3,71	0,526	0,527
10	3,68	3,12	no se aplica	no se aplica

realizaron simulaciones numéricas de productividad para cada capa a los efectos de determinar los parámetros óptimos respecto de la densidad de disparo, las condiciones de penetración y el desbalance (arriba) y se determinó una orientación aceptable para el cañón.

La adopción de las pautas corrientes con respecto al desbalance conducen al uso de grandes diferencias de presión en las zonas de alta resistencia y baja permeabilidad. Esto se tuvo en cuenta durante el estudio del campo Britannia en las pruebas de un solo disparo y en las pruebas de flujo realizadas sobre rocas del

yacimiento y rocas de afloramientos en el laboratorio de flujo avanzado en el SRC de Rosharon, Texas. Otro tema de preocupación es la producción potencial de arena provocada por el colapso de los disparos, lo que también fue considerado en los estudios de un solo disparo en los que se simularon los esfuerzos y las condiciones de fluencia del fondo.

Las pruebas de laboratorio confirmaron las predicciones teóricas en cuanto al desbalance y la estabilidad de los disparos. Los núcleos del yacimiento y de los afloramientos fueron agujereados utilizando las condiciones de fondo simuladas



▲ Tiempos en la secuencia de los eventos del disparo. Los sistemas de disparo actuales no se limitan a bajar y disparar las sargas de cañones. Con frecuencia, estos sistemas instalan los empacadores, comienzan las pruebas de presión, disparan más de un intervalo e inician las funciones de la herramienta de fondo; todo en una sola operación. Por ejemplo, los tiempos de la detonación de la carga, las vibraciones resultantes, la respuesta del yacimiento y las funciones de las herramientas se encuentran coordinadas para garantizar que los cañones caigan hasta el fondo del hueco.

< Optimización de las estrategias de disparo.

En el campo Britannia se tuvieron en cuenta las variaciones de litología en lugar de utilizar las propiedades promedio del yacimiento. La zona B presentaba mayor daño de formación a mayor profundidad comparada con la zona C. En la zona B se utilizó la carga A a razón de 5 dpp, arrojando un aumento de la productividad del 15 %. En la zona C se utilizó la carga X a razón de 12 dpp, lográndose un aumento de la productividad del 10%.

y el desbalance de presiones determinado a partir de las simulaciones. La estrategia de disparo para este campo fue seleccionada sobre la base de los resultados de este estudio. A partir del comportamiento del flujo en los núcleos del yacimiento agujereados se pudieron verificar las conclusiones previas acerca de la sensibilidad de la formación a los fluidos ácuos del hueco—salmuera—y se confirmó la estabilidad de los disparos bajo condiciones de limpieza y desbalance pronunciado. Con un desbalance de 1000 lpc [6,9 MPa] en las pruebas de las muestras de afloramientos se comprobó un bajo nivel de daño causado por el disparo. El análisis del comportamiento después de la completación indica un factor de daño entre bajo y negativo en 12 pozos. Este método permite determinar el mejor diseño de disparo para cada completación y, además, enfatiza la necesidad de estudiar el desbalance óptimo, especialmente en las formaciones de gas, para las mejores estrategias globales de completación.

Opciones de cañones y formas de transporte

Las cargas huecas están colocadas en cañones y se bajan hacia el fondo del pozo hasta alcanzar la profundidad correcta por medio de cables de acero, líneas de arrastre, tuberías de producción, sargas de perforación y tubería flexible. Existen dos categorías de cañones: los desechables y semidesechables y los sistemas recuperables entubados (próxima página). Los cañones del primer grupo, tales como los sistemas Enerjet y Pivot Gun, se utilizan en operaciones realizadas a través de las tuberías de producción y se bajan con cable de acero eléctricos y línea de arrastre. En este tipo de cañones, las cargas están expuestas a las condiciones del pozo y se deben encapsular en contenedores separados y resistentes a la presión. Una vez efectuado el disparo, los residuos de estos cañones descartables quedan en el pozo. Los sistemas recuperables entubados son bajados con cable de acero o línea de arrastre,

43. En junio de 1999 se disparó con éxito el cañón más largo hasta el momento (un HSD especial de diámetro variable) en el Pozo M-16 en el campo Wytch Farm de BP Amoco en el sur de Inglaterra. Esta sarga de cañones que marca un récord mundial tiene una longitud de 2616 m [8583 pies] desde el tope hasta el fondo y dispara con más de 25.000 cargas de penetración profunda CleanSHOT.

tuberías de producción o sartas de perforación operadas por equipos de perforación y reparación o unidades para entubar contra presión, o bien por tubería flexible con o sin línea eléctrica. En estos cañones, las cargas y la mayor parte de los detritos se encuentran contenidas dentro de transportadores huecos de acero que son recuperados, o liberados y abandonados en el fondo una vez completada la operación.

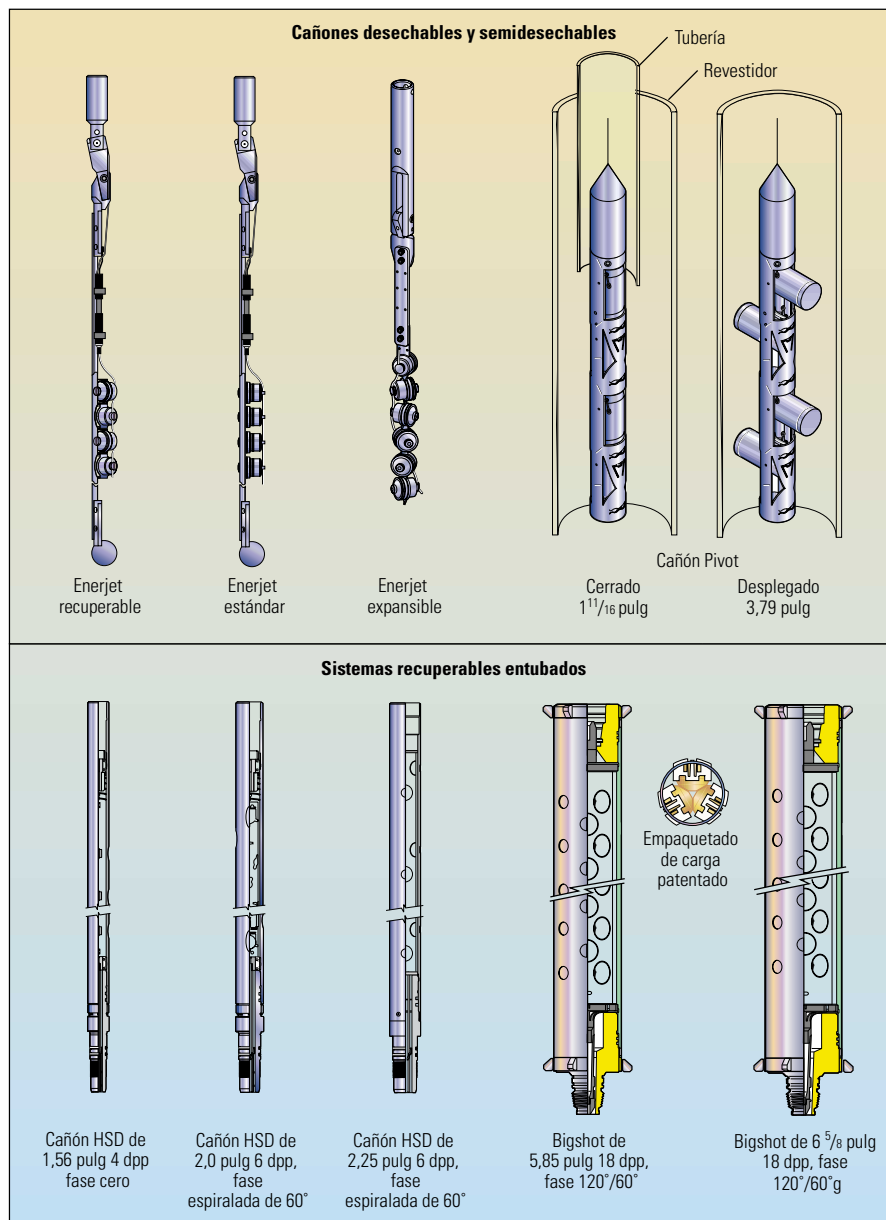
Los cañones que operan a través del revestidor y las tuberías de producción, tanto los cañones desechables/semidesechables como los sistemas recuperables entubados, se bajaban anteriormente con cable de acero, pero a principios de la década del 80 adquirieron gran popularidad los cañones de Alta Densidad de Disparo HSD bajados con la tubería de producción (TCP). El tamaño y la longitud de los cañones que

operan a través de las tuberías o del revestidor y los cañones HSD se encuentran limitados por el diseño de la completación del pozo y el equipamiento de superficie para el control de la presión. El uso de desbalance también está limitado cuando los cañones se corren con líneas eléctricas. Los cañones bajados con las tuberías de producción ofrecen una amplia variedad de opciones y permiten desbalance simultáneo para disparar en intervalos prolongados.⁴³

Hoy en día, la tecnología de disparo no se encuentra limitada a las operaciones tradicionales de bajar las pistolas o cañones y efectuar los disparos. Por el contrario, los sistemas de disparo constituyen una parte integral del equipo de completación del pozo y de las operaciones de completación diseñadas para realizar operaciones múltiples en las completaciones permanentes, como colocar empaques, realizar pruebas de presión, disparar uno o más intervalos e iniciar las funciones de las herramientas; todo ello en una única operación. Los tiempos de los eventos de disparo, como la detonación de las cargas, las vibraciones resultantes y la liberación del cañón, se utilizan para garantizar que los cañones TCP se liberen y caigan inclusive en los pozos muy desviados (página previa, abajo). Los cañones han sido liberados y desechados con éxito en pozos con desviaciones de hasta aproximadamente 84°.

Operaciones de fondo—La línea de Herramientas X (X-Tools) de completación y disparo han sido diseñadas para realizar funciones específicas como desenganche rápido y caída de las sartas de cañones una vez completado el disparo y la apertura de las válvulas. Estas incluyen: la herramienta WXAR, transportada con cable de acero o tubería flexible activada por explosión con desenganche automático, la herramienta SXAR, activada por explosión con desenganche automático, la herramienta MAXR de un solo diámetro, anclada con desenganche por explosión, la válvula de producción activada por explosión SXPV y la herramienta SXVA, con absorbente de vibraciones verticales y activada por explosión. Todas estas funciones se inician por medio de un explosivo que actúa en la misma cadena balística que los cañones. Estos dispositivos explosivos se activan después del disparo de los cañones, lo cual aumenta en gran medida la versatilidad de las operaciones de completación y disparo.

Longitud del cañón y disparo sin matar los pozos—Tanto el peso total de las sartas largas de cañones como el descenso y recuperación de los cañones bajo presión restringen las operaciones de disparo en las que se utilizan cables de acero, tuberías flexibles o tuberías de producción. Sin



▲ Tipos de cañones. Cañones desechables y semidesechables y sistemas recuperables entubados. A la derecha se observan algunos ejemplos. Los cañones desechables y semidesechables son bajados con cable de acero o línea de arrastre a través de las tuberías de producción. Las cuerdas detonantes se encuentran expuestas a las condiciones de fondo, de manera que las cargas se encapsulan en contenedores resistentes a la presión. Los cañones descartables que se bajan a través de la tubería de producción, generan residuos, los que permanecen en el pozo una vez terminada la operación. Los sistemas recuperables entubados, o cañones de revestidores, son bajados con cable de acero, tubería de producción o tubería flexible y se pueden diseñar de manera tal que retengan los residuos dentro del tubo transportador. La detonación ocurre dentro del tubo transportador bajo presión atmosférica.

embargo, estas limitaciones se superan utilizando los sistemas permanentes de completación y disparo (PCP, por sus siglas en Inglés).

El sistema de cañones apilables GunStack, también denominado CDAD (Conjunto de Fondo para Completaciones y Desconexión), permite ensamblar en el fondo varias secciones de cañones hasta cualquier longitud con o sin el uso de un equipo de perforación o terminación. Este equipamiento se puede bajar y recuperar con línea de arrastre, cable de acero eléctrico o tubería flexible y permite disparar con desbalance en intervalos prolongados en una sola carrera. Por otra parte, las secciones del cañón se pueden recuperar sin matar el pozo cuando resulte necesario, por lo cual este sistema se puede utilizar para disparar pozos sin interrumpir la producción. En combinación con las técnicas del tipo WXAR o MAXR, el sistema GunStack, o el CDAD, también permiten correr los cañones en secciones de acuerdo con la longitud disponible del lubricador y la capacidad de carga del método de transporte e instalación.

La primera sección del cañón se corre y se conecta a un ancla de fondo, tapón obturador o empacador colocado con cable de acero para un control preciso de la profundidad. La sarta de cañones también se puede asentar sobre el fondo del pozo. En esta configuración, la sarta no se encuentra anclada. Las secciones consecutivas se ensamblan y se conectan una encima de la otra hasta que se alcanza la longitud necesaria. Los cañones se pueden desconectar en cualquier momento en forma mecánica. Por otra parte, los conectores se desconectan automáticamente después de un retraso que se produce después de la detonación del cañón, lo cual impide que las secciones se muevan hacia arriba durante la detonación y suaviza la oleada inicial causada por el desbalance. Además, permite disparar los pozos con el máximo nivel de desbalance.

El sistema de Inserción de la Completación y Recuperación bajo Presión CIRP fue diseñado de manera tal que todo el proceso de ensamble de las sarts de cañones en la superficie, así como la introducción de los cañones en los pozos y la extracción y desarmado de los mismos se puedan realizar sin matar los pozos. El sistema CIRP permite bajar una sarta larga de cañones en los pozos bajo presión utilizando cable de acero o tubería flexible, por lo cual se puede disparar la totalidad de un intervalo en una sola operación y con un desbalance apropiado. Al poder recuperar y desarmar los cañones bajo presión ya no hay necesidad de aumentar la profundidad final del pozo para alojar los cañones desechados ni de matar los pozos después del disparo. El sistema CIRP se utiliza con cañones de 2 a 4,5 pulgadas

Bajo ciertas condiciones, es necesario un alto nivel de desbalance para limpiar los disparos y generar el flujo posterior al disparo. Cuando los cañones se bajan con cable de acero, esto es posible sólo si se anclan los cañones durante los disparos para impedir que los cañones asciendan a causa del impacto.

de diámetro. Se han corrido cañones de 610 m [2000 pies] de largo con un máximo de 60 conectores.

La Válvula de Aislamiento de la Formación FIV, integrada dentro del diseño de completación permanente, permite bajar en los pozos sarts de cañones de gran longitud sin necesidad de controlar la sobrepresión hidrostática. Se trata de una válvula de completación de diámetro pleno, que normalmente se corre por debajo de un empacador permanente, y actúa como una válvula lubricadora en el fondo del pozo que aísla los intervalos agujereados de la columna de producción que se encuentra encima. La longitud del cañón por bajada está limitada sólo por las restricciones de la carga admitida por el método de transporte utilizado.

Una vez terminada la operación de disparo, los cañones se levantan por encima de la herramienta FIV, que se cierra por medio de un mecanismo de cambio de posición que se encuentra al final de la sarta de cañones. La presión del pozo se alivia a través de una válvula de purga y se recuperan los cañones. A continuación se abre la herramienta FIV para iniciar la producción, aplicando una secuencia predeterminada de ciclos de presión. La herramienta FIV se puede abrir y cerrar un número infinito de veces con un mecanismo de cambio de posición. Este sistema de válvula fue desarrollado para el campo Andrew de BP Amoco ubicado en el Mar del Norte.⁴⁴

A partir del éxito de la herramienta FIV se diseñó la válvula de aislamiento al tope de la cañería corta (LTIV, por sus siglas en Inglés), que opera bajo los mismos principios. La LTIV es una válvula esférica de pleno diámetro que aísla las formaciones de los fluidos de completación una vez que una zona ha sido completada con una tubería corta no cementada. La herramienta LTIV se corre directamente por debajo del empacador del colgador de la tubería corta y se puede abrir y cerrar tantas veces como sea necesario. Una vez que la válvula esférica está cerrada, la formación queda aislada del fluido de completación hasta que el pozo se encuentra listo para iniciar la producción. La válvula mantiene la presión existente por encima y por debajo, lo cual la hace adecuada para su uso como barrera a largo plazo.

Pozos muy desviados—En los pozos muy desviados y en los pozos horizontales, puede ocurrir que el cable de acero no permita el descenso de los cañones si no se utiliza un mecanismo de arrastre. En estos casos es preferible utilizar tubería flexible, a menos que una sección horizontal sea tan larga que se atasque la tubería flexible y se produzca una flexión helicoidal antes de alcanzar el intervalo que se debe disparar. Los mecanismos de arrastre también se han utilizado con éxito para extender el alcance máximo de la tubería flexible. En muchos de los pozos sumamente desviados o de alcance extendido que se perforan hoy en día, es probable que los sistemas TCP o PCP representen las mejores opciones para el disparo.

Si se debiera ejercer una fuerza mecánica para jalar o empujar un sistema de cañones, el sistema TCP, las unidades para entubar contra presión, la tubería flexible y los mecanismos de arrastre ofrecen mayor versatilidad que los cables de acero eléctricos y las líneas de arrastre. En el caso de las sarts de cañones largas como las que se utilizan en los pozos horizontales, se debe tener en cuenta la resistencia a la tracción en el diseño de las mismas. Se han utilizado con todo éxito adaptadores de gran resistencia y sarts de cañones de diámetro variable. Por otra parte, también se debe simular y tener en cuenta la flexión de los cañones.

La tecnología de bajada de los cañones ha evolucionado desde los primeros cañones bajados con líneas eléctricas y con la tubería de producción o la sarta de perforación y, en la actualidad, incluye las tuberías flexibles, con o sin línea eléctrica, las unidades para entubar contra presión, las líneas de arrastre y los mecanismos de arrastre de fondo operados con cable de acero y tuberías flexibles. Cada método de transporte tiene sus ventajas y desventajas relacionadas con la realización de las operaciones en el fondo, la longitud de los cañones y el control de la presión, la posibilidad de disparar sin matar los pozos, la resistencia mecánica y el ángulo del hueco, la correlación de la profundidad, las intervenciones sin equipo de perforación/terminación y el tipo de cañón utilizado. Para optimizar el diseño de los disparos, se

deben ponderar todas las ventajas y desventajas correspondientes a los sistemas de cañones que se consideran adecuados para cada completación específica (derecha). Otras consideraciones incluyen el desbalance de presión y la duración de las operaciones.

Desbalance—Las opciones de disparo con desbalance han llegado a un alto nivel de sofisticación como resultado del hardware disponible para los sistemas TCP y PCP y los dispositivos de anclaje operados por cable de acero. Cualquiera sea el método utilizado, por lo general es posible disparar con el desbalance suficiente. Las excepciones prácticas en las que no se puede alcanzar el nivel óptimo de desbalance son los yacimientos agotados, los pozos poco profundos o los pozos con disparos abiertos existentes.

Bajo ciertas condiciones, es necesario un alto nivel de desbalance para limpiar los disparos y generar el flujo posterior al disparo. Cuando los cañones se bajan con cable de acero, esto es posible sólo si se utilizan los dispositivos de anclaje durante los disparos para impedir que los cañones asciendan a causa del impacto. Estos dispositivos de anclaje también se recomiendan cuando no se conoce el nivel de desbalance y los cañones se encuentran expuestos a un ingreso súbito del fluido, como por ejemplo, cuando se disparan nuevos intervalos en formaciones con intervalos productores que presentan niveles diferentes de agotamiento.

La herramienta de disparo con anclaje operada por cable de acero (WPAT, por sus siglas en Inglés) fue desarrollada para anclar los cañones en pozos de pequeño diámetro con completaciones de un solo diámetro y para impedir que los cañones se movieran después de la detonación. El dispositivo WPAT, que ahora se encuentra disponible en dos tamaños (uno para cañones de 2 pulgadas de diámetro para tuberías de 2 7/8 pulgadas y el otro para cañones de 2 1/4 ó 2 1/2 pulgadas para completaciones de 3 1/2 pulgadas), contrarresta potencialmente las grandes fuerzas generadas por los fluidos que pueden impulsar los cañones hacia arriba con consecuencias desastrosas.

La aplicación principal del dispositivo WPAT es disparar con un desbalance extremadamente alto y, además, proteger los puntos débiles del cable cuando se alcanza un alto esfuerzo a la tracción.

La herramienta cuenta con mecanismos positivos de anclaje y desenganche. Las cuñas mecánicas están diseñadas para no causar daños y, si los cañones quedan aprisionados después de la operación, pueden recuperarse accionando los percutores hacia arriba.

Un orificio calibrado que mide el petróleo a una tasa específica provee el período de espera, que se puede fijar hasta un máximo de una hora;

	Yacimiento				Economía				Técnica				
	Remover cañones sin controlar (matar) el pozo	Rápida remoción del cañón para producir el injiljo de todos los disparos	Optima limpieza del disparo	Disparo de la zona de interés con desbalance en un solo viaje	Nunca cerrar el pozo	Pozos altamente desviados	Redisparar sin matar el pozo	Redisparar durante la producción	No se requiere cámara de fondo	Nuevo pozo	Mejor tamaño de perforación/terminación para disparar	Pozos horizontales	Reparaciones
✓													
✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓ ¹	✓				✓
✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓ ¹	✓ ²	✓	✓		
✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓
✓		✓ ³	✓					✓ ¹	✓				
✓		✓ ³	✓					✓	✓				✓
✓		✓ ³	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
✓	✓	✓ ³	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ Ventaja
 (✓) Limitaciones

¹ Se requiere equipo de perforación/terminación para la instalación, pero no para el disparo
² Mejores resultados en completaciones de pequeño diámetro
³ Los cañones se hallan en sitio y dificultan la limpieza
⁴ Requiere un transportador de cañones apropiado

^ Opciones de sistemas de transporte de los cañones. Para optimizar las operaciones de disparo, se deben ponderar las ventajas, desventajas y limitaciones de todos los sistemas de cañones considerados para cada completación específica. Esta tabla enumera los beneficios económicos, técnicos y prácticos de los equipos que se utilizan para disparar sin necesidad de matar el pozo.

tiempo suficiente para establecer un desbalance, disparar y conducir una prueba de fluencia. La herramienta se libera en forma automática una vez transcurrido el tiempo programado. Además, se puede configurar en dos formas: una opera sobre la presión del pozo y la otra, para un hueco seco, opera sobre la presión suministrada por una botella de gas que forma parte del sistema.

Duración de las operaciones—La duración de las operaciones varía en cada pozo. Si los intervalos son verticales y cortos—menos de 12 m [40 pies]—y están agujereados en condiciones de balance o de sobrepresión, por lo general el disparo operado por cable de acero se puede realizar en cuestión de horas y puede resultar el método más eficiente. Si el intervalo es más largo o tiene varias secciones, las operaciones mediante cable de acero requieren más de un viaje, lo cual impide el uso del desbalance durante las corridas subsiguientes de los cañones. A medida que aumenta la desviación del pozo, el tiempo de operación también aumenta, especialmente si el peso de la sarta de cañones es bajo y se utiliza un

equipo de control de la presión instalado en la superficie. Cuando la desviación del pozo supera los 65°, se deben utilizar otros métodos de transporte como el TCP y el PCP que requieren un tiempo de operación más prolongado. Si los intervalos fueran mucho más largos, la duración total de TCP es más corta que las operaciones efectuadas con cable de acero y la totalidad del intervalo se puede disparar con desbalance para lograr una óptima limpieza de los disparos.

44. Patel D, Kusaka, Mason J y Gomersall S: "The Development and Application of the Formation Isolation Valve," presentado en la Conferencia y Exhibición Mediterránea de Operaciones Marinas, Ravenna, Italia, Marzo 19-21, 1997.
 Kusaka K, Patel D, Gomersall S, Mason J y Doughty P: "Underbalance Perforation in Long Horizontal Well in the Andrew Field," artículo de la OTC 8532, presentado en la OTC, Houston, Texas, EE.UU., Mayo 5-6, 1997.
 Mason J y Gomersall D: "Andrew/Cyrus Horizontal Well Completions," artículo de la SPE 38183, presentado en la Conferencia Europea sobre Daño de la Formación, La Haya, Holanda, Junio 2-3, 1997.

Seguridad

En los cañones se utilizan dos tipos de detonadores: detonadores eléctricos, o cascos explosivos, y detonadores a percusión. Los detonadores eléctricos convencionales están expuestos a aplicaciones accidentales de energía a partir de diferencias del potencial eléctrico (EPD, por sus siglas en Inglés), lo cual constituye un peligro. Los detonadores a percusión que se utilizan en los sistemas TCP se disparan en forma mecánica cuando una clavija de disparo golpea una membrana sellada a presión y detona un explosivo primario.

El Equipo de Disparo Activado por Impacto S.A.F.E. fue desarrollado para ser inmune a todas las diferencias de potencial creadas por las radiofrecuencias, las corrientes de los sistemas de protección catódica a la corrosión, las soldaduras eléctricas, las líneas de energía de alta tensión y los motores de inducción como los utilizados en sistemas 'topdrive' de los equipos de perforación. Este sistema elimina la necesidad de suspender las

comunicaciones radiales vitales y los equipos durante el desarrollo de las operaciones de disparo.⁴⁵

En el sistema S.A.F.E. el mecanismo de detonación es un Activador de Explosión (EFI, por sus siglas en Inglés) en lugar de un explosivo primario. Para disparar un cañón, se carga un capacitor que se encuentra en el cartucho electrónico de fondo y que luego produce una descarga en forma abrupta. El calor generado por esta descarga vaporiza una sección del disco delgado de metal, el cual golpea una carga explosiva adyacente pre-formada con la energía suficiente para hacerla detonar. Esta detonación corta un pequeño disco de aluminio que impacta un detonador que hace disparar el cañón. El equipo S.A.F.E. presenta la gran ventaja de que el ensamble al pie del pozo es más rápido que en el caso de los detonadores eléctricos convencionales. Las desventajas son el costo y el tamaño, ya que quita espacio al lubricador.

El detonador Secure es un dispositivo del tipo S.A.F.E. de tercera generación que también utiliza

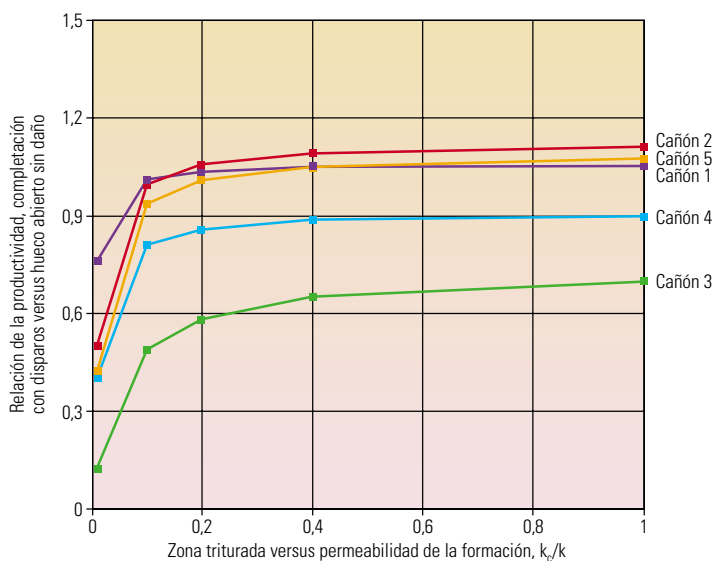
un EFI, ya que no contiene explosivos primarios ni un cartucho electrónico en el fondo. Un microcircuito realiza las mismas funciones que el cartucho electrónico y el EFI juntos, en un empaque cuyo tamaño es similar al del detonador eléctrico convencional. El sistema Secure tiene todas las ventajas técnicas de los detonadores S.A.F.E., pero resulta más confiable, es totalmente descartable y es más pequeño, de manera que las sartas de cañones pueden ser más cortas.

Diseño y análisis de las operaciones de disparo

Para diseñar las completaciones con disparos se puede utilizar el software de Análisis de Operaciones de Disparo de Schlumberger SPAN, que predice la eficiencia de la operación de disparo bajo condiciones de fondo.⁴⁶ El programa combina módulos que estiman la penetración en el fondo, calculan la productividad y determinan el nivel óptimo de desbalance. En el primer módulo, se estiman la profundidad de la penetración y el tamaño del hueco, que se utilizan en el segundo módulo para calcular la productividad del pozo. En el tercer módulo, se determina el desbalance óptimo para los disparos con factor de daño nulo, utilizando algoritmos para los criterios de desbalance aceptados corrientemente.⁴⁷ Cuando los cálculos no se pueden realizar mediante el uso de algoritmos, como en el caso de la corrección de la penetración de pruebas de superficie por los efectos ambientales en sitio tales como la resistencia de la roca y los esfuerzos de la formación, se utiliza una extensa base de datos que incluye el rendimiento de los disparos sobre núcleos o muestras de arenisca Berea, datos API y resultados de otras pruebas.

En el modo de diseño, este software permite seleccionar los sistemas de cañones sobre la base de los parámetros específicos del pozo: la geometría de la completación, los fluidos en el pozo y el desbalance seleccionado (izquierda). Cuando el desbalance real es menor que el mínimo exigido para lograr un daño nulo, se calcula el factor de daño del disparo provocado por el daño residual para estimar la reducción de la productividad.

El programa SPAN también se puede utilizar para analizar la producción después que los pozos han sido completados o recompletados. Si los datos de producción real coinciden con los cálculos del programa SPAN, la completación con disparos se considera exitosa. Cuando no se alcanzan los objetivos de producción, es necesario determinar las razones, que pueden ser la invasión profunda de la formación, la remoción incompleta del daño, o bien haber partido de



Cañón	Descripción	Fase	dpp
1	4 1/2 pulg HSD UltraJet	135°	12
2	4 1/2 pulg HSD PowerJet	72°	5
3	1 11/16 pulg Enerjet	0°	4
4	2 7/8 pulg Power Enerjet	0°	6
5	4 1/2 pulg HSD UltraJet	72°	5

Relación de anisotropía: 10
Espesor de la zona dañada: 4 pulg

Relación de la zona dañada versus permeabilidad de la formación, k_d/k : 0,5
Espesor de la zona triturada: 1 pulg

SPAN Versión 6.0
© Copyright 1999 Schlumberger

^ Diseño y análisis de las operaciones de disparo. El programa de Análisis de Operaciones de Disparo de Schlumberger SPAN se utiliza para pronosticar la eficiencia de las completaciones y seleccionar el mejor sistema de cañones. Los cálculos de desbalance se basan en los criterios más modernos. Si el diferencial real de presión es menor que el desbalance mínimo para alcanzar el daño nulo, se calcula el factor de daño provocado por el daño residual para mostrar la reducción de la productividad. En este caso la productividad se calcula para cinco tipos de cañones con varias densidades de disparo y distintos ángulos de fase.

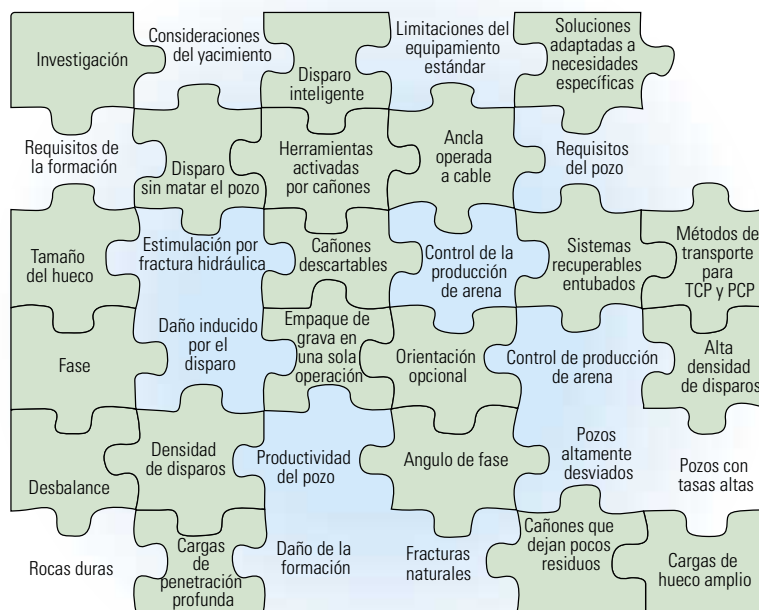
suposiciones incorrectas. Por otra parte, como el programa SPAN también incorpora aspectos geológicos, resulta útil para integrar las descripciones del yacimiento en el diseño de las operaciones de disparo.⁴⁸

Disparo inteligente

Todos los pozos revestidos deben tener orificios para poder producir hidrocarburos, pero las distintas combinaciones de yacimientos y completaciones tienen diferentes exigencias al respecto. Debido a que el disparo es un elemento tan crítico para la productividad del pozo, los requerimientos de cada pozo deberían ser optimizados sobre la base de las propiedades específicas de la formación. El mejor modo de alcanzar esto es comprender de qué manera responden los yacimientos a las completaciones naturales, estimuladas y las completaciones específicas para el manejo de la arena. Los factores que se deben tomar en cuenta son: la resistencia a la compresión y los esfuerzos de la formación, la presión y la temperatura del yacimiento, el espesor y la litología de la zona, la porosidad, la permeabilidad, la anisotropía, el daño y el tipo de fluido (gas o petróleo).

Las formaciones duras, de alta resistencia, y los yacimientos dañados por los fluidos de perforación son los que más se benefician de los disparos de penetración profunda que atraviesan el daño de la formación y aumentan el radio efectivo del hueco. Los yacimientos de baja permeabilidad, que necesitan estimulación por fracturación hidráulica para producir en forma económica, requieren disparos espaciados y orientados correctamente. Las formaciones no consolidadas que pueden producir arena necesitan orificios grandes, que permiten reducir la caída de presión y se pueden empacar con grava para mantener las partículas de la formación fuera del disparo y del hueco. Los disparos también se pueden diseñar a fin de prevenir la falla del túnel y de la formación provocados por la producción de arena.

En el pasado, el hecho de integrar las consideraciones relativas a la formación y a los disparos, incluyendo el desbalance, constituía una excepción y no una regla. Si bien se disponía de la teoría y del software necesarios para analizar el comportamiento de los disparos, las decisiones relativas a las completaciones casi siempre se basaban en las propiedades promedio de la formación o en las limitaciones de los disparos no relacionadas con la productividad. Hoy en día, en cambio, la actitud predominante consiste en pensar en términos de lo que es más conveniente para el yacimiento. Los operadores consideran las necesidades de desarrollo de cada campo en



^ Organización de las piezas del rompecabezas. Las diversas opciones de disparo y una gran variedad de factores relativos a la completación del pozo aumentan en forma exponencial el número de decisiones que se deben tomar antes de comenzar la operación de disparo. Un enfoque de sistemas de disparo inteligente permite a los operadores obtener mayores beneficios a partir de las soluciones de disparo disponibles para superar los dilemas técnicos relacionados con las completaciones con disparos.

particular y luego seleccionan las mejores técnicas de completación y el hardware disponibles.

Ahora bien, algunas veces los equipos estándares y los servicios convencionales no se ajustan a estas necesidades, por lo cual es preciso desarrollar nuevas herramientas, procedimientos y servicios: cargas huecas, equipos de completación, alternativas de transporte y aplicaciones para condiciones de desbalance, sobrepresión o sobrepresión extrema. Como resultado de ello, buena parte de los recursos de ingeniería y de investigación de Schlumberger están dedicados al desarrollo de soluciones especiales. Muchos de estos nuevos desarrollos terminan por convertirse en productos y servicios estándares que amplían el rango de opciones disponibles para los operadores. Los mejores diseños se basan en las exigencias específicas de los pozos con el fin de optimizar la producción. Este enfoque de sistemas globales—denominado disparo inteligente—pone énfasis en las técnicas que maximizan la productividad del pozo y ayudan a los operadores a obtener los mayores beneficios a partir de las soluciones disponibles para superar los dilemas asociados con las completaciones con disparos de los pozos (arriba).

Al adaptar los diseños de los disparos a los yacimientos específicos, la tecnología de disparo se integra con la geología, la evaluación de las formaciones y las técnicas de completación para

determinar cuáles son los equipos, la carga hueca, el sistema de transporte, el método de instalación y las condiciones de presión más adecuadas para realizar operaciones de disparo eficientes y efectivas. Gracias a las simulaciones computarizadas utilizadas para comparar el comportamiento real con respecto a las expectativas del diseño, se podrán perfeccionar las herramientas y los métodos existentes para hacerlos más efectivos. El objetivo final consiste en diseñar soluciones específicas para maximizar la productividad de cada pozo. —MET

45. Huber KB y Pease JM: "Safe Perforating Unaffected by Radio and Electric Power," artículo de la SPE 20635, presentado en la Conferencia y Exhibición Anual No 65 de la SPE, Nueva Orleans, Luisiana, EE.UU., Septiembre 23-26, 1990.

Huber et al: "Method and Apparatus for Safe Transport Handling Arming and Firing of Perforating Guns Using a Bubble Activated Detonator," Patente de EE.UU., No. 5.088.413 (Febrero 18, 1992).

Lerche et al: "Firing System for a Perforating Gun Including an Exploding Foil Initiator and an Outer Housing for Conducting Wireline Current and EFI Current," Patente de EE.UU., No. 5.347.929 (Septiembre 20, 1994).

46. Carnegie A: "Application of Computer Models to Optimize Perforating Efficiency," artículo de la SPE 38042, presentado en la Conferencia de Petróleo y Gas del Pacífico y Asia de la SPE, Kuala Lumpur, Malasia, Abril 14-16, 1997.

47. Behrmann y Elbel, referencia 32.

48. de Araujo PF y Coelho de Souza Padilha TC: "Integrating Geology and Perforating," *World Oil* 218, no. 2 (Febrero de 1997): 128-131.