

Cómo salir de un aprieto

Durante más de 80 años, los martillos o tijeras de perforación fueron ampliamente aceptados en la industria petrolera como un seguro económico de bajo costo para ahorrar tiempo de equipo de perforación y proteger la sarta de perforación y el pozo contra daños potenciales en caso de atascamiento de la tubería. Los avances tecnológicos y la mejor comprensión de la dinámica de las operaciones de martilleo exitosas han extendido la aplicación de los martillos a los pozos horizontales y altamente desviados. No obstante, aún persisten ciertos desafíos para la utilización óptima de los martillos y tanto el arte como la ciencia de estas operaciones continúan evolucionando.

Bob Costo
Larry W. Cunningham
Glenn Joseph Martin
José Mercado
Brian Mohon
Liangjun Xie
Houston, Texas, EUA

Traducción del artículo publicado en *Oilfield Review* Primavera de 2012: 24, no. 1. Copyright © 2012 Schlumberger.

Por su colaboración en la preparación de este artículo, se agradece a Eric Wilshusen, Houston.

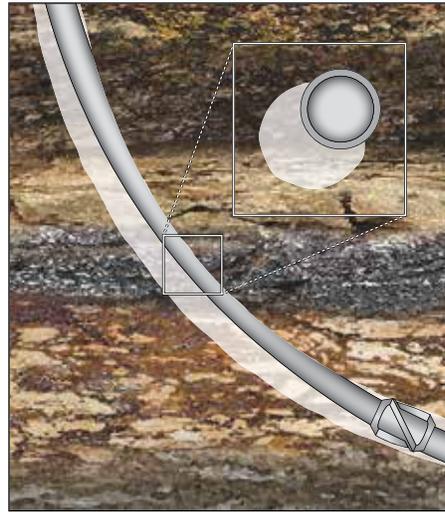
Accelerator AP, AP Impact, Hydra-Jar AP y Jar-Pact son marcas de Schlumberger.

1. Shivers RM III y Domangue RJ: "Operational Decision Making for Stuck-Pipe Incidents in the Gulf of Mexico: A Risk Economics Approach," *SPE Drilling & Completion* 8, no. 2 (Junio de 1993): 125–130.
2. Bradley WB, Jarman D, Plott RS, Wood RD, Schofield TR, Aufflick RA y Cocking D: "A Task Force Approach to Reducing Stuck Pipe Costs," artículo SPE/IADC 21999, presentado en la Conferencia de Perforación de las SPE/IADC, Ámsterdam, 11 al 14 de marzo de 1991.

Los martillos o tijeras de perforación cumplen una sola función: liberar la tubería atascada. La operación de martilleo es el proceso de transferencia dinámica de la energía de deformación almacenada en la sarta de perforación a un dispositivo —un martillo— que concentra la energía cinética en el punto en el que se encuentra atascada la tubería. La mayoría de los operadores incluyen martillos en sus conjuntos de fondo (BHAs) de perforación, como precaución contra la probable

ocurrencia de un incidente de atascamiento de la tubería. Se estima que las sartsas de perforación se atascan en promedio una vez cada tres pozos perforados, lo que implica un costo de cientos de millones de dólares por año para los operadores.¹ Aproximadamente un 50% de los incidentes de atascamiento de las tuberías se produce durante las maniobras, un 20% durante los procesos de rectificación y manipulación de la tubería y un 10% durante la continuación de la perforación.²



Empaque**Enchavetamiento****Atascamiento por presión diferencial**

^ Mecanismos de atascamiento de la tubería. La tubería puede atascarse en el pozo sin posibilidad de moverse hacia arriba o hacia abajo ni rotar, por una diversidad de razones. El empaque (*izquierda*) puede producirse cuando una formación no consolidada —empacada levemente con poca o ninguna adherencia entre las partículas, cantos rodados pequeños o cantos rodados grandes— cae dentro del pozo. El fenómeno de empaque también puede producirse cuando los recortes de formación o los detritos se depositan alrededor del BHA. El enchavetamiento (*centro*) puede tener lugar cuando la sarta de perforación rota contra un solo punto de la pared del pozo, con lo cual se genera una canaleta u orificio de cerradura (*inserto*). Cuando la sarta de perforación se extrae del pozo, las uniones de la tubería o las secciones del BHA de mayor diámetro que la sarta de perforación no pueden desplazarse a través del enchavetamiento. En este caso, la sarta de perforación puede moverse hacia abajo o rotarse pero no puede desplazarse hacia arriba y, por consiguiente, se atasca en el pozo. El atascamiento por presión diferencial (*derecha*) puede ocurrir cuando una fuerza generada por la presión hidrostática del fluido de perforación en el pozo es mayor que la presión de poro de una formación permeable. Este sobre balance presiona la sarta de perforación contra el pozo y a menudo se inicia cuando la sarta se encuentra fija o se mueve muy lentamente y entra en contacto con una formación permeable o un revoque de filtración espeso.

Las operaciones de martilleo representan la última línea de defensa contra el tiempo no productivo, las onerosas operaciones de pesca y la desviación de la trayectoria o el abandono de los pozos. Si bien las compañías de E&P no escatiman esfuerzos para evitar los costos que resultan del atascamiento de las tuberías, los grupos de trabajo de perforación suelen desconocer los aspectos mecánicos y dinámicos de los martillos y no están entrenados en la optimización de las operaciones de martilleo. En consecuencia, los operadores no siempre extraen todo el valor de sus planes de contingencias y varios millones quedan expuestos a riesgos.

Las compañías de servicios se están asociando con los operadores para reducir de manera sustancial el riesgo operacional, el tiempo no productivo y el costo a través de la capacitación del personal del equipo de perforación y la estimulación del uso correcto y oportuno de los programas de análisis del posicionamiento de los martillos, que se han convertido en el componente preventivo de los planes de contingencias que involucran martillos de perforación. El conocimiento más exhaustivo de la geología y la geometría del pozo y del BHA, y la comprensión de las implicancias de la posición de los martillos, permitirán que los ingenieros de perforación diseñen BHAs que optimicen las tasas de penetración y la ubicación de los

pozos, al mismo tiempo que proporcionan una máxima protección contra los incidentes potenciales de fondo de pozo que socavan el desempeño de la perforación.

Este artículo examina las causas del atascamiento de las tuberías y los tipos de martillos disponibles, y analiza las fuerzas de transmisión de impactos y la importancia de planificar y analizar el posicionamiento de los martillos en la sarta de perforación. Algunos casos de estudio de Canadá, Omán y EUA demuestran las ventajas del éxito de las operaciones con martillos.

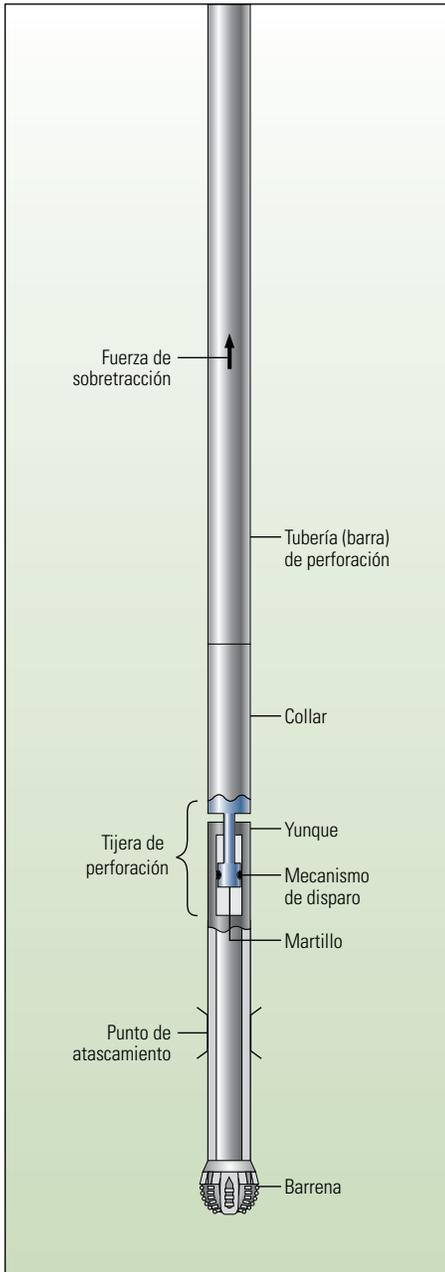
Los fundamentos del atascamiento de las tuberías

Cuando la fuerza estática necesaria para mover una sarta de perforación excede las capacidades del equipo de perforación o la resistencia a la tracción de la columna de perforación, la sarta se atasca. No puede moverse hacia arriba o hacia abajo ni rotar. La tubería puede atascarse durante la perforación, la ejecución de una conexión, la adquisición de registros o la realización de pruebas, o durante cualquier operación en la que el equipamiento se encuentre dentro del pozo. Existen dos tipos principales de atascamiento: mecánico y diferencial.

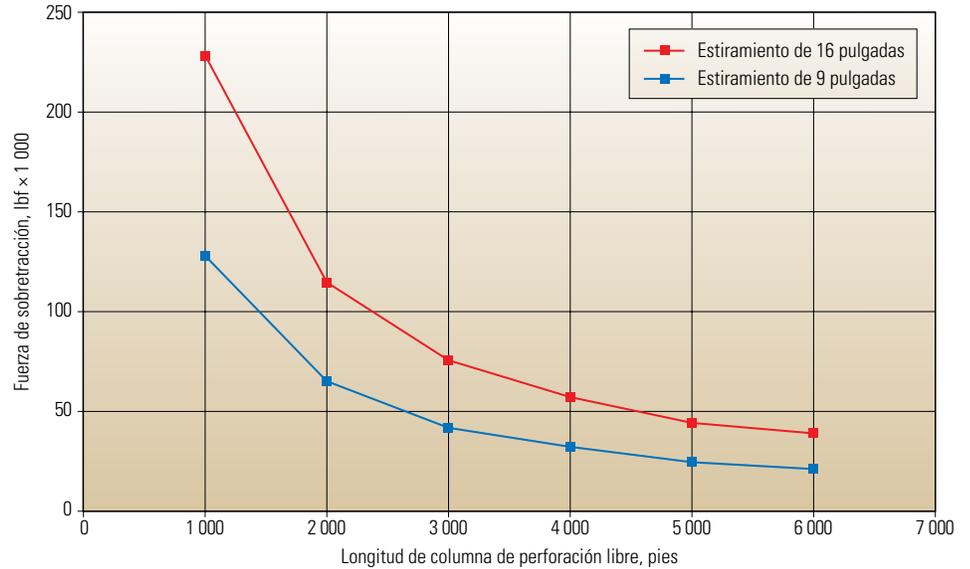
El atascamiento mecánico se observa generalmente mientras se desplaza la sarta de perforación y es causado por una obstrucción física o

una restricción. Tres mecanismos son responsables del atascamiento de las tuberías: empaque, puenteo e interferencia de la geometría del pozo (*arriba*). El empaque se produce cuando una formación no consolidada, los recortes de la formación o los detritos del pozo se depositan alrededor del BHA y rellenan el espacio anular existente entre la sarta de perforación y el pozo. Habitualmente, tiene lugar cuando las bombas de lodo han estado desconectadas por un período prolongado durante operaciones tales como los viajes de salida del pozo. El taponamiento ocurre cuando trozos medianos a grandes de formación, cemento o desechos caen en el pozo y obstruyen el espacio anular.

La interferencia de la geometría del pozo puede tener lugar cuando la forma o el tamaño del pozo y del BHA son incompatibles. A menudo, la interferencia es causada por el atascamiento en un enchavetamiento o torcedura del pozo cuando éste se desvía de la vertical. Un enchavetamiento es una canaleta o surco generado en la formación, donde pueden atascarse los componentes de la sarta de perforación de diámetro más grande, tales como las conexiones de los collares y el BHA. Otras de las causas de la interferencia son la existencia de un pozo de menor calibre, un arreglo de perforación rígido, la presencia de formaciones móviles, resaltos, patas de perro y las fallas de la tubería de revestimiento.



^ Arreglo de martilleo. Un arreglo típico de martilleo consiste en un mandril, o martillo, que se desliza dentro de una camisa, o yunque, y un mecanismo de disparo. El mecanismo de disparo restringe el movimiento del mandril poco antes de liberarlo. El retardo de tiempo permite que la columna de perforación almacene energía potencial. La liberación repentina del mecanismo de disparo hace que el mandril se acelere rápidamente a lo largo de una distancia de entre 25 y 50 cm [10 y 20 pulgadas] hasta que golpea contra la camisa o yunque, con lo cual libera la energía almacenada e imparte una fuerza de impacto en el punto de atascamiento. El movimiento ascendente del mandril hace que el martillo golpee el yunque, lo que ejerce una fuerza ascendente sobre la sarta de perforación. El movimiento descendente del mandril produce el efecto opuesto.



^ Obtención de la energía de deformación. La energía disponible para el martillo proviene de la fuerza de sobretracción aplicada en la superficie para estirar la columna de perforación. El tipo y la longitud de la columna de perforación inciden en la magnitud de su estiramiento y en la energía que puede almacenar. Esta gráfica correspondiente a una columna de perforación de 19,5 lbm/pie y 5 pulgadas compara dos longitudes de estiramiento obtenibles para las diferentes fuerzas de sobretracción aplicadas como una función de la longitud de la columna de perforación libre por encima del punto de atascamiento. Para un estiramiento dado, la fuerza de sobretracción y por ende la energía disponible para la martilleo, disminuye con el incremento de la longitud de la columna de perforación libre.

El atascamiento por presión diferencial se produce cuando la tubería se encuentra fija o se mueve muy lentamente. Este fenómeno es causado por el sobre balance del fluido de perforación —cuando la presión hidrostática de la columna de lodo es mayor que la presión de poro de la formación permeable— que empuja la tubería haciéndola penetrar en la pared del pozo.³ Algunas de las condiciones agravantes son: altas presiones de sobre balance, un revoque de filtración espeso, fluidos de perforación de alta densidad y lodos con alto contenido de sólidos.

Cuando los ingenieros comprenden los mecanismos y las causas potenciales del atascamiento de las tuberías, están en condiciones de optimizar el posicionamiento de los martillos con suficiente anticipación, dentro del proceso de diseño, para maximizar la efectividad de la operación de martilleo. Los operadores que cuentan con este conocimiento también pueden seleccionar mejor las fuerzas de transmisión de impactos adecuadas, una vez que se atasca una sarta de perforación.

Cómo funcionan los martillos

Si bien los martillos de perforación se utilizan desde el siglo XIX, los martillos modernos recién aparecieron en la década de 1930. En el año 1931, los ingenieros diseñaron un martillo que constaba de un mandril telescópico sostenido en su posición mediante un

dispositivo de enganche mecánico. Las numerosas mejoras introducidas desde entonces en los martillos han permitido manejar las demandas generadas por los pozos cada vez más complejos.⁴

Los martillos de nuestros días consisten de un mandril que se desliza en el interior de una camisa y un gatillo disparador interno que retarda brevemente el movimiento del mandril antes de liberarlo.⁵ El mandril se conoce a menudo como martillo y la camisa como yunque. Esta nomenclatura ayuda a explicar cómo la energía se libera desde la sarta de perforación y se transfiere a la tubería atascada (izquierda).⁶

Los martillos funcionan según el principio de la energía potencial almacenada. La energía potencial disponible para el martillo proviene de los valores de sobretracción o asentamiento aplicados en la superficie.⁷ Los martillos pueden impartir golpes, o activarse, hacia arriba, hacia abajo o en ambos sentidos, y se corren en la sarta de perforación en estado de tensión o compresión. Si se corren en estado de tensión, el mandril se encuentra completamente extendido. Si se corren en estado de compresión, el mandril se encuentra completamente cerrado. En cualquiera de las dos posiciones, el movimiento del mandril se impide hasta que es necesario iniciar el martilleo y los perforadores aplican tensión o compresión adicional a la sarta de perforación.⁸

Para activar un martillo hacia arriba, el perforador aplica una fuerza de sobretracción lentamente en el tope de la sarta mientras el BHA permanece fijo. El gatillo disparador del martillo restringe el movimiento del mandril por un lapso breve, lo cual hace que la columna de perforación se estire físicamente y almacene energía de deformación (página anterior, a la derecha). Esta fase, a menudo denominada fase de carga, dura habitualmente algunos segundos pero cuando la brigada de perforación utiliza martillos hidráulicos, que tienen tiempos de retardo largos, la fase de carga puede durar varios minutos.⁹

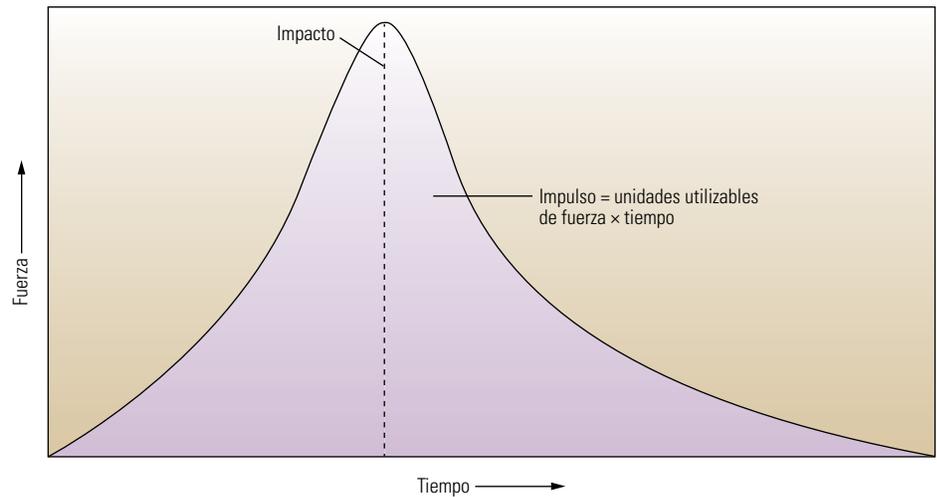
La fase siguiente, a veces denominada fase previa al impacto, comienza cuando el gatillo disparador se libera y culmina con el impacto del martillo. Esta fase dura generalmente entre 50 y 200 ms. El mandril se acelera y la energía almacenada en la sarta de perforación estirada es liberada súbitamente, lo cual pone en movimiento la masa de la columna de perforación y la masa del collar o de la tubería (barra) de perforación pesada (HWDP), que se encuentra directamente arriba del martillo. Estas masas cobran impulso durante el recorrido libre.

Cuando el movimiento se detiene, se imparte una carga de impacto, comparable a la de un martillo que golpea un yunque. El intervalo de tiempo de esta fase de impacto oscila en general entre 10 y 50 ms. El impacto genera una onda de choque que se propaga por la sarta de perforación en forma ascendente y descendente. Este proceso produce una liberación súbita de energía en el punto de atascamiento.

La fase posterior al impacto dura algunos segundos hasta que la sarta vuelve a un estado de reposo absoluto. Durante la fase siguiente, la fase de reposición, la sarta de perforación se baja hasta que su peso impone una fuerza de compresión sobre el martillo, que lo vuelve a poner en posición para el ciclo de martilleo siguiente.

Cuando el martilleo procede hacia abajo, en vez de la sobretracción aplicada en la columna de perforación, se libera el peso de la sarta de herramientas, con lo cual se imparte una fuerza de compresión en el punto de atascamiento en un intento para liberar la herramienta atascada llevándola hacia abajo. El proceso de martilleo se reitera — en ciertos casos cientos de veces — hasta que la herramienta atascada se libera o, si el martilleo resulta infructuoso, hasta que el operador decide adoptar un curso de acción diferente.

El martilleo genera dos magnitudes que se combinan para vencer la fuerza de atascamiento y mover la tubería atascada: el impacto y el impulso. La primera magnitud, el impacto, es la fuerza pico producida por la colisión del martillo con el yunque.



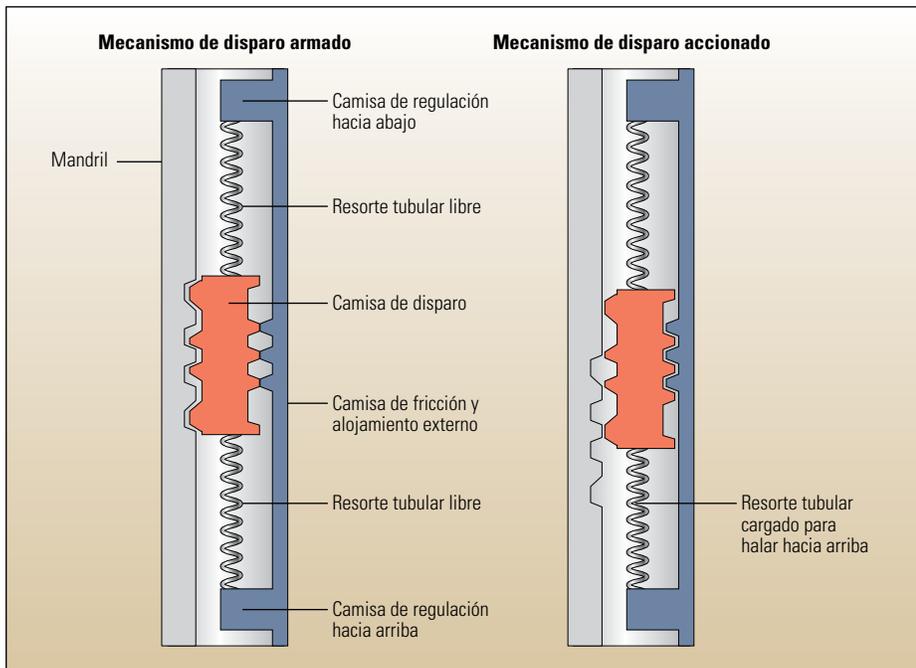
^ Impacto e impulso. Cuando los martillos se activan, el objetivo es generar una fuerza de impacto que supere la fuerza que produjo el atascamiento de la tubería. El impulso, con unidades de fuerza x tiempo, es la cantidad de movimiento, y debe ser suficiente como para mover la tubería. Tanto el impacto como el impulso son afectados principalmente por el número de portamechas situados por encima del martillo y por el posicionamiento de este último.

La segunda magnitud, el impulso, es el cambio producido en la cantidad de movimiento durante la fase de impacto medido por la curva del área debajo de la carga versus el tiempo (arriba). Tanto el impacto como el impulso son afectados principalmente por el número de portamechas (lastrabarrenas) existentes por encima del martillo; si el número de portamechas es menor, la fuerza de impacto es mayor, pero un número mayor de portamechas produce un impulso más grande. En las operaciones de martilleo exitosas, se logra una concesión mutua mediante el emplazamiento correcto del martillo y la regulación del número de portamechas para maximizar la forma en que las fuerzas de impacto e impulso operan en conjunto para liberar la tubería.

La magnitud del impacto generado por los martillos es limitada por la sobretracción o el peso de asentamiento disponible para liberar la tubería (slack-off). Un arreglo de martilleo correctamente diseñado usualmente ejerce más fuerza cuando se golpea hacia arriba que hacia abajo porque el perforador puede tirar de la columna de perforación con una fuerza equivalente al 90% del límite elástico de la tubería. Sin embargo, el peso de asentamiento disponible y la fuerza de compresión resultante son mucho menores que el peso total de la sarta de herramientas debido a las limitaciones que surgen de la flexión de la sarta de perforación por encima del martillo, la configuración de la longitud de los portamechas y la posición relativa de éstos y del martillo.¹⁰ El martilleo es más efectivo si se ejecuta en la dirección opuesta a la dirección en que se desplazaba la

columna de perforación en el momento de su atascamiento; es decir, el martilleo hacia arriba es más efectivo si el atascamiento se produjo durante la bajada de la sarta de perforación, en tanto que el martilleo hacia abajo es más efectivo si el atascamiento se produjo durante la extracción de la sarta.

3. Bowes C y Procter R: *1997 Drillers Stuck Pipe Handbook*. Houston: Schlumberger (1997): 13.
4. Clausen J, Rebellon J, Blanc J y Barton S: "Novel Drilling Technology Delivers a Step Change in Challenging Deepwater Operations," artículo SPE 142501, presentado en la Exhibición y Conferencia de Petróleo y Gas de Medio Oriente de la SPE, Manama, Bahreín, 25 al 28 de septiembre de 2011.
5. El gatillo disparador es un dispositivo que posiciona y sostiene una pieza mecánica en relación con otra, de modo que el dispositivo puede ser soltado cuando se aplica una fuerza en una de las piezas. Un ejemplo de gatillo disparador en un objeto común es el mecanismo de liberación de los paraguas.
6. Kalsi MS, Wang JK y Chandra U: "Transient Dynamic Analysis of the Drillstring Under Jarring Operations by the FEM," *SPE Drilling Engineering* 2, no. 1 (Marzo de 1987): 47–55.
7. Sobretracción es la cantidad de tracción ejercida en la tubería móvil que sobrepasa su peso en el aire o en un fluido. El peso de asentamiento, también conocido como peso de la sarta al bajar o peso de la sarta de perforación liberada, es el peso de la sarta de perforación y del BHA disponible en el punto de atascamiento o en el fondo del pozo si la tubería está libre.
8. Schmid JT Jr: "Designing BHAs for Better Drilling Jar Performance," *World Oil* 195, no. 5 (Octubre de 1982): 100–104.
9. Arrestad TV y Kyllingstad A: "Loads on Drillpipe During Jarring Operations," *SPE Drilling & Completion* 9, no. 4 (Diciembre de 1994): 271–275.
10. Newman KR y Procter R: "Analysis of Hook Load Forces During Jarring," artículo SPE/IADC 118435, presentado en la Conferencia y Exhibición de Perforación de la SPE/IADC, Amsterdam, 17 al 19 de marzo de 2009.



^ Martillo mecánico. Cuando el mecanismo de disparo de un martillo mecánico se encuentra armado (*izquierda*), los resortes tubulares sostienen la camisa de disparo contra el mandril, lo que impide la activación del martillo. Mediante la aplicación de una fuerza de tracción o de compresión que es inferior a la fuerza predeterminada del resorte tubular, el martillo puede bajarse en el pozo o extraerse de éste sin temor a que se dispare. Cuando la tensión aplicada es mayor que la fuerza predeterminada del resorte tubular, la camisa de disparo es forzada hacia arriba o hacia abajo, lo cual permite que el mandril se deslice libremente (*derecha*) y que se active el martillo.

La operación de martilleo puede verse afectada por dos fuerzas de resistencia. Una presión diferencial alta entre el interior y el exterior del martillo, que actúa sobre toda la sección transversal sellada del mandril, puede generar una fuerza suficiente para abrir el martillo y levantar la sarta de perforación. Esta fuerza se denomina fuerza de apertura del martillo o fuerza de extensión del martillo. Cuando se martilla hacia arriba, el operador debe sumar la fuerza de apertura a la sobretracción de superficie para obtener la tensión real en el martillo. Cuando se martilla hacia abajo durante la circulación, los perforadores deben liberar más peso en la superficie para superar la fuerza de apertura que actúa en la dirección opuesta.

La fuerza de apertura a veces puede asistir en las operaciones de martilleo hacia arriba. En los casos de arrastre o atascamiento por presión diferencial severo de la sarta de herramientas, la sobretracción no puede disparar un martillo mecánico o inducir un golpe suficientemente grande de un martillo hidráulico. A veces, un martillo puede ser activado mediante el incremento de la velocidad de la bomba de lodo, lo que incrementa la fuerza de bombeo, o mediante una combinación de incremento de la presión de lodo y aplicación de tensión en la sarta de perforación. El arrastre

de la sarta de perforación incrementa los requerimientos de sobretracción. En los pozos verticales, el arrastre puede ser insignificante, pero en los pozos direccionales a menudo incrementa hasta en un 10% la sobretracción requerida para activar el martillo.

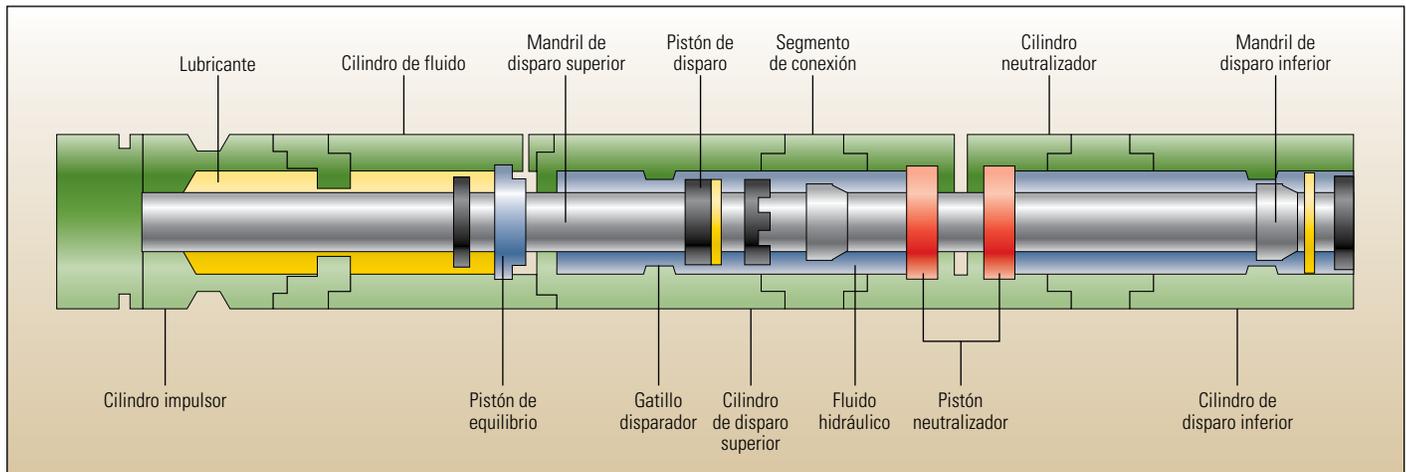
Tipos de martillos

Los martillos se clasifican por su función y por el método de accionamiento. Los martillos de perforación y de pesca poseen diseños similares y generan aproximadamente el mismo impacto, pero difieren en su construcción y cumplen funciones diferentes. Los martillos de perforación tienen la longitud de una barra de perforación estándar, son suficientemente duraderos para tolerar los esfuerzos de la perforación y se corren como componentes del BHA. Pueden ser activados y puestos en su condición inicial varias veces durante una sola operación de martilleo. Los martillos de pesca son más cortos que una barra de perforación estándar, no pueden tolerar las fuerzas de la perforación y sólo se corren después de que la tubería que se encuentra por encima del punto de atascamiento ha sido desconectada y extraída del pozo. Por lo general, están diseñados para martillar hacia arriba solamente.

Los martillos mecánicos e hidráulicos funcionan de un modo similar, pero difieren en sus mecanismos de disparo. Los martillos mecánicos son accionados mediante una serie de resortes, trabas y rodillos con mecanismos de liberación. Se disparan hacia arriba, con una fuerza de tracción predeterminada y hacia abajo con una fuerza de compresión predeterminada; estas fuerzas generalmente exceden las fuerzas de tracción o de compresión alcanzadas durante la perforación. La activación depende solamente de la carga, no del período de tiempo. Durante la perforación, el martillo mecánico se arma o bien se extiende hasta su posición completamente abierta o completamente comprimida (*izquierda*). Si bien aún se prefieren los martillos mecánicos para ciertas aplicaciones de nicho, incluidos los pozos de alta temperatura, muchos ingenieros están a favor de la tecnología de martillos hidráulicos para la mayoría de las aplicaciones.

Los martillos hidráulicos fueron introducidos en la década de 1940 para incrementar las cargas de impacto, las cuales están limitadas por los mecanismos de enganche de los martillos mecánicos. Por consiguiente, los martillos hidráulicos fueron diseñados para no dispararse con un valor umbral preseleccionado. Por el contrario, estos martillos funcionan utilizando un pistón que avanza a través de una restricción en un depósito de fluido hidráulico del mecanismo de disparo. Cuando se aplica tensión o compresión en la herramienta en la posición predeterminada, el fluido proveniente del lado de alta presión del depósito se comprime y pasa hacia el lado de baja presión a través de un orificio existente entre los depósitos. El orificio genera una restricción para el flujo de fluido, lo que produce un retardo que permite el almacenamiento de la energía potencial en la barra de perforación. La variación de la velocidad del fluido a través del orificio afecta la magnitud del impacto en el punto de atascamiento.

La carrera del dispositivo es la distancia total recorrida por el martillo hidráulico y el fluido.¹¹ Cuando la carrera alcanza una cierta distancia, el pistón se desplaza desde el área restrictiva hacia un área más grande, lo cual permite que el fluido comprimido fluya libremente a su alrededor. El martillo se dispara y la presión existente entre los dos lados se equaliza. La secuencia de tiempo y la fuerza con que se dispara el martillo determinan la magnitud de la tensión o la compresión aplicada.¹² El perforador incide en la sobretracción aplicada en el martillo, lo que a su vez afecta la tasa de flujo del fluido a través del orificio y la velocidad y la



^ Herramienta Hydra-Jar AP hidráulica de doble efecto. El cilindro impulsor consiste de una sección que hace posible la extensión axial libre y la retracción del mandril del martillo, a la vez que permite la transmisión del esfuerzo de torsión (torque) a través de la herramienta. El cilindro de fluido superior y el pistón de equilibrio mantienen un balance de presiones con la presión del pozo. El cilindro de disparo superior posee una restricción denominada gatillo disparador. Cuando se aplica sobretracción, el pistón de disparo es llevado hacia el gatillo disparador, regula el fluido hidráulico a través del pistón de disparo y permite que se acumule un estiramiento en la sarta de perforación. El pistón de disparo se desplaza lentamente a través del cilindro hasta que libera el gatillo disparador y dispara el martillo hacia arriba. El mandril y el cilindro de disparo inferior ejecutan las mismas funciones que sus contrapartes superiores, pero permiten el martilleo hacia abajo.

fuerza con que se dispara el martillo. La magnitud del impacto es proporcional a la sobretracción. Una mayor sobretracción produce una activación más rápida del martillo y un impacto más fuerte. Cualquier fuerza aplicada puede activar el martillo y los perforadores pueden variar la fuerza final impartida en el punto de atascamiento.

Expansión de los límites de los martillos hidráulicos

El avance de la exploración y el desarrollo de zonas de petróleo y gas hacia aguas más profundas, ambientes de fondo de pozo más hostiles y geometrías de pozos más complejos, ha generado una demanda de herramientas, incluidos los martillos, capaces de exhibir un desempeño confiable, eficiente y seguro ante la presencia de mayores esfuerzos en el fondo del pozo. Los fabricantes de martillos respondieron a esta situación con herramientas que muestran un desempeño confiable en una diversidad de ambientes de perforación: en tierra firme o en áreas marinas y en pozos verticales, horizontales o desviados, y de alta presión y alta temperatura (HPHT) o de aguas ultraprofundas.

Los martillos hidráulicos proporcionan ventajas operacionales y de desempeño significativas con respecto a los martillos mecánicos, pero presentan ciertas limitaciones. La fricción generada por la resistencia al flujo a través de la restricción durante la carrera de regulación eleva la temperatura del martillo. Cuando los martillos se recalientan, los operadores deben suspender el

martilleo hasta que el fluido hidráulico se enfría. Para minimizar los efectos del incremento de la temperatura, los ingenieros de Schlumberger desarrollaron el martillo de perforación hidráulico de doble efecto Hydra-Jar AP (arriba). Esta herramienta presenta un diseño único de compensación de la temperatura y está provista de sellos para alta temperatura.

Los martillos pueden ser corridos en compresión o en tensión, lo cual proporciona la flexibilidad necesaria para la optimización de su posicionamiento en la sarta de perforación. Por otro lado, dado que la herramienta trabaja sin la aplicación de esfuerzo de torsión (torque), la sarta de perforación no se hace rotar durante el martilleo por lo que la orientación de la herramienta de perforación direccional no se modifica. Para asegurar el desempeño efectivo y confiable del martillo de perforación Hydra-Jar AP en aplicaciones específicas, los ingenieros desarrollaron el software de ubicación de impactos del BHA Jar-Pact. Este software modela el posicionamiento del sistema de desempeño avanzado AP Impact. Mediante la utilización de los datos del plan de pozo del operador —incluidos los parámetros del pozo y del BHA— el software recomienda el posicionamiento óptimo de las herramientas para evitar su colocación en la zona de transición o el punto neutro de la sarta de perforación o cerca de éstos.¹³ Además, el software asegura que la relación entre el diámetro del pozo y el diámetro de la herramienta responda a las directrices recomendadas.

Si bien los operadores se esfuerzan para liberar las tuberías rápidamente y con el menor número posible de acciones de disparo, las experiencias vividas en un pozo del oeste de Canadá demuestran la resistencia y la repetibilidad de los martillos hidráulicos de avanzada. Apache Canadá incluyó una herramienta Hydra-Jar AP en la sarta de perforación de un pozo, como medida de prevención durante la perforación de la formación dolomítica-carbonatada Keg River, en Alberta, Canadá. Durante la perforación, la sarta se obtuvo con una acumulación de carbonato de calcio después de bombear varias píldoras para pérdidas de circulación destinadas a detener la pérdida de fluidos.¹⁴ Una combinación de rectificación e impactos provenientes de la herramienta Hydra-Jar AP ayudó a liberar la tubería atascada. El martillo se disparó más de 200 veces en siete horas sin pérdida de la fuerza de impacto. La tubería fue liberada y la perforación continuó hasta la profundidad total (TD) sin ninguna operación de pesca, minimizándose el tiempo perdido y el costo de equipo de perforación.

11. Adelung D, Askew W, Bernardini J, Campbell AT Jr, Chaffin M, Hensley R, Kirton B, Reese R y Sparling D: "Jars, Jarring and Jar Placement," *Oilfield Review* 3, no. 4 (Octubre de 1991): 52-61.
12. Adelung et al, referencia 11.
13. Una zona de transición es el área de la sarta de perforación situada entre el punto neutro y el estado de tensión o de compresión. La localización de la zona de transición varía a lo largo de todo el proceso de perforación.
14. Cook J, Growcock F, Guo Q, Hodder M y van Oort E: "Estabilización del pozo para prevenir pérdidas de circulación," *Oilfield Review* 23, no. 4 (Junio de 2012): 26-35.



^ Detención de las vibraciones. Cuando se activa un martillo, éste induce una onda inicial de vibraciones ascendentes y descendentes a lo largo de la sarta de perforación. La onda descendente se refleja hacia arriba desde el punto de atascamiento. Además de incrementar la eficiencia del martillo, un acelerador impide efectivamente que las ondas iniciales y las ondas reflejadas lleguen al piso de perforación ya que actúa como un desacople hidráulico dentro de la sarta de perforación.

Herramientas de aceleración de los martillos

Para que un martillo imparta un impacto máximo con cualquier carga dada, el mandril debe seguir acelerándose cuando impacta la camisa. Si se alcanza la velocidad terminal antes del impacto, el impacto del martillo será limitado. Dado que los portamechas han sido reemplazados por HWDP más livianas en muchos BHAs, sucede a menudo que el peso de trabajo ya no basta para generar suficientes niveles de impacto o impulso del martillo. La incorporación de un acelerador del martillo en el BHA amplifica significativamente el impacto y el impulso del martillo y refleja las ondas de choque hacia abajo, en dirección hacia el punto de atascamiento (izquierda). Además, remueve el esfuerzo de la sarta de perforación y del equipo de superficie y protege la unidad de mando superior contra el desgaste.

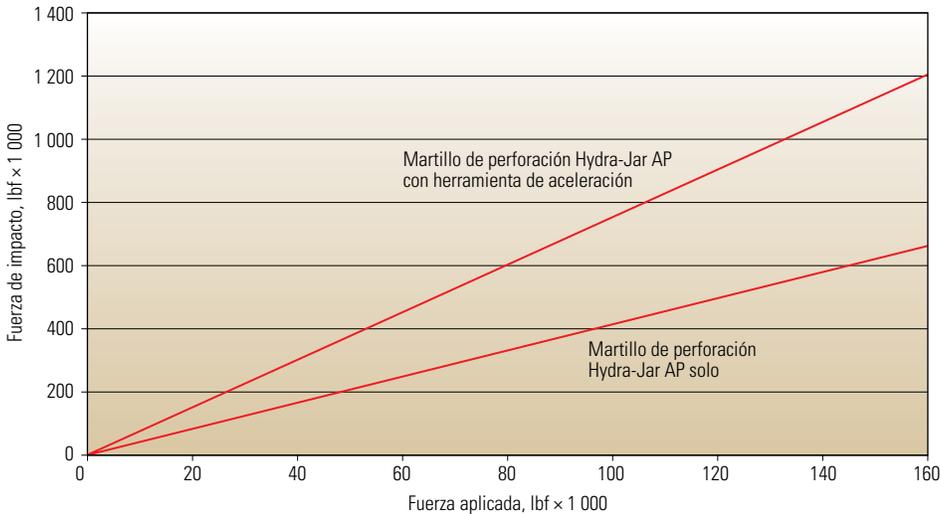
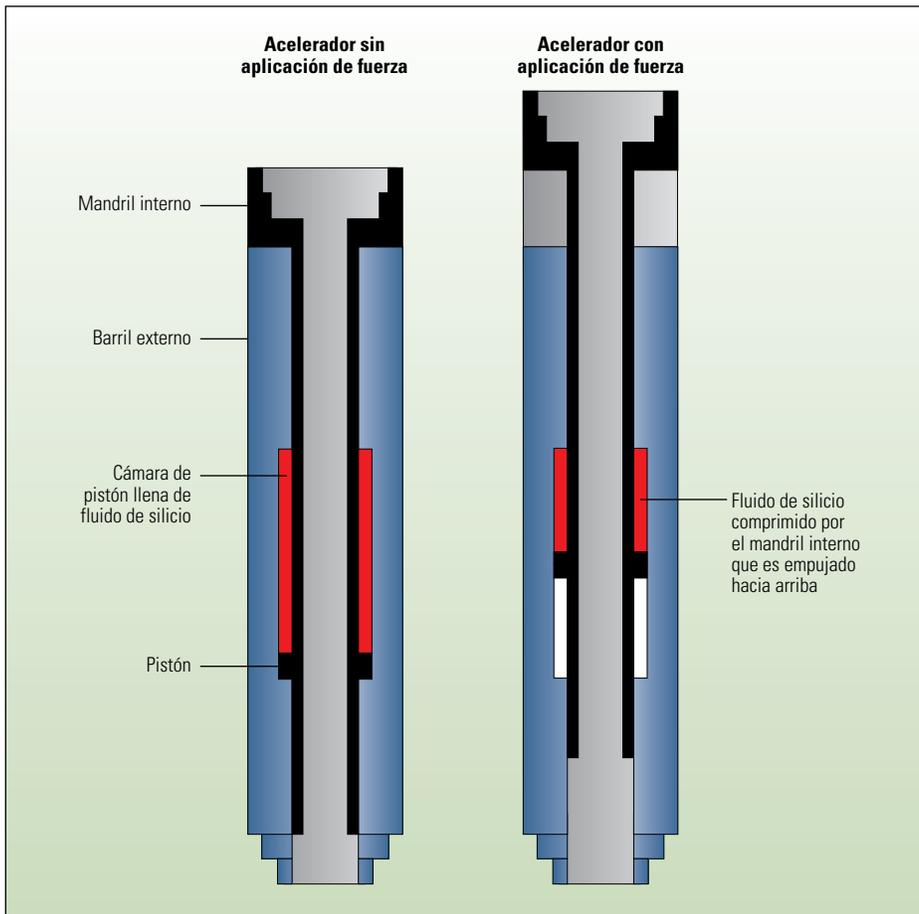
La herramienta de impacto Accelerator AP de Schlumberger constituye un ejemplo de un acelerador de martillo. Se trata de una herramienta de resorte compacta y con alta velocidad de carga que se coloca directamente arriba del martillo y de la masa de la HWDP. Cuando se aplica una carga en el sistema de impacto de una herramienta de aceleración de martillo, la carga comprime el fluido, el gas o el resorte que se encuentra en el interior de la herramienta de aceleración, almacenando así la energía potencial en la herramienta. El martillo y el acelerador se coordinan de modo que cuando el martillo se libera para el impacto, la energía potencial almacenada en el acelerador también es liberada. La energía potencial almacenada en el acelerador y luego liberada acelera la masa de trabajo por encima del martillo con mucha más eficiencia de la que lo hace la energía almacenada en la sarta de perforación porque elimina la fricción y el arrastre del pozo generados a lo largo de cientos de metros de columna de perforación. La utilización de la herramienta de aceleración permite duplicar efectivamente la fuerza de impacto de un martillo (próxima página).

A diferencia de la experiencia de Apache Canadá, los ingenieros de Arbj Energy Services experimentaron rápidamente el éxito de una operación con martillos mediante el uso de una herramienta de aceleración. En un pozo de Omán, la sarta de perforación se obturó y se atascó cuando fue levantada 16 m [53 pies] para efectuar una prueba de flujo después de perforar una sección vertical larga desde 957 m [3 140 pies] hasta la TD de 3 590 m [11 800 pies]. La circulación, la rotación y el movimiento ascendente y descendente se perdieron. Después de los primeros intentos para

liberar el BHA, el operador reemplazó un martillo de perforación y un intensificador defectuosos por las herramientas Hydra-Jar AP y Accelerator AP, y efectuó un análisis de posicionamiento Jar-Pact para optimizar los valores de los impactos y los impulsos en el punto de atascamiento.

Sobre la base de los resultados del análisis Jar-Pact, el BHA situado sobre el punto de atascamiento fue desenroscado a la altura de un portamechas por encima del estabilizador superior, a una profundidad de 3 536 m [11 601 pies] y la tubería se extrajo del pozo. Las herramientas Hydra-Jar AP y Accelerator AP fueron desplegadas como un arreglo de pesca, que se bajó en el pozo y se enganchó alrededor del BHA atascado. Si bien el plan inicial requería el martillo hacia abajo durante ocho horas y hacia arriba durante otras ocho horas, el BHA atascado comenzó a moverse después de tan sólo una hora de martilleo hacia abajo. Al cabo de seis horas, se había formado un bolsón de 14 m [46 pies], lo que permitió que el operador reanudara la circulación y la rotación del BHA. El éxito de la operación de martilleo generó para Arbj Energy Services un ahorro de más de USD 1,3 millones ya que se evitó una costosa desviación de la trayectoria del pozo.

Si bien se recomienda el uso de aceleradores para martillos en todo tipo de pozo, su empleo resulta particularmente ventajoso en pozos horizontales y de alto ángulo, en secciones salinas plásticas, áreas con una alta probabilidad de atascamiento por presión diferencial, pozos con un alto grado de arrastre de las sartsas y aplicaciones de martilleo hacia abajo. Las experiencias observadas en un pozo del oeste de Texas, en EUA, sirven para resaltar las ventajas de la previsión. Los ingenieros habían desplegado un martillo hidráulico de doble efecto Hydra-Jar AP y una herramienta Accelerator AP en la sarta de herramientas para reducir el daño potencial de la unidad de mando superior, resultante de las operaciones de martilleo, e incrementar la probabilidad de liberar con éxito la tubería que, en su opinión, podía atascarse durante la perforación de un pozo de 8½ pulgadas a través de la lutita Akota. Durante la ejecución de una conexión, la presencia de lutita hidratable produjo el atascamiento del BHA y el equipo de perforación no pudo circular el pozo. La operación de martilleo comenzó de inmediato. La energía almacenada en la herramienta de aceleración se sumó a la energía ya almacenada en la sarta de perforación, lo cual duplicó el impacto que hubiera sido posible en el punto de atascamiento sin un acelerador. No obstante, dado que se



^ Amplificación del impacto del martillo. La herramienta de aceleración consta de un barril externo y un mandril interno conectados por una cámara de pistón llena de fluido de silicio (*extremo superior izquierdo*). Cuando se aplica una fuerza a la herramienta de aceleración, el fluido de silicio es comprimido por el pistón móvil, lo cual almacena la energía de la tensión aplicada y proporciona un estiramiento extra a la sarta de perforación. Cuando la fuerza se libera, el fluido de silicio se expande y, como un resorte, desplaza al pistón de regreso a su posición original. Este movimiento amplifica tanto el impacto como el impulso final liberados (*extremo inferior*) por un martillo como resultado de la incorporación de la energía almacenada en el acelerador a la energía almacenada en la tubería.

trata de un componente telescópico, el acelerador absorbió la fuerza refractaria que, de lo contrario, habría sido enviada al equipo de superficie por la sarta de perforación. Con la combinación del martillo y el acelerador, la sarta de perforación fue liberada en 45 minutos sin que se produjeran daños en la unidad de mando superior. La perforación pudo proseguir y el operador previno una potencial operación de desviación de la trayectoria del pozo.

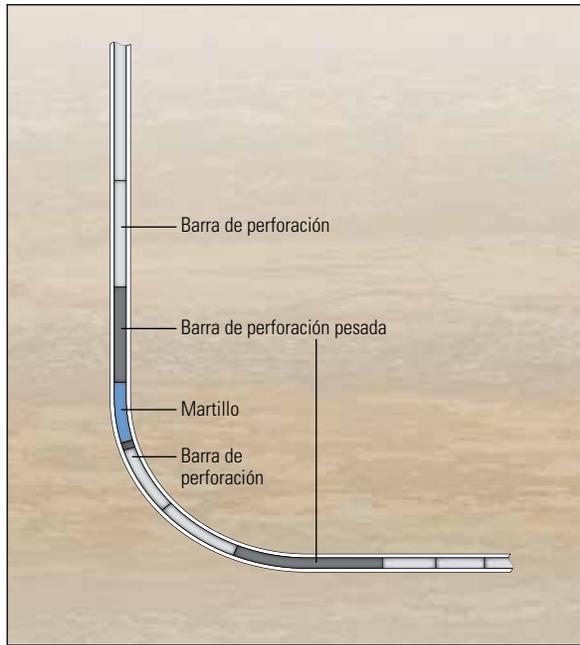
Pautas para el posicionamiento de los martillos

El diseño y el posicionamiento de los martillos son los factores determinantes más importantes para el éxito o el fracaso de una operación de martilleo. Sin embargo, desde su introducción, los métodos de despliegue de los martillos han dependido más de la experiencia y la práctica usual del perforador que del análisis de ingeniería; en parte porque los profesionales de la industria tienen un conocimiento insuficiente del diseño y la dinámica de los martillos. Dado que los martillos parecen sólidos, como los portamechas, los usuarios a menudo asumen que ambos tienen la misma resistencia. No obstante, a diferencia de los portamechas, el funcionamiento interno de los martillos es complejo y presenta numerosas conexiones y puntos débiles inherentes. Por otro lado, las roscas de las conexiones internas de los martillos no son tan resistentes como las roscas API utilizadas para conectar los tramos de la columna de perforación.

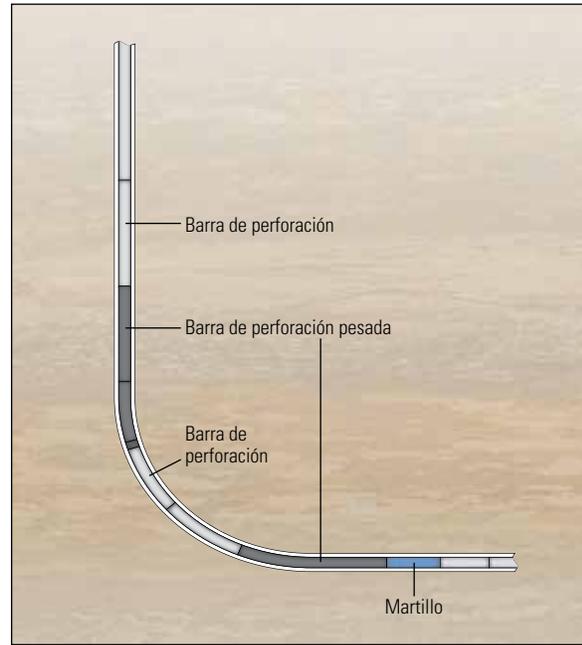
Los índices de éxito de las operaciones de martilleo varían, pero los ingenieros de Schlumberger determinaron que el 65% de las fallas se relacionan con el posicionamiento inadecuado de los martillos. La diferencia entre un posicionamiento correcto y un posicionamiento incorrecto puede traducirse en ahorros o pérdidas de cientos de millones por año para los operadores de nuestros días. Así y todo, los intrincados detalles del posicionamiento de los martillos suelen ser interpretados erróneamente y a menudo se pasan por alto. Además, no es fácil encontrar recomendaciones publicadas sobre el posicionamiento de martillos basadas en éxitos comprobados.¹⁵

15. Bouaziz S, Cummings J, Rebellon J, Barton S y Yankow A: "Advancements in Downhole Drilling Tool Placement for Highly Deviated Wells and ERD Applications," artículo SPE 144030, presentado en la Conferencia y Exhibición Norteamericana de Gas No Convencional de la SPE, The Woodlands, Texas, EUA, 14 al 16 de junio de 2011.

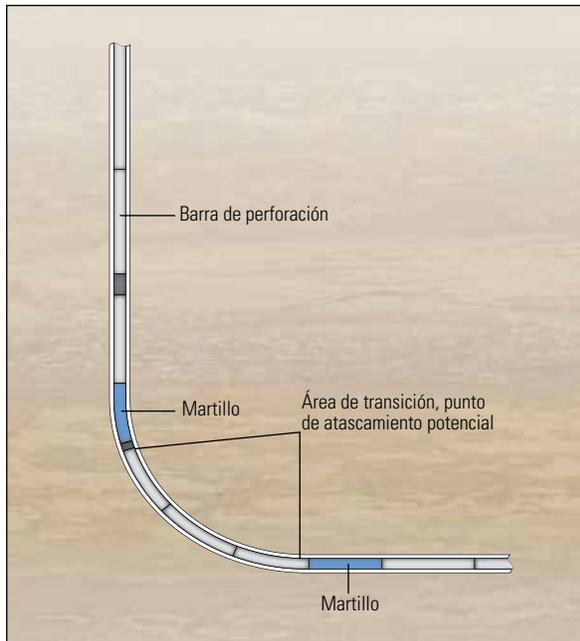
Posicionamiento en pozo horizontal, un solo martillo en la curva superior



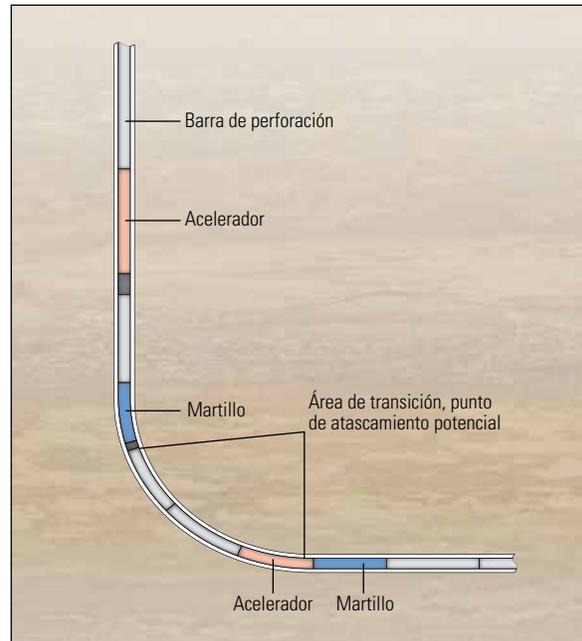
Posicionamiento en pozo horizontal, un solo martillo en el tramo lateral



Posicionamiento en pozo horizontal, martillo dual



Posicionamiento en pozo horizontal, martillo dual y acelerador dual



^ Posicionamiento del martillo. Los pozos de alto ángulo y alcance extendido desafían la sabiduría convencional y las hipótesis acerca del posicionamiento de los martillos, que constituyen el legado de muchos años de perforación vertical. Por ejemplo, en los pozos horizontales, puede colocarse un solo martillo en la curva superior (*extremo superior izquierdo*) o bien en la sección lateral (*extremo superior derecho*). El posicionamiento de un solo martillo en la curva superior protege el BHA inferior y reduce la amenaza de no lograr suficiente peso o sobretracción para operar el martillo. No obstante, el martillo en la sección lateral es relativamente ineficiente y los impactos en el punto de atascamiento son casi siempre menores a los que se necesita. El posicionamiento del martillo en la sección horizontal plantea el riesgo importante de no poder superar el arrastre del pozo para activar el martillo. Más recientemente, los operadores comenzaron a colocar los martillos tanto en la curva como en el tramo lateral (*extremo inferior izquierdo*). El posicionamiento de martillos duales protege tanto la curva como el tramo lateral, a la vez que imparte impactos más fuertes en el punto de atascamiento. El agregado de una herramienta de aceleración por encima de cada martillo (*extremo inferior derecho*) duplica los impactos de ambos martillos mediante la minimización de las pérdidas de velocidad causadas por el arrastre y a través del incremento de la eficiencia del martillo inferior. Cuando se escoge la opción del martillo dual, es importante mantener suficiente espaciado entre los dos martillos para evitar dañar el martillo inferior con los impactos generados por el superior.

Las compañías especialistas en perforación direccional y sus clientes a menudo comienzan a planificar un pozo direccional con varios meses de anticipación, prestando atención a los diseños de BHAs que impulsen el pozo desde su punto de partida hasta la TD. No obstante, el martillo suele colocarse en el BHA como una idea tardía de los ingenieros más preocupados por fijar el martillo de manera que no impida la perforación que para maximizar el impacto y el impulso, elementos críticos para el éxito de una operación de martilleo. Si los ingenieros efectúan un análisis de posicionamiento de martillos, suelen llevarlo a cabo justo antes de proceder a su activación, lo que reduce las posibilidades de que el martillo sea posicionado en forma óptima.

El rol del análisis de ingeniería para la determinación del posicionamiento correcto de los martillos está creciendo, al igual que la necesidad de efectuar el análisis con mayor antelación en el proceso de planeación de pozos. Dada la complejidad de la respuesta dinámica de una sarta de perforación a las diversas fuerzas asociadas con la transmisión de impactos, existe una demanda industrial creciente de software de posicionamiento de martillos que sean sofisticados en su funcionalidad pero fáciles de utilizar. La aplicación de fórmulas simples asiste en el posicionamiento y la utilización de los martillos; no obstante, las preguntas más complejas no pueden ser respondidas con herramientas de ingeniería simples. Estas preguntas se resuelven mejor a través del análisis por elementos finitos, que forma parte integrante de los programas de software modernos de análisis y posicionamiento de martillos. Estos programas ayudan al perforador a investigar y evaluar la efectividad de la operación de martilleo en varias disposiciones de martillos en el BHA ([página anterior](#)).

En ausencia de un software de posicionamiento de martillos, se han desarrollado ciertas pautas relacionadas con el posicionamiento. El primer paso consiste en considerar diversas preguntas básicas:

- ¿Qué mecanismo es más proclive a producir el atascamiento de la sarta de perforación?
- ¿El martillo de perforación se correrá en tensión o en compresión?

- ¿Dónde se encuentra el punto neutro en relación con el martillo durante la perforación?
- ¿Cómo afecta la presión de bombeo a la acción de martilleo?
- ¿Se encuentra el diseño del BHA y los parámetros de perforación dentro de las especificaciones de las restricciones de diseño de los martillos y la herramienta de aceleración?
- ¿El intervalo de pozo preocupante es vertical, desviado u horizontal?
- ¿Son hostiles las condiciones de perforación en el fondo del pozo? Por ejemplo, ¿son extremadamente altas las temperaturas o las presiones? ¿Tiene el lodo un alto contenido de sólidos? ¿Se sospecha la presencia de ácido sulfhídrico [H₂S] o existe este ácido presente?

Además de estas preguntas básicas, cuatro pautas fundamentales ayudan a optimizar el posicionamiento de los martillos. La primera indica colocar un mínimo de un 10% a un 20% de la sobretracción prevista del martillo como peso de martillado por encima del martillo, lo que asegura que un peso adecuado produzca impactos óptimos. Se ha observado que este rango de peso de martillado proporciona la masa ideal, a la vez que mantiene la velocidad adecuada para impartir impactos óptimos en el punto de atascamiento.

La segunda pauta establece que nunca se debe colocar el martillo demasiado cerca del punto neutro. Muchas fallas de la columna de perforación se producen alrededor del punto neutro porque las vibraciones laterales tienden a ser más severas en esta área. Por otra parte, la colocación del martillo demasiado cerca del punto neutro hará que el martillo fluctúe continuamente entre el estado de compresión y el estado de tensión, lo que puede acelerar el daño por fatiga y reducir la vida operacional; además, puede producir la activación imprevista del martillo. El hecho de mantener el 20% del peso sobre la barrena (WOB) entre el martillo de perforación y el punto neutro asegurará que el martillo esté fuera de la zona de transición del punto neutro. Cuando se efectúen cambios en el WOB o el BHA, se deberá reconsiderar el posicionamiento de los martillos.

Las pautas tercera y cuarta indican que nunca se deben colocar los estabilizadores u otros com-

ponentes del BHA —si poseen un diámetro externo mayor que el del martillo— por encima del martillo, y siempre hay que mantener cualquier estabilizador a una distancia de al menos 28 m [92 pies] del martillo. Un martillo nunca debe utilizarse como cupla entre los portamechas y las barras HWDP o entre dos tamaños diferentes de collares. Los altos esfuerzos flexores que tienen lugar en estas posiciones pueden incrementar el riesgo de daño de las herramientas.

Los próximos pasos

La proliferación de pozos altamente desviados y pozos de alcance extendido, asociada con las operaciones en aguas profundas y el descubrimiento y desarrollo de extensiones productivas de lutitas, generaron nuevos y mayores desafíos de perforación, incluida la posibilidad de atascamiento de las tuberías en dos secciones diferentes del pozo. La destreza y la experiencia que aporta un trabajador que realiza tareas de pesca en un campo petrolero a las operaciones de pesca tienen un valor que no puede sobreestimarse. No obstante, dadas las exigencias, el riesgo y el costo de las operaciones de perforación de nuestros días es probable que la experiencia no sea suficiente. La experiencia tiende a basarse en mediciones de superficie, que quizás no reflejan lo que está sucediendo en el fondo del pozo.¹⁶ El conocimiento y las hipótesis convencionales acerca del posicionamiento de los martillos quizás no sean aplicables a estos ambientes de perforación nuevos.

Si bien el posicionamiento de un martillo en el BHA puede servir como medida de precaución contra el daño del pozo, el tiempo perdido y los costos asociados con el atascamiento de las tuberías debe ser considerado y analizado con cuidado para aprovechar al máximo sus beneficios. A medida que los perforadores conozcan más los detalles intrincados de las operaciones con martillos, y los proveedores de martillos y las compañías de perforación colaboren en forma más inmediata y más estratégica en el proceso de planeación de pozos, los índices de éxito de estas operaciones se elevarán y los daños y costos asociados con los incidentes de atascamiento de las tuberías declinarán. —JF

16. Askew WE: "Computerized Drilling Jar Placement," artículo IADC/SPE 14746, presentado en la Conferencia de Perforación de las IADC/SPE, Dallas, 10 al 12 de febrero de 1986.