



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO Y SELECCION DE LOS DISPAROS
EN POZOS CONVENCIONALES Y EN
POZOS NO CONVENCIONALES**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :**

ADRIAN ALVAREZ BAHENA

ASESOR: M. I. NESTOR MARTINEZ ROMERO



México, D.F. 2000

280070



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-166

SR. ADRIAN ALVAREZ BAHENA
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I Néstor Martínez Romero y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

DISEÑO Y SELECCION DE LOS DISPAROS EN POZOS CONVENCIONALES Y EN POZOS NO CONVENCIONALES

- I INTRODUCCION
 - II ANTECEDENTES Y GENERALIDADES
 - III SELECCION DEL INTERVALO A DISPARAR
 - III FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LOS DISPAROS
 - IV DAÑO A LA FORMACION
 - V DISEÑO DE LOS DISPAROS EN POZOS CONVENCIONALES
 - VI DISEÑO DE LOS DISPAROS EN POZOS NO CONVENCIONALES
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, a 24 de febrero de 2000

EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS DISPAROS EN POZOS CONVENCIONALES
Y EN POZOS NO CONVENCIONALES”**

Tesis presentada por:

ADRIÁN ALVAREZ BAHENA

Dirigida por:

M.I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO

JURADO DEL EXÁMEN PROFESIONAL:

PRESIDENTE: DR. DANIEL GARCÍA GAVITO
VOCAL: M.I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO
SECRETARIO: M.I. JOAQUÍN MENDIOLA SÁNCHEZ
1ER SUPLENTE: ING. NORMA ARACELI GARCÍA MUÑOZ
2DO SUPLENTE: M.I. MAXIMINO MEZA MEZA

Handwritten signatures of the jury members on a set of horizontal lines. The signatures are: Daniel García Gavito, Néstor Martínez Romero, Joaquín Mendiola Sánchez, Norma Araceli García Muñoz, and Maximino Meza Meza.

MÉXICO, D.F. MAYO DE 2000

Con todo mi amor a mis Padres
Adrián Álvarez Barrios y María
Bahena Arrieta, por mostrarme
el valor del trabajo y del
estudio, por que gracias a sus
sacrificios, apoyo, comprensión
y cariño pude hacer realidad
una de mis metas.

A mis hermanos Silvia, Yaneth,
José y Onelye, por su apoyo en todo
momento, por saber compartir
penas y alegrías.

A G R A D E C I M I E N T O S

A la Universidad Nacional Autónoma de México (a la Facultad de Ingeniería), por haberme dado el conocimiento.

Al Instituto Mexicano del Petróleo, por el apoyo recibido.

A mi asesor, el Ing. Juan Antonio Morales Díaz de Vivar por su colaboración y orientación para el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos que laboran en el Instituto Mexicano del Petróleo, en especial a los M.I. Alonso Plata A. y Mario García H., por su amistad y ayuda para la realización de este trabajo.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería.

Í N D I C E

INTRODUCCIÓN

1 ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1	Tipos de terminación	1-1
1.1.1	Terminación sencilla en agujero descubierto con tubería de producción franca	1-2
1.1.2	Terminación sencilla en agujero descubierto con tubería de producción, empacador y accesorios	1-3
1.1.3	Terminación sencilla en agujero ademado y tubería de producción franca	1-4
1.1.4	Terminación sencilla en agujero ademado con tubería de producción, empacador y accesorios	1-5
1.1.5	Terminación sencilla selectiva en agujero ademado con tubería de producción, dos empacadores y accesorios	1-7
1.1.6	Terminación doble en agujero ademado con dos tuberías de producción, dos empacadores y accesorios	1-8
1.1.7	Terminación doble selectiva en agujero ademado con dos tuberías de producción, un empacador doble, más de un empacador sencillo y accesorios	1-9
1.1.8	Otros tipos de terminaciones	1-9
1.2	Accesorios superficiales y subsuperficiales	1-11
1.2.1	Árbol de válvulas	1-11
1.2.2	Empacadores	1-12
1.2.3	Niples de asiento	1-15
1.2.4	Válvula de seguridad	1-17
1.2.5	Válvulas de circulación	1-17
1.2.6	Junta de expansión	1-18
1.2.7	Unidad de sellos (Multi-V), junta de seguridad, coples de flujo y juntas de abrasión	1-20

2 SELECCIÓN DEL INTERVALO A DISPARAR

2.1	Selección del intervalo productor	2-2
2.1.1	Yacimientos que producen por empuje de gas disuelto liberado	2-2
2.1.2	Yacimientos con casquete de gas sin entrada de agua	2-3
2.1.3	Yacimientos con condiciones favorables a la segregación	2-3
2.1.4	Yacimientos con casquete de gas y con entrada de agua	2-3
2.1.5	Yacimientos con entrada de agua, sin casquete de gas	2-4
2.1.6	Yacimientos estratificados con permeabilidades diferentes en cada estrato	2-4
2.2	Descripción y caracterización de yacimientos	2-4
2.2.1	Sísmica de pozos	2-6
2.3	Evaluación de formaciones	2-6
2.3.1	Parámetros del yacimiento	2-7

2.4	Registros geofísicos utilizados para la selección del intervalo a disparar	2-11
2.4.1	Registros de resistividad	2-12
2.4.2	Registros de porosidad	2-13
2.4.3	Registros combinados	2-16
2.4.4	Curvas opcionales	2-17
2.4.5	Registros especiales	2-17
2.4.6	Sistemas computarizados de análisis de registros	2-18
3	FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LOS DISPAROS	
3.1	Factores que afectan el funcionamiento de las pistolas de cargas	3-1
3.1.1	Parámetros que afectan el diseño de la carga	3-2
3.1.2	Claro de la pistola	3-7
3.1.3	Propiedades físicas de la formación	3-11
3.1.4	Propiedades físicas de la tubería de revestimiento	3-13
3.1.5	Presión y temperatura	3-14
3.2	Factores que afectan el funcionamiento de las pistolas de bala	3-15
3.2.1	Claro de la pistola	3-16
3.2.2	Propiedades de la formación	3-16
3.2.3	Propiedades físicas de la tubería de revestimiento	3-17
3.2.4	Presión y temperatura	3-17
3.3	Otros factores que afectan la eficiencia de los disparos	3-18
3.3.1	Taponamiento de los disparos	3-18
3.3.2	Limpieza de los disparos taponados	3-18
3.3.3	Efecto de la presión diferencial	3-19
3.3.4	Efecto de usar fluidos limpios	3-20
3.3.5	Efecto de la resistencia a la compresión	3-20
3.3.6	Densidad de los disparos	3-20
3.3.7	Fasamiento	3-21
3.3.8	Control del pozo	3-21
3.3.9	Daño en el cemento y en la tubería de revestimiento	3-21
3.3.10	Control de la profundidad	3-22
3.3.11	Disparos orientados	3-22
3.3.12	Penetración contra diámetro de disparo	3-23
4	DAÑO A LA FORMACIÓN	
4.1	Daño por la perforación del pozo	4-1
4.2	Daño por disparos	4-2
4.2.1	Evidencia empírica del daño por disparos	4-2
4.2.2	Daño a la tubería de revestimiento y su resistencia al colapso	4-9
4.3	Daño por terminación parcial	4-13

5	DISEÑO DE LOS DISPAROS EN POZOS CONVENCIONALES	
5.1	Sistema de pistolas	5-1
5.1.1	Pistola de carga formada	5-1
5.1.2	Pistola de bala	5-10
5.2	Tipos de pistolas y sus características	5-13
5.2.1	Tipos de pistolas	5-13
5.2.2	Características de las pistolas	5-14
5.2.3	Características de comparación	5-21
5.2.4	Aplicaciones	5-25
5.2.5	Limitaciones	5-27
5.3	Eficiencia de flujo del sistema disparado	5-29
5.3.1	Eficiencia de flujo del pozo	5-29
5.3.2	Factores que influyen en el daño y la eficiencia de flujo del pozo	5-30
5.4	Disparos en pozos convencionales	5-38
5.4.1	Ambiente de disparos	5-40
5.4.2	Selección de la pistola y de la carga	5-43
5.4.3	Método de conducción de la pistola	5-44
5.4.4	Una perspectiva global	5-45
6	DISEÑO DE LOS DISPAROS EN POZOS NO CONVENCIONALES	
6.1	Disparos en pozos horizontales y altamente desviados	6-1
6.1.1	Pozos desviados	6-1
6.1.2	Pozos horizontales	6-2
6.2	Disparos para control de arena en terminaciones con empacamiento de grava	6-5
6.2.1	Daño adicional y único	6-6
6.2.2	Manejo de la caída de presión	6-7
6.2.3	Selección de la pistola	6-7
6.2.4	Condiciones del pozo	6-8
6.2.5	Métodos de conducción	6-9
6.3	Disparos para fracturamiento hidráulico	6-9
6.3.1	Diámetro de disparo en la tubería de revestimiento	6-10
6.3.2	Densidad de disparos	6-11
6.3.3	Fasamiento de los disparos	6-11
6.3.4	Característica de los disparos en la formación	6-12
6.3.5	Condiciones del pozo	6-12
6.3.6	Desviación del pozo	6-13
6.3.7	Método de conducción	6-13
6.4	Disparos en pozos profundos de alta presión y alta temperatura	6-13

6.4.1 Efectos de la temperatura	6-14
6.4.2 Condiciones del pozo	6-14
6.4.3 Selección de la pistola	6-14
6.4.4 Método de conducción	6-14
6.4.5 Planeación de terminaciones en pozos profundos	6-15
6.5 Una perspectiva global	6-16

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

Durante la etapa de terminación, el disparo de producción es la fase más importante, ya que permite establecer comunicación de los fluidos entre la formación productora y el pozo.

La operación del disparo no es una técnica aislada sino que se debe prestar atención particular en la solución del diámetro de la tubería de producción, ya que éste condicionará el diámetro exterior de las pistolas y éste a su vez, condicionará la penetración de las mismas.

El presente trabajo tiene por objetivo principal establecer el estado del arte de la tecnología de disparos, considerando los aspectos de la selección del intervalo a disparar, los factores que afectan la eficiencia de los disparos, el daño a la formación, tanto por las operaciones de perforación del pozo como por el disparo de las formaciones de interés, el diseño de los disparos en pozos convencionales y no convencionales.

Así, en el Capítulo 1 se establecen los antecedentes referentes a los tipos de terminación que se pueden implementar en un pozo, de acuerdo con sus características particulares. Asimismo, se presentan los accesorios superficiales y subsuperficiales que se utilizan durante la terminación de un pozo.

En el Capítulo 2 se describen las características a considerar para seleccionar el intervalo a disparar, de acuerdo al tipo de yacimiento, a la evaluación particular que es función de los parámetros del yacimiento y la sísmica de pozos, a la descripción y caracterización integral y por supuesto a los registros geofísicos utilizados.

Por otro lado, en el Capítulo 3 se describen los factores que afectan la eficiencia de los disparos. Entre dichos factores se encuentran aquéllos que afectan el

funcionamiento de las pistolas, como el claro, las propiedades físicas de la formación y de la tubería de revestimiento, la presión y temperatura. Asimismo, se consideran otros factores, tales como el taponamiento de los disparos, la limpieza de los disparos taponados, el efecto de la presión diferencial, el efecto de usar fluidos limpios, el efecto de la resistencia a la compresión, la densidad de los disparos, el fasamiento de los disparos, el control del pozo, la calidad del cemento y de las condiciones de la tubería de revestimiento, el control de la profundidad, la orientación de los disparos, la penetración y el diámetro de los disparos.

El daño a la formación es un concepto importante que merece ser tratado con cierto detalle. En el Capítulo 4 se explican algunos mecanismos de daño a la formación debido a la perforación del pozo, a los disparos y aquél debido a la terminación parcial del pozo. También se describe el daño que sufre la tubería de revestimiento a causa de los disparos y la disminución de la resistencia al colapso.

El diseño de los disparos en pozos convencionales se explica en el Capítulo 5. En dicho diseño se considera el ambiente de disparo, la selección de la pistola, la carga y el método de conducción de la pistola. Además se incluye: el sistema de pistolas de carga formada y de bala, los tipos de pistolas y sus características y la eficiencia de flujo del sistema disparado.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan los factores que afectan el diseño de los disparos para pozos horizontales y altamente desviados, para pozos con terminación con empacamiento de arena, para pozos que requieren fracturamiento hidráulico y para pozos de alta presión y alta temperatura.

Al final se presentan algunas conclusiones que pretenden resumir los aspectos más relevantes de la tecnología de disparos utilizada actualmente. Asimismo, se indican algunas recomendaciones susceptibles de llevar a cabo. En este caso, se refieren a las preferencias operativas y de diseño relacionadas con los disparos y que reflejan las experiencias de los operadores, indicadas en la literatura.

1 ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1 TIPOS DE TERMINACIÓN

La terminación de un pozo petrolero completa la perforación y es tan importante como ésta. Por medio de la terminación de un pozo se pueden extraer los hidrocarburos de los yacimientos a la superficie.

La terminación se lleva a cabo después de que se ha cementado la tubería de revestimiento de explotación, o bien, en agujero descubierto.

Para cualquier terminación se tendrán tres tipos de pozos, que son:

- a). Pozo en agujero descubierto.
- b). Pozo en agujero ademado con tubería de explotación hasta la superficie.
- c). Pozo en agujero ademado con tubería de revestimiento corta.

En cada tipo de pozo se pueden efectuar las siguientes terminaciones:

Terminación en agujero descubierto

- Sencilla con tubería de producción franca
- Sencilla con tubería de producción, un empacador y accesorios

Terminación en agujero ademado

- Sencilla con tubería de producción
- Sencilla con tubería de producción, empacador y accesorios
- Sencilla selectiva con tubería de producción, dos empacadores y accesorios
- Doble con dos tuberías de producción, dos empacadores y accesorios
- Doble selectiva con dos tuberías de producción, más de dos empacadores y accesorios

1.1.1 TERMINACIÓN SENCILLA EN AGUJERO DESCUBIERTO CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN FRANCA

La terminación sencilla con tubería de producción franca en un pozo que tiene su formación productora en agujero descubierto se muestra en la Figura 1.1.⁴

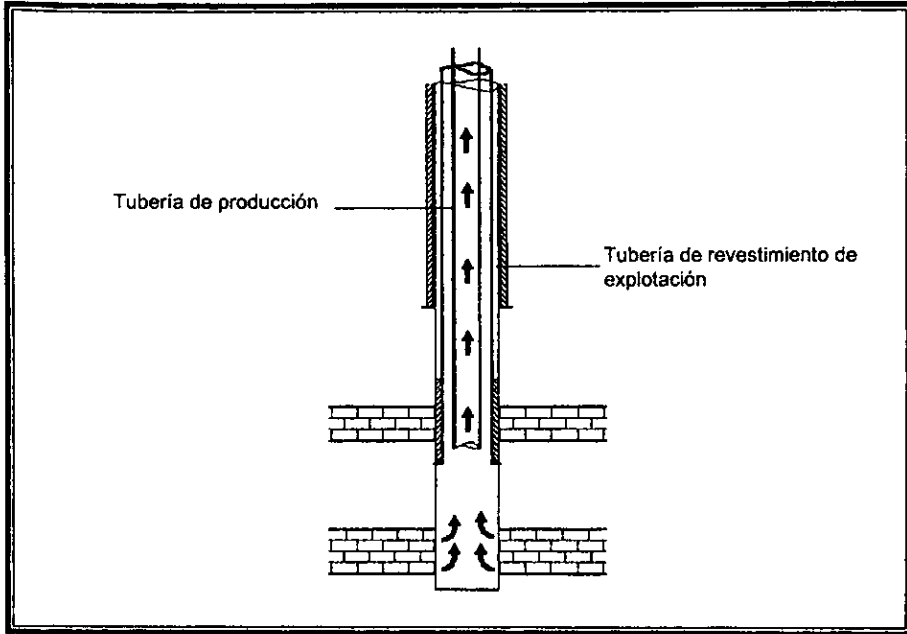


FIGURA 1.1 TERMINACIÓN SENCILLA CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN FRANCA

Este tipo de terminación puede realizarse cuando:

- La formación productora no sea deleznable.
- La formación productora no tenga contacto gas-aceite o aceite-agua; es decir, que su producción sea sólo de la zona de aceite.

VENTAJAS:

- Es una terminación rápida y menos costosa que cualquier otra.
- El tiempo de operación es mínimo comparado con los otros tipos de terminación.
- Se pueden obtener grandes gastos de producción, ya que se puede explotar por la tubería de producción y el espacio anular entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento.
- Es favorable para aceites viscosos.

DESVENTAJAS:

- La tubería de revestimiento de explotación está en contacto con los fluidos del yacimiento, y si éstos contienen sustancias corrosivas, pueden dañarla.
- Las presiones ejercidas por el yacimiento son aplicadas a la tubería de revestimiento, por lo que siempre estará sometida a esfuerzos adicionales.
- No se pueden efectuar tratamientos o estimulaciones, cuando las presiones de inyección son mayores que la presión interior que resiste la tubería de revestimiento.

1.1.2 TERMINACIÓN SENCILLA EN AGUJERO DESCUBIERTO CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN, EMPACADOR Y ACCESORIOS

Este tipo de terminación en un pozo con formación productora sin recubrir con tubería de ademe (Figura 1.2), se puede efectuar con empacador sencillo recuperable o permanente, todo dependerá de la profundidad a la que va a ir instalado, así como de las presiones que se esperan del yacimiento durante su explotación o bien por operaciones que se deseen efectuar después de la terminación, acidificaciones o tratamientos de limpieza.⁴

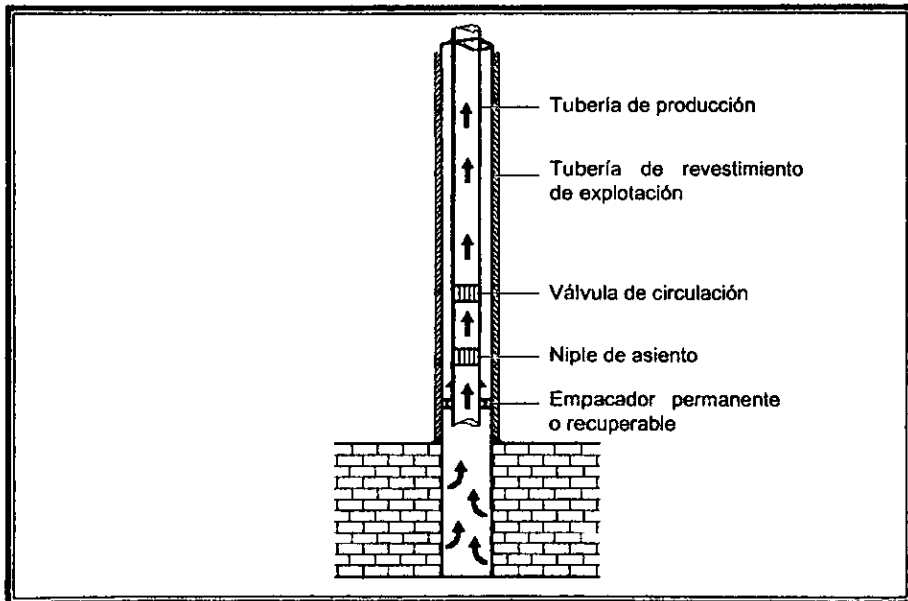


FIGURA 1.2 TERMINACIÓN SENCILLA CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN, EMPACADOR Y ACCESORIOS

Para asegurar que el empacador se ancle efectivamente es necesario seguir las recomendaciones del fabricante, entre ellas la que indica el peso de la tubería de producción que debe soportar el empacador.

En este tipo de aparejos la tubería de producción lleva como accesorios una válvula de circulación y un niple de asiento.

VENTAJAS:

- La presión del yacimiento y la presencia de fluidos corrosivos, no afectan a la tubería de revestimiento de explotación, por estar aislada ésta mediante el empacador y la tubería de producción.
- Cuando se quiera efectuar una estimulación, se podrán alcanzar mayores presiones que en el caso de una tubería franca.
- En caso que se requiera un gasto considerable, se puede abrir la válvula de circulación para producir por la tubería de producción y por el espacio anular simultáneamente.

DESVENTAJAS:

- Mayor tiempo para la terminación debido a los diversos viajes que se hacen con diferentes herramientas, así como mayor costo.
- Mayor costo por accesorios que lleva el aparejo de producción.
- Con aceites viscosos es más difícil la explotación.
- Se puede tener una reducción del diámetro de la tubería de producción causada por la acumulación de carbonatos, parafinas, asfaltenos y/o sales minerales.

1.1.3 TERMINACIÓN SENCILLA EN AGUJERO ADEMADO Y TUBERÍA DE PRODUCCIÓN FRANCA

Este tipo de terminación (Figura 1.3) es igual a la terminación con tubería de producción franca, sólo que aquí se tiene que disparar la tubería de revestimiento para poner en comunicación el yacimiento con el interior del pozo.⁴

VENTAJAS:

- Es una terminación rápida y menos costosa que cualquier otra de las terminaciones en agujero ademado.
- El tiempo de operación es mínimo comparado con los otros tipos de terminación en agujero ademado.
- Se pueden obtener grandes gastos de producción, ya que se puede explotar por la tubería de producción y el espacio anular entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento.
- Es favorable para aceites viscosos.

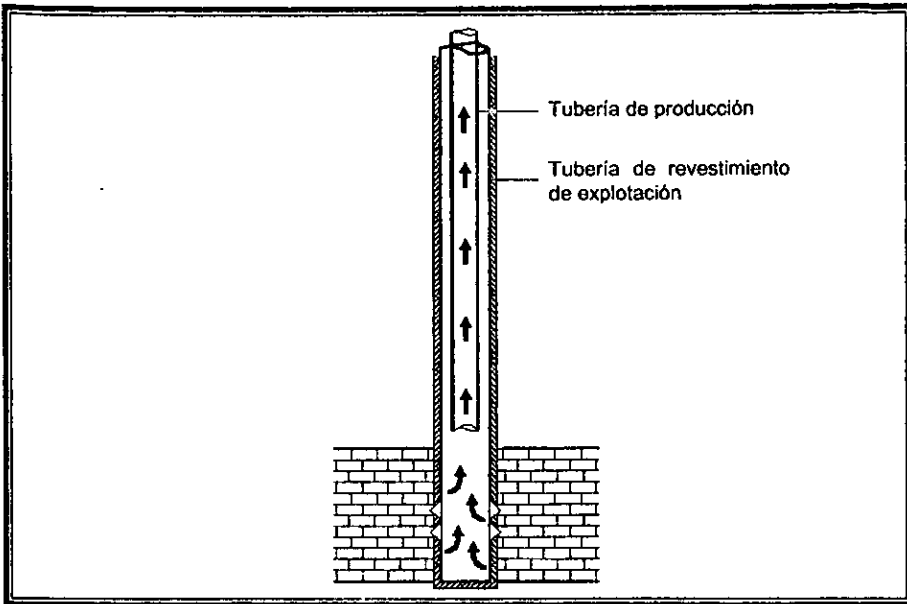


FIGURA 1.3 TERMINACIÓN SENCILLA CON AGUJERO ADEMADO Y TUBERÍA DE PRODUCCIÓN FRANCA

DESVENTAJAS:

- La tubería de revestimiento de explotación está en contacto con los fluidos del yacimiento, y si estos contienen sustancias corrosivas pueden dañarla.
- Las presiones ejercidas por el yacimiento son aplicadas a la tubería de revestimiento, por lo cual siempre estará sometida a esfuerzos adicionales.
- No se pueden efectuar tratamientos o estimulaciones, cuando las presiones de inyección son mayores que la presión interior que resiste la tubería de revestimiento.

1.1.4 TERMINACIÓN SENCILLA EN AGUJERO ADEMADO CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN, EMPACADOR Y ACCESORIOS

Esta terminación (Figura 1.4) puede efectuarse con empacador recuperable o permanente. El yacimiento puede tener contacto gas-aceite o aceite-agua, ya que mediante la cementación de la tubería de revestimiento se puede seleccionar el intervalo para la terminación. El tipo de empacador dependerá de las presiones que se esperen del yacimiento, así como del tipo de hidrocarburo (aceite o gas).⁴

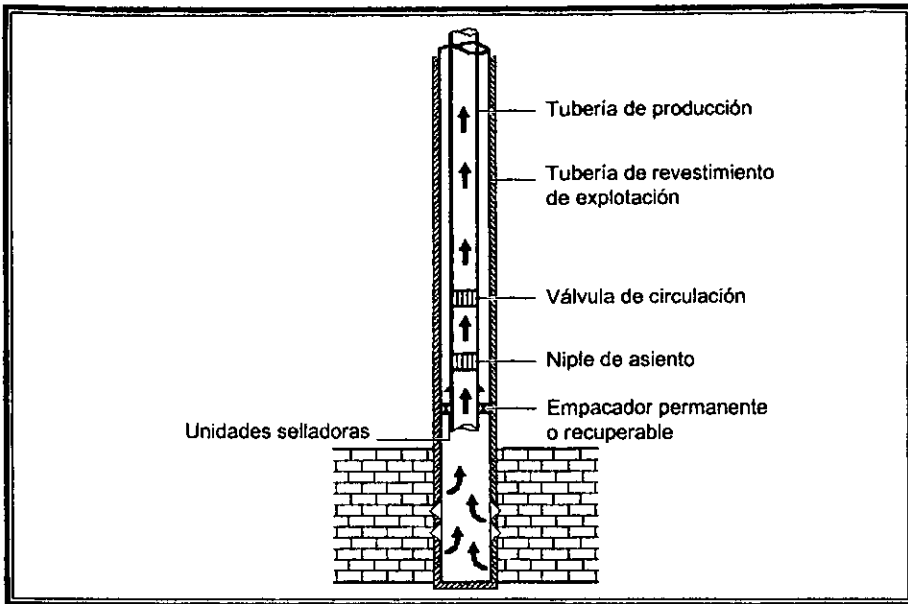


FIGURA 1.4 TERMINACIÓN SENCILLA CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN, EMPACADOR Y ACCESORIOS

VENTAJAS:

- La presión del yacimiento y la presencia de fluidos corrosivos, no afectan a la tubería de revestimiento de explotación, por estar aislada mediante el empacador y la tubería de producción.
- Cuando se quiera efectuar una estimulación se podrán alcanzar mayores presiones que en el caso de una tubería franca.
- En caso que se requiera un gasto considerable, se puede abrir la válvula de circulación para producir por la tubería de producción y por el espacio anular simultáneamente.

DESVENTAJAS:

- Mayor tiempo para la terminación debido a los diversos viajes que se hacen con diferentes herramientas, así como mayor costo.
- Mayor costo por accesorios que lleva el aparejo de producción.
- Con aceites viscosos es más difícil la explotación.
- Se puede tener una reducción del diámetro de la tubería de producción causada por la acumulación de carbonatos, parafinas, asfaltenos y/o sales minerales.

1.1.5 TERMINACIÓN SENCILLA SELECTIVA EN AGUJERO ADEMADO CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN, DOS EMPACADORES Y ACCESORIOS

Este tipo de terminación (Figura 1.5) debe efectuarse cuando se tiene más de un yacimiento por explotar cubiertos por tubería de revestimiento cementada. Se usan dos empacadores, el inferior es permanente y el superior recuperable, así como accesorios entre ambos empacadores y sobre el empacador superior.⁴

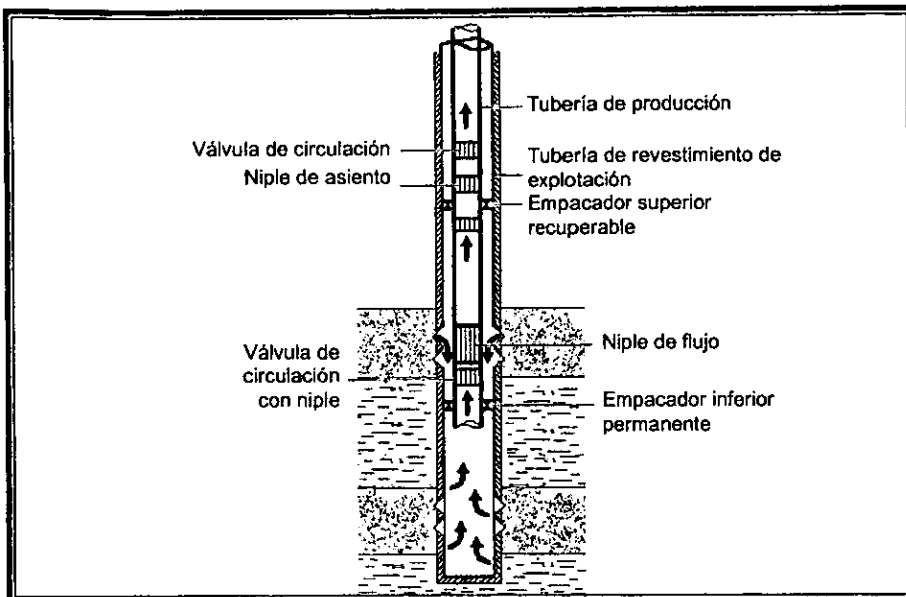


FIGURA 1.5 TERMINACIÓN SENCILLA SELECTIVA CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN, DOS EMPACADORES Y ACCESORIOS

VENTAJAS:

- Se pueden explotar simultáneamente los dos yacimientos o individualmente, utilizando para esta operación herramienta operada con línea de acero.
- Es recomendable para pozos de difícil acceso, así como para pozos marinos.

DESVENTAJAS:

- Mayor tiempo en la terminación debido a las diversas herramientas que deben bajarse antes de introducir los empacadores.
- Los disparos deben de hacerse con el pozo lleno de lodo y conexiones provisionales.

- Mayor costo.

1.1.6 TERMINACIÓN DOBLE EN AGUJERO ADEMADO CON DOS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN, DOS EMPACADORES Y ACCESORIOS

Este tipo de terminación (Figura 1.6) es recomendable cuando se tienen más de dos yacimientos productores con características diferentes (ya sea por el tipo de hidrocarburos o presiones) y se desea explotarlos al mismo tiempo.⁴

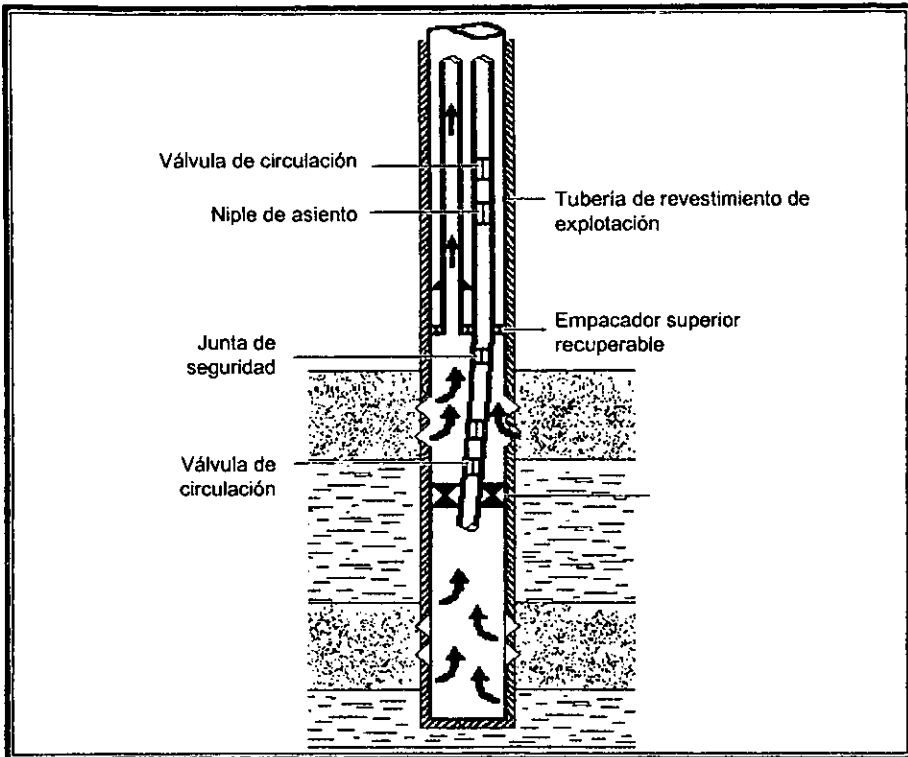


FIGURA 1.6 TERMINACIÓN DOBLE, CON DOS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN, DOS EMPACADORES Y ACCESORIOS

VENTAJAS:

- Se pueden explotar simultáneamente dos yacimientos en forma independiente, sin importar el tipo de fluido ni la presión.
- En caso de que alguno de estos dos yacimientos produzca fluidos indeseables se puede cerrar la rama sin que el pozo deje de producir.

DESVENTAJAS:

- Mayor tiempo en la terminación, más accesorios y experiencia para efectuarla.
- Al efectuar los disparos de producción el pozo generalmente está lleno de lodo, lo que en la mayoría de los casos daña la formación.
- Se tienen conexiones provisionales hasta haber introducido el aparejo de producción, para posteriormente instalar el medio árbol de válvulas para lavar el pozo.
- Mayor problema para inducirlo, debido al daño que se genera al efectuar los disparos. Este tipo de terminación debe utilizarse en casos muy especiales por lo complejo que es.

1.1.7 TERMINACIÓN DOBLE SELECTIVA EN AGUJERO ADEMADO CON DOS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN, UN EMPACADOR DOBLE, MÁS DE UN EMPACADOR SENCILLO Y ACCESORIOS

Esta terminación (Figura 1.7) es de las más complejas. Sin embargo, es conveniente su aplicación cuando se dispone de varios yacimientos en la misma estructura, ya que se pueden ir explotando individualmente utilizando equipo de línea para abrir, cerrar u obturar el acceso correspondiente.⁴

VENTAJAS:

- Se pueden explotar simultáneamente más de un yacimiento.
- Se puede abandonar temporalmente algún intervalo por presencia de gas o fluidos indeseables.
- Se puede explotar el yacimiento que más convenga.

DESVENTAJAS:

- Mayor tiempo en la terminación del pozo y como consecuencia más costo por este concepto.
- Mayor costo por los accesorios que deben instalarse al aparejo de producción.
- Se requiere amplia experiencia de campo para realizar estos trabajos.

1.1.8 OTROS TIPOS DE TERMINACIONES

Existen otros tipos de terminaciones, con tubería de revestimiento corta, que no son tan comunes como las descritas anteriormente, pero se utilizan cuando las condiciones de explotación del pozo lo requieran.

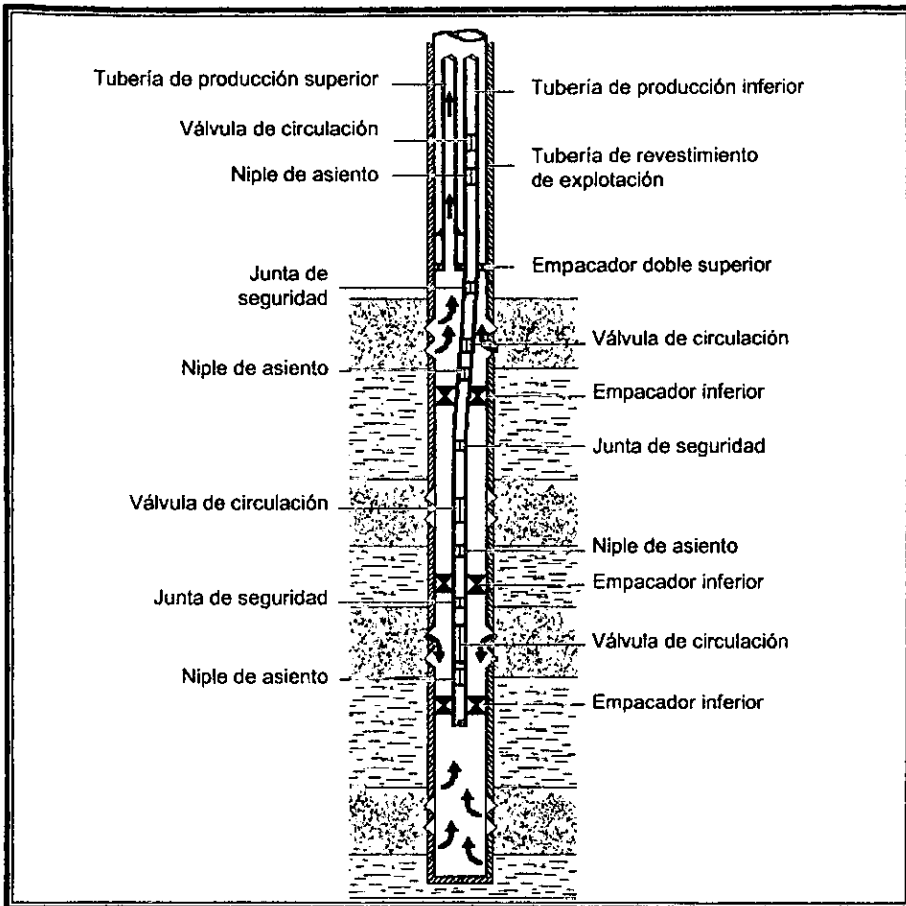


FIGURA 1.7 TERMINACIÓN DOBLE SELECTIVA CON DOS TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN, MÁS DE DOS EMPACADORES Y ACCESORIOS

Estas terminaciones son las siguientes:

- Terminación sencilla, en tubería de revestimiento corta, con empaque en tubería de revestimiento larga (Figura 1.8a).
- Terminación sencilla con empaque en tubería de revestimiento corta (Figura 1.8b).
- Terminación sencilla con "receptáculo pulido" instalado en la tubería de revestimiento corta (Figura 1.8c).

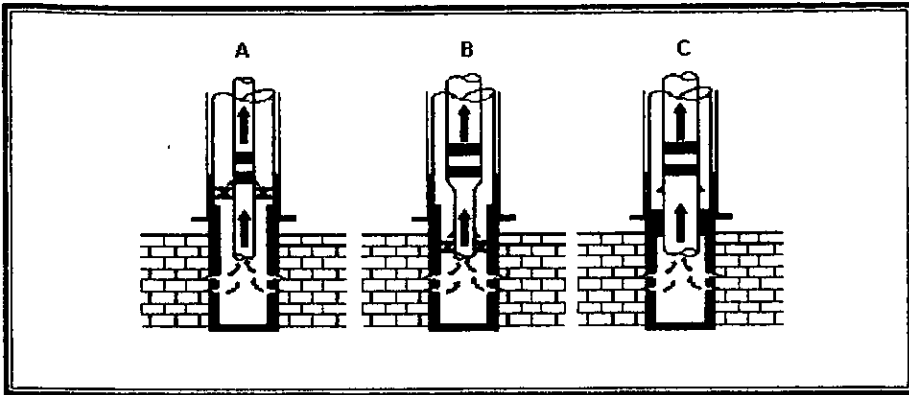


FIGURA 1.8 OTROS TIPOS DE TERMINACIÓN

1.2 ACCESORIOS SUPERFICIALES Y SUBSUPERFICIALES

1.2.1 ÁRBOL DE VÁLVULAS

Es el conjunto de válvulas de control, medidores de presión y estranguladores, ensamblados en la punta del pozo para controlar el flujo de aceite y de gas después de que el pozo ha sido perforado y terminado.²

El árbol de válvulas se conecta a las tuberías de revestimiento en la parte superior, y a la vez que las sostiene, proporciona un sello entre las sartas y permite controlar la producción del pozo.

Por lo general los árboles de válvulas se conectan a la cabeza del pozo, la cual es capaz de soportar la tubería de revestimiento, resistiendo cualquier presión que exista en el pozo.

De acuerdo con las características de producción, tales como: presiones y temperaturas de flujo (tanto de aceite como de gas), el tipo de fluidos producidos (si son fluidos corrosivos o no lo son, por ejemplo CO_2 , H_2S , etc.) y si el pozo produce material abrasivo (por ejemplo arena), entre otras, será la calidad del material a utilizar para la construcción del árbol adecuado para el pozo.

Como ilustración (Figura 1.9) se muestra el esquema de un árbol de válvulas para 3 tuberías de revestimiento. El árbol mostrado es de una aplicación para pozos terrestres.⁵

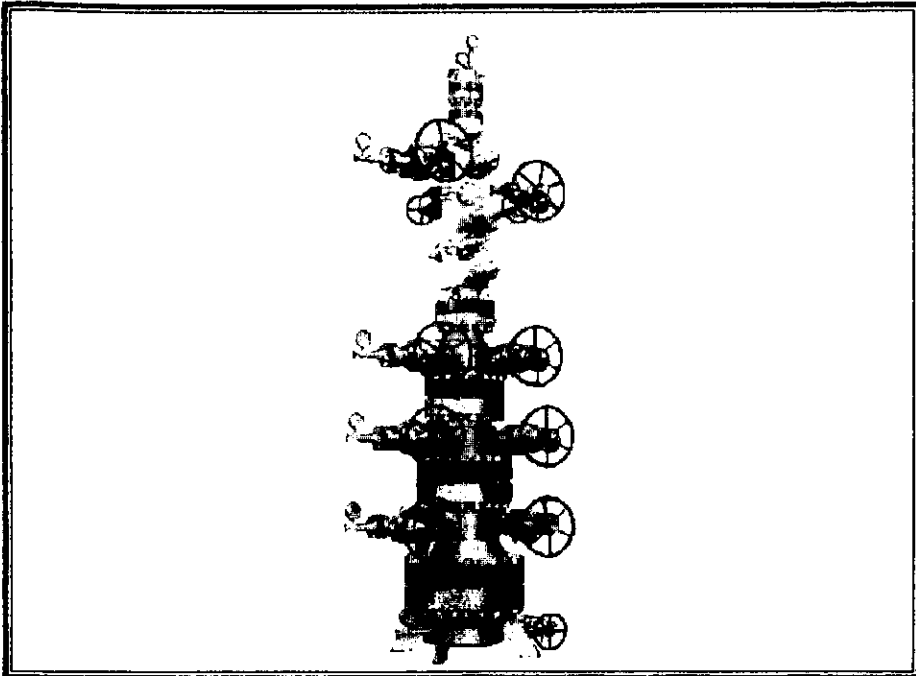


FIGURA 1.9 ÁRBOL DE VÁLVULAS PARA TRES TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

1.2.2 EMPACADORES

Los empacadores proporcionan un cierre o aislamiento entre la parte exterior de la tubería de producción y el interior de la tubería de revestimiento para prevenir el movimiento de fluidos, debido a una presión diferencial en la parte superior o inferior del área de cierre.⁴

Un empacador de producción se instala por las siguientes razones:

- Eliminar presiones en la tubería de revestimiento.
- Aislar la tubería de revestimiento de fluidos corrosivos (CO_2 , H_2S , etc.) para así lograr que la tubería se conserve en buenas condiciones durante mucho tiempo.
- Producir independientemente dos o más intervalos en un pozo.
- Aislar horizontes invadidos de agua o fluidos indeseables.
- Permitir dejar fluidos de control de alta densidad en el espacio anular T.R.-T.P., para reducir la presión diferencial a través de la tubería de producción, cuando se tienen pozos de alta presión.

En general, los empacadores están formados por las siguientes partes:

- Elementos sellantes.
- El mandril de flujo o cuerpo.
- El cono.
- Las cuñas.

Todos los tipos de empacadores están divididos en tres grandes grupos:

- Empacadores recuperables.
- Empacadores semi permanentes.
- Empacadores permanentes perforables.

EMPACADOR RECUPERABLE

Este empacador (Figura 1.10)⁵ se puede introducir con la tubería de producción que se va a emplear en la explotación del pozo. Su anclaje y desanclaje se efectúan con la misma tubería, ya sea mediante rotación y peso o rotación y tensión cuando los empacadores son mecánicos; o bien aplicando presión a través de la tubería de producción, en el caso de empacadores hidráulicos; todo dependerá del tipo que se emplee.⁴

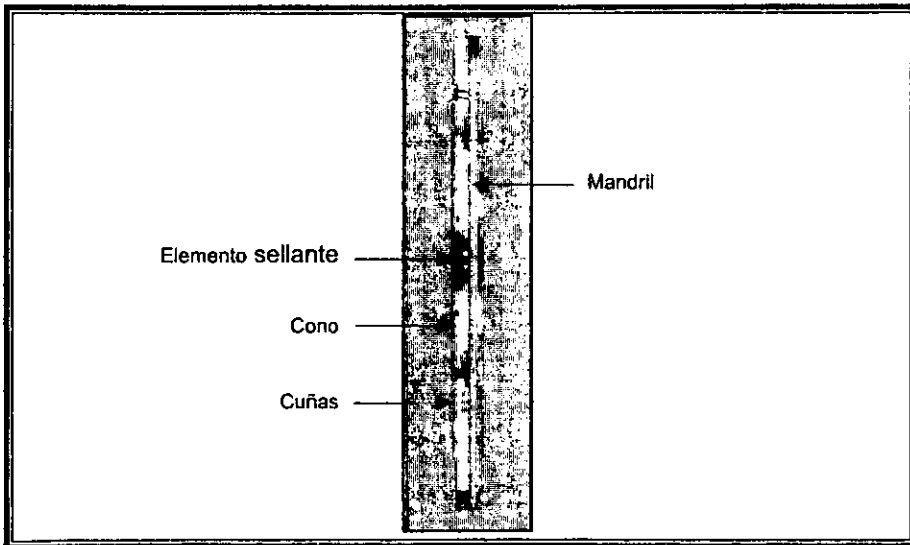


FIGURA 1.10 EMPACADOR RECUPERABLE

Estos empacadores tienen la propiedad que una vez desanclados se pueden recuperar, reparar y volver a emplear. No son recomendables para pozos con altas presiones y temperaturas, sobre todo cuando se produce gas.

EMPACADORES SEMI PERMANENTES

Se fijan a la pared de la tubería de revestimiento por medio de cuñas y empaican independientemente del peso de la tubería de producción.⁴ No están hechos de material perforable, ya que pueden ser recuperados con tubería de producción sin ser destruidos. Su recuperabilidad lo hace adaptable para usarse bajo presiones y temperaturas medias.

Puede ser bajado y anclado hidráulicamente, por rotación de tubería de producción o por medio de cable.

Se pueden usar donde la limpieza abajo del emparador es un problema o en pozos de profundidad media donde características de un emparador permanente se requieren. Soportan 8,000 lb/pg² y 180°C. El emparador semi permanente puede ser recuperado, evitando el proceso de molido de un emparador permanente.

EMPACADORES PERMANENTES PERFORABLES

Cuando se anclan quedan fijos permanentemente a la pared de la tubería de producción por medio de sus cuñas y permanecen anclados independientemente del peso o tensión a través de la tubería de producción, que actúe sobre el emparador.⁴ La Figura 1.11 muestra un emparador de este tipo.⁵

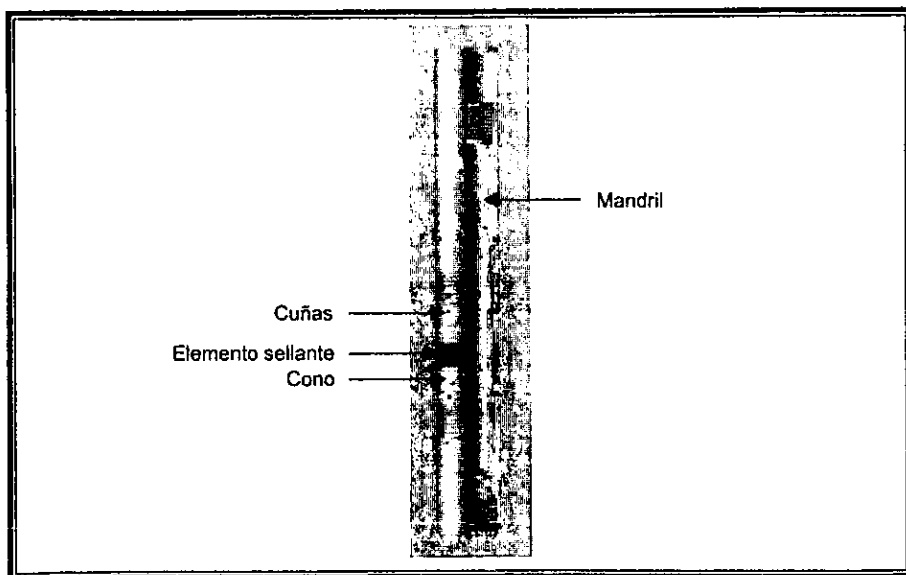


FIGURA 1.11 EMPACADOR PERMANENTE PERFORABLE

Por su método de anclaje los empacadores permanentes se dividen en:

- Por cable. Un localizador de coples junto con el cable, permite anclar el empacador a la profundidad deseada con un alto grado de precisión.
- Con tubería de producción. El empacador se introduce con la tubería y se ancla aplicando primero rotación y tensión, y posteriormente peso.
- Hidráulicos. El empacador se baja con la tubería de producción y se ancla hidráulicamente, taponando abajo del empacador (por medio de una bola o un tapón colocado en un niple) y aplicando presión en el interior del aparejo para activar el pistón que empuja las cuñas hacia fuera, para llevar a cabo el anclaje.

Los empacadores permanentes, una vez anclados, no se pueden recuperar, por lo que todas las partes del empacador están echas de material perforable. Las cuñas son accionadas por anillos, lo cual hace del empacador una herramienta confiable en pozos con altas presiones y temperaturas (10,000 lb/pg² y 200°C), pues soporta torsión o compresión extrema.

En medios corrosivos (H₂S o CO₂), el empacador permanente es el único aplicable, ya que los materiales dúctiles no se ven afectados.

1.2.3 NIPLES DE ASIENTO

Varían ampliamente en diseño y construcción, su función es la de alojar, asegurar y sellar dispositivos de control de flujo, tales como: tapones y estranguladores de fondo, o válvulas de contra presión, de seguridad o de pie, que se instalan y se recuperan por medio de una línea de acero (Figura 1.12).⁵

El niple de asiento tiene un contomo y un área pulida interiores, que permiten empacar el mandril candado, de tal manera que selle. Este mandril permite asegurar al dispositivo de control de flujo que se desea utilizar.

NIPLES SELECTIVOS

Se llaman así debido a que varios de estos niples se colocan en el aparejo de producción.⁴ Utilizando un espaciamiento apropiado entre los niples, se tiene la opción de utilizar cualquiera de ellos para colocar los dispositivos controladores de flujo. Se pueden usar para obturar el pozo y reparar las válvulas superficiales o aislar un intervalo productor.

NIPLES RETENEDORES

Se localizan en la parte inferior (al final) del aparejo, ya que tienen una restricción o un diámetro más pequeño. Dicha restricción está en la parte inferior del niple o a través de todo el niple.⁵

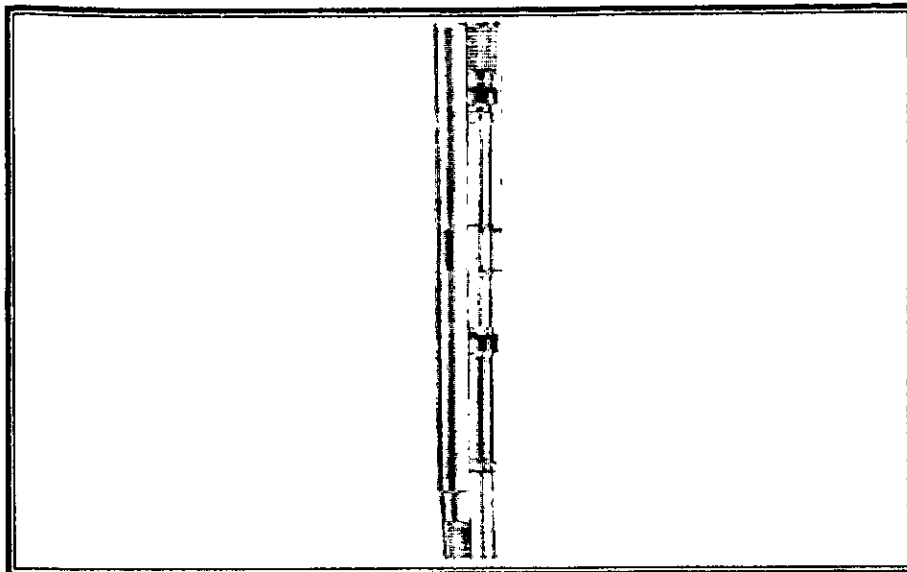


FIGURA 1.12 NIPLE DE ASIENTO

El mandril candado se coloca sobre el hombro del niple, que impide movimiento hacia abajo. El candado evita el movimiento hacia arriba cuando exista una presión diferencial a través del mismo.

Las funciones específicas de los niples retenedores son:

- Obturar la tubería de producción, para anclar empacadores durante la terminación.
- Obturar el aparejo para probar a presión la tubería de producción.
- Aislar un intervalo inferior cuando se tiene una invasión de agua en una terminación sencilla selectiva.

NIPLE PARA VÁLVULA DE SEGURIDAD SUBSUPERFICIAL CONTROLADA SUPERFICIALMENTE, (SCSSV o válvula de tormenta)

Se coloca en el aparejo, generalmente cerca de la superficie. Se usa normalmente en terminaciones marinas para alojar la válvula de seguridad llamada "de tormenta".

La línea de control (tubería de diámetro pequeño), se conecta entre el empaque del mandril candado y el niple. El empaque soporta la presión hidráulica en el área anular. Esta presión actúa sobre la válvula de seguridad, empuja hacia abajo un pistón y la mantiene así abierta. Al dejar de aplicar la presión de control sobre el pistón la válvula se cierra.

1.2.4 VÁLVULA DE SEGURIDAD

Las válvulas de seguridad están diseñadas para cerrar un pozo en caso de una emergencia. Se clasifican en dos tipos:

- Autocontroladas. Se accionan cuando se tienen cambios en la presión o en la velocidad, en el sistema de flujo. Por ejemplo, los risers marinos utilizados durante la perforación tienen válvulas de autollenado que son sensibles a los cambios de presión.
- Controladas desde la superficie. Son las válvulas de seguridad subsuperficiales controladas desde la superficie (SCSSV, Figura 1.13),⁵ conocidas también como “válvulas de tormenta” y se usan generalmente en pozos marinos, cuyo control es más difícil y en zonas donde el mal tiempo es frecuente.

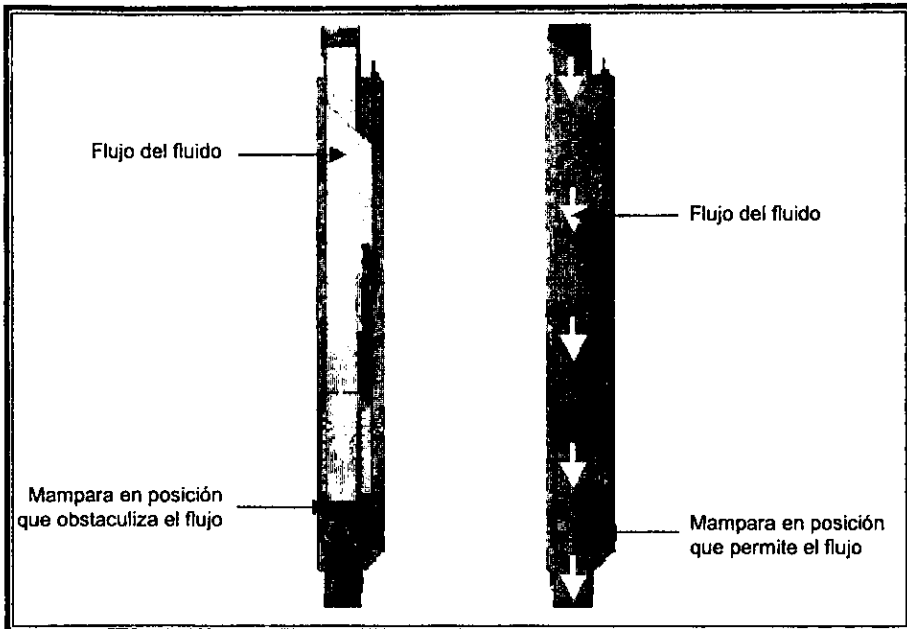


FIGURA 1.13 VÁLVULA DE TORMENTA

1.2.5 VÁLVULAS DE CIRCULACIÓN

Permiten, después de anclado el empacador, comunicar el interior de la tubería de producción con el espacio anular de la tubería de revestimiento. El tipo de válvula de circulación más usado es la de camisa interior deslizable (Figura 1.14), la cual está empacada con dos juegos de empacadores que aíslan fluidos y presiones

anulares cuando está cerrada. La comunicación se establece por medio de una herramienta, bajada con línea de acero, que mueve la camisa en una posición en la que alinea las ranuras de ésta con las del cuerpo exterior de la válvula. En otra variante de este tipo de válvula la camisa se separa completamente de los orificios exteriores y el flujo es a través de ellos.⁴

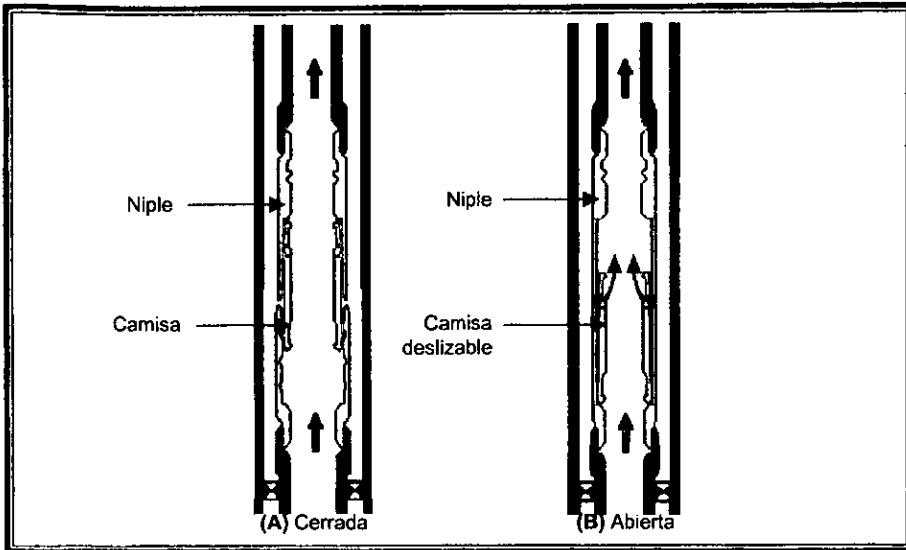


FIGURA 1.14 VÁLVULA DE CIRCULACIÓN

Otro tipo de dispositivo de circulación (Figura 1.15) es el mandril del receptáculo lateral, que proporciona una comunicación controlable removiendo, con línea de acero, una válvula "ciega" que es sustituida por una válvula de circulación.⁴

La Figura 1.15a muestra como los fluidos del espacio anular no penetran al interior de la tubería de producción, debido a los empaques colocados arriba y debajo de las aberturas del mandril. Cuando se coloca la válvula de circulación (Figura 1.15b), se puede permitir el paso del fluido a través de las aberturas del mandril y la válvula. Su principal uso es por terminar la vida fluyente del pozo, mediante una simple operación con línea, sin necesidad de sacar el aparejo. También se aplican estos dispositivos (mandril y válvula) para inyectar inhibidores de corrosión, al interior de la tubería de producción, en pozos que producen hidrocarburos con H_2S y/o CO_2 (Figura 1.16).

1.2.6 JUNTA DE EXPANSIÓN

Su función es absorber las contracciones y elongaciones de la sarta de la tubería de producción, causada por cambios en la presión y en la temperatura durante las

operaciones del pozo, eliminando excesos de carga en el empacador y en la cabeza del pozo, así como esfuerzos extremos sobre la tubería de producción.⁵

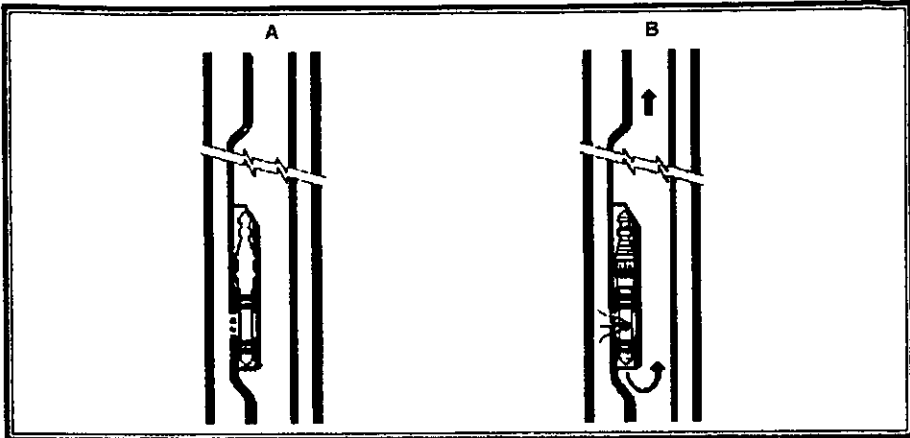


FIGURA 1.15 A.- MANDRIL CON RECEPTÁCULO LATERAL CONTENIENDO UNA VÁLVULA CIEGA, B.- MANDRIL CON VÁLVULA DE CIRCULACIÓN INSTALADA CON CABLE

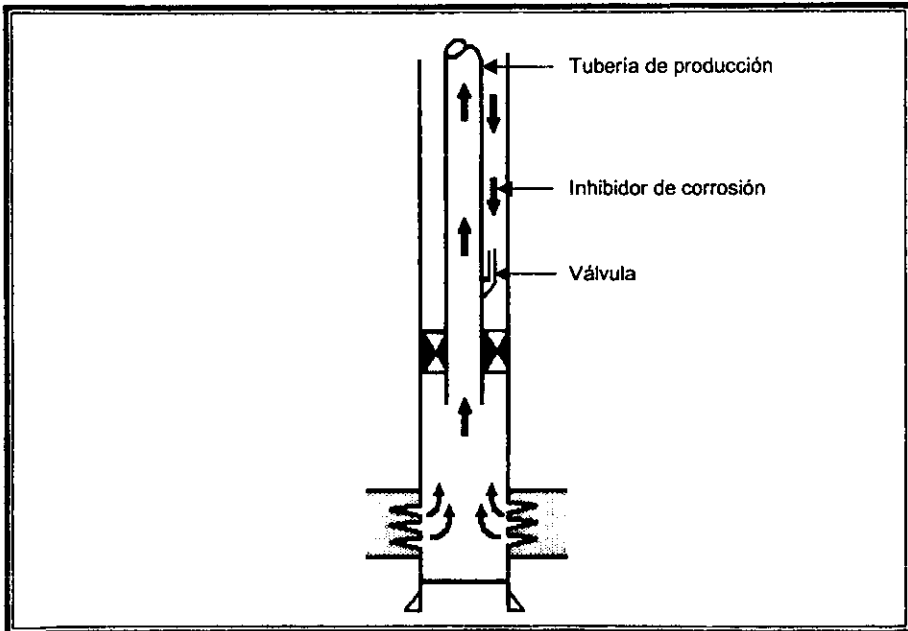


FIGURA 1.16 TERMINACIÓN CON VÁLVULA DE BOMBEO NEUMÁTICO

La junta de expansión, Figura 1.17, se coloca arriba del empacador, junto con un dispositivo de anclaje que impide el movimiento de la unidad de sellos (multi-V). Su longitud es función de las elongaciones y contracciones esperadas de la tubería de producción.

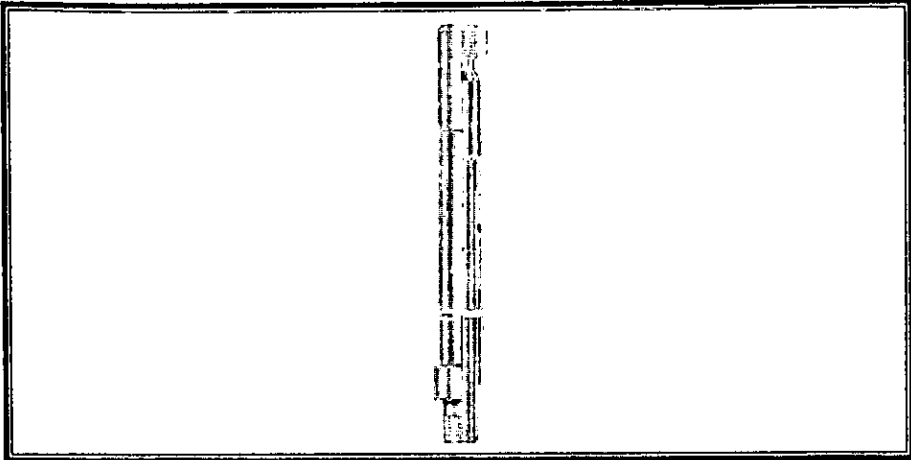


FIGURA 1.17 JUNTA DE EXPANSIÓN

1.2.7 UNIDAD DE SELLOS (Multi-V), JUNTA DE SEGURIDAD, COPLES DE FLUJO Y JUNTAS DE ABRASIÓN

La unidad de sellos, Figura 1.18,⁵ permite movimiento de la tubería de producción en el momento que se tengan elongaciones y contracciones las cuales determinan su longitud. Además forma un sello entre la tubería de producción y el mandril de flujo del empacador.

La junta de seguridad se utiliza en terminaciones sencillas selectivas o bien en terminaciones dobles. Su función principal es la de desconectar la tubería de producción en los empacadores.

Las juntas de abrasión son juntas protectoras que se colocan enfrente del intervalo disparado, para oponer resistencia a la acción de chorro del flujo de la formación sobre el aparejo. Se utilizan cuando se anticipa abrasión extrema por la aportación de partículas de arena con los fluidos producidos. Su longitud de 3 a 6 m. (Figura 1.19).⁵

Los coples de flujo son utilizados para evitar los efectos de erosión. Son instalados arriba y abajo de las restricciones de flujo (causadas por los diversos tipos de accesorios superficiales) en la sarta de la tubería de producción, donde la turbulencia causa erosión. Un cople de flujo tiene un diámetro interior regulado y

un espesor de pared cerca del doble de la tubería de producción, y tiene una longitud de 1.2 a 1.8 m.

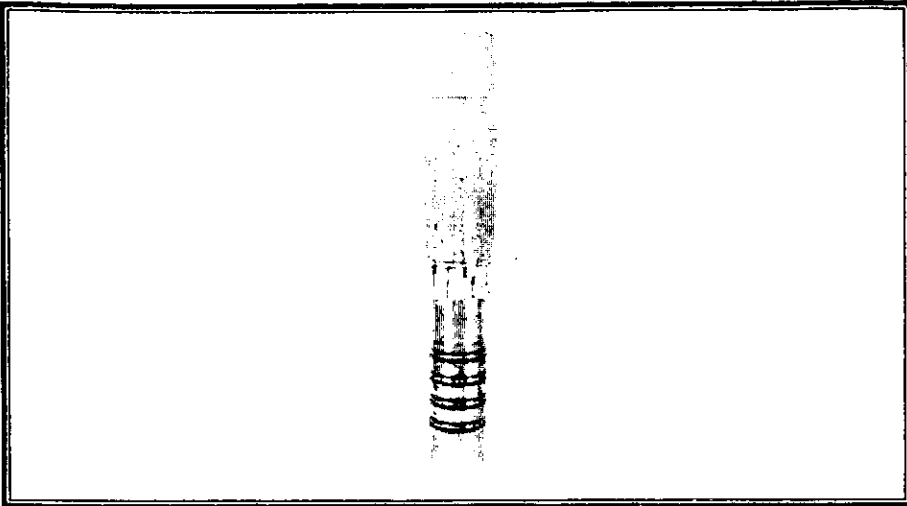


FIGURA 1.18 UNIDAD DE SELLOS MULTI-V

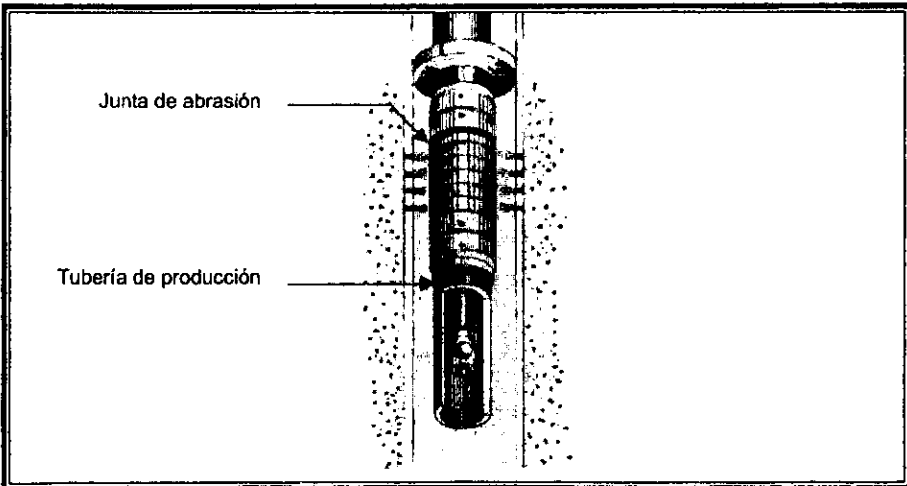


FIGURA 1.20 JUNTA DE ABRASIÓN

Cabe señalar que entre más accesorios subsuperficiales se le coloquen al aparejo de producción, mayores serán las pérdidas de presión por fricción lo que repercutirá en la selección adecuada del aparejo de producción mismo.

2 SELECCIÓN DEL INTERVALO A DISPARAR

La selección del intervalo a disparar incluye un análisis profundo que se lleva a cabo por especialistas de diversas áreas, antes de tomar la decisión final. En dichos grupos de especialistas se consideran desde geólogos, ingenieros de yacimientos, geofísicos, de producción y de operación, entre otros. Las fases del proceso de selección de intervalos a disparar ocupan a áreas como las siguientes, según se delimita en el proceso en sí.

- Geología regional y estructural
- Descripción de yacimientos
- Caracterización de yacimientos
- Diseño de la explotación
- Diseño de las intervenciones
- Aspectos operativos.

El aspecto definido por la geología indica las generalidades y características del yacimiento, desde un punto de vista de la formación y configuración general del yacimiento. También se contemplan algunos aspectos referentes al proceso de formación y explicación del modelo geológico del yacimiento.

La descripción del yacimiento indica las características físicas más probables de la configuración del yacimiento. Es decir, se explican los límites, fallas, cimas, bases, distribuciones de presión, saturaciones de fluidos, distribuciones de porosidad, permeabilidad, etc. Todo esto, con base en información de los pozos perforados y apoyados en la sísmica y estudios geológicos.

La caracterización de yacimientos define en este caso las características de las rocas, es decir, la petrofísica del yacimiento, basado en estudios de laboratorio sobre muestras de canal y núcleos cortados en los pozos perforados. También se incluye la descripción de los fluidos contenidos en el yacimiento y sus propiedades. Dicha caracterización queda definida por análisis PVT de laboratorio, estudios de mojabilidad, movilidad, saturaciones de fluidos, permeabilidades, presiones, etc.

En el diseño de la explotación es importante tener en cuenta las estrategias con que será producido o explotado, así como los lineamientos trazados en fases anteriores. Toda la información reunida referente a los aspectos anteriores, debe ser considerada en esta fase, a fin de obtener un diseño adecuado de cada pozo en producción. Así, se toman en cuenta la información de los registros geofísicos de los pozos a intervenir y las correlaciones de otros pozos, así como los métodos óptimos de producción. En esto último se incluye el análisis nodal del sistema de producción, contemplando diferentes opciones de explotación. Todo encaminado a una recuperación más rentable.

En el diseño de los pozos se entra al detalle de seleccionar los intervalos en forma minuciosa y en el cual se considera un análisis basado en ingeniería de detalle precisamente. Aquí se selecciona directamente de las pistas de los registros geofísicos del pozo en cuestión del que se habrá de elegir el intervalo a disparar. Como se puede ver, el aspecto casi final en el cual se realiza propiamente la selección del intervalo a disparar es el resultado de un análisis previo que permite realizar dicha selección con bases mucho más firmes y con probabilidades más altas de éxito en la obtención de producción.

Un aspecto que no se puede dejar de lado es el operativo, ya que éste contempla ciertas consideraciones de carácter técnico operativo que permiten la viabilidad de la operación de disparar. Es decir, se deben considerar cuestiones como el estado mecánico y geometría del pozo, ubicación, medio ambiente, seguridad, etc.

2.1 SELECCIÓN DEL INTERVALO PRODUCTOR

Para seleccionar adecuadamente el intervalo productor de un pozo, es necesario recopilar y analizar toda la información (petrofísica, geofísica, geológica) disponible del yacimiento.

Básicamente la selección del intervalo productor, es función del tipo de yacimiento, del mecanismo de empuje que pueda prevalecer e indiscutiblemente de las propiedades del sistema roca-fluidos del yacimiento. La determinación de la variación de las saturaciones de fluidos con la profundidad y del espesor de la zona de transición, es esencial en la selección del intervalo productor, y permite evitar la producción de gas.

A continuación se presentan los criterios que norman la selección de dicho intervalo productor, al considerar los mecanismos de desplazamiento que prevalecerán al explotar un yacimiento.

2.1.1 YACIMIENTOS QUE PRODUCEN POR EMPUJE DE GAS DISUELTO LIBERADO

Una vez iniciada en el yacimiento la liberación del gas disuelto en el aceite, al alcanzarse la presión de saturación, el mecanismo de desplazamiento del aceite se deberá, principalmente, al empuje de gas disuelto liberado.

El gas liberado no fluye inicialmente hacia los pozos sino que se acumula en forma de pequeñas burbujas aisladas, las cuales por motivo de la declinación de la presión, llegan a formar posteriormente una fase continua, que permitirá el flujo de gas hacia los pozos.³

Si se tiene un yacimiento de aceite que por sus características, producirá sin entrada de agua y sin casquete de gas (original o secundario), entonces se recomienda disparar todas las zonas productoras de aceite limpio, desde la cima hasta la base de la formación.⁴

2.1.2 YACIMIENTOS CON CASQUETE DE GAS, SIN ENTRADA DE AGUA

El empuje por capa de gas consiste en una invasión progresiva de la zona de aceite por gas, acompañada por un desplazamiento direccional de la zona del aceite fuera de la zona de gas libre y hacia los pozos productores.³ Los requerimientos básicos son:

- Que la parte superior del yacimiento contenga una alta saturación de gas
- Que exista un continuo crecimiento de la zona ocupada por el casquete de gas.

Los intervalos productores se sitúan en la parte inferior del yacimiento, procurando evitar la conificación del agua preexistente en la estructura. Los ritmos de producción se controlan para obtener un avance uniforme (horizontal) del contacto gas-aceite y evitar la prematura conificación y digitación del gas del casquete.⁴

2.1.3 YACIMIENTOS CON CONDICIONES FAVORABLES A LA SEGREGACIÓN

La segregación gravitacional o drene por gravedad, es la tendencia del aceite, gas y agua a distribuirse en el yacimiento de acuerdo con sus densidades.³

Se consideran aquéllos con grandes espesores o alto relieve estructural, alta permeabilidad vertical, aceite ligero, echado pronunciado.

Habiendo perforado los pozos en los flancos (en el caso de un anticlinal), se disparan los intervalos en la parte baja del yacimiento, para evitar la producción del casquete de gas secundario. Se debe evitar también la conificación de agua.⁴

2.1.4 YACIMIENTOS CON CASQUETE DE GAS Y CON ENTRADA DE AGUA

Los intervalos a disparar se localizan en la parte media del yacimiento, dependiendo de la intensidad de la entrada de agua o empuje de gas.⁴

- Si prevalece la entrada de agua se seleccionará arriba de la parte media
- Si prevalece la expansión de gas se seleccionará debajo de la parte media.

El objetivo es minimizar los costos de operación (reparaciones para la selección de un nuevo intervalo productor).

2.1.5 YACIMIENTOS CON ENTRADA DE AGUA, SIN CASQUETE DE GAS

El desplazamiento por la invasión de agua es en muchos sentidos similar al del casquete de gas. El desplazamiento de los hidrocarburos tiene lugar en este caso atrás y en la interfase agua-acite móvil. En este proceso el agua invade y desplaza al aceite progresivamente desde las fronteras exteriores del yacimiento hacia los pozos productores.³

Cuando la comunicación vertical es buena, el intervalo productor se sitúa en la parte superior del yacimiento.

2.1.6 YACIMIENTOS ESTRATIFICADOS CON PERMEABILIDADES DIFERENTES EN CADA ESTRATO

En este tipo de yacimientos se colocan varios empacadores con el fin de aislar los intervalos productores de aquéllos improductivos. De esta manera, se facilitará, en el futuro, realizar tratamientos de estimulación u obturamiento selectivo.

Los intervalos de producción se seleccionan considerando la geología del yacimiento y los mecanismos de desplazamiento que participaran, en forma natural o artificial, durante la explotación futura de los hidrocarburos.

2.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE YACIMIENTOS

La industria petrolera se ha vuelto cada vez más consciente de que los yacimientos presentan variaciones complejas de continuidad, en particular de sus propiedades relativas al espacio poroso (porosidad, permeabilidad y presión capilar). Dichas variaciones reflejan el proceso de depósito original y los cambios diagenéticos y tectónicos consecuentes. A menudo los modelos sencillos son inadecuados para predecir el rendimiento del yacimiento y para diseñar un esquema de administración de la producción del campo que optimice el rendimiento. Se ha vuelto más claro para los ingenieros petroleros que la optimización del rendimiento depende de manera crucial de la calidad de la descripción del yacimiento. Esto es particularmente cierto para los yacimientos heterogéneos bajo inyección de agua en los que el factor de rendimiento es muy sensible a la heterogeneidad del yacimiento y donde el conocimiento exacto de la distribución vertical y lateral de la permeabilidad es esencial. Se necesita definitivamente una descripción inicial más exacta del yacimiento.

Una clave para la descripción coherente es la utilización e integración máximas de todos los datos de todas las fuentes posibles, ya que ninguna fuente de datos por sí sola puede proporcionar una descripción completa del yacimiento.⁷ Cada fuente de datos está sujeta a limitaciones y errores. Sin embargo, se puede obtener cierta sinergia a partir de la incorporación inteligente de todos los datos existentes.

Los datos de entrada estáticos para la descripción del yacimiento provienen de:

- Los registros de servicio de cable en agujero abierto.
- Datos de muestras y recortes.
- Datos sísmicos.
- Datos sobre fluidos de yacimientos.

Los datos de muestras y registros describen una región muy poco profunda alrededor del pozo. El tamaño de una muestra típica es muy reducido en comparación con el de la capa del yacimiento. Las propiedades determinadas con base en muestras presentan, por lo tanto, más variación de los datos promediados sobre volúmenes de roca más grandes. Otras dificultades causadas por la naturaleza puntual de la medición de muestras se encuentran al relacionar la permeabilidad de las muestras con las propiedades de flujo de capas a gran escala y al definir la permeabilidad vertical, la cual a menudo depende de estrías muy delgadas de roca más compacta.

La tendencia moderna, dada la dificultad y el costo de corte de núcleos (en particular en las plataformas marinas con perforaciones desviadas), consiste en sacar muestras solamente en algunos pozos clave. Estas muestras son objeto de análisis detallado para desarrollar el modelo geológico del yacimiento y determinar una relación entre los diferentes parámetros petrofísicos de la formación (porosidad, saturaciones, permeabilidad, etc.) y los parámetros de la formación que pueden determinarse con registros. Una vez establecida tal relación, los parámetros petrofísicos de la formación (incluyendo la distribución de la permeabilidad) a menudo pueden deducirse de los datos de los registros en pozos en áreas sin datos de núcleos. Para este propósito se han desarrollado nuevas técnicas que utilizan bancos de datos de registros multidimensionales. Éstas proporcionan distribuciones continuas de los parámetros petrofísicos de la formación que son coherentes con las muestras, la información geológica, la presión y otros datos para cada pozo del campo. Por lo tanto, son un complemento importante para las técnicas de mejoramiento de la descripción de los yacimientos.

Los datos de registros también se han usado con éxito para definir y correlacionar tipos de rocas, otra información crítica para la descripción del yacimiento.

Mejoras recientes en las técnicas, fuentes y procesamiento de registros sísmicos han elevado considerablemente el papel de la información sísmica en la descripción de yacimientos, particularmente a través del modelaje y de la interpretación estratigráfica. El registro de echados también puede ayudar a identificar características estructurales y estratigráficas y a definir la inclinación y orientación de las capas.

En la mayoría de los casos, la amplia cantidad de datos de registro y otros datos disponibles sobre las rocas, así como las interpretaciones del procesamiento por computadora, no se utilizan totalmente en la descripción.

2.2.1 SÍSMICA DE POZOS

Las técnicas sísmicas constituyen una parte esencial dentro de los métodos geofísicos para la exploración del petróleo y del gas en el subsuelo.

La mayoría de los yacimientos petroleros del mundo han sido descubiertos en estructuras seleccionadas mediante los métodos sísmicos de exploración.

En vista de la importancia decisiva que reviste el método sísmico en la exploración y explotación petrolera, se han dedicado numerosos esfuerzos en el campo de la investigación y del desarrollo, con el fin de mejorar las técnicas de adquisición, procesamiento e interpretación de los datos sísmicos.

Eso también se debe a que cada vez se dificulta más la exploración petrolera ya que los yacimientos se descubren cada vez a mayor profundidad, en estructuras más complejas y en trampas de tipo estratigráfico, las cuales están tomando cada vez mayor importancia en el campo petrolero.

Si bien una parte de los esfuerzos de investigación ha sido enfocada hacia el mejoramiento de la tradicional sísmica de superficie, se ha desarrollado una nueva rama para aprovechar la perforación de los pozos y así obtener mayor y mejor información sísmica del área. Estas técnicas sísmicas de pozo las constituyen esencialmente el sismograma sintético y el perfil sísmico vertical.

Estos métodos proporcionan información sísmica mediante sondas colocadas dentro del pozo muy cercanas a los cambios litológicos y que se emplean para complementar la información sísmica obtenida en la superficie.

Los datos obtenidos mediante la sísmica de pozo, proporcionan información sobre las propiedades fundamentales de la propagación de las ondas sísmicas y asisten en el entendimiento de los procesos de reflexión y transmisión de la energía sísmica dentro de la tierra.

De esta forma, ayudan a mejorar la interpretación estructural, estratigráfica y litológica de los registros sísmicos de superficie.

2.3 EVALUACIÓN DE FORMACIONES

Otra consideración para la selección de los intervalos productores es que es necesario conocer los valores de porosidad y saturaciones de agua obtenidos de los registros.

Los registros obtenidos por medio de servicios de cable, han sido utilizados extensamente en los pozos para la localización de hidrocarburos. Constituyen una información esencial en cuanto a la determinación de las propiedades petrofísicas de

las rocas y de su capacidad de producción. Estas mediciones están basadas principalmente sobre registros de tipo eléctrico, electromagnético, nuclear y sísmico.

En este tema se presentan los parámetros del yacimiento (porosidad, saturación de agua, etc.) que se consideran para la evaluación de formaciones.

2.3.1 PARÁMETROS DEL YACIMIENTO

Una formación geológica debe reunir dos características esenciales para formar un yacimiento comercial de hidrocarburos: la capacidad de almacenamiento y la transmisibilidad de fluidos.

La roca de un yacimiento está compuesta de cementante y componentes entre los cuales subsiste un espacio relleno con fluidos. La porosidad, por definición, es el espacio de poros dividido por el volumen total de roca. Es posible determinar esta cantidad directamente en el laboratorio o estimarla por análisis de registros geofísicos.⁷

Los procesos geológicos posteriores a la sedimentación (cementación, disolución, reemplazamiento, fracturamiento) pueden modificar notablemente el volumen y la distribución de los poros. Cierta parte de los poros puede ser ocupada por arcilla secundaria, lo que contribuye a reducir el volumen de poros y también la capacidad de flujo del yacimiento.

Sólo se debe considerar para fines económicos la porosidad intercomunicada, ya que la demás porosidad no contribuye al flujo.

Así, los parámetros del yacimiento a considerar para la evaluación de formaciones son, entre otros, los siguientes:

- Porosidad.
- Saturación de hidrocarburos.
- Permeabilidad.
- Presión de formación.
- Litología.
- Contenido de arcilla.
- Profundidad y espesor del yacimiento.

Estos parámetros pueden ser obtenidos directa o indirectamente de los registros, mediante mediciones en pozo abierto o revestido.

POROSIDAD

El volumen del espacio de poros determina la capacidad de almacenamiento del yacimiento. Los registros utilizados para determinar la porosidad son: el de densidad de formación FDC o litodensidad LDT, el neutrónico compensado CNL y el sísmico BHC.

En el caso frecuente de litologías complejas, no es posible efectuar una medición independiente de la porosidad, puesto que cada uno está afectado por los minerales que forman la roca, por el porcentaje de arcillas y por la densidad de los fluidos de formación (hidrocarburo ligero, gas).⁷

SATURACIÓN DE HIDROCARBUROS

La saturación de fluidos de las formaciones se puede determinar a partir de los registros de resistividad.

La evaluación del contenido de fluido constituye el objetivo primordial del análisis de registros después de la determinación de la porosidad.⁷ La saturación de agua, S_w , es la fracción o porcentaje del volumen de poros, ocupada por el agua de la formación. La saturación de hidrocarburos, S_h , (aceite o gas) se deduce del valor de S_w por la fórmula:

$$S_h = 1 - S_w \quad (2.1)$$

Los registros de resistividad en agujero descubierto son los más usados para la determinación de saturación de agua, ya sea en la zona invadida por el fluido de perforación o bien en la zona virgen. La saturación de agua es función de la resistividad de la formación R_t (o R_{xo}), del volumen de arcilla V_{cl} , de la resistividad del agua de formación R_w (o R_{mf}) y de la porosidad efectiva ϕ .

El factor R_w (resistividad del agua de la formación) se obtiene de los datos de los registros en los intervalos acuíferos o bien por la experiencia adquirida en el área.

La saturación de hidrocarburos residuales, S_{or} , es igual a:

$$S_{or} = 1 - S_{xo} \quad (2.2)$$

La fracción de hidrocarburos móviles se obtiene por la diferencia entre los valores de S_{xo} y S_w .

La determinación de S_{xo} requiere de una medición de resistividad de investigación muy somera como el registro MSFL, mientras que el valor R_{mf} (resistividad del filtrado) se obtiene a partir de mediciones sobre muestras de filtrado de todo en superficie. Se puede obtener mejor evaluación de R_{mf} por medio de la sonda auxiliar AMS, la que registra a cada nivel del pozo la resistividad y temperatura del lodo.

La evaluación de saturación de fluidos puede ser inferida de otras técnicas como la de propagación electromagnética (DPT o EPT) en agujero abierto o la herramienta magnética nuclear (NML). En agujero revestido, el tiempo de decaimiento térmico (TDT) y la espectroscopia de rayos gamma inducidos (GST) proporcionan un análisis cuantitativo del contenido de fluidos presentes detrás del revestimiento.

PERMEABILIDAD

Mientras que los parámetros de porosidad efectiva, ϕ , y saturación de agua, S_w , definen la cantidad de hidrocarburos presentes en la formación, la permeabilidad es la que determina la capacidad de producir estos últimos, en determinadas condiciones de presión.⁷

La ecuación de Darcy define la permeabilidad absoluta, "k", mediante la fórmula siguiente:

$$k = \frac{q\mu}{A\Delta p} \quad (2.3)$$

Donde:

- q = Gasto de flujo que fluye a través de un área de sección transversal A,
- μ = Viscosidad del fluido,
- Δp = Caída de presión que ocasiona el flujo.

Los métodos para determinar la permeabilidad son los siguientes:

- Mediciones directas sobre núcleos.
- Datos de registros.
- Pruebas de formación (producción, multiprobador de formación RFT).

Es común observar grandes diferencias entre uno y otro método, lo cual conduce a ejercer cierta precaución en el análisis de los resultados.

Una prueba de formación constituye un medio ideal para determinar la permeabilidad, ya que permite medir la cantidad de fluido producida en determinadas condiciones de presión y de temperatura. Además, mientras que las pruebas de formación se efectúan generalmente en cantidad limitada sobre intervalos relativamente amplios, el multiprobador de formaciones (RFT) permite tomar mediciones sobre una gran cantidad de niveles de profundidad.

La secuencia automática de medición consiste en dos pruebas consecutivas (pre-ensayos) que permiten extraer una pequeña cantidad de fluido de la formación con diferentes gastos de extracción y el incremento subsiguiente de la presión.

El uso de los registros de producción enfocado hacia las pruebas de formación proporciona un modo para determinar los parámetros tales como:

- Presión de fondo mediante sensores de alta precisión.
- Gasto de producción "in situ" y en superficie.
- Temperatura de fondo.

- Densidad de los fluidos.

Permiten, mediante análisis de incremento y decremento de presión, resolver las ecuaciones de flujo y derivar los valores de la permeabilidad, presión de formación y factor de daño.

LITOLOGÍA

El conjunto de registros de porosidad permite resolver el sistema de incógnitas que afectan individualmente a cada registro. Los diagramas de interrelación tales como densidad-neutrón, neutrón-sónico, sónico-densidad, son de gran ayuda para la identificación de la litología y el cálculo de la porosidad. En un nivel determinado de profundidad, los valores aparentes de densidad de grano y de porosidad se obtienen por interpolación entre las líneas longitudinales y transversales del diagrama de interrelación densidad-neutrón. Si la litología de la formación es conocida, a partir de dichos valores, entonces es posible derivar las concentraciones respectivas de cada mineral y corregir la porosidad por el efecto de la litología.

CONTENIDO DE ARCILLA

La presencia de arcilla afecta en forma notable las lecturas de los registros de porosidad y de resistividad. El conocimiento de la composición mineralógica de las arcillas y su distribución en la matriz ayuda al analista de registros a predecir el comportamiento de una formación.⁷

Las arcillas depositadas en forma laminar afectan poco las características de porosidad y de permeabilidad horizontal. En cambio, cuando existen en forma dispersa, las partículas arcillosas se desarrollan en el espacio intergranular y tienden a obstruirlo parcialmente. Según el tipo de arcilla, la acumulación de las partículas entre los granos puede impedir casi totalmente el flujo de los fluidos de la formación. Por ejemplo, un contenido aún muy bajo de ilita en los poros, puede arruinar completamente la permeabilidad. Las lutitas se manifiestan generalmente por altos valores de porosidad, debido al elevado porcentaje de agua que contienen.

En intervalos arcillosos, los registros de resistividad demuestran lecturas bajas, mientras que las deflexiones del potencial espontáneo SP se ven reducidas, lo cual permite proporcionar una evaluación cuantitativa del contenido arcilloso. Sin embargo, la naturaleza misma de estos indicadores limita su uso a condiciones particulares. El indicador de resistividad encuentra su mayor utilidad en caso de formaciones saturadas de hidrocarburos donde el producto " ϕS_w " es constante. El potencial espontáneo tiene mayor aplicación en formaciones de gran espesor y con buena porosidad.

El registro de rayos gamma naturales GR permite medir el contenido de arcilla, a partir de los niveles leídos en las lutitas y en los cuerpos limpios. En las lutitas se observan generalmente concentraciones apreciables de isótopos radioactivos que resultan del decaimiento de los elementos torio, potasio y uranio, los que producen altos valores de

radioactividad, mientras que los cuerpos limpios quedan usualmente libres de tal fenómeno. Se puede entonces calibrar fácilmente la escala de rayos gamma a volumen de arcilla. Un intervalo cuya radioactividad proviene exclusivamente del uranio (sin torio ni potasio), no puede contener minerales de arcilla.

La herramienta de espectroscopia de rayos gamma naturales (NGT) permite derivar las concentraciones de los elementos torio, potasio y uranio, mediante el análisis del espectro de rayos gamma naturales generado por la roca. Además de la evaluación cuantitativa del volumen de arcilla a partir de las curvas de torio y potasio, el registro NGT puede ser utilizado en combinación con el de litodensidad para el análisis de los minerales de arcilla presentes en la roca.

PROFUNDIDAD Y ESPESOR DEL YACIMIENTO

La medición de la profundidad se efectúa mediante equipos calibrados, cuyo funcionamiento se revisa periódicamente. Los efectos de elongación del cable que resultan de su tensión en pozos profundos o la aceleración de la herramienta en agujeros pegajosos, afectan la precisión de la medición. El equipo auxiliar AMS (Auxiliary Measurement Sonde) permite, entre otras mediciones, registrar constantemente la tensión en la cabeza de la herramienta, para mejorar el control de profundidad.

Las profundidades registradas en cada bajada de herramienta, pueden ser corregidas posteriormente por efectos de desviación del pozo. El procesamiento TVD (profundidad vertical real) ejecutado en las unidades CSU (sistema computarizado integral para la adquisición y el procesamiento de datos) y en los centros de computación, utiliza los datos direccionales obtenidos durante la perforación (mutishot) o por medio de una herramienta direccional (HDT, SHDT, BGT, CGT).

La medición de profundidad obtenida con los registros, complementada con el análisis de echados de formación, constituye una fuente importante de información para los estudios de correlación, la determinación de la extensión lateral de los yacimientos y para su interpretación estructural, que es esencial para la determinación del intervalo productor.⁷

2.4 REGISTROS GEOFÍSICOS UTILIZADOS PARA LA SELECCIÓN DEL INTERVALO A DISPARAR

Los registros geofísicos intervienen en varias etapas de la realización de los pozos: durante su perforación, su terminación y finalmente durante el proceso de producción.

En agujero descubierto, proporcionan información sobre parámetros tales como el espesor del yacimiento, porosidad, saturación de fluidos, litología, ambiente geológico de depositación, presión, permeabilidad, etc.

En agujero revestido, los servicios de cable permiten efectuar con rapidez y buen control de profundidad, operaciones de disparo, colocación de accesorios (tapones, empacadores) y diversas operaciones de control (evaluación de cementación, producción, re-evaluación de intervalos).

2.4.1 REGISTROS DE RESISTIVIDAD

La resistividad de la formación, o su recíproco la conductividad, es una de las más importantes medidas en los registros de pozos. La resistividad puede ser definida como el grado al cual una sustancia resiste el flujo de una corriente eléctrica. La saturación de agua y la saturación de hidrocarburos, están basadas en los valores de resistividad.¹⁵ Los minerales sedimentarios que componen la matriz de la formación y cualquier hidrocarburo en el espacio poroso son no conductores, así que el flujo de corriente en la formación es a través del agua contenida en el espacio poroso. Por lo tanto, la resistividad de la formación depende, entre otros factores, de la cantidad y tipo de agua contenida en el espacio poroso de la formación y de la geometría estructural de los poros.

La mayoría de los registros de resistividad pueden presentar más de una medida de resistividad. Generalmente, esas medidas están combinadas con datos de otras herramientas de registros para proporcionar una descripción completa de las formaciones y fluidos encontrados.

REGISTRO DE INDUCCIÓN ELÉCTRICA

La herramienta de inducción eléctrica mide la conductividad de la formación y es más efectiva en formaciones de media a alta porosidad. La herramienta utiliza un sistema de bobina enfocada el cual mejora la respuesta en capas delgadas con muy poco efecto de capa adyacente. La presentación del registro de inducción eléctrica (Figura 2.1),⁹ incluye una curva SP, 18" normal, 18" normal amplificada y la curva de inducción en escala de conductividad y de resistividad.

El SP ayuda en la definición de capa, en la determinación de la resistividad del agua de la formación (R_w) y también proporciona información litológica.¹⁵ La curva normal ayuda en la determinación de la resistividad de la zona invadida (R_i) y proporciona datos excelentes de correlación. Las curvas de conductividad y de resistividad son efectivas en la determinación de la resistividad real (o resistividad en la zona no contaminada) de la formación (R_t) y la saturación de agua (S_w).

Las aplicaciones de este registro son:

- Determinar las resistividades de la formación.
- Correlación.
- Control de la profundidad.

El fluido de control requerido para correr este registro puede ser gas, aceite, agua o lodo. Cuando se tenga en el pozo aire, gas o un lodo de perforación base aceite, las curvas 18" normal y SP no pueden ser obtenidas. Bajo esas condiciones, la curva de rayos gama es usualmente sustituida por el SP.

Las opciones que se tienen para este registro son los registros de rayos gama, neutrón y el caliper.

REGISTRO DE DOBLE INDUCCIÓN

Este registro es una de las herramientas disponibles de resistividad más avanzadas. Es usado particularmente donde los diámetros de invasión son grandes.

En la presentación de este registro (Figura 2.2),⁹ son grabadas una curva SP y tres curvas de resistividad con diferentes profundidades de investigación. La curva de investigación de poca profundidad (o curva 16" normal) indica la resistividad en la zona lavada (R_{xo}); la curva de inducción media mide las zonas lavada e invadida (R_i); mientras que la curva de inducción profunda responde a la zona no contaminada (R_t). Las relaciones de las tres curvas indican los diámetros de invasión, así como la resistividad real.¹⁵

El registro doble inducción puede ser grabado en escala logarítmica o lineal. La presentación logarítmica permite leer un rango completo de valores de resistividad y facilita el análisis.

Las aplicaciones de este registro son:

- Determinar la resistividad real de la formación.
- Correlación.
- Determinar los diámetros de invasión.
- Control de la profundidad.

El fluido de control requerido para correr este registro puede ser gas, aceite, agua o lodo, para las curvas de inducción y rayos gama. Mientras que para las curvas SP y la de poca profundidad de investigación, se puede utilizar lodo.

Las opciones que se tienen para este registro son los registros de rayos gama, neutrón, gráfica R_{xo}/R_t y registro de velocidad acústica (sónico).

2.4.2 REGISTROS DE POROSIDAD

La correcta evaluación de la formación depende no solamente de un conocimiento de las medidas de resistividad discutidas en la sección previa, sino que también de un conocimiento del volumen disponible del total del volumen de la formación. Este

volumen es conocido como porosidad y es medido con los registros sónico, de densidad y de neutrón.¹⁵

Como la cantidad y el tipo de fluidos en la formación afectan la resistividad, este registro es esencial para determinar la cantidad del volumen de poros presente antes de que pueda ser hecha una determinación correcta del tipo de fluidos. Los registros descritos en esta sección son empleados para determinar este volumen de poros.

REGISTRO DE VELOCIDAD ACÚSTICA (SÓNICO)

El registro sónico (Figura 2.3),⁹ mide el tiempo (microseg/pie) que tarda una onda sonora en viajar a través de la formación. En formaciones sedimentarias la velocidad del sonido depende de varios factores, siendo el más importante el tipo del material de la matriz (arena, caliza, dolomita) y la porosidad. Si la invasión es poco profunda entonces los hidrocarburos en el espacio poroso pueden también afectar el tiempo de viaje.

En general, una formación más densa o consolidada tendrá un mayor tiempo de tránsito. Un incremento en el tiempo de tránsito en una litología dada indica un incremento en la porosidad.¹⁵

Una curva caliper es grabada rutinariamente con el registro Sónico. Las herramientas sónicas tienen circuitos para compensar los cambios en el diámetro del agujero o inclinaciones de la herramienta en el agujero.

Como una ayuda para la interpretación de datos geofísicos, el tiempo de tránsito sónico desde el registro puede ser integrado por una computadora de campo. Esta información está indicada en el registro cada 1,000 μ segundos.

Las aplicaciones de este registro son:

- Determinación de la porosidad de la formación en agujeros llenos de líquido.
- Excelente evaluación de la porosidad en agujeros rugosos.
- Correlación.
- Proporciona datos de velocidad en la formación para referencia sísmica.
- Identificación de litología cuando es acompañado con el registro de densidad o de neutrón.
- Es utilizado en algunas áreas para localizar zonas con presión anormal.
- Determinación de las propiedades mecánicas de la roca.
- Selección de barrenas.

El fluido de control requerido para correr este registro puede ser aceite, agua o lodo.

Las opciones que se tienen para este registro son los registros de rayos gama, el SP, neutrón, doble inducción y el tiempo de tránsito integrado.

REGISTRO DE DENSIDAD

La herramienta de densidad emplea una fuente química de radiación gama y detectores gama protegidos para medir la densidad de la formación. El número de rayos gama capaces de moverse desde la fuente al detector, es directamente proporcional a la densidad. En formaciones de baja densidad (alta porosidad), la mayoría de los rayos gama de la fuente son capaces de alcanzar al detector y ser contados. Pero como la densidad de la formación se incrementa (la porosidad disminuye), menor número de rayos gama alcanza el detector.¹⁵

Un sistema con doble detector compensa los efectos de filtrado de lodo o pequeñas irregularidades del agujero. Simultáneamente, puede ser grabada una curva de porosidad usando una densidad de grano de la formación dada (Figura 2.4).⁹

Las aplicaciones de este registro son:

- Evaluación de la porosidad.
- Identificación de litología, combinado con otros registros de porosidad.

El fluido de control requerido para correr este registro puede ser gas, aceite, agua o lodo.

Las opciones que se tienen para este registro son los registros de rayos gama, neutrón y de contacto (contact log).

REGISTRO DE NEUTRONES

El registro de neutrones (Figura 2.5),⁹ es una medida de la radiación inducida de la formación, producida por bombardeo a la formación con neutrones. Esos neutrones, emitidos desde una fuente en la herramienta de registros, son capturados por los átomos de la formación, produciendo emisión secundaria de rayos gama.¹⁵

Generalmente las calizas, dolomitas, areniscas y anhidritas de gran densidad muestran grandes niveles de radiación en el registro de neutrones. Las lutitas y arcillas muestran bajos niveles de radiación. Por lo tanto, el registro de neutrones puede ser usado para determinar la porosidad de varias formaciones, así como la litología.

Aunque la combinación de las curvas de rayos gama y la de neutrones es la más usada, las dos curvas pueden ser grabadas con muchas otras herramientas de registros.

Las aplicaciones de este registro son:

- Determinación de la porosidad.
- Identificación de litología.
- Estimar el volumen de lutitas.

- Distinguir zonas de gas de zonas de agua o aceite.

El fluido de control requerido para correr este registro puede ser gas, aceite, agua o lodo.

Las opciones que se tienen para este registro son los registros de rayos gama, el caliper y puede ser grabado con casi cualquier otro registro.

2.4.3 REGISTROS COMBINADOS

Existen combinaciones de registros diseñados para obtener simultáneamente datos referidos a la porosidad de la formación y la saturación de fluidos dentro del espacio poroso de la formación.

Los registros combinados ahorran horas hombre, tiempo de equipo y permiten procesar datos calculados de diversos servicios mientras está siendo corrido.

Se pueden dar varias combinaciones de registros, pero la más utilizada para la selección de los disparos, es el registro Inducción-Sónico.

REGISTRO COMBINADO INDUCCIÓN-SÓNICO

La combinación de los registros de resistividad y porosidad tiene distintas ventajas. Los ahorros en tiempo de equipo y la inmediata combinación de ambos parámetros son obvios.

Las curvas presentadas en esta combinación de registros (Figura 2.6),⁹ son el SP, el caliper, el de Inducción profunda, el sónico y el 16" normal con la opción de curvas como R_{wa} .

El registro Sónico es normalmente presentado en una escala lineal-logarítmica-lineal. La porción logarítmica es de dos ciclos, facilitando de esta manera la lectura de los valores de baja resistividad para las respuestas de inducción y de 16" normal (guard).

Las aplicaciones de este registro son:

- Determinar la resistividad real de la formación.
- Determinar el tiempo de tránsito de la formación.
- Determinar la resistividad aparente del agua de la formación y la saturación de agua.
- Control de la profundidad.
- Estimar el contenido de lutita.

El lodo es el fluido de control requerido para correr este registro.

Las opciones que se tienen para esta combinación son los registros de rayos gama, la curva R_{wa} y el de neutrones.

2.4.4 CURVAS OPCIONALES

Para obtener datos adicionales para la determinación de la litología y varias condiciones del pozo, pueden ser corridas curvas opcionales en conjunto con otras herramientas de registros.

CURVA DE RAYOS GAMA

La curva de rayos gama (Figura 2.7),⁹ puede ser grabada sola o con cualquier otro registro. Es una de las más usadas y adaptables curvas disponibles en la industria petrolera y puede ser corrida en agujero descubierto o en agujero revestido.

La curva de rayos gama es una medida de la radiación natural de la formación. Las fuentes de emisión de rayos gama de la formación son el potasio radioactivo, el uranio y el torio, depositados en la formación en varias cantidades. Generalmente las dolomitas, arenas, calizas, anhidritas y sales muestran bajos niveles de radiación. Las lutitas y arcillas tienen un nivel de radiación considerablemente superior. El registro de rayos gama es usado, en efecto, para determinar la litología.¹⁵

Las aplicaciones de este registro son:

- Identificación litológica.
- Correlación.
- Estimar el contenido de lutitas.
- Detección de depósitos radioactivos.

El fluido de control requerido para correr este registro es gas, aceite, agua o lodo.

2.4.5 REGISTROS ESPECIALES

REGISTRO DE ECHADOS

De todos los registros de pozos, el de echados reviste particular importancia para la determinación de los aspectos geológicos de las rocas del subsuelo.

Esta medición, procesada por computadora, proporciona al geólogo datos que, una vez integrados con la demás información geológica local de superficie y de subsuelo, permitan efectuar interpretaciones de tipo estructural (fallas, pliegues) y de tipo estratigráfico (intensidad y tipo de estratificación, discordancias, ambientes de depósito, cambios verticales de facies), así como estudios de fracturamiento.

En los años recientes el registro de Echados (Figura 2.8),⁹ ha tomado un papel importante en el desarrollo de campos nuevos y existentes.

El registro de Echados proporciona información correcta referida al echado de la formación, fallas, discordancias y otras características estructurales y estratigráficas. Adicionalmente, puede ser establecida la dirección y el grado de desviación del agujero.¹⁵ Están disponibles técnicas de correlación óptica y por computadora para obtener información de echados. La información básica de echado es presentada en un registro de resistividad para su fácil interpretación.

Existen dos tipos de registros de Echados. La herramienta de echados de tres brazos es la usual en la mayoría de las áreas. La nueva versión de cuatro brazos proporciona datos excelentes y es preferida en algunas áreas donde agujeros grandes y no cilíndricos o con gran desviación, presentan un problema.

Las aplicaciones de este registro son:

- Determinar el echado de la formación.
- Localizar fallas y discordancias.
- Interpretación estratigráfica y ambiental.
- Registra el drift del pozo.
- Identificación de fracturas.

2.4.6 SISTEMAS COMPUTARIZADOS DE ANÁLISIS DE REGISTROS

El análisis de registros de pozos es una ciencia que utiliza cada relación viable que pueda ser técnicamente soportada. Muy frecuentemente es requerido un análisis minucioso sobre largas secciones de un registro, para entenderlo completamente o identificar un intervalo productor. Con este tipo de análisis la posibilidad de error se incrementa cuando se realizan cálculos de mano repetitivos. Y muchas veces el volumen de datos y el gran número de cálculos hacen poco práctico el análisis, si éstos no son asistidos por un sistema computarizado de análisis de registros.

En el análisis por computadora, debido a una técnica suplemental de grabación, los valores de la curva pueden ser introducidos como datos. Esto permite una comparación y corrección rápida por computadora que de otra manera sería tedioso y consumiría demasiado tiempo en el proceso.

Este sistema computarizado proporciona programas de cómputo en tres categorías generales, las cuales son: cálculos de porosidad y saturación, características de la formación y técnicas de interpretación especiales.

Cada presentación proporciona un análisis comprensivo de la formación desplegado en el registro de análisis computarizado (Figura 2.9)⁹ y en una lista con respuestas en una forma numérica para un análisis adicional.

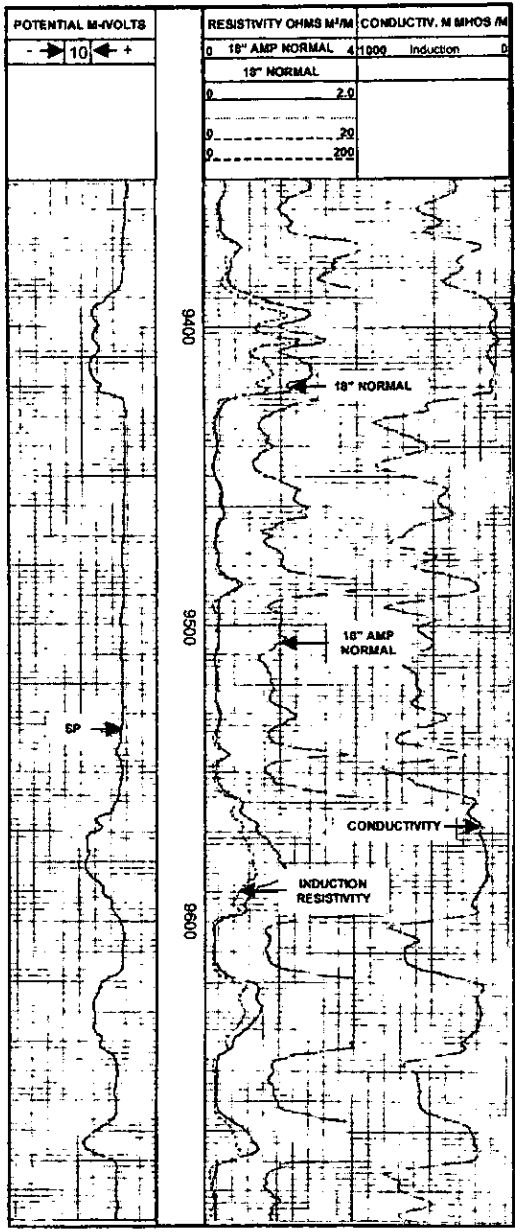


FIGURA 2.1 REGISTRO DE INDUCCIÓN ELÉCTRICA

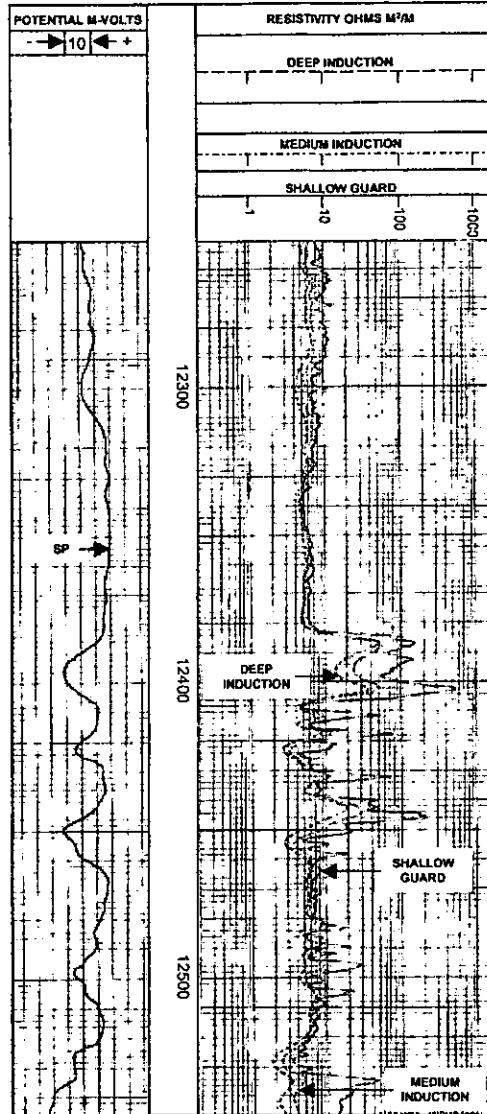


FIGURA 2.2 REGISTRO DE DOBLE INDUCCIÓN

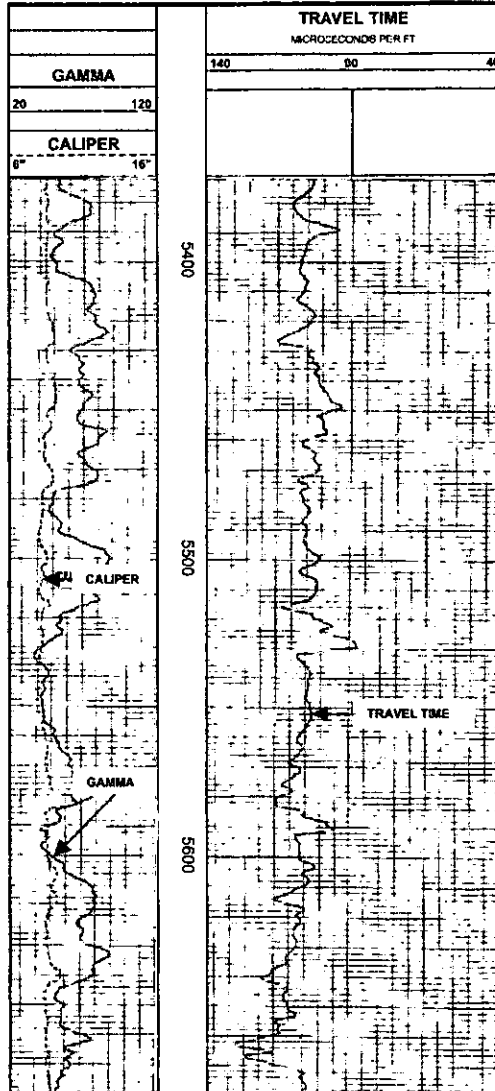


FIGURA 2.3 REGISTRO SÓNICO

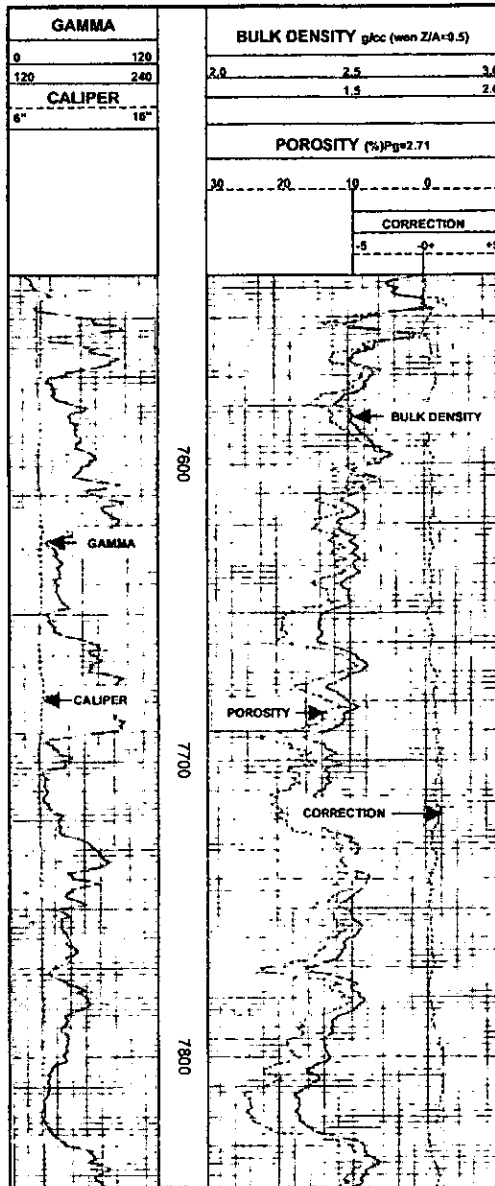


FIGURA 2.4 REGISTRO DE DENSIDAD

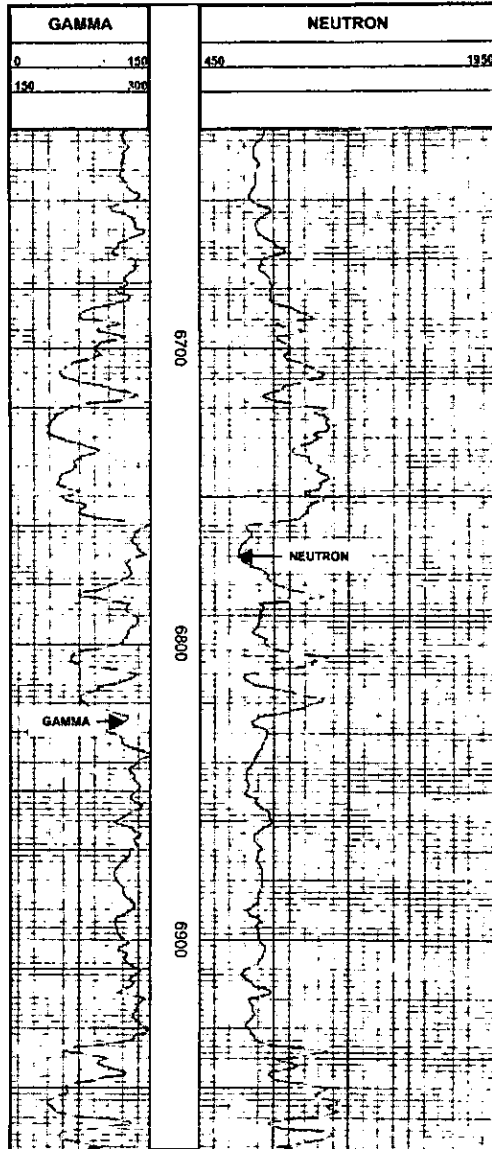


FIGURA 2.5 REGISTRO DE NEUTRONES

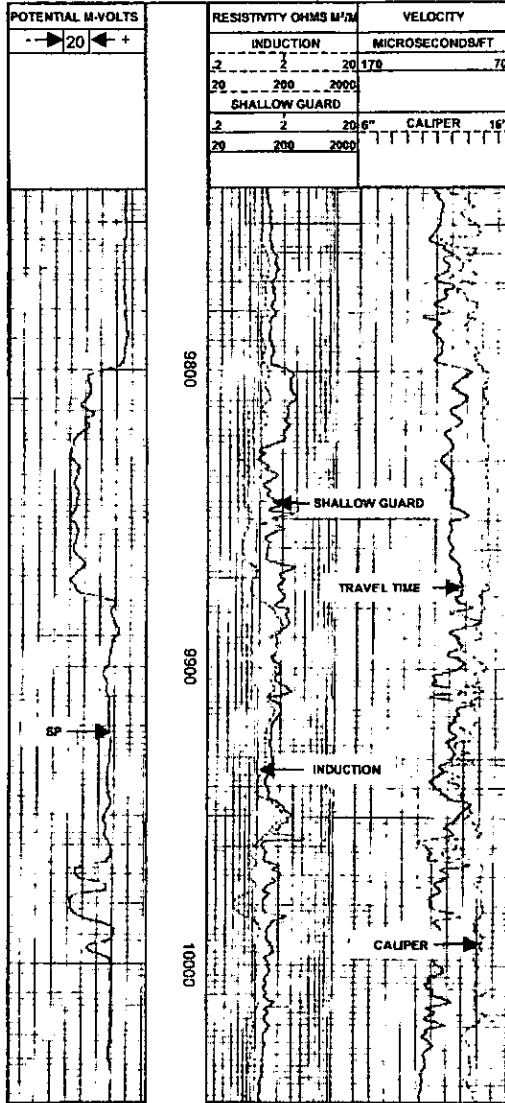


FIGURA 2.6 REGISTRO INDUCCIÓN-SÓNICO

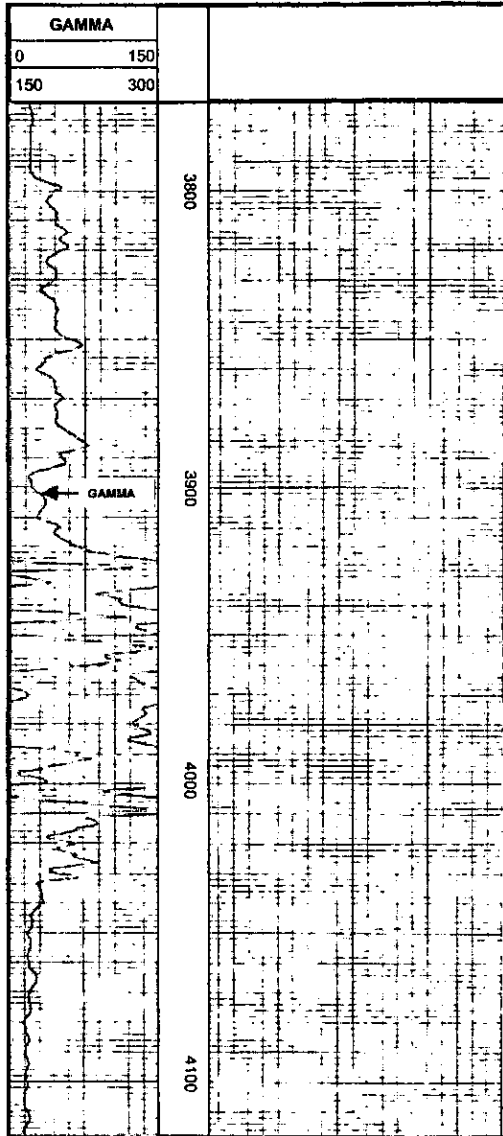


FIGURA 2.7 REGISTRO DE RAYOS GAMA

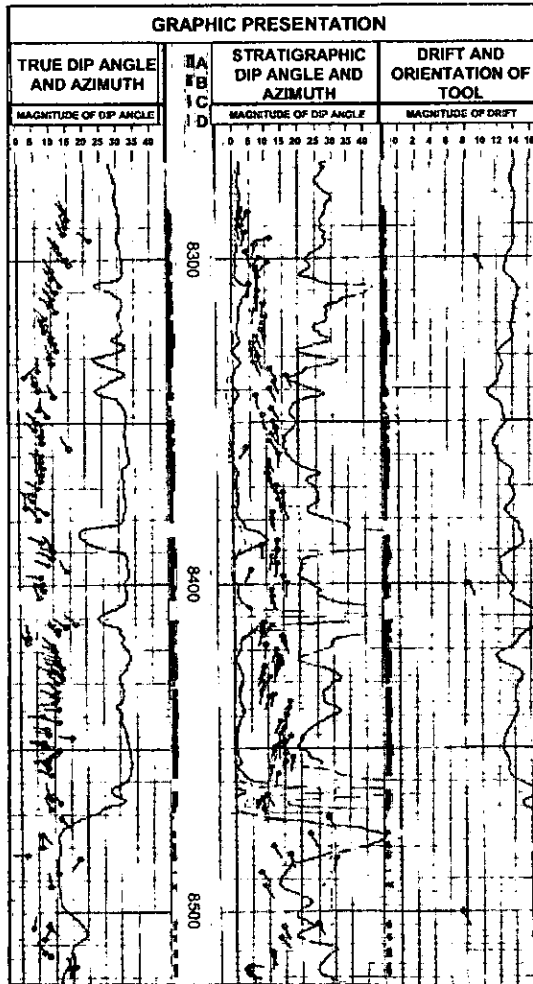


FIGURA 2.8 REGISTRO DE ECHADOS

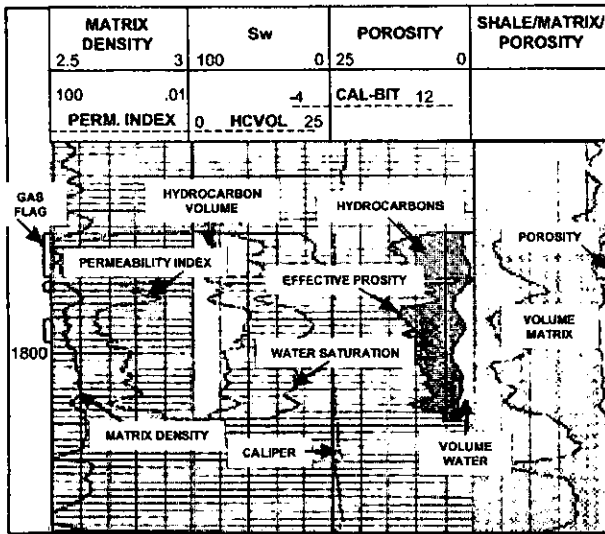


FIGURA 2.9 SISTEMAS COMPUTARIZADOS DE ANÁLISIS DE REGISTROS

3 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LOS DISPAROS

Los factores que afectan la eficiencia de los disparos pueden ser de naturaleza variada. Algunos de ellos dependen del tipo de pistolas seleccionadas, o de parámetros técnicos controlados, como el estado mecánico del pozo y las condiciones de operación presentes al efectuar los disparos. Otros dependen de propiedades o características no controladas directamente, como las propiedades de la formación, los fluidos contenidos en ella, la profundidad, entre otros.

Así, dichos factores son:

- Tipo de pistolas y sus características (pistola de carga o pistola de bala)
- Propiedades físicas de la formación
- Propiedades físicas de la tubería de revestimiento
- Condiciones ambientales
- Taponamiento de los disparos
- Limpieza de los disparos taponados
- Presión diferencial
- Limpieza de los fluidos
- Resistencia a la compresión
- Densidad de los disparos
- Fasamiento
- Control del pozo
- Calidad de la cementación
- Control de la profundidad
- Disparos orientados
- Penetración del disparo
- Diámetro del disparo

3.1 FACTORES QUE AFECTAN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS PISTOLAS DE CARGAS

La efectividad de la carga formada para la creación de las perforaciones deseadas, depende en gran parte del diseño de la carga.¹⁰ El diseño deberá ser válido para las condiciones reales que se encuentren en el fondo del pozo. Los principales factores que afectan el funcionamiento de la carga formada incluyen los parámetros del diseño de la carga, el espacio que hay entre la pistola y la tubería de revestimiento (llamado claro), las propiedades físicas de la tubería de revestimiento y de la formación y factores ambientales, tales como la presión y la temperatura.

3.1.1 PARÁMETROS QUE AFECTAN EL DISEÑO DE LA CARGA

Si bien la carga formada comprende sólo tres componentes básicos (liner, cubierta o contenedor y explosivo),¹¹ numerosos parámetros afectan el diseño de la carga: las propiedades del material del liner, la geometría del liner, las propiedades de los explosivos, el material y configuración del contenedor, las dimensiones de la carga y la configuración de la relación carga-pistola (Figura 3.1). La interacción de esos parámetros influye significativamente en la penetración del jet y el diámetro del disparo en la tubería de revestimiento.¹⁰

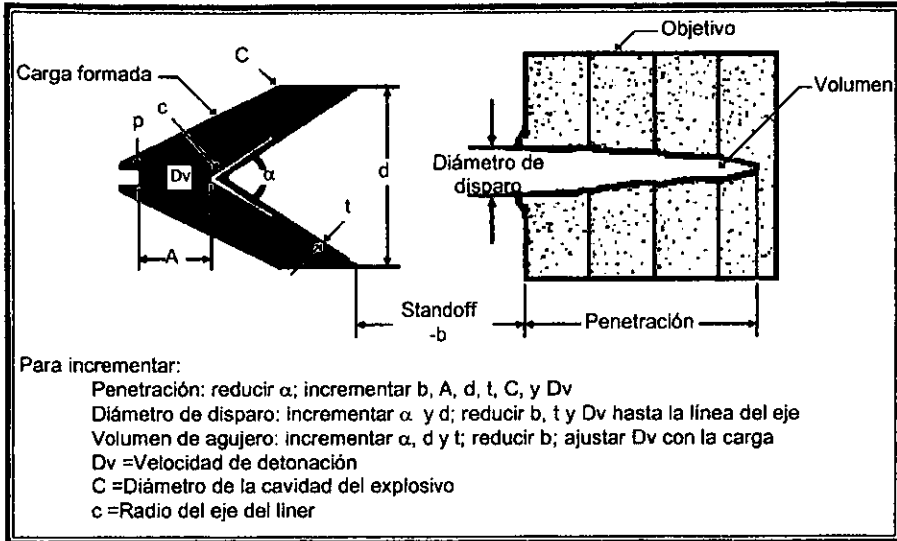


FIGURA 3.1 DISEÑO DE LOS PARÁMETROS DE LA CARGA QUE AFECTAN LA PENETRACIÓN Y LAS DIMENSIONES DEL DISPARO

LINER

Las dimensiones del liner (y de la carga) afectan la profundidad de penetración y el diámetro de disparo. A liner más grande, hay más material para convertirlo en jet. A mayor jet, hay más penetración o diámetro de disparo. Por lo tanto, con algunas excepciones, una pistola grande tendrá una carga grande y un liner grande y proporcionará la mayor profundidad de penetración y mayores diámetros de disparo.

Examinando a más detalle los parámetros del liner, indican que la geometría del liner afecta la velocidad del jet y la distribución de la masa. Generalmente, una reducción en el foco del liner (α) incrementa la velocidad del jet y la penetración, a la vez que se reduce el diámetro de disparo. Recíprocamente, un incremento en el foco da una menor velocidad del jet, un gran diámetro de jet y, consecuentemente,

agujeros grandes y poca penetración. Los diseños anteriores de cargas para agujeros grandes usadas en operaciones de empacamiento con grava, tienen liners con cimas significativamente redondas o configuración parabólica para proporcionar grandes diámetros de disparo en la tubería de revestimiento. Los liners modernos de configuración cónica, de polvos de metal presurizados, proporcionan grandes diámetros de disparo en la tubería de revestimiento. Además, los nuevos liners de polvo de metal pueden mantener un mayor diámetro de disparo sobre un amplio rango de claro entre la tubería de revestimiento y la pistola que el que los viejos liners de hoja parabólica de cobre pueden mantener.

EXPLOSIVOS

El tipo, la distribución y la densidad del explosivo afectan la velocidad (D_v) y la presión de detonación (D_p), las cuales crean la penetración del jet. Los explosivos típicamente usados en pistolas en el campo son de material granular que fueron comprimidos a una gran presión para lograr la densidad requerida para proporcionar un buen diseño de la carga. Las velocidades de penetración varían dependiendo el tipo de explosivo. Las velocidades nominales para los explosivos RDX (ciclotrimetileno trinitamina), HMX (ciclotetrametileno tetranitramina), HNS (hexanitrostilbeno) y PYX (dinitropiridino) son 26000, 30000, 23000 y 25000 pie/seg, respectivamente.

Sin embargo, la velocidad real de detonación para un explosivo dado depende de la densidad del explosivo. A mayor densidad, mayor velocidad (Figura 3.2). Debido a que la densidad del explosivo es la clave para la velocidad de detonación, se controla la distribución del explosivo cuando la carga es crítica. Las variaciones causadas por su manufactura pueden resultar en un cambio no deseado del diseño de la carga. Esas variaciones pueden comprometer la conversión simétrica y progresiva del liner en jet y pueden dar como resultado un diámetro de disparo en la tubería de revestimiento, un diámetro de la perforación y una profundidad de penetración indeseables.

Como se indicó anteriormente, un concepto erróneo fundamental es que la mayor carga, tiene un mejor funcionamiento. Sin embargo, debido a que los rangos de eficiencia de las cargas son de 20% a 30% y debido a que la calidad puede variar, no es una práctica segura igualar el funcionamiento de la carga con el peso del explosivo. Como lo indica la Figura 3.3, por ejemplo, las pistolas de 4" de diámetro, comúnmente usadas en el campo, penetran de 9 a 17" con diámetros de disparo en tubería de revestimiento de 0.35 a 0.57". Sin embargo, el peso del explosivo varía un poco de carga a carga. Nótese además que algunas pistolas de 3³/₈" penetran a mayor profundidad que algunas pistolas de 4" y los explosivos tienen 40% menos de carga que aquellas pistolas grandes.

CONTENEDOR

El diseño del contenedor que aloja al liner de la carga formada y a los explosivos, es menos importante que otros factores que afectan el funcionamiento de la carga.

Sin embargo, la ahora popular versión de acero proporciona mejor confinamiento, lo cual hace al explosivo un poco más eficiente en dirigir mas energía hacia el liner.

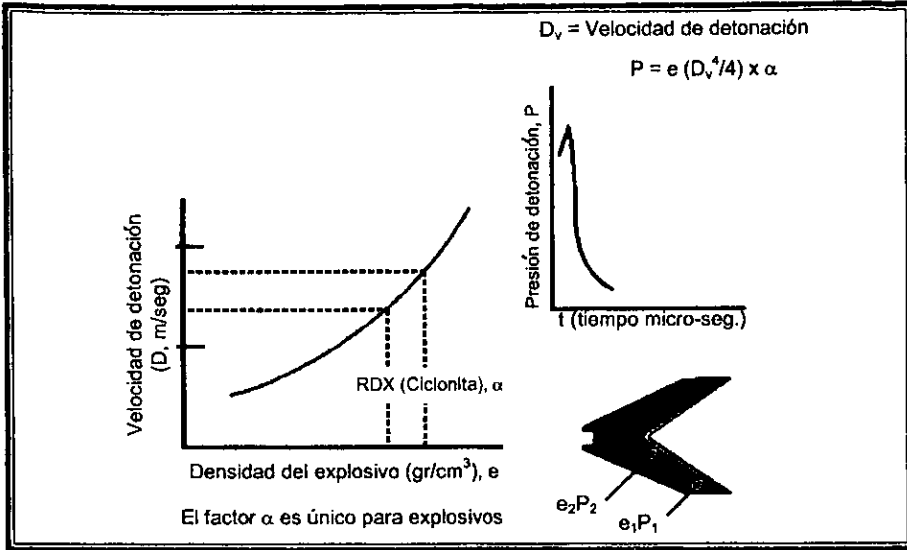


FIGURA 3.2 RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO Y LA VELOCIDAD DE DETONACIÓN

STANDOFF

El standoff es la distancia entre la base del liner y el diámetro interior del cargador e influye significativamente en la penetración y el diámetro del disparo.¹⁰ Esta distancia es un parámetro de diseño que, una vez estabilizada, permanece fija. El standoff se diseña generalmente para proporcionar un espacio adecuado para el colapso del liner y la formación del jet antes de que el liner golpee la pared interior de la pistola.¹¹ En general, a mayor standoff, es mejor el funcionamiento. Nótese en la Figura 3.4 que el standoff es diferente del claro.

La Figura 3.5 muestra el standoff para una pistola de cargador hueco típica, corrida a través de tubería de producción. Nótese el efecto del standoff sobre la penetración y el diámetro de disparo para esta carga. El standoff es la principal restricción en el funcionamiento de la carga en esta pistola en particular. El cargador de la pistola está diseñado para una operación segura y una recuperación a través de tubería de producción de 2 7/8", y las características requeridas para proporcionar el mejor funcionamiento de cargas posible en esta pistola resulta en menor standoff que el deseable. Estas características incluyen un adecuado espesor de pared del cargador para resistir presiones y para evitar el

hinchamiento excesivo durante el disparo. La situación más favorable de standoff en pistolas más grandes de cargador hueco está ilustrado en la Figura 3.6.

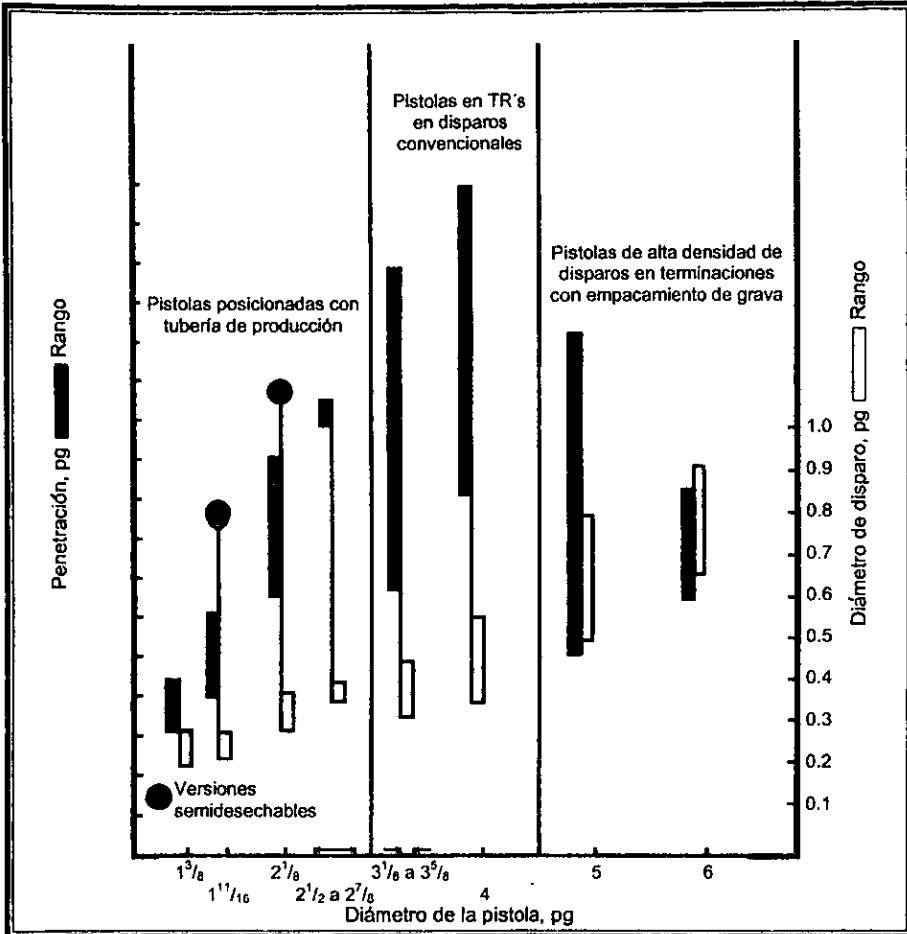


FIGURA 3.3 VARIACIONES EN EL FUNCIONAMIENTO DE LA CARGA FORMADA DE LA PISTOLA CON EL DIÁMETRO DE LA PISTOLA

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

El diseñador de la pistola y la carga equilibra varios parámetros de diseño para proporcionar el mejor funcionamiento posible del sistema, para aplicaciones en particular. Las pistolas de cargas formadas de hoy, penetran 2 ó 3 veces más profundo que las pistolas anteriores y sin sacrificar el diámetro de disparo en la tubería de revestimiento.

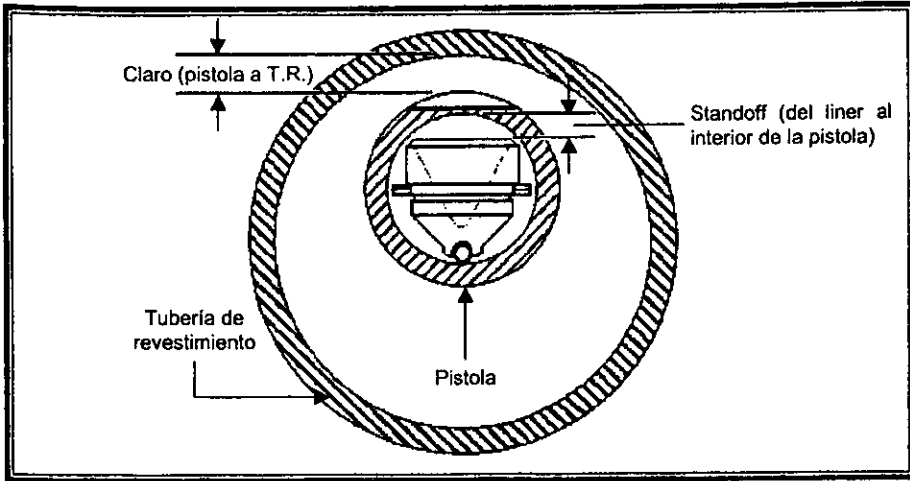


FIGURA 3.4 COMPARACIÓN DEL CLARO DE LA PISTOLA Y EL STANDOFF

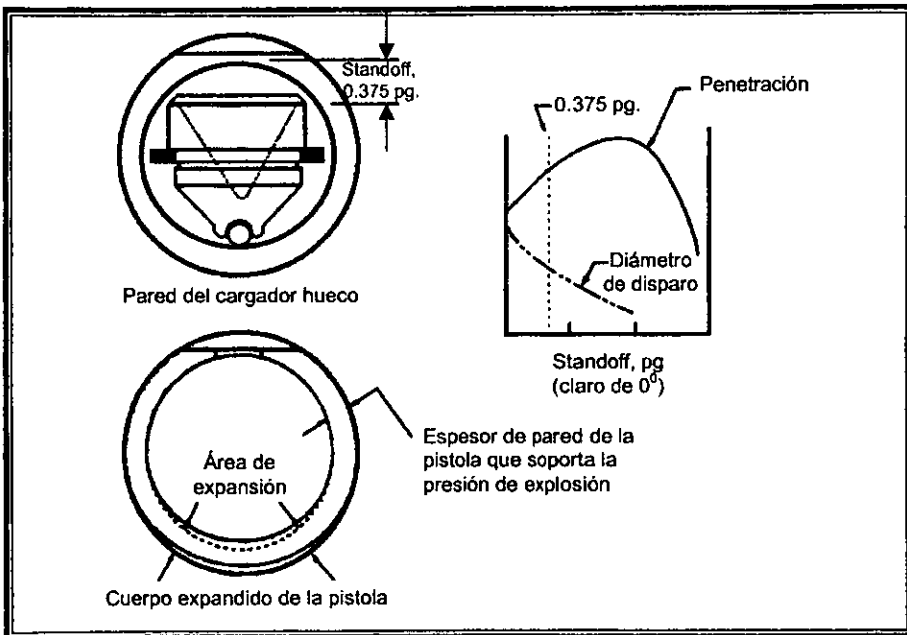


FIGURA 3.5 STANDOFF VS PENETRACIÓN Y DIÁMETRO DE DISPARO PARA UNA PISTOLA DE CARGADOR HUECO RECUPERABLE DE 2 1/8"

3.1.2 CLARO DE LA PISTOLA

El claro es la distancia que hay entre la pistola y la tubería de revestimiento a lo largo del eje del jet (Figura 3.4).¹⁰ Como se nota, el claro es diferente del standoff del liner. El claro influye significativamente en el funcionamiento de la pistola. Las pistolas generalmente operan bajo claros variables, debido a que se descentran como resultado de pequeñas desviaciones del pozo. Además, la mayoría de las pistolas están diseñadas para realizar los disparos con multifasamientos en diferentes direcciones (20°, 45°, 60°, 120°; etc.).

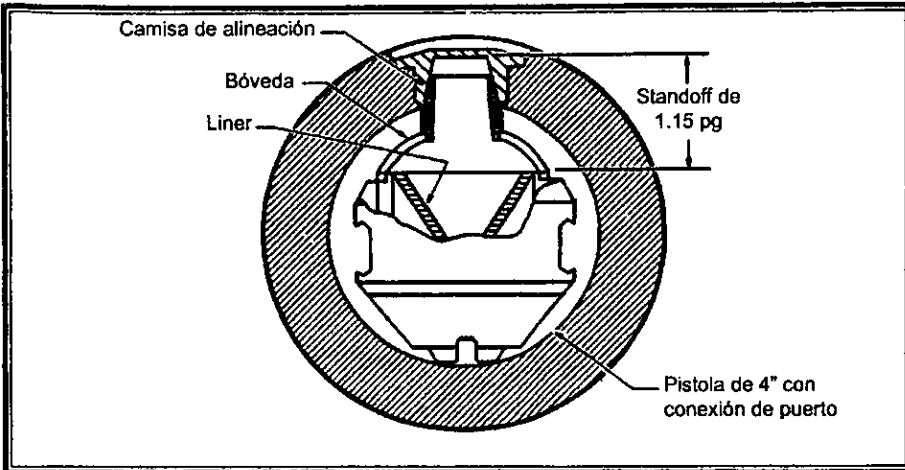


FIGURA 3.6 STANDOFF MEJORADO EN PISTOLAS GRANDES DE CARGADOR HUECO

CLARO EN PISTOLAS PARA DISPAROS EN TUBERÍA DE REVESTIMIENTO DE DIÁMETRO REDUCIDO

Estos disparos se efectúan con pistolas de 3 a 5 pg con una densidad de disparos de 4 o menor.¹¹

La penetración y el diámetro de disparo pueden variar significativamente con las variaciones del claro, pero generalmente se obtienen mejores penetración y diámetro de disparo con claros pequeños. Cada pistola tiene una relación única claro/funcionamiento. La Figura 3.7 muestra los funcionamientos de dos pistolas de 3³/₈" con diferentes profundidades de penetración. Nótese las variaciones en funcionamiento entre las dos pistolas con la variación del claro.

CLARO EN PISTOLAS PARA DISPAROS EN TERMINACIONES CON EMPACAMIENTO DE GRAVA

El claro es un factor importante cuando las pistolas son seleccionadas para terminaciones con empacamiento de grava para control de arena. Esas

terminaciones requieren disparos de gran diámetro con una alta densidad. La Figura 3.8 muestra el funcionamiento de dos diferentes pistolas de 5", que proporcionan grandes agujeros, disparadas con una descentralización de 7", en una tubería de revestimiento J-55 de 35 lb_m/pie. Nótese que para la pistola A, el diámetro del disparo disminuye gradualmente cuando se incrementa el claro de la pistola. Por otro lado, la pistola B muestra que el diámetro del disparo se incrementa al máximo hasta un claro de 0.8", entonces el diámetro decrece mientras se sigue incrementando el claro.

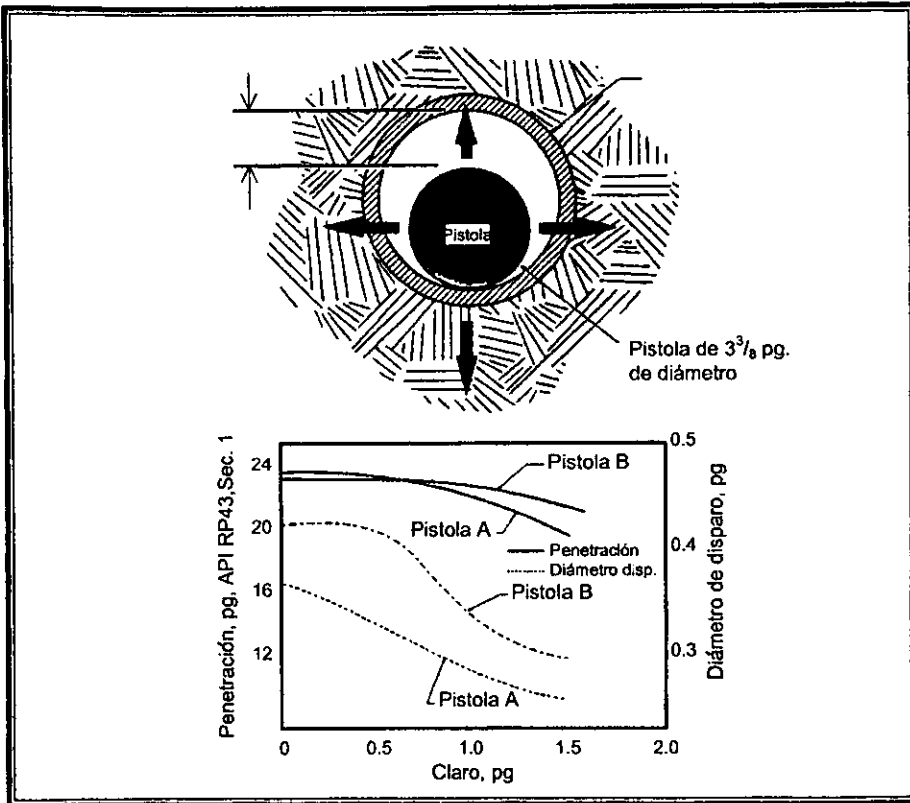


FIGURA 3.7 EFECTOS DE CLARO EN LA PENETRACIÓN Y EL DIÁMETRO DE DISPARO PARA PISTOLAS DE CARGA FORMADA DE 3 3/8"

Evidentemente, no todos los 12 disparos por pie hechos con esas pistolas descentralizadas serán tan grandes como se desea, o de un diámetro uniforme. La centralización debería resultar en disparos de dimensiones uniformes. Sin embargo, como lo indica la Figura 3.8, el funcionamiento de esas dos pistolas cuando se centralizan es parecido.

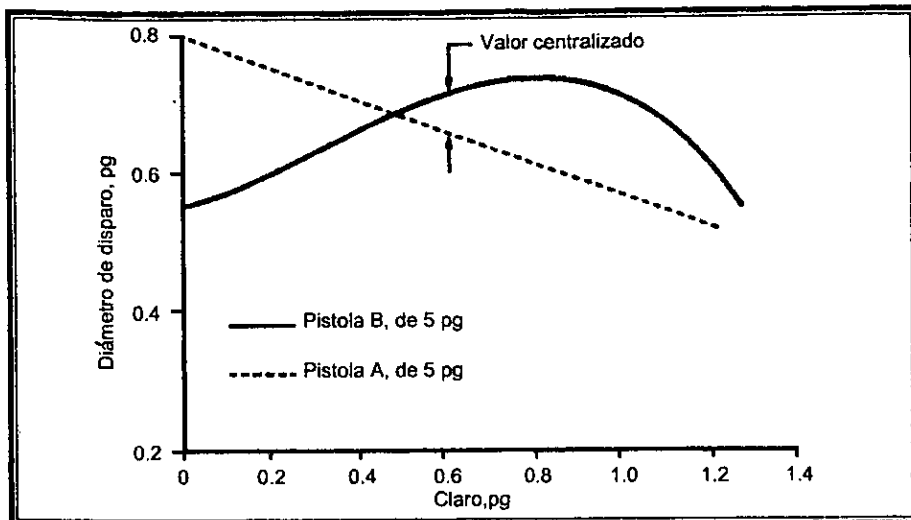


FIGURA 3.8 EFECTOS DEL CLARO EN EL DIÁMETRO DEL DISPARO PARA DOS PISTOLAS DE CARGAS FORMADAS DE 5"

CLARO EN PISTOLAS PARA DISPAROS A TRAVÉS DE TUBERÍA DE PRODUCCIÓN

Estos disparos se efectúan con pistolas conducidas normalmente a través de tubería de producción con los accesorios de fondo instalados.

El problema del claro es crítico cuando se consideran pistolas de diámetro pequeño corridas a través de tubería de producción. Considere la Figura 3.9 donde una pistola con 90° de fasamiento, con densidad de 4 disparos por pie y de $1\frac{1}{16}$ " está descentrada y se dispara en una tubería de revestimiento de 7". Nótese la diferencia significativa que hay entre los valores de la penetración y el diámetro del disparo. Solo el 50% de los disparos proporcionan un buen funcionamiento.

La centralización de la pistola corrida a través de la tubería de producción no es una solución práctica. La orientación positiva y el posicionamiento contra la tubería de revestimiento por medios mecánicos o magnéticos han proporcionado una mejor solución para el problema del claro, como se indica en la Figura 3.9. El fasamiento está limitado a 0° o a $\pm 60^\circ$, pero la penetración y el diámetro de disparo se pueden optimizar. Con métodos semejantes, el claro se mantiene en algunos valores bajos aceptables, de cero a una fracción de pulgada.

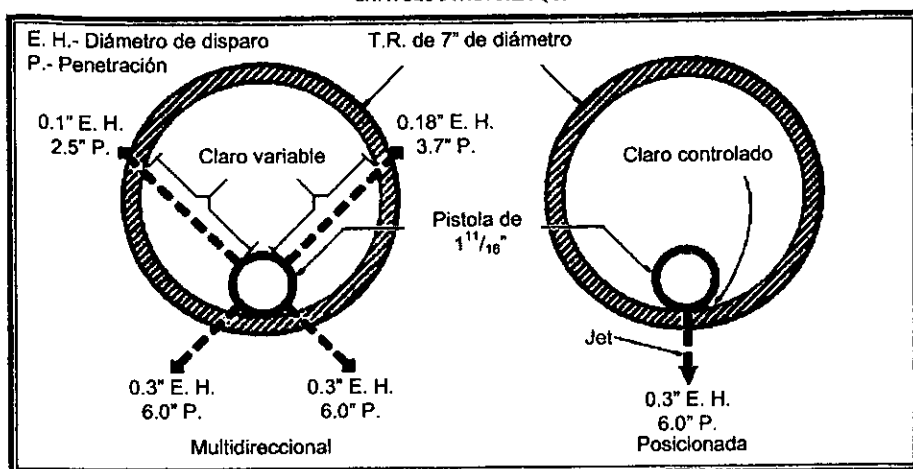


FIGURA 3.9 EFECTOS DEL CLARO EN PISTOLAS DE DIÁMETRO PEQUEÑO CORRIDAS A TRAVÉS DE TUBERÍAS

NECESIDAD DE CONTROLAR EL CLARO DE LAS PISTOLAS

Un claro excesivo con cualquier pistola tipo Jet y en especial con algunas, como se ilustra en la Figura 3.9, puede ocasionar una penetración inadecuada ó un disparo de tamaño inadecuado y de forma irregular. Las pistolas de bala deberán generalmente dispararse con un claro de 0.5", para evitar una pérdida apreciable en la penetración. Generalmente las pistolas Jet convencionales, de diámetro grande, presentan poco problema, excepto cuando se disparan en tuberías de revestimiento de 9⁵/₈" o mayores.

El control del claro puede lograrse a través de expansores de resorte, magnetos y otros procedimientos. Se necesitan, generalmente, dos magnetos, uno localizado en la parte superior y el otro en el fondo de las pistolas que se corren a través de la tubería de producción, para aumentar la probabilidad de obtener un claro adecuado. Dependiendo del diseño de las pistolas y las cargas, generalmente se obtiene una máxima penetración y diámetro de disparo con claros de 0 a 0.5 pg, cuando se usan pistolas tipo Jet. Con algunas pistolas de cargador tubular, se han observado cambios notables en el tamaño de los disparos al aumentar el claro de 0 a 2 pg. En algunos casos la centralización de las pistolas produce disparos de tamaño más consistente y satisfactorio. Cuando los claros son mayores de 2 pg, es, generalmente, conveniente descentralizar y orientar la dirección de los disparos de las pistolas.

La centralización de las pistolas no es recomendable para pistolas tipo Jet que se corren a través de la tubería de producción, ya que éstas están generalmente diseñadas para dispararse con un claro igual a cero. Las pistolas con cargas a chorro giratorias pueden generalmente aliviar el problema del claro cuando se

corren a través de las tuberías de producción. Sin embargo, se pueden tener residuos y problemas mecánicos bastante severos.

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

El posicionamiento de la pistola, la centralización o la descentralización (uno u otro), representa otra característica más en el diseño de la pistola/carga. Los centralizadores para pistolas grandes llevan consigo posibles problemas operativos. La descentralización de pistolas corridas a través de tubería de producción, limita el fasamiento del disparo. Un fasamiento aproximado a 0° , incrementa el daño comparado con aquél obtenido a partir de una terminación multifasada con la misma penetración y diámetro del disparo.

Otra consideración del funcionamiento de las pistolas de carga formada, referida a los grandes claros, es que la calidad del disparo tiende a disminuir (la geometría del disparo tiende a deteriorarse). El deterioro generalmente se caracteriza por la carencia de redondez, el aumento de la rugosidad de la superficie y el aumento de la dispersión en el diámetro y la penetración del disparo, entre uno y otro disparo.

Cuando una pistola sea seleccionada para operar en una tubería de revestimiento de un diámetro y grado en particular, los efectos del claro deberán ser evaluados cuidadosamente con la norma API-RP-43.²¹

3.1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FORMACIÓN

La profundidad de penetración es afectada significativamente por la resistencia a la compresión de la formación, los esfuerzos efectivos y las características de la roca contra la carga formada.¹⁰ Las características del disparo dependen también del tipo de roca, la resistencia y las condiciones de esfuerzo. La discusión siguiente asume que el claro entre la pistola y la tubería de revestimiento ha sido optimizado.

FORMACIONES CON PRESIÓN DE FORMACIÓN NORMAL

En rocas con presión normal de formación, la penetración disminuye cuando se incrementa la resistencia a la compresión (Figura 3.10). Por ejemplo, una pistola con penetración de cerca de 10 pulgadas, penetraría sólo 4 ó 5 pg en formaciones duras, comparada con cerca de 15 pulgadas en formaciones de baja resistencia o blandas. No se han desarrollado correlaciones que incluyan a la porosidad, la permeabilidad u otra propiedad mecánica de la roca.

Pruebas extensivas en rocas no presionadas, muestran el cambio de penetración de cerca del 5% al 6% por cada 1,000 lb/pg² de resistencia a la compresión. Las dimensiones del objetivo, las condiciones de frontera y la saturación del fluido también influyen significativamente en la penetración. Para una formación con resistencia a la compresión constante, se tiene mayor penetración en diámetros

pequeños que la obtenida en diámetros más grandes en rocas no consolidadas. La compresibilidad del sistema poro-fluido también afecta a la penetración.

FORMACIONES CON PRESIÓN DE FORMACIÓN ANORMAL

El efecto del esfuerzo sobre la roca reduce la penetración, permaneciendo constantes otros factores. Saucier y Lands exploraron los efectos del esfuerzo con núcleos de diámetro pequeños con cargas pequeñas. Ellos confirmaron los efectos de resistencia a la compresión de formaciones no presionadas pero encontraron mayores reducciones significantes en la penetración con el incremento del esfuerzo efectivo (Figura 3.11). Se encontró que el grado de reducción de la penetración depende particularmente de la formación rocosa que esté siendo evaluada.

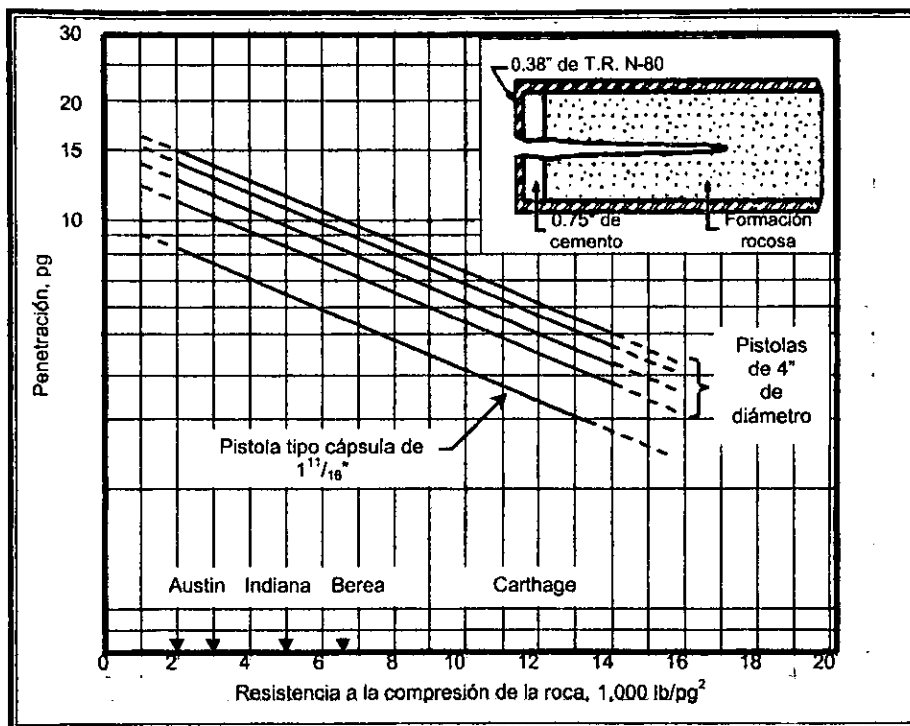


FIGURA 3.10 PENETRACIÓN DE LA CARGA FORMADA VS ESFUERZO A LA COMPRESIÓN

Los resultados de Saucier y Lands alentaron al API para dirigir más pruebas de simulación de esfuerzos con núcleos de gran diámetro, primero con núcleos de 8" y luego con núcleos de 13 1/2". Los resultados de esas pruebas confirmaron la tendencia de los datos de Saucier y Lands y más adelante mostraron que el grado de reducción en la penetración también depende de las características específicas

del jet de la carga formada (Figura 3.12). Las evaluaciones del API continúan con la caracterización del mejor funcionamiento del jet en materiales rocosos bajo condiciones representativas de aquéllas encontradas en el fondo del pozo. El objetivo es desarrollar un criterio para un modelo que predirá la penetración en el fondo del pozo y las propiedades de flujo de los disparos.

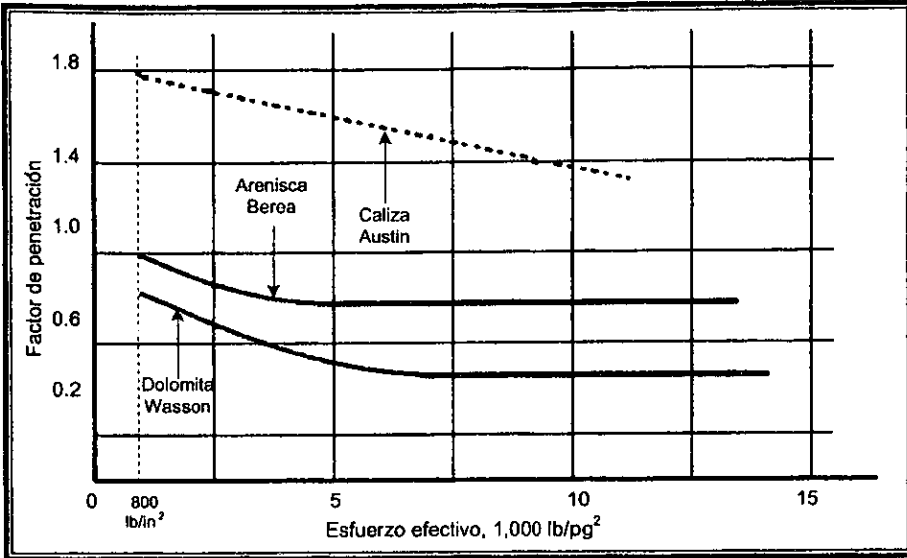


FIGURA 3.11 EFECTO DEL ESFUERZO EFECTIVO SOBRE LA PENETRACIÓN (NÚCLEOS DE 2³/₄")

Se dispone de pocos datos sobre los efectos de penetración en formaciones no consolidadas. La información que está disponible indica que el esfuerzo, en vez de la resistencia a la compresión, controlará la penetración a niveles más allá del rango de los datos de Saucier y Lands.

3.1.4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO

La resistencia de la tubería de revestimiento y el espesor de pared tienen poco efecto en la penetración, excepto cuando se disparan múltiples sartas de la tubería de revestimiento. Sin embargo, la resistencia de la tubería tiene un efecto significativo en el diámetro del agujero disparado en la tubería de revestimiento.

El espesor de la tubería de revestimiento puede también afectar las dimensiones del disparo y producir valores más pequeños que los predichos, particularmente cuando se utilizan cargas pequeñas requeridas para disparos a través de tubería de producción. Para disparos en tuberías de revestimiento múltiples con cargas de

profunda penetración, el diámetro de disparo en la segunda o tercera sarta varía de pistola a pistola y de acuerdo con el tipo de carga.

Para cargas de profunda penetración, se tienen disponibles productos de software para predecir el comportamiento del pozo, los cuales pueden calcular las dimensiones de los disparos en sartas múltiples. Sin embargo, si la información de las dimensiones de los disparos es crítica, la mejor aproximación es una prueba superficial en un simulador de sartas múltiples. Se pueden hacer aproximaciones burdas de las dimensiones de los disparos para cargas de penetración profunda.

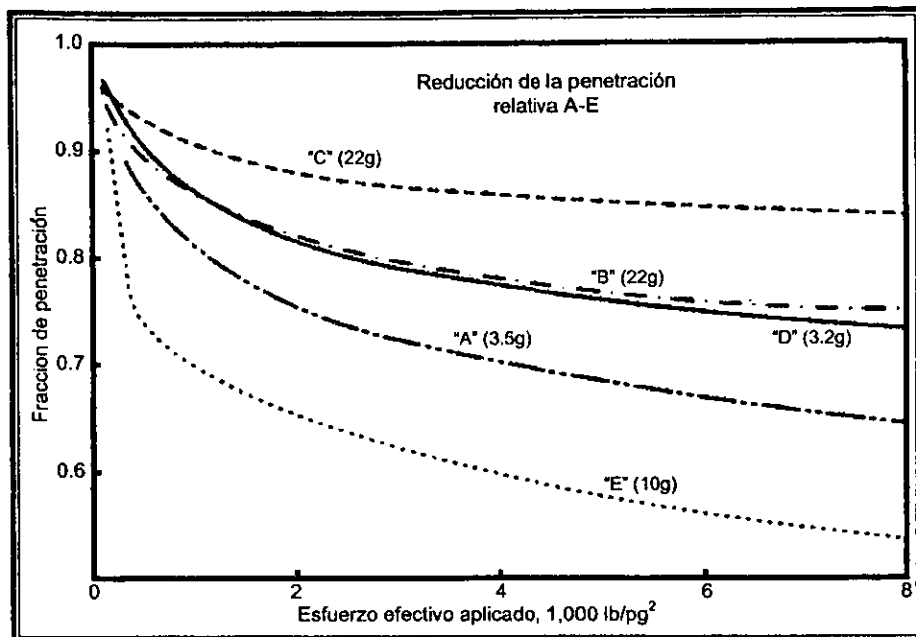


FIGURA 3.12 VARIACIÓN DE LA PENETRACIÓN CON EL ESFUERZO EFECTIVO Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL JET

3.1.5 PRESIÓN Y TEMPERATURA

La presión hidrostática, la densidad específica del fluido de terminación (asumiendo que es líquido) y la temperatura del fondo del pozo (cuando se opera dentro de los rangos del explosivo) tienen efectos indeseables en el funcionamiento de la carga formada. Sin embargo, los disparos en pozos llenos de gas pueden producir diferencias significantes en la penetración y en la dimensión del disparo en la tubería de revestimiento, comparada con los disparos en líquido, excepto cuando el claro es cero. Los efectos de disparar en gas son

frecuentemente pasados por alto debido a que los disparos de la norma API RP 43²¹ siempre son desarrollados en líquido.

Existen especificaciones sobre las presiones y temperaturas de operación para todas las pistolas. Las presiones en el fondo del pozo pueden limitar el uso de algunas pistolas con cargas expuestas. Sin embargo, cuando la presión es un problema, las pistolas convencionales con cargadores de tubo son poco usadas. Como regla general, las cargas para altas temperaturas no deben emplearse en pozos con temperatura del orden de 150-200°C. Esta recomendación está basada en lo siguiente: (1) la mayoría de las cargas para alta temperatura proporcionan poca penetración; (2) el explosivo de alta temperatura es poco sensible, originando mayores fallas en los disparos; (3) las cargas para alta temperatura son más costosas, y (4) existen pocas cargas para seleccionar.

Cuando se opere cerca del límite superior con cargas para baja temperatura pueden seguirse estas recomendaciones:

1. Pueden circularse en los pozos fluidos con baja temperatura para reducir la temperatura en el fondo del pozo. Este procedimiento es especialmente aplicable, para pistolas que se corren a través de la tubería de producción, inmediatamente después de suspender la circulación del fluido.
2. Cuando existe alguna duda con relación a si se alcanzará la temperatura límite de la pistola antes de que ésta dispare, pueden emplearse detonadores para altas temperaturas en las pistolas que contienen cargas para baja temperatura. De esta manera se evitarán los disparos accidentales debido a la alta temperatura, ya que las cargas formadas se fundirán o quemarán sin detonar, a menos que sean disparadas con el detonador de la pistola.

Para pozos con temperaturas muy altas puede no existir otra alternativa que correr el paquete completo para disparar a alta temperatura. Éste incluye el detonador, el cordón explosivo y la carga principal. Como se indicó con anterioridad, el detonador es el elemento principal del sistema. A menos que el detonador sea accionado, la carga formada no será disparada.

3.2 FACTORES QUE AFECTAN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS PISTOLAS DE BALA

Para hacer una descripción del funcionamiento de las pistolas de bala se debe tener mucha precaución, debido a que se han desarrollado muy pocos trabajos sobre las pistolas de bala. La mayoría de los trabajos se desarrollan sobre pistolas de cargas formadas debido a que éstas se aplican en el campo la mayoría de las veces, debido a su versatilidad y su mejor funcionamiento potencial. Por tal razón, los datos aquí presentados sobre los factores que afectan el funcionamiento de las

pistolas de bala deben ser vistos como una simple descripción, en vez de considerar una base para una comparación precisa con las pistolas de carga formada.

3.2.1 CLARO DE LA PISTOLA

Como con la carga formada, el claro tiene un efecto apreciable en el funcionamiento de la penetración. La Figura 3.13 muestra que se obtiene mayor penetración con claros menores de 0.5 pg, aproximadamente. La bala encuentra resistencia cuando penetra la tubería de revestimiento, resultando en un incremento en la cámara de presión. De este modo, se proporciona energía adicional a la bala. La penetración decrece a mayores claros.¹⁰

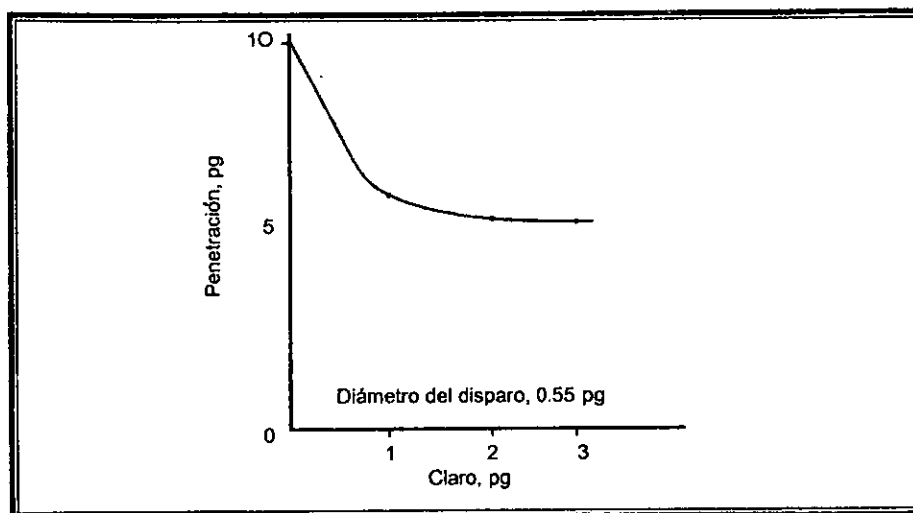


FIGURA 3.13 PENETRACIÓN vs CLARO DE UNA PISTOLA DE BALA DE 4" DE DIÁMETRO, DISPARADA A 1,000 lb/pg² Y 80°C

3.2.2 PROPIEDADES DE LA FORMACIÓN

Los esfuerzos compresivos de la formación tienen una influencia marcada en la penetración. En formaciones de gran esfuerzo, la penetración cae a menos de un tercio en comparación con la penetración de la carga formada (Figura 3.14). Sin embargo, en formaciones de bajo esfuerzo (normales), las balas penetran más profundo, casi a la misma profundidad de penetración que las pistolas de la carga formada. Existen insuficientes datos para analizar los efectos de los esfuerzos de la formación sobre la penetración de la bala. Se sospecha que la pistola de bala mostrará una reducción en la penetración con el incremento del esfuerzo, similar a la carga formada.

3.2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO

La resistencia de la tubería de revestimiento tiene un efecto significativo en la penetración de la bala. Algunas pruebas han mostrado reducciones del 50% cuando la dureza se incrementa desde 160 a 280 BHM (medida de dureza Brinell), en tuberías de revestimiento de grado J-55 al grado P-110. La resistencia de la tubería de revestimiento tiene un efecto mayor en la penetración con disparos de bala que con disparos tipo jet de carga formada.

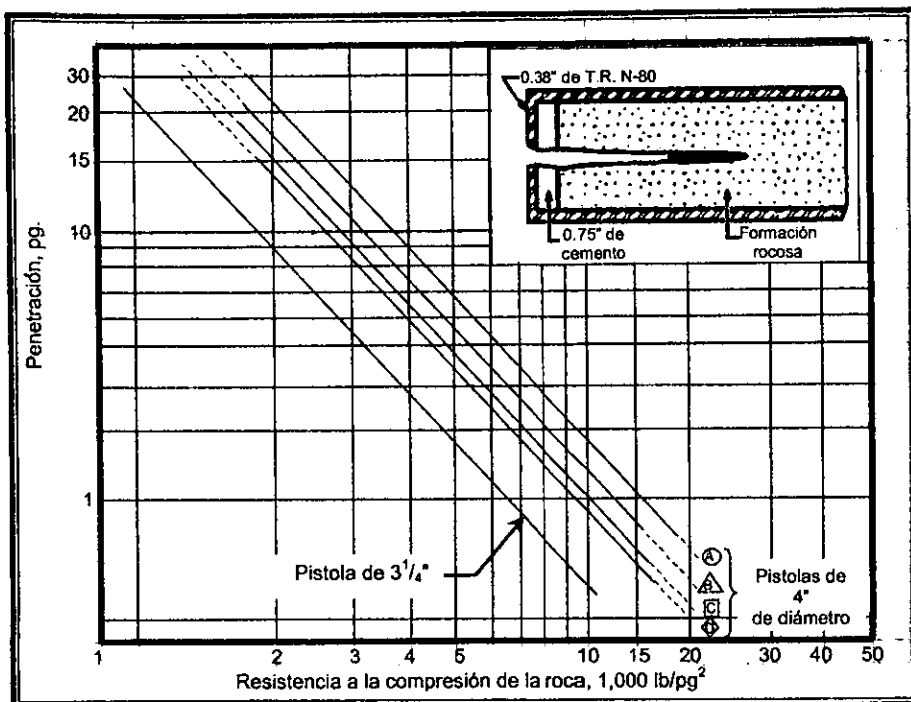


FIGURA 3.14 PENETRACIÓN DE LA BALA DE LA PISTOLA vs RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA ROCA

3.2.4 PRESIÓN Y TEMPERATURA

Un incremento de presión y/o de temperatura del pozo, puede traer consigo un incremento en la penetración de la bala. Como cualquiera de los dos factores (o ambos) se incrementan, la penetración se incrementa cuando mucho 30%. Nótese, sin embargo, que comúnmente las pistolas de bala no pueden operar a altas temperaturas, como lo hacen las pistolas de cargas formadas. Las operaciones estándar están generalmente limitadas a una temperatura de cerca de 120 °C, con propelantes especiales disponibles para servicios de 200°C.

3.3 OTROS FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LOS DISPAROS

3.3.1 TAPONAMIENTO DE LOS DISPAROS

El taponamiento de los disparos con residuos del liner metálico puede ser muy severo. Mediante el empleo de liners cónicos elaborados con metal pulverizado, la mayoría de los residuos han sido eliminados en varias de las cargas especiales. También se forman residuos del liner del tamaño de las partículas de arena o más pequeñas, pero son acarreados al fondo del agujero. Las pruebas superficiales a presión atmosférica no son confiables para evaluar este tipo de taponamiento de los disparos.

Los disparos tienden a llenarse con roca triturada de la formación, con sólidos de lodo y con residuos de las cargas cuando se dispara en el lodo. Estos tapones no son fácilmente removidos por el contra flujo. La presencia de partículas trituradas y compactas de la formación alrededor de los disparos reduce aún más la posibilidad de limpiarlos. Los lodos con alta densidad mezclados con sólidos pesados, provocan la formación de tapones densos en los disparos.

La presión diferencial requerida para iniciar el flujo, de la formación al pozo, varía. Cuando se abren algunos disparos que requieren una presión diferencial baja, el flujo a través de estos disparos dificultan la creación de la mayor caída de presión requerida para abrir más disparos. En formaciones estratificadas, como las constituidas por secuencias de lutita y arena, permanecen taponados un gran número de disparos y pueden evitar que se drenen algunas zonas específicas. Cuando están taponadas, o parcialmente obturadas, una o más zonas en un yacimiento estratificado, las pruebas de formación, las de producción y las mediciones del índice de productividad, pueden proporcionar una evaluación errónea sobre el daño del pozo, su productividad y su recuperación.

3.3.2 LIMPIEZA DE LOS DISPAROS TAPONADOS

En arenas no consolidadas las herramientas de "sondeo instantáneo" y las lavadoras de disparos han sido usadas con éxito para limpiar los disparos en muchas áreas. Si los disparos en pozos terminados en arenas, no pueden limpiarse con "herramientas de sondeo instantáneo" o lavadoras, entonces el siguiente paso consiste generalmente en abrir cada disparo con aceite o agua limpia usando bolas selladoras. Este procedimiento ocasiona que el lodo sea desplazado dentro de las fracturas de la formación. Normalmente estas fracturas se cerrarán poco después que la presión de fracturamiento sea liberada.

La acidificación de los pozos en areniscas generalmente no permitirá limpiar todos los disparos taponados con lodo, a menos que cada disparo sea aislado y fracturado, y el lodo sea desplazado dentro de la fractura de la formación.

Los tapones de lodo son más fáciles de remover de los disparos en formaciones carbonatadas, debido a que al entrar el ácido en unos cuantos disparos, generalmente disuelve una cantidad de roca suficiente para abrir otros disparos. Generalmente los pozos terminados en formaciones de caliza o dolomita se disparan en ácido, con una pequeña presión diferencial hacia la formación. Sin embargo, los disparos en aceite o agua, con una presión diferencial hacia el pozo, limpian muy satisfactoriamente.

Si una parte de la tubería de revestimiento disparada está pobremente cementada, provocando comunicación vertical atrás de la tubería y entre los disparos, las condiciones resultantes son similares a las de una terminación en agujero abierto con tubería ranurada. Si se presenta flujo de la formación, todos los disparos en la tubería de revestimiento generalmente se limpiarán. Sin embargo, los disparos en la formación podrán o no limpiarse.

El taponamiento de los disparos con parafina, asfaltenos o incrustaciones, es un gran problema en muchas partes del mundo. Los tratamientos con solventes, generalmente removerán la parafina o los asfaltenos. Si los disparos están obstruidos con incrustaciones solubles o insolubles en ácido, es generalmente aconsejable redisparar y tratar con ácido u otros productos químicos.

3.3.3 EFECTO DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL

Cuando se dispara en lodo, con una presión diferencial hacia la formación, los disparos se llenan con partículas sólidas de lodo de la formación y residuos de las cargas. Los tapones de lodo son difíciles de remover, produciendo en algunos disparos un taponamiento permanente y reduciendo la productividad del pozo.

Aún cuando se dispare en fluidos limpios tales como aceite o agua que tienen altos ritmos de filtrado, las partículas procedentes de las arcillas, los residuos de las cargas o de otro tipo, pueden originar algún taponamiento de los disparos y un daño profundo en la formación. Las formaciones con permeabilidad de 250 md o mayores, permiten que las partículas del tamaño de las arcillas se desplacen hacia los poros de la formación o por las fracturas.

En formaciones carbonatadas es frecuente obtener altas productividades de los pozos y bajas presiones de fracturamiento de los disparos cuando se dispara en HCl o en ácido acético con una presión diferencial pequeña hacia la formación. Debido al bajo ritmo de reacción del ácido acético con las formaciones calizas, es generalmente conveniente dejar el ácido acético frente a los disparos por unas doce horas después de disparar. No debe permitirse que partículas sólidas de lodo penetren en los disparos acidificados.

Por supuesto, también se puede disparar hacia la formación con una presión diferencial negativa, es decir, con una presión hidrostática en el interior del pozo menor a la presión de formación. A esto se le conoce como disparos bajo balance. La principal ventaja de disparar bajo balance es la de evitar el taponamiento de los disparos y de evitar o reducir el daño a la formación y a los disparos, evitando así la reducción de la productividad del pozo.

Cuando los disparos se efectúan con una presión diferencial hacia el pozo y con fluidos limpios, se ayuda a obtener una buena limpieza de los disparos. Este es el método preferido para disparar formaciones de arenisca y carbonatadas.

3.3.4 EFECTO DE USAR FLUIDOS LIMPIOS

En general, se recomienda utilizar fluidos limpios para efectuar cualquier operación de disparos, ya que éstos tienden a optimizar el comportamiento de flujo en la vecindad del pozo cuando se encuentra libre de daño. Por el contrario, el uso de fluidos no limpios propiciará el taponamiento de los disparos en forma casi inmediata, a menos que se dispare bajo balance. Esto, sin embargo, no garantiza al 100% una limpieza efectiva.

3.3.5 EFECTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La penetración y el tamaño de los disparos a chorro se reducen a medida de que aumenta la resistencia a la compresión de la tubería de revestimiento, del cemento y de la formación. La penetración de las pistolas a bala decrece severamente al aumentar la resistencia de la tubería de revestimiento, del cemento y de la formación.

3.3.6 DENSIDAD DE LOS DISPAROS

La densidad de los disparos generalmente depende del ritmo de producción requerido, de la permeabilidad de la formación y de la longitud del intervalo disparado. Para pozos con alta producción de aceite y gas, la densidad de los disparos debe permitir el gasto deseado con una caída de presión razonable. Generalmente son adecuados cuatro disparos por pie de 0.5 pulgadas, siendo satisfactorio uno o dos disparos por pie para la mayoría de los pozos con producción baja. En los pozos que serán fracturados, los disparos se planean para permitir la comunicación con todas las zonas deseadas. Para operaciones de consolidación de arenas, generalmente se prefieren cuatro disparos por pie de diámetro grande. Para terminaciones con empaque de grava se prefieren de cuatro a ocho disparos por pie de 0.75" de diámetro o mayores.

Los disparos de cuatro o más cargas por pie en tuberías de revestimiento de diámetro pequeño, y de baja resistencia, con pistolas con cargas expuestas,

pueden agrietar la tubería de revestimiento. También el cemento puede fracturarse severamente, siendo necesario efectuar cementaciones forzadas para controlar la producción indeseable de agua o gas. Los coples de las tuberías de revestimiento de alta resistencia pueden dañarse al efectuar múltiples disparos sobre ellos.

3.3.7 FASAMIENTO

Es el ángulo que se forma entre los disparos individuales. Es importante para mantener patrones de flujo uniformes alrededor del pozo. Estos patrones reducen la velocidad del fluido y subsecuentemente el movimiento de arena de la formación.¹¹

Un fasamiento angular diferente a cero puede incrementar la productividad por la reducción de la interferencia de flujo proveniente de la vecindad del agujero.

3.3.8 CONTROL DEL POZO

Los pozos productores de aceite con baja presión pueden ser disparados, con aceite o agua dentro de la tubería de revestimiento, con poco control superficial, siendo suficiente un prensa-estopa tipo limpiador. Sin embargo, es siempre conveniente usar un preventor de cable. Los pozos productores de aceite con presión normal, pueden ser disparados, con aceite o agua en el agujero, con pistolas corridas a través de la tubería de producción, usando instalaciones de control convencionales a boca del pozo y un prensa-estopa ajustable tipo espiral.

En todos los pozos productores de gas deberá usarse un lubricador con sello de grasa, así como en todos los pozos en que se prevea una presión superficial mayor de 1,000 lb/pg².

3.3.9 DAÑO EN EL CEMENTO Y EN LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO

Las pistolas con cargador de tubo absorben la energía no empleada al detonar las cargas. Esto evita el agrietamiento en la tubería de revestimiento y evita virtualmente que el cemento se desquebraje. Con el uso de pistolas de balas convencionales no se dañan mucho las tuberías de revestimiento. Al disparar con un claro igual a cero se tiende a eliminar las asperezas dentro de la tubería.

Las pistolas tipo Jet con cargas expuestas pueden causar la deformación, fracturamiento y ruptura de la tubería de revestimiento, así como un notable agrietamiento del cemento. La cantidad de explosivo, el grado de adherencia de la tubería con el cemento, la densidad de los disparos, el diámetro y la "masa resistencia", son factores que afectan el agrietamiento de las tuberías expuestas a disparos tipo Jet. La "masa resistencia" ha sido definido como el producto del peso unitario y su resistencia hasta el punto de cedencia.

3.3.10 CONTROL DE LA PROFUNDIDAD

El método aceptado para asegurar un control preciso en la profundidad de los disparos consiste en correr un localizador de coples con las pistolas, y medir la profundidad de los coples que han sido localizados, respecto a las formaciones, usando registros radiactivos. Algunos marcadores radiactivos pueden instalarse dentro de cargas formadas seleccionadas, para ayudar a localizar la profundidad exacta de los disparos. Los registros de detección de coples pueden mostrar la posición de disparos recientes o anteriores hechos con cargas expuestas, tales como las usadas en pistolas con cargas encapsuladas. En este caso el registro señalará las deformaciones en la tubería de revestimiento ocasionadas por la detonación de las cargas expuestas.

3.3.11 DISPAROS ORIENTADOS

Los disparos orientados se requieren cuando se usan varias sartas de tubería de revestimiento, o en terminaciones múltiples en las que se dispara a través de la tubería de producción, como se ilustra en la Figura 3.15.

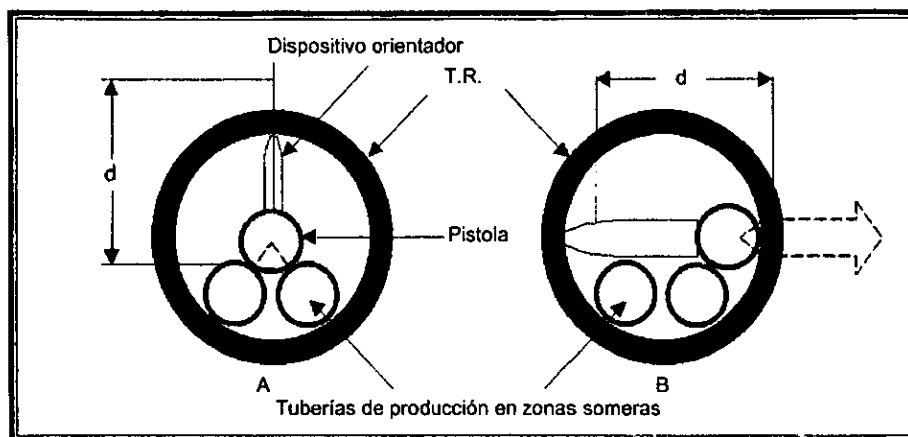


FIGURA 3.15 DISPAROS ORIENTADOS DE ZONAS ENTRE EMPACADORES. EN (A) LA PISTOLA NO PUEDE SER DISPARADA CONFORME AL DISPOSITIVO DE ORIENTACIÓN; EN (B) LA PISTOLA SE TIENE EN LA POSICIÓN ADECUADA PARA EFECTUAR EL DISPARO

Se dispone de dispositivos mecánicos, radiactivos y electromagnéticos, para orientar las pistolas. Cuando se usan pistolas orientadas en terminaciones múltiples, a través de las tuberías de producción, como se muestra en la Figura 3.15, se deben usar siempre pistolas con cargadores tubulares de pared delgada. Las pistolas con cargas encapsuladas pueden provocar el colapso de alguna tubería de producción adyacente.

Para evitar disparar las sartas de tuberías de revestimiento adyacentes, cementadas en el mismo agujero, la práctica más usual consiste en correr una fuente radioactiva y un detector sobre el mismo cable eléctrico de las pistolas y a continuación girar las pistolas para evitar perforar las tuberías adyacentes. Si existe alguna duda en la interpretación se correrá una marca radioactiva en la tubería adyacente para ayudar a localizar estas sartas.

3.3.12 PENETRACIÓN CONTRA DIÁMETRO DE DISPARO

Al diseñar cualquier carga formada puede obtenerse una mayor penetración sacrificando el diámetro de disparo. Debido a que una máxima penetración parece ser importante, con fundamento en los cálculos teóricos de flujo, se ha solicitado frecuentemente a la industria petrolera, y se han recibido a menudo, cargas de mayor penetración sacrificando el diámetro de disparo. Cuando se disparan tuberías de revestimiento de alta resistencia y de pared gruesa, o formaciones densas de alta resistencia, probablemente se requiera una penetración máxima aún cuando el diámetro del disparo sea reducido hasta 0.4 pg.

Sin embargo, en situaciones más normales, debido a la dificultad de remover el lodo, los residuos de las cargas, la arena y las partículas calcáreas de un disparo de diámetro pequeño, el disparo en la tubería de revestimiento, el cemento y la formación, deberán normalmente tener un diámetro mínimo de entrada de 0.5 pg, con agujero liso y de tamaño uniforme de máxima penetración.

Para situaciones específicas los siguientes puntos deberán ser considerados:

1. Para empacamientos con grava, los agujeros de los disparos deben ser redondos y grandes, con un diámetro mínimo de 0.75 pg, y una densidad de disparos de hasta 8 disparos por pie. Cuando los disparos van a ser limpiados con herramientas lavadoras, una penetración en la formación de 4 pg es adecuada.
2. Cuando se consoliden las arenas con plástico, el diámetro mínimo de los disparos deberá ser de 0.5 pg, con la máxima penetración obtenible. Se recomienda disparar con una presión diferencial hacia el pozo, y/o limpiar los disparos con herramientas lavadoras o de "sondeo instantáneo".
3. Cuando se empleen bolas selladoras como dispositivos desviadores en operaciones de fracturamiento hidráulico o fracturamiento con ácido, la entrada de los disparos debe de ser redonda y lisa. Es aconsejable que el tamaño del agujero sea de 0.75 pg.
4. Cuando se disparen en ácido formaciones calcáreas, el tamaño del disparo deberá ser de alrededor de 0.75 pg de diámetro. Una penetración de 4 a 6 pg dentro de la formación es probablemente adecuada, debido a que el ácido proporcionará la penetración requerida en la formación.

5. En los pozos en que se observa taponamiento por incrustaciones, el tamaño del disparo deberá ser tan grande como lo permitan las condiciones prácticas, probablemente de 0.75 pg, para reducir las tendencias de taponamiento y para ayudar a limpiar los disparos.

El taponamiento de los disparos con incrustación en los pozos productores o inyectores parece estar relacionado con el diámetro del disparo y el periodo de tiempo en que los disparos están expuestos a la precipitación de un material incrustante en particular. La caída de presión a través de disparos con diámetro pequeño incrementa la incrustación de CaCO_3 y de CaSO_4 . El abatimiento de temperatura a través de disparos de diámetro pequeño en pozos productores de gas aumentará la incrustación de BaSO_4 .

4 DAÑO A LA FORMACIÓN

Algunos estudios de laboratorio y de campo indican que la mayoría de las operaciones (perforación, terminación y producción) son una fuente potencial de daño para la productividad del pozo. Durante muchos años, cuando el costo del aceite era bajo, el daño a la productividad era ignorado y se le dio mayor énfasis a minimizar costos que a maximizar la productividad. Ahora, se le ha dado mayor importancia a la prevención del daño a la formación y a maximizar la productividad del pozo.

Debido a que una intervención a la formación dañada usualmente es difícil y costosa, la mejor solución es tratar de prevenir este daño. Para lograr este objetivo se deben optimizar las operaciones de perforación, de terminación y de producción del pozo.

La base de la prevención del daño al pozo requiere de un amplio conocimiento del daño y la forma en que éste se presenta.

En este Capítulo se describe el daño que sufre la formación debido a la perforación del pozo, los disparos y la terminación parcial, lo cual repercute significativamente en la productividad del pozo. En adición se describe el daño que sufre la tubería de revestimiento por los disparos, debido a que es un factor que se debe controlar a fin de prevenir la disminución de la productividad del pozo.

4.1 DAÑO POR LA PERFORACIÓN DEL POZO

La fuente más común de daño en los pozos es debido al proceso mismo de su perforación. El daño a la formación y su efecto en la productividad del pozo puede resultar debido a la interacción del filtrado de fluido de perforación con los minerales de la formación y de la invasión de sólidos del fluido de perforación. El daño causado por las partículas del fluido de perforación es probablemente el más severo.⁶

La formación productora está expuesta a una serie de operaciones y fluidos, desde que es perforada por la barrena hasta que el pozo es puesto en producción, que afectarán grandemente la capacidad de producción del pozo. Cuando se perfora a través de esta zona, la calidad del fluido de perforación y la presión diferencial son factores críticos en el daño a la formación. El tiempo al que se exponga la formación al fluido de perforación es un factor importante.⁸

El depósito de las partículas del fluido de perforación en la formación alrededor de la vecindad del pozo puede reducir severamente la permeabilidad en esta región crítica; afortunadamente la profundidad de invasión de estas partículas es usualmente pequeña, fluctuando desde menos de una pulgada hasta aproximadamente un máximo de 1 pie. Para minimizar este daño, las partículas del fluido de perforación deberán ser mayores que los poros. Se sugiere que teniendo 5% del volumen de partículas de lodo con un diámetro mayor que 1/3 de las dimensiones del medio poroso, prevendrá significativamente la invasión de partículas. Debido a que la profundidad de invasión es pequeña, es posible, frecuentemente, sobreponer el daño por partículas de lodo disparando la región dañada o por medio de una acidificación.

El filtrado invadirá la formación a una mayor profundidad que la obtenida con la invasión de las partículas de fluido de perforación, siendo comunes profundidades de invasión desde 0.30 hasta 1.8 m. A medida que el filtrado entra a la formación, se forma un enjarre en la cara de la pared del pozo que reduce el gasto de invasión de filtrado. Sin embargo, este enjarre también se erosionará debido a la fuerza desgastante del fluido de perforación.

La perforación de pozos horizontales con longitudes de más de 2,400 m, propone nuevos problemas de daño por penetración debido a la larga exposición de fluidos de perforación mientras perfora la sección horizontal. La forma de daño a lo largo de un pozo horizontal es probablemente causada por el largo periodo de exposición cerca de la sección vertical.

El filtrado del fluido de perforación puede dañar la formación por movimiento de finos, por precipitación o por bloqueo de agua. El daño por migración de finos y por precipitación puede ser minimizado haciendo que la composición iónica del fluido de perforación sea compatible con el fluido de la formación. En el caso de que el bloqueo de agua sea un problema, se deben evitar los lodos base agua.¹³

4.2 DAÑO POR DISPAROS

La geometría de los disparos y el ambiente en que se llevan a cabo, pueden ser controlados de varias formas. Un factor que no es controlable es el efecto negativo de la zona dañada por los disparos. Este efecto es significativo y merece atención cuidadosa durante el proceso del diseño de la terminación.

4.2.1 EVIDENCIA EMPÍRICA DEL DAÑO POR DISPAROS

Investigaciones de campo y de laboratorio indican que hay una zona dañada rodeando las perforaciones individuales hechas por los disparos. Estudios de

laboratorio indican que la permeabilidad en la zona puede ser tan baja como de 10% a 20% del total de la formación no dañada, aún cuando se dispare bajo balance y en fluidos limpios y compatibles.

Algunos resultados de campo indican que frecuentemente las terminaciones disparadas tienen menores eficiencias que en terminaciones con empacamiento de grava, con liner ranurado o en agujero descubierto. Perfiles de productividad y de inyectividad indican que una proporción significativa de los disparos permanece tapada aún después de una producción considerable. El grado de daño aparentemente está influenciado por el tipo de formación y los fluidos contenidos en ella, por el tipo y la calidad de la carga, por la magnitud y dirección de la presión diferencial, por el fluido de terminación y por la duración de flujo del fluido de limpieza.

LIMPIEZA DE LOS DISPAROS

Pruebas de laboratorio demuestran que los efectos de la zona dañada por los disparos pueden ser mitigados por el flujo a través de los disparos. Las Figuras 4.1 y 4.2 presentan una serie de eventos típicos en la limpieza de un objetivo con la norma API RP 43 Edición 4, sección 2,²¹ disparado sobre balance en el que después se fluye el pozo. La eficiencia de flujo inicial es baja, como resultado de un taponamiento de los disparos y una baja permeabilidad en la zona dañada por estos. La mayoría de los desechos en el conducto hecho por el disparo son expulsados rápidamente por el flujo transmitido con grandes gradientes de presión. El flujo constante adicional reduce gradualmente el daño en la zona dañada (Figura 4.3). El proceso de limpieza y la eficiencia de flujo final (CFE) son afectadas por la presión diferencial (Figura 4.4). A medida que se incrementa la presión diferencial más allá de 500 lb/pg², se considera generalmente inefectiva. En algunos casos, mayores niveles de bajo balance han sido benéficos en núcleos tipo API. Sin embargo, hay un daño residual, a pesar de la presión diferencial o el volumen total de flujo.

MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE LA LIMPIEZA

Debido a que el daño a los disparos es inevitable, una óptima limpieza es esencial. Los métodos primarios implican disparos sobre balance o bajo balance seguidos por un flujo de surgencia o lavado de los disparos.

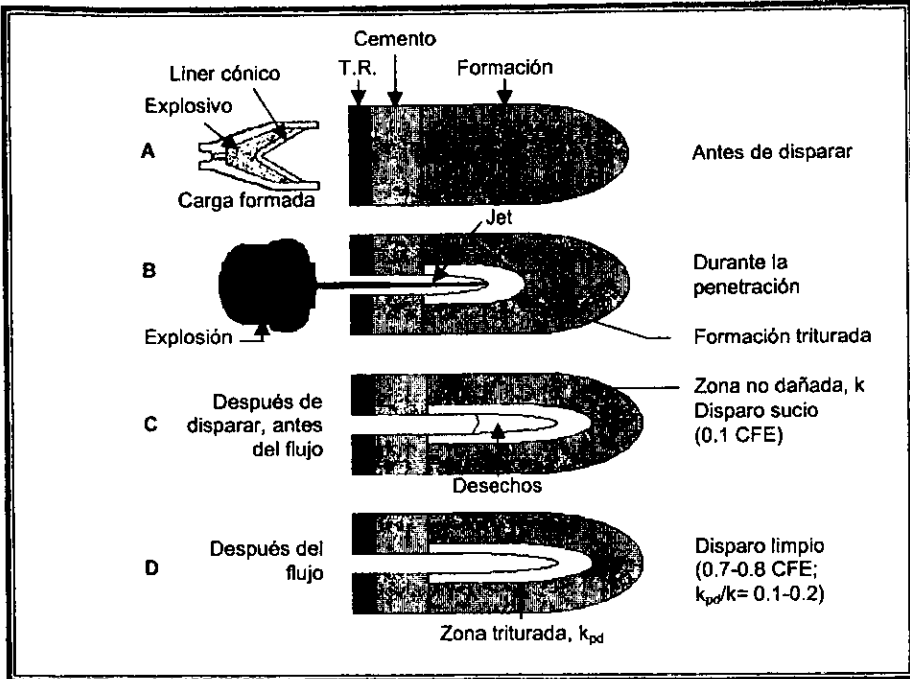


FIGURA 4.1 EVENTOS EN LA LIMPIEZA DE LOS DISPAROS

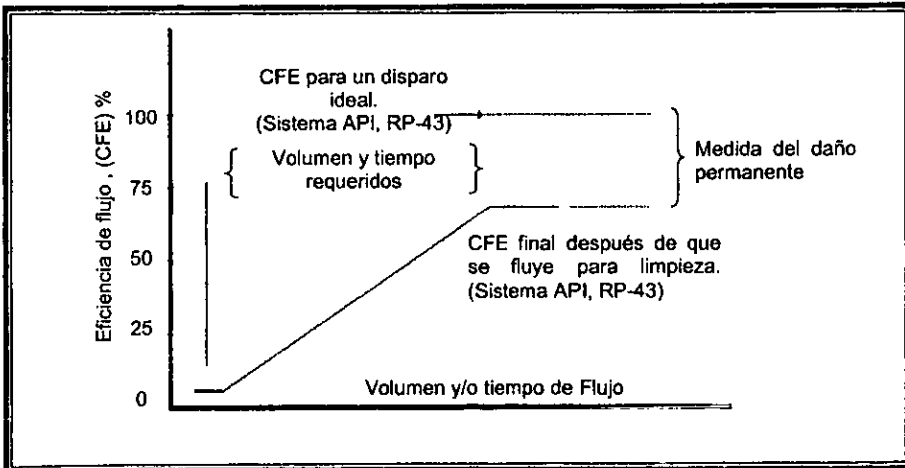


FIGURA 4.2 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DURANTE LA LIMPIEZA DE LOS DISPAROS

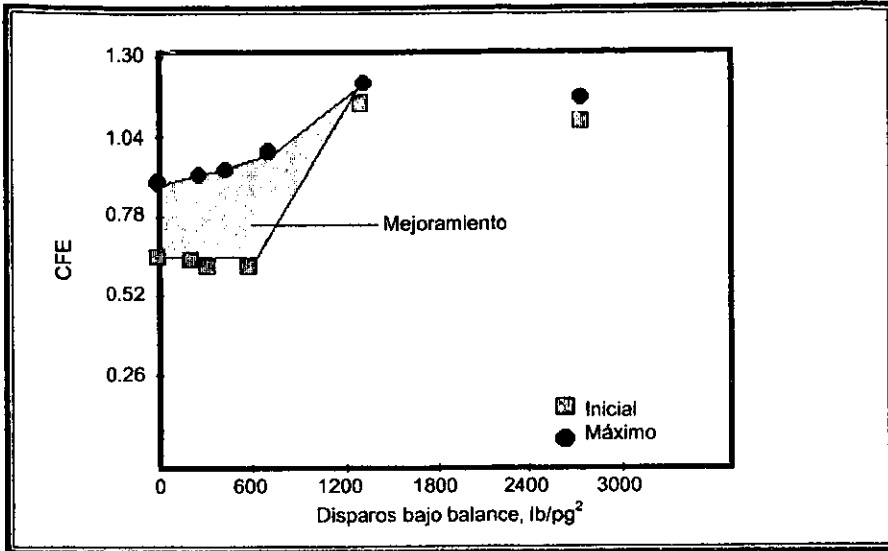


FIGURA 4.3 MEJORAMIENTO EN LA EFICIENCIA DE FLUJO COMO RESULTADO DEL FLUJO CASI ESTÁTICO

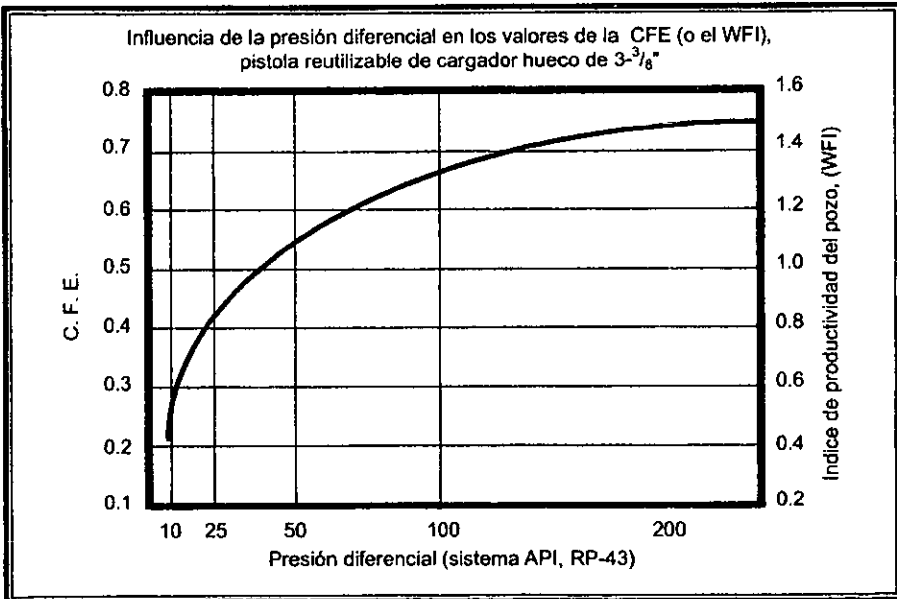


FIGURA 4.4 EFECTO DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL EN LA EFICIENCIA DE FLUJO

a) Disparos bajo balance

Nivel óptimo de bajo balance. Un nivel de bajo balance que es demasiado bajo resultará en una limpieza inadecuada; un nivel que es demasiado alto puede resultar en una falla mecánica de la formación, movimiento de finos, reventón de la sarta de la pistola arriba del agujero, colapso de la tubería de revestimiento, empacadores destruidos u otros problemas.¹⁰ Los niveles de presión diferencial suficientes para causar fallas en la formación se pueden calcular a partir de las propiedades mecánicas de la formación estimadas con registros sísmicos. Las experiencias pasadas en un campo dado son la mejor guía para una óptima selección de bajo balance. La Tabla 4.1, basada en cientos de terminaciones alrededor del mundo, presenta los rangos recomendados de bajo balance. Las Figuras 4.5 y 4.6 presentan resultados de un campo en estudio de 90 terminaciones con tubería de producción en formaciones de areniscas. El bajo balance fue considerado suficiente cuando la acidificación posterior no mejoró el funcionamiento del pozo. Nótese que se requieren altos valores de bajo balance para pozos de gas.

TABLA 4.1 RANGOS TÍPICOS DE PRESIÓN BAJO BALANCE PARA LA LIMPIEZA DEL SISTEMA DISPARADO

Permeabilidad	Líquido	Gas
Alta permeabilidad (> 100 md)	200 a 500 psi	1, 000 a 2, 000 psi
Baja permeabilidad (< 100 md)	1, 000 a 2, 000 psi	2, 000 a 5, 000 psi

Disparos bajo balance en terminaciones con múltiples zonas productoras. El nivel de bajo balance requerido para limpiar los disparos depende de la permeabilidad (Figuras 4.5 y 4.6) y de la viscosidad del fluido.¹⁰ Debido a que los disparos en zonas de alta permeabilidad responden más fácilmente que aquellos en estratos de baja permeabilidad, el nivel de bajo balance debe ser seleccionado para asegurar una respuesta óptima (Figura 4.7). Las terminaciones multi-zona con línea de acero requiriendo mas de un viaje pueden llevar a problemas en establecer el bajo balance requerido después de la primera corrida. Una solución es disparar primero la zona de baja permeabilidad. Fluyendo el pozo se puede proporcionar un adecuado bajo balance para disparar la zona de más alta permeabilidad (Figura 4.8). Los disparos con tubería de producción permiten la terminación de toda la zona en un solo viaje, con un nivel de bajo balance que permitirá la limpieza simultáneamente.

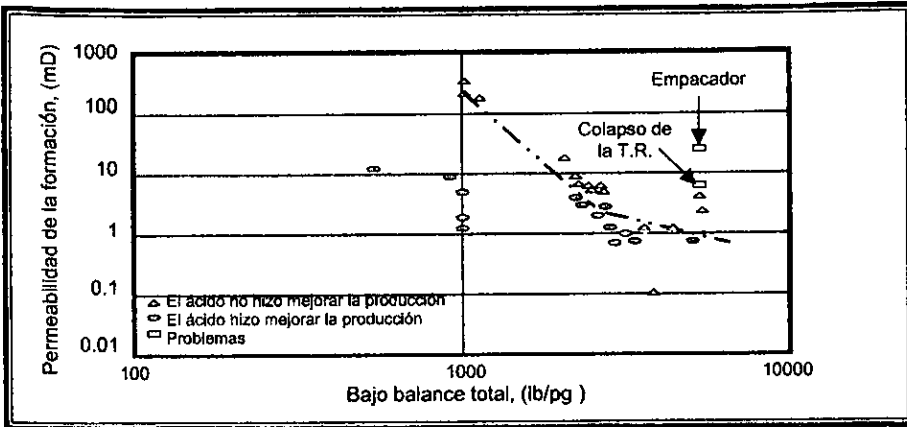


FIGURA 4.5 BAJO BALANCE REQUERIDO PARA TERMINACIONES EN POZOS DE GAS

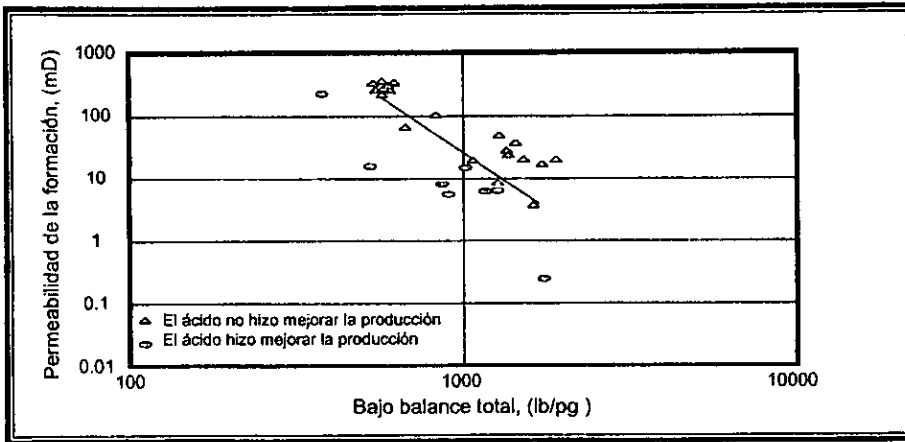


FIGURA 4.6 BAJO BALANCE REQUERIDO PARA TERMINACIONES EN POZOS DE ACEITE

b) Disparos sobre balance

Si bien, los disparos bajo balance favorecen la limpieza de las perforaciones, los disparos sobre balance todavía son utilizados ampliamente.¹⁴ Los factores económicos, entre otros, pueden dictar el uso de pistolas de gran diámetro junto con línea de acero, disparadas en fluidos de terminación, compatibles a niveles modestos de sobre balance. Este es un método razonablemente efectivo en formaciones de alta permeabilidad, particularmente cuando es seguida por flujo de surgencia en los disparos.¹⁴ Las operaciones sobre balance pueden también

proporcionar buenos resultados cuando los efectos de daño son reducidos por lavado o por acidificación. La estimulación es otra opción.

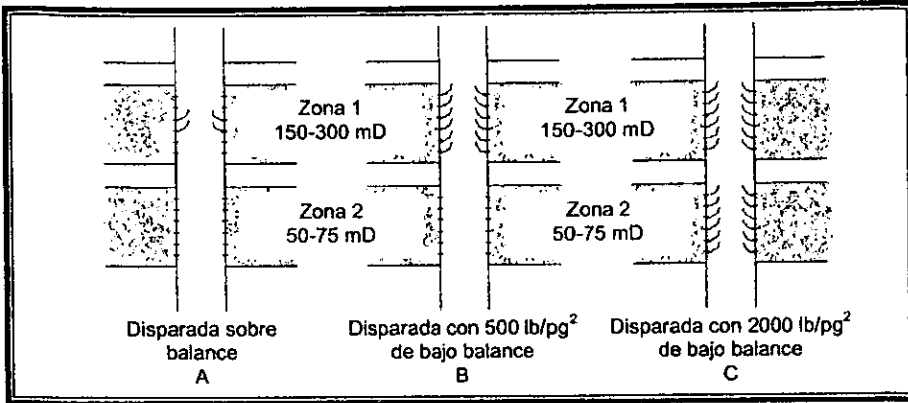


FIGURA 4.7 TERMINACIONES BAJO BALANCEADAS EN ZONAS DE DIFERENTES PERMEABILIDADES

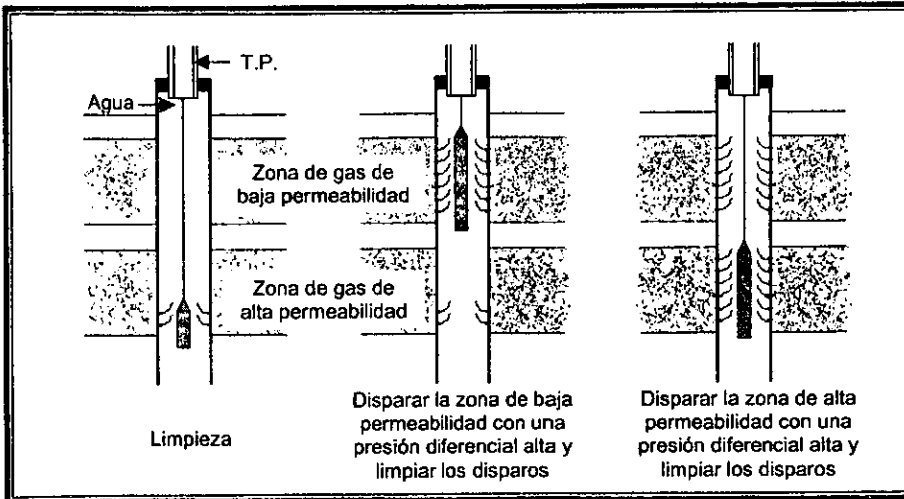


FIGURA 4.8 TERMINACIONES EN POZOS DE GAS CON ZONAS DE DIFERENTE PERMEABILIDAD

Fluido de terminación. Fluidos de terminación limpios, compatibles y con bajo contenido de sólidos son esenciales para la efectividad de las operaciones sobre balance. Los disparos en lodo usualmente resultan en taponamiento de las perforaciones. La limpieza de tales perforaciones es difícil y la probabilidad de una gran densidad efectiva de los disparos es remota. Aún cuando se usen fluidos

limpios, deberá de tenerse cuidado para evitar la contaminación por sólidos en la sarta de terminación, debido a que aún pequeñas cantidades de sólidos pueden causar un decremento significativo en la productividad.

Flujo de surgencia. El flujo de surgencia a través de las perforaciones después de los disparos tan pronto como sea posible puede mejorar la productividad. Se pueden usar herramientas agitadoras especiales. La efectividad de la surgencia es proporcional al gasto de flujo.¹⁴

c) Resultados comparativos

Resultados de campo indican que, aún con atención cuidadosa en la selección del fluido de terminación y del flujo de surgencia, los disparos sobre balance generalmente resultan en una productividad menor que la obtenida con disparos bajo balance. Sin embargo, ha habido excepciones a esta regla general.

4.2.2 DAÑO A LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO Y SU RESISTENCIA AL COLAPSO

Las extremadamente altas presiones de explosión están asociadas con los disparos de la pistola de carga formada. Los efectos sobre la tubería de revestimiento del pozo varían desde ninguno hasta pandeo o deformación y, en algunos casos, rompimiento de la tubería de revestimiento (Figura 4.9). Los factores que influyen en el daño de la tubería de revestimiento incluyen el tipo de pistola, tipo de carga, tipo de explosivo, el fasamiento y la densidad de los disparos, las propiedades de la tubería de revestimiento y las condiciones del pozo (ejemplo tipo de fluido, presión hidrostática, tipo de formación y soporte de la tubería de revestimiento debido a la cementación).

La resistencia al colapso de la tubería de revestimiento se reduce debido a los disparos; el factor más significativo es la distancia vertical a lo largo del eje de la tubería de revestimiento entre los disparos adyacentes.

DAÑO A LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CON PISTOLAS DE CARGADOR HUECO

Las pistolas de cargador hueco, a reserva de estudiarlas en el Capítulo 5, absorben la mayoría de la energía de explosión de la detonación de las cargas y no hay una apreciable deformación en la tubería de revestimiento cuando las pistolas operan adecuadamente. Sólo con las pistolas más grandes cargadas con altas densidades de disparos con un excepcional poder de carga (peso del explosivo de aproximadamente 50 gramos o más) y disparadas en pozos llenos de líquidos, es cuando la tubería de revestimiento absorbe una fracción significativa de la energía del explosivo. Sin embargo, si se planea el uso de esas potentes pistolas, se deberá dedicar una atención cuidadosa a las propiedades de

la tubería de revestimiento (aleación, peso, grado, resistencia, etc.) y deberá confirmarse un buen trabajo de cementación antes de disparar.

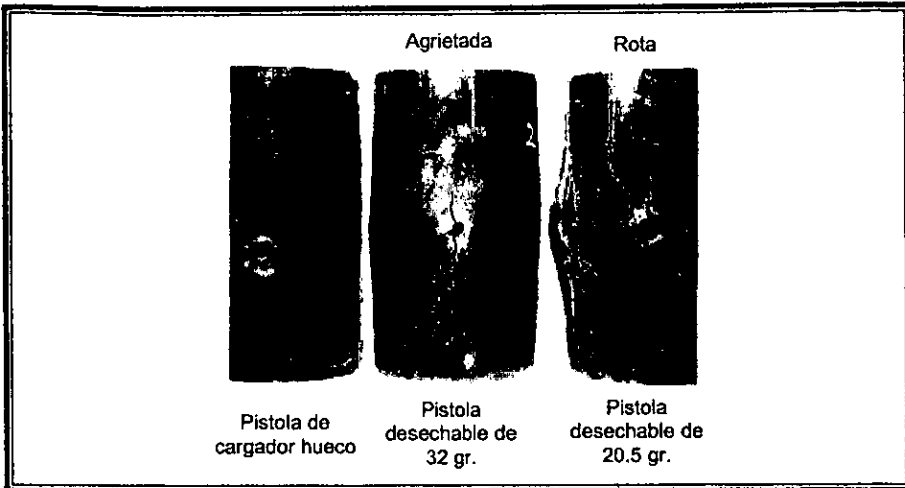


FIGURA 4.9 NATURALEZA DEL DAÑO A LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CUANDO ESTÁ MAL CEMENTADA. LAS CARGAS FUERON DISPARADAS A 1,000 lb/pg² Y 82°C

Una excepción importante para la regla general de que las pistolas de cargador hueco no dañan la tubería de revestimiento es el inadvertido disparo de una pistola inundada con fluidos del pozo. Este inundamiento resulta de una falla en los sellos al final del cargador.

DAÑO A LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CON PISTOLAS DESECHABLES

Los disparos con pistolas desechables (vistas en el Capítulo 5), liberan una fuerza de explosión significativa que es absorbida por la tubería de revestimiento. Consecuentemente, estas pistolas pueden deformar la tubería de revestimiento, en algunos casos significativamente. El grado de deformación o daño a la tubería depende en gran medida de la carga del explosivo (Figura 4.10a). Cuando se incrementa el peso del explosivo, la deformación se incrementa casi en forma lineal hasta agrietar la tubería. Sin embargo, el sostén o soporte de la tubería (cemento y formación), su resistencia y la presión hidrostática también influyen en su deformación. La deformación decrece con un buen soporte de la tubería y con el incremento del espesor de pared y de su resistencia (Figura 4.10b). Incrementando la presión hidrostática se puede también reducir la deformación en un 50% como máximo (Figura 4.10c).

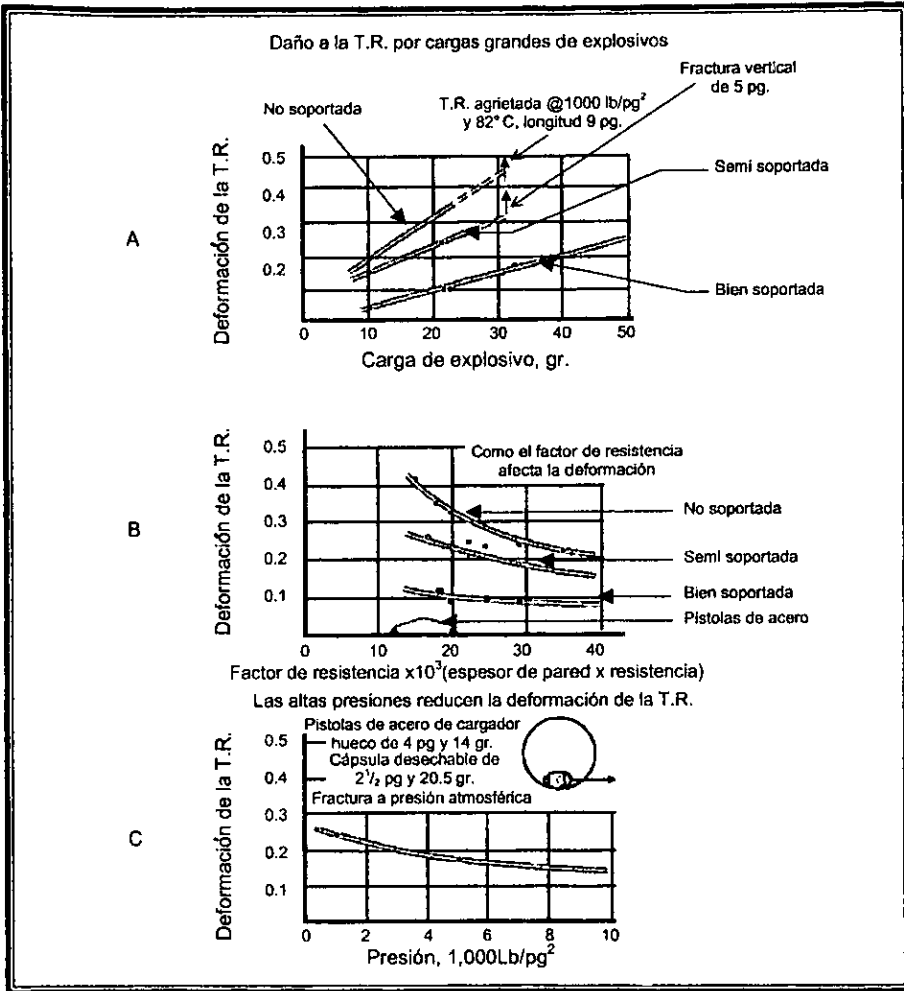


FIGURA 4.10 FACTORES QUE AFECTAN EL DAÑO DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO

La orientación de la carga con respecto a la tubería de revestimiento también afecta significativamente su deformación. La Figura 4.11a muestra el peor caso, donde un lado de la carga está en contacto con la tubería. Una menor deformación es experimentada cuando la carga está orientada de tal forma que el eje del Jet es normal a la tubería de revestimiento (Figura 4.11b).

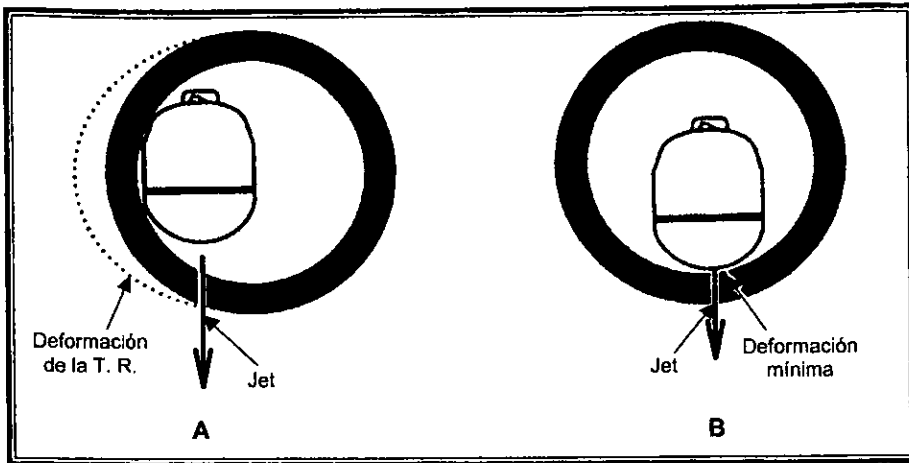


FIGURA 4.11 INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN DE LA CARGA DESECHABLE EN EL DAÑO A LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO

La tubería de revestimiento puede agrietarse cuando ésta es débil (ejemplo grado J-55), no está bien soportada y cuando los explosivos exceden la carga de 25 gramos. Sin embargo, pistolas de $1\frac{11}{16}$ y $2\frac{1}{8}$ " operadas a través de tubería de producción (con explosivos cargados aproximadamente con 10 y 22 gramos, respectivamente) no deberán agrietar la tubería, aun cuando estén pobremente soportadas.

Cuando la tubería de revestimiento está bien soportada, pistolas de $2\frac{1}{8}$ " conteniendo 22 gramos de explosivo no deberán producir más de aproximadamente 0.05 a 0.10" de deformación bajo condiciones normales de fondo del pozo. El uso de explosivos cargados a 50 gramos (el mayor límite de investigación) mostró un incremento de deformación mayor que 0.20" sin agrietar la tubería. Parece ser que esta deformación no es alarmante si la pistola es operada a través de tubería de producción y en tubería de revestimiento que está en buenas condiciones. Sin embargo, si hay razones para sospechar que la tubería de revestimiento ha sido debilitada por el tiempo y la exposición a condiciones corrosivas, se recomienda el uso de pistolas de cargador hueco.

DAÑO A LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO CON PISTOLAS DE BALA

Las pistolas de bala pueden también agrietar la tubería de revestimiento si no está bien cementada como resultado de la alta presión de los gases de la carga propelante. Cuando la tubería está bien cementada, la deformación es mínima.

EFFECTO DE LOS DISPAROS EN LA CAPA DE CEMENTO

Los disparos tipo Jet con pistolas de cargador hueco o con pequeñas pistolas desechables no afectan desfavorablemente la resistencia de la capa de cemento cuando la tubería está soportada por cemento con una resistencia a la compresión excedente, del orden de 2,000 lb/pg². Debido a que los efectos de las grandes cargas desechables no han sido bien definidos, es recomendado el uso de cemento de alta resistencia para todas las operaciones de disparos. Pruebas de laboratorio sugieren adicionalmente que los disparos jet no rompen la capa de cemento detrás de la tubería de revestimiento. Sin embargo, pistolas de bala causan fracturamiento en la capa de cemento.

RESISTENCIA DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO AL COLAPSO

La resistencia al colapso de la tubería de revestimiento se reduce por la presencia de los disparos. El factor más importante que afecta la resistencia al colapso de la tubería de revestimiento después de disparar es la distancia vertical entre los disparos a lo largo del eje de la tubería. A menor distancia vertical será más pronunciada la reducción en la resistencia al colapso de la tubería. La Figura 4.12 muestra dos tipos de arreglos de tiros usados para pistolas de alta densidad de disparos. Nótese que las dos pistolas tienen la misma densidad efectiva de disparos, 12/pie. Para la pistola fasada 120° la distancia vertical entre los disparos es de 3 pulgadas. Para la pistola fasada 135°/45°, la distancia es de 8 pulgadas. La Figura 4.13 muestra un tratamiento teórico de los efectos de los disparos y el fasamiento en la resistencia al colapso de la tubería de revestimiento. Nótese que a la menor densidad de disparos (5 disparos por pie), los efectos de los disparos en la resistencia al colapso son insignificantes. Aún para la pistola 135°/45° (Figura 4.12), los efectos no son significantes. Sin embargo, note la reducción sustancial para la pistola fasada 120° mostrada en la Figura 4.13. Esta reducción es también en el precio notando que las pistolas fasadas 120° son poco usadas.

4.3 DAÑO POR TERMINACIÓN PARCIAL

Frecuentemente los pozos están parcialmente terminados; esto es, la longitud que está abierta a la formación (disparada) es menor que la longitud del yacimiento. Algunas veces a esto se le conoce como penetración parcial. Esta situación puede ocurrir como resultado de un mal trabajo de disparos o por una terminación deliberada para retardar o prevenir efectos de conificación. En modernas pruebas de práctica de ciertos yacimientos, la penetración parcial puede ser creada para formar tempranamente un flujo esférico para permitir los cálculos de la permeabilidad vertical. El flujo radial formado tardíamente tendría la distinguida característica de terminación parcial. Si el pozo no está terminado a la mitad de la longitud del yacimiento, el problema se agravará más adelante.¹³

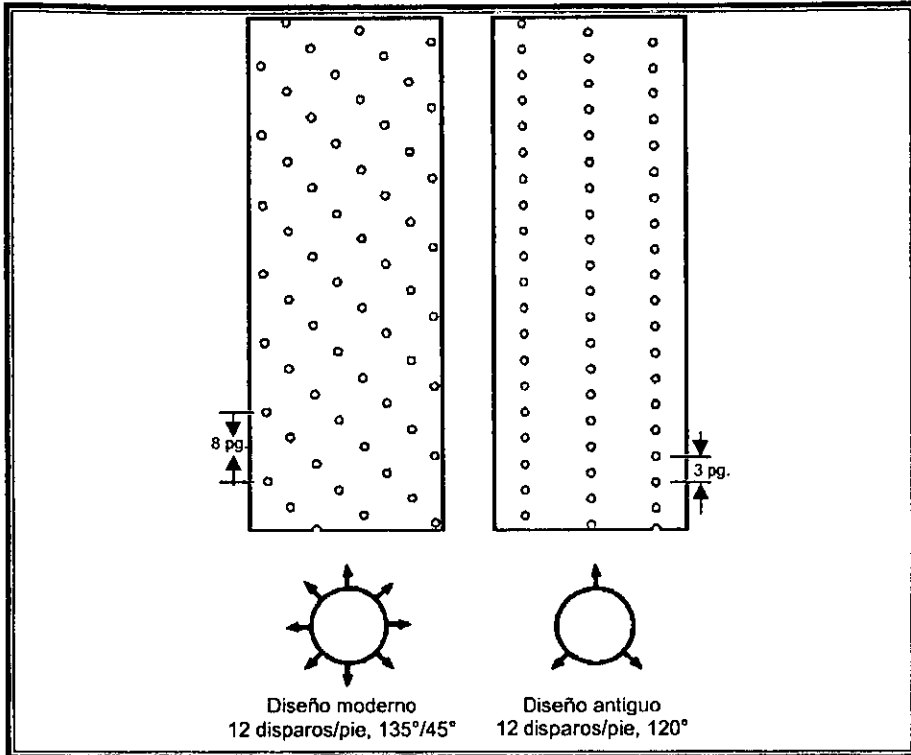


FIGURA 4.12 COMPARACIÓN DE DOS MODELOS DE DISPAROS

En todos esos casos la inclinación del pozo debido al diseño de la trayectoria, resultará en un efecto de daño denotado por s_c . A menor intervalo disparado comparado a la longitud del yacimiento (menor relación h_w/h) y una terminación más desviada (mayor θ), será mayor el efecto de daño. Sin embargo, si el intervalo terminado es 75% de la longitud del yacimiento, o más, este efecto de daño llega a ser insignificante.

Mientras que la terminación parcial genera un efecto de daño positivo (daño efectivo) por la reducción de la exposición del pozo al yacimiento, en un pozo desviado resulta lo contrario. A mayor ángulo de desviación, mayor será la contribución negativa al efecto de daño total (reducción del daño). El efecto de daño debido a la desviación del pozo es denotado por $S_{c+\theta}$.

Se ha resuelto el problema en forma semi analítica y se han presentado tablas de esos efectos de daño para varias combinaciones de terminación parcial, evaluación de la terminación y desviación del pozo. La Figura 4.14 muestra las variables relevantes, donde h_w es la longitud disparada, Z_w es la elevación de

punto medio de la zona disparada desde la base del yacimiento, h es la longitud del yacimiento, θ es el ángulo de desviación del pozo y r_w es el radio del pozo.

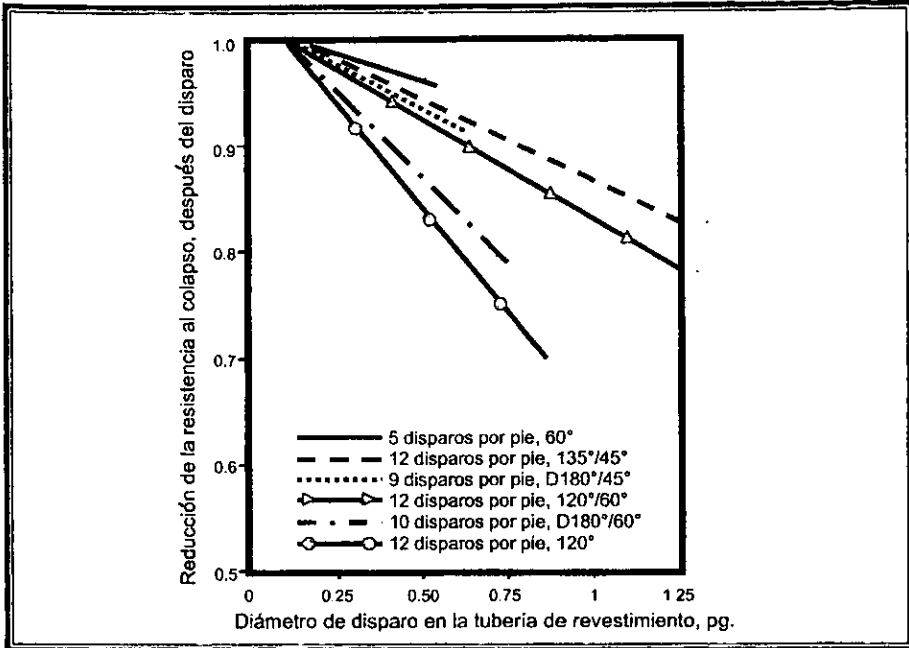


FIGURA 4.13 EFECTO DE LA DENSIDAD DE LOS DISPAROS Y EL FASAMIENTO SOBRE LA RESISTENCIA DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO

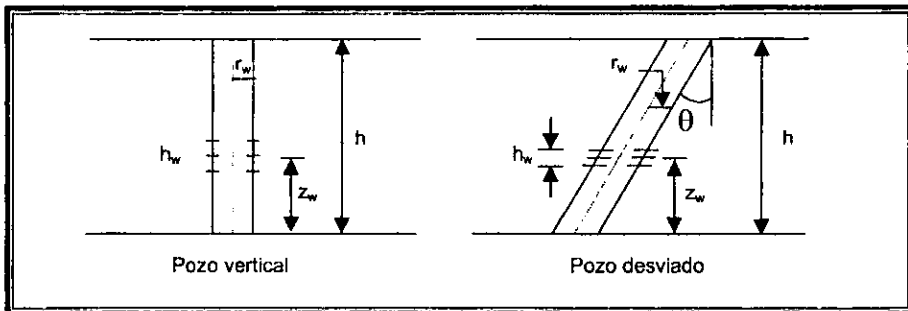


FIGURA 4.14 CONFIGURACIÓN DEL POZO INCLINADO, DESVIADO Y PARCIALMENTE TERMINADO

5 DISEÑO DE LOS DISPAROS EN POZOS CONVENCIONALES

El diseño y selección de los disparos es un proceso que depende de varios factores, entre los cuales se destacan el tipo de terminación en el que se pretenda disparar, ya sea una terminación a la que no se le va a tratar o una terminación a la que se le va a estimular o se le pretenda controlar la producción de arena; de la dirección y magnitud de presión diferencial, si se disparará bajo balance o con un modesto nivel de sobre balance; de la selección de la carga de la pistola, densidad de disparos y fasamiento; de la selección de la pistola, de carga formada o de bala y del método de conducción de ésta, que puede ser con línea de acero, con tubería de producción o con tubería flexible.

En este Capítulo se describen el sistema de pistolas utilizadas para efectuar los disparos, los tipos de pistolas y sus principales características, la eficiencia de flujo de la terminación disparada y el diseño de los disparos en pozos convencionales. Dependiendo de la calidad de estos parámetros se tendrá una mejor productividad del pozo.

5.1 SISTEMA DE PISTOLAS

Existen dos tipos de pistolas utilizadas en la industria petrolera para disparar pozos de aceite y gas; éstas son pistolas de carga formada y pistolas de bala. El mecanismo del disparo de estas pistolas se describe a continuación.

5.1.1 PISTOLA DE CARGA FORMADA

La carga formada es un dispositivo con un poderoso explosivo que deriva su energía de aquéllos usados en bombas aéreas, en la cabeza de proyectiles de artillería o torpedos submarinos. La siguiente discusión muestra el sistema de pistolas típico, describe dos tipos de explosivos usados, detalla la función de la carga formada y describe el mecanismo de penetración tipo Jet.

Se ha desarrollado una gran variedad de cargas formadas para las pistolas operadas con línea de acero o con tubería de producción, todas ellas operan con el mismo principio básico. La carga formada típica está compuesta por cuatro componentes básicos: un transportador para la carga formada (cargador), la carga formada, el cordón detonante y el detonador.¹⁰ La Figura 5.1 presenta esquemáticamente una pistola de carga formada, de cargador hueco.

El sistema de operación comienza con el detonador. En el ejemplo de la Figura 5.2, el detonador es encendido eléctricamente, iniciando la explosión del cordón detonante, el cual se extiende a través del cargador, dispuesto en íntimo contacto con la carga formada. Como la detonación del cordón avanza a través de la

pistola, el explosivo contenido en cada carga formada es encendido sucesivamente.

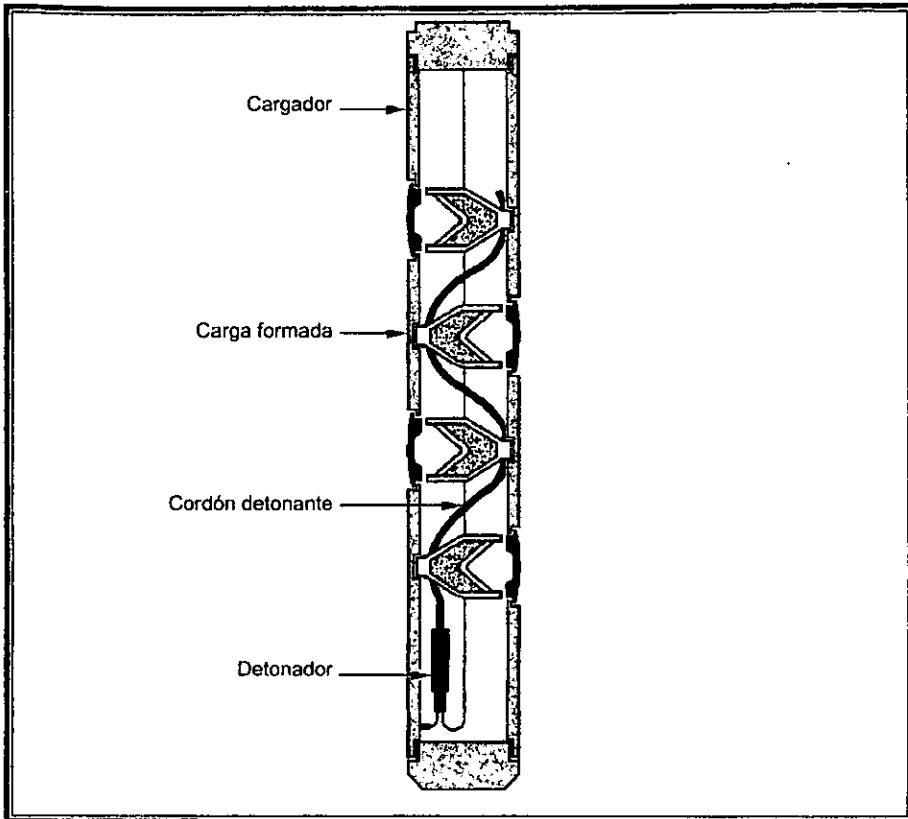


FIGURA 5.1 COMPONENTES DE UNA PISTOLA DE CARGA FORMADA

Para propósitos prácticos, la detonación de toda la pistola es instantánea. En el esquema de la Figura 5.2, el frente de detonación en el cordón detonante ha progresado desde el detonador hasta el punto mostrado en aproximadamente 55μ seg. En ese punto, la primera carga está aproximadamente a la mitad del camino del proceso de penetración. Una pistola de 3 m de longitud requiere cerca de 1 mili-seg para el proceso completo de encendido, desde el detonador a la última carga de detonación. Por lo tanto, todos los disparos son producidos esencialmente al mismo tiempo, sin considerar la longitud de la pistola.

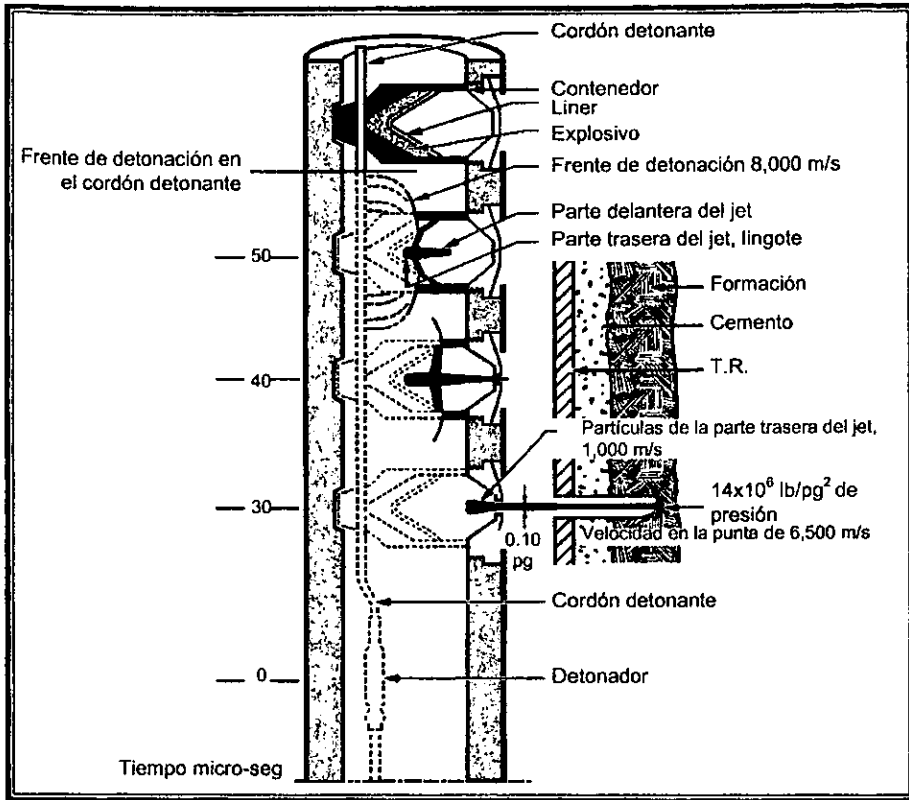


FIGURA 5.2 OPERACIÓN DE LA PISTOLA DE CARGA FORMADA

EXPLOSIVOS

Hay dos tipos básicos de explosivos, de baja y de alta. Los explosivos de baja, algunas veces llamados propulsores, son caracterizados por sus relativamente bajas presiones de combustión (reacción) y su velocidad de reacción de aproximadamente 500 a 1,500 m/s. Los explosivos de alta detonan de 5,000 a 10,000 m/s (velocidad de reacción) y generan muy altas presiones, de algunos millones de libras por pulgada cuadrada en el frente de detonación.¹¹

Los explosivos de alta se dividen en dos grupos (primarios y secundarios) de acuerdo con su sensibilidad de detonación.¹¹ Los compuestos más volátiles, llamados explosivos primarios, reaccionan fácilmente con el fuego, la fricción o con fuertes golpes. Para campos de aceite, los explosivos primarios son usados sólo en detonadores (Figura 5.3). Los explosivos secundarios son menos volátiles. La mayoría no son muy sensibles a la detonación ya que estos se funden y lanzan, maquina o presionan (en forma granular) bajo muy altas presiones

durante la manufactura o diseño de las cargas formadas. A la vez que esas operaciones son relativamente seguras, se ejercen rigurosos procedimientos de seguridad durante su manufactura.

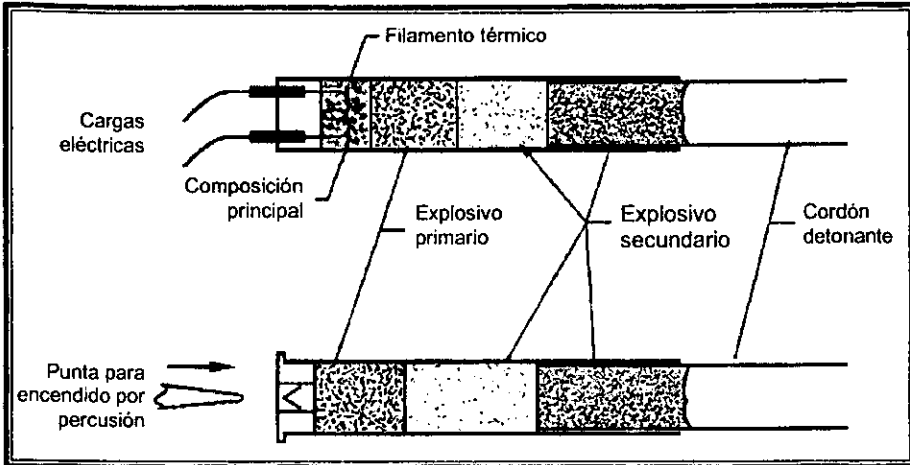


FIGURA 5.3 ESQUEMA DE LOS DETONADORES ELÉCTRICOS Y DE PERCUSIÓN

El detonador resuelve el problema crítico de las características no sensibles de los explosivos secundarios. Como se muestra en la Figura 5.3, el detonador usa un dispositivo eléctrico o mecánico (percusión) para iniciar la detonación del explosivo primario. La corriente eléctrica produce una flama que inicia la detonación. La detonación de percusión resulta de una combinación de fricción y un golpe mecánico para causar la detonación. La velocidad de detonación resultante de aproximadamente 3,000 m/s produce presiones de aproximadamente 500,000 lb/pg², que son las adecuadas para iniciar la detonación del explosivo secundario. La última detonación alcanza rápidamente velocidades de 8,000 a 10,000 m/s acompañada con presiones de frente de detonación de 1 a 4 millones de lb/pg². Esas presiones encienden fácilmente el explosivo secundario en el cordón detonante. La carga formada contiene sólo un explosivo secundario, el cual es fácilmente encendido por la alta presión de explosión del cordón detonante.

Solo los explosivos secundarios son usados en el cordón detonante y en la carga formada, de este modo la pistola, antes de la conexión con el detonador, está segura para su manejo y transporte.

FUNCIÓN DE LA CARGA FORMADA

La carga formada comprende tres componentes básicos: el liner, la cubierta o contenedor y el explosivo, dividido en las cargas principal e iniciadora (o del cebador),¹¹ los cuales se ilustran en la Figura 5.4. El liner es cónico o parabólico y está hecho de una aleación de cobre derretido o una mezcla presurizada de cobre,

plomo y otros polvos metálicos (Figura 5.5). La cubierta puede estar hecha de varios materiales, usualmente metal y está diseñada para trabajar en cada tipo de sistema de pistolas en particular. El explosivo principal es comúnmente RDX (ciclotrimetileno trinitramina) o HMX (ciclotetrametileno tetranitramina) para operaciones de rutina o puede ser HNS (hexanitrostilbeno) o PYX (dinitropirideno) para aplicación en pozos de alta temperatura. El cebador es una pequeña cantidad del mismo explosivo de la carga principal, excepto que este ha sido manufacturado para ser más sensible a golpes para asegurar su encendido por el cordón detonante. La sensibilidad generalmente es incrementada usando una granulación fina del explosivo y evitando el uso de algunos agentes de fricción o aditivos (parafinas, grafito, etc.) para facilitar la presión del explosivo.

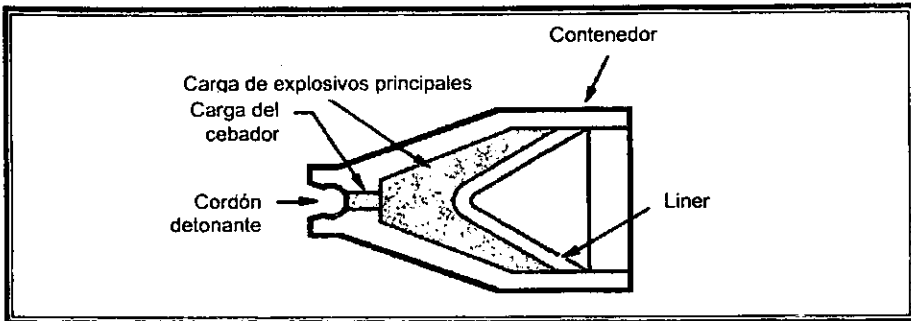


FIGURA 5.4 COMPONENTES TÍPICOS DE LA CARGA FORMADA

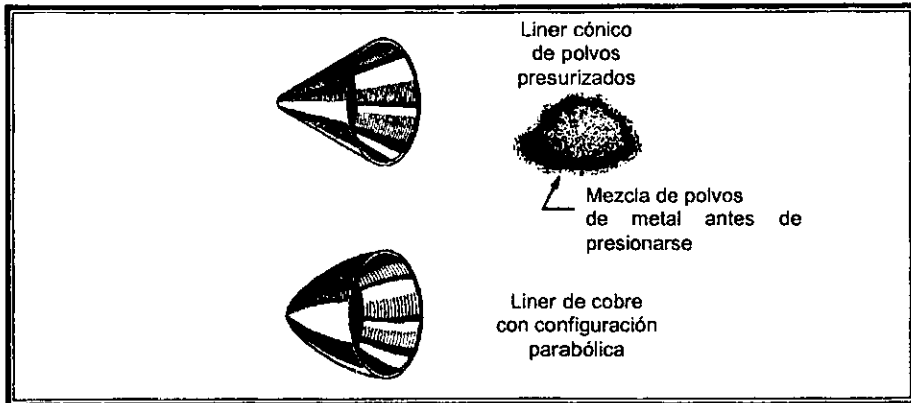


FIGURA 5.5 LINERS TÍPICOS

Cuando se enciende, una onda detonante barre completamente el explosivo con una velocidad de 8,000 a 10,000 m/s, generando intensas presiones sobre el liner (2 a 4 millones de lb/pg^2 , Figura 5.6). Como se indica en la Figura 5.7, esas tremendas presiones propulsan o colapsan el interior del liner hacia su eje.¹⁰ A medida que los elementos del liner alcanzan el eje, éstos se funden y forman un

jet (chorro) de partículas del material del liner.¹⁷ Para propósitos conceptuales, el jet puede ser considerado una muy rápida vara de metal en movimiento, excepto que la formación del jet es un fenómeno dinámico y continuamente cambia de longitud (alargamiento) conforme continúa el proceso del disparo (Figura 5.8). El jet es propulsado fuera de la carga a lo largo de su eje a una muy alta velocidad. El jet es a la carga formada como el proyectil es al rifle, esto hace la penetración. El proceso completo de la iniciación de la explosión, el colapso del liner y la formación del jet toma sólo, aproximadamente, 50 μ seg.

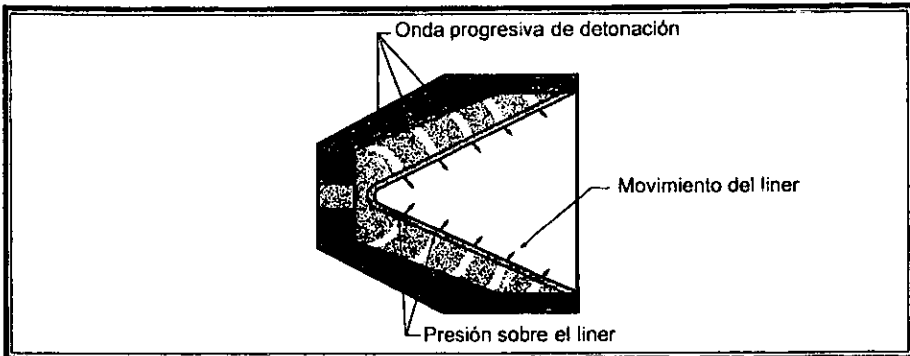


FIGURA 5.6 FUERZAS DE DETONACIÓN SOBRE EL LINER

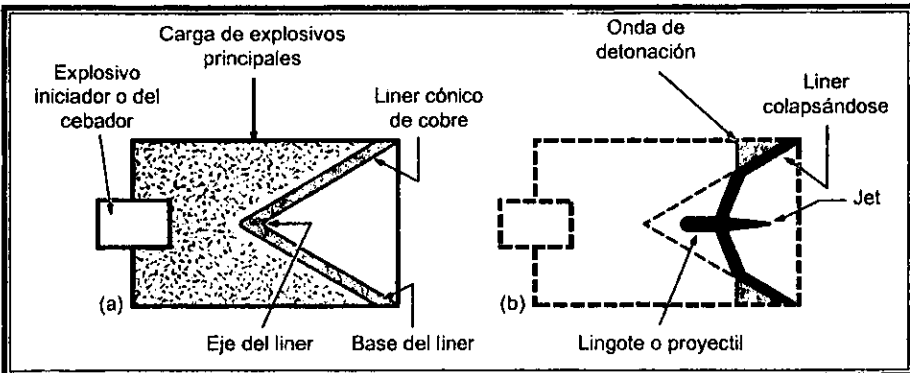


FIGURA 5.7 COLAPSO DEL LINER Y FORMACIÓN DEL JET

Como lo muestra la Figura 5.7, sólo cerca del 25% del material del liner es convertido a jet.¹⁰ El resto del material del liner forma un lingote de movimiento relativamente lento que no es efectivo en el proceso de penetración.¹⁷ Sin embargo, debido a que el lingote sigue a la penetración del jet, esto puede taponar el disparo recién hecho. Las modernas cargas de alto desempeño usan liners de polvo de metal presurizado, los cuales no taponan. El material que no forma parte

del jet permanece separado durante el proceso de colapso del liner. De manera contraria, los liners hechos de material de cobre sólido tienden a producir lingotes coherentes, los cuales incrementan la posibilidad de taponamiento.

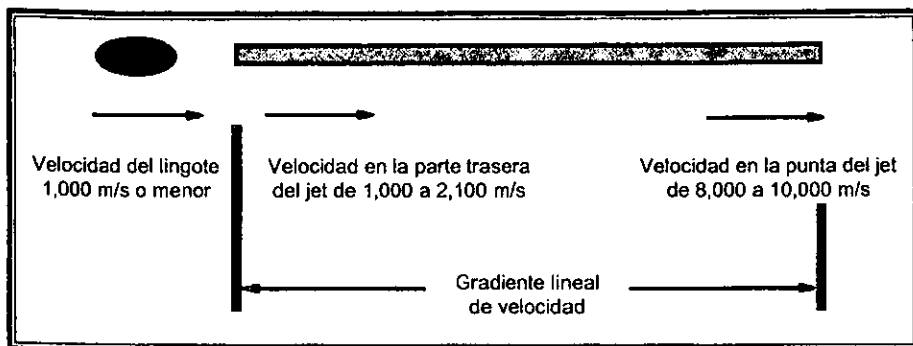


FIGURA 5.8 FENÓMENO DE ALARGAMIENTO DEL LINER

Hoy, el uso de liners de cobre está limitado para cargas diseñadas para crear disparos de gran diámetro en la tubería de revestimiento. Esas cargas generalmente usan liners tipo parabólicos o hemisféricos (Figura 5.5), los cuales tienden a crear lingotes pequeños.¹⁰ El lingote pequeño, el gran diámetro de disparo en la tubería de revestimiento y una formación generalmente no consolidada minimizan cualquier problema de taponamiento de los disparos. De hecho, esas cargas son usadas para propósitos de control de arena.

La velocidad de la punta del jet, creada cerca del eje del liner, varía de 8,000 a 10,000 m/s, con porciones posteriores del jet viajando progresivamente más lento hasta que la última porción puede estar en movimiento a solo 1,000 m/s (Figura 5.8). El decremento en la velocidad del jet resulta del decremento de la rapidez con la que el liner se colapsa a medida que la onda de detonación se aproxima a la base del jet. El gradiente de velocidad, el cual es esencialmente lineal a lo largo del jet, alarga el jet y es la causa de la extraordinaria capacidad de penetración de la carga formada. Por ejemplo: a Jet más largo se tendrá mayor profundidad de penetración.

La eficiencia de la carga formada es aproximadamente de 20% a 30%; sólo esa fracción del total de la energía del explosivo en la carga, es impartida a la penetración del jet. La energía restante es disipada en la creación del lingote y la expansión de la carga del contenedor y en el cargador de la pistola (Figura 5.9). En ciertas situaciones, esta energía remanente puede también deformar o dañar la tubería de revestimiento del pozo.

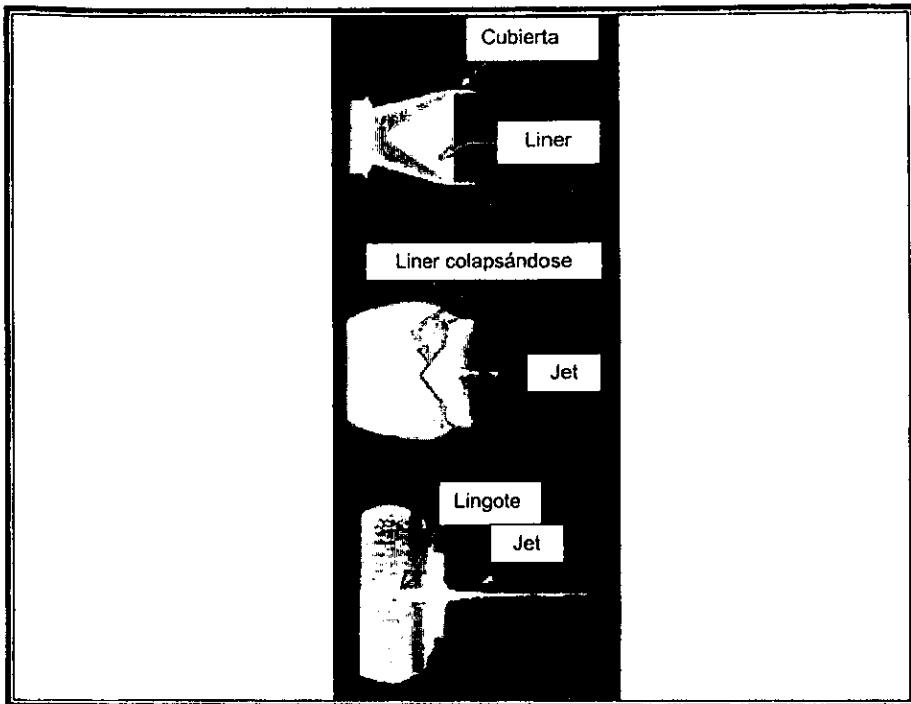


FIGURA 5.9 MECANISMO DE DETONACIÓN DE LA CARGA FORMADA

MECANISMO DE PENETRACIÓN JET

El mecanismo de penetración es de golpeteo. La presión de impacto de la punta del jet en la tubería de revestimiento y en la formación es aproximadamente de 10 a 15 millones de lb/pg^2 .¹⁰ Esta presión sobrepasa las resistencias de la tubería y de la formación y hace que el material se aleje del eje del jet.

La porción delantera del jet que crea el agujero en la tubería de revestimiento, procede de la región de la cima del liner. La porción del jet que hace el final del disparo viene de la base del liner. A medida que las partes discontinuas de la base del liner alcanzan el final del agujero, penetran y expanden su energía en el proceso. Las siguientes porciones del jet continúan con el proceso de penetración hasta que todo el jet es desgastado (Figura 5.10). La temperatura y la alta presión de los gases creada por la explosión son insignificantes en el proceso de penetración.

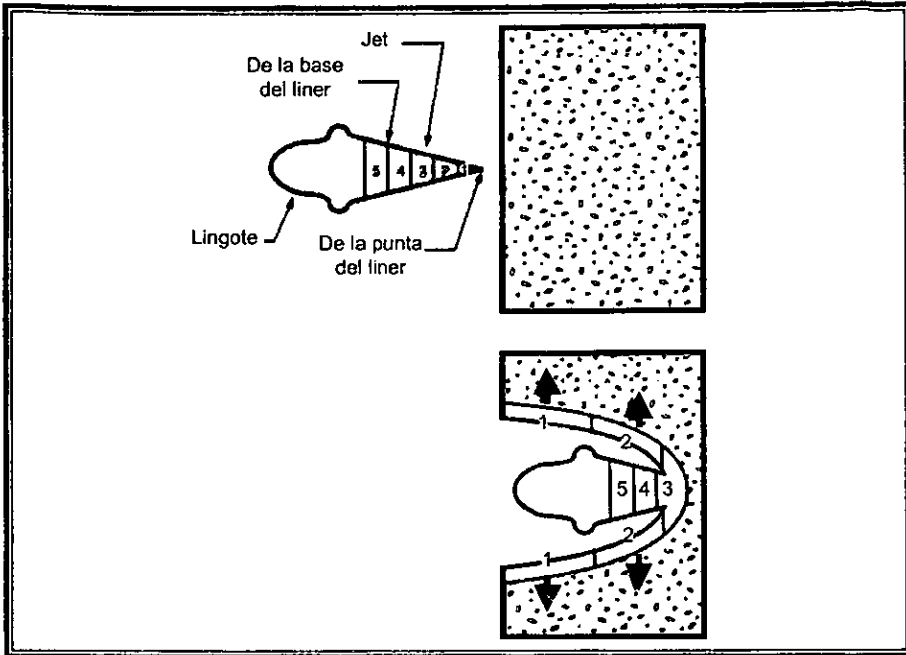


FIGURA 5.10 ESQUEMA DEL MECANISMO DE PENETRACIÓN JET

La acción de golpeteo del jet crea una zona de permeabilidad reducida alrededor del túnel creado por el disparo. Esta región es comúnmente llamada zona dañada por el disparo (Figura 5.11). El espesor de esta zona varía dependiendo del tipo y características de la formación y del tipo y dimensión de la pistola. La zona tiende a ser más grande para cargas más grandes. El grado de reducción de permeabilidad tiene un impacto significante en la productividad del pozo.

Como se describió anteriormente, la velocidad del jet varía a lo largo de su longitud. También varía la relación de penetración del jet, o la relación del incremento del agujero del disparo en la formación.

Estudios recientes indican que la reducción de la permeabilidad puede no ser resultado de la trituración y compactación del material de la formación, como se ha llegado a creer. Esos estudios de laboratorio indicaron que el material en la zona dañada fue triturado pero que no hubo un cambio significativo en su densidad (compactación), o una disminución de su porosidad.¹⁰ Por el contrario, los poros más grandes fueron destruidos y reemplazados por poros más pequeños creados por micro fracturamiento. Los poros más pequeños causaron una reducción de permeabilidad en la zona. También se pueden considerar otros mecanismos de daño a la permeabilidad, como la migración de finos.

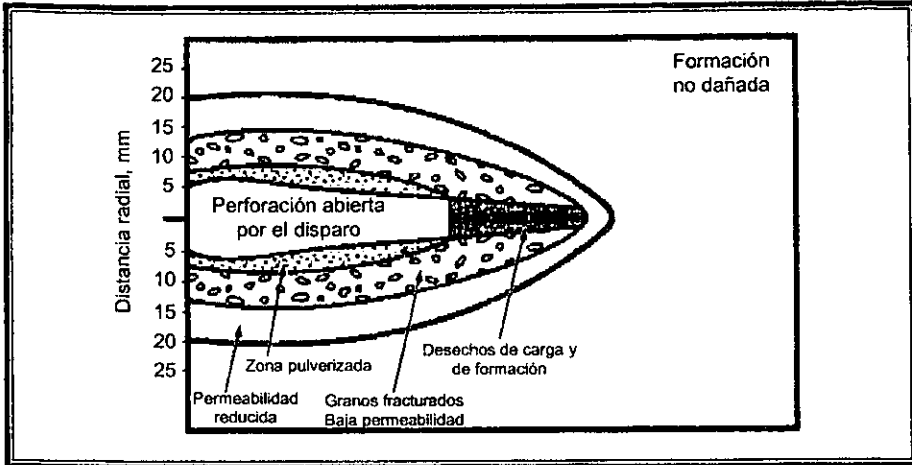


FIGURA 5.11 ZONA DAÑADA POR LOS DISPAROS

Por otra parte, estudios por separado indicaron una reducción en la porosidad en la zona dañada rodeando el túnel hecho por el disparo.¹⁰ Se requieren estudios adicionales para investigar más a fondo el fenómeno asociado con la zona dañada disparada.

5.1.2 PISTOLA DE BALA

La configuración de la pistola de bala es similar a la de la pistola de carga formada. Dentro del cuerpo de la pistola, 4 a 6 disparos por pie son dispuestos de 60 a 120° de fasamiento. La interacción con la tubería de revestimiento es también la misma que para la pistola de la carga formada. La Figura 5.12 muestra una sección transversal de una pistola de bala típica. El sistema comprende los siguientes componentes básicos: el cuerpo de la pistola, el iniciador, la carga propulsora, la cámara de combustión, el barril y la bala.¹⁰

FUNCIÓN DE LA PISTOLA

La pólvora propulsora usada en la pistola de bala es similar a la usada en armas de fuego convencionales y en artillería militar. El iniciador, el cual contiene un filamento térmico y una pequeña cantidad de pólvora, es activado en forma eléctrica. Cuando el iniciador es activado, la flama es descargada dentro de la carga propulsora, iniciando una rápida inflamación que produce un incremento de la presión del gas de 250,000 a 300,000 lb/pg². Las altas presiones aceleran la bala a lo largo de la longitud del barril a velocidades de 685 a 1,000 m/s dentro de un periodo de tiempo de 200 a 300 μ seg.¹⁰

La velocidad resultante de la bala es suficiente para penetrar la tubería de revestimiento, la capa de cemento y la formación. El efecto de penetración de la bala se mejora por la punta de su contorno. Varios contornos típicos incluyen la forma ojival mostrada en la Figura 5.12.

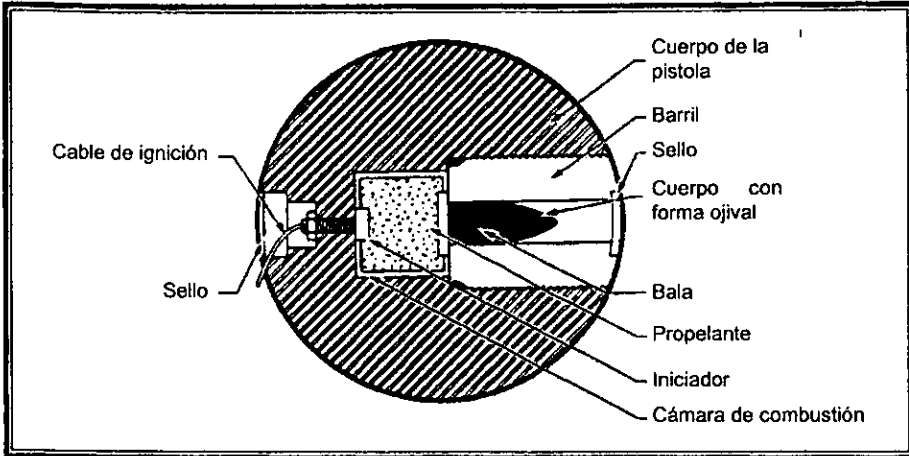


FIGURA 5.12 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA PISTOLA DE BALA TÍPICA

Evidentemente, la pistola de bala es única en la industria petrolera, aún cuando ésta tenga la tecnología de mecanismos propulsores convencionales. El barril es bastante corto, 2 pg o menos. Consecuentemente, las presiones en las cámaras deben ser muy grandes para acelerar rápidamente la bala a la velocidad requerida. Al mismo tiempo, esas presiones deben ser controladas, o limitadas para prevenir el daño en el cuerpo de la pistola. La clave para satisfacer esos requerimientos balísticos es la carga propulsora.

Se requieren propulsores de velocidad de encendido controlada para balancear los requerimientos balísticos. La Figura 5.13 compara dos tipos de pólvora diferentes usadas en la configuración de la misma pistola. Aunque la pólvora A desarrolla un gran pico en la cámara de presión, la velocidad en la boca de la bala es más baja que para la pólvora B con un pequeño pico en la cámara de presión. La pólvora A se incendia demasiado rápido, generando una presión muy alta en la cámara, la cual entonces cae demasiado rápido durante el viaje de la bala a lo largo del barril (incremento efectivo en el volumen de la cámara). La pólvora B, imparte más energía a la bala durante su viaje y proporciona una velocidad en la boca de 1,000 m/s. El desempeño de la bala es mejor con la pólvora B y el hinchamiento de la pistola es menor como resultado de la baja presión en la cámara.

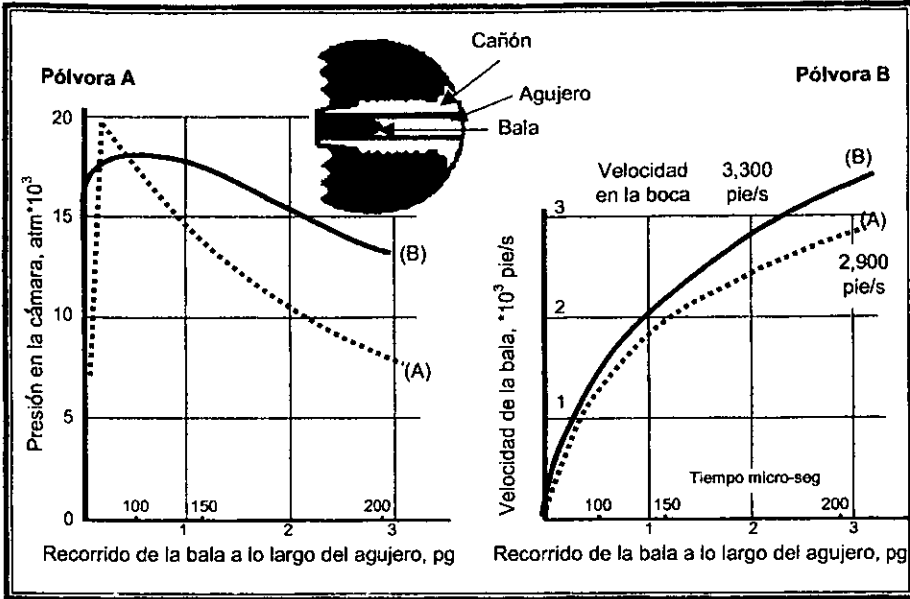


FIGURA 5.13 CÁMARA DE PRESIÓN DE LA PISTOLA DE BALA Y VELOCIDAD RESULTANTE DE LA BALA CON DIFERENTES TIPOS DE PÓLVORA

Para que la bala proporcione consistentemente un funcionamiento deseado, la bala y barril adecuados deben ser mantenidos dentro de tolerancias cerradas para prevenir el escape de gas durante el viaje de la bala (Figura 5.14).¹⁰ Un escape de gas excesivo reduce la velocidad y la penetración de la bala. Las altas presiones de gas afectan el barril de dos maneras. La presión detrás de la bala tiende a expandir el barril y algo de esa expansión es permanente. También, como el diámetro interior del barril crece, el claro entre el agujero y la bala se incrementa, como lo hace con el escape de gas. Esta acción también erosiona el agujero, por lo que es necesaria la medición y el reemplazo del barril periódicamente para mantener el funcionamiento.

Los altos cambios de presión también resultan en una expansión permanente en el cuerpo de la pistola. Las pistolas deben ser reemplazadas periódicamente para mantener el volumen o presiones en la cámara dentro de las especificaciones.

En resumen, el funcionamiento deseado de la pistola de bala requiere un control cuidadoso en la formulación de la pólvora y un diseño adecuado de la bala con el barril.

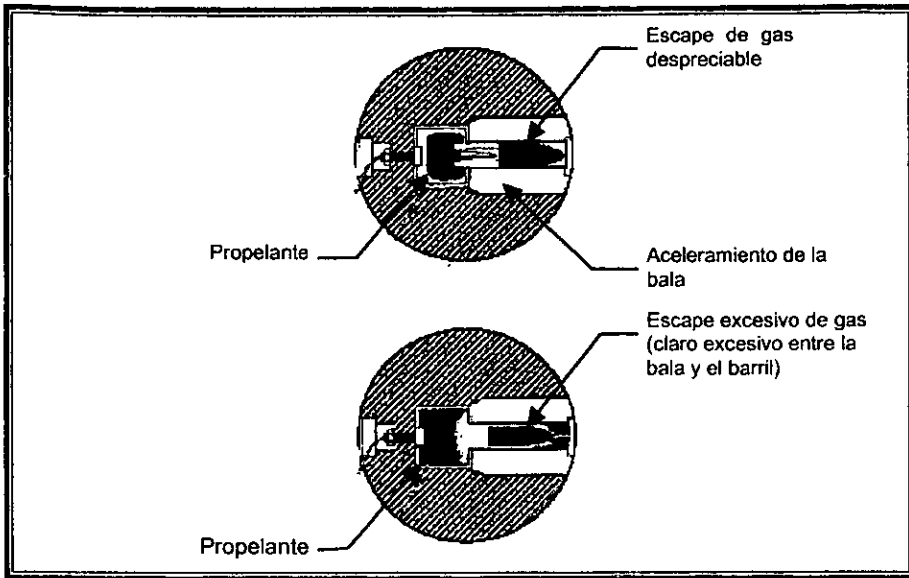


FIGURA 5.14 ESCAPE DE GAS EN LA PISTOLA DE BALA

5.2 TIPOS DE PISTOLAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

5.2.1 TIPOS DE PISTOLAS

Es difícil de obtener una clasificación unificada de los tipos de pistolas. La clasificación correcta debe estar basada en un rango de diámetro de la pistola, configuración, métodos de introducción al pozo, aplicaciones o alguna combinación de ellas. Tal vez la clasificación más simple está basada en la configuración de la pistola.¹⁰ Esta clasificación es la siguiente:

- Pistolas de cargador hueco
 - Pistolas de cargador hueco reutilizable
 - Pistolas de cargador hueco desechable
- Pistolas desechables
 - Pistolas completamente desechables
 - Pistolas completamente desechables, de diámetro extendido
 - Pistolas semi desechables
- Pistolas de bala

5.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS PISTOLAS

PISTOLAS DE CARGADOR HUECO

En pistolas de carga formada con cargador hueco, las cargas y otros compuestos explosivos son cargados dentro de una tubería, o cargador, de pared gruesa, asegurados en una posición deseada y selladas contra los fluidos del pozo y la presión. Cuando las pistolas son disparadas, las presiones instantáneas de detonación son contenidas dentro de la pistola. Las ondas de detonación de las cargas explosivas expanden un poco el cargador de la pistola, pero no lo bastante para afectar su recuperación del pozo.¹⁰

Generalmente, la mayoría de los desechos de las cargas detonantes también permanecen dentro del cargador. Sin embargo en algunos casos, una significativa cantidad de desechos de la carga pueden penetrar en la vecindad del pozo, particularmente con pistolas de alta densidad de disparos cargadas con cargas para producir grandes diámetros de disparo.

Dos configuraciones básicas, reutilizable y desechable, son usadas, como la Figura 5.15 lo muestra.¹⁰ La Figura 5.16 muestra, en sección transversal, algunas partes de las configuraciones.

Pistolas de cargador hueco reutilizable

En pistolas reutilizables o pistolas con conexión de puerto (Figura 5.15a), las cargas formadas son aseguradas en lugares con conexiones selladas insertadas dentro de la pared del cargador y empleando sistemas alineados adheridos a las cargas. El jet de la carga formada penetra la relativamente delgada sección central de la conexión de puerto (Figura 5.16a) y entonces penetra la tubería de revestimiento y la formación. La delgada sección en la conexión minimiza la energía requerida para penetrar fuera de la pistola, de este modo, se maximiza la energía disponible para penetrar la tubería de revestimiento y la formación. Cuando se recupera la pistola del pozo, las conexiones perforadas son removidas, junto con los desechos de carga dentro del cargador, y el cargador se vuelve a utilizar.

Algunas veces, las conexiones de puerto se pierden de las pistolas. La pérdida ocasional de las conexiones no es para preocuparse. Un gran número de conexiones reventadas indica que algo está fuera de especificación en la construcción, carga u operación de la pistola

Los rangos de diámetros de las pistolas reutilizables de $3\frac{1}{8}$ a 5 pg, usan generalmente un fasamiento de 90° y una densidad máxima de 4 a 6 disparos por pie. La vida útil del cargador depende de un número de factores, incluyendo el peso de los explosivos en las cargas, el espesor de pared del cargador, el material del cargador y la presión hidrostática en el fondo del pozo. Generalmente, la vida

del cargador excede los 15 viajes dentro del pozo. En algunos casos se alcanzan 30 o más viajes.

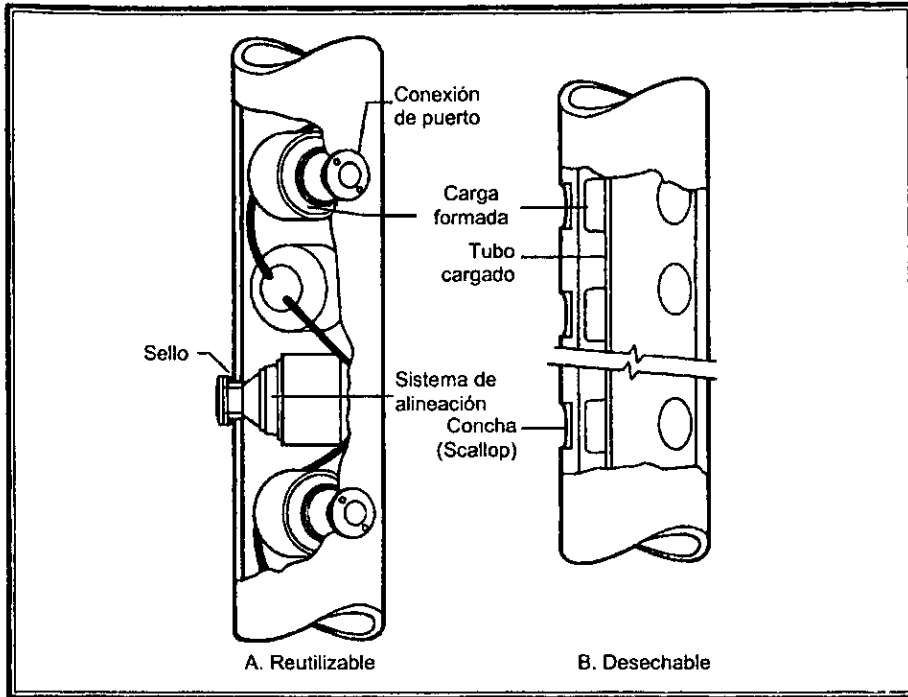


FIGURA 5.15 TIPOS DE PISTOLAS DE CARGAS FORMADAS CON CARGADOR HUECO

Pistolas de cargador hueco desechable

Este tipo de pistolas no tienen aberturas en los cargadores (conexiones selladas). La mayoría de los diseños cuenta con descansos externos, o conchas (Scallops), en la pared del cargador (Figuras 5.15b y 5.16b). Las cargas formadas son colocadas primero en un armazón o tubería y entonces el ensamble cargado es insertado dentro del cargador. Los medios indicados son proporcionados para que las cargas sean alineadas precisamente para disparar a través de las conchas, o en las secciones de espesores reducidos, en el cargador. Las conchas proporcionan la misma característica de conservación de energía del Jet, como la conexión de puerto, y contienen el "erizo" creado por la salida del Jet (Figura 5.17), minimizando por completo el diámetro de la pistola usada. Además, debido al erizo, se eliminan los problemas relacionados con la escariación de la tubería de revestimiento o daño en el equipo. El uso de cargadores con conchas es esencial cuando se disparan cargas para obtener grandes diámetros de disparo en operaciones de control de arena o de empacamiento con grava. Es esencial la

mínima pérdida de energía por penetración fuera de la pistola para que esas cargas proporcionen grandes diámetros de disparo en la tubería de revestimiento.

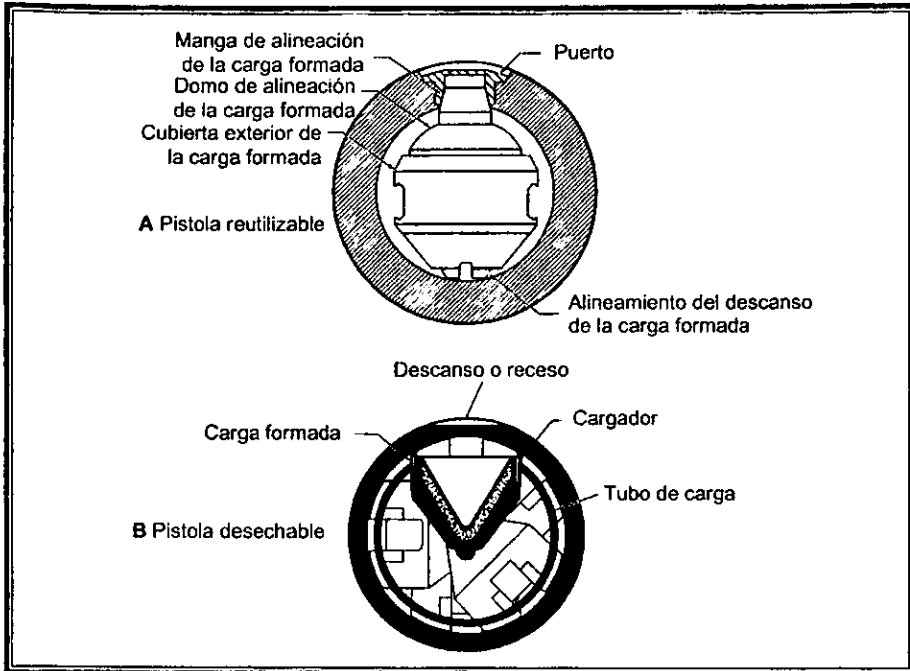


FIGURA 5.16 CONEXIÓN DE PUERTO Y RECESO EXTERNO DEL CARGADOR PARA PISTOLAS REUTILIZABLES Y DESECHABLES

Cuando se recupera la pistola del pozo, se desecha el cargador perforado de la pistola. En algunas aplicaciones de disparos con tubería de producción (terminaciones permanentes), las pistolas se dejan dentro del agujero de ratón y permanecen dentro del pozo. Las pistolas que se corren a través de la tubería de producción con cable de acero especial, están también diseñadas para ser dejadas en el fondo después de los disparos. Esas pistolas, generalmente con versiones de diámetro exterior menor que el de las pistolas estándar, se utilizan para conciliar las pequeñas restricciones de la tubería de producción mientras se proporciona el máximo funcionamiento posible de la carga. El diámetro exterior reducido del cargador de pared delgada, se expande significativamente y podría ser imposible recuperarlo debido a las restricciones que implica tener un diámetro pequeño.

Los agujeros en la conexión de puerto (en pistolas reutilizables) o en los descansos en el cargador (pistolas desechables), son buenos indicadores del disparo de la carga. Agujeros de diámetro consistente, razonablemente redondos, generalmente confirman el funcionamiento adecuado de la carga. Agujeros

alargados indican un funcionamiento inadecuado de la carga (algunas veces llamados doble-jetting) con penetración reducida y características inadecuadas de diámetro de disparo en la tubería de revestimiento.¹⁰ Sin embargo, nótese que en el caso del funcionamiento correcto de cargas, el diámetro de disparo en el cargador no es un indicador correcto del diámetro de disparo en la tubería de revestimiento. Otra indicación del funcionamiento inadecuado de la carga es la deformación inusual (hinchamiento) del cargador.

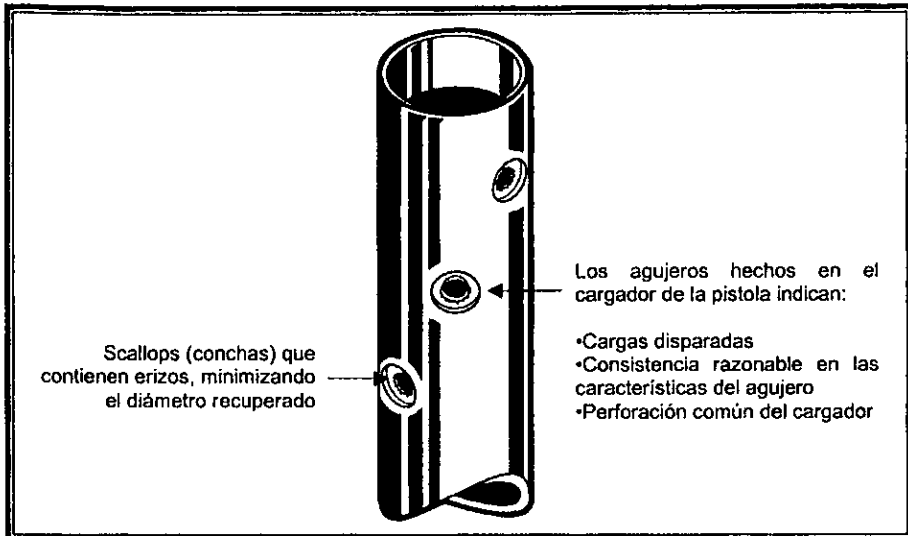


FIGURA 5.17 PISTOLA DE CARGADOR HUECO DESECHABLE RECUPERADA

Versiónes especiales de pistolas desechables de gran diámetro que no contienen conchas, son algunas veces usadas con cargas de penetración muy profunda. La pérdida de energía en la penetración de la pared del cargador no reduce significativamente la penetración de esas cargas. El diseño del cargador sin concha permite variaciones en la densidad de los disparos y el fasamiento.

La longitud individual del cargador puede llegar hasta cerca de 10 m. El rango de fasamientos va desde 0° (para pistolas posicionadas) hasta una gran variedad de configuraciones multifasadas (180°, 130°, 120°, 60°, 45°, 20°, etc.), con densidades desde 4 a 16 disparos por pie o mayores. Son típicas bajas densidades de disparos (hasta cerca de 6 disparos por pie) en pistolas de diámetro pequeño.

PISTOLAS DESECHABLES

Las pistolas desechables pueden ser clasificadas como completamente desechables o semi desechables. Debido a que el cargador no es tubular cerca de

los componentes explosivos, las cargas formadas pueden ser algo mayor que las cargas para pistolas de cargador hueco del mismo diámetro.¹⁰

Pistolas completamente desechables

Las pistolas desechables típicas (Figura 5.18)¹¹ no se recuperan después de ser disparadas. Las cargas están selladas individualmente contra el ambiente del fondo del pozo. Un medio de conexión sujeta las cargas juntas en una específica relación de fasamiento.

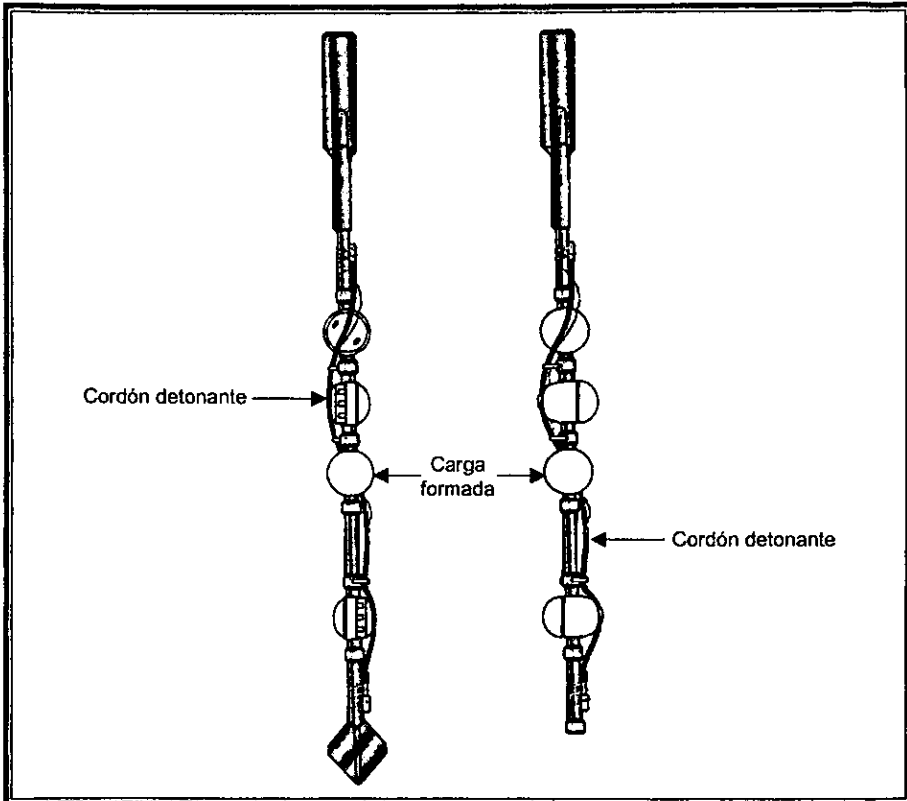


FIGURA 5.18 PISTOLAS TÍPICAS DE CARGA FORMADA COMPLETAMENTE DESECHABLES

El cordón detonante y el detonador son expuestos a la presión, temperatura y fluidos del fondo del pozo. Expuesto el cordón detonante a estas condiciones, debe ser instalado de tal forma que se tenga la posibilidad de que el frotamiento del cordón contra la tubería sea minimizado, particularmente en pozos altamente desviados. El daño a la capa protectora en el cordón y la exposición de los explosivos a los fluidos del fondo del pozo puede causar una falla en los disparos.

Cuando la pistola es disparada, las fuerzas de la explosión fragmentan el contenedor de la carga y todos los desechos resultantes permanecen en el pozo. En algunos casos, los desechos pueden tapan la tubería de producción o la de revestimiento, o interferir o dañar el equipo de producción. El tipo de desechos depende del material usado y del tipo de conexión de carga a carga. Los materiales del contenedor incluyen vidrio, cerámica, aluminio y acero.

Los medios de conexión entre las cargas individuales proporcionan un incremento en la flexibilidad de la sarta de la pistola comparada con la sarta de la pistola de cargador hueco. La flexión de la pistola, facilita la bajada a través de tubería de producción doblada, torcida, o con alguna restricción.

Los rangos de diámetros que van desde $1\frac{3}{8}$ hasta mayores de 7 pg permiten usarse en operaciones a través de tubería de producción y de revestimiento. Se dispone de una gran variedad de fasamientos y el rango de densidad de disparos por pie va de 4 a 12.

Pistolas completamente desechables, de diámetro extendido, corridas a través de tubería

La nueva tecnología proporciona un alto desempeño de penetración con pistolas completamente desechables mediante la ampliación del diámetro de la pistola debajo de la tubería de producción. Las cargas individuales son montadas dentro de un cargador cilíndrico ranurado. Como la Figura 5.19 lo indica, la pistola es corrida con las cargas dobladas dentro del cargador y es capaz de pasar a través de la tubería de producción y por los nipples de asiento asociados. Cuando la pistola es posicionada a la profundidad de disparo deseada en la tubería de revestimiento, las cargas son desplegadas y disparadas. Las cargas grandes posicionadas con un óptimo claro proporcionan una penetración equivalente a una pistola de cargador hueco de gran diámetro (Ejemplo, una pistola de $1\frac{11}{16}$ " tendrá una penetración igual o mejor que una pistola de cargador hueco de 4 pg). Además, la pistola dispara a 180° en vez de 0° , como lo hacen la mayoría de las pistolas pequeñas corridas a través de tuberías de producción. Cuando hay falla en los disparos, la pistola puede ser sacada dentro de la tubería de producción, doblando las cargas dentro del cargador y permitiendo la recuperación total de la pistola. Cuando se dispara la pistola, todos los fragmentos de sarta bajo la cabeza desplegada y los residuos caen dentro del agujero de ratón.

Pistolas semi desechables

En este tipo de pistola es característica la recuperación de una porción de la pistola después del disparo. Al igual que con las pistolas completamente desechables, las cargas, el cordón detonante y el detonador se encuentran sometidas a las condiciones ambientales del pozo. Las cargas generalmente están conectadas mediante una barra semi rígida montada al frente o tira, (Figura 5.20), o bien, montada al centro con alambre de alta resistencia (Figura 5.21), las cuales son recuperadas del pozo después del disparo.

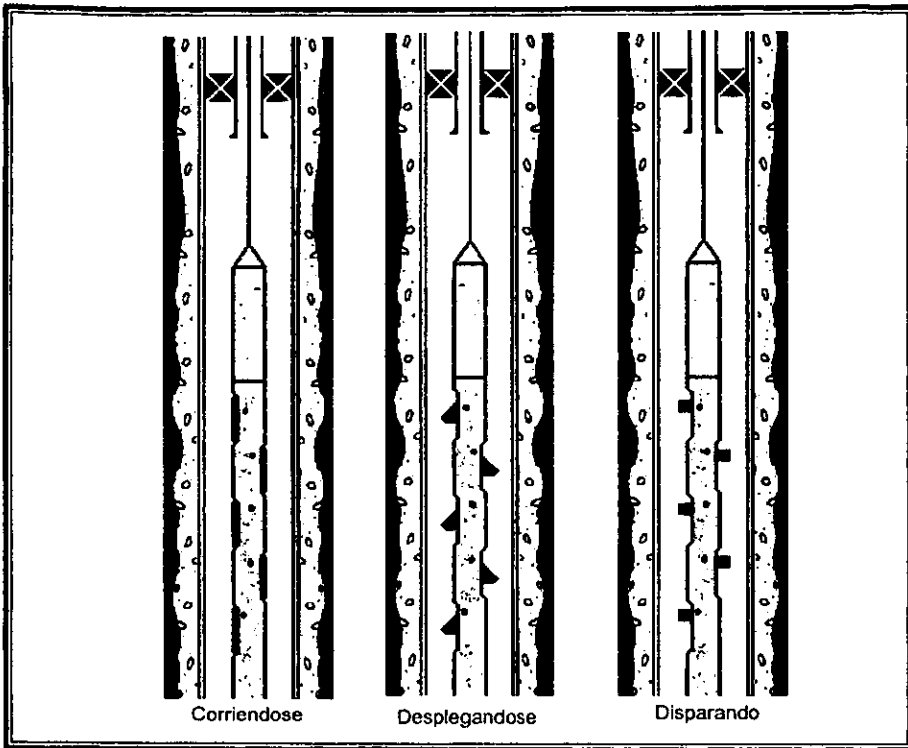


FIGURA 5.19 PISTOLAS DE DIÁMETRO EXTENDIDO CORRIDAS A TRAVÉS DE TUBERÍA

Solo las versiones con barra montada al frente indican un disparo adecuado; la barra recuperada muestra agujeros del jet. La otra versión solo indica la detonación de la carga y no confirma la formación del jet.

Las pistolas semi desechables proporcionan de 4 a 6 disparos/pie, generalmente son posicionadas con un claro de cero y a 0° de fasamiento en operaciones a través de la tubería de producción. Sin embargo, algunas pistolas son fasadas a más o menos 45° o 60° (Figura 5.22) para operaciones posicionadas a través de la tubería de producción. Un fasamiento de 180° puede ser una alternativa para pistolas grandes operadas en tuberías de revestimiento.

PISTOLAS DE BALA

Estas pistolas son recuperables y su configuración se describió anteriormente.¹⁰ El diámetro de las pistolas es de $3\frac{1}{8}$ a $5\frac{1}{4}$ pg y son mayores de 5 m de longitud.

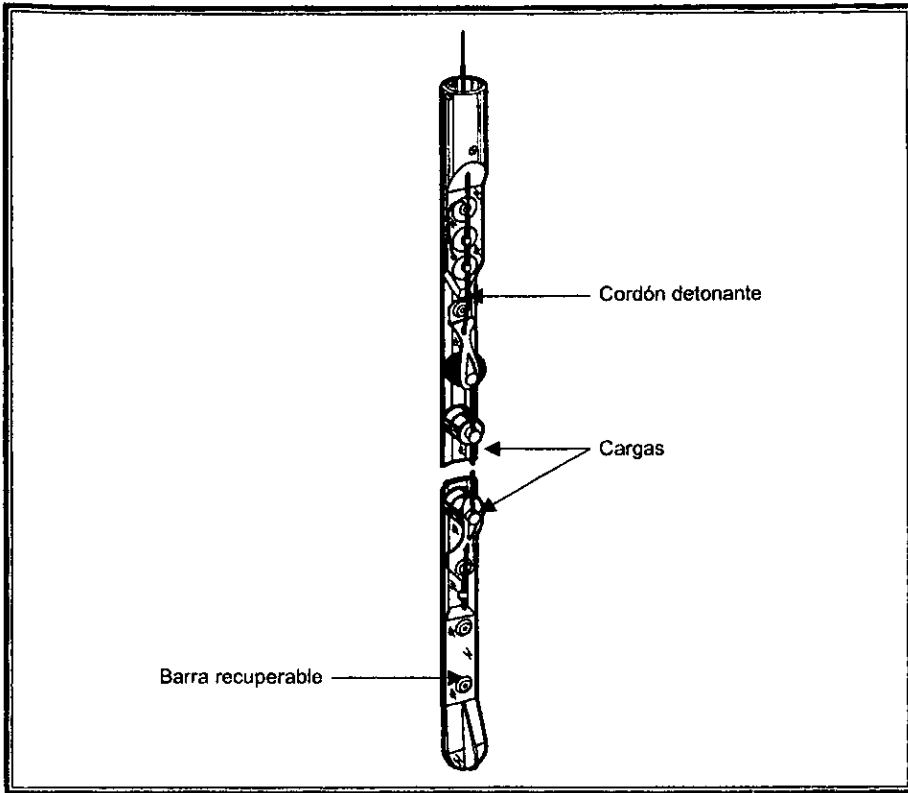


FIGURA 5.20 PISTOLA SEMI DESECHABLE TÍPICA DE CARGA FORMADA CON BARRA MONTADA AL FRENTE

El rango de fasamiento de disparos es de 60° a 120° , con densidades de 6 disparos/pie. Actualmente se están desarrollando pistolas especiales para operaciones con empacamiento de arena con diámetros desde 5 hasta 6 pg. Estas pistolas multifasadas proporcionarán diámetros de disparo en la tubería de revestimiento de aproximadamente de $1\frac{1}{4}$ ", con densidades de 12 disparos/pie.

5.2.3 CARACTERÍSTICAS DE COMPARACIÓN

La Tabla 5.1 muestra una comparación completa de las características de varias pistolas.

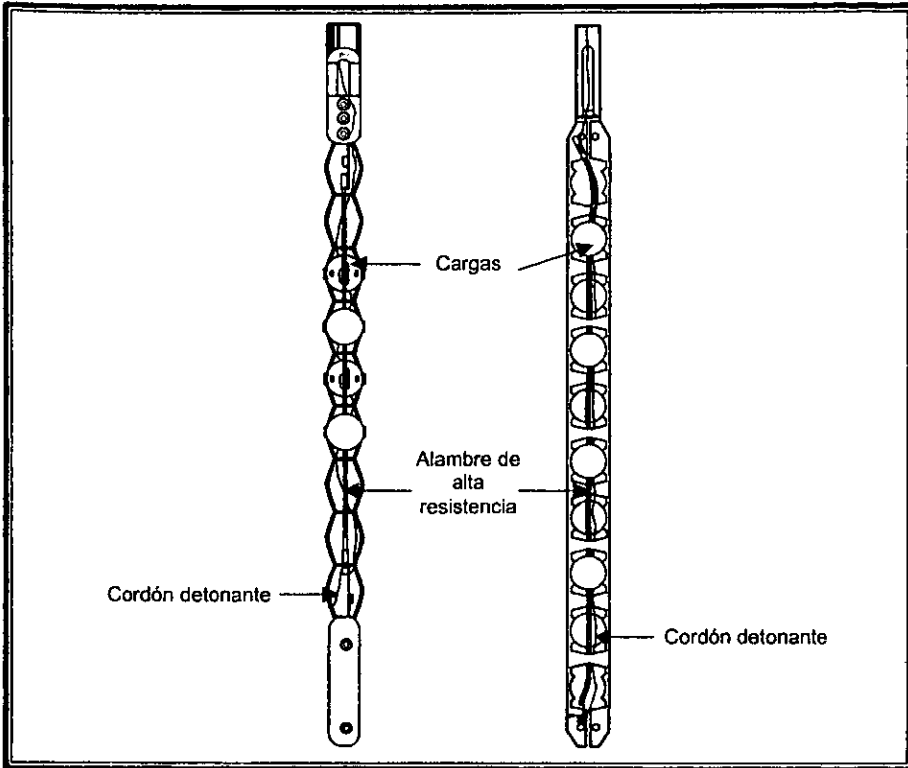


FIGURA 5.21 PISTOLA SEMI DESECHABLE TÍPICA DE CARGA FORMADA MONTADA AL CENTRO

PISTOLAS DE CARGADOR HUECO

Los dos tipos de pistolas de cargador hueco están caracterizadas por una protección completa de los componentes del explosivo. Sólo esas pistolas operarán con seguridad a presiones y temperaturas elevadas (aproximadamente a 15,000 lb/pg² y 163°C respectivamente). A pesar de sus dimensiones, el disparo de esas pistolas raramente causa deformación a la tubería de revestimiento, si las pistolas son usadas correctamente y operadas de forma normal. Un mínimo de residuos es dejado en el pozo, la mayoría son retenidos en el cargador bajo condiciones normales.

Debido a que los componentes del explosivo están protegidos de las condiciones de fondo del pozo, estas pistolas son ideales para operaciones de disparos selectivos, donde dos o más pistolas son corridas en el mismo viaje dentro del pozo y disparadas sucesivamente a diferentes profundidades.

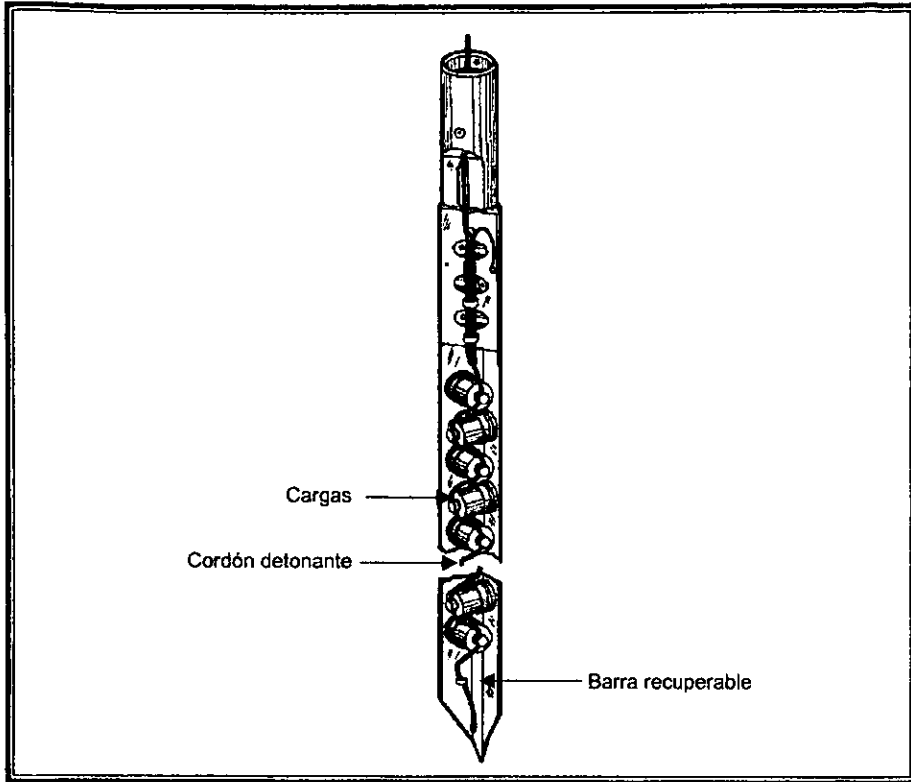


FIGURA 5.22 PISTOLA SEMI DESECHABLE FASADA

Prácticamente, las pistolas de cargador hueco proporcionan un desempeño más completo (máxima penetración y dimensión de disparo en la tubería de revestimiento) en pistolas con diámetro exterior mayor de 3 pg. No se recomienda el uso de pistolas desechables grandes debido a su mayor cantidad de explosivos y el probable incremento de daño a la tubería de revestimiento.

PISTOLAS DESECHABLES

Debido a que las cargas para pistolas desechables son un poco mayores que las pistolas de cargador hueco del mismo diámetro, proporcionan mayor penetración y diámetro de disparo en la tubería de revestimiento, particularmente con pistolas de diámetro pequeño ($2\frac{1}{4}$ " y menores). Esas pequeñas cargas desechables, con cargas de explosivos menores de 25 gr, producen solo una modesta deformación a la tubería de revestimiento, cuando ésta está en buenas condiciones y bien cementada. Además, si existe un agujero de ratón adecuado, la cantidad de desechos generados no afectará los posibles intervalos productores inferiores. Sin

embargo, las cargas desechables grandes no se recomiendan para el uso rutinario, debido a su gran carga de explosivos y el probable daño a la tubería de revestimiento. Además, esas cargas dejan gran cantidad de desechos en el pozo, haciéndose necesario el uso del agujero de ratón.

TABLA 5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PISTOLA

Característica	Pistolas de carga formada			Pistolas de bala
	De cargador hueco	Semi desechable	Completamente desechable	
Robustez	A	B	C	A
Confiabilidad	A	B	C	A
Rango de presión	A	C	C	B
Rango de temperatura	A	C	C	C
Desechos	A	B	C	A
Deformación de la T.R.	A	B	C	B
Disparos selectivos	A	B	C	A
Penetración, en T.R.-2 ⁷ / ₈ a través de 7 ¹ / ₄ pg	A	*	*	C
Penetración a través de TP 1 ³ / ₈ a través de 2 ¹ / ₈ pg	C	A	B	N/A
Flexibilidad	C	B	A	C
Indicador de que la carga disparó	A	B	C	C
Costo	C	B	A	A

A - Es más deseable
 * Las pistolas en este rango de dimensiones no representan un daño potencial para la T.R.

Una ventaja significativa de las pistolas desechables es su flexión, la cual facilita el descenso a través de tubería doblada o torcida. Este es, frecuentemente, el único tipo de pistolas que pueden ser corridas con éxito.

Solo pistolas con una barra montada al frente indican el disparo de la pistola y si todas las cargas producen Jets. Al igual que con las pistolas de cargador hueco, la indicación de formación del jet no proporciona información referente a la penetración o a la dimensión del disparo en la tubería de revestimiento.

PISTOLAS DE BALA

Las pistolas de bala se caracterizan también por su robustez y confiabilidad de funcionamiento. Cuando operan normalmente, no dejan desechos en el pozo, y

cuando se disparan en tubería de revestimiento bien cementada, no le causan un daño apreciable. Son apropiadas para operaciones de disparos selectivos. Una característica importante de la pistola de bala es el diámetro y forma consistente del disparo en la tubería de revestimiento.

5.2.4 APLICACIONES

La Tabla 5.2 presenta una comparación completa de aplicaciones para varios tipos de pistolas.

PISTOLAS DE CARGADOR HUECO

Estas pistolas usadas en un gran rango de configuraciones del pozo y condiciones de fondo, son usadas en la mayoría de las operaciones de disparos.

Pistolas de cargador hueco reutilizable

Las pistolas reutilizables, o tipo port-plug (conexión de puerto), son usadas principalmente en operaciones de conducción con línea de acero, donde el tiempo de exposición a la presión y temperatura de fondo del pozo es mínima (1 a 3 horas). No obstante, son apropiadas para operaciones de alta presión y alta temperatura y para operaciones de disparos selectivos. Las pistolas reutilizables son adecuadas también para las operaciones en tuberías de revestimiento viejas o corroidas.

Como se indicó anteriormente, las pistolas reutilizables con diámetro entre un rango de aproximadamente $3\frac{1}{8}$ a 5 pg, generalmente usan 90° de fasamiento y tienen como máxima densidad de disparos por pie de 4 a 6.

Pistolas de cargador hueco desechable

Estas pistolas están disponibles en diámetros de $1\frac{1}{4}$ a $7\frac{1}{4}$ pg aproximadamente, expandiendo su rango para disparos a través de tubería de producción de $1\frac{1}{2}$ " y para operaciones de terminación en sartas de tuberías de revestimiento de gran diámetro. Se pueden correr todas las dimensiones de esas pistolas con línea de acero. Versiones de alta densidad de disparo (en diámetros desde $2\frac{7}{8}$ " y mayores), pueden ser corridas con tubería o línea de acero. Versiones de alta densidad de disparo, cargadas con cargas para crear disparos de gran diámetro, son apropiadas para terminaciones con empacamiento de arena y para control de arena. Las pistolas pueden ser también cargadas con cargas de penetración profunda para operaciones de terminación sencilla. Debido a su construcción robusta y un mínimo de sellos, esas pistolas son ideales para grandes exposiciones de tiempo en ambientes de alta presión y alta temperatura (200 horas o más). Todas las pistolas pueden ser disparadas selectivamente.

TABLA 5.2 APLICACIONES DE LAS PISTOLAS BASADAS EN PRÁCTICAS DE CAMPO

Aplicaciones	Cargador hueco		Semi desechable	Completamente desechable	Pistola de bala
	Reutilizable	Desechable			
Conducida con línea de acero	A	A	A	A	A
Conducida con tubería	--	A	--	--	--
Presión elevada (>15 ksi)	B	A	C	C	C
Temperatura elevada (>163 °C)	B	A	C	C	C
Larga exposición al pozo	--	A	--	--	--
Mínimo de desechos	A	A	B	C	A
Carácter de desecho	A	A	B	C	A
T.R. vieja o debilitada	A	A	C	C	A
Tubería dañada u obstruida	A	A	C	C	A
A través de tubería (<3 1/2")	--	A	A	A	--
Tubería torcida o doblada	--	--	B	A	--
Mínimas restricciones en la T.P.	--	--	A	A	--
Aplicaciones de profunda penetración	A	A	A	--	--
Empacamiento de grava	--	A	--	--	--
Alta densidad de disparos (>6 dpp)	--	A	--	--	--
Diámetro de disparo consistente y posicionada	A	A	--	--	A
Disparos selectivos	A	A	--	--	A
Gas seco	C	A-C*	A	--	--

A = Es más deseable
 *Dependiendo del diámetro y características de la pistola se tendrá la mínima presión requerida
 Ksi x 6.894757 = Mpa

Versiones especiales de pistolas de diámetro exterior reducido, corridas a través de tubería de producción, pueden utilizarse en sartas más pequeñas que la usual. Por ejemplo, una pistola de 1.832 pg puede ser corrida a través un niple de 1.875 pg y funciona de manera similar a la de una pistola de 2 pg, previniendo la necesidad de usar una de 1¹¹/₁₆" que es de menor desempeño. La pared delgada del cargador de la pistola de diámetro exterior reducido se expande significativamente después del disparo y cae dentro del agujero de ratón.

PISTOLAS DESECHABLES

Aunque están disponibles en un amplio rango de diámetros, las pistolas completamente desechables y semi desechables se usan principalmente en operaciones realizadas a través de tubería de producción en dimensiones de $1\frac{3}{8}$ a $2\frac{1}{8}$ pg. Estas pistolas son populares por su mejor diámetro de disparo y penetración comparada con pistolas de cargador hueco del mismo diámetro. Las pistolas semi desechables con barra montada al frente generalmente son preferidas a causa de su construcción robusta, confiabilidad, reduce el problema de desechos, y su característico medidor, que indica que la carga disparó adecuadamente.

Las pistolas completamente desechables deben ser utilizadas cuando la flexión de la sarta de la pistola es una consideración importante (por ejemplo cuando se tienen que correr en tubería de producción doblada o torcida). Sin embargo, el uso de pistolas grandes generalmente debe evitarse a causa de su gran carga de explosivo y al potencial para dañar la tubería de revestimiento.

PISTOLAS DE BALA

Aunque las pistolas de bala son usadas hoy en día en operaciones de disparos en un porcentaje relativamente pequeño, ofrecen la ventaja de una consistente forma y diámetro de disparo en la tubería de revestimiento. Las pistolas de bala son una excelente elección para todos los tipos de fracturamiento hidráulico u otras operaciones de inyección.

5.2.5 LIMITACIONES

Cada tipo de pistola tiene una o más limitaciones. Una revisión de los objetivos de la terminación antes de la selección de la pistola, es esencial para obtener el funcionamiento óptimo de la pistola y la mejor respuesta del pozo.

PISTOLAS DE CARGADOR HUECO REUTILIZABLE

Su uso está confinado a operaciones de conducción con línea de acero, donde la exposición a las condiciones de fondo de pozo es corta. Se debe tener cuidado en operaciones bajo balance o en pozos llenos de gas. La relativamente baja densidad de los disparos y la variedad limitada de fasamiento en estas pistolas puede limitar su uso.

PISTOLAS DE CARGADOR HUECO DESECHABLE

Se requiere cuidado cuando estas pistolas son utilizadas bajo balance o en pozos llenos de gas, debido a que son susceptibles a hinchamientos excesivos o agrietamientos bajo esas condiciones. Se debe tener atención en las especificaciones para cada pistola en particular antes de ser usada. La mayoría de

las pistolas de $1\frac{3}{8}$ a $2\frac{1}{8}$ pg requieren una presión mínima para evitar el hinchamiento excesivo o la ruptura. El rango de presiones posibles es de 500 lb/pg² para servicios de líquido hasta 5,000 lb/pg², como máximo, para servicios de gas seco, dependiendo la pistola. Se deberá también tener cuidado en la selección del material adecuado del cargador en pistolas grandes con altas densidades de disparo, para evitar problemas en operaciones donde la presión hidrostática es baja. La precaución es indicada en pistolas corridas a través de tubería debido a que los rangos de presión pueden ser sustancialmente menores que los de las pistolas estándar, esto es, bajo balance.

El funcionamiento de la familia entera de pistolas de $1\frac{3}{8}$ a $2\frac{1}{8}$ pg es frecuentemente considerado marginal, alentando el uso de pistolas reutilizables o desechables de alto funcionamiento, donde las condiciones del pozo lo permitan.

PISTOLAS DESECHABLES

Una limitación seria para grandes pistolas desechables es la gran carga característica del explosivo y el potencial para dañar la tubería de revestimiento. La situación es particularmente aguda en pozos con tubería desgastada o corroída o en pozos donde no está bien cementada.

Las pistolas completamente desechables generan desechos excesivos que pueden no llegar al fondo del pozo y que pueden tapar las tuberías de producción y de revestimiento o puede interferir con la tubería de producción y/o dañarla. Los fluidos de terminación de alta densidad y las tuberías de diámetro interior pequeño incrementan la probabilidad de problemas.

Muchas pistolas desechables no pueden ser operadas en ácido debido a que los componentes de la pistola son atacados por el ácido y fallan a la presión a la que están sujetas, o detonan prematuramente. Igualmente, el gas puede filtrarse a través del material del contenedor o los sellos, resultando en una penetración reducida (cerca de 12% de reducción de penetración por cada incremento de 1,000 psi de presión). La filtración de líquido dentro de las cargas, en algunos diseños de pistolas semi desechables, puede resultar en deformación excesiva o separación de las cargas.

PISTOLAS DE BALA

Sólo un rango limitado de dimensiones esta disponible (cerca de $3\frac{1}{8}$ a $5\frac{1}{4}$ pg). La temperatura estándar es aproximadamente 120°C, con propelantes especiales disponibles para servicios a 200°C. La penetración de la bala decrece sustancialmente en formaciones de gran resistencia y cuando es usada una tubería de revestimiento de muy alta resistencia.

5.3 EFICIENCIA DE FLUJO DEL SISTEMA DISPARADO

La eficiencia de flujo de las terminaciones disparadas, ha sido la mayor inquietud desde que se usó la primera pistola para disparar en los años 1930's. El problema inicialmente fue atribuido al área restringida disparada a través de la tubería de revestimiento comparada con la mayor área superficial de una terminación en agujero descubierto de la misma longitud. Sin embargo, en 1950 estudios experimentales indicaron que, con una penetración y densidad de disparos adecuada, la eficiencia de flujo del sistema disparado sería mejor que la de una terminación en agujero descubierto de longitud similar.¹⁰ Desgraciadamente, aún con la geometría adecuada, los resultados de campo se parecen poco a los resultados predichos. Las continuas investigaciones han indicado que la productividad está influenciada, no sólo por la geometría de disparo, sino también por las características de la formación y el ambiente de disparo, interactuando en una forma compleja. Es esencial un entendimiento de esta interacción si la productividad se va optimizar.

5.3.1 EFICIENCIA DE FLUJO DEL POZO

La eficiencia de flujo o productividad de una terminación disparada puede ser definida en términos de: (1) La relación de productividad, la cual es la relación del gasto de un sistema disparado dividido entre el gasto ideal de un sistema en agujero descubierto, y (2) El factor de daño, el cual es una medida de la caída de presión real a través del sistema disparado, comparado con la caída de presión ideal predicha por la teoría de flujo radial para el mismo gasto. Las dos definiciones son equivalentes y están relacionadas mediante una expresión matemática simple:

$$J = \frac{q_p}{q_{oh}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}{\left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + s_i\right]} \quad (5.1)$$

Donde:

- J = Productividad,
- q_{oh} = Gasto ideal de un sistema en agujero descubierto,
- q_p = Gasto real en el sistema disparado,
- r_e = Radio de drene, pies,
- r_w = Radio del pozo, pies, y
- s_i = Daño total.

J generalmente es usada para propósitos ilustrativos. El factor de daño se utiliza para análisis cuantitativo debido a que permite la estimación de los elementos discretos que componen el daño total.

El efecto de daño inicialmente fue entendido como una zona delgada de formación dañada rodeando la vecindad del pozo. Más tarde, la zona de permeabilidad reducida alrededor del disparo fue considerada un daño adicional. En ambas situaciones, el daño describe un fenómeno físico. Sin embargo, hace más de 30 años el daño empezó a ser usado matemáticamente para calcular las caídas anormales de presión.¹⁰

Desde luego, el concepto matemático de daño es esencial para un diseño y un análisis adecuado de la terminación. La evidencia empírica es abrumante con respecto a las caídas de presión como resultado del daño en la vecindad del pozo y en los disparos, los disparos taponados, el flujo no radial alrededor del pozo, los efectos de la geometría de la terminación, las características de la formación, el ambiente de disparos, etc.¹⁰ Un análisis cuidadoso de esos elementos y su respectiva contribución al daño total es fundamental para cuantificar el daño total.

5.3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DAÑO Y LA EFICIENCIA DE FLUJO DEL POZO

La compleja interacción de la geometría de disparo, las características de la formación y el ambiente de disparo imposibilitan soluciones globales simples para diseñar o analizar terminaciones de pozos. Cada caso debe ser estudiado individualmente y se debe considerar toda la información disponible (núcleos, registros, pruebas de pozo, etc.). Debido a que cierta información necesaria (p. ej. el grado y la severidad de daño al pozo) frecuentemente no está disponible o es de calidad cuestionable, los métodos descritos aquí deben considerar lineamientos generales. Sin embargo, cuando se aplican consistentemente y se validan con pruebas de campo, esas técnicas proporcionan medios razonables para predecir el funcionamiento del pozo.

GEOMETRÍA DEL DISPARO

La Figura 5.23 muestra la geometría típica de una terminación sencilla disparada. Los parámetros que más influyen en la eficiencia de la terminación son la densidad efectiva de los disparos (número real de disparos produciendo por pie), la penetración del disparo dentro de la formación, el fasamiento angular y el diámetro del disparo.¹¹

La compleja geometría de la Figura 5.23 guió a los primeros investigadores a usar un modelo análogo y a asumir disparos ideales (no dañados), sin daño alrededor de la vecindad del pozo y un yacimiento isotrópico.¹⁰ Se utilizaron técnicas de simulación desarrolladas (procedimientos de diferencias finitas y después métodos de elemento finito más precisos) para estimar los efectos de daño, culminando con una solución general de buena precisión y requiriendo de hipótesis poco simplificadas.¹⁰

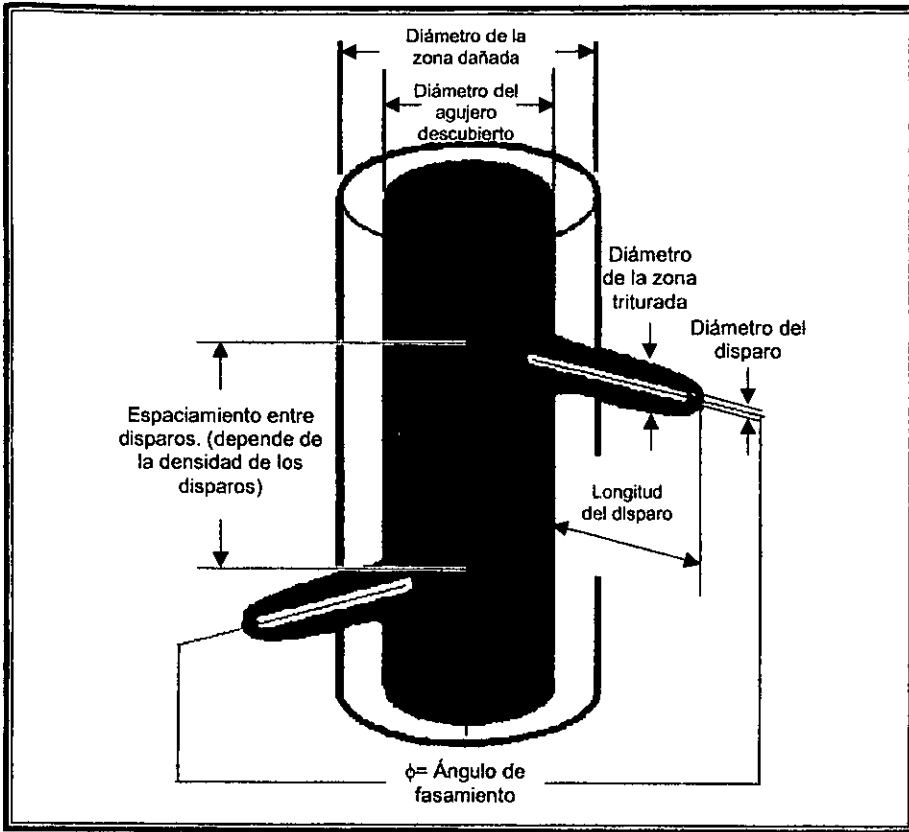


FIGURA 5.23 GEOMETRÍA TÍPICA DEL POZO DISPARADO EN UNA TERMINACIÓN SENCILLA

Generalmente los factores geométricos influyen en el índice de productividad para una terminación sencilla en un yacimiento ideal e isotrópico.

1. La productividad se incrementa con la densidad de disparos (Figura 5.24).¹¹
2. La productividad se incrementa con el incremento en la penetración de los disparos (Figuras 5.24 y 5.25).¹¹
3. El efecto del incremento de penetración es más significativo en disparos poco profundos que en disparos profundos (Figuras 5.24 y 5.25).¹¹
4. Un fasamiento angular diferente a 0° incrementa la productividad, reduciendo la interferencia con el flujo proveniente de la vecindad del pozo (Figuras 5.24 y 5.25).¹¹

5. El diámetro del disparo toma un papel relativamente menor en la determinación de la productividad (Figura 5.25).¹¹

Nota: las Figuras 5.24 a la 5.28 son descriptivas.

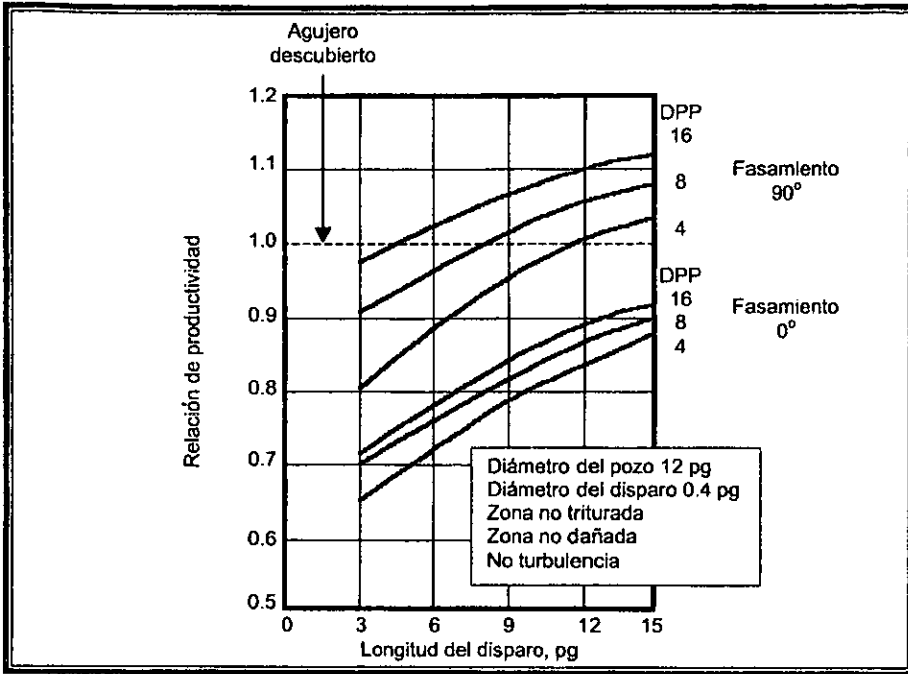


FIGURA 5.24 EFECTO DE LA DENSIDAD Y LA LONGITUD DE LA PERFORACIÓN EN LA RELACIÓN DE PRODUCTIVIDAD

CARACTERÍSTICAS DE LA FORMACIÓN

En adición a los factores geométricos, las siguientes características físicas de la formación deben ser consideradas:

Propiedades físicas

El tipo de formación (arenisca, caliza, etc.), resistencia a la compresión, y condiciones de esfuerzo in-situ influyen en la penetración de la pistola, en la extensión y grado de daño alrededor del disparo y en las características de limpieza del disparo.

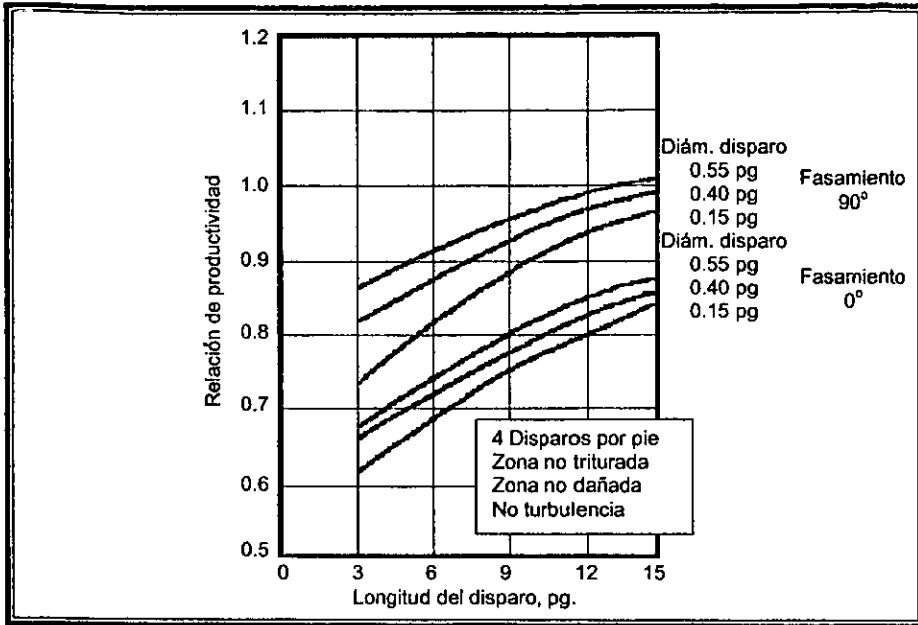


FIGURA 5.25 EFECTO DEL DIÁMETRO Y LA LONGITUD DE LOS DISPAROS EN EL ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD

Permeabilidad y fluido de la formación

Estos dos factores determinan grandemente el nivel de presión diferencial (de la formación al pozo) requerida para limpiar efectivamente los disparos. Se requieren mayores presiones diferenciales para limpiar los disparos en formaciones productoras de gas que en formaciones que tienen aceite. Los efectos adversos de reducción de la permeabilidad alrededor de los disparos aparentemente son amplificados por flujo turbulento.

Permeabilidad anisotrópica (K_H/K_V)

La Figura 5.26 muestra los efectos de la permeabilidad anisotrópica en la eficiencia de los disparos.¹¹ Incrementos significantes en la productividad resultan de altas densidades de disparos, particularmente cuando el grado de anisotropía se incrementa. El efecto de la longitud del disparo no es tan significativo como lo es la densidad de los disparos.

Lutitas laminares

Los efectos de lutitas laminares son similares a los de la permeabilidad anisotrópica. La productividad es altamente insensible a la longitud del disparo,

mientras se incremente la densidad de disparos se puede mejorar la eficiencia de flujo por el taponamiento de un gran número de estratos productores.

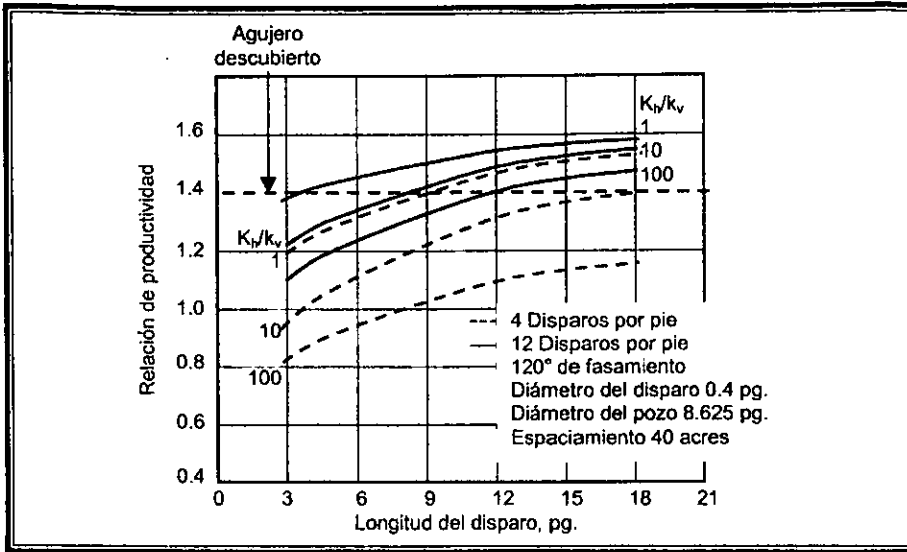


FIGURA 5.26 EFECTO DE LA PERMEABILIDAD ANISOTRÓPICA EN EL ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD

Fracturas naturales

Una red de fracturas naturales proporciona transporte eficiente de fluidos dentro de la formación. La productividad de la terminación disparada depende de la comunicación hidráulica entre los disparos y la red de fracturas y varía con el tipo, la orientación y el intervalo de la fractura. La Figura 5.27 indica la productividad teórica de una terminación disparada en una red ortogonal de fracturas. La profundidad de penetración y los pequeños bloques de la matriz proporcionan una buena productividad. Los efectos de densidad de los disparos son relativamente insignificantes ya que la red de fracturas proporciona buena comunicación vertical. Sin embargo, pueden resultar diferencias significantes en la productividad por la diferente orientación de la fractura, y cada caso deberá ser analizado individualmente para proporcionar una terminación que asegurará una conexión óptima entre las fracturas y los disparos. Además, modelar los sistemas de fracturas es difícil y los resultados son algunas veces desilusionantes.

AMBIENTE DE DISPAROS

Una tercera consideración en la productividad del pozo es el ambiente en que se llevan a cabo los disparos.

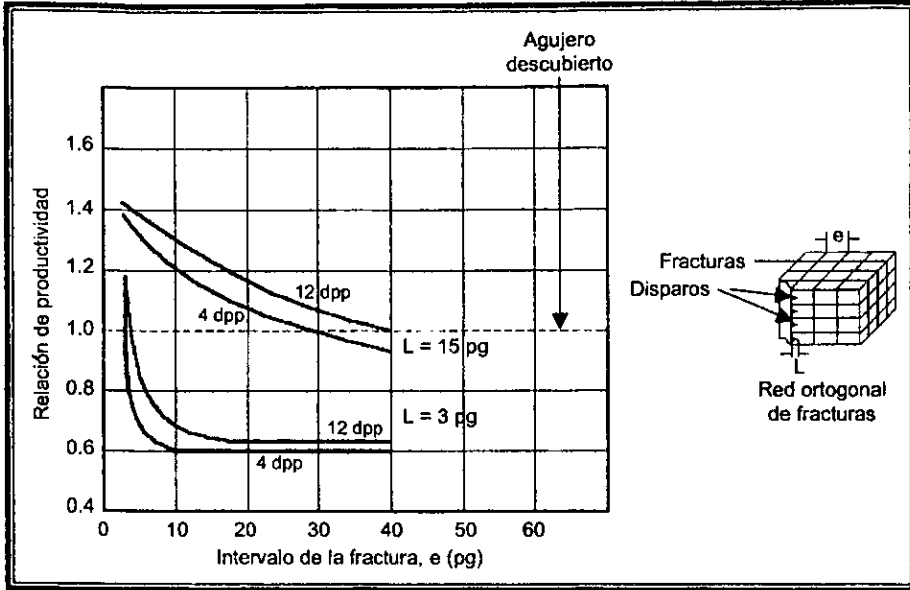


FIGURA 5.27 RELACIÓN DE PRODUCTIVIDAD EN UNA FORMACIÓN NATURALMENTE FRACTURADA

Daño al pozo

Las operaciones de perforación y cementación crean una zona de permeabilidad reducida alrededor de la cercanía del fondo del pozo como resultado del filtrado del fluido de perforación o del cemento, o de la invasión de sólidos. La Figura 5.28 indica el efecto en la productividad de una zona de permeabilidad reducida de 8 μg de profundidad alrededor del pozo. En la práctica, el grado y extensión del daño generalmente son difíciles de determinar. Si se sospecha de un daño significativo, entonces deberá ser usada una pistola de máxima penetración.

Daño a los disparos

Los perfiles de inyectividad y de productividad muestran comúnmente que solo una pequeña fracción de los disparos está fluyendo. Como se dijo anteriormente, investigaciones de campo y de laboratorio sugieren que hay una zona de permeabilidad dañada alrededor de los disparos (ver Figura 5.11). La extensión y el grado de daño dependen del tipo de formación, del tipo de porosidad y permeabilidad, del tipo de carga formada, y de la dirección y el nivel de la presión diferencial al momento del disparo. Las pistolas de bala crean una zona similar. El daño a los disparos puede ser debido al filtrado de lodo o por la invasión de sólidos.

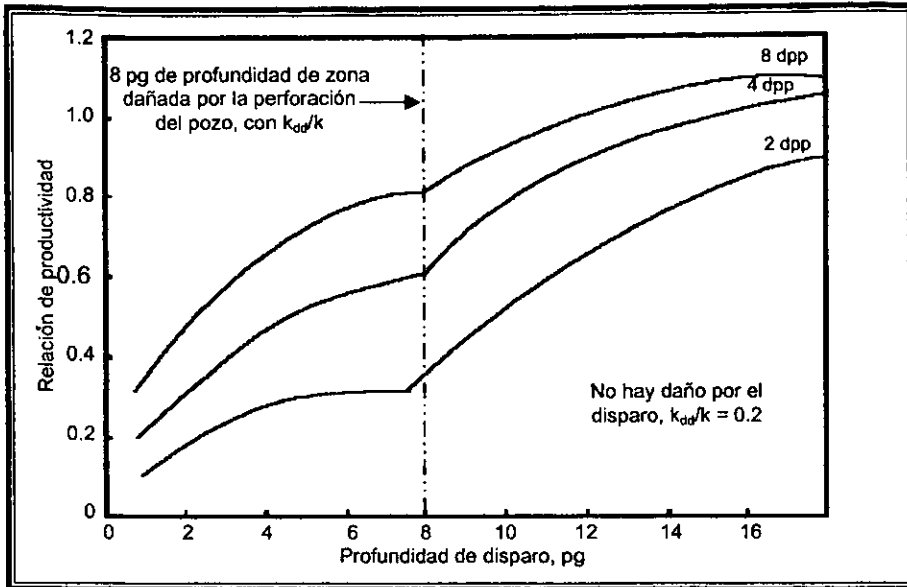


FIGURA 5.28 EFECTO DEL DAÑO EN EL POZO SOBRE EL ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD

Presión diferencial

El nivel y dirección de presión diferencial de la formación al pozo, influye fuertemente en la eficiencia de flujo. Los disparos bajo balance (presión de formación mayor que la presión de fondo del pozo) facilitan el rápido flujo de los desechos fuera de los disparos, mejorando la eficiencia de flujo. Los disparos sobre balance (presión de fondo del pozo mayor que la presión de formación) pueden resultar en una reducción significativa de la productividad. Sin embargo, ha habido excepciones que favorecen las terminaciones sobre balance.

Fluido de terminación

Aunque disparar en lodo puede resultar en un taponamiento de los disparos, particularmente en disparos sobre balance, el uso de fluidos limpios y compatibles, acompañados con un apropiado nivel de bajo balance, puede mejorar la productividad en operaciones realizadas con línea de acero y con tubería.

Desviación del pozo

La mayoría de los pozos no penetran la formación productora perpendicularmente. Por el contrario, hay un ángulo entre el plano normal a la formación y el eje del pozo, como lo es cuando un pozo vertical penetra una formación inclinada, o

cuando un pozo perforado direccionalmente penetra una formación horizontal. Esta desviación del pozo, con respecto a la formación, resulta en un incremento de productividad, debido a que un incremento en el área del intervalo productor es expuesto al flujo. Este incremento en la productividad resulta en un efecto negativo al daño.

Penetración parcial

En algunos pozos, solo una fracción del intervalo productor es abierta al flujo. Por ejemplo, si existe un casquete de gas, el intervalo abierto está localizado lejos del contacto gas-aceite para prevenir conificación de gas. Los pozos que intencionalmente han sido abiertos al flujo, en sólo una fracción a lo largo de la formación productora, son llamados pozos con entrada limitada o penetración parcial. Obviamente, también existen terminaciones no intencionales de este tipo. En todos los casos, la entrada limitada disminuye la productividad del pozo.

Flujo turbulento

Estudios de simulación y experimentos de flujo a través de disparos indican que el flujo turbulento, o no darciano, influye grandemente en la eficiencia de flujo. Los efectos de turbulencia pueden ser reducidos por una gran área superficial para flujo (ejemplo: disparar con una alta densidad de disparos, gran profundidad de penetración y gran fasamiento angular).

IMPORTANCIA DE LOS FACTORES DE PRODUCTIVIDAD

Durante el diseño de la terminación, todos los factores aplicables deberán ser balanceados tan efectivamente como sea posible. Algunos factores pueden ser controlados; otros frecuentemente pueden ser compensados en varios grados. Una clasificación global de todos los factores es esencialmente imposible para su completa interacción. Los factores controlables incluyen los parámetros geométricos, nivel y dirección de presión diferencial, y la selección del fluido de terminación.

En un balance de varios factores, una alta densidad de disparos puede ser usada para compensar el efecto de la permeabilidad anisotrópica o lutitas laminares, o maximizar el área de flujo para reducir la turbulencia. Para llegar más allá de la zona dañada en la vecindad del pozo se pueden utilizar pistolas de penetración profunda para mejorar la productividad. Sin embargo, la selección de un método de conducción (conducción con línea de acero o con tubería) es también significativa. Cuando por economía se selecciona disparar con línea de acero, es posible tener restricciones en la geometría de los disparos (ejemplo, terminación a través de tubería de producción con penetración y fasamiento limitados) o en el ambiente de disparos (ejemplo: disparos bajo balance para permitir el uso de grandes pistolas para maximizar la penetración y la densidad de los disparos). Por otro lado, el uso de disparos conducidos con tubería permite la optimización de los

factores geométricos y ambientales. Obviamente, cada terminación deberá ser estudiada individualmente para un óptimo diseño.

5.4 DISPAROS EN POZOS CONVENCIONALES

Con los principios y procedimientos presentados anteriormente, es posible diseñar terminaciones que proporcionaran el funcionamiento deseado del pozo. En este caso el objetivo es disparar el pozo de tal forma que se obtenga un bajo nivel de daño sin la necesidad de efectuar una estimulación. Debido a que la mayoría de los pozos tienen algún grado de daño en la vecindad del agujero, una terminación con alta densidad de disparos con cargas de profunda penetración es la indicada. El fasamiento de los disparos es también importante, debido a que un fasamiento angular diferente a cero puede incrementar la productividad por la reducción de la interferencia de flujo proveniente de la vecindad del agujero. El diámetro del disparo es de interés secundario en disparos en pozos convencionales. La Figura 5.29 muestra el efecto de daño en la vecindad del pozo en una terminación para pozos de este tipo donde solo se considera flujo darciano, o laminar.¹⁰ Nótese que el flujo no-darciano, o de dos fases, aumenta grandemente la caída de presión. El índice de productividad es el gasto real de un sistema disparado dividido por el gasto ideal de un sistema en agujero descubierto, y el daño es la caída de presión adicional a través de un sistema disparado comparada con la caída de presión ideal para el mismo gasto.

Debido a que la densidad efectiva de disparo (número de disparos realmente produciendo) es un factor crítico en la producción del pozo, deberá de tenerse cuidado en usar técnicas de disparos que aseguren que el mayor porcentaje posible de disparos se limpien y fluyan efectivamente. Esas técnicas varían ampliamente, dependiendo el tipo de yacimiento y las propiedades de los fluidos. Entre esas técnicas se tienen disparos bajo balance, flujo de surgencia en los disparos inmediatamente después de haberse disparado, o terminación con un modesto sobre balance en la presencia de fluidos de terminación compatibles y no obturantes. Esas técnicas varían en efectividad, dependiendo de las condiciones específicas del fondo del pozo.

Aparentemente se quiere terminar el pozo de tal forma que proporcione el gasto máximo. Sin embargo, esto no es necesariamente cierto. En algunos casos, la tubería de producción o las instalaciones pueden imponer restricciones al gasto. En otros casos, las características del yacimiento pueden dictar restricciones al gasto máximo posible. Finalmente, maximizar el gasto no debe ser deseable si se ponen en juego los costos, riesgos y consideraciones de seguridad.

Una vez que el gasto deseado ha sido decidido, los factores que deben ser considerados incluyen las condiciones de presión del pozo y de fluidos (ambiente

de disparos), dimensión y tipo de pistola (geometría del disparo) y las características del yacimiento y de la formación.

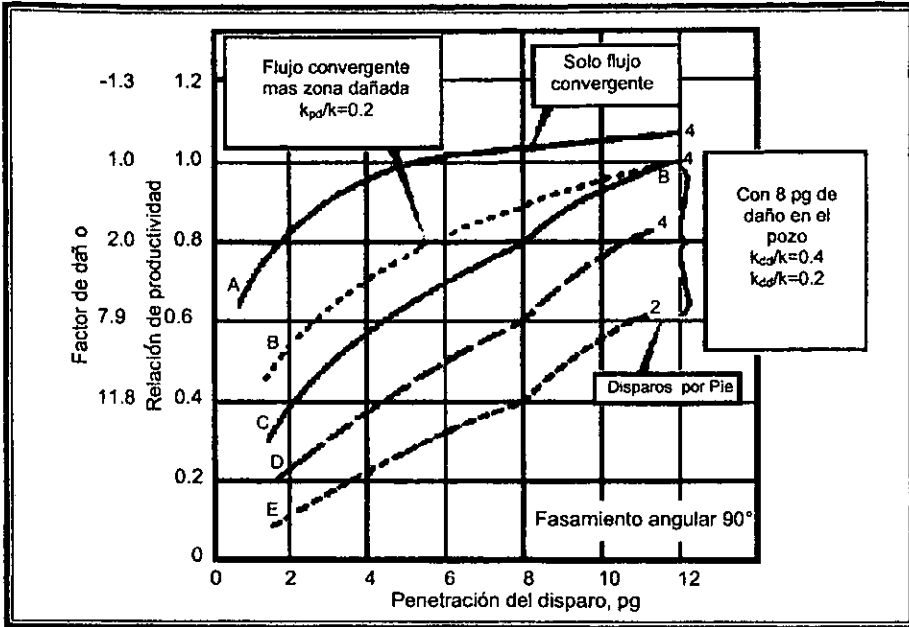


FIGURA 5.29 ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD Y FACTOR DE DAÑO CONTRA DENSIDAD DE DISPARO Y PENETRACIÓN

El ambiente de disparos deseado es dictado en su mayoría por las características del yacimiento. Las consideraciones incluyen el nivel y dirección de la presión diferencial entre la formación y el pozo, y la limpieza y compatibilidad del fluido de terminación. La meta es proporcionar buena limpieza de los disparos y una alta densidad efectiva de disparos.

En cuanto a la geometría de disparos, el uso de pistolas de gran diámetro cargadas con una alta densidad de disparos y con un fasamiento óptimo generalmente es el adecuado. Por supuesto, el sistema de la pistola debe ser compatible con las condiciones de presión y temperatura del pozo y con las dimensiones de las tuberías de revestimiento y de producción.

La selección del método de conducción de la pistola está gobernada por una combinación de todos esos factores. El método deberá proporcionar control positivo de la operación sin poner en juego la presión y las condiciones de flujo.

5.4.1 AMBIENTE DE DISPAROS

Las decisiones en cuanto al ambiente de disparos están basadas en la obtención de una buena limpieza y una alta densidad efectiva. Estas decisiones están afectadas también por otros factores, incluyendo económicos.¹⁰

TERMINACIONES BAJO BALANCE

Los disparos bajo balance (presión de formación mayor que la presión de fondo del pozo) generalmente proporcionan una óptima limpieza de los disparos y un mínimo daño. El nivel de bajo balance seleccionado es un factor importante en la limpieza de los disparos y el funcionamiento del pozo.

Nivel de bajo balance recomendado

El nivel mínimo para un flujo máximo es determinado por las propiedades del yacimiento, particularmente por la permeabilidad. La Figura 5.30 muestra los resultados de estudios realizados para pozos de aceite y gas, los cuales se obtienen con la siguiente ecuación:

$$\text{Log}_{10}P_u = 3.46055 - 0.3812 \text{Log}_{10}K \quad (5.2)$$

Donde:

- K = Permeabilidad de la formación, mD,
- P_u = Presión bajo balance, lb/pg².

Nivel máximo de bajo balance

Niveles excesivos de bajo balance pueden causar falla mecánica de la formación, movimiento de finos de la formación, falla de la sarta de la pistola arriba del agujero, y en casos extremos, colapso de la tubería de revestimiento u otro daño a las tuberías. En general, niveles excesivamente altos de bajo balance deben ser evitados para minimizar el daño a la formación.¹⁰ Además, la presión de bajo balance no debe exceder ninguno de los siguientes valores: colapso de la tubería de revestimiento o de producción (el valor máximo recomendado es el 80% de la relación API para tubería nueva y un valor reducido para tubería vieja, basada en su diámetro interior), el valor de colapso o presión diferencial de las herramientas y los empacadores, y los niveles de presión diferencial y las condiciones de fluido que pueden causar una falla de la línea de acero sobre el agujero. Mientras esto no sea definido completamente, algunas compañías proporcionan programas para estimar los límites. La Tabla 5.3 muestra una regla empírica que sirve de guía.

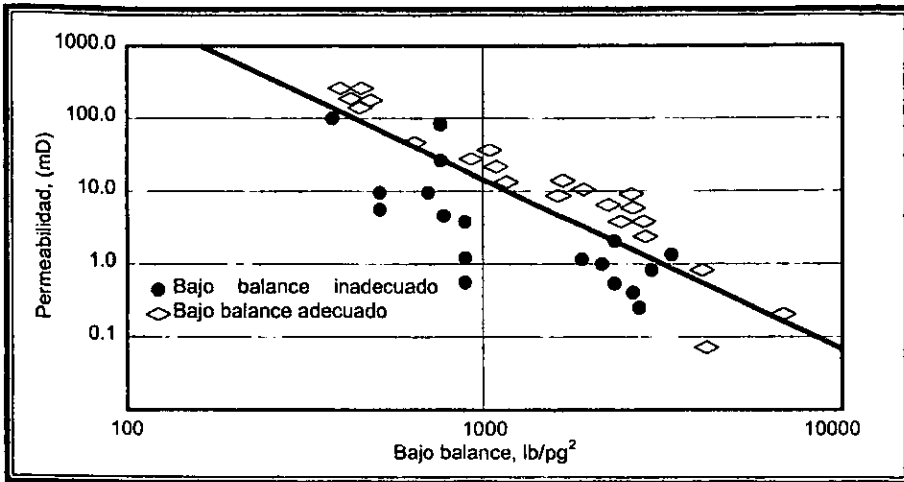


FIGURA 5.30 EFECTO DE LA PERMEABILIDAD SOBRE EL BAJO BALANCE REQUERIDO

TABLA 5.3 LÍMITES DE BAJO BALANCE PARA OPERACIONES CON LÍNEA DE ACERO

Descripción	Presión (lb/pg ²)		
	Gas	Aceite ligero/agua (30° API)	Aceite pesado (20° API)
Pistolas en T.R.	1500	1500	500
Pistolas a través de T.P.	2500	2000	1000

Precaución. Las presiones indicadas arriba son aproximaciones que deberán ser usadas con otros medios de predicción debido a que el riesgo se incrementa con el incremento de la productividad, la viscosidad del fluido y con un claro reducido (Pistola-T.R.).

Fluido del Fondo del Pozo

Los efectos del fluido del fondo del pozo no son considerados significantes en una terminación bajo balance si al fluido no le es permitido invadir los disparos después de disparar o si el fluido no daña a la formación.

TERMINACIONES SOBRE BALANCE

Mientras que los disparos bajo balance generalmente proporcionan un óptimo funcionamiento del pozo, en algunos casos varios factores se combinan para dictar disparos a presiones balanceadas o con un modesto nivel de sobre balance (presión del pozo mayor que la presión de formación). En estos casos se requiere de una cuidadosa selección del fluido del fondo del pozo y el uso de métodos alternativos de limpieza de los disparos.

Nivel de sobre balance

Normalmente, el sobre balance es mantenido a un nivel mínimo por seguridad de control del pozo. Un bajo nivel de sobre balance minimiza el grado de invasión del fluido del pozo hacia la formación.

Fluido del fondo del pozo

Para una terminación sobre balance efectiva es esencial el uso de fluidos limpios y compatibles con los fluidos de la formación. Los fluidos deben ser filtrados y medidos para evitar la contaminación por sólidos en la sarta de terminación. Aún con pocas cantidades de sólidos se puede disminuir la productividad.

Mientras que los disparos bajo balance eliminan grandemente el riesgo de daño a los disparos o a la formación, como resultado de la invasión de fluidos durante la terminación, en algunos casos las terminaciones sobre balance han proporcionado buen comportamiento del pozo. Algunos estudios han reportado excelente comportamiento del pozo con fluidos de terminación limpios y se han experimentado buenos resultados en disparos sobre balance en lodo. Además, se ha reportado un efecto de retrosurgenencia instantánea del pozo, el cual es un proceso que tiende a contrarrestar los efectos negativos usualmente experimentados cuando se dispara sobre balance en lodo. Por lo que estos estudios son una excepción a la regla general, y el uso de fluidos limpios y un mínimo nivel de sobre balance es sugerido como un procedimiento estándar, si se dispara sobre balance. Además, se recomiendan métodos alternos de mejora del comportamiento del pozo.¹⁰

Mejora del comportamiento del pozo

Se recomienda la retrosurgenencia después de disparar sobre balance, con los niveles de presión de surgencia seleccionados de acuerdo con el criterio presentado anteriormente para los niveles de bajo balance.¹⁴ La surgencia puede llevarse a cabo de tres maneras:

1. Sondeo. Es aplicable cuando la permeabilidad de la formación es alta (> 100 mD) o donde solo se permiten bajos niveles de presión diferencial.¹⁰
2. Discos de surgencia. Estos discos pueden ser utilizados en formaciones de más baja permeabilidad o donde son requeridos altos niveles de presión diferencial.
3. Válvulas de surgencia. Se utilizan cuando se requiere controlar el flujo, por ejemplo, cuando el objetivo es minimizar la producción de arena.¹⁰

Otros métodos de mejora del comportamiento del pozo incluyen fracturamientos, fracturamiento con gas de alta energía, fracturamiento hidráulico de arena y acidificación.

5.4.2 SELECCIÓN DE LA PISTOLA Y DE LA CARGA

Además de los aspectos anteriores para disparar, se selecciona un sistema pistola/carga para obtener el comportamiento deseado del pozo y para operar en una forma segura y confiable en el ambiente específico del pozo.¹⁰

DIMENSIÓN DE LA PISTOLA

Para obtener un comportamiento óptimo del pozo, un análisis mostrará que se debe utilizar la pistola más grande posible, de acuerdo con el estado mecánico del pozo. Sin embargo, la pistola deberá permitir el uso de herramientas de pesca por si esta debe ser pescada. Una regla comúnmente observada para el uso de pistolas de gran diámetro en tuberías de revestimiento es:

$$\text{Diámetro máximo de la pistola} + 1.38 < \text{Diámetro interior (drift) de la tubería de revestimiento}$$

(Todas las dimensiones están en pulgadas)

Para pistolas corridas a través de tubería:

El claro mínimo de la pistola a la tubería deberá ser > 0.3 pg, y > 0.1 pg cuando la pistola gastada es recuperada a través de restricciones en la tubería.

TIPO DE PISTOLA Y CARGA

La pistola deberá ser cargada con cargas de profunda penetración a una densidad de disparos y fasamiento seleccionados basándose en un análisis completo del pozo. Generalmente es indicada una alta densidad de disparos y un fasamiento múltiple.

Deberán de cumplirse cuatro requerimientos mecánicos:

1. Características satisfactorias de deformación de la tubería de revestimiento y de la capa de cemento.
2. Una cantidad aceptable de desechos que pueden permanecer en el pozo después de haberse disparado. Los desechos no deben ser dejados a lo largo del intervalo disparado. Además, deben ser de un tipo que no interfieran con la recuperación de la pistola, una importante consideración en casos de alto bajo balance donde los desechos pueden estar fluyendo dentro de la tubería.
3. Una adecuada y confiable relación de presión/temperatura para un ambiente específico del pozo. Para una larga exposición a las condiciones del pozo, como en disparos conducidos con tubería de producción, pistolas de cargador desechable son preferibles a las de conexión de puerto, debido a que tienen menos sellos y éstos son más seguros. Las características de hinchamiento de

las pistolas de cargador deberán también ser consideradas, particularmente en líquidos de baja presión o en gas seco. Cuando el equipo seleccionado es operado cerca de la relación presión/temperatura, se deben indicar pruebas de evaluación especiales antes de su operación.

4. La pistola gastada indicará claramente si todas las cargas fueron disparadas, mediante algún indicador. Esta característica dicta el uso de pistolas de cargador hueco o desechables tipo barra.

5.4.3 MÉTODO DE CONDUCCIÓN DE LA PISTOLA

La pistola deseada y las características de comportamiento del pozo interactúan con las restricciones operativas y con las consideraciones de costo/riesgo en la determinación del sistema del método de conducción de la pistola. Las restricciones operativas incluyen condiciones del pozo (presión, temperatura y nivel de bajo balance), longitud del intervalo a terminar y requerimientos de control de presión en la superficie.¹⁰

La Tabla 5.4 presenta una relación generalizada de métodos de conducción para varias condiciones del pozo. Las consideraciones de costo/riesgo no están incluidas.

TABLA 5.4 APLICACIÓN PARA TÉCNICAS DE DISPAROS			
Condiciones del pozo	Sistemas de pistola		
	Terminaciones con pistolas corridas en T.R. conducidas con T.P.	Terminaciones con pistolas corridas en T.R. con Línea de acero	Terminaciones con pistolas corridas a través de T.P. con línea de acero
Alto bajo balance (>2500 lb/pg ²) Bajo bajo balance (<2500 lb/pg ²)	3	N/A	N/A
Intervalo corto (< 40 pies)	3	3	2
Intervalo grande (> 40 pies)	3	N/A	N/A
Sobre balance	3	3	1

Comportamiento del Pozo: 1 = pobre; 2 = favorable; 3 = bueno; N/A = no puede ser usado.

Alto bajo balance = pistolas conducidas con línea de acero pueden fallar arriba del agujero.
 Bajo bajo balance = pistolas conducidas con línea de acero no fallarán arriba del agujero.
 Intervalo corto = el espesor de la formación que puede ser disparado con línea de acero, con el bajo balance específico y a una presión en la cabeza específica (generalmente < 40 pies).
 Intervalo grande = el espesor de la formación que no puede ser disparado con el bajo balance específico como resultado de la presión en la cabeza prevalectante y la elevación permisible del tubricador (generalmente > 40 pies).

DESEMPEÑO DE LA PISTOLA/CARGA

Cuando se desea el máximo comportamiento del pozo, los disparos con tubería de producción o pistolas de gran diámetro con línea de acero, son las indicadas para proporcionar la máxima flexibilidad en funcionamiento óptimo de la carga, densidad de disparos y fasamiento.

Las pistolas corridas con línea de acero a través de tubería de producción frecuentemente están limitadas por su menor desempeño de carga, menor densidad de disparos y fasamiento limitado. Se requiere de un análisis cuidadoso y un buen diseño de la terminación para obtener resultados favorables con esas pistolas.

PRESIÓN DEL POZO

La presión en operaciones con tubería de producción ofrece la mayor flexibilidad en la optimización de los disparos bajo balance. Los disparos con línea de acero son aceptables sólo si se trata de intervalos relativamente cortos y todos los demás criterios de diseño de la terminación pueden satisfacerse con las pistolas conducidas con línea de acero.

Cuando se dispara bajo balance, los equipos de disparos conducidos con línea de acero y tubería de producción proporcionarán resultados equivalentes. Sin embargo, las experiencias con pistolas a través de tubería de producción han resultado frecuentemente desilusionantes, requiriendo algunas formas de estimulación para producir el pozo a gastos aceptables.

LONGITUD DEL INTERVALO

El comportamiento óptimo del pozo generalmente se logra disparando bajo balance grandes intervalos con pistolas conducidas con tubería de producción. Los disparos conducidos con tubería de producción permiten terminar el intervalo en un viaje sencillo con un óptimo bajo balance. Los intervalos cortos pueden ser disparados con pistolas conducidas con línea de acero, en tubería de revestimiento o a través de tubería. Sin embargo, la ejecución de una terminación bajo balanceada disparada con línea de acero, involucrando múltiples zonas, o la terminación de una zona sencilla donde se requieren múltiples viajes, puede presentar dificultades. Una vez que se dispara la primera pistola, puede resultar imposible establecer niveles óptimos de bajo balance para las pistolas siguientes.

5.4.4 UNA PERSPECTIVA GLOBAL

La técnica óptima para disparar no es necesariamente la que permite el menor factor de daño. En cambio, es la técnica que permite el comportamiento deseado al mismo tiempo que se satisfacen los requerimientos de costo/beneficio.

La Tabla 5.5 presenta una guía práctica para el diseño y la selección del tipo de disparos en pozos convencionales. Las consideraciones costo/riesgo no están incluidas.

Los parámetros de diseño que se consideran son:

- Nivel de presión diferencial. Las decisiones en cuanto al nivel de presión diferencial están basadas en la obtención de una buena limpieza y una alta densidad efectiva de los disparos.
- Selección de la carga y de la pistola. El sistema debe proporcionar el comportamiento deseado del pozo y debe operar en forma segura y confiable en el ambiente específico del pozo.
- Método de conducción de la pistola. Depende del tipo de pistola que se vaya a utilizar y las características de comportamiento del pozo; además de las condiciones del pozo (presión, temperatura y nivel de presión diferencial), longitud del intervalo y requerimientos de control en la superficie.

TABLA 5.5 GUÍA PRÁCTICA PARA DISPAROS EN POZOS CONVENCIONALES

Nivel de presión diferencial. Se puede disparar con ambos métodos.		Selección de la carga y la pistola.		Método de conducción.
Bajo balance	Sobre balance	Carga	Pistola	
El nivel recomendado para un flujo máximo está determinado por las propiedades del yacimiento (en especial k). Ya que proporciona una óptima limpieza de los disparos y un daño mínimo.	Se recomienda disparar con un nivel mínimo por seguridad de control del pozo. Es esencial el uso de fluidos de terminación limpios y compatibles con los fluidos de la formación, además de usar métodos alternativos de limpieza de los disparos.	Alta densidad de disparos y de profundidad penetración y un fasamiento múltiple.	Se debe utilizar la pistola más grande posible de acuerdo con el estado mecánico del pozo.	Aquel que proporcione control de la operación sin poner en juego la presión y las condiciones de flujo. Generalmente se prefiere disparar con T.P. Para mayor detalle ver Tabla 5.4

6 DISEÑO DE LOS DISPAROS EN POZOS NO CONVENCIONALES

En este Capítulo se presentan los factores que afectan el diseño de los disparos en pozos horizontales y altamente desviados, en pozos con terminación con empacamiento de arena, en pozos que requieren fracturamiento hidráulico y en pozos de alta presión y alta temperatura.

6.1 DISPAROS EN POZOS HORIZONTALES Y ALTAMENTE DESVIADOS

Si bien, la perforación de pozos horizontales y altamente desviados ha llegado a ser casi rutinaria, las técnicas de terminación todavía están en desarrollo intensivo.

6.1.1 POZOS DESVIADOS

Los parámetros que afectan el descenso del equipo de conducción para disparar con línea de acero y las herramientas de registros asociados en pozos desviados, incluyen el ángulo del agujero, la longitud de la sección inclinada, el peso de las herramientas y el cable, la fricción y la configuración del agujero (principalmente desviación y pata de perro), (Figura 6.1).¹⁰ Dependiendo de los parámetros respectivos para un pozo en particular, se pueden suponer configuraciones estándar de las herramientas para bajar a desviaciones de 50° a 68°.

El descenso de la pistola, con equipo de línea de acero, se puede mejorar usando mecanismos especiales de reducción de fricción colocados en la sarta. Con esas mejoras, el ángulo teórico puede ser incrementado de cerca de 70° a 80°, dependiendo de la longitud de la sección inclinada. Se han terminado pozos con desviaciones excediendo los 70°. La capacidad de desviación puede estar afectada por las condiciones del agujero. Algunos accesorios que proporcionan flexión de las herramientas, pueden facilitar su paso a través de las desviaciones.

La experiencia de campo indica que se deben de considerar otras opciones de conducción (disparos conducidos con tubería), los cuales proporcionan buen desempeño en todas las desviaciones del pozo, y tubería flexible con línea de acero interna, para desviaciones del pozo que exceden los 55°. La tubería flexible proporciona ahorros en costo y tiempo, además se pueden correr en forma segura sistemas de pistolas de gran longitud. Esto ofrece buena profundidad de control (para registros y subsecuentemente el desplazamiento de la pistola). Los disparos conducidos con tubería de producción ofrecen mayor flexibilidad en términos de selección de la pistola; por ejemplo, se pueden correr aparejos mucho más

grandes, largos y pesados. También, se pueden intervenir pozos más profundos como resultado de la mayor resistencia de la sarta de la tubería de producción.

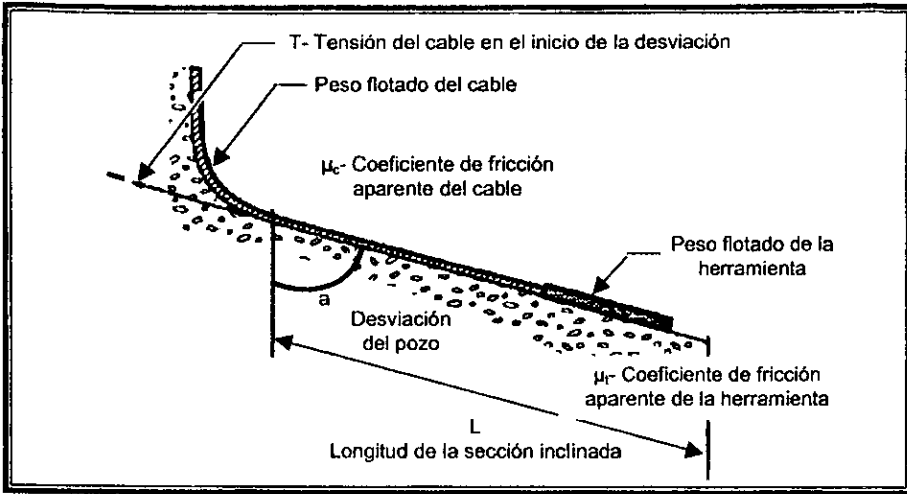


FIGURA 6.1 ESQUEMA DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN EL DESCENSO DEL CABLE DE LA HERRAMIENTA

6.1.2 POZOS HORIZONTALES

Los pozos horizontales inicialmente fueron terminados con liners ranurados no cementados o, si la formación era muy consolidada, en agujero descubierto. En ambos métodos era difícil determinar cuales zonas producían, y en caso de surgir problemas, el tratamiento selectivo de esas zonas era prácticamente imposible.

AISLAMIENTO DE ZONAS

El aislamiento de zonas puede no ser tan importante en pozos horizontales como lo es en terminaciones verticales. Idealmente, en la terminación horizontal se debería aislar una formación y producir el intervalo horizontal completo. Sin embargo, la experiencia muestra que los yacimientos frecuentemente son heterogéneos horizontalmente. Esta heterogeneidad no es del todo malo y puede ser aprovechada (aún con arreglos de fracturas naturales o fallas aislando varias formaciones productoras), pero sólo si el aislamiento de zonas es posible.

El aislamiento de zonas se logra con empacadores externos de tubería de revestimiento en liner ranurado, o con cementación y disparos convencionales.¹⁰ El último método proporciona el aislamiento más seguro y es recomendable si el

pozo va a ser fracturado hidráulicamente. Sin embargo, algunos pozos horizontales han sido fracturados exitosamente con empacadores externos.

CEMENTACIÓN

En general, las operaciones de cementación en pozos horizontales son similares a aquellas requeridas en pozos verticales. No obstante, los detalles hacen una diferencia significante. Es más difícil proporcionar un trabajo de cementación libre de canales continuos en pozos horizontales que en verticales. Para evitar problemas, se debe tener atención cuidadosa en la centralización de la tubería de revestimiento, en el diseño de los fluidos de perforación y de la lechada de cemento y en el uso de técnicas especiales de operación.

MÉTODOS DE CONDUCCIÓN

Un mayor reto en pozos horizontales es colocar la sarta de la pistola a la profundidad deseada. Se utilizan ambos métodos de conducción, con tubería de producción y con tubería flexible. Los disparos conducidos con tubería de producción tienden a ser caros, pero el sistema es fuerte y proporciona un amplio rango para la selección de pistolas y accesorios. Como con los pozos desviados, los ahorros en tiempo y los costos hacen de la tubería flexible una opción atractiva.⁶

LONGITUD DEL INTERVALO

Cementar y disparar el intervalo completo de un pozo horizontal puede ser muy caro. Algunos resultados de campo indican que disparar el intervalo horizontal completo es innecesario, particularmente cuando el intervalo que está siendo terminado es delgado. Se puede obtener la misma producción terminando solo una fracción de la longitud total. Además, la mayoría de los yacimientos exhiben suficiente heterogeneidad total para garantizar producción selectiva. La tendencia es hacia disparar intervalos más cortos.

TRATAMIENTO Y CONTROL DE ARENA

En terminaciones para fracturamiento hidráulico, se utilizan altas densidades de disparos y fasamientos múltiples para reducir la fricción en los disparos.¹⁰ Los disparos con pistolas conducidas con tubería de producción o pistolas corridas con tubería flexible son equipados con empacadores para permitir pruebas y disparos selectivos o disparos y tratamientos en zonas discretas.

Cuando se llevan a cabo tratamientos de fracturas en pozos con gran ángulo de desviación u horizontales, el espaciamiento entre los disparos individuales puede ser un importante criterio de diseño. Los disparos a espacios cortos alineados en un plano sencillo (fasamiento de 0°) maximizan la conexión, cerca del agujero, de

los disparos a lo largo del eje del pozo y minimiza la tendencia de que fracturas aisladas se comuniquen con el disparo. Otra importante consideración de diseño es que el área de intersección del pozo y las fracturas creadas hidráulicamente puede ser muy limitada. Consecuentemente, la longitud del túnel del disparo es un criterio de diseño más importante que el usual. Incrementando la longitud del túnel se puede, en algunos casos, incrementar el radio efectivo del pozo, lo cual puede incrementar el área de intersección de las fracturas y el pozo.

SELECCIÓN DE LA PISTOLA

Las consideraciones en la selección de la pistola incluyen las características específicas del yacimiento, el tipo de terminación y la orientación del pozo en relación con las zonas de fractura y de las condiciones de éstas. Se prefieren pistolas con altas densidades de disparos y multifasadas antes de efectuar estimulaciones o empacamientos con grava y también en los casos donde el pozo intersecta formaciones naturalmente fracturadas.

Otros puntos son la profundidad del disparo y la dimensión del disparo en la tubería de revestimiento. La centralización de la pistola puede resolver el problema de dimensiones inconsistentes del disparo y puede, en algún grado, mitigar la dificultad de penetración. Sin embargo, las técnicas de centralización no están perfeccionadas y sólo están disponibles en disparos con pistolas conducidas con tubería de producción. La técnica actual es utilizar las pistolas más grandes que puedan ser pescadas y proporcionar los mejores medios posibles para su centralización.

CONTROL DE LA PROFUNDIDAD

La precisión requerida de control de la profundidad puede ser menos crítica en pozos horizontales que en verticales. La clave es el grado de heterogeneidad del yacimiento; a mayor heterogeneidad de la formación, más correcto debe ser el control de la profundidad. En ambientes horizontales, el control de la profundidad no se puede confiar en la correlación convencional de Rayos Gamma; generalmente no hay suficiente definición en éste registro. Las medidas correctas de longitud de la tubería, las medidas mientras se perfora el pozo u otras técnicas, pueden proporcionar al registro la posición requerida de la pistola. Para tubería flexible equipada con línea de acero, resulta efectiva la técnica convencional de colocar un tramo corto dentro de la tubería de revestimiento corta (liner) justo arriba de la zona productora. El tramo corto se identifica con un registro localizador de coples (CCL) en la sarta de la tubería flexible (Figura 6.2).

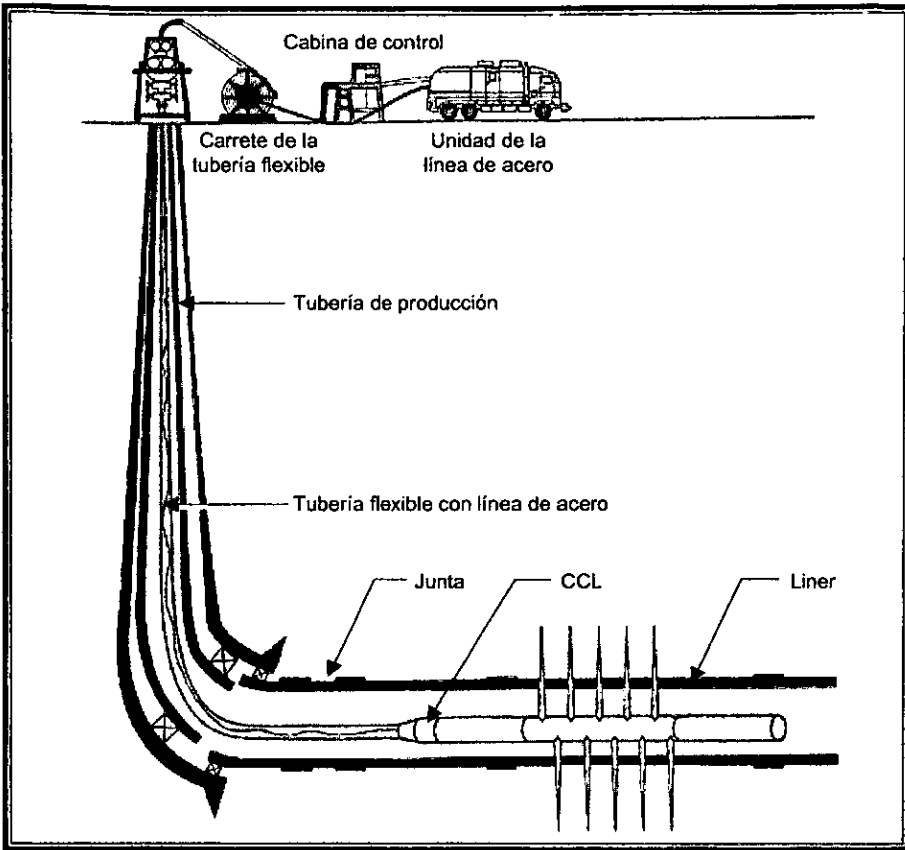


FIGURA 6.2 PROFUNDIDAD DE CONTROL DE LA TUBERÍA FLEXIBLE

6.2 DISPAROS PARA CONTROL DE ARENA EN TERMINACIONES CON EMPACAMIENTO DE GRAVA

Existe una forma más de daño en las terminaciones con empacamiento de grava disparadas, con respecto a las configuraciones de terminaciones con liner ranurado o de disparos en pozos convencionales.

6.2.1 DAÑO ADICIONAL Y ÚNICO

El daño se manifiesta por el flujo a través del túnel del disparo lleno de grava (Figura 6.3).¹⁶ El flujo es lineal y puede provocar caídas de presión importantes. La caída de presión para un líquido que fluye a través del túnel está expresada por la ecuación siguiente:

$$\Delta P_2 = (0.888)(L_t)(\mu_o)(B_o)(q_o)/(k_g)(A_t) + (9.1)(10^{-13})(B_g)(B_o^2)(L_t)(\rho_o)(q_o/A_t)^2 \quad (6.1)$$

Donde:

- A_t = Sección transversal del área de flujo del túnel del disparo, pie²,
- B_o = Factor de volumen del aceite, adimensional,
- k_g = Permeabilidad del túnel del disparo lleno de material, darcies,
- L_t = Longitud del túnel del disparo, pies,
- q_o = Gasto por disparo, bpd,
- ΔP_2 = Caída de presión en el túnel, lb/pg²,
- β_g = $(1.47)(10^7)/(k_g^{0.55})$, pie⁻¹,
- μ_o = Viscosidad del fluido, cp, y
- ρ_o = Densidad del fluido, lb_m/pie³.

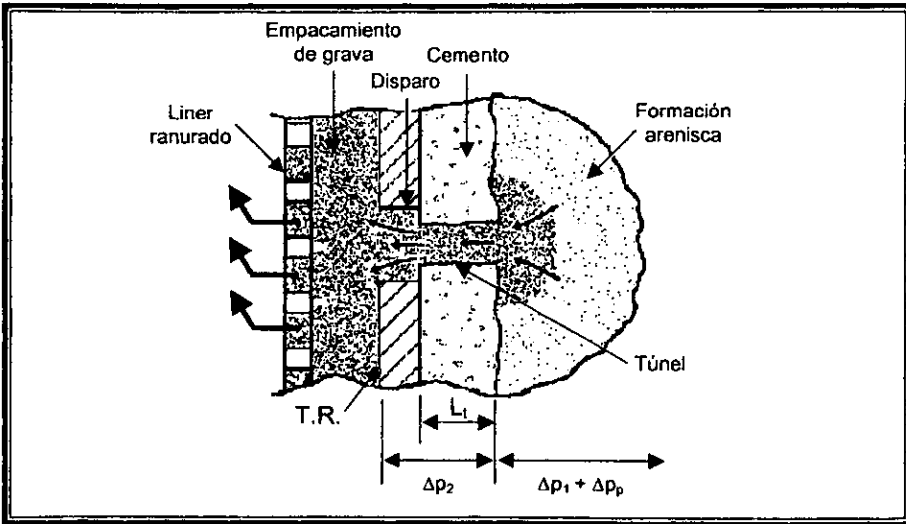


FIGURA 6.3 CONFIGURACIÓN IDEALIZADA DE UNA TERMINACIÓN CON EMPACAMIENTO CON GRAVA DISPARADA

Es aparente el efecto significativo de un pequeño cambio en el diámetro del disparo sobre la caída de presión.

La caída de presión excesiva en el túnel, puede reducir la productividad del pozo a niveles inaceptables, particularmente en yacimientos de baja presión y puede dañar los liners ranurados si la caída de presión se llegara a incrementar a un nivel en que se movilicen partículas de la formación (finos) y corten el liner.

6.2.2 MANEJO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN

La caída de presión puede mantenerse en niveles aceptables, mediante un área grande de sección transversal del túnel de cada disparo, con el área específica requerida dependiendo del gasto deseado. El área total de flujo esta controlado por el sistema disparado.

Los parámetros importantes de la geometría de los disparos son el diámetro y la densidad efectiva de los disparos.¹⁰ El rango de diámetros del disparo en la tubería de revestimiento es de 0.5 a 1.0 pg, o mayores, siendo el más común de 0.60 a 0.75 pg. Se recomiendan altas densidades de disparos debido a que el túnel del disparo a través de la tubería de revestimiento y el cemento está lleno de grava (Figura 6.3). Generalmente, cerca de dos terceras partes del área de sección transversal del túnel están ocupadas por grava. Por lo tanto, un pozo disparado a 12 disparos/pie tiene un área de flujo a la equivalente en un pozo disparado a 4 disparos/pie en una terminación sencilla.

La penetración de la bala es de menos importancia, a pesar de que el disparo asegura la comunicación con el yacimiento; unas pocas pulgadas mas allá del cemento es una penetración adecuada, tomando en cuenta que no se debe de tener una profundidad de penetración excesiva, ya que, como el túnel está lleno de grava, las caídas de presión por fricción aumentarán.¹⁶ El fasamiento de los disparos no es una consideración importante en terminaciones con empacamiento de grava.

6.2.3 SELECCIÓN DE LA PISTOLA

Las pistolas de carga formada y de cargador hueco desechable son usadas típicamente para proporcionar la densidad y dimensión del disparo en la tubería de revestimiento deseadas. El diámetro de la pistola generalmente es el más grande que pueda ser corrido, de tal modo que si después del disparo la pistola es perdida, ésta pueda ser pescada.

En el diseño de la terminación y en la selección de la pistola se debe poner atención en los efectos del claro de la pistola sobre las dimensiones del disparo en la tubería de revestimiento, particularmente cuando las pistolas están descentradas (el caso usual). Los resultados de las pruebas API deben ser ajustados no solo para el claro, sino también para los diferentes grados de

tuberías de revestimiento. Si las dimensiones del agujero para disparos con gran claro caen abajo del 10% de las dimensiones para una pistola con claro óptimo, el lavado de los disparos y la colocación subsecuente de grava pueden resultar inefectivos, volviéndose esos disparos de diámetro pequeño inoperables. Consecuentemente, esos agujeros deben ser ignorados, reduciendo eficazmente la densidad de disparos. Si la densidad de disparos reducida resulta poco satisfactoria en el análisis de la terminación, la pistola debe ser centralizada para mitigar los efectos del claro.

Una consideración adicional en el diseño de la terminación es que los resultados analíticos tienden a ser optimistas, debido a que en estos no se consideran las reducciones en la permeabilidad que resultan de la mezcla del material de la formación con la grava. De ahí que, la densidad de disparos seleccionada debe ser siempre mayor que el valor calculado, para asegurar el comportamiento satisfactorio del pozo.

6.2.4 CONDICIONES DEL POZO

Los niveles de presión y los fluidos del pozo se seleccionan, en su mayor parte, basándose en el método elegido para limpiar los disparos antes de colocar la grava.

Las dos técnicas de terminación (sobre balance y bajo balance) pueden ser utilizadas, dependiendo de los requerimientos del yacimiento. Las operaciones sobre balance generalmente envuelven lavado o surgencia inmediatamente después de los disparos, o una combinación de esos dos métodos.¹⁰

El método preferido es disparar bajo balance, usualmente seguido directamente de la colocación de la grava. Sin embargo, la práctica del lavado de los disparos después de disparar bajo balance y después de la colocación de la grava está tomando mayor auge. La presión bajo balance es típicamente cerca de 500 lb/pg² para yacimientos de aceite y cerca de 1,000 lb/pg² para pozos de gas. Situaciones individuales o específicas pueden dictar diferentes valores. Los niveles máximos que pueden ser tolerados sin colapsar la tubería de revestimiento o dañar la formación y producir arena están, dados en la literatura especializada.

Los disparos generalmente son corridos con fluidos de terminación compatibles y no obturantes. Los fluidos usados para la limpieza de los disparos, no sólo deben ser limpios y compatibles, si no que deberán tener una densidad considerada como la mínima para seguridad de control del pozo (para minimizar la invasión a la formación por fluido lavador).

6.2.5 MÉTODOS DE CONDUCCIÓN

Los dos métodos de conducción de disparos (con línea de acero y con tubería de producción) proporcionan terminaciones con empacamiento de arena satisfactorias. El método seleccionado depende, principalmente, de las condiciones de presión del pozo durante los disparos y la longitud del intervalo a disparar.

En condiciones de disparos sobre balance, el método de línea de acero es aplicable hasta que la longitud del intervalo se incrementa hasta el punto donde los disparos conducidos con tubería de producción llegan a ser más económicos en términos de costos de servicios y manejo de tiempo. Para terminaciones bajo balance, generalmente se prefieren los disparos conducidos con tubería de producción debido a su mayor flexibilidad y habilidad para acomodarse a la longitud del intervalo y al nivel de bajo balance. Por supuesto, se pueden utilizar pistolas conducidas con línea de acero en intervalos cortos (aproximadamente 12 m), solo si el bajo balance es lo suficientemente bajo para asegurar que la línea no se reviente en el agujero cuando la pistola se dispare. Las incertidumbres asociadas con la predicción de este riesgo alientan el uso de disparos conducidos con tubería de producción en todas las operaciones bajo balance.

Al igual que en las terminaciones sencillas, un análisis costo/riesgo puede ayudar a elegir el método de limpieza y de conducción de los disparos.

6.3 DISPAROS PARA FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Las perforaciones creadas por los disparos juegan un papel principal en el control de la hidráulica en las operaciones de tratamientos. Proporcionan dimensiones de disparos específicas y caldas de presión controladas al bombear cantidades diseñadas de fluido. También proporcionan acceso selectivo a zonas a ser fracturadas y comunicación entre las fracturas y el pozo después de disparar.

La Figura 6.4, un esquema de una formación fracturada hidráulicamente, muestra disparos creando accesos a la formación por presión hidráulica. Las fracturas se diseñan para emanar desde la base de los disparos. La orientación de las fracturas está influenciada solamente por las características de esfuerzo de la formación, sin considerar la orientación del disparo.¹⁰

Otros parámetros importantes en los disparos son, en orden de importancia, las dimensiones y las características de los disparos en la tubería de revestimiento, la densidad efectiva, el fasamiento y el daño en la formación creada por el disparo.

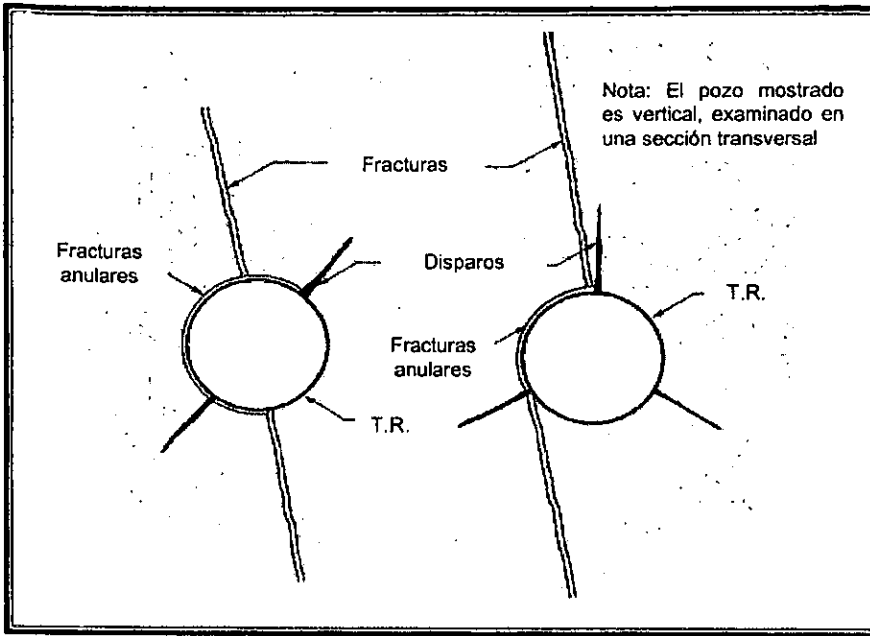


FIGURA 6.4 ESQUEMA DEL INICIO DE LAS FRACTURAS A PARTIR DE LOS DISPAROS

6.3.1 DIÁMETRO DE DISPARO EN LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO

La fricción controla la caída de presión por fricción (P_f) y el gasto a través del sistema (del pozo a la formación). La caída de presión por fricción a través de los disparos, en psi, se puede expresar como:

$$P_f = \frac{0.2369 q_t^2 \rho_o}{n^2 d^2 C_d^2} \quad (6.2)$$

Donde:

- C_d = Coeficiente de descarga, adimensional,
- d = Diámetro del disparo en la tubería de revestimiento, pg,
- n = Número de disparos,
- q_t = Gasto total, bpm,
- ρ_o = Densidad del fluido de control, lb/pie³.

Nótese que un pequeño cambio en el diámetro del disparo en la tubería de revestimiento tiene un efecto fuerte en las caídas de presión por fricción a través

de los disparos. Cuando se tratan simultáneamente zonas múltiples, la uniformidad de la dimensión del disparo también es importante, sobre todo si el fluido de tratamiento se va a dispersar uniformemente. El control del disparo depende de la combinación específica carga-pistola seleccionada (API RP 43)²¹, la calidad del sistema, los efectos del claro de la pistola, las propiedades físicas de la tubería de revestimiento y los efectos de erosión de los fluidos que causan agrandamiento del disparo durante el tratamiento.

Otro factor importante es el coeficiente de descarga del disparo (C_d), el cual tiende a incrementarse durante el tratamiento. La importancia del coeficiente de descarga en el diseño de la terminación no debe ser pasado por alto.

Un incremento en todo el diámetro del disparo como resultado de la erosión, puede tener también efectos significativos sobre la caída de presión por fricción a través de los disparos. En zonas múltiples, el tratamiento puede fallar si el gasto de bombeo no es ajustado para compensar el crecimiento del agujero disparado. La erosión y el agrandamiento del disparo ocurren tanto en terminaciones con pistolas de cargas formadas, como en terminaciones con pistola de bala. Se ha mostrado que disparos de diámetro pequeño se erosionan más rápidamente que disparos de gran diámetro. Además, la relación de erosión se incrementa con el gasto de fluido y la concentración de arena.

Las pistolas de bala ofrecen una ventaja importante sobre las pistolas de carga formada, predominantemente usadas: las dimensiones del agujero disparado son inicialmente constantes, sin considerar las propiedades físicas de la tubería de revestimiento y el claro de la pistola (suponiendo que la pistola seleccionada proporciona un buen desempeño para todos los claros entre la pistola y la tubería de revestimiento).¹⁰

6.3.2 DENSIDAD DE DISPAROS

Para tratamientos típicos de fracturamiento, la densidad de disparos se determina por el número de disparos requeridos para mantener la presión de inicio, la presión de tratamiento y la presión instantánea de cierre, a niveles razonablemente bajos y la P_f a 100 lb/pg² o menos, al gasto de tratamiento diseñado. Típicamente se recomiendan de 4 a 8 disparos por pie. Para operaciones de acceso limitado, el número de disparos necesarios se determina por la P_f deseada, la cual está entre 500 y 2,500 lb/pg².

6.3.3 FASAMIENTO DE LOS DISPAROS

Para tratamientos típicos de fracturamiento, se sugiere un fasamiento de 20° a 60° para facilitar la intersección de los disparos con las fracturas y para mantener

bajas presiones de bombeo. Para tratamientos de acceso limitado comúnmente se usan pistolas de cargas formadas con fasamiento de 0° para proporcionar los disparos individuales que sean requeridos. El uso de pistolas a 0° facilita su posicionamiento para obtener un diámetro de disparo consistente.

6.3.4 CARACTERÍSTICA DE LOS DISPAROS EN LA FORMACIÓN

La penetración dentro de la formación es considerada de importancia secundaria, debido a que las fracturas generalmente proceden de la base de los disparos. El uso de cargas formadas de alta penetración más grandes, puede resultar en presiones de inyección mayores como resultado de mayor daño a la formación por la pistola (a partir del trituramiento de la formación y de la reducción de la permeabilidad cerca de los disparos, características de las cargas más grandes). También se pueden generar mayores presiones de inyección con el uso de cargas pequeñas de poca penetración, debido a que apenas entran a la formación. Una penetración de 4 a 6 pulgadas dentro de la formación es la adecuada.

La selección de la pistola para tratamientos típicos de fracturamiento hidráulico se basa en los requerimientos de dimensión del disparo, densidad y fasamiento.¹⁰ Generalmente se usan pistolas de carga formada y cargador hueco para las operaciones a través de tubería de producción y a través de tubería de revestimiento. Las pistolas de bala son una opción viable para usarse en tuberías de revestimiento que exceden las 4¹/₂".

Para operaciones de acceso limitado, se recomiendan pistolas para disparos selectivos. Esas pistolas pueden ser disparadas tiro por tiro a medida que la sarta de la pistola es movida hacia arriba del agujero. De ahí que la operación se pueda realizar en un viaje sencillo dentro del pozo. Se obtienen ahorros significativos de tiempo. La selección del sistema de la pistola se basa en un adecuado control del claro (posicionadores o centralizadores para pistolas de carga formada), la calidad y desempeño de la pistola/carga y los métodos de disparos selectivos, los cuales permiten controlar la colocación de la pistola y una característica muy deseable, la indicación de que se efectuó el disparo.

Una pistola de bala de buen desempeño es una excelente candidata para este tipo de operación. Algunos resultados comparativos para operaciones de inyección en acceso limitado han favorecido grandemente a la pistola de bala.

6.3.5 CONDICIONES DEL POZO

Los pozos que van a ser fracturados hidráulicamente pueden ser disparados en condiciones de sobre balance o de bajo balance. La selección depende de varios

factores. Si las condiciones del yacimiento (ejemplo, formaciones altamente geopresionadas o agotadas) dictan el fracturamiento por medio de bombeo a través de tubería de producción, se recomienda una terminación bajo balance. En un yacimiento normalmente presionado que será fracturado posteriormente en la parte inferior de la tubería de revestimiento, generalmente se recomienda una terminación sobre balance con pistolas de gran diámetro. Se recomienda una planeación cuidadosa y un análisis del yacimiento para asegurar compatibilidad entre el método de disparo y la operación de tratamiento hidráulico.

6.3.6 DESVIACIÓN DEL POZO

Los procedimientos de fracturamiento para pozos altamente desviados u horizontales son algo diferentes de aquéllos en pozos verticales. Estas características fueron discutidas anteriormente.

6.3.7 MÉTODO DE CONDUCCIÓN

La decisión de disparar con línea de acero o con tubería depende de los siguientes factores: nivel de bajo balance, espesor de la zona, número de zonas, condiciones del pozo (particularmente la presión), requerimientos de control de arena y de estimulación.¹⁰

6.4 DISPAROS EN POZOS PROFUNDOS DE ALTA PRESIÓN Y ALTA TEMPERATURA

El principal problema asociado con las terminaciones de pozos profundos es la elevada temperatura. Los problemas incluyen las altas presiones hidrostáticas y de superficie y un incremento en la carga mecánica (peso) debido a mayor línea de acero requerida para efectuar la terminación. A medida que la temperatura se incrementa, los componentes del sistema se deterioran rápidamente. Las mezclas de los metales pierden una fracción significativa de su resistencia, la relación de corrosión se incrementa, la seguridad del equipo eléctrico y electrónico decrece, los elastómeros pierden sus propiedades deseables y los explosivos se degradan hasta el punto de inutilidad.¹⁰

La temperatura a la cual el sistema funcionará confiablemente depende del tiempo de exposición. A mayor tiempo de exposición, menor será la temperatura que el sistema tolerará. Consecuentemente, los sistemas de disparos se clasifican con base en una combinación de tiempo y de temperatura.

6.4.1 EFECTOS DE LA TEMPERATURA

Las altas temperaturas afectan los componentes del sistema de diferentes formas:

1. Los sellos del elastómero pierden su elasticidad y su resistencia.
2. Los asientos de los sellos pueden requerir modificaciones para prevenir fallas del sello causadas por el incremento de la presión hidrostática acompañada de una disminución de la resistencia mecánica de los elastómeros.
3. Se afectan los componentes electrónicos, el aislado de los cables, los conectores y la línea de acero.
4. Se degrada la resistencia de las pistolas de cargador de acero, sus accesorios y el equipo electrónico y se incrementa la probabilidad de corrosión.
5. Los explosivos se degradan rápidamente con el incremento en la temperatura y el tiempo de exposición. Los problemas van desde una reducción en el desempeño de la carga hasta la autodetonación del sistema.

6.4.2 CONDICIONES DEL POZO

El conocimiento correcto de la temperatura de fondo es importante debido a que, como la Figura 6.5 lo indica, a mayor tiempo de exposición, la temperatura a la cual trabaja efectivamente el explosivo es menor. Es decir, a mayor tiempo de exposición menor será la resistencia a la temperatura de los explosivos. La presión de fondo es también una consideración importante, debido a que basándose en ésta se determinarán los factores de seguridad para la realización del diseño de las pistolas. La densidad del fluido del fondo del pozo y la presión en la cabeza deberán ser supervisadas cuidadosamente.

6.4.3 SELECCIÓN DE LA PISTOLA

En casi todas las terminaciones en pozos profundos se utilizan pistolas de cargador hueco de acero debido a su robustez, su resistencia a la presión, su número mínimo de sellos y su protección adicional proporcionada por los componentes del explosivo (contenidos dentro del cargador de la pistola). La selección de los componentes del explosivo (cargas, cordón detonante y detonador) se basa en las condiciones anticipadas de tiempo-temperatura.

6.4.4 MÉTODO DE CONDUCCIÓN

Para disparar pozos muy profundos y de alta temperatura se utilizan pistolas de gran diámetro conducidas con línea de acero, disparadas con una presión sobre balance, debido a que las operaciones se realizan rápidamente. Sin embargo, los disparos conducidos con tubería de producción son una opción viable cuando la terminación se diseña cuidadosamente para minimizar el tiempo de exposición a las temperaturas elevadas. Realmente, los disparos conducidos con tubería de producción se prefieren en pozos donde la carga de la línea de acero es excesiva.

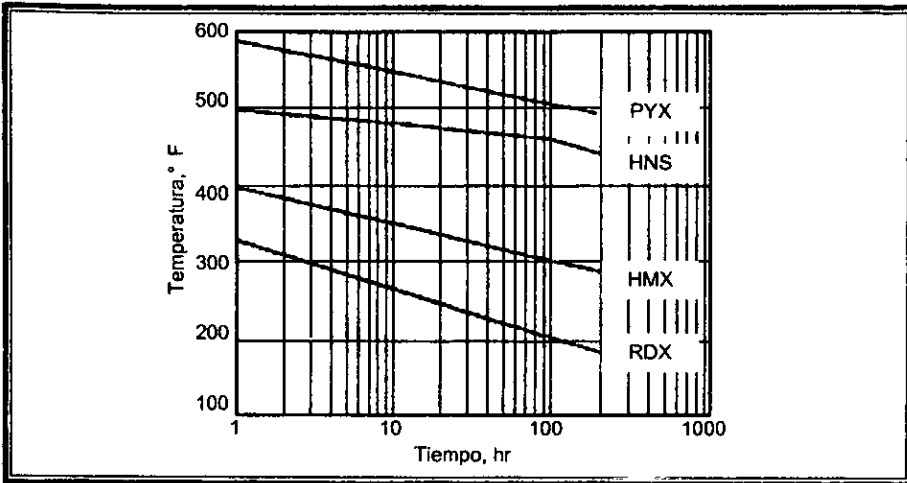


FIGURA 6.5 CAPACIDAD DE LOS EXPLOSIVOS A LA TEMPERATURA

6.4.5 PLANEACIÓN DE TERMINACIONES EN POZOS PROFUNDOS

Es esencial una planeación cuidadosa y detallada. Se requieren preparaciones extensivas que frecuentemente implican varios meses. Los planes y las especificaciones cambian comúnmente durante las operaciones de perforación del pozo y de la toma de registros. Es de vital importancia la planeación y consulta con la compañía de servicio para evaluar el equipo disponible para una correcta operación de terminación.

La consideración más importante en el diseño de la terminación es la disminución del desempeño de la pistola bajo condiciones de temperaturas elevadas. La mayoría de los sistemas de explosivos para altas temperaturas tienen una capacidad reducida de penetración, tal reducción va del 10 al 20%. La reducción en la penetración se acentúa con el uso de pistolas de diámetro pequeño en tuberías de revestimiento y liners de diámetro reducido en pozos muy profundos.

En tales circunstancias, se debe incluir una alternativa para la estimulación del pozo en la planeación de la terminación.

6.5 UNA PERSPECTIVA GLOBAL

La Tabla 6.1 presenta una guía práctica para el diseño y la selección del tipo de disparos en pozos no convencionales. Las consideraciones costo/riesgo no están incluidas.

TABLA 6.1 GUÍA PRÁCTICA PARA DISPAROS EN POZOS NO CONVENCIONALES				
Tipo de pozos. Parámetros de diseño.	Disparos en pozos horizontales y altamente desviados.	Disparos para control de arena en terminaciones con empacamiento de grava.	Disparos para fracturamiento hidráulico.	Disparos en pozos profundos de alta presión y alta temperatura.
Nivel de presión diferencial.	Se recomienda disparar bajo balance, ya que este método proporciona una buena limpieza de los disparos y un mínimo daño.	El método preferido es disparar bajo balance, usualmente seguido de la colocación de la grava.	En formaciones geopresionadas o agotadas se recomienda disparar bajo balance. En un yacimiento normalmente presionado se recomienda disparar sobre balance.	Se dispara con una presión sobre balance.
Selección de la carga y la pistola.	Utilizar la pistola más grande posible que pueda ser pescada y que proporcione los mejores medios posibles para su centralización. Además debe ser una pistola con alta densidad de disparos y un fasamiento múltiple.	Utilizar la pistola más grande que pueda ser corrida y que proporcione alta densidad, de poca penetración y un diámetro del disparo de 0.60 a 0.75 pg.. Generalmente se usan pistolas de carga formada y de cargador hueco desechable.	Utilizar la pistola más grande que pueda ser corrida y que proporcione los requerimientos de dimensión del disparo, densidad y fasamiento. Generalmente se usan pistolas de carga formada de cargador hueco. La densidad de los disparos recomendada es de 4 a 8 dpp con un fasamiento de 20° a 60° y una penetración de 4 a 6 pg.	Utilizar la pistola más grande que pueda ser corrida. Se prefieren las pistolas de carga formada de cargador hueco de acero.

Tipo de pozos. Parámetros de diseño.	Disparos en pozos horizontales y altamente desviados.	Disparos para control de arena en terminaciones con empacamiento de grava.	Disparos para fracturamiento hidráulico.	Disparos en pozos profundos de alta presión y alta temperatura.
Método de conducción.	Se recomienda la tubería flexible, ya que se obtienen ahorros en tiempo y en costos.	Depende de las condiciones de presión del pozo durante los disparos y de la longitud del intervalo a disparar. Generalmente se prefiere disparar bajo balance con tubería de producción.	La decisión del método de conducción depende del nivel de bajo balance, número de zonas, espesor de la zona, condiciones del pozo (particularmente la presión), requerimientos de control de arena y de estimulación.	Se dispara con línea de acero. Los disparos con T.P. se prefieren en pozos donde la carga del cable de la línea de acero es excesiva.

Los parámetros de diseño que se consideran para cada tipo de pozos son:

- Nivel de presión diferencial. Las decisiones en cuanto al nivel de presión diferencial están basadas, en su mayor parte, en la obtención de una buena limpieza y una alta densidad efectiva de los disparos.
- Selección de la carga y de la pistola. El sistema debe proporcionar el comportamiento deseado del pozo y debe operar en forma segura y confiable en el ambiente específico del pozo.
- Método de conducción de la pistola. Depende del tipo de pistola que se pretenda utilizar y de las características de comportamiento del pozo; además de las condiciones del pozo (presión, temperatura y nivel de presión diferencial), longitud del intervalo y requerimientos de control en la superficie.

CONCLUSIONES

Considerando el actual estado del arte de la tecnología de disparos y el análisis técnico realizado en los capítulos precedentes, se concluye lo siguiente.

- ◆ La selección del intervalo a disparar debe procurar siempre evitar la producción de zonas con casquete de gas y la conificación de agua, presentes o futuras.
- ◆ La calidad de la cementación de la tubería de revestimiento de explotación que se vaya a disparar es un factor importante en la eficiencia de los disparos, ya que si la cementación es de mala calidad, de la misma calidad serán los disparos, debido a que puede haber comunicación vertical entre formaciones y se pueden producir fluidos indeseables, además de que se puede dañar en un alto grado la tubería.
- ◆ Para prevenir el daño a la permeabilidad o para estimular el pozo efectivamente, es vital conocer perfectamente los mecanismos de daño que afectan a la formación.
- ◆ El daño a la formación se presenta en cualquier operación de campo que involucre a la formación productora. La forma en la cual se daña la formación varía dependiendo la operación que se efectúe, usualmente las razones están asociadas con el transporte de finos, reacciones químicas o una combinación de estos dos fenómenos.
- ◆ El daño a la formación causado por la invasión del filtrado del fluido de perforación durante el proceso de la perforación del pozo puede reducir significativamente la productividad en una terminación en agujero descubierto y afecta drásticamente en terminaciones disparadas, particularmente cuando los disparos se producen dentro de la zona dañada.
- ◆ Para maximizar la productividad del intervalo disparado, los disparos deberán penetrar más allá de la zona dañada por la perforación del pozo y deberán ser de la mejor calidad posible. En un pozo con daño debido a su perforación, son más efectivos pocos disparos y profundos que muchos disparos y poco profundos; sin embargo, el daño severo debido a los disparos no se soluciona incrementando la densidad y/o la penetración de los disparos.
- ◆ El comportamiento del flujo en la zona disparada no está del todo bien definido. Se requieren estudios adicionales para investigar más a fondo el fenómeno asociado con la zona dañada disparada.
- ◆ El control de problemas de daño requiere énfasis en el control de la calidad de los productos químicos, fluidos y condiciones de tratamiento y de operación. El

uso de filtros, el tratamiento de limpieza a las tuberías y el diseño de un fluido compatible y limpio es esencial para mejorar los resultados.

- ◆ La técnica óptima para disparar no es necesariamente la que permite el menor factor de daño. En cambio, es la técnica que permite el comportamiento deseado al mismo tiempo que se satisfacen los requerimientos costo/beneficio.
- ◆ Las pistolas de cargador hueco son las más utilizadas en la mayoría de las operaciones de disparos, debido a que por sus características de diseño no dejan desechos en el fondo del pozo, no producen deformación o daño a la tubería de revestimiento y tienen una mayor robustez. Las pistolas de cargador hueco reutilizable se usan principalmente en operaciones de conducción con línea de acero donde el tiempo de exposición a la presión y a la temperatura de fondo es mínimo. Las pistolas de cargador hueco desechable son ideales para grandes exposiciones de tiempo en ambientes de alta presión y alta temperatura.
- ◆ Las pistolas desechables y semi desechables son populares por tener una mejor consistencia en diámetro y penetración de disparo, comparada con los obtenidos con pistolas de cargador hueco del mismo diámetro.
- ◆ Las pistolas completamente desechables deben ser utilizadas cuando la flexión de la pistola es una consideración importante. Esto es particularmente cierto en pozos donde la tubería de revestimiento está sometida a pandeo y en pozos altamente desviados. Sin embargo, se debe evitar, en lo posible, el uso de pistolas grandes debido al potencial que tienen para dañar la tubería de revestimiento.
- ◆ Sólo las pistolas semi desechables con barra semi rígida montada al frente indican un disparo adecuado, la barra recuperada muestra agujeros del Jet. Las pistolas semi desechables con barra semi rígida montada al centro con alambre de gran resistencia sólo indican la detonación de la carga y no confirman la formación del Jet.
- ◆ Las pistolas de bala son una opción excelente para todos los tipos de fracturamiento hidráulico y otras operaciones de inyección.
- ◆ La compleja interacción de la geometría del disparo, las características de la formación y el ambiente de disparos afectan el análisis y el diseño de la terminación de pozos.
- ◆ La profundidad de penetración de una pistola puede incrementarse optimizando el diseño geométrico de ésta.

- ◆ En una terminación disparada, la productividad se incrementa con la densidad y la penetración de los disparos y con un fasamiento angular diferente de cero.
- ◆ En la selección del diámetro de la pistola se debe elegir la pistola más grande disponible para la tubería en particular, ya que con esto se asegura un máximo desempeño de la pistola.
- ◆ El comportamiento óptimo del pozo generalmente se logra disparando bajo balance grandes intervalos con pistolas conducidas con tubería de producción (pistolas TCP). Los disparos conducidos con tubería de producción permiten terminar el intervalo en un solo viaje con un bajo balance óptimo. Los intervalos cortos pueden ser disparados con pistolas conducidas con línea de acero, en tubería de revestimiento o a través de tubería. Sin embargo, la ejecución de una terminación bajo balanceada disparada con línea de acero, involucrando múltiples zonas, o la terminación de una zona sencilla donde se requieren varios viajes, puede presentar dificultades. Una vez que se dispara la primera pistola, puede resultar imposible establecer niveles óptimos de bajo balance para las pistolas siguientes.
- ◆ La mayoría de las técnicas usadas en tubería de producción convencional son aplicables cuando se usa tubería flexible para disparar. Con el uso de tubería flexible se obtienen ahorros económicos sustanciales, debido a que el posicionamiento de la pistola se hace en un solo viaje, además de que la operación es más segura, efectiva y confiable. Se pueden correr en forma segura pistolas de grandes longitudes con tubería flexible.
- ◆ En la mayoría de los diseños de pozos para la explotación de campos petroleros mexicanos no se contempla la perforación del extremo inferior del pozo denominado agujero de ratón como tal y con la finalidad expresa de retener los residuos de pistolas y otros desechos producidos durante las múltiples intervenciones de reparación y mantenimiento de pozos.
- ◆ Las altas presiones y temperaturas son factores importantes en la selección del tipo de explosivo, del diseño del cargador y de la operación de estos elementos en el pozo. La operación en el pozo es afectada debido a que los rangos de temperatura de los explosivos son dependientes del tiempo. La presión hidrostática y el tipo de fluidos que rodea la pistola son también importantes. Los rangos de tiempo y temperatura nunca deben ser excedidos en las operaciones de disparos.
- ◆ Las propiedades químicas del fluido, como la concentración de H₂S (ácido sulfhídrico) que existan en el pozo, durante e inmediatamente después de los disparos, deberá tomarse en cuenta cuando se planeen las operaciones de terminación. En operaciones de disparos en ambientes con alta concentración de H₂S (>2%) y cuando se usa ácido a altas temperaturas de fondo (>138 °C),

generalmente se prefiere el uso de pistolas de cargador hueco en vez de las pistolas expuestas.

- ◆ En una terminación con empacamiento de grava, debido a que los túneles hechos por los disparos se encuentran llenos de grava, la profundidad de penetración no necesita ser mayor de 10 cm, debido a que las pérdidas de presión en el túnel aumentan con la penetración, independientemente del tipo de flujo que se tenga dentro del túnel. Por otro lado, al aumentar el diámetro del disparo se incrementa la productividad y a mayores dimensiones de la grava en el túnel se tienen mejores condiciones de flujo.
- ◆ El empacamiento con grava puede causar severas pérdidas en la productividad en pozos disparados debido a que la arena puede pasar a través de la grava, causando una drástica reducción en la permeabilidad del empacamiento. Se necesitan más estudios en los diseños y colocación de empacamientos con grava para minimizar las pérdidas de presión durante el flujo en los túneles hechos por los disparos.

RECOMENDACIONES

Con base en las conclusiones obtenidas anteriormente y considerando el actual estado del arte de la tecnología de disparos y el análisis técnico realizado en los capítulos precedentes, se pueden hacer las siguientes recomendaciones.

- ◆ Para los yacimientos de aceite que presentan empuje por casquete de gas y/o entrada de agua, se recomienda que en la selección del intervalo a disparar se evite la producción de zonas del casquete de gas o cercanas al contacto de agua, presentes o futuras, a fin de evitar incrementar la producción de gas y/o agua asociada.
- ◆ Se recomienda utilizar cementos de alta resistencia en la cementación de las tuberías de revestimiento de explotación (que son las que generalmente se disparan) a fin de evitar un efecto negativo en la capa de cemento por efecto de disparos. Al mismo tiempo se recomienda no utilizar cementos de baja resistencia para cementar las tuberías de explotación.
- ◆ A fin de prevenir la reducción de la permeabilidad o la estimulación innecesaria del pozo, se recomienda que se conozcan perfectamente los mecanismos de daño antes de efectuar cualquier operación en el pozo.
- ◆ Para maximizar la productividad de las terminaciones disparadas, se recomienda lo siguiente:
 1. Minimizar el daño por la perforación del pozo. Controlar las pérdidas de fluido para prevenir la penetración profunda del daño.
 2. Usar fluidos limpios y compatibles con los fluidos de la formación durante la operación de disparo.
 3. Procurar en lo posible utilizar presión bajo balance durante los disparos.
 4. Penetrar más allá de la zona de permeabilidad dañada.
 5. Para el caso en el que se tengan heterogeneidades de la formación (permeabilidad variable), se recomienda usar densidades de disparos variables y si es necesario, para el caso en que se tenga un daño profundo.
 6. Usar tuberías limpias para prevenir la recontaminación del fluido utilizado para disparar.
- ◆ Para maximizar la productividad de los disparos se recomienda disparar con pistolas que penetren más allá de la zona de daño debido a la perforación del pozo y que los disparos hechos sean de la mejor calidad posible en cuanto a geometría. En un pozo con daño debido a su perforación se recomienda que los disparos sean de baja densidad y de profunda penetración, debido a que con esto se maximiza la productividad.

- ◆ Se recomienda hacer más estudios para investigar más a fondo el fenómeno asociado con la zona dañada disparada.
- ◆ Antes de efectuar los disparos se recomienda controlar la calidad de los productos químicos, fluidos y condiciones de tratamiento y de operación para tener control del problema de daño. Se recomienda usar filtros, dar tratamiento de limpieza a las tuberías y diseñar un fluido compatible y limpio para mejorar los resultados.
- ◆ En los casos en los que el tiempo de exposición a la presión y a la temperatura de fondo es mínimo, se recomienda el uso de pistolas de cargador hueco reutilizable para disparar con línea de acero. Asimismo, en los casos en los que se tengan condiciones para disparar con grandes exposiciones de tiempo en ambientes de alta presión y alta temperatura se recomienda el uso de pistolas de cargador hueco desechable.
- ◆ Cuando la flexión de la pistola es una consideración importante, se recomienda el uso de pistolas completamente desechables. Sin embargo, se recomienda evitar, en lo posible, el uso de pistolas grandes debido al potencial que tienen para dañar la tubería de revestimiento.
- ◆ En el caso en el que se quiera confirmar la formación del Jet después de haber disparado, se recomienda el uso de pistolas semidesechables con barra semirígida montada al frente.
- ◆ Para todos los tipos de fracturamiento hidráulico y otras operaciones de inyección se recomienda el uso de pistolas de bala.
- ◆ Debido a que la profundidad de los disparos es sensible a las características de cada pistola, se recomienda optimizar el diseño geométrico de la pistola a fin de incrementar la profundidad de penetración de ésta.
- ◆ Se recomienda que en una terminación disparada, se incrementen la densidad y la penetración de los disparos y se tenga un fasamiento angular diferente de cero, ya que la productividad se incrementa con estos parámetros.
- ◆ En la selección del diámetro de la pistola, se recomienda utilizar la pistola más grande disponible, para las condiciones del pozo en particular, a fin de asegurar el máximo desempeño de ésta.
- ◆ Se recomienda que para grandes intervalos se dispare bajo balance con pistolas conducidas con tubería de producción, ya que con esto se logra un comportamiento óptimo del pozo, debido a que estos disparos permiten terminar el intervalo en un solo viaje con un óptimo bajo balance. Se recomienda disparar los intervalos cortos con pistolas conducidas con línea de acero, en tubería de revestimiento o a través de tubería.

- ◆ Se recomienda que, en la medida de lo posible, se utilice la tubería flexible para disparar, ya que con esto se obtienen ahorros económicos sustanciales, debido a que el posicionamiento de la pistola se hace en un solo viaje, además de que la operación es más segura, efectiva y confiable.
- ◆ Se recomienda ampliamente que en el diseños de los pozos para la explotación de los campos petroleros sea contemplada la perforación del extremo inferior del pozo denominado agujero de ratón a fin de retener los residuos y desechos de las operaciones de reparación y mantenimiento de pozos. De esta manera se evitará en lo posible la obstrucción de intervalos productores de interés que mermen el potencial productivo del pozo.
- ◆ En pozos profundos, se recomienda tener en cuenta los efectos de las altas presiones y temperaturas en la selección del tipo de explosivo, el diseño del cargador y la operación de estos elementos en el pozo, debido a que estos factores afectan el funcionamiento de la carga. Es muy importante que durante las operaciones nunca se excedan los rangos de tiempo y temperatura para los tipos de pistola y cargas utilizadas.
- ◆ Cuando se planeen las operaciones de terminación se recomienda tomar en cuenta las propiedades químicas del fluido, tales como la concentración de H₂S (ácido sulfhídrico), que existan en el pozo durante e inmediatamente después de los disparos. En operaciones de disparos en ambientes con alta concentración de H₂S (>2%), así como con el uso de ácido a altas temperaturas de fondo (>138 °C) se recomienda el uso de pistolas de cargador hueco.
- ◆ En una terminación con empacamiento de grava se recomienda que la profundidad de penetración del disparo no sea mayor de 10 cm, debido a que las pérdidas de presión en el túnel, que se encuentra lleno de grava, se incrementan con la longitud de penetración, independientemente del tipo de flujo que se tenga dentro del túnel.
- ◆ Se recomienda hacer más estudios en los diseños y colocación de empacamientos con grava para minimizar las pérdidas de presión durante el flujo en los túneles hechos por los disparos.

BIBLIOGRAFÍA

1. SAUCIER R.J. AND LANDS J.F.Jr., **A LABORATORY STUDY OF PERFORATIONS IN STRESSED FORMATIONS ROCKS**, JPT, SEPTIEMBRE 1978.
2. RON BAKER, **A PRIMER OF OFFSHORE OPERATIONS**, 2ª Ed; AUSTIN TEXAS.
3. GARAICOCHEA P. FRANCISCO, **APUNTES DE COMPORTAMIENTO DE LOS YACIMIENTOS**, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE INGENIERÍA.
4. CARDENAS ALONSO IGNACIO, **APUNTES DE TERMINACIÓN DE POZOS**, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE INGENIERÍA.
5. AVA INTERNATIONAL, **CATALOGO DE PRODUCTOS DE TERMINACIÓN DE POZOS**.
6. PAT BOND AND PERRY COURVILLE, **COILED TUBING CONVEYED PERFORATING PRESENTATION SUMMARY**, HALLIBURTON ENERGY SERVICES.
7. SCHLUMBERGER, **EVALUACIÓN DE FORMACIONES EN MÉXICO**, SEPTIEMBRE 1984.
8. P.S. SMITH, L.A. BEHRMANN AND WENBO YANG, **IMPROVEMENTS IN PERFORATING PERFORMANCE IN HIGH COMPRESSIVE STRENGTH ROCKS**, SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS INC, JUN 1997.
9. HALLIBURTON, **OPEN HOLE SERVICES CATALOG**, WELEX.
10. W.T. BELL, R.A. SUKUP AND S.M. TARIQ, **PERFORATING**, SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERING, INC., RICHARDSON TEXAS, 1995.
11. SCHLUMBERGER, **PERFORATING SERVICES**, 1995.
12. A. GHALAMBOR AND M. ASARI, **PERFORMANCE EVALUATION OF EXTREME OVERBALANCED PERFORATING**, SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERING, INC, RICHARDSON TEXAS, 1998.
13. ECONOMIDES M.J., DANIEL HILL AND EHLIG-ECONOMIDES C., **PETROLEUM PRODUCTION SYSTEMS**, PRENTICE HALL PETROLEUM ENGINEERING SERIES, 1994.
14. PATRICK J. HANDREN, **PRACTICAL APPLICATIONS FOR OVERBALANCED PERFORATING AND SURGING**, SOUTHWESTERN PETROLEUM SHORT COURSE-96.

15. SCHLUMBERGER, **PRINCIPIOS/APLICACIONES DE LA INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS.**
16. M.O. ONYEKONWU, F.C. OKONKWO, **PSEUDO-SKIN MODEL FOR GRAVEL FILLED PERFORATIONS,** JOURNAL OF PETROLEUM SCIENCE AND ENGINEERING, 1997.
17. MANMOHAN S. CHAWLA, **SHAPED CHARGES,** WESTERN ATLAS INTERNATIONAL INC., TEXAS, 1995.
18. IAN W. THOMSON, **TCP USING A DEPLOYMENT SYSTEM,** TRANSOCEAN PETROLEUM TECHNOLOGY, JUNE 1995.
19. M. AZARI, J. BURLESON, M. SOLIMAN, JUSTIN MASOR AND N. GAZI, **WELL TESTING AND EVALUATION OF TUBING CONVEYED EXTREME OVERBALANCED PERFORATING,** SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERING, INC, RICHARDSON TEXAS, 1998.
20. SCHLUMBERGER, **50 ANIVERSARIO DE SCHLUMBERGER EN MÉXICO,** OCTUBRE, 1993.
21. **API RECOMMENDED PRACTICE STANDARD PROCEDURE FOR EVALUATION OF WELL PERFORATORS,** API RP 43, 2ND ED, JULY, 1971.