

Desempeño de cargas para disparos en formaciones duras

Heberto Ramos Rodríguez¹ y Alfredo Fayard²

¹ Centro de Desarrollo de Competencias Energéticas y Sustentabilidad (CEDECES) - Universidad Olmeca. Carretera Villahermosa-Macuspána, km 14, Dos Montes, Centro, C.P. 86280, Tabasco, México. E-mail: hramosr@hotmail.com

² Retirado de Schlumberger Technologies.

RESUMEN

En la terminación de un pozo petrolero, una de las operaciones más importantes es la de disparos, ya que la producción de hidrocarburos depende en gran parte de su diseño y ejecución. El ingeniero especialista tomará en consideración si el pozo es de gas o de aceite, la presión del yacimiento, las características litológicas de la formación productora, la temperatura, la tubería de revestimiento, el agujero, la cementación, etc. Todas estas variables y elementos deberán estar disponibles al momento de diseñar el programa de disparos, para que en la ejecución del programa, se logre comunicar de manera efectiva el yacimiento con el pozo, provocando el menor daño posible a la formación productora. Otro elemento que se considerará, en particular para el caso de los yacimientos del Sureste de México, es la dureza de las formaciones. Como la mayoría de las cargas para disparos están diseñadas para atravesar formaciones de arenas, es posible que no tengan la misma efectividad en formaciones más consolidadas, como calizas, dolomías, brechas y otras litologías más complejas que prevalecen en los yacimientos del Sureste mexicano. Debido a que la gran mayoría de las formaciones productoras de petróleo y gas en los Estados Unidos son rocas de bajo esfuerzo compresivo menor a 10 000 psi, el procedimiento común actual del American Petroleum Institute (API), con número API RP 43 es probar las cargas para disparos únicamente en cemento. Para formaciones blandas esto es una buena práctica, pues el esfuerzo compresivo del cemento es similar al de las formaciones típicas en los Estados Unidos, sin embargo, en el caso de las formaciones de la Región Sur de México (calizas y dolomías), sobre todo

en las formaciones del período Mesozoico Chiapas-Tabasco, en las que el esfuerzo compresivo de las formaciones es generalmente mayor de 10 000 psi, la experiencia muestra que las pruebas API no son lo suficientemente representativas, por lo que es necesario realizar pruebas de las cargas para disparos en materiales de mayor dureza, semejantes a nuestras formaciones productoras. En este trabajo se describen los procedimientos utilizados para realizar dichas pruebas, los materiales utilizados, el tipo de cargas usadas y los resultados obtenidos en las diferentes pruebas efectuadas en el Sureste de México, así como en los laboratorios de Terra Tek. Finalmente, y a partir de las conclusiones derivadas de los resultados, se dan una serie de recomendaciones básicas para diseñar las terminaciones de una manera más apropiada a las características y propiedades de las formaciones del Sureste de México.

Palabras clave: cargas para disparos, formaciones duras, formaciones blandas, pozo petrolero.

ABSTRACT

In the completion of an oil well, one of the most important operations is the perforating, since the production of hydrocarbons depends largely on its design and execution. The specialist engineer must take into consideration the following: whether the well is of gas or oil, the reservoir pressure, the lithological characteristics of the production formation, the temperature, the casing, the hole, the cementation, etc. All these variables and elements must be available at the time of designing the perforating program, so that in the execution of the program, it is

possible to communicate effectively the reservoir with the well, causing the least possible damage to the production formation. Another element that must be considered, for the case of the deposits of southeastern Mexico, is the hardness of the formations. Since most of the charges for shooting are designed to cross sand formations, they may not have the same effectiveness in more consolidated formations, such as limestones, dolomites, breccias and other more complex lithologies that prevail in the deposits of southeastern Mexico. Because most of the oil and gas producing formations in the United States are rocks with low compressive stress of less than 10 000 psi, the current American Petroleum Institute (API), known as API RP 43 common procedure is to test the charges for shooting only in cement. For soft formations this is a good practice, since the compressive effort of the cement is similar to that of the typical formations in the United States, however, in the case of the formations of the Southern Region of Mexico (limestones and dolomites), all in the formations of the Mesozoic period of Chiapas-Tabasco, in which the compressive effort of the formations is generally greater than 10 000 psi, experience shows that the API tests are not sufficiently representative, so it is necessary to perform loads tests for shots in materials of greater hardness, similar to our production formations. This paper describes the procedures used to perform these tests, the materials used, the type of loads used, and the results obtained in the different tests carried out in the southeast of Mexico, as well as in the Terra Tek laboratories. Finally, and based on the conclusions derived from the results, a series of basic recommendations are given to design the completions in a more appropriate way to the characteristics and properties of the formations of the southeast of Mexico.

Key words: charges for shots, hard formations, soft formations, oil well.

RESUMO

Na conclusão de um poço de petróleo, uma das operações mais importantes é o tiro, já que a produção de hidrocarbonetos depende em grande parte de seu projeto e execução. O engenheiro especialista deve levar em consideração se o poço é de gás ou óleo, pressão do reservatório, características litológicas da formação da produção, temperatura, revestimento, furo, cimentação, etc. Todas essas variáveis e elementos devem estar disponíveis no mo-

mento de projetar o programa de queima, para que na execução do programa seja possível comunicar efetivamente o reservatório com o poço, causando o menor dano possível à formação da produção. Outro elemento que deve ser considerado, em particular para o caso dos depósitos do sudeste do México, é a dureza das formações. Como a maioria das cargas de tiros são projetados para atravessar formações de areia, você pode não ter a mesma eficácia em formações mais consolidadas, como calcário, dolomita, breccia e outras litologias mais complexas prevalentes nos campos do sudeste do México. Porque a grande maioria de uma produtora de petróleo e gás nos Estados Unidos são rochas sob tensão de compressão inferior a 10 000 psi, o procedimento comum atual do American Petroleum Institute (API), número API RP 43 é testar cargas para tiros apenas em cimento. Para macia esta é uma boa prática, uma vez que a tensão de compressão do cimento é semelhante ao típico nas Formações Estados Unidos, no entanto, no caso da formação da Região Sul do México (calcários e dolomitas) em particularmente nas formações de período Mesozóico Chiapas-Tabasco, onde a tensão de compressão da formação é geralmente superior a 10 000 psi, a experiência mostra que os testes de API não são suficientemente representativas, por isso é necessário para cargas de teste para tiros em materiais de maior dureza, semelhantes às nossas formações de produção. Este artigo descreve os procedimentos utilizados para realizar esses testes, os materiais utilizados, o tipo de cargas utilizadas e os resultados obtidos nos diferentes testes realizados no sudeste do México, bem como nos laboratórios da Terra Tek. Finalmente, e com base nas conclusões derivadas dos resultados, uma série de recomendações básicas são dadas para projetar as conclusões de uma forma mais adequada às características e propriedades das formações do sudeste do México.

Palavras chave: cobra por tiros, formações duras, formações suaves, poço de petróleo.

INTRODUCCIÓN

Para diseñar en forma efectiva la terminación de un pozo se necesita conocer, entre muchos otros parámetros, las características de las cargas para los disparos, especialmente la penetración efectiva a la formación, ya que, de no conocer este dato, se puede tener una producción inferior a la esperada —en el mejor de los casos—, y en ocasiones ni siquiera tener acceso a la formación.

Los cuatro principales parámetros de las cargas para lograr la máxima productividad de los pozos son: densidad de disparo, penetración, fase del disparo y diámetro del agujero de entrada. La importancia relativa de cada parámetro varía dependiendo del tipo de terminación. En las terminaciones convencionales, la productividad de la formación depende fuertemente de la penetración de las cargas, especialmente en rocas duras, como es el caso de las existentes en la Región Sur de México.

En función de estos elementos, y con el propósito de tener un conocimiento más preciso de las diferentes herramientas utilizadas para ejecutar esta operación clave en la industria petrolera, se investigaron los procedimientos que utilizan los fabricantes de cargas para probar sus productos, así como las condiciones y materiales que toman como referencia para diseñar sus especificaciones.

Sobre la base de este conocimiento se procedió a diseñar un modelo experimental para realizar pruebas de laboratorio y campo, a fin de comprobar el desempeño real de las cargas explosivas que hay en el mercado. La generación de este nuevo conocimiento permitirá seleccionar las mejores tecnologías para efectuar terminaciones más efectivas, considerando las características de las formaciones del mesozoico Chiapas-Tabasco.

Los resultados de esta investigación permitirán

elaborar procedimientos adecuados para realizar terminaciones de pozos con mayor seguridad y alcanzar los objetivos propuestos en cada una de estas operaciones.

DESARROLLO

Explosivos.

Las cargas para perforar la tubería de revestimiento dependen de los explosivos para generar la energía necesaria y tener una penetración efectiva de la tubería de revestimiento, cemento y formación. Por esto, el desempeño de la carga está relacionado directamente con el desempeño del explosivo.

Debido a su enorme relación Energía-Peso se prefiere los explosivos sobre otra fuente de energía. Los explosivos actúan rápidamente, son confiables y se almacenarán por largos periodos de tiempo. Además, con las precauciones debidas, los combustibles se manejarán con seguridad.

Tipos y características

De acuerdo con su velocidad, los explosivos de reacción se clasifican en altos y bajos, se les denomina de esa manera por su velocidad de reacción, los explosivos bajos son los que tienen una velocidad de reacción que va de los 330 a los 1 500 m/s, y los explosivos altos son los que tienen velocidades de reacción superiores a los 1 500 m/s (**Tabla 1**).

Los explosivos que se usan comúnmente en las

| Explosivos Bajos | Explosivos Altos |
|--|-----------------------------------|
| Velocidad de reacción 330-1500 m/s. | Velocidad de reacción > 1500 m/s. |
| Sensibles al calor (iniciados por flama o chispa). | Iniciados por calor o percusión. |

Tabla 1. Tipos y características de explosivos.

operaciones de disparos son de cuatro tipos: azida de plomo, RDX, HMX y HNS. La Azida de plomo se usa en algunos estopines eléctricos. Los restantes: RDX, HMX, y HNS se usan en los cordones detonantes, fulminantes y cargas.

Algunos de los parámetros más importantes a considerar en la selección de los explosivos son las siguientes:

- Sensibilidad: La sensibilidad es una medida de la energía mínima, presión o potencia requerida para iniciar un explosivo y nos refleja

la facilidad con la que puede iniciarse.

- Sensibilidad al impacto: Es la altura mínima de la cual puede dejarse caer un peso sobre el explosivo para que detone.
- Sensibilidad a la chispa: Es la cantidad de energía que debe tener una chispa para detonar un explosivo.
- Estabilidad. Se refiere a la habilidad de un explosivo para perdurar por largos periodos de tiempo o para soportar altas temperaturas sin

descomponerse, disminuir o perder sus propiedades.

Los explosivos usados en los disparos tendrán una alta estabilidad para que sean almacenados por un tiempo razonable y que operen de forma efectiva después de exponerse a las altas temperaturas, así como a las condiciones ambientales del pozo.

Tipo de pistolas y cargas

Un sistema de disparo consiste en un arreglo de cargas explosivas, un cordón detonante, un estopín y un porta-cargas. A este arreglo se le llama cadena explosiva y contiene una serie de componentes de tamaño y sensibilidad diferente. La cadena explosiva se bajará al pozo utilizando cable electromecánico para registros y/o con tubería.

Pistolas bajadas con cable.

El sistema de disparo bajado con cable (DBC) se usará antes o después de introducir la tubería de producción.

Los disparos en la formación se generan mediante el uso de pistolas recuperables entubadas, así como también expuestas –parcial o totalmente desechables– que cuentan con cargas explosivas moldeadas o huecas.

En los sistemas recuperables entubados, los residuos de los explosivos y lámina porta cargas se recuperarán, por lo que prácticamente no queda basura en el pozo. En este sistema las cargas moldeadas o huecas no están expuestas a la presión y ambiente del pozo, que lo hace más adecuado para ambientes hostiles. Estos sistemas tienen la ventaja de serán bajados mediante tubería de producción, con el aparejo de tubería flexible o con cable.

En las pistolas expuestas desechables, los residuos de las cargas, cordón, estopín y el sistema porta cargas (lámina, alambre, uniones de cargas) se quedan dentro del pozo dejando una considerable cantidad de basura. Una ventaja es que, al no estar las cargas contenidas dentro de un tubo, serán de mayor tamaño, con lo que se obtiene una mayor penetración. La principal desventaja es que los componentes explosivos están expuestos a la presión y fluido del pozo, lo cual limita sus aplicaciones.

Las pistolas expuestas semi desechables son similares a las anteriores con la ventaja de que la cantidad de residuos dejados en el pozo es menor, pues se recupera el porta cargas.

Pistolas bajadas con tubería.

En el sistema de disparo bajado con tubería (DBT), la pistola es ubicada al intervalo de interés con tubería de trabajo o con el aparejo de producción. A diferencia de las pistolas bajadas con cable, la operación de disparos puede



Figura 1. Tipos de pistolas:

- a. Pistola expuesta desechable con cargas Enerjet de 1 1/4".
- b. Pistola expuesta semi-desechable con cargas Enerjet de 2 1/2".
- c. Pistola expuesta semi-desechable con cargas PowerSpiral.

ser efectuada en una sola corrida, lo cual favorece la técnica de disparos bajo balance.

METODOLOGÍA DE SELECCIÓN

Planeación

Con frecuencia, cuando se piensa en disparar un pozo solo se presta atención a la pistola. Sin embargo, para obtener un resultado eficiente de disparo, se requiere del diseño y aplicación de un programa completo de disparo.

Los resultados de las pruebas API pueden servirán de base para una comparación general del desempeño de

las cargas, pero ésta solo será válida bajo las mismas condiciones de prueba. Las condiciones reales en la formación no serán las mismas que existían durante la prueba, es decir, las tuberías, fluidos del pozo, tipos de formación, esfuerzo compresivo y presiones serán muy diferentes. Como resultado, el desempeño de una carga variará significativamente del obtenido durante la prueba.

En general:

- A mayor resistencia compresiva y densidad de los materiales menor penetración.
- El esfuerzo efectivo (presión de sobrecarga menos la presión de poro) y la heterogeneidad de la formación también afecta la penetración.

Al planear un trabajo de perforación de tubería-formación, se deben considerar: el método de terminación, las características de la formación, las tuberías y accesorios del pozo y las condiciones esperadas del pozo durante el disparo.

Una vez recabada esta información, se escogerá dentro de una gran variedad de sistemas de disparo y técnicas disponibles para seleccionar el mejor sistema para el caso en particular.

Métodos básicos de terminación

Los métodos más comunes utilizados en la industria petrolera son: natural, control de arena y estimulación.

El orden de importancia de los factores geométricos del sistema de disparo es diferente para cada caso.

Terminación natural

En las terminaciones naturales no se necesita estimulación o control de arena. El objetivo es incrementar la relación de productividad.

El diseñador establecerá un programa de disparo para remover o reducir cualquier obstáculo al movimiento del fluido del yacimiento. Estas restricciones existirán en la zona comprimida por el disparo o en la zona dañada durante la perforación.

La zona dañada es una región que rodea la pared del pozo en la cual la formación pudo haber sido alterada durante la perforación. Por ejemplo, cuando el fluido de perforación y el agua del cemento entran en la formación se deposita materia sólida, esto causa dilatación de la arcilla e induce precipitación química. Además, reduce el

tamaño efectivo de los poros disponibles para flujo del fluido y, en consecuencia, la permeabilidad.

El orden de importancia de los factores geométricos en este tipo de terminación es: densidad de cargas, penetración, fase y diámetro del agujero.

Control de arena

El objetivo en las operaciones para control de arena es prevenir que la formación alrededor de la perforación se deteriore. Si esto ocurre, los materiales resultantes bloquean el agujero y pueden llegar a tapar la tubería de revestimiento y la tubería de producción.

En formaciones no consolidadas, ocurrirá el arenamiento si hay una caída sustancial de presión entre la formación y el pozo. Esta caída de presión es inversamente proporcional a la sección transversal del agujero hecho por la carga, la probabilidad de arenamiento se reducirá aumentando el área perforada total. Entre más grande sean la densidad de cargas y el diámetro del agujero del disparo, mayor será el área perforada.

Por lo anterior, el orden de importancia de los factores geométricos será: diámetro de la perforación, densidad de cargas, fase y penetración.

Estimulación

Las operaciones de estimulación incluyen acidificación y fracturamiento hidráulico. El objetivo es incrementar el tamaño y número de caminos por los que el fluido se moverá de la formación al pozo. Ambas operaciones requieren de la inyección a la formación de grandes volúmenes de fluidos a altas presiones.

En las formaciones que requieren estimulación, el diámetro y distribución de los agujeros son importantes. El diseñador debe seleccionar diámetros y densidades para controlar la caída de presión a través de las perforaciones para reducir la demanda del equipo de bombeo.

Una buena distribución vertical de los agujeros es necesaria para mejorar la extensión vertical del tratamiento. Generalmente, una densidad de 13 cargas por metro es suficiente. La distribución radial de los agujeros tendrá un rol importante en la efectividad del tratamiento. En operaciones de fracturamiento, por ejemplo, si se usa una fase 90 ° en lugar de 0 °, es más probable que los agujeros se alineen con la orientación de las fracturas naturales, proporcionando una trayectoria más directa para que el fluido de fracturamiento entre en la formación.

El orden de importancia para este tipo de terminación es la siguiente: fase, densidad de cargas, diámetro del agujero y penetración.

En caso de tener la formación fracturada naturalmente, se considerará un sistema que aumente la probabilidad de interceptar fracturas, por lo que el orden de los factores cambia de la siguiente manera: penetración, fase, densidad de las cargas y diámetro del agujero.

Las características de la formación y los objetivos de la terminación determinan la jerarquía de los factores geométricos del sistema de disparo.

Las condiciones del pozo, por otro lado, determinan usualmente el tamaño y tipo de pistola que puede usarse y pueden afectar también el éxito de la operación de disparo. En la **Figura 2** se muestra la jerarquía de los factores geométricos del sistema de disparos en función de la heterogeneidad de la formación.

Consideraciones en formaciones heterogéneas

El diseño efectivo de disparo considera las heterogeneidades

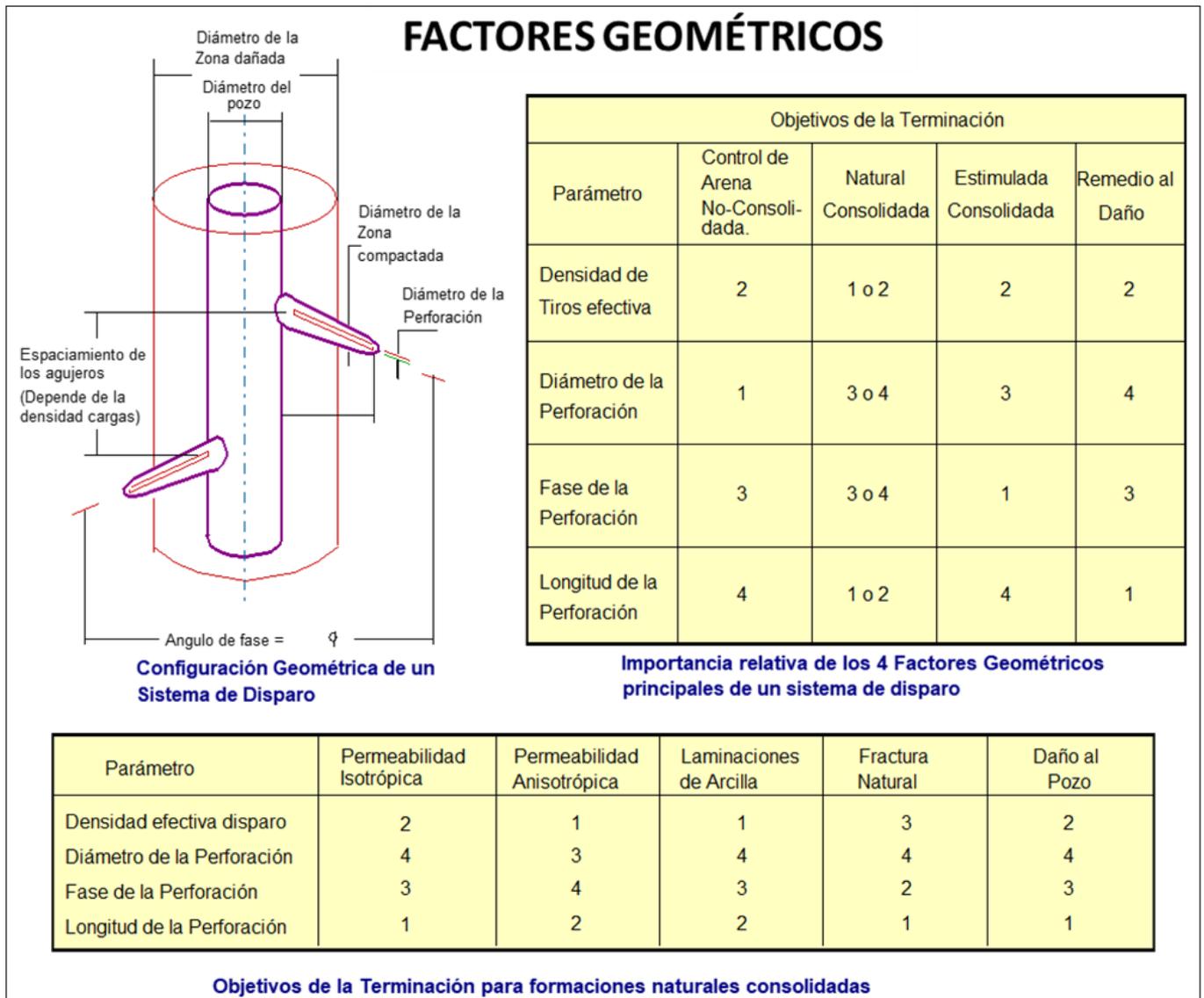


Figura 2. Jerarquía de los factores geométricos.

dades comunes de la formación: anisotropía, laminaciones de arcilla, fracturas naturales y redes de fracturas (**Figura 3**).

La mayoría de las formaciones son anisotrópicas, es decir su permeabilidad vertical K_{vert} es menor que su permeabilidad horizontal K_{horiz} . Esto afecta la relación

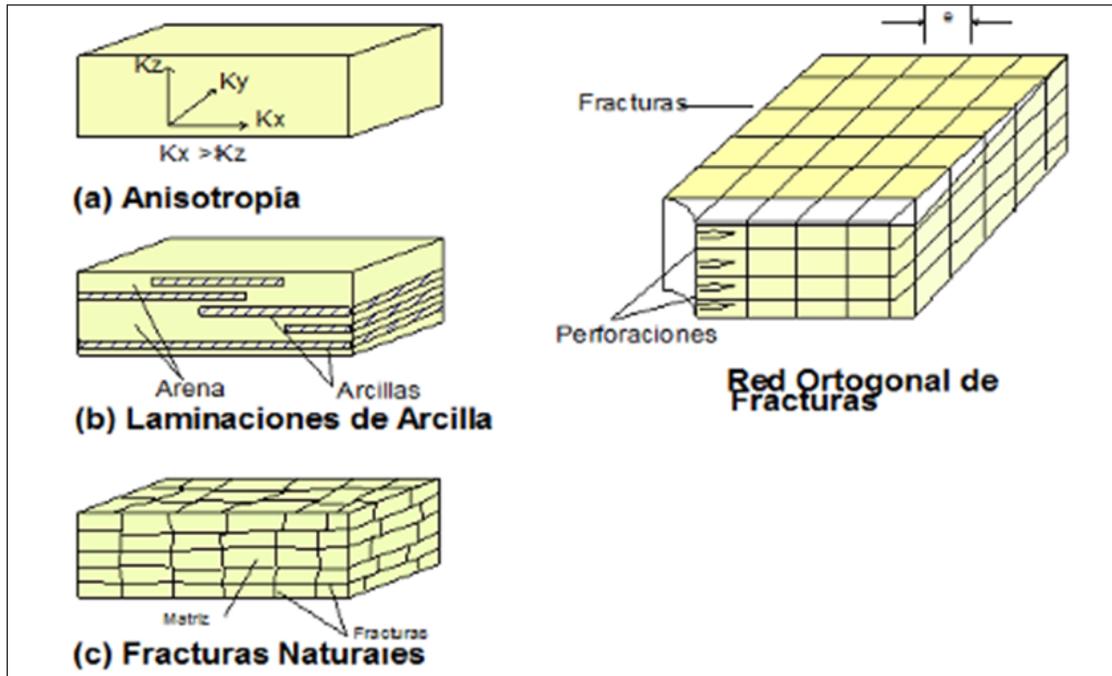


Figura 3. tipos comunes de heterogeneidades.

de productividad. Una manera efectiva de contrarrestar los efectos adversos de la anisotropía es incrementando la densidad de los disparos.

Si se tienen laminaciones de arcilla, es importante obtener la mayor densidad de cargas por metro para aumentar la probabilidad de perforar las formaciones productoras intercaladas.

Muchos yacimientos tienen uno o más conjuntos de fracturas naturales que generan una alta permeabilidad, aunque la permeabilidad de la matriz sea baja. La productividad del intervalo disparado depende de la comunicación hidráulica entre las perforaciones y la red de fracturas. En la **Figura 4** se observan los tipos de disparos para cada tipo de formación heterogénea.

Información necesaria para el diseño del disparo

Los siguientes datos deben considerarse para obtener un buen diseño de disparos:

- **Datos de la formación:** litología, permeabilidad, porosidad, densidad e intervalo a disparar.
- **Fluidos esperados y presiones:** aceite, gas, H₂S, presión de formación, presión de sobrecarga, presión de poro, resistencia compresiva.
- **Condiciones del pozo:** desviaciones, lodo de perforación, diámetro de barrena y temperatura de fondo.
- **Estado mecánico:** tuberías de revestimiento, cementación y datos del aparejo de producción.

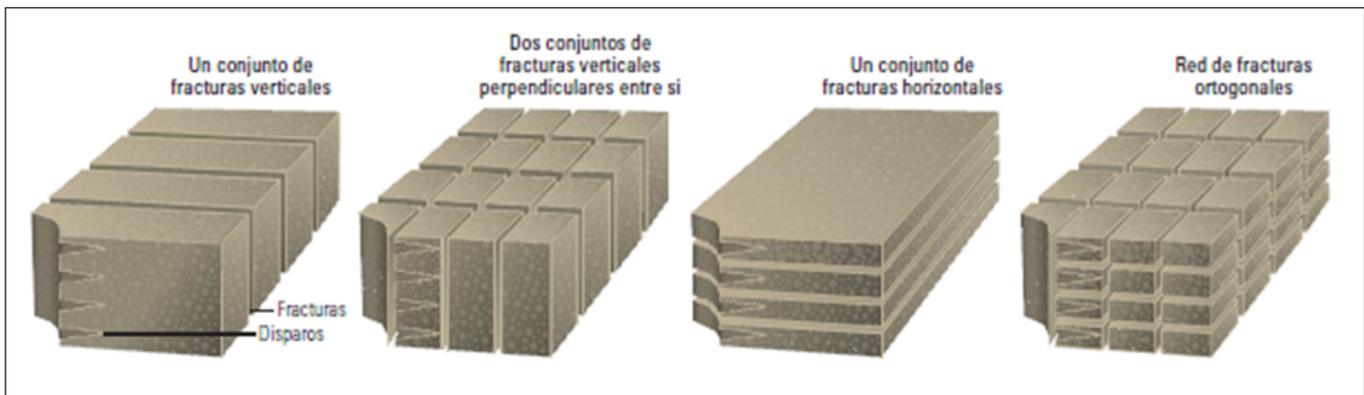


Figura 4. Tipos de disparos para las diferentes formaciones heterogéneas.

- **Método de terminación a realizar:** natural, control de arena o estimulación o fracturamiento.

El problema

El común denominador en todos los trabajos referidos a las cargas utilizadas en las operaciones de terminación de pozos, son los esfuerzos compresivos de los núcleos o blancos utilizados para efectuar pruebas de penetración no rebasan las 10 000 psi. El problema que se tiene en la Región Sur de México es que, como las formaciones productoras son más duras (los esfuerzos compresivos varían de 12 000 a 15 000 psi), no hay muchos antecedentes de trabajos o pruebas realizados en materiales de dureza similar.

Por lo que se infiere que, mientras no se tenga un estudio comparativo de las diferentes tecnologías usadas para efectuar terminaciones, no se podrán evaluar y seleccionar adecuadamente los mejores productos para realizar estas operaciones, de tal manera que estos resulten efectivos en las condiciones que prevalecen en las formaciones productoras de la Región Sur de México.

Para obtener un mejor conocimiento del desempeño de estas cargas tipo JET en materiales característicos de las formaciones productoras, se envió un núcleo de ca-

liza a los laboratorios Terra Tek, en Houston, Texas, EUA. Los técnicos de esta empresa cortaron varias muestras y midieron sus características, las cuales se muestran en la **Tabla 2**.

Como se observa, el esfuerzo compresivo de la matriz de esta roca va de los 13 000 a los 15 000 psi. Esta variación se debe a que el núcleo está fracturado, como es común en las formaciones de la Región Sur de México.

En su artículo «Flash X-Ray Analysis of the Interaction of Perforators with Different Target Materials (SPE Paper No. 14 322), C. L.» Aseltine menciona que el comportamiento de una carga para disparos en cemento es muy diferente al que tiene en otros materiales, tales como berea y caliza. También expresa que es necesario realizar más pruebas para poder establecer un modelo más avanzado para la predicción de las penetraciones.

Siguiendo esta recomendación, se realizaron pruebas de penetración de cargas en diferentes materiales (caliza, cemento, acero, etcétera), cuyas propiedades de compresividad varían significativamente.

Los resultados de estas pruebas se muestran en la **Tabla 3**. Las letras mayúsculas A y B, corresponden a diferentes proveedores de cargas.

Lo interesante de esta prueba es que, en contra

| Muestra | Tipo de roca | Esfuerzo efectivo confinado | Módulo de Young (x106 psi) | Relación Poisson | Esfuerzo compresivo (psi) | Esfuerzo compresivo residual |
|---------|--------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1 | Carbonato | 0.0 | 7.44 | 0.23 | 13,433 | 8.551 |
| 2 | Carbonato | 0.0 | 7.86 | 0.24 | 15,848 | 12.229 |

Tabla 2. Resultado del núcleo analizado en los laboratorios de Terra Tek.

de lo comúnmente aceptado, en el sentido de que una carga que penetra más en concreto, penetrará más en roca dura, las cargas «A» y «B» que penetraron más en cemento penetraron menos en la roca dura. Esto es, entre otras razones, al hecho de que para satisfacer los requerimientos del American Petroleum Institute (API) algunas compañías están optimizando sus cargas para que penetren bien en cemento, lo que no es bueno –definitivamente– para las formaciones duras, fracturadas naturalmente, de litologías complejas y rangos muy variables de permeabilidad como las de la Región Sur de México.

Cuando una formación es de baja permeabilidad, la invasión de los fluidos de perforación es alta y, por lo

tanto, el daño a la formación es mayor. Al ser la formación de baja permeabilidad, tarda más en formarse el enjarre y hay probabilidades de mayor invasión de agua. En este caso, se requieren cargas que tengan buena penetración en formaciones duras, para que se rebase la zona dañada y se tenga mejor opción de obtener la producción esperada. Probando las cargas únicamente en cemento no tienen ninguna certeza de que las cargas van a tener un buen desempeño en rocas duras.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El modelo para llevar a cabo las pruebas de las cargas consistió en confinar el blanco de caliza o granito en una

| Carga | Blanco | Penetración |
|-------|-------------------|-------------|
| A | Concreto API | 24" |
| A | Caliza 15,000 psi | 8" |
| B | Concreto API | 19" |
| B | Caliza 15,000 psi | 10" |

Tabla 3. Penetración de cargas en diferentes materiales.

tubería de revestimiento de 9 5/8", con cemento alrededor, poniendo en la parte superior un recorte de la tubería de 5", donde se coloca la carga, como se muestra en el diagrama de la **Figura 5**. En la **Figura 6**, se aprecia el resultado de la realización física del modelo, en la parte media se observa el blanco de caliza rodeado de cemento. El contenedor es un tramo de tubería de revestimiento, en esta etapa, aun no se colocaba la placa que simula la tubería de revestimiento a perforar.

El estudio abarcó los diámetros de pistola comúnmente usados en la Región Sur de México, tales como 1 1/8", 2 3/8", 2 1/2", 3 3/8" y 4 1/2" efectuando las pruebas en rocas de alta resistencia a la compresión, en un

rango de 10 000 a 15 000 psi, lo que representa un cambio sustancial respecto a las pruebas que realiza el API, donde generalmente las rocas son de esfuerzo compresivo bajo, del orden de los 5 000 psi.

Otra diferencia notable es la heterogeneidad de las rocas que se utilizaron como blancos en esta investigación, las cuales fueron calizas y granito, teniendo un valor de penetración más real para el tipo de yacimientos que existen en la Región Sur de México. El API, en cambio, utiliza blancos de concreto, cuya resistencia a la compresión es menor a los 5 000 psi, y es además un material homogéneo.

La eficacia de las cargas es extremadamente sensible al esfuerzo de compresividad de las rocas, esto quiere

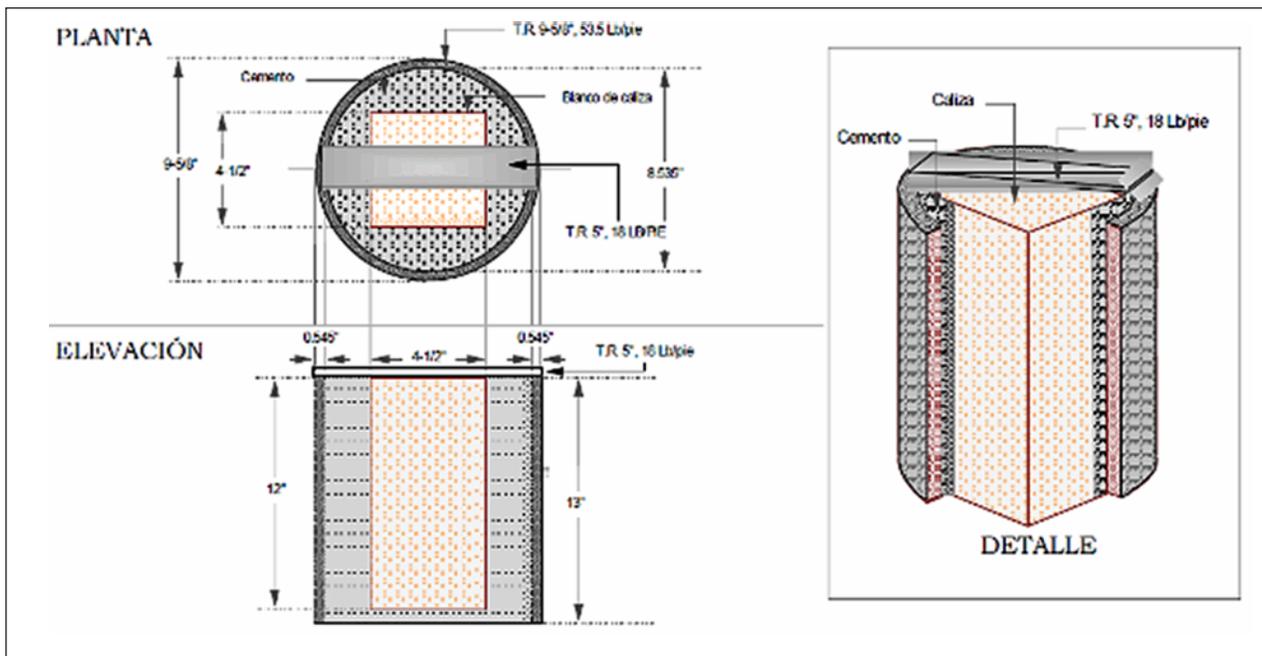


Figura 5. Modelo empleado para las pruebas de cargas.

decir que una carga diseñada y optimizada para un blanco de concreto, no necesariamente tendrá un buen desempeño en uno de caliza o granito, tal como se muestra en los resultados de este trabajo, donde se observan reducciones en la penetración total del disparo hasta un máximo del 80 %, con relación a las marcas en la norma API.

Este aspecto tiene una relevancia significativa, debido a que la productividad de los pozos dañados durante la perforación depende directamente de la profundidad del daño, y el mejor desempeño de las pistolas utilizadas. Si los disparos tienen una penetración mayor que la zona dañada, el factor de daño mecánico será bajo.

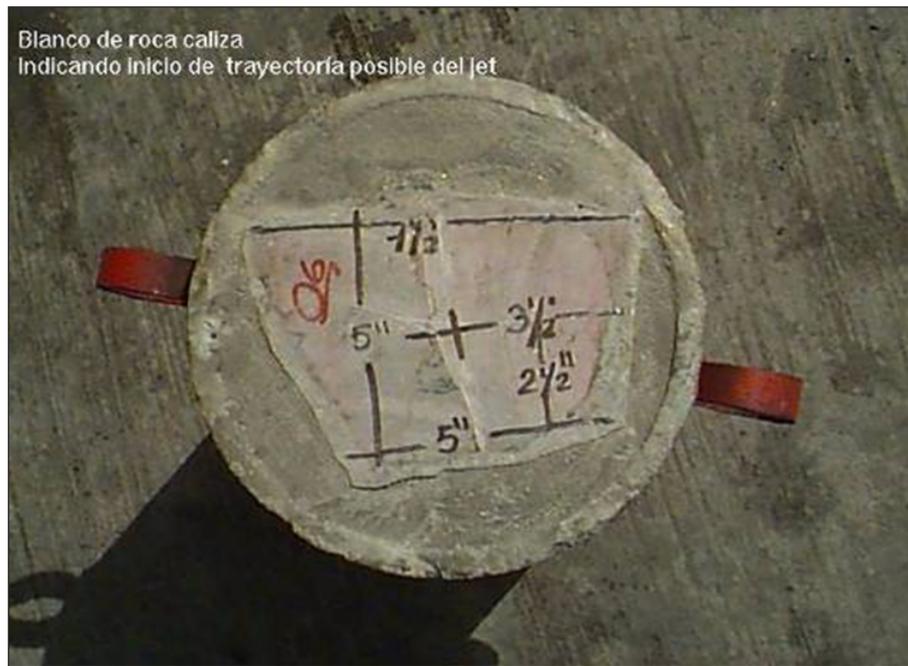


Figura 6. Realización del modelo en el que se observa el blanco de caliza con indicación del posible inicio de trayectoria del disparo.

En consecuencia, si la zona dañada es mucho mayor que la penetración del disparo, se observará un daño a la formación mucho mayor.

Una de las consideraciones más importantes con respecto a la longitud de penetración del disparo y la productividad del pozo, es que el disparo debe sobrepasar la zona dañada.

Normalmente, la perforación producida por el disparo debe ser de pocas pulgadas en la vecindad del pozo, sin embargo, en roca dura la probabilidad de pasar la zona de daño se reduce considerablemente debido al comportamiento de las cargas, como se observar en los resultados de las pruebas realizadas.

La litología es una variable en el desempeño de las cargas que recientemente se ha reconocido como un factor que afecta la penetración de los disparos. De ahí la importancia de los resultados obtenidos en este trabajo, a partir de los cuales será posible seleccionar las mejores cargas para obtener resultados satisfactorios.

La descripción geológica de los blancos utilizados (granito, caliza y acero), así como de las muestras de núcleos tomados en los pozos **1** y **2** de la Región Sur de México, son las siguientes:

Granito

Rojo de Texas, granito biotita (geológico) o granito (ASTM)

a secas. Los minerales que conforman la roca son: álcali feldespato (microlina) 35 %, cuarzo 26 %, plagioclasa (albita) 25 %, biotita 15 %, con trazas de moscovita, zircón, apitita, clorita y sericita.

Se extrajo de una cantera de Llano, Texas, al Oeste de Austin. Su origen es Grenville, post-tectónico y data de 1 116-1 070 millones de años. La muestra es un granito de grano mediano a grueso. Está conformado por cristales largos de álcali feldespato (microlina) color salmón, rodeados por pequeños cristales de cuarzo y plagioclasa (albita), con muchos cristales de biotita esparcidos a través de la muestra. La textura puede describirse mejor como holocristalina, puesto que la roca está enteramente compuesta de material cristalino. El índice de color del granito fue aproximadamente hasta 15, y su esfuerzo compresivo de 20 000 a 25 000 psi (**Figura 7**).

Caliza

Es un *packstone* de bioclastos (algas, corales) con placas y espículas de equinodermos. Presenta recristalización, escasas microfracturas selladas por calcita y estilolitas. Se observan foraminíferos bentónicos y planctónicos, y escasa dolomitización en estilolitas. Esta caliza, procedente del afloramiento de la cantera de Cementos Apasco, en Macuspana, Tabasco, México, data del Oligoceno Superior, con una edad de aproximadamente 20 millones de

años. Su esfuerzo compresivo está entre 12 000 y 15 000 psi (**Figura 8**).

Se utilizaron cuatro muestras de acero ASTM A36-94, con resistencia a la tensión de 73 800 a 79 200 psi, esfuerzo a la compresión de 49 000 a 54 400 psi, y una elongación de 25.7 a 33.0 milímetros (**Figura 9**).

Núcleo del pozo 1

Fue extraído del intervalo 5 553 m - 5 542 m, con una recuperación total (100 %) de 9.0 m y un diámetro de 4 pulgadas. Se observó una impregnación regular de aceite pesado y trazas de aceite ligero. Su porosidad es de tipo secundaria, intercrystalina y disolución en cavidades. Se describe como una dolomía café claro, mesocrystalina, euhedral a subhedral, que presenta abundantes fracturas, microfracturas y estilolitas. Perte-



Figura 7. Muestra experimental de granito.

neces a la formación Jurásico Superior Kimmerigiano. Una muestra del núcleo ya perforado por el disparo se observa en la **Figura 18**.

Núcleo del pozo 2

Fue extraído del intervalo 2 922-2 931 m, con una recuperación (74.4 %) de 6.7 m. Se observó impregnación de aceite y gas. Su porosidad es de tipo intergranular. En la parte superior (3.7 m) es arena gris claro a café claro, con granos que van de grueso a fino, con laminaciones de lutita compacta de color gris oscuro, arena y calcárea en partes con laminaciones de material carbonoso, con piritita diseminada. Procede de la formación Encanto. Una muestra del núcleo ya perforado por el disparo se observa en la **Figura 19**.

PROCEDIMIENTO

Para la realización de las pruebas de disparos con dife-

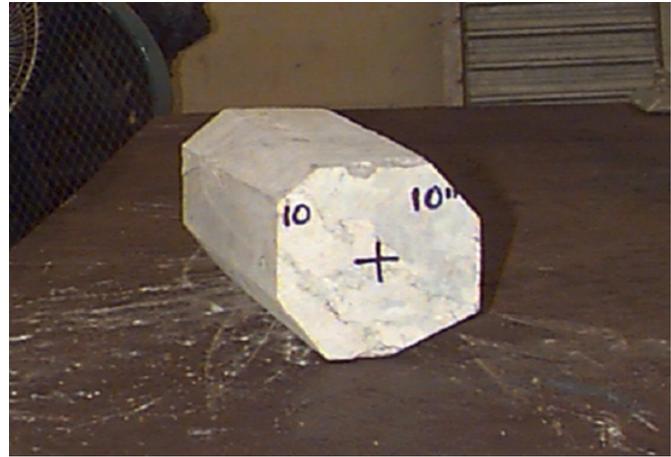


Figura 8. Muestra experimental de caliza Acero.

rentes cargas, de acuerdo con el diseño mencionado líneas arriba, se cortaron tramos de tubería de revestimiento como contenedores de los blancos de caliza, granito y acero, así como de las muestras de núcleos de los pozos 1 y 2, provenientes de la Región Sur de México, se colocaron en el interior de los tramos de tubería de revesti-



Figura 9. Muestra experimental del blanco de acero ASTM A36-94.

miento utilizados como contenedores y se vació cemento alrededor de los blancos para proporcionar rigidez y resistencia mecánica. En la **Figura 10**, aparece una placa recortada de tubería de revestimiento sobre la cara superior de cada contenedor, en el que se coloca la carga explosiva.

Las cargas se fijan sobre el recorte de tubería de revestimiento y se centran a los blancos de caliza, granito y acero, así como en las muestras de núcleos de los pozos 1 y 2 provenientes de la Región Sur de México, como se observa en las **Figuras 11** y **12**. Para las pruebas se utilizaron cargas de 3 diferentes proveedores: A, B y C.

Siguiendo las normas de seguridad aplicables se realizaron los disparos a los diferentes contenedores con cargas de los proveedores A, B y C, utilizando los mis-



Figura 10. Disposición de muestras experimentales en contenedores.

mos espesores de tubería de revestimiento entre las cargas y los contenedores. En las **Figuras 13 y 14** se observan las perforaciones producidas por los disparos. En los

blancos y en las tuberías de revestimiento.

Posteriormente se procede a sacar los blancos con cemento de los contenedores elaborados con tramos



Figura 11. Blanco de roca caliza con carga de 1 "1/8" del proveedor B y lámina de T.R. de 5", 18 lb/pie.

de tubería de revestimiento, se desechan estos y se realizan cortes longitudinales a las muestras para observar la forma de los disparos y medir la profundidad de estos.

En las **Figuras 15, 16, 17, 18 y 19**, se observan respectivamente las perforaciones en los blancos de granito, de caliza y de acero, así como las perforaciones en las



Figura 12. Cargas de 1 1/8", del proveedor A y lámina de T.R. de 5", 18 lb/pie.



Figura 13. Blancos después de recibir disparos en contenedores tipo recuperables.

muestras de núcleos de los pozos 1 y 2 provenientes del Sureste de México.

DISCUSIÓN

En las gráficas de las Figuras 20, 21 y 22, se observan los resultados de disparos de cargas con pistolas de diferentes

diámetros y diferentes proveedores (A, B y C) en varios blancos y referidos a los valores establecidos por el API.

En las pruebas realizadas sobre muestras de caliza los disparos con pistolas de diámetro de 1 1/8", de las compañías A, B y C, mostraron penetraciones promedio de 4.09", 3.92" y 4.04", respectivamente, muy similares una



Figura 14. Detalle de los impactos sobre las placas de tubería de revestimiento.



Figura 15. Blanco de granito con una perforación producida por una pistola de 1 1/8" de diámetro.

Figura 16. Penetración de disparos en blancos de granito.





Figura 17. Penetración de disparos en blancos de acero: diámetro 2 1/2", fase 60°, penetración 6.625"; diámetro 2 1/8", fase 40°, penetración 4.968"; diámetro 1 1/8", fase 40°, penetración 3.375".



Figura 18. Núcleo del pozo 1 que muestra la penetración del disparo de prueba.



Figura 19. Núcleo del pozo 2 que muestra la penetración del disparo de prueba.

de otra. En pistolas de 2 1/8", las de la compañía B mostraron los mejores resultados, con penetraciones de 7.77" en promedio, mientras que las de las compañías C y A alcanzaron 6.5". En los disparos con pistolas de 2 1/2", las de la compañía B también fueron más estables, con penetraciones de 10" en promedio.

En los disparos sobre muestras de granito, el desempeño de pistolas de diámetro de 1 1/8" de la compañía B superó al de las compañías C y A, con una penetración de 5.5". En pistolas de 2 1/8", las de las compañías B y A mostraron buen desempeño, con 6.6" y 6.3" respectivamente. Y en las de 2 1/2", la compañía A mostró mejores resultados que las de la compañía B, con 10" de una y 9.25" de la otra.

En las pruebas sobre muestras de acero, se observó en las cargas de 1 1/8" un mejor desempeño en las de la compañía A (4.125") sobre las de las otras dos compañías, que tienen un promedio de 3.2". En las de 2 1/8",

las cargas de las tres compañías mostraron un desempeño similar, de 5.3" como promedio, y en las cargas de 2 1/2" las de la compañía B fueron ligeramente mejores respecto a las de la compañía A, con 7.29" por 6.62".

A propósito de estas mediciones, cabe enfatizar la importancia de un hallazgo que afecta la normativa técnica en el campo de la terminación de pozos. Los resultados de las pruebas efectuadas muestran una gran diferencia con respecto a los reportados en el boletín del API, y lo mismo sucede respecto a los resultados de los cálculos de los *software* existente en el mercado.

CONCLUSIONES

Entre los principales aspectos a partir de los experimentos realizados durante esta investigación, se destacan las siguientes:

1. La litología es una variable importante que se considerará en el desempeño de los disparos.

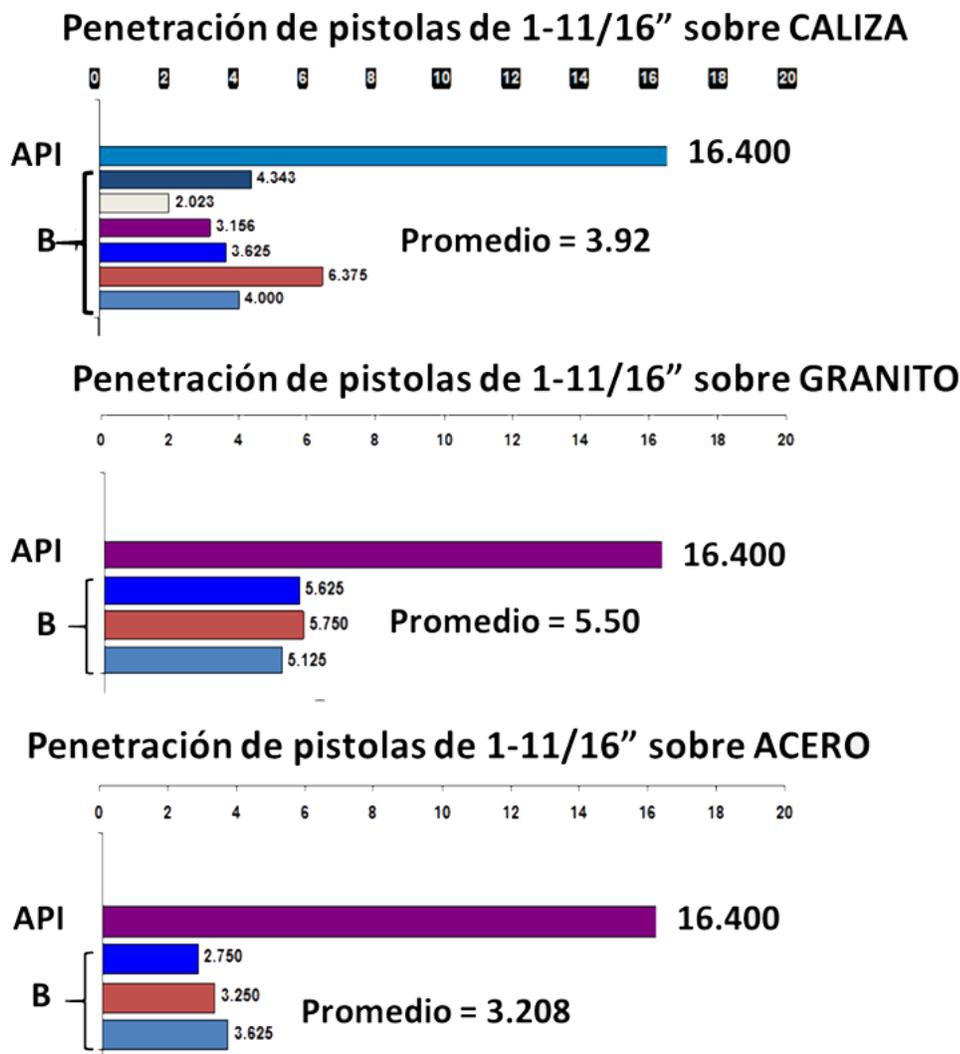


Figura 20. Penetración de pistolas de 1 1/8" en caliza, granito y acero comparados con la referencia del API (penetración en cemento). Las barras de colores corresponden a blancos diferentes del mismo material. Por espacio, sólo se muestran los resultados de las cargas del proveedor B. Los resultados de los proveedores de cargas y pistolas A y C son muy semejantes a los resultados obtenidos con los materiales del proveedor B.

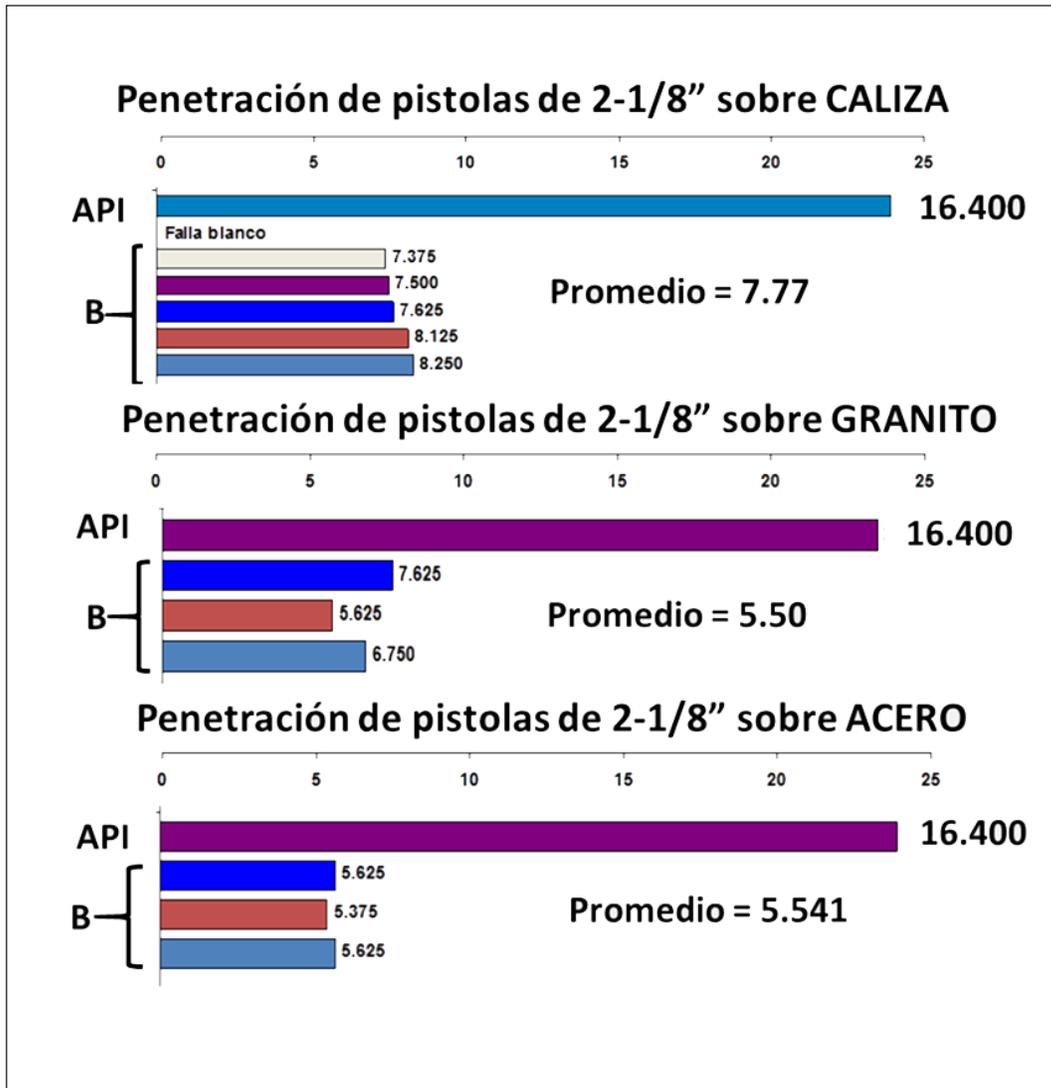


Figura 21. Penetración de pistolas de 2 1/8" en caliza, granito y acero comparados con la referencia del API (penetración en cemento). Las barras de colores corresponden a blancos diferentes del mismo material. Por espacio, sólo se muestran los resultados de las cargas del proveedor B. Los resultados de los proveedores de cargas y pistolas A y C son muy semejantes a los resultados obtenidos con los materiales del proveedor B.

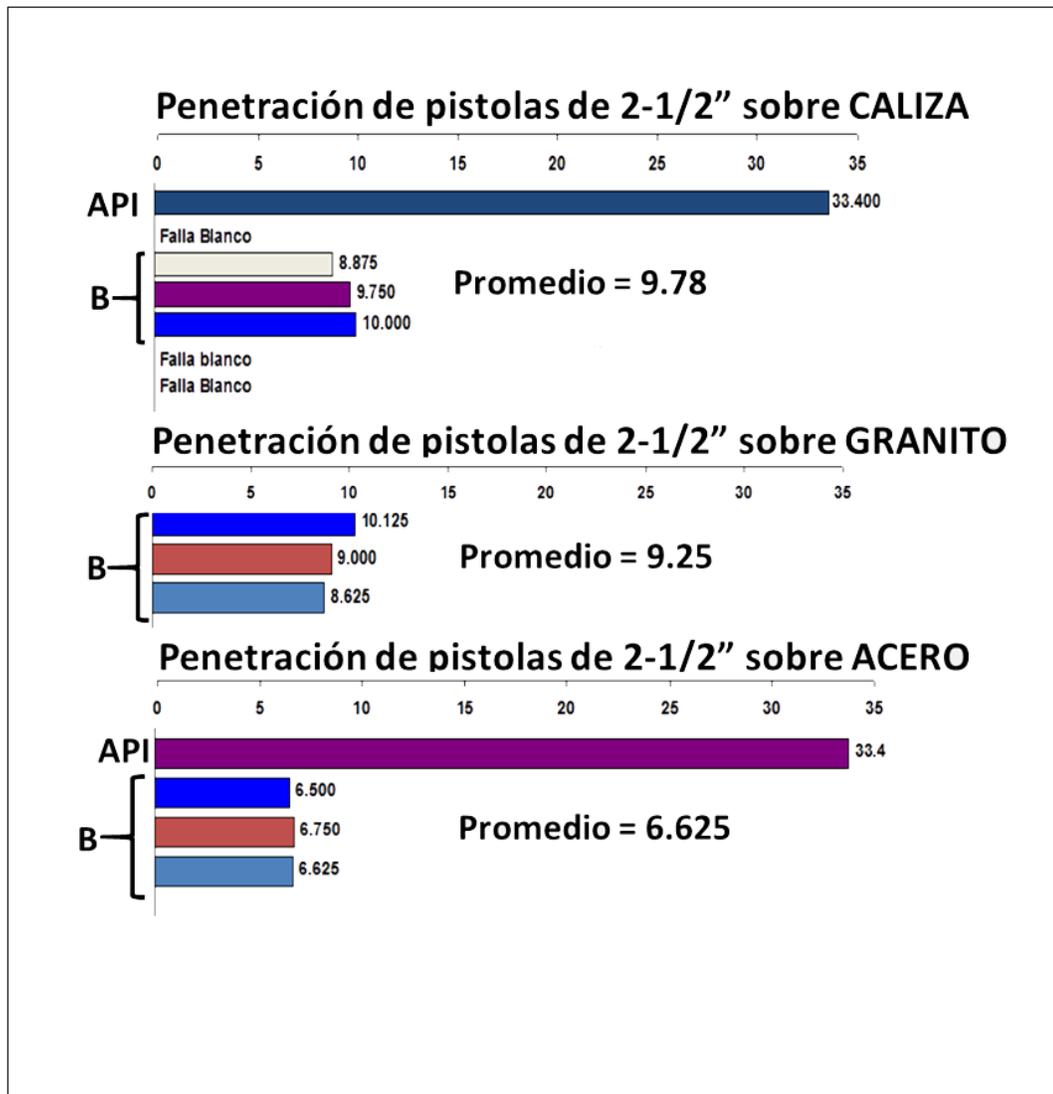


Figura 22. Penetración de pistolas de 2 1/2" en caliza, granito y acero comparados con la referencia del API (penetración en cemento). Las barras de colores corresponden a blancos diferentes del mismo material. Por espacio, sólo se muestran los resultados de las cargas del proveedor B. Los resultados de los proveedores de cargas y pistolas A y C son muy semejantes a los resultados obtenidos con los materiales del proveedor B.

2. La penetración de las cargas se ve fuertemente disminuida debido a la dureza de la roca.
3. El desempeño de las cargas muestra una variabilidad importante en medios heterogéneos.
4. La trayectoria del disparo es recta en términos generales, teniendo pequeñas desviaciones por las características del material que penetra.
5. El diámetro del disparo disminuye conforme aumenta la penetración.
6. Un fenómeno que se observa al final del disparo es la formación de un vórgulo de mayor diámetro que la trayectoria del disparo (caliza, acero).
7. Se observó que quedaban residuos de formación en el interior del túnel creado por el disparo.
8. Los resultados de estas pruebas, comparadas con los del boletín del API, muestran diferencias importantes.

RECOMENDACIONES

En virtud de la importancia técnica y económica de las terminaciones de pozos petroleros, puesto que de ellas depende la productividad de un pozo, y dado que existen pocas investigaciones sobre el desempeño de las cargas utilizadas para los disparos, es recomendable:

1. Continuar con las investigaciones de disparos en rocas duras, a fin de poder optimizar el desempeño de las cargas para el tipo de yacimientos de litologías complejas y alto esfuerzo compresivo.
2. Solicitar a los fabricantes de cargas un mayor empeño en sus investigaciones, para desarrollar mejores materiales y ofrecer mejores resultados en formaciones duras.
3. Proponer al American Petroleum Institute incluir en el Boletín API RP-43 los resultados de la prueba de pistolas en formaciones duras (con más de 10 000 psi de esfuerzo compresivo).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Petroleum Institute, API Boletín RP-43.

Aseltine, C. L. 1985. Flash X-Ray Analysis of the Interaction of Perforators with different Target Materials; SPE, Las Vegas, november, 22-25, september.

Petróleos Mexicanos. 1995. Manual de procedimientos para disparos. Pemex Exploración y Producción, Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos, Región Sur.

Subiaur Arteache, Servio Tulio. 1996. Sistemas óptimos de disparos para las perforaciones duras; Pemex Exploración y Producción; X Congreso Latinoamericano de Perforación.

Smith, C. L., Sherman, L. A., Yang, Wembo. 1997. Improvements in perforating performance in high compressive strength rocks; SPE, Netherlands, 2-3 June.

Wesson David S. Gill, Bennie C., y Navarette, Mike. 1991. Improved system tent for perforators; SPE; Dallas, Texas, 6-9 October.

Manuscrito recibido: 19 de febrero de 2019.

Manuscrito corregido: 20 de mayo de 2019.

Manuscrito aceptado: 10 de abril de 2019.

