

01124
31



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"ANÁLISIS Y DISEÑO DETERMINACIONES
DE POZOS CON DISPAROS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

JUAN JAVIER / PINEDA GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS: M. I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ

MEXICO, D.F.

2003



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A



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
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-144

SR. JUAN JAVIER PINEDA GARCÍA
Presente

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

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

ANÁLISIS Y DISEÑO DE TERMINACIÓN DE POZOS CON DISPAROS

INTRODUCCIÓN
RESUMEN
I PERSPECTIVA GENERAL
II LAS PISTOLAS
III TIPOS DE PISTOLAS Y CARACTERÍSTICAS
IV TRANSPORTE DE LA PISTOLA Y CONTROL DE LA PROFUNDIDAD
V EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS DISPAROS
VI EFICIENCIA DE FLUJO DE LOS SISTEMAS DE DISPARO
VII DISPAROS, LA TERMINACIÓN NATURAL
VIII TÉCNICAS DE DISPAROS PARA MÉTODOS DE TERMINACIONES ESPECIALIZADAS
IX SEGURIDAD EN LOS DISPAROS
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
NOMENCLATURA
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 28 de febrero de 2003
EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas •
UNAM a difundir en formato electrónico o impreso
el contenido de mi trabajo de tesis.
NOMBRE: Juan Pineda García
FECHA: 7 de Abril 2003
FIRMA: [Firma]

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE TERMINACIONES EN POZOS
CON DISPAROS.**

Presentada por: Juan Javier Pineda García

Dirigida por: M.I. José Martínez Pérez

Jurado:

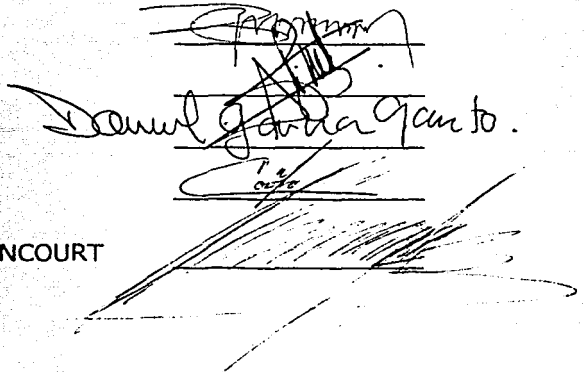
Presidente: ING. MANUEL VILLAMAR VIGUERAS

Vocal: M.I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ

Secretario: DR. DANIEL GARCÍA GAVITO

1er. Suplente: ING. CLAUDIA CASTRO ROMERO

2do. Suplente: ING. RAMÓN E. DOMÍNGUEZ BETANCOURT



Handwritten signatures of the jury members over a grid background. The signatures are: Manuel Villamar Viguera, José Martínez Pérez, Daniel García Gavito, Claudia Castro Romero, and Ramón E. Domínguez Betancourt.

Ciudad Universitaria, México, D.F.
Marzo del 2003

C

Agradecimientos:

Mamá: Ma. Isabel García Torres.

Como agradecer a quien no sólo ha cumplido con su compromiso de darme de comer y cuidarme sino que además y lo más importante; de entregarme parte de su corazón y parte de su vida, gracias a ti que me diste la vida y las palabras más bellas de este mundo nunca serán suficientes para expresar este sentimiento de amor hacia ti. Gracias Mamá.

Papá: Juan Javier Pineda Chávez.

Gracias por permitirme tener tantos días y noches en completa felicidad y paz, sabiendo que tu me cuidabas y me respaldabas, gracias por tu apoyo, por tu cariño, por tu ejemplo y por darme la oportunidad de terminar una carrera, A ti te debo todo lo que se y lo que soy. Gracias Papá.

Tía Isabel y Abuela Mercedes.

Gracias por estar siempre apoyándonos en las buenas y en las malas, por que en este proyecto siempre estuviste presente empujándome hacia delante, pidiéndome que me esforzaré no con palabras pero con un ejemplo de vida que es digno de seguirse. Gracias Tía por todo tu cariño.

A la abuela Mercedes que siempre me demostró su cariño, su alegría y amor. Gracias Abuela.

Hermanos: Jorge Armando y Leslie Elizabeth.

Gracias hermana por tu cariño y ternura, tu temperamento y buen humor, porque eres parte fundamental dentro de mi corazón.

Gracias hermano porque siempre fuiste mi mejor amigo y compañero, gracias por tu sentido del humor y alegría que me contagiabas día con día.

A mi familia.

Porque sin ustedes la palabra familia, no sería más que una conjunción de letras sin ningún significado ni valor para mi, porque representan un gran apoyo en tiempos buenos y no tan buenos. Por sus conocimientos y tiempo en el que hemos estado juntos. Gracias.

Delliany Castro Espinosa. ♥

Gracias, porque me diste la oportunidad de conocerte y pasar muchos momentos felices a tu lado, compartir diversas experiencias y lo más importante por compartir tu corazón y amor conmigo. Porque representas un evento crítico en mi vida y por tu ayuda en mi desarrollo personal, ya que no he cambiado, sin embargo no soy el mismo desde que te conocí. Gracias.

Compañeros:

Hegel, Edgar, Mike, Yasmín, Blanca, Ivan, Donidoy, Maruri.

Gracias por permitirme pasar tiempos excelentes junto a ustedes, por prestarme ayuda y sentirme parte de un gran equipo de trabajo y un gran grupo de compañeros, por todas aquellas noches interminables y felices.

Asesor M. I. José Martínez Pérez.

Gracias por ser un profesor y persona modelo, por su tiempo, consejos, conocimientos y dedicación en la dirección adecuada de este trabajo que representa tanto para mí.

A la Facultad de Ingeniería.

Porque en tus aulas encontré mucho más que bancas, pizarrones y exámenes, pude hallar un verdadero Amor, diversas amistades, excelentes tiempos, algunas noches de desvelo, el ser parte de una gran institución y un universo de pensamientos y conocimientos que han transformado mi mente y mis ideas. Gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Por ser una gran institución, donde muchos como yo podemos encontrar los elementos necesarios para generar nuevas formas de pensar y nuevos conocimientos, que serán herramientas necesarias para generarnos el futuro que nosotros decidamos tener. Gracias.

ADIOS.

Porque me diste un cuerpo sano, una gran familia, un suficiente tiempo y las condiciones adecuadas para realizar mis proyectos. GRACIAS.

Índice

I. Introducción	iii
II. Resumen	v
1. CAPITULO I	
PERSPECTIVA GENERAL	1
1.1. La Terminación con Disparos.....	1
1.2. El papel de los disparos.....	4
1.3. Evolución de la pistola.....	8
1.4. Disparos en la actualidad.....	10
2. CAPITULO II	
LAS PISTOLAS	11
2.1. La pistola con cargas moldeadas.....	11
2.2. Factores que afectan el Desempeño de la pistola de Cargas Moldeadas.....	17
2.3. La pistola de Balas.....	27
2.4. Factores que afectan el Desempeño de la pistola de Balas.....	29
3. CAPITULO III	
TIPOS DE PISTOLAS Y CARACTERÍSTICAS	32
3.1. Tipos de pistolas.....	32
3.2. Características de las Pistolas.....	32
3.3. Daño a la Tubería y Reducción de la Resistencia al Colapso.....	39
3.4. Comparación de Características.....	44
3.5. Aplicaciones.....	45
3.6. Limitaciones.....	46
4. CAPITULO IV	
TRANSPORTE DE LA PISTOLA Y	
CONTROL DE LA PROFUNDIDAD	49
4.1. Introducción.....	49
4.2. Pistolas transportadas con línea de cable.....	49
4.3. Pistolas transportadas con tubería.....	64
4.4. Pistolas transportadas con tubería flexible.....	75
4.5. Colocación de la pistola a la profundidad.....	76
4.6. Consideraciones en la Planeación.....	81
5. CAPITULO V	
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS DISPAROS	85
5.1. Perspectiva Histórica.....	85
5.2. Revisión de la Prueba API RP 19b.....	85
5.3. API RP 19b, Procedimientos de Prueba.....	86
5.4. Validación de la información del API RP19b.....	91
5.5. Predicción del desempeño en el fondo del pozo de la información API obtenida.....	93
5.6. Consideraciones de la calidad de los disparos en el campo.....	101
6. CAPITULO VI	
EFICIENCIA DE FLUJO DE LOS SISTEMAS DE DISPARO	104
6.1. La eficiencia de flujo del pozo.....	104
6.2. Daño al pozo.....	104
6.3. Factores de daño que influyen en la eficiencia de flujo del pozo.....	105

6.4. Daño por los disparos.....	111
6.5. Predicción del desempeño del pozo.....	116
6.6. Ejemplo de predicción de eficiencia de flujo.....	129
6.7. Diagnóstico de la eficiencia de flujo resultante.....	134
6.8. Conclusiones.....	137
7. CAPITULO VII	
DISPAROS, LA TERMINACIÓN NATURAL.....	140
7.1. Terminaciones con Disparos.....	140
7.2. Ambiente de disparos.....	140
7.3. Selección de pistola y carga.....	142
7.4. Método de transporte de pistola.....	144
7.5. Perspectiva global.....	146
8. CAPITULO VIII	
TÉCNICAS DE DISPAROS PARA MÉTODOS	
DE TERMINACIONES ESPECIALIZADAS.....	147
8.1. Disparos para control de arenas.....	147
8.2. Disparos para fracturamiento hidráulico.....	150
8.3. Disparos en pozos profundos, de alta presión y alta temperatura.....	153
8.4. Disparos en pozos con producción de H ₂ S.....	157
8.5. Disparos en pozos altamente desviados y horizontales.....	158
8.6. Disparos tipo "puncher" de TR y TP.....	162
8.7. Disparos para la inyección.....	162
9. CAPÍTULO IX	
SEGURIDAD EN LOS DISPAROS.....	164
9.1. Seguridad en los disparos.....	164
9.2. Seguridad con explosivos.....	164
9.3. Seguridad en las operaciones de disparos transportados con línea de cable.....	166
9.4. Seguridad en las operaciones de disparos transportados con tubería.....	167
9.5. Operaciones de control de presión en la cabeza del pozo.....	177
9.6. Seguridad en el pozo en la presencia de aparatos radioactivos de registro.....	179
9.7. Operaciones con presión y presencia de H ₂ S.....	179
III. Conclusiones y Recomendaciones.....	182
IV. Nomenclatura.....	183
V. Bibliografía.....	185

INTRODUCCIÓN

La Industria Petrolera abarca una gran extensión en sus tareas cotidianas que van desde la exploración, descubrimiento, delimitación, desarrollo, producción (primaria, secundaria, terciaria) y abandono de los yacimientos, por lo que durante la carrera se nos muestran los conceptos para el estudio del comportamiento de los mismos con el fin de lograr un máximo beneficio económico en la explotación del yacimiento. Así tenemos conceptos, fenómenos y procesos que interactúan de una manera tan compleja, que para poder descifrar tales eventos se requiere de una interacción de diversas áreas de conocimiento y diversos profesionistas. Cuando hablamos de la Exploración y Producción de Yacimientos en un afán por reducir el espectro del alcance la carrera nos encontramos con las diversas actividades que no son las únicas pero que nos sirven como referencia dentro de las operaciones dentro del desarrollo del yacimiento por lo que tenemos:

- o Caracterización del Yacimiento
- o Perforación y Terminación de los pozos en el Yacimiento
- o Producción del Yacimiento (primaria)

Los cuales son parte de un gran ciclo que se repite una y otra vez, pero hablar y profundizar en cada uno de ellos resultaría en otra gama tan amplia, que resultaría aún muy difícil de abarcar y para lo cual, hay especializaciones, maestrías y doctorados que representan tan sólo una pequeña parte de lo que implica cada una de ellas (pero no menos importante por supuesto). Así llegamos al punto en que debemos especializarnos en alguna rama de la industria, por lo tanto por medio de este trabajo intento especializarme y alcanzar una idea más precisa de los que implica la Terminación con Disparos que cae dentro de las operaciones de Desarrollo del Yacimiento sin perder de vista que es una red de complejas interacciones y que siempre se necesitará tener contacto con otras áreas de conocimiento y otros profesionistas.

Así durante la etapa de terminación, el disparo establece una comunicación entre el yacimiento y el pozo, pero tampoco es una operación aislada por lo que envuelve también una serie de factores como son:

El tipo de pistola, tipo de carga, método de transporte, condiciones del pozo, condiciones del yacimiento y tipo de yacimiento entre otros. Así trataremos de manera específica los aspectos relevantes durante la operación de disparos con el objetivo de optimar todos aquellos factores que nos permitan realizar los disparos en forma eficiente y segura, estableciendo los criterios fundamentales que se toman en cuenta para llevar a cabo la correcta planeación y diseño de terminaciones con disparos en pozos petroleros.

El alcance se limitará a analizar los métodos más comunes de terminaciones con disparos así como de las características de los elementos auxiliares bajo los procedimientos establecidos de prueba por medio de las practicas recomendadas del API en su versión más reciente

La aplicación de este trabajo es que funcione como una referencia para entender los procesos que se presentan en las operaciones de disparos y que pueda ser utilizado por los profesionistas de la rama, así como por los estudiantes de la carrera ya que en la actualidad existen diversos programas de cómputo, los cuales realizan el diseño de las actividades para los disparos, siempre resulta conveniente conocer los métodos analíticos y semi-analíticos que puedan llevarnos a la solución del problema y así analizar los resultados arrojados por tales simuladores.

Por medio del análisis de los temas propuestos se completará el estudio en una forma general de los disparos con pistolas de cargas moldeadas, su análisis y el poder diseñar una terminación con disparos, sin embargo esta operación forma parte y solo es un aspecto a considerar dentro de la terminación de un pozo, por lo que no se deben confundir estos dos conceptos.

Durante la lectura y análisis de este trabajo, nos encontramos con una gran variedad de herramientas y conceptos que nos ayudan a caracterizar el funcionamiento y comportamiento del sistema de disparos.

El sistema de disparos se compone por el pozo, la pistola y el yacimiento, por lo que es necesario no sólo conocer las características físicas de la pistola, sino también aquellos parámetros que se ven involucrados antes y durante la operación de los disparos. Este sistema disparado, también debe ser evaluado en su desempeño, lo cual se realiza por el Índice de Productividad del pozo, por esto se presenta métodos para llevar a cabo esta tarea y que puedan ser analizados, sin embargo los resultados deben ser validados en campo.

Una vez obtenidos y validados, los resultados, deben ser analizados por los profesionistas y diagnosticar la situación que se tiene en el fondo del pozo a partir de aquí establecer si se requieren operaciones especiales para lograr el comportamiento esperado. Estas operaciones pueden ser: Control de arenas, fracturamiento hidráulico, disparos en pozos con altas condiciones de presión y temperatura, disparos en pozos desviados, disparos tipo "puncher" o disparos para la inyección de fluidos al pozo.

Durante el trabajo, también se establecen algunos procedimientos de seguridad en el manejo y operación de los explosivos, ya que cualquier detonación no planeada tendría fatales consecuencias en términos económicos y más importante aún en la pérdida de vidas humanas, así se presentan las posibles causas y las soluciones adecuadas en términos técnicos. Sin embargo siempre será necesario que los operadores se encuentren alerta y conscientes que la seguridad depende de ellos mismos.

Es necesario citar que este trabajo se encuentra fundado en un 98% en la monografía de la SPE denominado "Perforating" citada como referencia bibliográfica al final y de la cual se realizó la traducción la más apegada posible a la obra original.

RESUMEN

En el primer capítulo "Perspectiva General" se establecen y definen de una manera somera todos aquellos parámetros que se ven envueltos en los disparos; desde la pistola, el yacimiento y algunas aplicaciones especiales. También se establecen los diversos mecanismos de disparo como son: Pistola de Balas, Pistolas de cargas moldeadas y pistolas hidráulicas.

En el segundo capítulo "Las Pistolas" se analizan en forma mucho más formal los parámetros que caracterizan y optiman el desempeño de la pistola de cargas moldeadas (jet) y la pistola de balas, conociendo los explosivos utilizados, el fenómeno de penetración, los factores que afectan tal desempeño y la forma de optimar dichos factores para las diferentes operaciones más generales.

En el tercer capítulo "Tipos de pistolas y sus características" se detallan los diferentes tipos de pistolas de cargas moldeadas y de bala, así como sus características específicas e inherentes, ventajas y desventajas como pudieran ser: el daño a la Tubería de Revestimiento, a la cementación y sus aplicaciones más frecuentes.

En el cuarto capítulo "Transporte de la pistola y control de la profundidad" se analiza el medio con el cual llevaremos la pistola al fondo del pozo (cable, tubería o tubería flexible), tomando en cuenta factores económicos, las condiciones de terminación y las propias características del yacimiento, además del control de presión en la superficie, el cálculo de los pesos adicionales para bajar la pistola, la configuración básica de la sarta de disparo, detonadores utilizados, etc. Después se describe el proceso de control de la profundidad para cada uno de los métodos de transporte de la pistola en el pozo.

En el quinto capítulo "Evaluación del desempeño de los disparos" revisamos de un manera general los procedimientos propuestos por el API en su última versión como lo es API RP 19b, donde se señalan algunas prácticas recomendadas y su estandarización en relación con los resultados que pueden obtenerse en el pozo por medio de correlaciones matemáticas, así como la utilización de un nomograma derivado de dichas correlaciones que facilitan el proceso.

En el sexto capítulo "Eficiencia de flujo de los sistemas de disparos" se presenta un estudio de los factores que influyen en los disparos y que afectan la productividad del pozo ya que se encuentran relacionados en forma directa (los factores relativos al pozo, yacimiento y disparos), así como un acercamiento analítico para la predicción del desempeño del pozo tanto de gas como de aceite y los métodos más comunes para confirmar tal predicción.

En el séptimo capítulo "Disparos, la terminación Natural" se estipulan las técnicas que nos ayudan a mejorar los disparos realizados (bajo-balance, sobre-balance) y sus requerimiento específicos para cada uno de ellos.

En el octavo capítulo "Técnicas de disparos para métodos de terminaciones especializados" se revisan las terminaciones no convencionales y los requerimientos que cada uno de estas , como son los métodos de transporte, las condiciones del pozo, tipo de pistola, las características de las pistolas, etc.

En el noveno capítulo "Seguridad en los disparos" se establecen los procedimientos operacionales que resultan críticas en las operaciones de disparos, las causas de incidentes, los procedimientos de armado seguro y los procedimientos de operación.

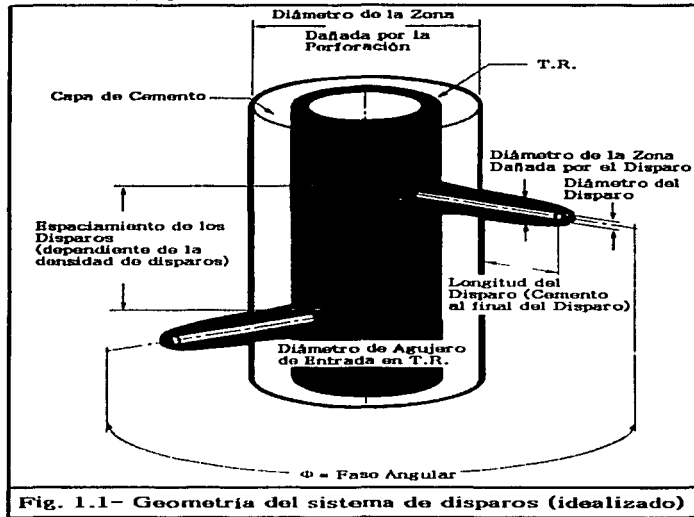
PAGINACIÓN

DISCONTINUA

CAPITULO I PERSPECTIVA GENERAL

1.1 La Terminación con disparos

El objetivo primario de la utilización de las pistolas modernas es el de establecer la comunicación efectiva para el flujo de fluidos entre el pozo y el intervalo productor. Para alcanzar esa comunicación, los disparos de la pistola generan un modelo de perforaciones a través de la Tubería de Revestimiento, el recubrimiento de cemento y la formación productora (figura 1.1). La profundidad de los disparos en la formación depende en el tipo y tamaño de pistola, características físicas del yacimiento y las condiciones de esfuerzo de la formación. La profundidad puede variar de una a varias decenas de pulgada.



La facilidad con la cual los fluidos del yacimiento son producidos a través de éstas perforaciones dependen de un número de factores que interactúan de una manera compleja. Los resultados de éstas interacciones se transforman en restricciones al flujo, manifestándose como caídas de presión entre el yacimiento y el pozo (o bien la superficie si se considera un sistema completo). Estas caídas de presión son denominadas "daño" al sistema. Este daño generalmente no incluye las pérdidas en la tubería y equipos superficiales. Los factores que contribuyen al daño debido a los disparos caen en tres grandes categorías: geometría de los disparos, ambiente de los disparos y características de la formación.

Geometría de los Disparos.

Esta se encuentra caracterizada típicamente por cuatro parámetros:

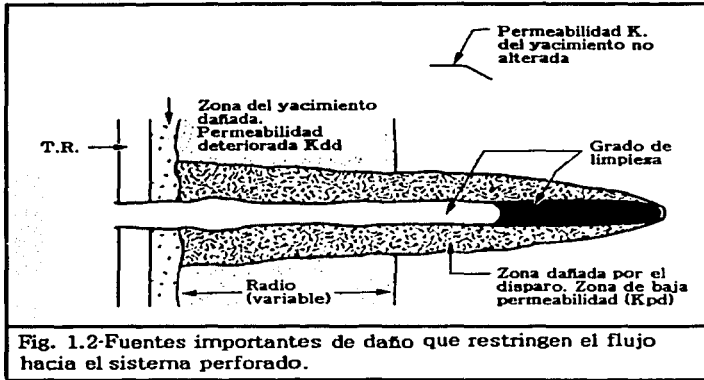
- Densidad de los disparos.
- Profundidad y penetración de los disparos en el yacimiento.
- Fase del disparo (distribución angular de los disparos).
- Diámetro del agujero disparado.

Estos factores pueden ser controlados por el operador. Cuando son optimizados para la terminación de un pozo específico, el daño resultante de éstos factores pueden aproximarse a cero o incluso volverse negativos y el sistema disparado producirá de una forma igual o mejor como si la

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

terminación fuese en agujero descubierto. La influencia relativa sólo del aspecto geométrico de los disparos, en el flujo de fluido depende principalmente en el tipo de terminación, es decir, la optimización de todos los factores para un tipo específico de terminación no serán óptimos para cualquier otro.

El diseño de los disparos de terminación sería simple si, tan solo los factores geométricos estuvieran presentes. La mayoría de los sistemas modernos de disparos proveen eficiencias en el flujo de fluidos iguales o mejores que aquellas de terminaciones de longitud comparable de agujero descubierto. Desafortunadamente se encuentran otros problemas significativos que existen detrás de la capa cementante en el pozo.



Ambiente de los Disparos.

Como muestra la figura 1.2 las operaciones de disparos y cementación pueden crear zonas de permeabilidad reducida en las cercanías del pozo como resultado de la invasión de filtrado o del taponamiento de la formación por finos. Además de una zona dañada de permeabilidad reducida que se crea alrededor del disparo, inherente al proceso de penetración. Los disparos bajo-balanceados (la presión de la formación es mayor que la del pozo) pueden permitir la limpieza de los disparos significativamente. Por otra parte el uso de los fluidos de terminación puede acarrear problemas significativos con la limpieza de los disparos, particularmente cuando se combina con los disparos sobre-balanceados (la presión en el pozo es mayor que la presión de la formación).

Características de la formación.

Las propiedades físicas de la formación y las condiciones de esfuerzo in-situ, tienen influencia en la penetración de los disparos, el grado y extensión de la formación pulverizada alrededor del disparo. La permeabilidad de la formación y las características del fluido determinan ampliamente el nivel de presión diferencial requerida para la limpieza efectiva de los disparos por medio del flujo de fluidos a través de ellos. La anisotropía de la permeabilidad o las laminaciones de arcillas lutita, pueden significativamente influenciar el desempeño del flujo cuando los pozos son disparados con baja densidad de disparos.

Diseño y Terminación

La formación y los factores ambientales pueden ser de mayor importancia que los disparos por sí mismos, ya que influyen de una manera crítica la efectividad de la terminación. El alcance del diseño de las operaciones de terminación se ve incrementado significativamente cuando la

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

formación y los efectos ambientales se incluyen. La lista de acciones para la planeación y la efectiva terminación se vuelve extensa:

1. Revisar la información proveniente de otros pozos perforados y terminados en el yacimiento de interés. El desempeño del proceso de terminación es altamente simplificado si tal información se encuentra disponible.
2. Las operaciones y los fluidos de perforación son seleccionados para minimizar el daño a la formación al rededor del pozo.
3. Revisar los registros geofísicos disponibles que indican las características de la formación y las propiedades de los fluidos presentes.
4. Estudiar la información que se obtienen de los núcleos y muestras de roca estudiadas.
5. Analizar los resultados de las pruebas DST (open-hole drillstem test) y establecer las propiedades básicas del yacimiento.
6. Establecer la geometría de los disparos que resulta la indicada bajo los aspectos del tipo de terminación, características de la formación y ambiente de disparos.
7. Indicar el método de transporte de disparos, cable o tubería.
8. Diseñar adecuadamente las presiones (bajo balanceadas) para una optima limpieza de los disparos bajo las circunstancias 3 y 4.
9. Especificar el tipo de fluido para la terminación que no cause daño.
10. Planear y revisar la terminación una vez realizada por medio de las pruebas después de los disparos DST (Drill Steam Testing).

Considerando la compleja interacción de estos factores, su justo balance de efectos no es una tarea simple, sin embargo, la falla en la consideración de uno o varios factores o bien la suposición de su influencia, puede resultar en un desempeño deficiente del pozo.

Herramientas de la Planeación.

Para determinar las razones por las cuales se tiene un pobre desempeño del pozo resulta muy difícil por lo que se debe definir la naturaleza del problema, el desempeño de los disparos, el bajo balance o sobre balance establecido y la correcta profundidad de los disparos. Una revisión de los registros geofísicos no siempre señala al problema.

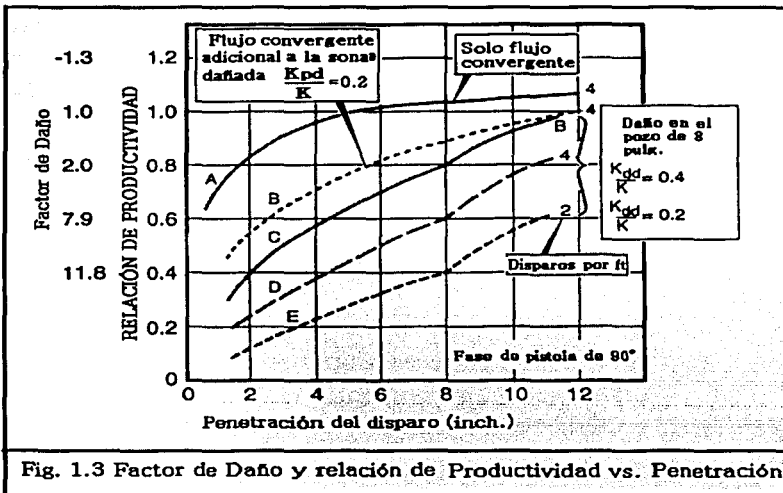
El análisis de la presión de la formación, por medio de pruebas, nos indicarán si existe algún daño no deseado considerable estableciendo así lo que al principio suponíamos, es decir que el pozo se encuentra dañado. Desafortunadamente el análisis transición de presión de la formación no siempre aísla los componentes individuales del daño. Procedimientos adicionales de diagnóstico deben ser implementados. Los registros de producción que envuelven múltiples estudios pueden ser de ayuda. Pruebas de incremento o decremento de presión pueden establecer información considerable relativa a las características del yacimiento. El análisis nodal estudia el sistema completo y puede aislar los problemas en áreas específicas. Pero la pregunta original no queda contestada. ¿Puede el proceso de diseño de la terminación ser más efectivo?

Es imposible sobre estimar la importancia del uso de todas las herramientas disponibles para la planeación y el diseño al inicio. Ellas no sólo proveen la mayor eficiencia de la terminación en términos del desempeño de flujo además, diagnostica efectivamente los problemas si algo sale mal y las operaciones adicionales que se requerirán. No es sorprendente que el uso de técnicas analíticas para predecir el desempeño del pozo se incremente rápidamente, sin embargo se debe tener cuidado, ya que no existen soluciones simples. Cada terminación debe ser planeada individualmente y toda la información posible debe ser considerada (registros, núcleos, resultados de pruebas de pozos, etc.) Más aún cierta información necesaria como la extensión y severidad del daño del pozo no se encuentra disponible, como resultado las técnicas analíticas deben ser reconocidas como guías generales en vez de respuestas concretas. Las técnicas analíticas deben ser respaldadas por el juicio, la experiencia de los ingenieros y por la información obtenida y disponible.

El diseño de la terminación se ha mejorado por los avances en la década pasada por el entendimiento de las interacciones de los disparos con el yacimiento, esto ayudó a desarrollar los disparos efectivos y que pudieran resolver el problema del daño de una manera efectiva, los métodos de disparos que mejoran tanto la limpieza de los mismos como la eficiencia de flujo. Como resultado, el operador puede escoger de una gran variedad de equipos y tecnologías que son superiores a las herramientas disponibles en el pasado. Por una parte el incremento de la flexibilidad provee de medios para adaptar las técnicas de disparo específicas al problema de terminación, de otra forma provee mayor oportunidad para error por lo que se debe ser cuidadoso. El propósito de esta tesis es la presentación de los diversos criterios de diseño como guía para la aplicación de los disparos en la terminación.

1.2 El papel de los disparos

El tipo de disparos y la configuración de los mismos juegan diferentes papeles para cada tipo de terminación. La siguiente temática indicará que para una terminación natural¹, la profundidad de los



disparos, la fase y la densidad tienen mayor importancia que la profundidad del disparo y para el caso de fracturamiento hidráulico el diámetro del agujero de la tubería y la fase de los disparos son mucho más importantes que la penetración.

Terminación Natural

En situaciones de terminaciones naturales, el objetivo es el de disparar el pozo para obtener un bajo nivel de daño y así evitar la estimulación. Ya que la mayoría de los pozos tienen cierto daño alrededor del pozo, la terminación con alta densidad de disparo y con gran penetración de las cargas es lo indicado. El desfaseamiento del disparo es también importante ya que una fase diferente de cero

¹ La terminación natural se considera como aquella en la que una vez terminado el proceso de perforación y cementación de las tuberías, es necesario crear un acceso para que los fluidos del yacimiento lleguen al pozo y a su vez puedan ser producidos, así nos referiremos a la terminación natural como una terminación común, es decir: un pozo ademado y disparado. Así a lo largo del texto nos referiremos a este término de manera general.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

puede incrementar la productividad por medio de la baja interferencia de flujo resultado de la presencia del pozo. El diámetro de los disparos es de interés secundario en la terminación natural. La figura 1.3 la relación de productividad es el gasto de flujo de un sistema disparado dividido por el flujo ideal en agujero descubierto y el daño es la caída de presión adicional a través del sistema perforado comparado con la caída de presión ideal para el mismo gasto.

Dado que la densidad de disparos efectiva (el número de disparos que actualmente se encuentran produciendo) es un factor crítico en todos los pozos productores, y atención especial debe ser dada al uso de las técnicas de disparos que aseguren el mayor porcentaje posible de limpieza de disparos y flujo efectivo. Tales técnicas varían ampliamente dependiendo de las propiedades del yacimiento y los fluidos. Estas técnicas incluyen disparos bajo balanceados, represionamiento de las perforaciones inmediatamente después de los disparos o bien la terminación en un modesto sobre balance en presencia de fluidos de terminación compatibles. Estos acercamientos varían en efectividad dependiendo de las condiciones específicas en el fondo del pozo.

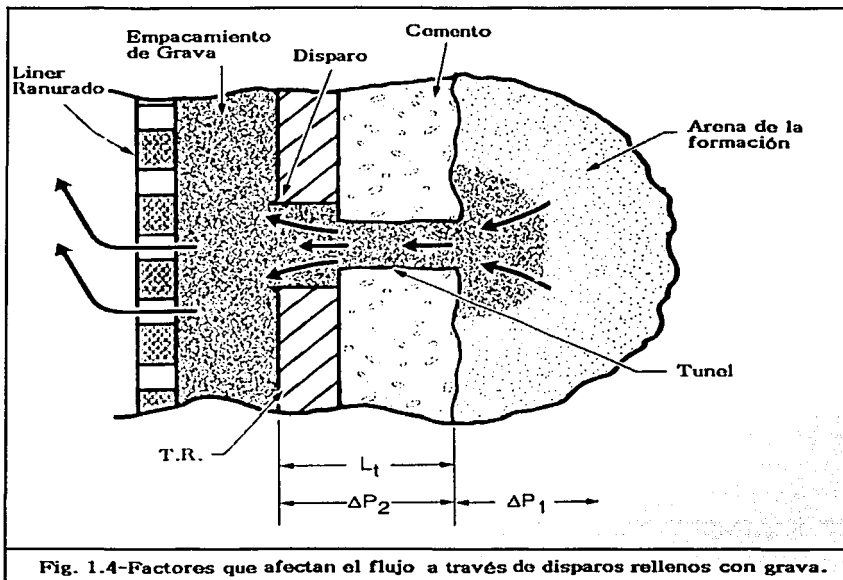


Fig. 1.4-Factores que afectan el flujo a través de disparos rellenos con grava.

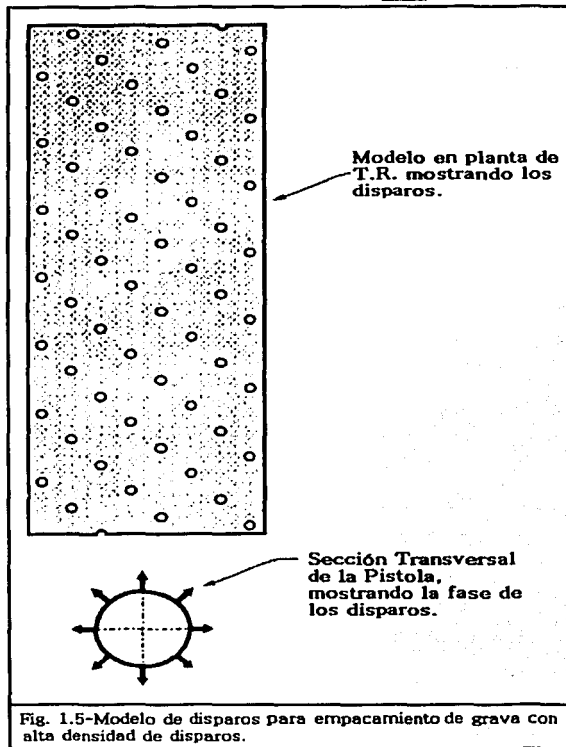
Terminación de Control de Arenas o Empacamiento de Grava.

En éste tipo de terminación la arena es colocada dentro del túnel disparado, (figura 1.4) altos gastos de flujo a través de los túneles de disparos y pueden resultar en una gran caída de presión.

La caída de presión puede ser particularmente grande para flujo no Darciano o turbulento. Por lo tanto el objetivo primario, en la terminación de control de arenas es el de reducir las caídas de presión a través de los túneles a un nivel aceptable.

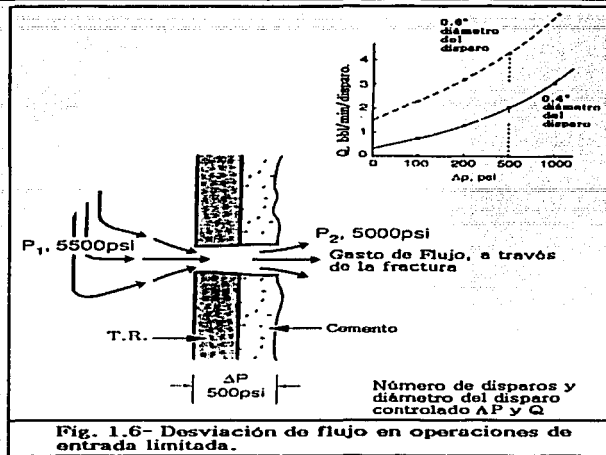
La caída de presión a través de los túneles individuales se encuentra gobernada por el área transversal del túnel, la longitud del mismo, la permeabilidad dentro del túnel ya sea de grava o de arena

Propiedades del fluido y gasto de flujo (incluyendo efectos de turbulencia). La caída de presión (y el gasto de flujo) puede ser optimizada si se utilizan grandes diámetros de agujeros que establezcan una máxima área en sección transversal y una alta densidad de disparos para minimizar el gasto de flujo por disparo.



La fase de los disparos es importante en altas densidades de disparos para asegurar características de flujo óptimo en las regiones cercanas al pozo mientras proveen máximos esfuerzos residuales en la tubería y evite esfuerzos grandes en la T.R. y problemas de colapso. La figura 1.5 muestra el modelo de disparos para un típico caso de pistola de alta densidad de disparo en una terminación de empacamiento de grava. En ésta ilustración la tubería ha sido separada y arreglada en sección plana para mostrar el modelo de los disparos. En terminaciones de empacamiento de grava, opuesto a la fase, la penetración es una consideración secundaria. Sin embargo las técnicas para asegurar que el máximo número de disparos se encuentren abiertos al flujo es un aspecto muy importante, otra vez las perforaciones a bajo balance modesto resulta el indicado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



De lo establecido anteriormente podemos comentar que un disparo idealmente situado para una terminación natural no establecerá resultados óptimos en una operación de empacamiento de grava, por ejemplo los disparos de diámetro pequeño asociado con cargas de alta penetración para la terminación natural podría resultar en una alta caída de presión a través de los disparos aún que todos los demás aspectos de la operación fuesen ideales.

Operaciones en fracturamiento hidráulico.

El énfasis cambia de nuevo en las operaciones de fracturamiento hidráulico, con tales terminaciones los sistemas de disparos deben establecer lo siguiente:

- La capacidad de adaptar grandes volúmenes de flujo de fluido del pozo a la formación durante el fracturamiento sin crear una excesiva caída de presión en el sistema, particularmente a través del disparo.

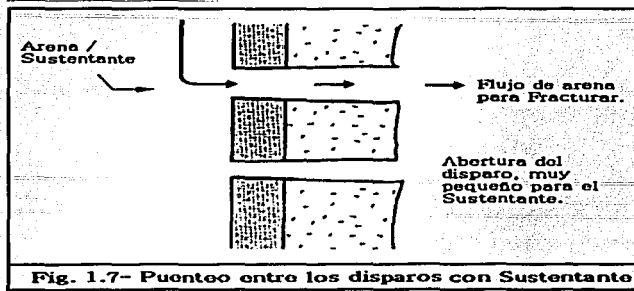
El tamaño del disparo controlado para operaciones de entrada limitada para operaciones diversas. Un número específico de disparos de tamaño consistente, estratégicamente colocados, desviar flujo a intervalos seleccionados a una predeterminada caída de presión a través del orificio. (figura 1.6)

- Disparos de diámetro controlado que impidan la salida del sustentante (arena) durante su colocación (figura 1.7)

Los diámetros de los disparos es el parámetro crítico en las operaciones de fracturamiento con énfasis en un tamaño de agujero específico y controlado para regular las operaciones de hidráulica. La fase del disparo es importante para tener acceso a planos de fractura preferentes, la profundidad o la penetración del disparo pasan a segundo término.

Pistolas y cargas especiales, en conjunto con técnicas de encendido selectivo han sido desarrolladas para el fracturamiento hidráulico. Las pistolas de balas continúan siendo usadas en el fracturamiento hidráulico porque proveen un controlado y consistente diámetro de agujero en la tubería.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



1.3 Evolución de la pistola

Conforme la perforación del pozo se vuelve una operación controlada, la colocación de una tubería de revestimiento en la zona productora también es una práctica frecuente, particularmente en formaciones poco consolidadas de arena. Inicialmente la tubería ranurada se utilizaba, sin embargo a final de 1920 las técnicas de cementación para el aislamiento de zonas y el mejor control del pozo se aplicaron más comúnmente la necesidad de un medio efectivo para los disparos o perforaciones en la tubería se volvió inminente.

Mecanismos de Perforación.

Los primeros métodos de la perforación de tubería fueron puramente mecánicos. Un ejemplo típico es el cuchillo perforador que es corrido con tubería de perforación a la profundidad deseada, el cuchillo era movido abierto y un empuje desde arriba en la tubería forzaba al cuchillo a través de la pared de la tubería. (figura 1.8) Realizar las perforaciones de ésta manera resultaba lento, tedioso y caro.

Más aún el cuchillo era ineficiente en alcanzar cualquier distancia significativa más allá de la capa de cemento. Otros aparatos mecánicos como la rueda estrella o cortador mecánico, teniendo limitaciones similares.

Pistola de Balas

Las pistolas de balas fueron concebidas y patentadas en 1926, las tuberías de revestimiento de pozos de aceite fueron perforadas con balas en 1932, operando con línea eléctrica, la pistola utilizaba cargas propulsadas con pólvora para disparar las balas proyectiles a través de la tubería, de la capa de cemento y de la formación productora. El desarrollo de estas pistolas progresó rápidamente y las pistolas de balas desarrollaron la mayoría de las operaciones de terminación en 1950.

Pistola de cargas moldeadas

Durante 1946 – 1948 las pistolas de éste tipo fueron desarrolladas a partir de aplicaciones militares y fueron introducidas a la industria petrolera como una alternativa superior de pistolas de balas. También operadas por medio de línea cable eléctrico, las pistolas de carga moldeada resultaron impresionantes en términos de la profundidad de la penetración mucho mayor que la pistola de balas convencional. Conforme avanzó el desarrollo de éste tipo de pistola, se volvió evidente que una pistola de menor diámetro podía establecer una satisfactoria penetración, así el proyectil de la pistola de balas dejó de desarrollarse.

Esto fue el resultado de la naturaleza de la carga moldeada que incluye el uso de explosivos de alto orden en vez de las pólvoras propulsoras, ya que las primeras concentran una gran cantidad de energía en un pequeño volumen.

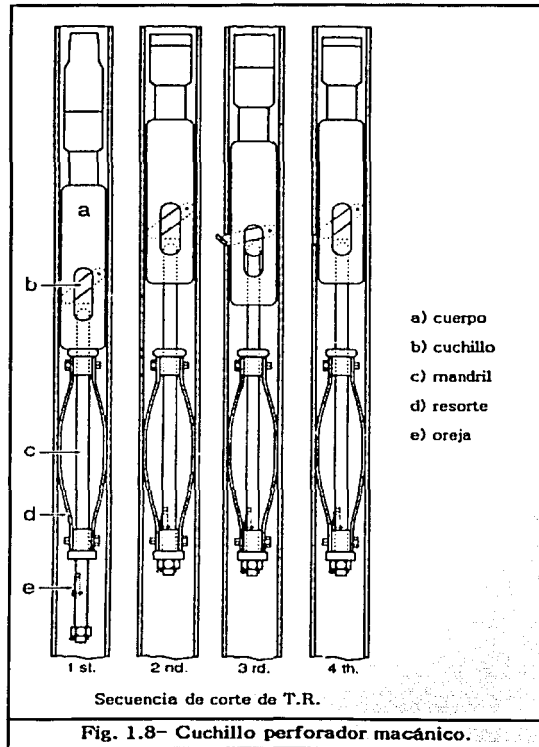
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En 1957 las pistolas de carga moldeadas, resultaron lo suficientemente pequeñas que podían correrse por el interior de las tuberías de producción y así el primer tipo de terminación permanente de pozo fue desarrollado.

Esta pequeña pistola también abrió el camino a la operación de re-perforaciones "a través de tubería de producción" como medio de corrección. Versiones actualizadas y mejoradas de éste tipo de pistolas y cargas se siguen utilizando. Sin embargo no se han desarrollado pistolas de balas con diámetros adecuados, requeridos para operaciones "a través de la tubería."

Pistolas hidráulicas.

Estos métodos fueron desarrollados principalmente por compañías de servicio durante 1950, operadas con tubería y creando un jet² hidráulico cargado de arena, por medio del bombeo del líquido en la tubería y pasando por medio de pequeñas toberas dirigidas hacia la tubería. Estas herramientas tienen limitaciones similares a las herramientas mecánicas de perforación, es decir perforaciones poco profundas y tiempo excesivo para producir dichas perforaciones.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

² El término jet se tomará como sinónimo del término chorro durante todo el presente trabajo, ya que los dos son el mismo proceso físico presentado durante el disparo en una terminación.

1.4 Disparos en la actualidad

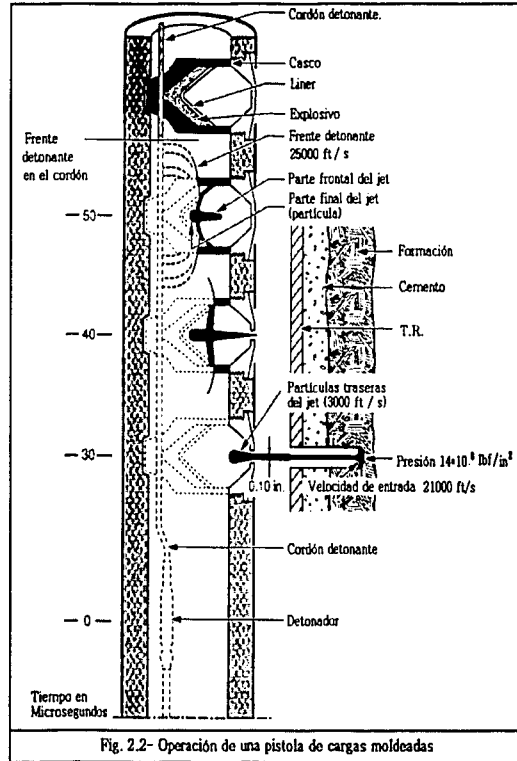
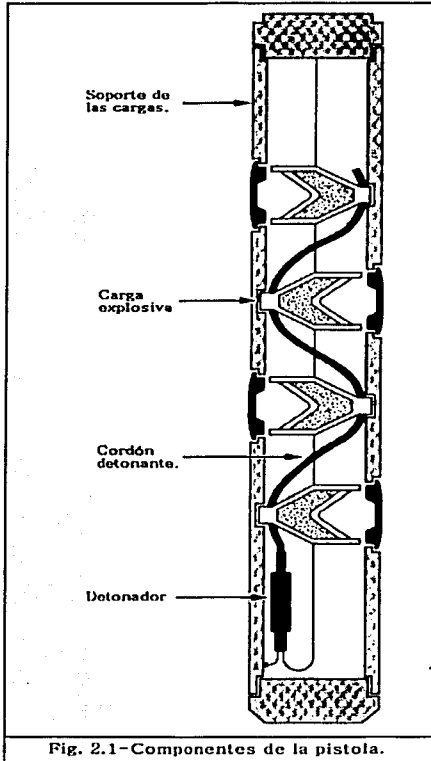
Hoy en día la pistola de cargas moldeadas, es la técnica más ampliamente utilizada realizando el 95% de las operaciones de disparos o perforaciones. Esta técnica se encuentra altamente desarrollada y hay más de 60 variaciones de pistolas y una docena de variaciones de carga que han evolucionado para satisfacer la mayoría de las necesidades de operación. La pistola de balas continua siendo una alternativa viable que es útil para operaciones especiales, por ejemplo: donde se requieren perforaciones de tamaño consistente y preciso, como resultado de su aplicación poco usual, la disponibilidad es limitada.

Ya que los sistemas de disparos transportados con cable o tubería, resultan los medios más prácticos, versátiles y económicos para disparar los pozos en la terminación, el presente trabajo se enfocará en tales elementos.

CAPITULO II LAS PISTOLAS

2.1 Las Pistolas con cargas moldeadas

Las pistolas con cargas moldeadas son dispositivos que obtiene su energía de explosivos del tipo de las bombas aéreas, los proyectiles de la artillería o los torpedos submarinos. La casi instantánea liberación de la energía almacenada en el explosivo es la llave de la gran habilidad del sistema para penetrar en las paredes de él o los pozos. En este capítulo se remarcará el típico sistema de disparos, describiendo dos tipos de explosivos utilizados, los detalles de los fenómenos presentes es el tipo de disparo y se describirá también el mecanismo de penetración del jet.



El sistema de Pistola

Mientras que una gran variedad de pistolas de carga moldeada han sido desarrolladas para operaciones con cable o tubería, todas ellas operan bajo el mismo principio básico. Una pistola típica de carga moldeada, contiene cuatro componentes básicos: (1) un soporte para las cargas moldeadas, (2) las cargas moldeadas individuales, (3) el cordón detonante y (4) el detonador. La figura 2.1 presenta esquemáticamente un sistema como el descrito anteriormente es decir la pistola de cargas moldeadas de soporte hueco. La operación del sistema empieza con el detonador, en el

ejemplo de la figura 2.2 el detonador es encendido eléctricamente iniciando la explosión del cordón detonante el cual se extiende a través del soporte dispuesto en contacto directo con cada una de las cargas. Conforme la detonación en el cordón avanza hacia la pistola, el explosivo contenido en cada carga se inicia consecutivamente. Para fines prácticos la detonación de la pistola y cada una de las cargas se tomará como instantánea, en el esquema de la figura 2.2, el frente de detonación en el cable detonante ha progresado del detonador al punto mostrado en aproximadamente $55 \mu s$. En este punto, la primera carga se encuentra aproximadamente a la mitad del proceso de penetración. Una pistola perforadora de 10 pies de longitud requiere tan solo 1 mili segundo para completar el proceso de detonación, que va desde la ignición del detonador de disparo hasta la última carga detonada. El mayor disparo realizado en el campo de una longitud de 2600 pies, disparado de arriba hacia abajo, tardó tan solo 0.25 segundos en completar la distancia. Así todos los disparos se producen esencialmente al mismo tiempo, sin importar la longitud de la pistola.

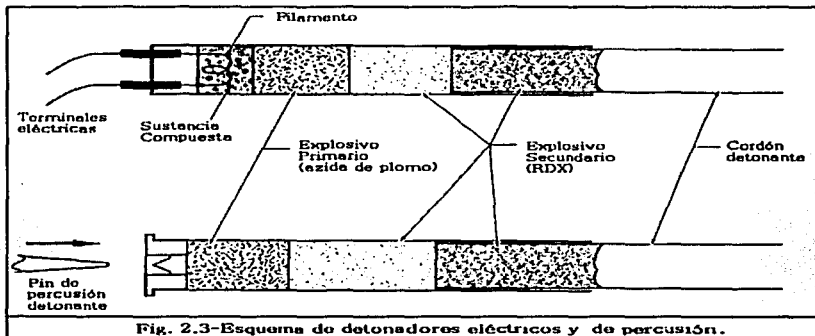


Fig. 2.3-Esquema de detonadores eléctricos y de percusión.

El Explosivo.

En la práctica se encuentran dos tipos básicos de explosivos, de bajo y alto poder. Los explosivos de bajo poder algunas veces llamados propulsores son caracterizados por una presión de combustión o reacción relativamente lenta y velocidades de reacción de 1500 a 4500 pies/s. Como ejemplos típicos pueden mencionarse la pólvora, juegos pirotécnicos y materiales impulsores de cohetes. En contraste los explosivos de alto poder detonan de 15 000 a 30 000 pies/s. (En velocidad de reacción) y generan muy altas presiones (varias libras por pulgada cuadrada en el frente de detonación). Los explosivos de alto poder se dividen en dos grupos de acuerdo a la sensibilidad de detonación, los compuestos más volátiles llamados explosivos primarios reaccionan fácilmente a: flama, fricción o golpe. Para servicios de campo los explosivos primarios son utilizados solo en los detonadores. (figura 2.3) Los explosivos secundarios son menos volátiles al grado que pueden ser moldeados, expuestos a presión (en forma granular) durante la fabricación de las cargas moldeadas. Mientras que éstas operaciones son relativamente seguras, los procedimientos de manufactura son procedimientos altamente cuidadosos y seguros.

El detonador resuelve el problema crítico de las características de baja sensibilidad en los explosivos secundarios, como muestra la figura 2.3 el detonador utiliza un medio eléctrico o mecánico (de percusión) para iniciar la detonación de los explosivos primarios (generalmente azida de plomo), el encendido eléctrico produce una flama que inicia la detonación. La detonación por percusión comienza con una combinación de fricción y golpe mecánico que causa el encendido. La detonación resultante tiene una velocidad de 10 000 pies/s. Y produce una presión de 500 000 psi adecuado para iniciar la detonación del explosivo secundario en el porta detonador. La detonación secundaria rápidamente alcanza velocidades de 25 000 a 30 000 pies/s, con presiones en el frente de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

detonación de 1 a 4 millones de psi. ésta presión fácilmente inicia el explosivo secundario en el cordón detonante.

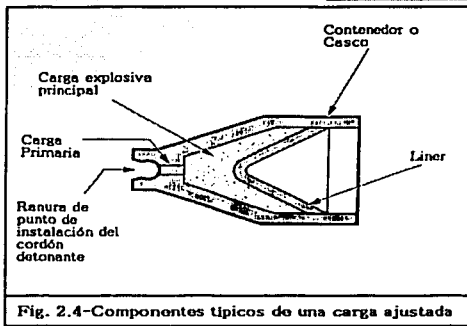


Fig. 2.4-Componentes típicos de una carga ajustada

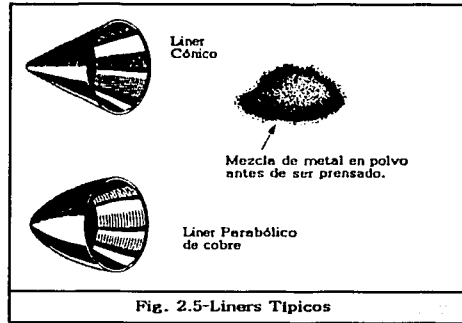


Fig. 2.5-Liners Típicos

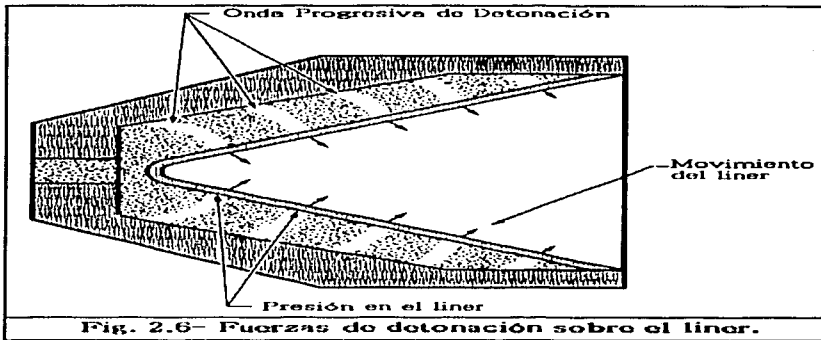


Fig. 2.6- Fuerzas de detonación sobre el liner.

La carga moldeada contiene sólo explosivos secundarios que son los iniciados por la alta presión de la explosión del cordón detonante. Sólo explosivos secundarios son usados en el cordón de detonación y las cargas moldeadas, para que la pistola sea segura en su manejo y transporte antes de la conexión al detonador.

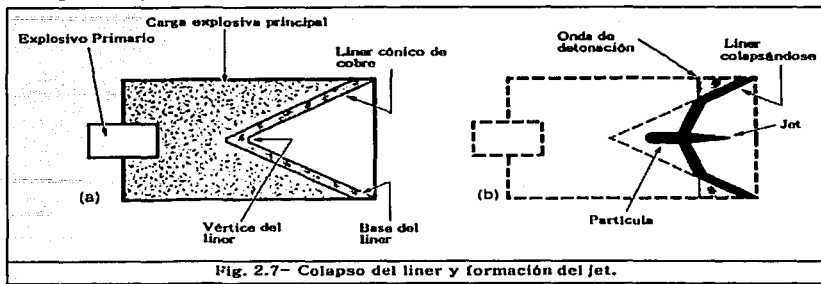
Función de la Carga Moldeada

La carga moldeada se encuentra formada por tres componentes básicos: liner, casco y explosivo (dividido en carga principal y carga primaria) figura 2.4.

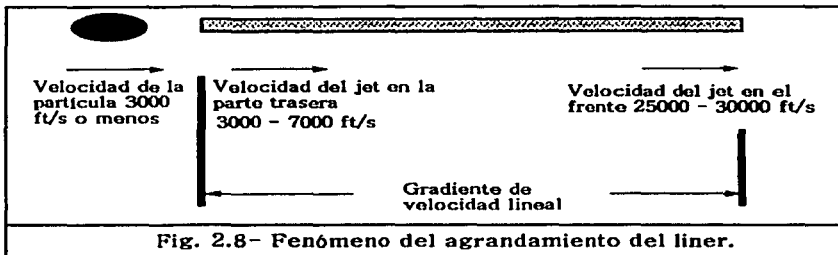
El liner es cónico o parabólico y se encuentra hecho de una aleación de cobre o de una mezcla comprimida de cobre y otros metales (figura 2.5)

El casco o contenedor puede estar fabricado de varios materiales, usualmente metal y está configurado para trabajar en un sistema particular de pistola. El explosivo principal es comúnmente RDX o HMX para operaciones rutinarias o bien HNS (hexabrostilbene) o PYX (picralamino dinitropyridine) para aplicaciones a alta temperatura. La carga primaria es una pequeña cantidad del mismo explosivo de la carga principal, excepto que ha sido planeada para ser más sensible al impacto y asegurar el encendido inicial por el cable detonante. La sensibilidad generalmente se incrementa por el uso de gránulos más finos de explosivo y aditivos (grafito, cera, etc.) para facilitar la compresión del explosivo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



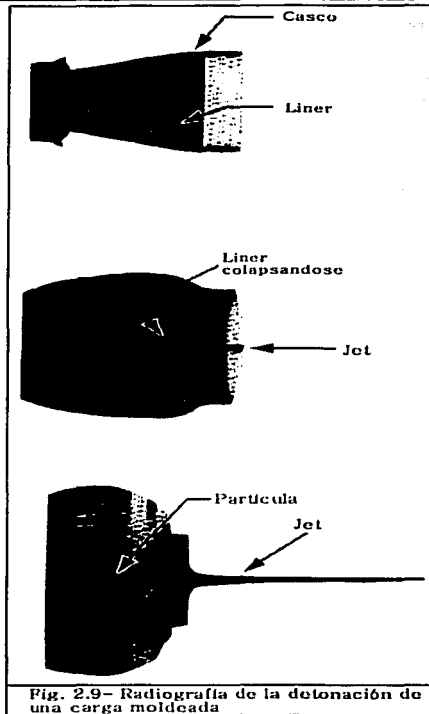
Cuando se inicia la onda detonante, el explosivo se quema a 25 000 o 30 000 pies/s generando una presión en el liner de 2 a 4 millones de psi. (figura 2.6) Como indica la figura 2.7 ésta presión es tan grande que colapsa al liner hacia el centro de su eje, conforme los elementos del liner llegan al eje, son expulsados y forman un jet de partículas del material mecánico.



Para propósitos conceptuales el jet puede ser considerado como una varilla que se mueve rápidamente, excepto que la formación del jet es un fenómeno dinámico y se encuentra continuamente cambiando de longitud conforme avanza. (figura 2.8) El jet es impulsado fuera de la carga a través de su eje a muy altas velocidades. Realizando un simil, el jet es a la carga moldeada como la bala al rifle, este realiza la perforación. El proceso completo, esto es, el inicio de la explosión, el colapso del liner y la formación del jet toma tan sólo 50 μ s.

Como la figura 2.7 señala que tan solo el 25% del material del liner es convertido en jet, el material restante forma una partícula de material de baja velocidad que no es efectivo en el proceso de penetración. Sin embargo ya que la partícula sigue el proceso y la trayectoria de penetración, puede taponar la perforación recientemente realizada. En la actualidad se encuentran cargas de un avanzado desempeño que utilizan liners de metal que no taponan. Ya que la masa del material que no forma parte del jet no es consistente y permanece desasociada durante el proceso de colapso del liner. Contrariamente los liners fabricados de materiales de cobre sólido tienden a producir partículas consistentes las cuales incrementan la probabilidad de taponamiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Hoy en día el uso de liners de cobre sólido es esencialmente limitado al diseño de cargas, para crear grandes agujeros de entrada en la tubería de revestimiento. Tales cargas generalmente utilizan configuraciones de liner hemisféricos o parabólicos, (figura 2.5) los cuales tienden a crear un menor tamaño de partícula. El menor tamaño de partícula, el mayor tamaño de agujero en la TR y generalmente la presencia de una formación no-consolidada minimizan cualquier problema de taponamiento en los disparos (éste tipo de cargas son utilizadas para propósitos de control de arenas).

La velocidad de la punta del jet creada desde la región del vértice cercana en el liner, tiene un rango que va de 25 000 a 30 000 pies/s con partes subsecuentes del jet viajando progresivamente más despacio hasta alcanzar la parte final o terminal desplazándose en tan solo 3000 pies/s. (figura 2.8) La velocidad decreciente del jet resulta de la reducción de velocidad de colapso, porque la onda de detonación alcanza la línea base. La onda de detonación esférica activa proporcionalmente menor explosivo mientras más se aleja del punto inicial de ignición, el gradiente de velocidad el cual es esencialmente lineal a lo largo del jet, alarga el jet y es responsable de la extraordinaria capacidad de penetración de las cargas moldeadas por ejemplo, mientras mayor sea el jet mucho mayor la penetración.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

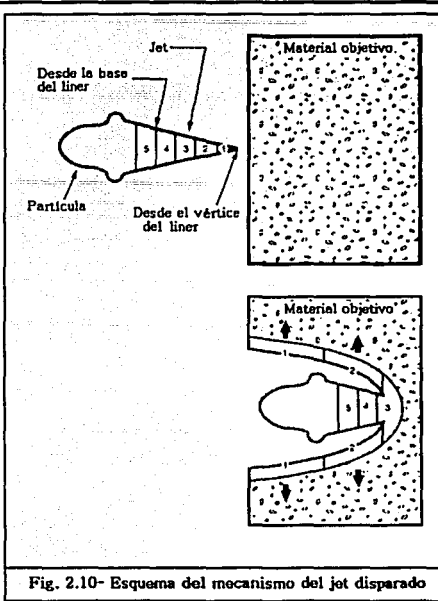


Fig. 2.10- Esquema del mecanismo del jet disparado

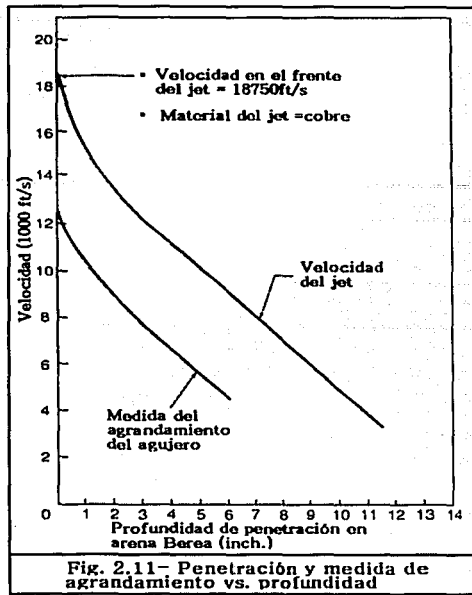


Fig. 2.11- Penetración y medida de agrandamiento vs. profundidad

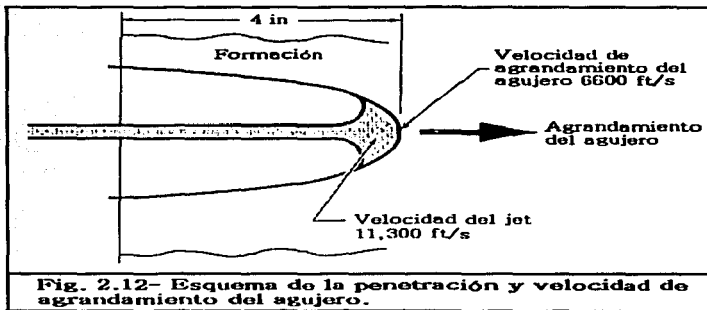


Fig. 2.12- Esquema de la penetración y velocidad de agrandamiento del agujero.

La eficiencia de las cargas moldeadas moldeadas va de 20% a 30% sólo esa fracción del total de la energía del explosivo es impartida a la carga para la penetración del jet. La energía restante es disipada en la creación de partículas de metal y la expansión del casco de la carga y el soporte de la pistola. (figura 2.9) Bajo ciertas situaciones la energía remanente puede deformar o dañar la tubería de revestimiento del pozo.

Mecanismo de Penetración del Disparo.

El principio del mecanismo de penetración es el de golpear y no el de quemar, como muchas veces se cree. La presión de impacto de la punta del jet en la tubería de revestimiento y la formación es de 10 a 15 millones de psi. Esta presión sobre pasa la resistencia de la tubería y la formación, forzando al material radialmente fuera del eje del jet. La parte frontal del jet que crea el agujero en la tubería

proviene de la región del vértice del liner, la parte final del jet que termina el agujero del disparo que proviene de la base del liner como se describió anteriormente. Conforme una unidad del jet golpea el final del agujero, penetra y expande su energía en el proceso, así consecutivamente hasta que se completa la longitud del jet (figura 2.10) la temperatura y la alta presión creada por los gases de la explosión juegan un papel mínimo en el proceso de penetración. Como se describió anteriormente la velocidad del jet varía conforme a su longitud. El ritmo de penetración o bien el ritmo de agrandamiento del agujero en la formación también varía figura 2.11 y 2.12. En estas figuras se comparan la velocidad del jet en el aire y el agrandamiento del agujero contra la profundidad en una arena "Berea" API RP19b para una pistola comercial de cargas moldeadas se debe notar que la velocidad en el aire cae a 2 000 pies/s, la penetración en la arena Berea decremente a 4550 pies/s. El valor de 4550 pies/s representa la velocidad de entrada requerida para penetrar éste material en particular. Otros materiales utilizados en las pruebas por ejemplo: El concreto API RP 43 puede mostrar mayor o menor penetración para la misma pistola, dependiendo de las características únicas de penetración en la roca en donde se realice la prueba.

La acción perforadora del jet crea una zona de permeabilidad reducida alrededor del túnel perforado, ésta región es comúnmente llamada la zona dañada del disparo (figura 2.13), el espesor de ésta zona varía de acuerdo al tipo de formación, sus características físicas y el tamaño y tipo de disparo, la zona de permeabilidad reducida tiende a ser mayor para cargas mayores y el grado de reducción de la permeabilidad tiene un impacto considerable en la productividad del pozo.

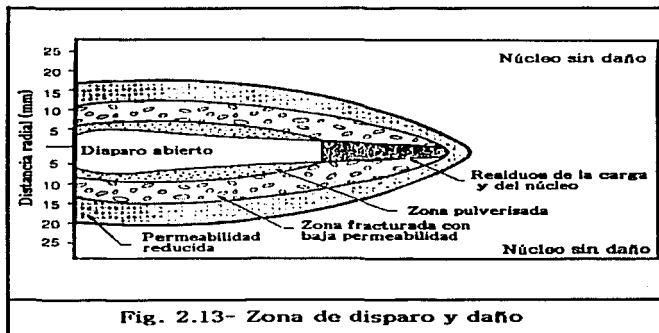


Fig. 2.13- Zona de disparo y daño

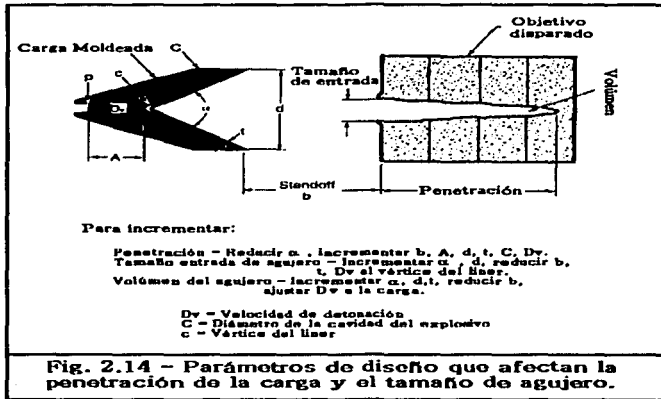
Estudios indican que la reducción de la permeabilidad puede no ser el resultado del rompimiento y compactación del material de formación como se ha creído, éstos estudios de laboratorio, los cuales se realizan con núcleos o arenas Berea indican que el material en la zona dañada se encontraba fragmentada, pero no se encontraba un cambio significativo en su densidad (compactación) o cualquier pérdida de porosidad (al menos en núcleos saturados), al contrario los poros más grandes fueron destruidos y reemplazados por poros de menor tamaño creados por las micro fracturas, los de menor tamaño causan la reducción de permeabilidad en la zona, otros mecanismos de daño a la permeabilidad como la migración de finos pueden estar envueltos. Por otra parte estudios realizados por separado en las arenas Berea con diferente metodología indicaron una reducción en la porosidad en el área dañada alrededor del disparo. Así trabajo adicional es requerido para investigar más ampliamente el fenómeno asociado a la zona dañada al disparo.

2.2 Factores que afectan el Desempeño de las Cargas Moldeadas.

La efectividad en la creación del disparo deseado depende grandemente en el diseño de las cargas, en el debe considerar las condiciones actuales en el fondo del pozo que se encontrarán. Los principales factores que afectan el desempeño de los disparos con cargas moldeadas incluyen los

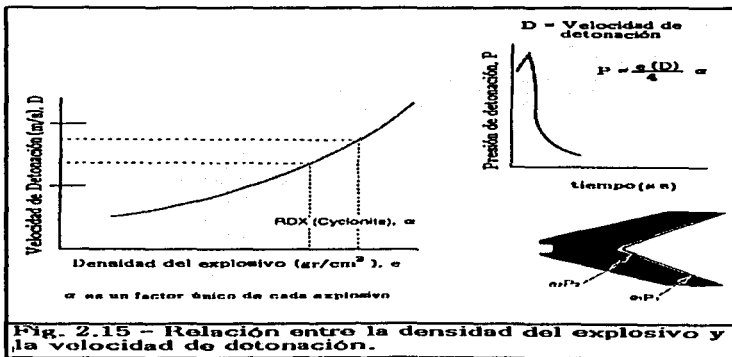
parámetros del diseño de las cargas, el intervalo o distancia entre la pistola y tubería (clearance) y las propiedades físicas de la formación y la tubería.

Aunque las cargas moldeadas sólo se basan en tres componentes básicos, un número considerable de parámetros afectan el desempeño de las cargas: propiedades del material del liner, geometría del liner, propiedades de los explosivos, el material del casco y su configuración, el tamaño de la carga y la configuración de las cargas-pistola, particularmente en términos de la distancia entre cargas o "standoff" (figura 2.14) La interacción de éstos parámetros afectan significativamente la penetración del jet y el diámetro del agujero de entrada en la tubería.



Liner o Cubierta

El tamaño del liner y la carga afectan la profundidad de la penetración así como el diámetro del agujero, mientras mayor sea el liner, habrá más material para ser convertido en jet y a mayor jet la penetración o el tamaño del agujero será por consiguiente mayor. Usualmente mientras mayor sea la pistola la carga también lo será, al igual que el liner y realizará una mayor penetración y una entrada más grande de agujeros.



Examinando los parámetros del liner con mayor detenimiento se puede indicar que la geometría del liner afecta la velocidad del jet y la distribución de masa. Generalmente una reducción en el ángulo del liner incrementa la velocidad del jet y la penetración, mientras que reduce el diámetro del

agujero. De manera inversa, un incremento en el ángulo del liner provoca una disminución en la velocidad del jet, aumenta el diámetro del disparo, por consecuencia el agrandamiento del agujero (diámetro mayor) y una menor penetración.

Los antiguos diseños de cargas de gran agujero utilizadas en operaciones de empacamiento de grava, contenían liners diseñados con una configuración parabólica para crear mayores diámetros en la tubería. Los modernos liners de metal pueden mantener los diámetros grandes de agujero en las tuberías de revestimiento, cubriendo un amplio rango de espaciamiento "clearance" pistola-tubería, comparado con los antiguos liners parabólicos de cobre.

Se puede establecer de lo expuesto anteriormente que el material del cual se encuentra fabricado el liner influye de manera directa. Los liners que se utilizaban tradicionalmente de cobre templado han dado paso a liners de mejor desempeño como los de metal presurizado que son más versátiles y que consisten de una mezcla de cobre, plomo y otros materiales.

Así para un material, geometría y aplicación específica, el espesor y la densidad son optimizados para la carga en particular.

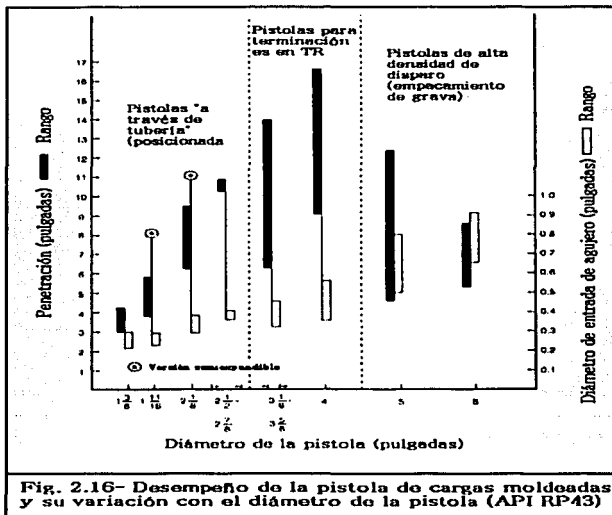


Fig. 2.16- Desempeño de la pistola de cargas moldeadas y su variación con el diámetro de la pistola (API RP43)

Explosivos

El tipo, la distribución y la densidad del explosivo afectan la velocidad de detonación y la presión, los cuales crean el jet perforador. Los explosivos típicamente utilizados en las operaciones de disparos de cargas moldeadas son materiales granulares que deben ser comprimidos bajo altos esfuerzos (presiones) para alcanzar la densidad requerida y crear un buen desempeño de las cargas. Las velocidades de detonación varían de acuerdo al tipo de explosivo, las velocidades nominales para RDX, HMX, HNS, y PYX son 26 000, 30 000, 23 000 y 25 000 pies/s respectivamente³.

Sin embargo la velocidad real de detonación para un explosivo determinado, depende en la densidad del explosivo, mientras mayor sea la densidad, la velocidad será mayor (figura 2.15). Ya que la densidad del explosivo es la clave de la velocidad de detonación, la distribución controlada del explosivo dentro de la carga es crítica.

³ Op. Cit. Pág. 15

Las variaciones causadas por la manufactura pueden resultar en cambios indeseados en el desempeño de las cargas, estas variaciones pueden afectar comprometer la conversión simétrica y progresiva del liner al jet y lo cual puede resultar en un diámetro del agujero en la tubería no deseado, un tamaño diferente de disparo o bien un alcance en penetración del disparo no planeada.

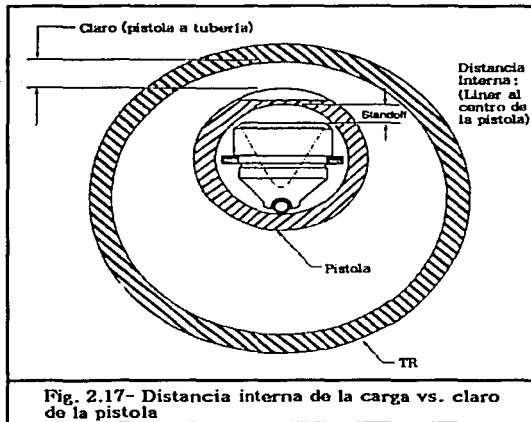


Fig. 2.17- Distancia interna de la carga vs. claro de la pistola

Como se indicó anteriormente la idea de que a mayor carga, el desempeño es mejor, es errónea, sin embargo ya que la eficiencia de la carga va del 20% al 30% y como la calidad puede variar, no es una práctica confiable el igualar el desempeño de las cargas en función del peso del explosivo (1 grano = $6.5E-03$ gramos). Como indica la figura 2.16 por ejemplo una pistola de 4 pulgadas de diámetro comúnmente utilizada en el campo penetra de 9 a 17 pulgadas con diámetros en los agujeros de la tubería que varían de 0.35 a 0.57 pulgadas. Sin embargo el peso del explosivo varía poco entre las cargas. Se debe notar que algunas pistolas de diámetro 3 3/8" penetran mucho más que algunas pistolas de 4" de diámetro y contienen un 40% menos de peso en explosivo que aquellas pistolas mayores.

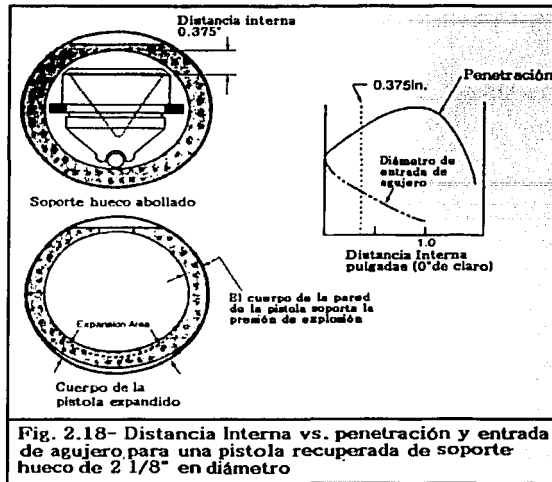
Casco

El diseño del casco que aloja el liner de la carga moldeada y el explosivo, es de menor importancia que otros factores que afectan el desempeño de las cargas. Sin embargo la nueva versión de acero provee un mejor confinamiento, el cual genera que el explosivo de alguna manera dirija en forma más eficiente una mayor energía al liner.

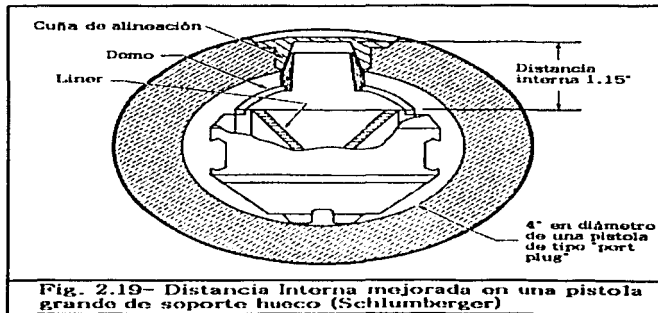
Distancia Interior o Standoff

La distancia entre la base del liner y el interior del soporte tiene una influencia significativa tanto en la penetración como el tamaño del agujero. Esta distancia es un parámetro de diseño que una vez establecido permanece constante. En general mientras mayor sea esta distancia mejor el desempeño de la carga, en la figura 2.17 la Distancia Interior o "standoff" es diferente de la Distancia Exterior que se encuentra de la pistola a la tubería espaciamiento o "clearance" el cual será definido más adelante. Así los términos "standoff" y "clearance" deben ser entendidos y establecer una diferencia entre ellos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La figura 2.18 muestra la distancia del liner para una pistola "a través de tubería" de soporte hueco. Se debe notar el efecto del "standoff" o distancia interior en la penetración y en la entrada de agujero para esa carga el "standoff" o distancia interior, es la principal restricción en el desempeño de la carga en esa pistola en particular. El soporte de la pistola es diseñado para una operación confiable y su recuperación a través de una tubería de producción de 2 7/8" requeridos para alcanzar el mejor desempeño posible en las cargas, para ésta pistola resulta una reducción de la distancia interior o "standoff", (en un standoff menor que la deseable). Estos cambios incluyen adecuados soportes en espesor de pared para resistir las presiones y evitar una excesiva expansión a la ignición. Una situación más favorable para el standoff es la utilización de un soporte hueco de pistola mayor como se ilustra en la figura 2.19



Optimización del diseño

El encargo del diseño de las pistolas debe balancear varios parámetros para conseguir el mejor desempeño posible del sistema para una aplicación en particular. Hoy en día las perforaciones o disparos realizados con cargas moldeadas penetran de dos a tres veces más que las primeras pistolas sin sacrificar el diámetro de entrada del agujero en la tubería.

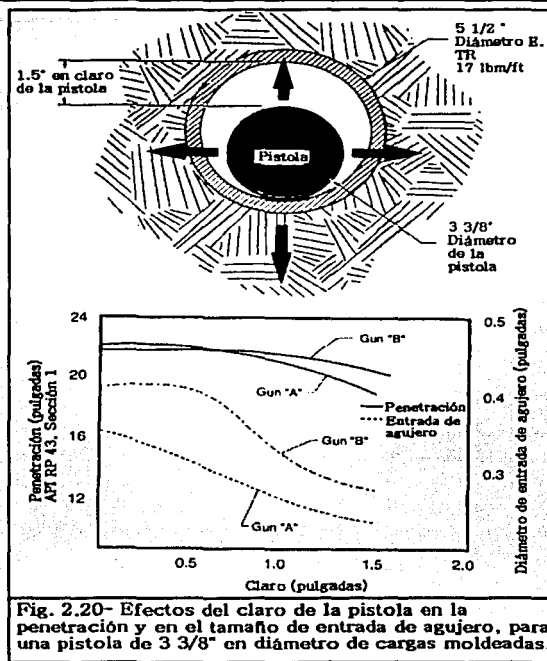


Fig. 2.20- Efectos del claro de la pistola en la penetración y en el tamaño de entrada de agujero, para una pistola de 3 3/8" en diámetro de cargas moldeadas.

Distancia Exterior o "Clearance"

Se define como la distancia de la pistola a la tubería sobre el eje del jet (figura 2.17) y cómo se ha hecho énfasis, ésta distancia es diferente del Standoff del liner. La distancia exterior o "Clearance" influye significativamente en el desempeño del disparo. Las pistolas comúnmente operan bajo diversas Distancias Exteriores o "Clearance" por que las pistolas se encuentran excéntricas a la tubería como resultado de las pequeñas desviaciones del pozo, más aún la mayoría de las pistolas son diseñadas para la detonación de los disparos multifases en diferentes direcciones (20, 45, 60, 120°, etc.)

Operaciones de la pistola en Tubería de Revestimiento

La penetración y la entrada del agujero pueden variar significativamente con las variaciones en el clearance, cada pistola tiene una única relación Distancia / Desempeño. La figura 2.20 muestra los desempeños de dos diferentes pistolas de igual diámetro (3 3/8 pulgadas) pero con relaciones de profundidad en disparo diferentes. Deben considerarse las variaciones en el desempeño entre las dos pistolas conforme varía el clearance.

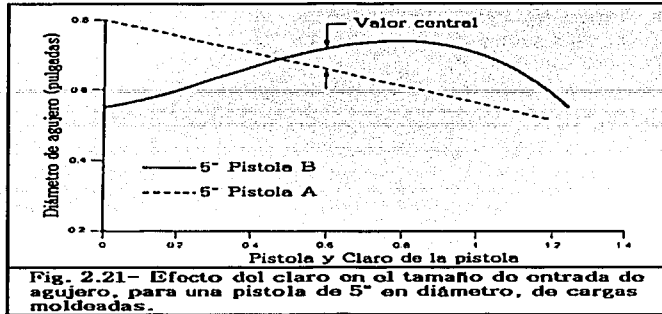
Operaciones de Empacamiento de Grava

El clearance es un factor importante cuando se realiza la selección de pistola para las terminaciones de control de arenas de empacamiento de grava. Esta aplicación requiere perforaciones de gran diámetro con alta densidad de disparos.

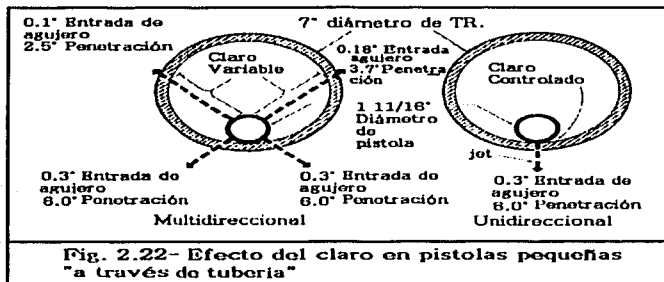
La figura 2.21 muestra el desempeño de dos diferentes pistolas de gran diámetro de agujero (5 pulgadas), disparadas excéntricamente en una Tubería de Revestimiento de 7 pulgadas, 35 libras

TESIS CON
VALIA DE ORIGEN

masa / pie J55. Debe resaltarse que para la pistola al tamaño de agujero de entrada cae en forma proporcional directa claramente con el incremento del clearance de la pistola. El caso de la pistola B muestra que el tamaño del agujero se incrementa hasta un máximo de 0.8 pulgadas en clearance de la pistola, luego el tamaño decrecimiento, conforme el clearance se ve incrementado.



Claramente no todos los 12 disparos / pie realizados con esta pistola excéntrica serán todos de la profundidad deseada o tendrán los mismos diámetros. El centrado de la pistola resultará en tamaños de disparo uniformes y como indica la figura 2.21 el desempeño en tamaño de agujero para las dos pistolas cuando están centradas es comparable.



Operaciones "a través de la tubería"

El problema del clearance se vuelve crítico cuando las pistolas de diámetro pequeño son consideradas para desplazarse a través de las Tuberías estrechas de Producción y de Producción. Considerando la figura 2.22 donde una pistola de fase 90°, 4 disparos / pie y diámetro de 1 11/16 pulgadas, es disparada excéntricamente en una tubería de 7 pulgadas. Se apreciarán diferencias entre disparos, los valores de penetración y de diámetro de entrada de agujero donde solo 50% de los disparos son realizados eficientemente.

El centrar la pistola en la Tubería de Producción no resulta una solución práctica. Mientras que el desempeño pudiera ser consistente si la pistola fuese centrada éste desempeño resultaría pobre a consecuencia de la baja penetración de los disparos.

La orientación positiva y el posicionamiento en contra de la tubería de revestimiento por medios magnéticos o mecánicos han probado ser una mejor solución para problemas severos de clearance. Como se indica en la figura 2.22 la fase se limita de 0° a +60° pero la penetración y la entrada del agujero se optimizan. Con tales métodos el Clearance se mantiene a un valor aceptable que va de cero a fracciones de pulgada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Optimización del diseño.

La posición del centrado de la pistola representa otro cambio en el diseño de la pistola. Centreadores para pistolas muy largas complican la sarta y pueden ocasionar posibles problemas operacionales. La excentricidad de la pistola dentro de la tubería de producción (TP) limita la fase de los disparos. Conforme la fase se acerca a 0°, el daño se incrementa, comparado con el daño de la terminación multifase con la misma penetración y el tamaño de agujero, como resultado del sistema geométrico perforado que resulta menor que el deseable.

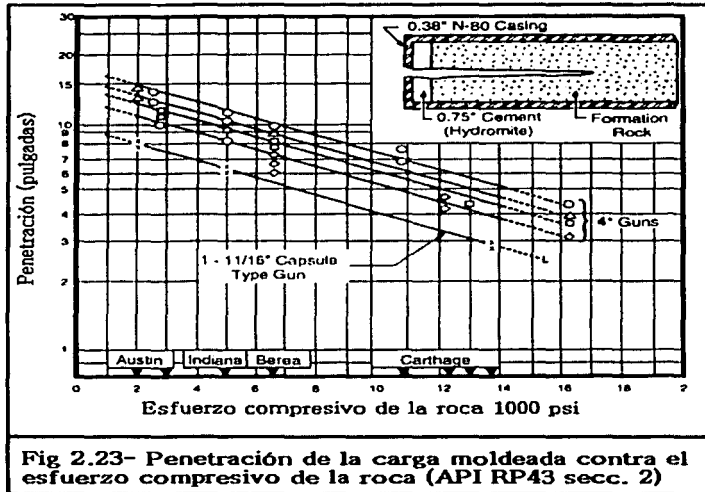


Fig 2.23- Penetración de la carga moldeada contra el esfuerzo compresivo de la roca (API RP43 secc. 2)

Otra consideración concierne al desempeño de los disparos de cargas moldeadas en grandes clearance, es que la calidad del agujero perforado tiende a deteriorarse. Este deterioro se encuentra caracterizado generalmente por la falta de redondez, el incremento en la rugosidad de la superficie y la dispersión incrementada en la penetración de un agujero a otro.

Cuando una pistola es seleccionada para una operación en particular el tamaño de la tubería y su grado, el efecto del clearance debe ser cuidadosamente evaluado con información de la prueba API RP 19b.

Propiedades de la Formación.

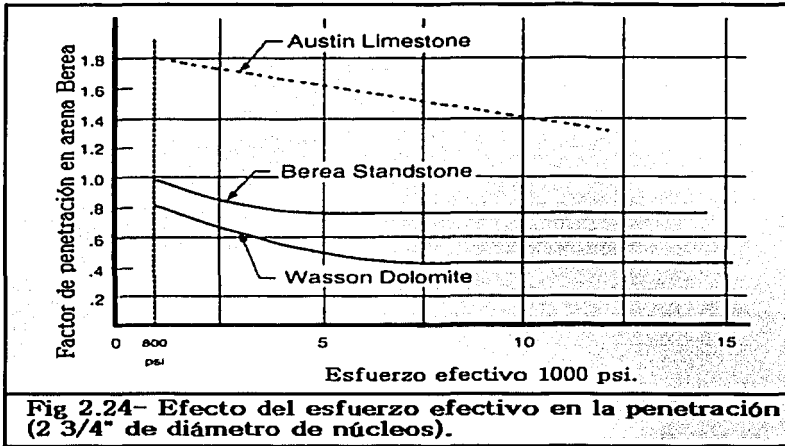
La profundidad de penetración se ve afectada significativamente por la fuerza compresiva de la formación. El esfuerzo efectivo y las características únicas de la roca en contra de las cargas moldeadas. La característica o forma del agujero perforado también depende del tipo de roca, las condiciones de esfuerzos y compactación. La siguiente información supone o presupone que el clearance entre la tubería y la pistola a sido optimizado.

Formaciones no sometidas a Esfuerzos Compresivos

En formaciones de roca sin compresión como aquellas utilizadas para las pruebas API RP 19b sección 2, la penetración decrece con el incremento de los esfuerzos compresivos de la formación (figura 2.23). Por ejemplo un disparo que penetra cerca de 10" en arenas Berea probablemente alcanzará de 4 a 5" en formaciones duras comparado con las 15" en formaciones suaves o sometidas a bajos esfuerzos de compresión.

Thompson⁴ no pudo desarrollar una correlación que pudiera relacionar la porosidad, permeabilidad y algunas otras propiedades mecánicas de las rocas.

Exámenes extensivos en rocas sin esfuerzo compresivo, con énfasis en las arenas Berea, generalmente confirman la relación de Thompson, la cual muestra el cambio de penetración de 5% a 6% por cada 1000 psi de esfuerzo compresivo. El tamaño del objetivo, las condiciones de barrera o límite y el grado de saturación de fluidos tienen una influencia significativa en la penetración. Para una formación con esfuerzo compresivo constante los objetivos de diámetro pequeño, no confinados mostraron de forma regular, penetraciones mayores que los objetivos no confinados de mayor diámetro.



Los objetivos altamente confinados mostraron sólo una pequeña influencia en el diámetro del objetivo en la penetración, sin embargo la penetración alcanzada resultó significativamente menor en objetivos confinados. La compresibilidad del sistema poro-fluido también afecta el desarrollo de la penetración y el incremento de la saturación de líquidos aumentan la penetración comparada con la penetración en objetivos secos.

Formaciones sometidas a esfuerzos.

El efecto de las fuerzas de compresión en las rocas es el de reducir la penetración, mientras otros factores permanecieron constantes, Saucier y Lands⁵ exploraron los efectos de los esfuerzos en núcleos de diámetro pequeño y cargas pequeñas, ellos confirmaron el efecto de formaciones sin esfuerzos compresivos pero encontraron reducciones adicionales significativas en la penetración con el incremento en el esfuerzo efectivo (esfuerzo de sobre carga menos presión de poro o formación, figura 2.24). El grado de la reducción de la penetración fue encontrado, ser dependiente de la formación que está siendo evaluada. Los resultados de Saucier y Lands alentaron las pruebas API de simulación de disparos utilizando núcleos de mayor diámetro, es decir primero con núcleos de 8" y consecutivamente con diámetro de 13 1/2". Los resultados de éstas pruebas confirmaron la

⁴ Thompson, G. D. Effects of Formation Compressive Strength on Perforator Performance API 1962 elaboró estudios donde obtuvo correlaciones que involucraban las propiedades mecánicas del yacimiento.

⁵ Saucier, R.J. and Lands. A Laboratory Study of Perforations in Stressed Formation Rocks JPT 1978 Llevaron a cabo pruebas experimentales, donde modelaron los efectos del esfuerzo de las rocas en la penetración de los disparos.

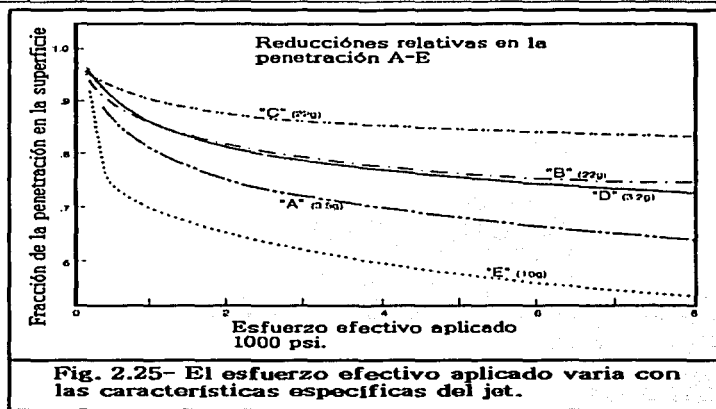
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tendencia de Saucier y Lands en su información que establece que el grado de la reducción también depende de las características específicas del jet que forman las cargas moldeadas (figura 2.25)

Las evaluaciones API continúan caracterizando el mejor desempeño en los materiales rocosos, bajo condiciones más representativas a aquellas experimentadas en el fondo del pozo. El objetivo es el desarrollo de los criterios para un modelo que pueda predecir la penetración en el fondo del pozo y las propiedades de flujo de los agujeros perforados.

Por el momento el desempeño en el fondo del pozo puede ser previsto con razonable precisión utilizando los métodos descritos en el capítulo 5.

Poca información se encuentra disponible sobre los efectos de penetración en formaciones no consolidadas. De la información con que se cuenta actualmente sugiere que el esfuerzo en vez de la fuerza compresiva, controlará el nivel de la penetración dentro del rango de la información obtenida por Thompson y Saucier.



Propiedades Físicas de la Tubería de Revestimiento

La resistencia de la tubería y el espesor, tienen tan solo efectos menores en la penetración excepto solo múltiples tuberías son perforadas (capítulo 5). Sin embargo la resistencia de la tubería tiene un efecto significativo en el diámetro del agujero perforado en ella. La relación entre la resistencia de la tubería y el tamaño de agujero puede ser predecido con expresiones del capítulo 5.

El espesor de la tubería puede también afectar el tamaño del agujero y producir valores menores que los predecidos, particularmente cuando se requieren pequeñas cargas utilizadas en operaciones "a través de tubería". Para múltiples disparos en Tuberías de Revestimiento con cargas de mayor penetración, los diámetros de entrada de agujero en la segunda o tercera sarta varían de pistola a pistola y al tipo de carga utilizada.

Para cargas de mayor penetración, productos de software se encuentran disponibles y así poder predecir el desempeño del pozo y puede calcularse el tamaño de la entrada de los agujeros en tuberías múltiples, sin embargo si la información del tamaño de agujero es crítica, el mejor acercamiento es una prueba en superficie en un objetivo simulado de tuberías múltiples.

Aproximaciones poco precisas del tamaño de agujero para cargas de alta penetración pueden realizarse de acuerdo a la teoría del capítulo 5.

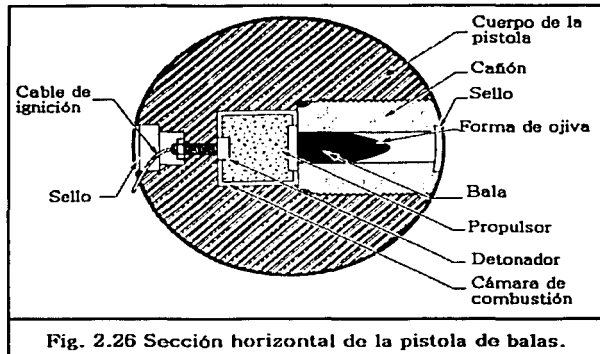
Para cargas de gran tamaño de agujero como aquellas utilizadas en la terminación de control de arenas los únicos medios confiables para predecir el tamaño de agujero en sarts múltiples de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tuberías de revestimiento es el de desarrollar pruebas superficiales en objetivos simulando dichas sartas.

Condiciones en el fondo del Pozo.

La presión hidrostática, la densidad del fluido de terminación (conocido o supuesto) y la temperatura del pozo (cuando se operan en el rango de los explosivos) tienen efecto despreciable en el desempeño de las cargas moldeadas. Sin embargo el disparar en pozos de gas puede producir diferencias significativas en la penetración y el tamaño de agujero en la tubería de revestimiento, comparado con disparos realizados en presencia de líquidos, excepto con un espaciamiento de cero. Los efectos de los disparos en gas son usualmente ignorados por que la información obtenida de las pruebas API RP19b, siempre son desarrolladas en un ambiente líquido (en núcleos saturados con líquidos).

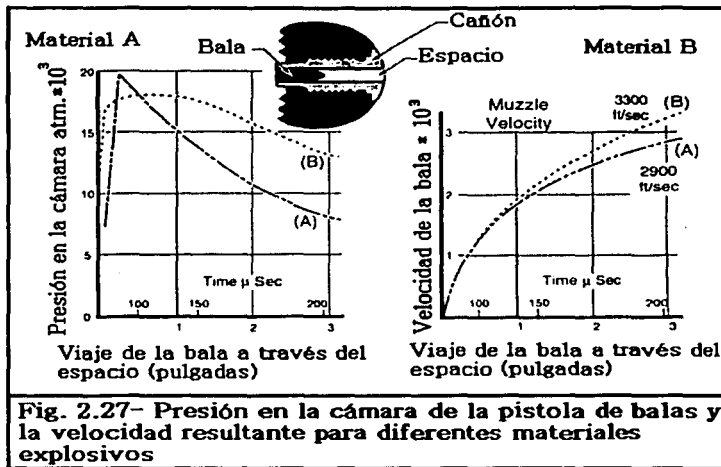


2.3 La pistola de Balas

La configuración de este tipo de pistola es similar a la de las cargas moldeadas, en el cuerpo de la pistola se encuentran de 4 a 6 disparos / pie con una fase de 60 a 120°. La interfase con la tubería de revestimiento es similar a la pistola de cargas moldeadas. La figura 2.26 muestra una sección transversal de una pistola de balas típica. El sistema consta de cinco componentes básicos: cuerpo de la pistola: detonador, carga propulsora, la cámara de combustión, el barril o cañón y la bala. A continuación se presentarán las funciones de la pistola perforadora de balas, su funcionamiento y algunos factores que afectan su desempeño.

Función de la pistola.

El material propulsor utilizado en este tipo de pistola es similar al utilizado en armamento convencional (armas de fuego) y la artillería militar. El detonador contiene un filamento y una pequeña cantidad de material primario flamable, el cual es activado electrónicamente. Cuando el encendedor es activado, la flama es descargada en la carga primaria impulsora, iniciando una rápida combustión, lo cual resulta en un incremento de la presión de gas de 250 000 a 300 000 psi. Esto es de 4 a 7 veces la presión en la cámara de cualquier arma de fuego de alto poder. La alta presión acelera la bala a lo largo de la longitud del barril (cañón) alcanzando velocidades de 2250 a 3300 pies / segundo en tan sólo 200 a 300 µseg. La velocidad resultante de la bala perforadora es suficiente para perforar la tubería de revestimiento, la capa de cemento y la formación. El efecto perforador de la bala es incrementado por el contorno tipo difusor, diferentes contornos son populares, incluyendo la forma de ojiva mostrado en la figura 2.26



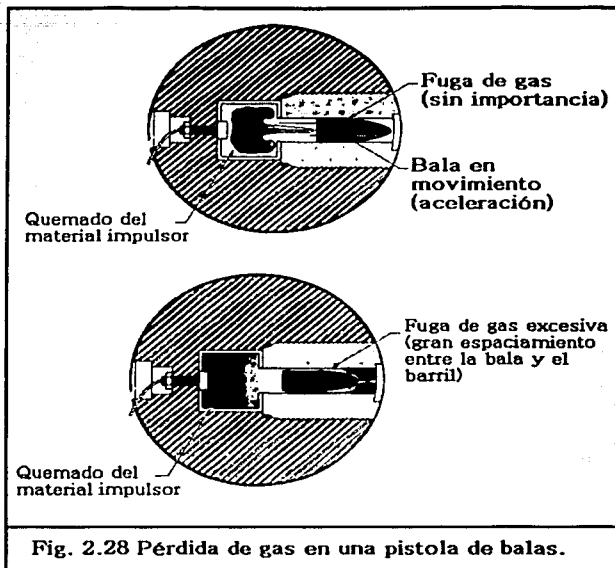
Las pistolas de bala en la industria petrolera son únicas, aunque su tecnología requiere de aparatos convencionales de propulsión: el barril o cañón es demasiado corto 2 pulgadas o menos, como consecuencia, la presión en la cámara de combustión debe ser muy alta para acelerar la bala a la velocidad requerida y al mismo tiempo ésta presión debe ser controlada o limitada para prevenir daño al cuerpo de la pistola. La llave para satisfacer estos requerimientos balísticos poco usuales recaen en las cargas propulsoras.

Se requieren impulsores controlados en el rango de encendido y combustión para así balancear los factores balísticos, la figura 2.27 compara dos diferentes tipos de material con diferentes formulaciones, utilizadas en dos pistolas diferentes con la misma configuración, aunque, el material "A" desarrolla una cima de alta presión en la cámara de combustión, la velocidad de descarga de la bala es más baja que la velocidad de la pistola "B" ya que el material "B" presenta una cima menor de presión en la cámara.

El material "A" se quema de manera muy rápida, desarrollando una muy alta presión en la cámara, decreciendo muy rápidamente durante el viaje de la bala a lo largo del barril (cañón) conforme el volumen efectivo de la cámara incrementa. El material "B" es un material de un quemado progresivo que imparte una mayor energía al proyectil durante su recorrido y le proporciona una velocidad de descarga de 3 300 pies / s, no solo el desempeño del proyectil es mejor con el material "B", sino también la expansión de la pistola es menor como resultado de la menor presión en la cámara.

Para que la pistola proporcione el desempeño deseado consistente, el ajuste entre la bala y el barril debe mantenerse con la menor tolerancia para prevenir pérdida de gas (figura 2.28) una excesiva pérdida de gas reduce la velocidad de la bala y la penetración. La alta presión de gas afecta el barril en dos formas; la presión detrás del proyectil tiende a expandir el barril y puede llegar a ser permanente y como el diámetro interno del barril crece, el calibre del barril y la bala incrementa, perdiéndose gas de la propulsión. Este fenómeno también erosiona la pared del barril y se requieren mediciones periódicas y reemplazamiento del mismo para mantener el desempeño adecuado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Las altas presiones en la cámara también resultan en una permanente expansión de la misma (cuerpo de la pistola). La pistola debe ser reemplazada periódicamente y así mantener el volumen de la cámara o bien la presión dentro de la especificación.

En resumen, el desempeño deseado de la pistola de balas requiere un control cuidadoso de la formulación del material explosivo y de un ajuste adecuado de barril y de la bala. La alternativa es liberar aquellas balas que fallaron en la penetración como resultado de velocidades bajas en la salida de la pistola, fuera del pozo después del disparo.

2.4 Factores que afectan el desempeño de la pistola de Balas.

La discusión del desempeño de la pistola de balas, debe realizarse con precaución, resaltándose que la mayoría de las referencias mencionadas son anticuadas y poco trabajo se ha realizado sobre la pistola de balas por las últimas dos décadas. Los estudios se han enfocado casi enteramente a las pistolas de cargas moldeadas. Sin embargo se ha generado un renovado interés en la pistola de balas en los últimos años, la consistencia en el diámetro y forma de la entrada del agujero son ventajas significativas en cualquier tipo de operación de inyección (capítulo 8).

Claro de la Pistola

Así como en las cargas moldeadas, el espaciamento o claro tiene un efecto apreciable en el desempeño de la penetración, la figura 2.29 muestra que altas penetraciones se observan en espaciamientos clearance menores a 0.50" en tales casos, la bala encaja en la pared de la TR antes de que la presión halla recorrido el barril de la pistola.

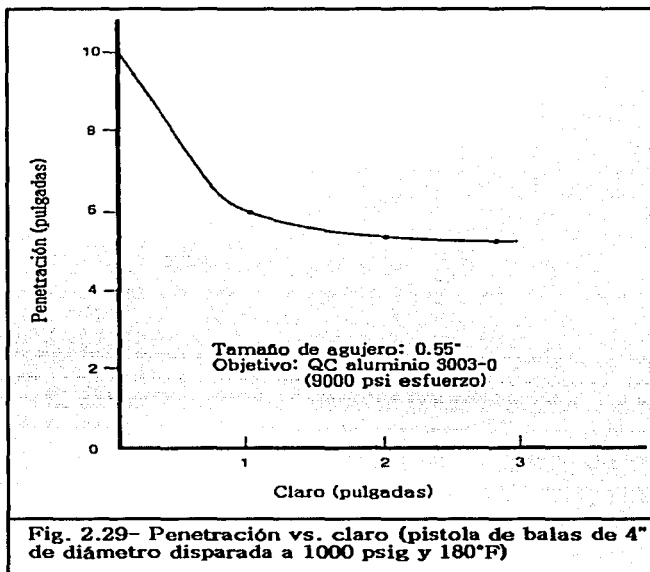
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La resistencia que la bala encuentra al penetrar la pared de la TR resulta en un incremento de presión en la cámara, la cual proporciona una energía adicional a la bala, así la penetración decrece a mayores espaciamientos.

Propiedades de la Formación.

Los esfuerzos compresivos de la formación tienen una influencia marcada en el desempeño de la penetración, en formaciones con altos esfuerzos en la formación, la penetración cae a menos de un tercio comparado en tamaño con un disparo de carga moldeada (figura 2.30).

En formaciones con menores esfuerzos en promedio las balas penetran más profundo, aproximándose al desempeño de los disparos con cargas moldeadas (probadas en formaciones objetivo sin esfuerzo). Respecto a este fenómeno, se cuenta con poca información para analizar el o los efectos de los esfuerzos de la formación en la penetración de la bala. Se tiene la idea que las perforaciones con bala mostrará una reducción en la penetración al incrementar los esfuerzos, un proceso similar se presenta con las cargas moldeadas.



Propiedades físicas de la Tubería.

La resistencia de la tubería tiene un efecto considerable en la penetración de la bala. Diversos experimentos han mostrado reducciones del 50% cuando la dureza se ve incrementada de 160 a 280 BHN (Brinell Hardness Measurement) aproximadamente el rango del grado J-55 a grado P-110 de tubería de revestimiento. Así la resistencia de la tubería de revestimiento tiene un mayor efecto en la penetración de la bala que en el jet de los disparos de carga moldeadas.

Factores ambientales.

Un incremento en la temperatura o presión del pozo puede incrementar la penetración de la bala, así el incremento de cualquiera de éstos factores o ambos incrementan la penetración en un 30%. Esto resulta porque la presión hidrostática causa una extensión del efecto de barril similar a la llegada e

incrustación de la bala con la tubería después de salir del barril, y el incremento en la temperatura (arriba del rango del explosivo) realiza que el material impulsor proporcione mayor energía.

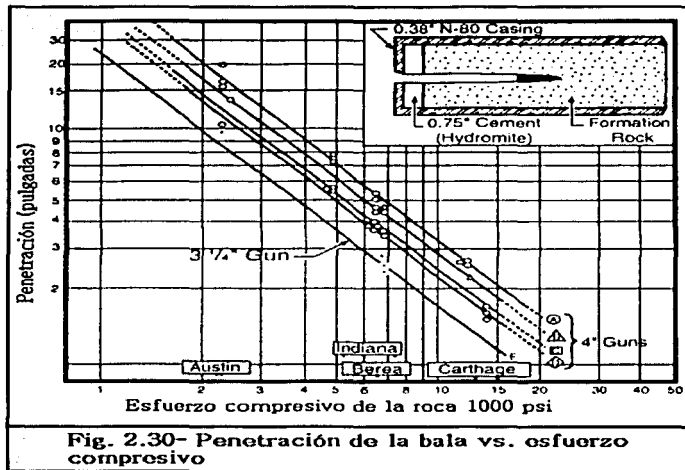


Fig. 2.30- Penetración de la bala vs. esfuerzo compresivo

Debe notarse sin embargo que las pistolas de balas no pueden operar a tan altas temperaturas como las pistolas de carga moldeadas. Las operaciones estándar son generalmente limitadas de 250°F con material propulsor especial disponible para trabajar a 400 °F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO III TIPOS DE PISTOLAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.

3.1 Tipos de Pistolas

Una definición consensuada de los tipos de pistola es difícil de obtener, sin embargo surgen las siguientes preguntas: ¿Debería la definición basarse en el rango del diámetro de la pistola, su configuración, método de transporte, aplicación o alguna otra combinación de estas? Tal vez el método más simple se encuentra basado en la configuración de la pistola: (1) la pistola de cargas moldeadas de soporte hueco expandible y / o re-usable. (2) La pistola expandible y la semi-expandible de cargas moldeadas y (3) la pistola de balas.

3.2 Características de las Pistolas

Pistolas de soporte hueco

En la pistola de soporte hueco de cargas moldeadas, sus cargas y otros componentes de los explosivos, usualmente son cargados dentro de una tubería de gran espesor o soporte, asegurados en la posición deseada y sellado en contra de los fluidos y la presión del pozo. Cuando las pistolas son disparadas las presiones instantáneas de detonación, son contenidas junto con la pistola.

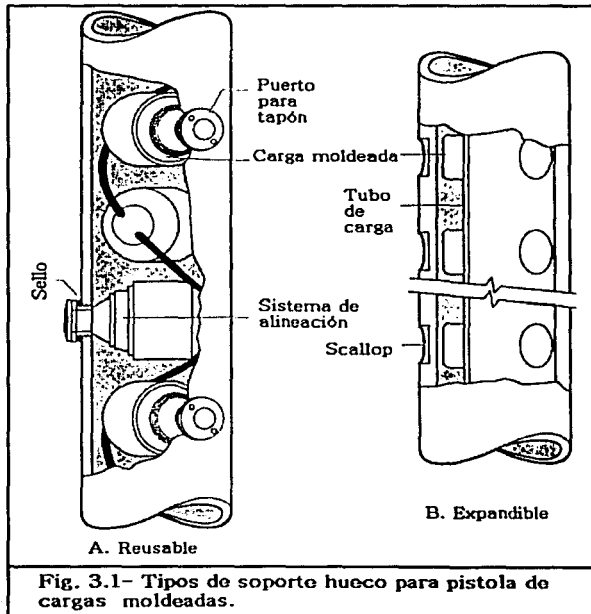


Fig. 3.1- Tipos de soporte hueco para pistola de cargas moldeadas.

La onda detonante de las cargas explosivas expande levemente la tubería o soporte de la pistola, pero no lo suficiente para afectar la recuperación de la pistola del pozo.

Generalmente la mayoría de los residuos de las cargas detonantes también permanecen dentro del soporte. Sin embargo bajo algunas circunstancias particularmente con pistolas de altas densidades de disparo, cargadas con cargas de "agujero grande," una cantidad apreciable de los residuos de las

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

cargas pueden quedarse en el pozo. Atención especial debe presentarse al diseño del casco de las cargas y la chaqueta y así como a la selección de los materiales, asegurando que los residuos que se queden en el pozo sean del tipo arena y minimizar cualquier tendencia de un tapón en la tubería de producción o en el equipo superficial. Las dos configuraciones básicas tanto del tipo re-usable y expandible, son usadas como se muestra en la figura 3.1. La figura 3.2 muestra una vista en sección transversal de tales configuraciones.

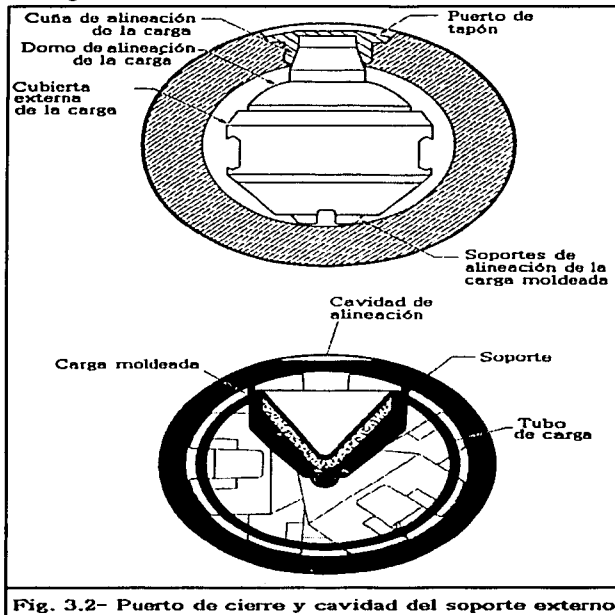


Fig. 3.2- Puerto de cierre y cavidad del soporte externo

Pistola re-usable de soporte hueco.

En éste tipo de pistola re-usable o bien pistola de tipo "Puerto de Tapón" (Portplug) figura 3.1a, las cargas moldeadas, son asegurados en el lugar con puertos de tapón sellados, colocados en la pared del cargador donde el sistema de alineación sujeta y ajusta las cargas.

El jet de las cargas moldeada penetra la sección relativamente delgada del centro del puerto de tapón figura 3.2a y luego penetra la tubería de revestimiento y la formación. La sección delgada en el tapón minimiza la energía requerida para penetración de la tubería de la pistola misma y al contrario, maximiza la energía disponible para penetrar la tubería de revestimiento y la formación. Al recuperarse la pistola del pozo, los tapones perforados son removidos junto con los residuos de las cargas contenidos dentro del soporte y el soporte re-usable.

En algunas ocasiones algunos puertos de tapón se pierden de la pistola, mientras que las pérdidas ocasionales de puertos de tapón no es causa de preocupación, experimentar un gran número de tapones reventados indicarán que algún componente se encuentra fuera de especificación en la construcción de la pistola, en la carga o en la operación. Los problemas pueden incluir: pistolas utilizadas anteriormente, pistolas nuevas con puertos defectuosos, puertos de tapón mal manufacturados, muy baja presión hidrostática, procedimientos mal realizados del ajuste de las cargas o bien la combinación de cualquiera de éstos factores.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las pistolas re-usables tienen un rango de diámetro que va de 3 1/8 a 5 pulgadas, generalmente utiliza una fase de disparo de 90° y tiene una densidad máxima de 4 a 6 disparos / pie. La vida del soporte depende en un número de factores, incluyendo:

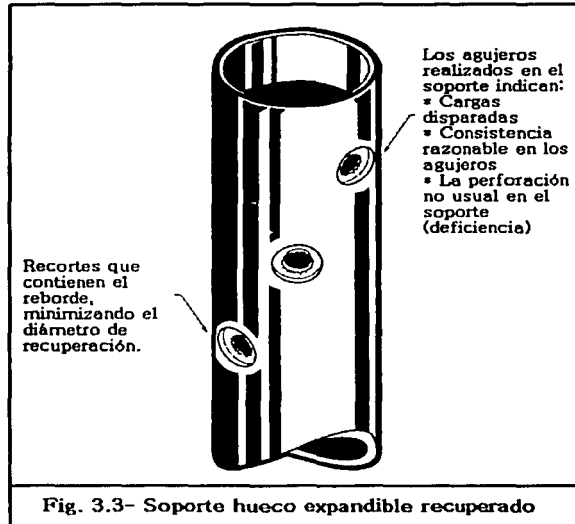
El peso del explosivo.

El espesor de pared del soporte.

El material del cual esta hecho el soporte y

La presión hidrostática del pozo.

Generalmente la vida del soporte excede los 15 viajes hacia el pozo, en algunos casos 30 o más viajes son posibles de obtener.



Pistola expandible de soporte hueco.

Este tipo de pistola no contiene aberturas en el soporte (puertos de tapón sellables), en la mayoría de los diseños los huecos externos o "scalops" se encuentran en la pared del soporte figura 3.1b y 3.2b. Las cargas moldeadas son primero montadas en una placa estructural de carga, o tubo y después este ensamble es insertado dentro del soporte. Los medios indicados son provistos para que las cargas sean alineadas en forma precisa para disparar a través de los huecos o "scalops", o bien en secciones de espesor reducido en el cargador. Los huecos o "scallop" proveen la misma energía del jet conservando las características como el puerto de tapón y conteniendo los residuos creados por el jet proyectado (figura 3.3) minimizando el diámetro (ejemplo: El drift del diámetro externo de la pistola disparada.) más aún ya que los residuos son contenidos, los problemas relacionados con desgaste de la tubería o equipo dañado como resultado de los residuos en el soporte son eliminados. El uso de soportes tipo "scalops" es esencial cuando cargas de "gran agujero" son disparadas en operaciones de control de arenas o de empacamiento de grava. Es esencial tener las mínimas pérdidas de energía en la penetración fuera de la pistola para que así, estas cargas puedan crear grandes diámetros de entrada de agujero en la tubería de revestimiento.

Cuando la pistola es recuperada del pozo, el soporte de la pistola perforada es desechada. En algunas aplicaciones de disparos transportados con tubería, las pistolas son desechadas dentro del "rathole" y permanecen en el pozo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Pistolas especiales transportadas con cable "a través de la tubería de producción" son también diseñadas para ser arrojadas al fondo del pozo después de los disparos, éstas pistolas generalmente en versiones reducidas de diámetro exterior de pistolas estándar, son usadas para atravesar por restricciones en las tuberías menores que las comunes, mientras proveen un máximo desempeño de las cargas posibles. El reducido diámetro exterior del cargador de pared, se expande significativamente y sería imposible de recuperar a través de restricciones de diámetro menor.

Los agujeros en el puerto de tapón (pistolas re-usables) o en los huecos en el soporte (pistolas expandibles), son buenos indicadores de la detonación de las cargas.

Agujeros de diámetro consistente que se muestran razonablemente redondos generalmente confirman un apropiado desempeño de las cargas.

Agujeros significativamente rectangulares indican un mal desempeño de las cargas algunas veces denominado "doble jet", como consecuencia se reduce el desempeño de la penetración y características de entrada de agujero a la tubería de revestimiento inadecuadas.

Debe señalarse sin embargo que en el caso de un desempeño apropiado, el diámetro del agujero en el puerto de tapón o soportes, no indican en forma precisa el tamaño de la entrada de agujero en la tubería de revestimiento. Otro indicador de un desempeño inadecuado de las cargas es la deformación inusual (expansión) del soporte.

Versiones especiales de pistolas expandibles de soporte sin terminación tipo "scallop" de mayor diámetro, son algunas veces utilizadas con cargas de muy alta penetración, la pérdida de energía se da en la penetración del soporte, no reduciendo el desempeño del disparo de las cargas en forma significativa.

El diseño del soporte sin terminación tipo scallop permite una gran variedad, en la densidad de disparo y fase con una simple configuración universal del soporte.

Pistolas de diámetro externo con rango de 1 ¼" a 7" medidas en el rango de operaciones a través de la tubería de producción en 1 ½", pueden ser utilizadas para terminaciones en sargas de tuberías de mayor diámetro.

Las longitudes de los soportes individuales varían de un solo disparo hasta 30 pies. El rango de fase de disparo va de 0° para pistolas posicionadas hasta una variedad de configuraciones multifases (180, 130, 120, 60, 45, 20°, etc.) con densidades de 4 a 16 disparos / pie o mayores. Menores densidades de disparo (hasta 6 disparos / pie) son típicas de pistolas de diámetro menor.

Pistolas expandibles.

Las pistolas expandibles pueden dividirse como completamente expandibles o semi-expandibles. Dado que los soportes no tubulares rodean los componentes explosivos, las cargas moldeadas pueden llegar a ser mayores que las cargas para soportes huecos del mismo diámetro.

Pistolas convencionales completamente expandibles.

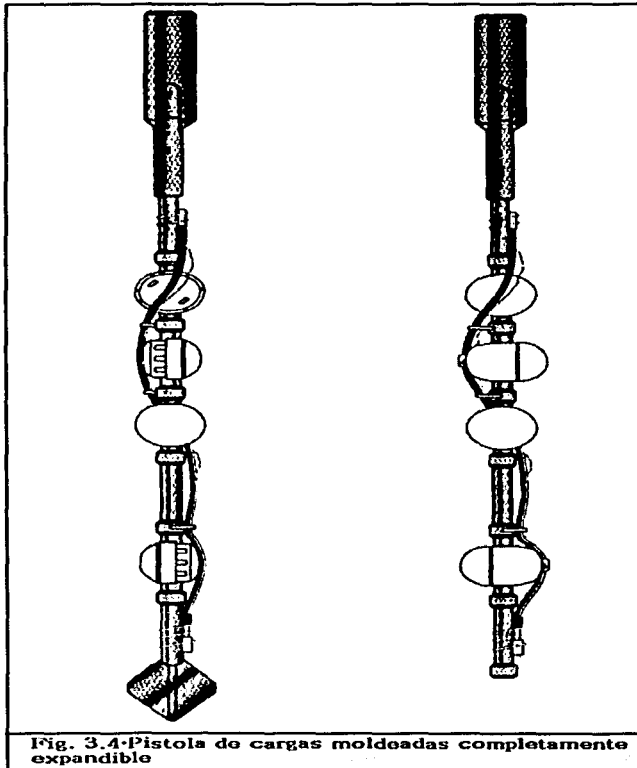
Este tipo de pistolas (figura 3.4) son no-recuperables después de la detonación. Las cargas son individualmente selladas en contra de las condiciones del pozo. Los medios de conexión mantienen las cargas juntas en una relación de fases específicas.

El cordón detonante y el detonador se encuentran expuestos a la presión del pozo, temperatura y al fluido de control, el primero debe ser instalado para minimizar la posibilidad de rozamiento contra la tubería, particularmente en pozos altamente desviados. El daño en la capa protectora del cordón y la exposición al fluido de control puede causar fallas en la detonación.

Cuando la pistola es detonada, la explosión fuerza al rompimiento del contenedor y de los medios de retención y todos los desechos resultantes permanecen en el pozo. En algunos casos los desechos pueden crear un tapón en la Tubería de Producción o en la TR, o bien interferir o dañar los sistemas de producción. Las características de éstos residuos dependen del tipo de material utilizado y de la naturaleza de las conexiones entre cargas. Los materiales del contenedor incluyen: vidrio, cerámica, aluminio y acero.

Los medios de conexión entre las cargas individuales establecen una mayor flexibilidad de la sarta de la pistola comparado con aquella del soporte hueco de la pistola. La flexibilidad de la pistola, facilita el descenso a través de tuberías de producción curvas o sinuosas o bien a través de restricciones.

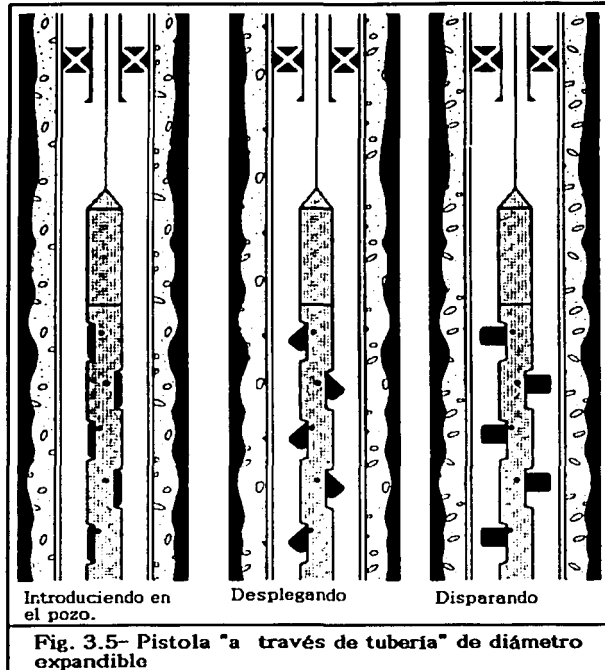
Los diámetros de pistola tienen un rango que va de 1 3/8" a 7", permitiendo el uso en operaciones "a través de TP" y de TR. Una gran variedad de fases están disponibles y la densidad de disparos va de 4 a 12 disparos / pie.



Pistolas de diámetro extendido, Pistolas completamente expandibles y Pistolas "a través de tubería".

Como un acercamiento rápido, se puede decir que se alcanza un alto desempeño en la penetración del disparo en las pistolas completamente expandibles por medio de la extensión del diámetro de la pistola debajo de la tubería de producción, las cargas moldeadas individuales son montadas por medio de un pivote dentro de un soporte cilíndrico ranurado. Como muestra la figura 3.5 la pistola se corre con las cargas plegadas dentro del soporte y así atravesar por la tubería y los nipples asociados.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Cuando la pistola se encuentra a la profundidad deseada de disparo en la tubería de revestimiento, las cargas son desplegadas y disparadas. Las cargas mayores, posicionadas a un clearance óptimo, proveen un desempeño de la penetración equivalente a una pistola de mayor tamaño en diámetro y de soporte hueco (por ejemplo una pistola de 1 11/16 pulgadas de diámetro tendrá un desempeño en la penetración igual o mejor que una pistola de 4 pulgadas de diámetro externo de soporte hueco.) Más aún los disparos de la pistola serán a 180° en vez de ser a 0° en fase, como la mayoría de las pistolas pequeñas "a través de tubería".

Si se presenta un fallo en la detonación la pistola puede ser recuperada y desplazada por la Tubería de Producción, plegando las cargas de regreso en el soporte y permitiendo así la completa recuperación de la pistola. Cuando la pistola es disparada, toda la sarta por debajo de las cabezas fragmentadas desplegadas y los residuos caen dentro del rathole o agujero auxiliar en el fondo del pozo. Pistolas semi-expandibles La recuperación de una parte de las pistolas semi-expandibles detonada es su característica principal y como las pistolas completamente expandibles, las cargas son individualmente selladas en contra de la presión y el fluido del pozo, y tanto el cordón detonante como el detonador se encuentran expuestos a las condiciones del pozo. Las cargas generalmente son conectadas en una placa de metal semirígida montada en el frente (figura 3.6) o montada en el centro, con cables de alta resistencia (figura 3.7) las cuales son recuperadas del pozo después del disparo.

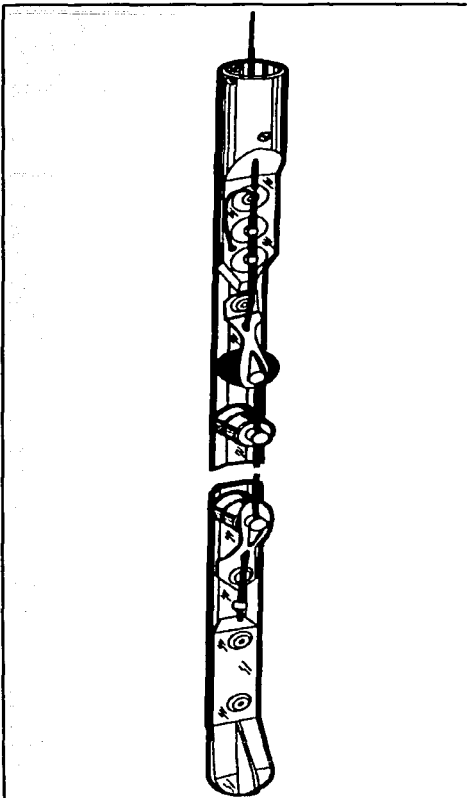


Fig. 3.6- Pistola de cargas moldeadas semi-expandible con barra de montaje frontal

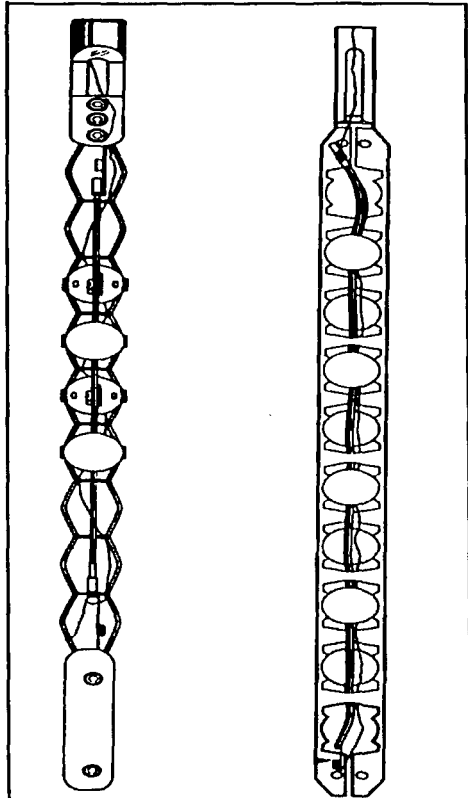


Fig. 3.7- Pistola de cargas moldeadas somioexpandible centricamente montadas

Solo las versiones con la placa montada al frente indican la correcta detonación del disparo, ya que ésta barra o placa muestra los agujeros de él o los jets. Las versiones montadas en el centro con cables sólo indican la detonación de las cargas y no confirman la formación del jet.

Las pistolas semi-expandibles se encuentran en el rango de 4 a 6 disparos / pie y generalmente se encuentran posicionadas a un "clearance" de cero y 0° de fase en operaciones "a través de tubería". Algunas pistolas sin embargo se encuentran con fase de +45 a 60° (figura 3.8). Para operaciones de servicio posicionadas "a través de la tubería". Una fase de 180° puede ser establecida como una alternativa para pistolas largas operadas en la TR.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

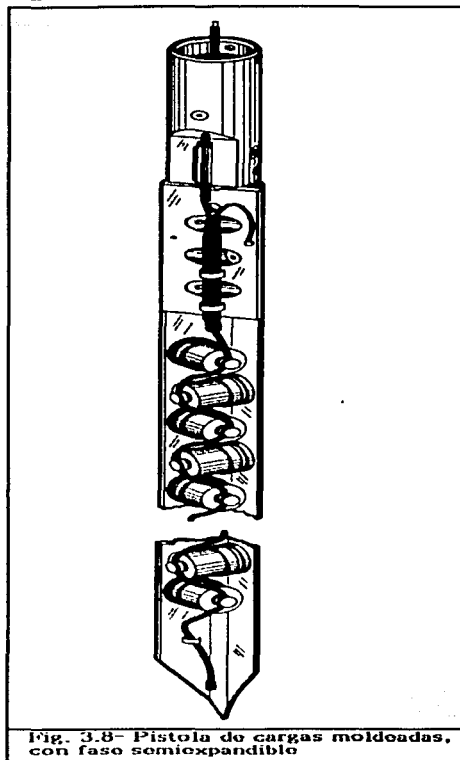
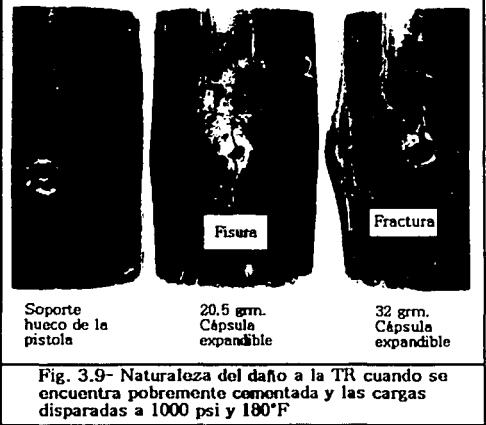


Fig. 3.8- Pistola de cargas moldeadas, con fase semiexpandible



Pistolas de bala

Las pistolas de bala son recuperables y usualmente configuradas como se describe en el capítulo 2. Las pistolas van de 3 1/8 a 5 1/4 en diámetro y hasta 15 pies de longitud.

La fase de los disparos tiene un rango de 60 a 120° con densidades de disparo de 6 disparos por pie. Pistolas especiales están siendo desarrolladas para operaciones de empaquetamiento de grava con diámetros de 5 a 6 pulgadas. Estas pistolas multifase establecerán diámetros de entrada a la tubería de aproximadamente 1 1/4 de pulgada con densidades de disparo de 12 disparos / pie.

3.3 Daño a la Tubería y Reducción de la Resistencia al Colapso.

Presiones de explosión extremadamente altas se encuentran asociadas con la detonación de pistolas de cargas moldeadas (capítulo 2). Los efectos sobre la TR varía desde no presentarse daño hasta un daño mayor en la tubería, otros además de los disparos o agujeros como abolladuras o deformaciones y en algunos casos el separamiento de tuberías (figura 3.9). Los factores que gobiernan el daño a la tubería incluyen el tipo de pistola, carga, el tipo de ajuste de cargas, la fase de los disparos y la densidad, propiedades de la tubería de revestimiento y las condiciones del pozo

(por ejemplo tipo de fluido, presión hidrostática y el soporte de la tubería por el cemento y la formación). Mientras que la resistencia al colapso de la tubería de revestimiento se ve reducida por las perforaciones, el factor más significativo resulta la distancia vertical a lo largo del eje de la tubería entre perforaciones adyacentes.

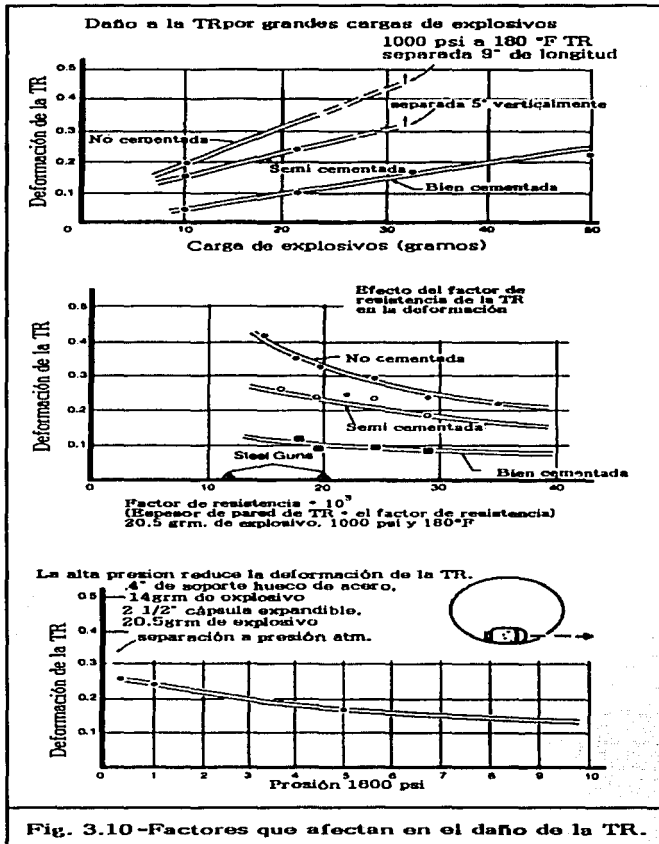


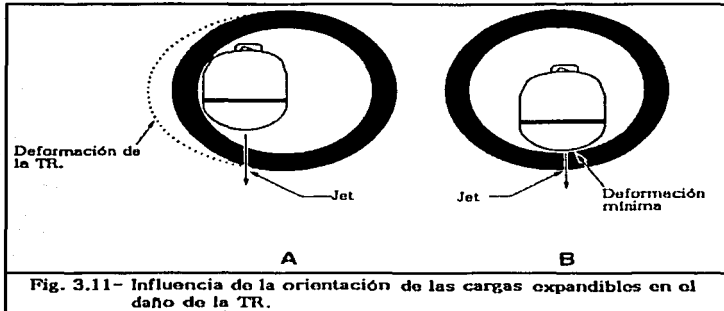
Fig. 3.10 - Factores que afectan en el daño de la TR.

Daño a la tubería con pistolas de soporte hueco

Este tipo de pistolas absorben la mayor parte de la energía del explosivo a la detonación de las cargas, por lo que no hay una deformación apreciable a la tubería de revestimiento cuando la pistola opera apropiadamente. Sólo cuando pistolas grandes cargadas con altas densidades de disparo y con cargas de explosivo excepcionalmente poderosas (el peso de los explosivos de 50 gramos o más) y disparados en pozos llenos con líquido, se encuentra la tubería propensa a absorber una fracción significativa de la energía de la explosión. Sin embargo si se planea utilizar tales pistolas tan poderosas, se debe poner gran atención a las propiedades de la tubería (aleación, esfuerzo de cedencia, peso, condición, etc.) y un buen trabajo de cementación debe ser confirmado antes de los disparos.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Una importante excepción a la regla general que establece que las pistolas de soporte hueco no dañan la tubería implica también el disparo no consciente de la pistola inundada con líquido del pozo, tal inundación a la pistola resulta de la falla de los sellos al final del soporte en los cierres de enlace o en los cierres de los puertos.



Daño a la Tubería de Revestimiento con Pistola Expandible.

La detonación de ambos tipos de pistolas expansibles resulta en fuerzas explosivas significativas que son absorbidas por la tubería de revestimiento. Consecuentemente los dos tipos pueden deformar la tubería de revestimiento siendo este daño algunas veces significativas. El grado de deformación de la tubería de revestimiento (TR) o daño dependen principalmente en el tipo de cargas utilizadas (figura 3.10). Conforme el explosivo incrementa, la deformación también incrementa aparentemente en forma lineal hasta que la tubería de revestimiento se separa. Sin embargo el soporte de la tubería de revestimiento (cemento-formación), la resistencia de la TR y la presión hidrostática también se ven envueltas en la deformación de la TR. La deformación decrece con un adecuado soporte (cemento-formación) de la tubería. Y con un incremento del espesor de pared de TR y esfuerzo de cedencia (figura 3.10b), el incremento en la presión hidrostática puede reducir la deformación en un 50% (figura 3.10c). La orientación de las cargas con respecto a la TR también se puede ver envuelta en la deformación de la misma.

La figura 3.11a muestra el peor caso, donde un costado de la carga se encuentra en contacto con la TR, una deformación menor se alcanza cuando la carga es orientada para que el eje del jet sea normal a la TR. (figura 3.11b).

La TR se puede separar cuando una tubería débil (por ejemplo Grado J-55) no se encuentra soportada⁶ cuando las cargas de explosivo exceden los 25g. Sin embargo una pistola de 1 11/16" y 2 1/8" de diámetro "a través de la tubería" (cargas de explosivo de aproximadamente 10 a 22 gramos respectivamente) no deben separar las tuberías aún en el caso de que se encuentren pobremente soportadas (cementada).

Cuando la TR se encuentra soportada adecuadamente una pistola de 2 1/8" conteniendo 22 gramos de explosivo no debe producir más de 0.05" a 0.01" de la deformación de TR bajo condiciones de pozo usuales. El uso de cargas explosivas de 50 gramos (arriba del límite de investigación) muestra un incremento en la deformación de más de 0.20" sin presentarse separación en la TR.

Se puede suponer que la deformación de la TR no es de gran importancia cuando pistolas "a través de tubería" son utilizadas en la TR que se sabe se encuentran en buena condición física, sin embargo si se tiene alguna razón para sospechar que la TR ha sido debilitada por el tiempo o bien la exposición a condiciones corrosivas el uso de pistolas de soporte hueco es altamente recomendable.

⁶ El término soportada se utiliza como sinónimo de cementada.

Daño a la Tubería de Revestimiento con Pistola de Balas.

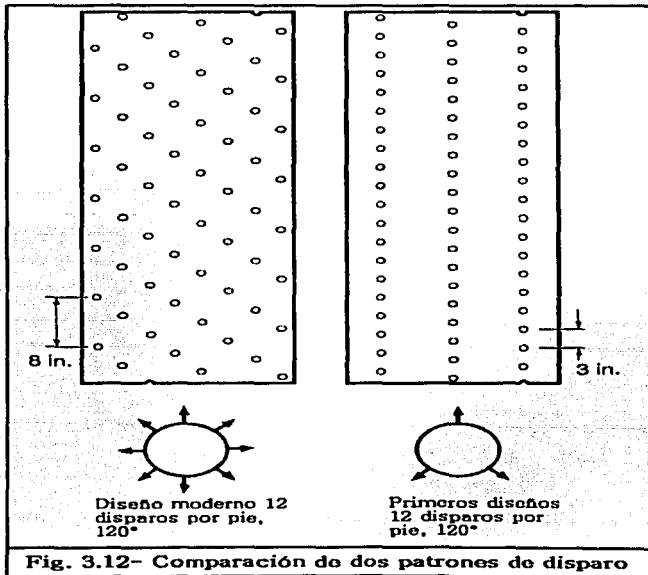
La pistola de bala puede también separar TR mal soportadas como resultado de los gases a alta presión de las cargas propulsoras. Cuando la TR se encuentra bien soportada sin embargo la deformación de la TR es mínima. Un fenómeno inusual ocasionalmente se presenta con las pistolas de balas, el abollamiento hacia el interior de la TR a las perforaciones de las balas. Esto se aprecia en formaciones de baja permeabilidad y con grandes esfuerzos o en otras instancias donde el disparo de la bala dentro de la formación es pequeña.

Efecto del disparo en la capa de cemento.

El jet perforador con pistolas de soporte hueco o las pistolas expandibles pequeñas no afectan en forma adversa la resistencia de la capa de cemento cuando la tubería es soportada por el cemento con una fuerza compresiva excedente de 2000 psi. Como el efecto de cargas expandibles muy grandes no sé a definido correctamente, el uso de cemento de alta resistencia se recomienda para todas las operaciones de disparos.

Los análisis de laboratorio sugieren adicionalmente que la perforación del jet no fragmenta o fractura la capa de cemento detrás de la TR. sin embargo la pistola de bala, si causa un fracturamiento localizado en la capa de cemento.

Incidentalmente las fracturas localizadas en el cemento no resultan un problema en la acidificación o en operaciones de fracturamiento hidráulico porque la influencia de la fase angular y los efectos de gasto inicial se reducen y un porcentaje de los efectos iniciales son reducidos. Más aún la capa fracturada puede establecer una menor presión de rompimiento y de tratamiento.



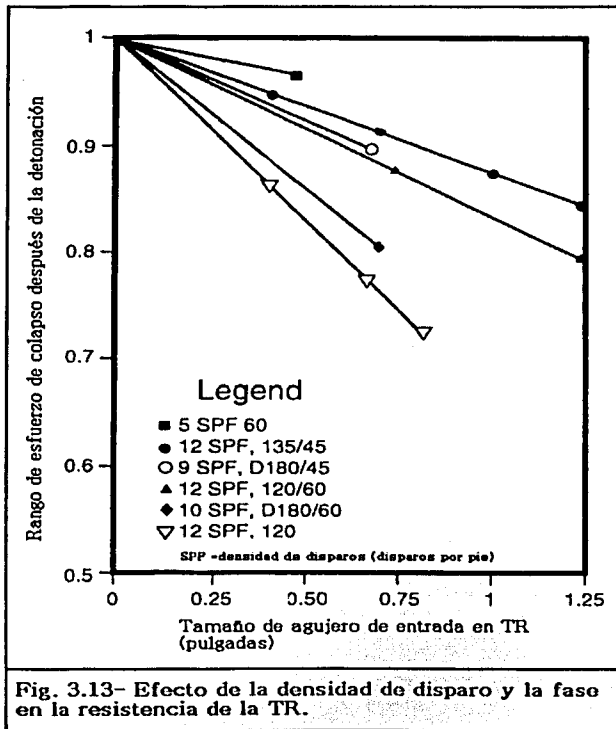
Resistencia de la Tubería al Colapso

La resistencia al colapso de la tubería se ve reducida por la presencia de disparos, el factor que más afecta la resistencia al colapso de la TR después de los disparos es la distancia vertical entre los

disparos adyacentes a lo largo del eje de la tubería, mientras ésta distancia vertical sea menor, la reducción de la resistencia al colapso de la TR se ve más pronunciada.

La figura 3.12 compara dos tipos de patrones de disparo utilizados para pistolas de alta densidad de disparo. Debe notarse que ambas pistolas tienen la misma densidad efectiva de disparo 12 disparos / pie, para la fase de la pistola a 120° la distancia vertical entre los disparos es 3" y para las fases 135°/45° la distancia es de 8 pulgadas. La figura 3.13 muestra un tratamiento teórico de los efectos de disparos y fase en la fuerza de colapso en la TR. Suponiendo una carga de presión externa uniforme.

Debe resaltarse que a la menor densidad de disparo (5 disparos / pie), los efectos de disparos en la fuerza de colapso es despreciable, aún para la pistola 135°/45° (figura 3.12) los efectos no son significantes. Sin embargo debe notarse la reducción substancial para la pistola de fase 120° mostrada en la figura 3.12. También debe resaltarse que la pistola fase 120° ha sido descontinuada desde hace mucho.



Estudios empíricos de pruebas que envuelven la línea de contacto de la distancia vertical de los disparos como opuestos a la presión externa uniforme corroboran la información mostrada en la figura 3.10

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Reducciones en el esfuerzo calculado no tomando en cuenta problemas de campo con el colapso de TR se experimentan muy rara vez en operaciones de empacamiento de grava donde las altas densidades de disparo y las configuraciones de grandes agujeros son utilizadas rutinariamente.

3.4 Comparación de Características.

La tabla 3.1 establece una comparación general sobre todo de las características de varios tipos de pistolas.

Tabla 3.1- Características de las pistolas				
	Pistolas de carga moldeada			
	Soporte hueco	Semi-expandibles	Completamente expandibles	Pistola de balas
Construcción	A	B	C	A
Confiabilidad	A	B	C	A
Rango de presión	A	C	C	B
Rango de temperatura	A	C	C	C
Residuos	A	B	C	A
Deformación de TR	A	B	C	B
Disparo selectivo	A	B	C	B
Penetración	A	B	C	A
Diámetro(2 7/8 a 7 1/2)pulg.	A	---	---	C
Diámetro(1 3/8 a 2 1/8)pulg.	C	A	B	---
Flexibilidad	C	B	A	C
Indicación de disparo	A	B	C	C
Costo	C	B	A	A

A= más deseable

Pistolas de soporte hueco

Los dos tipos de pistolas de soporte hueco se caracterizan por su robustez y la protección a los componentes explosivos. Solo éstas pistolas operarán confiablemente a temperaturas y presiones elevadas (arriba de 325 °F y 15 000 psi ver capítulo 8). Sin tomar en cuenta el tamaño, la detonación de esta pistola rara vez causa deformación a la TR, si la pistola es utilizada correctamente y operada normalmente. Un mínimo de residuos se queda en el pozo, la mayoría de ellos son contenidos en el soporte, bajo condiciones normales. Ya que los componentes explosivos son protegidos de las condiciones del pozo, estas pistolas son ideales para operaciones selectivas de disparos, donde dos o más pistolas son corridas en un mismo viaje y disparadas eficientemente a diferentes profundidades del pozo.

Prácticamente las pistolas de soporte hueco proveen el mejor desempeño en todos los aspectos (máxima penetración y máximo tamaño de entrada de agujero en la TR) en pistolas que exceden en diámetro externo más de 3 pulgadas (el uso de pistolas expandibles más grandes son descartadas a causa de las altas cargas explosivas utilizadas y el incremento de la probabilidad de daño a la tubería). Como se indicó anteriormente, el revisar la tubería de la pistola después de la recuperación (figura 3.3), pueden indicar si la pistola fue disparada correctamente.

Debe recordarse que los agujeros en el soporte o en el puerto de tapón no proveen información acerca de la penetración o del tamaño de agujero de entrada a la tubería ya que diferentes porciones del jet perforador crean al agujero en el puerto de tapón y el agujero de entrada en la TR.

Pistolas expandibles

Ya que las cargas para las pistolas expandibles son de alguna manera mayor que aquellas de las pistolas de soporte hueco del mismo diámetro, las pistolas expandibles proveen una mejor penetración y un mejor diámetro de entrada de agujero a la TR. particularmente para pistolas de menor diámetro (2 2/8 pulgada o menores). Estas cargas expandibles menores, con pesos de explosivo de menos de 25 gramos, producen solo una modesta deformación en la TR, cuando la TR se encuentra en buenas condiciones y se encuentran propiamente soportadas por el cemento. Más aún la cantidad de residuos generados no debe ser considerada si es que se cuenta con un adecuado "rathole" (agujero secundario en el fondo del pozo).

Cargas mayores expandibles no se recomiendan para uso rutinario, ya que como son cargas explosivas mayores, incrementan la probabilidad de daño a la TR. Además del hecho, que estas cargas dejan grandes cantidades de residuos en el pozo, adicionando la necesidad de un "rathole" adecuado.

Una ventaja significativa de las pistolas expandibles es que facilita el descenso a través de tuberías curvadas o imperfectas y esta pistola es la única en su tipo que puede ser corrida satisfactoriamente.

Solo las pistolas con barra frontal montada o placa indican la detonación de la formación del jet más no provee información concerniente a la penetración o tamaño de entrada de agujero a la TR.

Pistolas de bala.

Las pistolas de bala también se caracterizan sobre todo por su robustez y confiabilidad. Cuando operan correctamente, no dejan residuos en el pozo y cuando son detonadas en tuberías correctamente soportadas, ellas no causan daño apreciable a la TR. Estas se encuentran bien situadas en operaciones selectivas de disparos, una característica significativa de la pistola de la bala es el diámetro y forma consistente de agujero de entrada a la TR.

3.5 Aplicaciones

La tabla 3.2 presenta una comparación sobre todo de las aplicaciones de dos diferentes tipos de pistola.

Pistolas de soporte hueco.

Estas pistolas son utilizadas sobre el mayor rango de configuraciones de pozo y condiciones en el fondo y son utilizadas en la mayoría de las operaciones de disparos.

Pistolas Reusables de soporte hueco.

Las pistolas re-usables o de tipo "port plug" son utilizadas primeramente en operaciones transportadas con línea de cable donde el tiempo a la exposición en las condiciones del pozo (presiones y temperatura) es mínimo (1 a 3 horas). Sin embargo, éstas se encuentran bien situadas para operaciones a altas temperaturas y presiones, y operaciones de disparo selectivos. Así como en operaciones en TR viejas o corroidas.

Las pistolas son efectivas, aunque el costo varia con el tipo de carga moldeada. Como se indicó anteriormente, las pistolas re-usables tienen un rango de aproximadamente 3 1/8 a 5 pulgadas, generalmente se utiliza una fase de 90° para el disparo y tiene un máximo de densidad de disparo que va de 4 a 6 disparos / pie.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Pistolas expandibles de soporte hueco. -

Estas pistolas se encuentran disponibles en diámetros de 1 ¼" a 7 ¼" midiendo el rango que se extiende desde operaciones "a través de tubería" en 1 ½ pulgada de Tubería de Producción hasta operaciones de terminación en sartas de TR de gran diámetro, donde todos los tamaños de ésta pistola deben ser corridas con cable. Versiones de mayores densidades de disparos (en diámetros desde 2 7/8" hasta las de mayor diámetro) deben ser corridas con tubería o con cable, éstas versiones que utilizan cargas de agujero grande, se utilizan para terminaciones de empacamiento de grava o control de arenas. También pueden utilizarse con cargas de alta penetración para operaciones de terminaciones naturales. Como estas pistolas presentan un mínimo de sellos y sobre todo por su construcción tan robusta estas pistolas son ideales para ser expuestas prolongadamente (200 horas o más) a altas presiones y altas temperaturas, todas las pistolas deben ser detonadas selectivamente.

Versiones especiales de diámetro externo reducido pueden ser utilizadas en sartas de tubería menores que la usual. Por ejemplo una versión de diámetro reducido de 2" de diámetro externo, disponible en 1.832" de diámetro externo puede ser corrida a través de un 1.875" en niple y permite el desempeño de una pistola de 2", previniendo la necesidad de utilizar una pistola de menor desempeño de 1 11/16". Mientras las características del soporte sean de menor espesor de pared, más reducido será el diámetro externo de la pistola y se expandirá significativamente arriba de la detonación siendo desechada dentro del agujero secundario perforado en el pozo.

Pistolas expandibles

Aunque se encuentran disponibles en una gran variedad de diámetros, ambos diseños tanto expandible como semi-expandible, son utilizadas principalmente en operaciones "a través de tubería" de 1 3/8" a 2 1/8" en tamaño. Estas pistolas son comprensivamente populares por su generalmente mejor entrada de agujero y mejor desempeño de penetración, comparado con las pistolas de soporte hueco del mismo diámetro. Las pistolas semi-expandibles de barra frontal montada o de placa de metal son preferidas generalmente por su robusta construcción confiabilidad, reducido volumen de residuos y sus características indicadoras que muestran si las cargas fueron detonadas apropiadamente. Las pistolas completamente expandibles deben ser utilizadas cuando la flexibilidad de la sarta de tubería de la pistola sea una consideración dominante (por ejemplo en tuberías de producción con curvas o deformaciones). Sin embargo el uso de pistolas mayores generalmente es evitado por sus mayores cargas de explosivos y el potencial para dañar la TR.

Pistolas de bala

Mientras que las pistolas de bala son utilizadas en un relativo porcentaje menor en las operaciones de disparo, hoy en día éstas establecen la ventaja de un diámetro y forma de agujero de entrada en la TR consistente, así las pistolas de bala son una excelente opción para todos los tipos de fracturamiento hidráulico y otras operaciones de inyección.

3.6 Limitaciones

Cada tipo de pistola tiene una o más limitaciones, una revisión del objetivo de la terminación antes de la selección de pistola es esencial para obtener un óptimo desempeño de la pistola y la respuesta del pozo.

Pistolas re-usables de soporte hueco.

Su uso se encuentra sujeto a operaciones de transporte con línea de cable donde la exposición a las condiciones del pozo es corta. Se debe tener cuidado en las operaciones con muy baja presión hidrostática o en pozos de gas. El uso de cierres de puertos para pozos de gas sellos, con una muy delgada membrana que sirve como sección de sello de presión que minimiza el impacto del jet, el cual puede provocar una mala posición del tapón y los soportes relativamente nuevos son

recomendados para minimizar la posibilidad de la pérdida de los cierres de puerto y en consecuencia un gran potencial de pegamiento de la tubería. La relativa baja densidad de disparos y la limitada variedad de fase de disparo, como características de esta pistola puede también limitar su uso.

Pistolas expandibles de soporte hueco.

Se debe tener cuidado cuando estas pistolas son utilizadas en condiciones de baja presión hidrostática o en pozos de gas porque son susceptibles a una exagerada expansión o ruptura bajo estas condiciones. Es imperativo que las especificaciones para la pistola en particular sean revisadas cuidadosamente antes de su uso, la mayoría de las pistolas (1 3/8" a 2 1/8") requieren una mínima presión para evitar la excesiva expansión o ruptura. La presión puede ir de 500 psi para disparos en líquido hasta 5000 psi para detonaciones de gas seco, lo cual depende de la pistola. También se debe tener cuidado en la selección del apropiado material del soporte cuando se utiliza en pistolas grandes, de alta densidad de disparo y así evitar problemas en las operaciones donde la presión hidrostática es baja. Se debe tener precaución con las pistolas "a través de tubería" desechables porque su rango de presión puede ser substancialmente menor que aquel de las pistolas estándar y pueden sufrir daño. El desempeño de la familia completa de pistolas que va de 1 3/8 a 2 1/8 pulgada son consideradas usualmente alentadoras, fomentando el uso de las pistolas de mayor desempeño como la expandible o semiexpandible, donde las condiciones del pozo lo permitan.

Pistolas expandibles

Una seria limitación para las pistolas expandibles grandes, es la característica de las altas cargas de explosivos y el potencial para dañar la TR, esta situación es particularmente remarcada en pozos con tuberías viejas o corroídas o en pozos donde la TR no se encuentra bien cementada.

Las pistolas completamente expandibles generan un excesivo volumen de residuos que no siempre se estancan en el fondo del pozo pudiendo interferir y / o dañar la tubería de producción. Los fluidos de terminación con altas densidades y un reducido diámetro interno de las tuberías incrementan la probabilidad del problema.

Muchas pistolas expandibles no pueden ser operadas en ácido porque los componentes de la pistola son atacados por el ácido y fallan a la presión o detonan prematuramente. Similarmente el gas puede introducirse a través del material del casco o por los sellos, resultando en una reducción del desempeño de la penetración de la carga (cerca del 12% de reducción en la penetración por cada 1000 psi de incremento en la presión).

La entrada de líquido a las cargas en el diseño de algunas pistolas semi-expandibles puede resultar en una excesiva deformación o en la división de la placa de metal que sostiene las cargas.

Pistolas de balas.

Solo se encuentran disponibles bajo un limitado rango de tamaños (de 3 1/8 a 5 1/4 de pulgadas en diámetro externo). El rango de temperatura estándar es cercana a 250 °F con materiales especiales propulsores, pudiendo llegar a los 400 °F. El desempeño de la penetración de la bala decrece substancialmente en formaciones con alta resistencia y cuando se utilizan TR de grado muy alto (capítulo 2).

Tabla 3.2 Aplicaciones de las pistolas basados en la práctica regular en campo

	Soporte hueco				
	Reusable	Expandible	Semi-expandible	Completamente expandible	Balas
Transportada con cable	A	A	A	A	A
Transportada con tubería	----	A	----	----	----
Presión elevada (>15ksi)	B	A	C	C	C
Temperatura elevada (>325°F)	B	A	C	C	C
Exposición a condiciones prolongada	----	A	----	----	----
Mínimos residuos	A	A	B	C	A
Tipo de residuos	A	A	B	C	A
TR viejas y debilitadas	A	A	C	C	A
Tuberías dañadas	A	A	C	C	A
Tuberías curvadas	----	----	B	A	----
Restricciones mínimas de tuberías	----	----	A	A	----
Gran penetración	A	A	A	----	----
Empacamiento de grava	----	A	----	----	----
Alta densidad de disparo	----	A	----	----	----
Consistente entrada de agujero	A	A	----	----	A
Disparo selectivo	A	A	----	----	A
Pozos de gas	C	A	A	----	----

A = lo más deseable

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

CAPITULO IV

TRANSPORTE DE LA PISTOLA Y CONTROL DE LA PROFUNDIDAD.

4.1 Introducción

Las pistolas como se describieron previamente, operan en forma independientes de los medios por las que son transportadas dentro del pozo, el tamaño de pistola, tipo, función, etc. son las mismas sin importar si la sarta de la pistola se corre con cable, tubería o tubería flexible. La selección del método de transporte se rige bajo un número de factores incluyendo, economía, condiciones de terminación, condiciones de pozo y características del yacimiento.

4.2 Pistolas transportadas con línea de cable.

El método

Las pistolas transportadas con cable varían en diámetro de 1 ¼ a 7 pulgadas, midiendo el rango desde las pistolas menores de soporte hueco o pistolas expandibles, a las de mayor diámetro y mayor densidad de disparo, cada una de estas puede correrse con línea de cable.

Las líneas de cable se encuentran disponibles en diferentes diámetros para la operación con cualquier tamaño de pistola, la figura 4.1 muestra un arreglo típico de una pistola transportada con línea de cable.

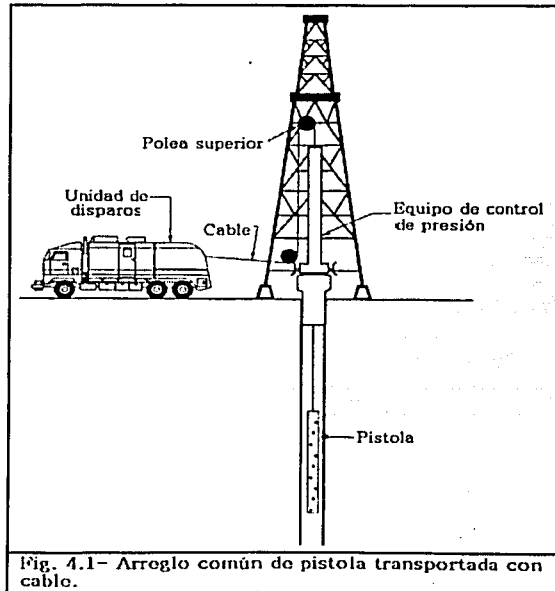
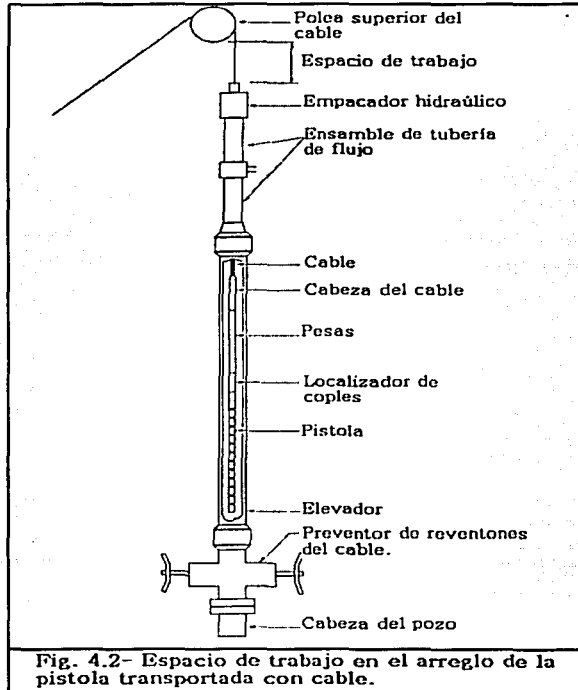


Fig. 4.1- Arreglo común de pistola transportada con cable.

La sarta de la pistola comúnmente incluye elementos mecánicos como una tubería corta, cople localizador y un sensor radioactivo (rayos gamma, neutrón, etc.) utilizado para correlacionar la posición de la pistola con respecto a la zona productora que va a ser disparada. El cable provee el medio de sustentación de la pistola en el pozo, la comunicación con el sensor y el de suministrar la corriente eléctrica para iniciar la detonación del sistema de la pistola.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La longitud de la pistola para establecer un solo viaje dentro del pozo, depende en la longitud total de la sarta de la pistola que debe pasar a través del equipo superficial de control de presión. La sarta de la pistola incluye la cabeza del cable, instrumentos de medición, pesos auxiliares que deben ser añadidos para sobre pasar la presión en la cabeza del pozo y finalmente la pistola misma. Sobre todo la longitud de ésta sarta se encuentra limitada por el espacio de trabajo entre la cima del preventor de estallamiento del cable (BOP) y la polea superior. Este espacio de trabajo es igual a la longitud de la sarta, más la longitud del ensamble de control de presión por encima de la sarta, más un espacio de maniobra de aproximadamente 5 pies figura 4.2

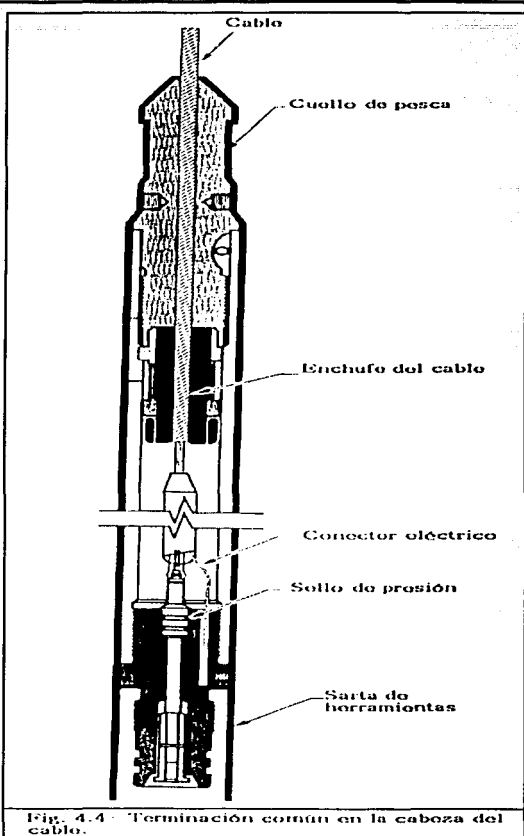
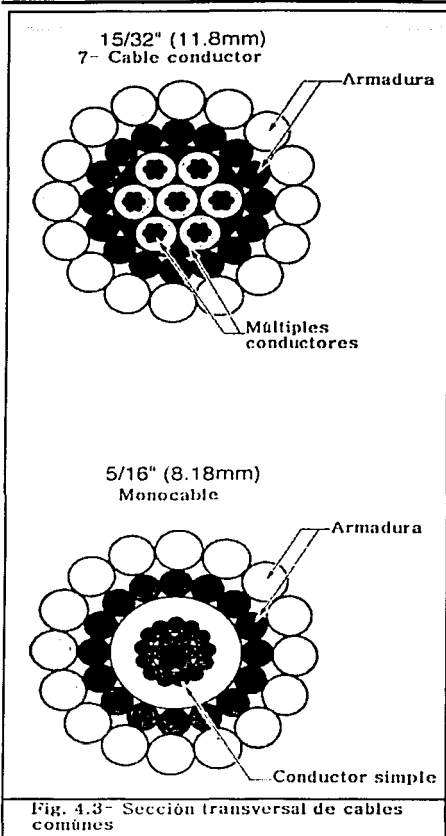


Múltiples corridas se requieren para disparar un intervalo que excede la longitud de la sección "activa" de carga de la pistola. Consideraciones prácticas usualmente limitan la longitud "activa" de la pistola de 30 a 40 pies para pistolas de diámetro grande de soporte hueco extendiéndose de 60 a 80 pies, para pistolas de diámetro menor de soporte hueco expandibles o semi-expandibles que corren "a través de la tubería".

Construcción de la línea de cable.

Los cables modernos generalmente envuelven dos cubiertas de cables de acero que rodean al núcleo central. El núcleo puede contener un conductor simple (monocable) o varios conductores (multicable). Los conductores son individuales y colectivamente aislados y pueden ser recubiertos con un compuesto sellante para minimizar la migración del gas y líquidos por medio del espacio entre los cables.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Las dos capas de cables de acero alrededor de los conductores tienen un doble propósito: el de establecer la capacidad para soportar la carga /el peso y proteger el conductor de cualquier daño (figura 4.3) al final de la sarta de herramientas, el cable termina en “la cabeza del cable” (figura 4.4)

El esfuerzo de rompimiento a la tensión, de la conexión cable-cabeza es de alguna forma menor que la fuerza de rompimiento del cable por sí mismo. Si la sarta de la pistola se atora en el pozo, la tensión del cable se incrementa hasta alcanzar el “punto débil” a la cabeza del cable la cual falla y el cable se separa de la sarta de herramientas de la pistola.

Después de que el cable es removido del pozo, un ensamble pescante de cuñas es conectado al cuello de la cabeza del cable para su pesca y la sarta es recuperada. Una falla en el cable por tensión en el cable por encima de la cabeza del cable complicará seriamente la operación de pesca.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Selección del cable

Los factores en la selección del cable incluyen: la fuerza de tensión, diámetro del cable, materiales del mismo (tanto conductor aislado y material de la armadura) y las aplicaciones (necesidad de multicable como opuesto al monocable). La fuerza de tensión es la consideración primaria en la selección del cable en superficie (suma del peso de flotación de la sarta de la pistola y el cable en el pozo) nunca deben exceder el 65% de la fuerza de rompimiento del cable. Esta limitación del 65% es una consideración seria en pozos profundos (por encima de los 18 000 pies) como se presenta en el capítulo 8.

El diámetro del cable es también una consideración importante en las operaciones donde la presión en superficie es anticipada durante la introducción o recuperación de la sarta del pozo. Las pistolas grandes y pesadas, requieren el uso de cables más largos y de mayor diámetro para lo cual se requieren unidades de manejo en superficie mayores (tambores para enrollar el cable y un adecuado poder para la recuperación de ensambles más pesados del pozo a velocidades de 20 000 pies / hora). La figura 4.5

y figura 4.6 muestran unidades tanto en tierra como en mar equipadas para manejar sargas de pistolas pesadas.

Las condiciones del pozo y el ambiente en el mismo dictan la selección de los materiales del cable. Para la condición de alta temperatura, se requieren cables con aislantes resistentes a tal condición para los conductores eléctricos. La presencia de porcentajes significativos de H_2S puede requerir cables con materiales de recubrimiento especial que no permitan el ataque del H_2S ⁷.

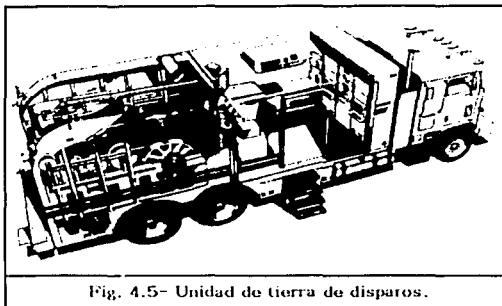


Fig. 4.5- Unidad de tierra de disparos.

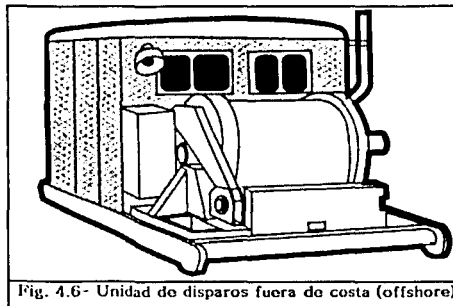


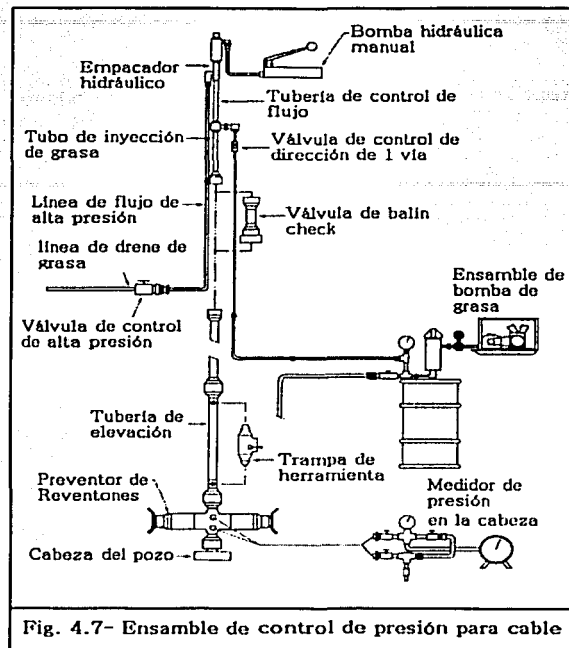
Fig. 4.6- Unidad de disparos fuera de costa (offshore)

Control de presión

Las consideraciones para la seguridad del pozo requieren el uso rutinario de equipo de control de presión en la cabeza del pozo para todas las operaciones de disparo con cable, yendo desde las pistolas de diámetro pequeño para operaciones "a través de tubería" de soporte huecos o pistolas expandibles, hasta las pistolas mayores utilizadas en las operaciones de disparos de TR (aún con presión sobre balanceada).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁷ H_2S Ácido sulfhídrico o hidrógeno sulfurado, es un gas muy tóxico que se combina con la hemoglobina de la sangre, con lo que éste se vuelve negra e incapaz de absorber el oxígeno del aire. Produce la muerte aun en dosis muy pequeñas.

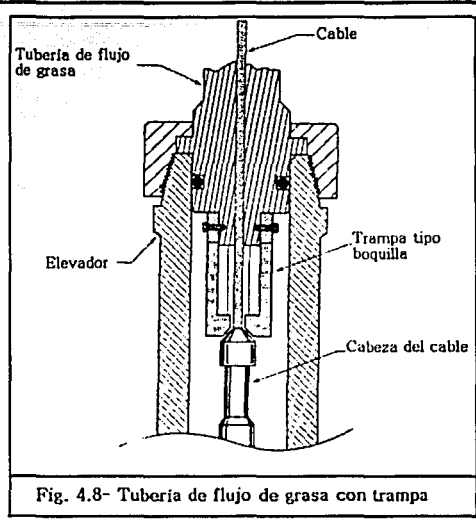
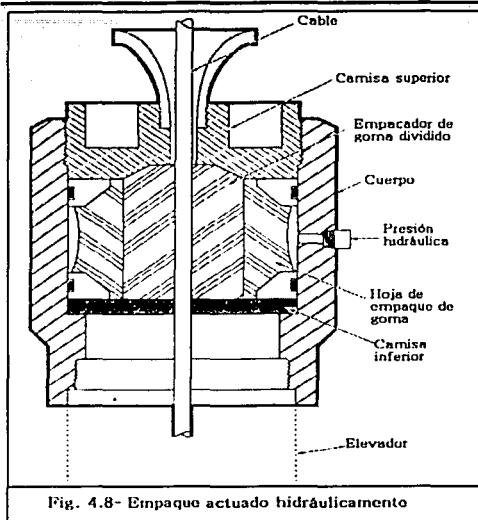


El equipo para la pistola de diámetro pequeño de soporte hueco, generalmente es utilizado donde las pistolas deben ser introducidas o recuperadas del pozo bajo presiones en la cabeza del pozo significantes. Estas pistolas se corren "a través de la tubería" y son disparadas con presión bajo balanceada en el intervalo de terminación. La figura 4.7 muestra un ensamble típico de control de presión para cable y en operación "a través de tubería".

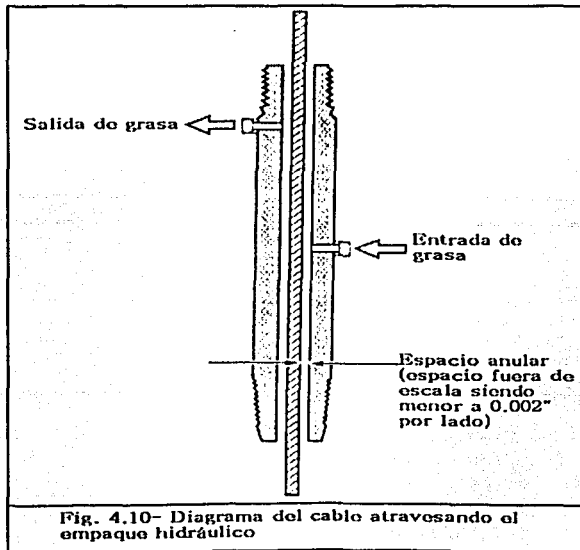
El sistema consiste de cinco componentes básicos (de arriba hacia abajo):

- 1) Empacador manejado hidráulicamente que puede ser sellado alrededor del cable.
- 2) Un ensamble de tubería de flujo que establecerá un sello de presión dinámica alrededor del cable.
- 3) Un elevador (tubería de elevación) o lubricador que acomodará la sarta de la pistola completamente.
- 4) Una trampa de herramienta baja, opcional
- 5) Un preventor BOP que actúa hidráulicamente, capaz de sellar al rededor del cable, el rango del equipo es de 5 000, 10 000 y 15 000 psi de presión en la cabeza del pozo, un equipo especial es necesario para una presión en la cabeza del pozo de 20 000 psi.

La función primaria del empacador es la de sellar el punto al cual el cable entra por encima del ensamble del control de presión, así previene la fuga de los fluidos del pozo mientras que la sarta de la pistola se encuentra en movimiento descendente o ascendente en el pozo.



El empaquetador (por ejemplo prensa-estopas) generalmente consiste en un protector, un elemento empaquetador y medios para aplicar presión externa para comprimir el elemento alrededor del cable (figura 4.8) el sello del empaquetador es completamente comprimido solo en situaciones de emergencia. Algunos montajes de empaquetadores incluyen una herramienta de sujeción "catcher" en el fondo.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Esta herramienta de sujeción o "catcher" automáticamente se acopla al cuello de la cabeza del cable para la pesca si la sarta de la pistola es jalada o forzada en contra del empacador, si el cable es separado de la cabeza del cable, esta herramienta previene que la sarta caiga dentro del pozo (figura 4.9).

El componente principal del montaje de control de presión, es la sección del tubo de flujo (ejemplo tubo engrasador) el cual provee una reducción esencial en la fricción en el sello por presión dinámica alrededor del cable (figura 4.10)

La grasa de alta viscosidad es bombeada dentro de la porción central del ensamble del tubo de flujo a una presión algo mayor que la presión en la cabeza del pozo. La sección anular entre el diámetro interno del tubo de flujo y el diámetro externo del cable es muy pequeño (usualmente ≤ 0.004 pulgadas).

La resistencia al flujo de la grasa que atraviesa por el espacio tan pequeño crea, una caída de presión substancial a lo largo del tubo de flujo así al final, reduce la presión en la cabeza del pozo hasta llegar a un nivel un pozo superior que la presión atmosférica al punto al cual la grasa fluyente sale del ensamble (figura 4.11). El resultado es un sello efectivo que previene la pérdida de fluido del pozo (líquido o gas) mientras permite un movimiento libre del cable.

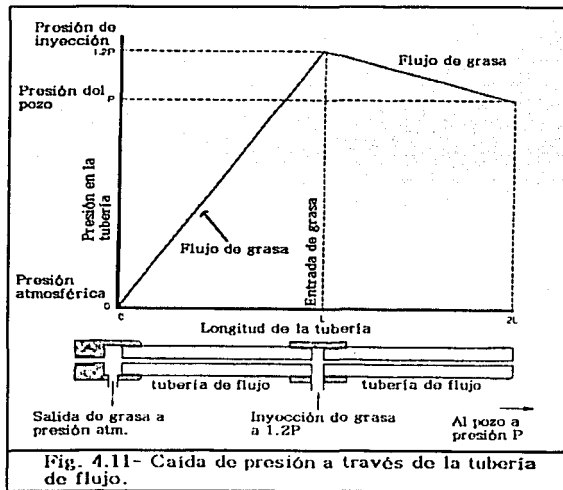
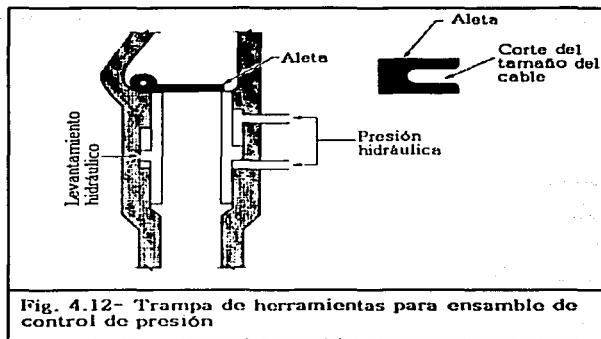


Fig. 4.11- Caída de presión a través de la tubería de flujo.

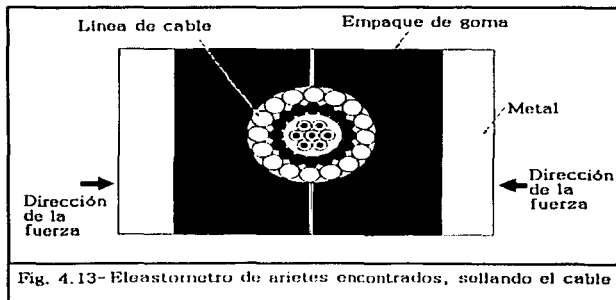
La tubería de elevación o riser, consiste en una serie de secciones modulares, similares a las juntas de las tuberías cortas, con uniones integrales de rápida conexión en cada extremo final. Deben ser conectadas suficientes secciones en serie para cubrir completamente el ensamble de la pistola, además de añadir 2 a 3 pies para maniobras internas. El mantenimiento al sello superficial resulta crítico, porque cada conexión es una fuente potencial de una falla en el sello de presión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Muchos montajes de control de presión superficiales incluyen la opción de una trampa de herramientas, instalada directamente por encima del preventor del cable. Esta herramienta provee un receptor superior como respaldo (si se utiliza) recibiendo la sarta si el cable es removido de la cabeza del cable, mientras que la sarta se encuentra todavía en la tubería de elevación y al mismo tiempo cierra la aleta de la válvula de paso (figura 4.12).

El preventor de reventones del cable es utilizado para contener la presión del pozo si alguna otra operación debe llevarse a cabo mientras la sarta de herramientas se encuentre en el pozo. Tales operaciones incluyen la remoción, la adición o la reparación del ensamble de la tubería de elevación o drene de la presión fuera del mismo. Para reemplazar los elementos empacadores en la cabeza de control, las operaciones de bombeo para matar el pozo en la circunstancia de un cabeceo y cualquier cierre de emergencia si los componentes sellantes fallan en el montaje por arriba del preventor.



El preventor sella contra del cable por medio de dos aríetes recubiertos opuestos (figura 4.13) que tienen un contorno en forma de canal o ranura para ajustar el diámetro del cable seleccionado. La aplicación de presión externa a los aríetes inducen al sello ajustado alrededor de la superficie irregular del cable (figura 4.14)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

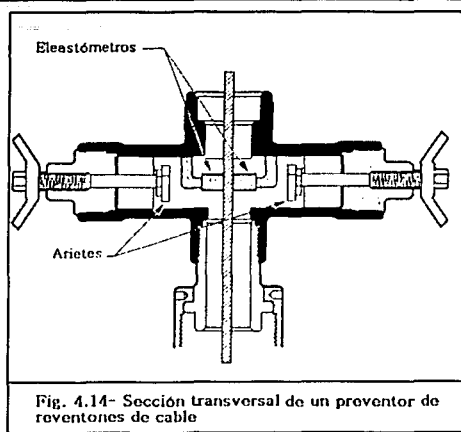


Fig. 4.14- Sección transversal de un preventivo de reventones de cable

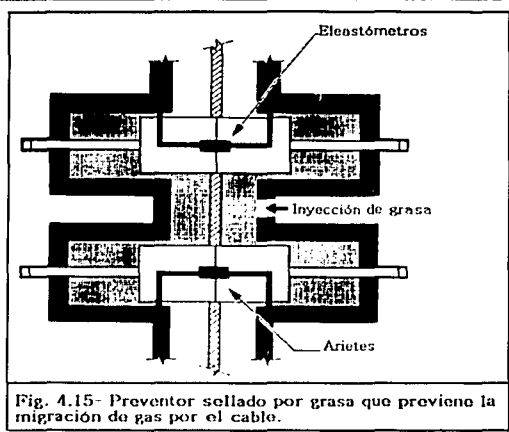


Fig. 4.15- Preventor sellado por grasa que previene la migración de gas por el cable.

Para operaciones de gas a alta presión se debe inyectar grasa entre el preventivo superior e inferior para minimizar la migración de gas a través del cable cuando los preventores (BOP's) se encuentran cerrados (figura 4.15), el sello de los preventores es efectivo solo cuando el cable se encuentra estático. El movimiento del cable a través de los arietes cerrados puede afectar los elementos sellantes y resultar en la pérdida de control de presión.

La figura 4.16 muestra la introducción de un ensamble de disparos a través de equipo de control de presión y dentro del pozo. El ensamble es removido en orden inverso.

El peso de la sarta de herramientas debe ser suficiente para sobre pasar la fuerza ascendente ejercida en el cable por la presión en la cabeza del pozo.

Esta fuerza es el producto de la área en sección transversal del cable y la presión en la cabeza del pozo, mientras mayor sea el área en sección transversal de la tubería (de producción, revestimiento, etc.) obviamente impedirá el corrimiento de la sarta transportada y corrida con tubería previamente matado el pozo.

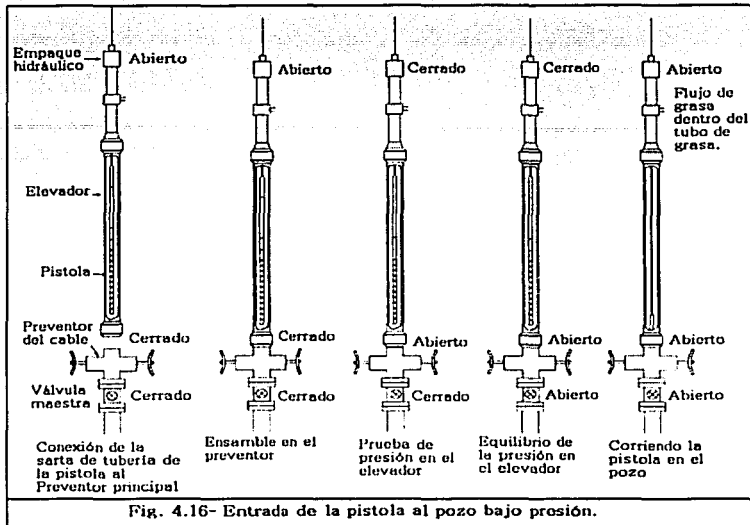
Los cables de diámetro menor son preferibles para operaciones que envuelven altas presiones en la cabeza del pozo. Los pesos muertos (ejemplo: barras de hundimiento) son incorporadas en el ensamble de la pistola para sobrepasar la fuerza de resistencia de presión en el pozo en el cable estos pesos son creados con materiales de alta densidad para minimizar la longitud adicional que se establece por el volumen de los pesos en el ensamble de la pistola.

El apropiado balance de la longitud de la pistola, el diámetro del cable y la longitud total de las barras de hundimiento son determinados con tablas como la de la figura 4.17 los pesos establecidos por las tablas son los mínimos requeridos para entrar al pozo, incluyendo la resistencia por fricción que se presente en el empacador.

Generalmente el peso mínimo debe incrementarse en un 20% para asegurarse que el cable se moverá fácilmente a través del empacador y los tubos de flujo.

Un acercamiento es el no tomar en cuenta el peso de la pistola cuando se determinan los pesos mínimos de las barras de hundimientos utilizando la tabla para determinar el peso de la barra de hundimiento y contar en los pesos adicionales de la pistola y herramientas de medición para jalar el cable dentro del pozo.

El efecto del diámetro del cable en la longitud de la sarta de la pistola es ilustrado mejor por medio de un ejemplo:



Un intervalo a 60 pies será disparado sin matar al pozo, la presión en la superficie es 7 000 psi. De la figura 4.17 se puede ver que los requerimientos de peso adicional son de 215 lb. Para una línea (cable) de 3/16 pulgada, 285 lb. para una línea de 7/32 y 555lbm para una línea de 5/16 pulgadas. Asumiendo que cada barra de 5 pies pesa 11.6 lbm/pie (58 lbm).

El peso de la tabla, es el peso total requerido sin incluir el peso del resto de la sarta por tanto el peso requerido incrementa 20, 25 o 50 pies respectivamente, dependiendo en el diámetro del cable, para la longitud de la sarta, tubería de elevación, tubos de flujo y los accesorios, permitiendo así un espacio para trabajo, la distancia desde el piso del equipo a las poleas superiores de 120 a 150 pies para los tres diámetros de cable considerados (figura 4.18)

Muchas terminaciones en tierra son manejadas por grúas, su máxima extensión va de 80 a 125 pies. Cuando los requerimientos de peso total exceden la capacidad de las grúas disponibles, grúas de construcción o auxiliares pueden ser utilizadas. Las instalaciones costa fuera o las instalaciones en tierra, usualmente tienen de alguna manera menor peso de trabajo. Aún cuando ensambles grandes de control de presión pueden ser ajustadas, cada sección del elevador adicional es una fuente potencial de falla en el sello. Más aún las consideraciones de seguridad deben limitar la longitud máxima del equipo porque el manejo de ensambles de control de presión que son muy pesados y largos, incrementan el riesgo de lesiones al personal. Obviamente el cable con el menor diámetro práctico para la operación debe ser seleccionado para permitir el uso de ensambles lo más cortos posibles para el intervalo en particular a ser disparado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

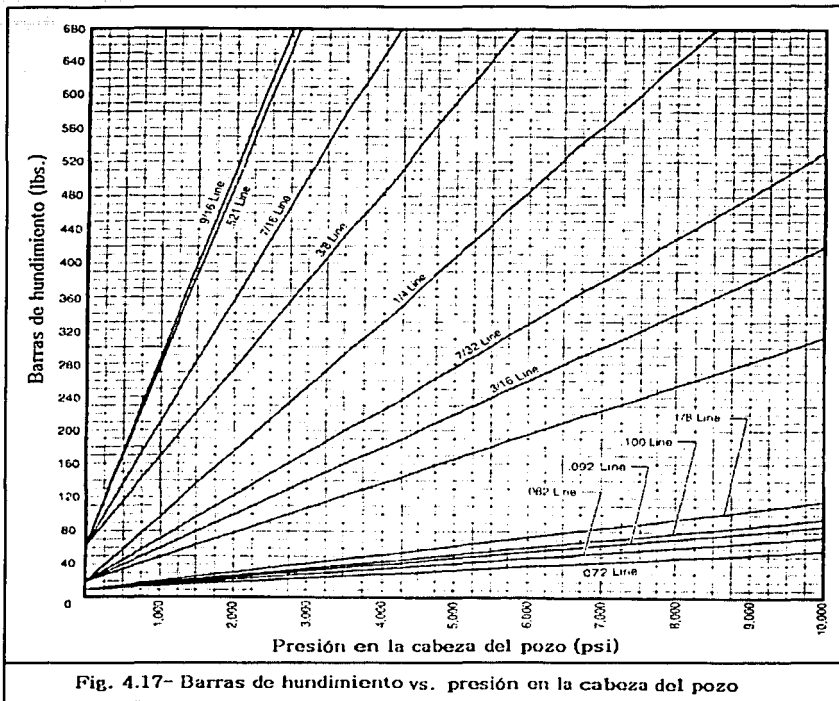


Fig. 4.17- Barras de hundimiento vs. presión en la cabeza del pozo

La máxima presión de superficie anticipada para pistolas transportadas con cable en operaciones de TR es ordinariamente mucho menor que aquella propuesta en el ejemplo anterior, permitiendo el uso de equipo de control de presión de una menor capacidad (3 000 a 5 000 psi usualmente), el adecuado control de la presión puede mantenerse usualmente por medio de un empacador controlado hidráulicamente por encima del elevador, eliminando la necesidad de tubos de flujo y en consecuencia la disminución de la longitud del montaje de control de presión. Incluso con el menor rango de presión, las secciones de diámetro largo del elevador son pesadas y riesgosas por lo que el personal debe mantenerse expectante.

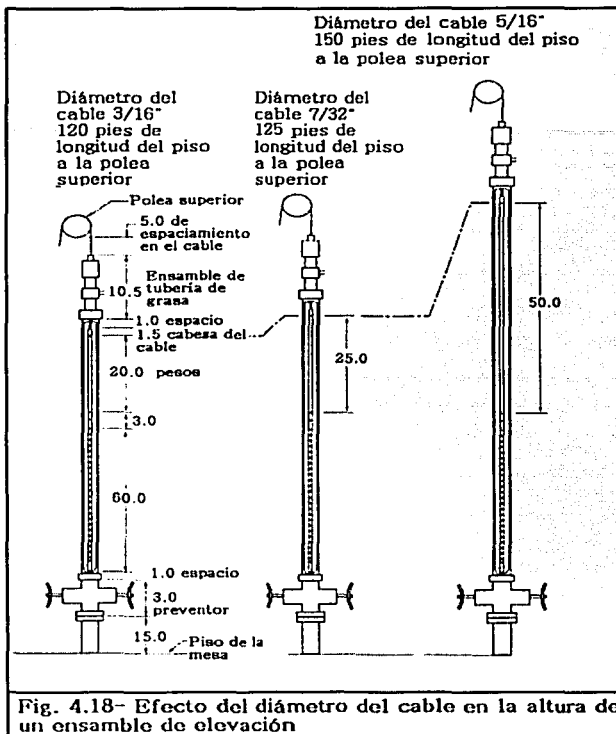
El armado de la pistola y la detonación.

La selección del detonador, depende del tipo de pistola y la aplicación, las condiciones del pozo (temperatura y presión) y las consideraciones de seguridad. El armado es un paso crítico en las operaciones de terminación particularmente en términos de seguridad y confiabilidad.

Sistemas detonantes de la pistola de soporte hueco.

Detonadores explosivos iniciados eléctricamente y desensibilizados al fluido (EED's fluid Desensitized Electrically initiated Explosive detonators) (figura 4.19) generalmente son utilizados para disparar las pistolas transportadas con cable de soporte hueco. El detonador es localizado en el fondo de la pistola, si se presenta alguna fuga o entrada de líquido, el aire se queda en el intervalo

entre la sección primaria y el "booster", interrumpiendo el tren de detonación, desactivando el detonador y previniendo el disparo de la pistola.



El disparar una pistola de cargas moldeadas que contienen líquido puede resultar en una catástrofe, aún que el jet no se forma el líquido dentro de la cavidad del "liner" interfiere en el colapso de este y con la formación del jet, las ondas de choque de la detonación son transmitidas a la pared del soporte sin ser atenuadas, el soporte puede ser excesivamente abollado y en casos extremos fracturarse, propiciando que la recuperación del soporte se vuelva difícil.

Los detonadores convencionales son susceptibles a la detonación inadvertida por corriente eléctrica parásitas, que son resultado de fuentes de radio frecuencias, operaciones de soldadura, aparatos de protección catódica o de fuentes de poder. Los detonadores contienen filtros de radio frecuencia y ofrecen una protección limitada en contra de las ondas de radio frecuencia, pero no ofrecen protección en contra de otras fuentes de poder, una alternativa para evitar los problemas con la corriente parásita es el uso de detonadores no convencionales de "puentes de cable" (EBW) o de tipo "cubierta de metal" (EFI). Como se presentará en el capítulo 9, tales detonadores son esencialmente inmunes a cualquier fuente de energía parásita. Otras variaciones de sistemas de seguridad relacionadas al uso de Elementos Electro-explosivos de Detonación (EED) también se presentarán en el capítulo 9.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

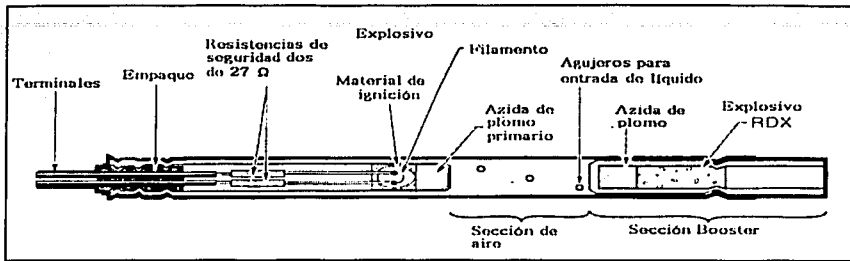


Fig. 4.19- RFD desensibilizado al fluido

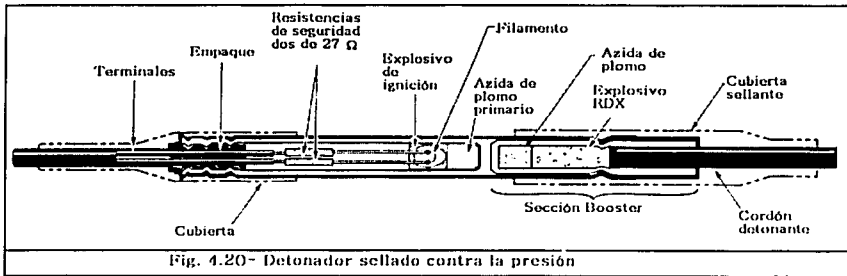


Fig. 4.20- Detonador sellado contra la presión

Sistemas detonadores para las pistolas expandibles y semi-expandibles.

EED sellados contra la presión en el pozo (figura 4.20) son utilizadas con ambos equipos, expandibles y semi-expandibles, el detonador es montado en el fondo de las pistolas completamente expandible. Si tan solo una parte de la pistola es disparada, lo cual puede suceder si el cordón fue dañado en la corrida dentro del pozo o si el cordón estaba defectuoso, la porción no disparada de la pistola generalmente puede ser recuperada. El detonador debe ser montado en el fondo en la parte superior de las pistolas semi-expandibles porque la barra o placa de metal usualmente recupera la sección no disparada.

Estas protecciones de detonadores no convencionales también pueden ser utilizadas con las pistolas expandibles o semi-expandibles para asegurar la protección en contra de las corrientes eléctricas parásitas.

Armado y detonación de la pistola de balas.

Actualmente, las cargas detonantes en las pistolas de bala son iniciadas por percusión o bien por encendedores eléctricos individuales. La detonación por percusión envuelve el uso de un cordón detonante para la iniciación directa de las cargas detonantes.

El tipo más comúnmente utilizado de pistola de bala (figura 4.21)

incorpora una serie de encendedores, cada uno conteniendo un filamento calentado eléctricamente y un compuesto especial de encendido, para iniciar la serie de cargas individuales detonantes. Las cámaras de las balas son conectadas separadamente, selladas contra la presión y disparadas selectivamente. Una falla en el sello de la presión permite al líquido entrar a la cámara y desensibilizar las cargas detonantes. Cuando la pistola se encuentra posicionada a la profundidad correcta, la corriente eléctrica es transmitida desde la superficie a un sistema de control en el fondo del pozo, el cual selecciona las cámaras deseadas iniciando el encendido y las cargas detonantes. La

reaplicación de la corriente desde la superficie es requerido para seleccionar y disparar la siguiente cámara.

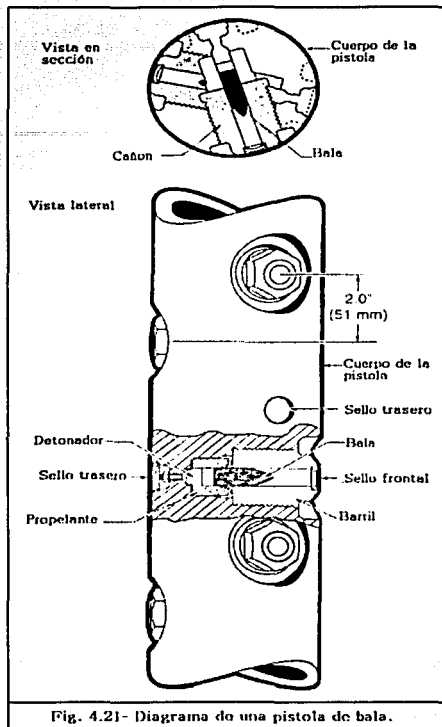


Fig. 4.21- Diagrama de una pistola de bala.

Armado de la pistola de cargas moldeadas.

El armado de una pistola de soporte hueco de cargas moldeadas con un EED convencional se presenta en detalle en el capítulo 9. Básicamente, el detonador es primero conectado al sistema eléctrico de disparo dentro de un tubo de seguridad capaz de contener una detonación accidental. Después el detonador es conectado al cordón detonante inmediatamente después de la instalación de la cabeza inferior sellada. Los problemas que ocurren durante la instalación y ajuste del detonador, pueden causar fallas en el disparo y detonaciones de bajo orden, como se presentó anteriormente. Las pistolas tanto expandibles como semi-expandibles son armadas en forma similar: primero una conexión eléctrica del detonador segura y después el ajuste del detonador al cordón detonante, un recubrimiento especial es utilizado para asegurar que el sistema se encuentre a prueba de fluidos.

La detonación de la pistola de cargas moldeadas.

Las pistolas transportadas con cable son disparadas por un transmisor de corriente eléctrica desde un sistema de control superficial a la pistola. En el capítulo 9 se dan detalles de la iniciación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Confirmación del disparo

Cuando las operaciones de disparos son completadas, la pistola es retirada del pozo y examinada para confirmar el funcionamiento adecuado, para pistolas de soporte hueco o semi-expandibles con barra montada en el frente o placa de metal, uno debe revisar que todas las cargas fueron disparadas y que los agujeros perforados en el soporte, "port plugs" o placa de metal son, en tamaño y forma razonablemente consistentes (agujeros mal formados o irregulares pueden indicar un mal funcionamiento de la carga).

Aplicaciones de los disparos con cable.

Las pistolas transportadas con cable encuentran una amplia aplicación.

- o Cuando sobre todo los costos de terminación y de tiempo de equipo son consideraciones primarias.
- o En terminaciones de zonas relativamente cortas.
- o En operaciones a muy altas temperaturas donde el tiempo de exposición del explosivo a la temperatura debe ser minimizado.
- o Cuando el pozo no puede ser disparado sobre balanceado.
- o Para dos o más intervalos que son seleccionados para terminarse.
- o En operaciones de corrección donde el pozo puede ser reperforado sin antes matarlo⁸.
- o Cuando agujeros de tamaño consistente en la TR, es una consideración dominante (pistola de balas).

Como se estableció anteriormente, cualquier pistola puede ser corrida con cable, en aplicaciones que involucren pistolas de mayor diámetro y alta densidad de disparos para operaciones en TR y las pistolas menores "a través de tubería".

Terminación de tipo TR.

Las pistolas mayores de soporte hueco, tienen varias aplicaciones específicas.

- o Para terminaciones iniciales en pozos donde no hay tubería o empacador, o en operaciones de corrección donde la tubería y el empacador han sido removidos.
- o Cuando resulta funcional el correr longitudes de sarta de pistola por encima de 50 pies (en cada dentro del pozo).
- o En condiciones de presión sobre balanceada
- o Cuando las condiciones del pozo incluyen solo un sobre balance modesto (no más de 200 psi) y cuando la máxima presión en superficie anticipada no excederá los 3500 psi.
- o Para operaciones con muy alta temperatura (arriba de 400 °F)

El uso de las pistolas completamente expandibles (cargas tipo cápsula) mayores que 2 1/8 pulgadas en diámetro externo debe ser evitadas porque sus cargas explosivas pesadas pueden dañar la TR. Un acercamiento a la planeación de la terminación con pistolas completamente expandibles es la de mantener el peso de la carga explosiva en una operación específica al diámetro de la TR. Una guía recomendada para todos los tipos de cápsulas expandibles perforadas es la de *"nunca utilizar más de 5 gramos del explosivo por carga para cada pulgada del diámetro interno de la TR"*.

Esta regla se aplica a densidades de disparos de 4 disparos /pie, para mayores densidades de disparos pueden requerir una mayor reducción en el peso de las cargas y su correlación con el diámetro de la TR. Bajo condiciones de confinamiento (pistolas de diámetro externo cercano al diámetro interno de la TR), los residuos de las cargas y el casco puede causar problemas con la recuperación de la sarta, particularmente para cargas transportadas en barra o placa de metal.

⁸ El término "matar" significa que el pozo sea cerrado al flujo por completo.

Terminaciones "A través de tubería".

Pistolas pequeñas de soporte hueco o semi-expandibles operadas con cable son utilizadas en los siguientes casos.

- o En operaciones de corrección donde el pozo no puede matarse (con longitud práctica máxima de pistola por viaje de 50 pies)
- o Cuando la presión en la cabeza del pozo se espera que sea alta.
- o Cuando el nivel de bajo balance es modesto (unas cuantas centenas de presión psi) no hay peligro de estallamiento de la pistola en el agujero.
- o Si la alta penetración de agujeros grandes en la TR no son requeridos (ejemplo yacimientos de alta permeabilidad con mínimo daño alrededor del pozo).

Las pistolas completamente expandibles con su flexibilidad inherente, son utilizadas en operaciones "a través de tubería" cuando se presentan desviaciones o curvas en la tubería y no permiten el uso de equipo semiexpandible o de soporte hueco.

Pistola de bala

Esta pistola es utilizada cuando la consideración dominante es un diámetro y forma consistente de agujero de entrada a la tubería y cuando una máxima penetración en la formación no es requerida (ejemplo: operaciones que incluyen una entrada limitada o un máximo control de la inyectabilidad, fracturamiento hidráulico, acidificación e inyección de vapor) Su gran diámetro inherente impide su uso en operaciones "a través de tubería".

4.3 Pistolas transportadas con tubería

El método: En las pistolas transportadas con tubería, la sarta de la pistola junto con espaciadores y accesorios seleccionados, son corridos dentro del pozo al final de una sarta de prueba o sarta de terminación. Así la sarta es posicionada junto con la pistola a través de la zona de interés, equipamiento superficial en la cabeza del pozo es instalado estableciendo la presión bajo balanceada planeada y detonando la pistola. El resultado es una perforación simultánea de los intervalos seleccionados. Los disparos transportados con tubería también proveen la oportunidad de desarrollar pruebas de flujo del pozo⁹ (well flow test) inmediatamente después del disparo por medio de incluir equipo de prueba en la sarta.

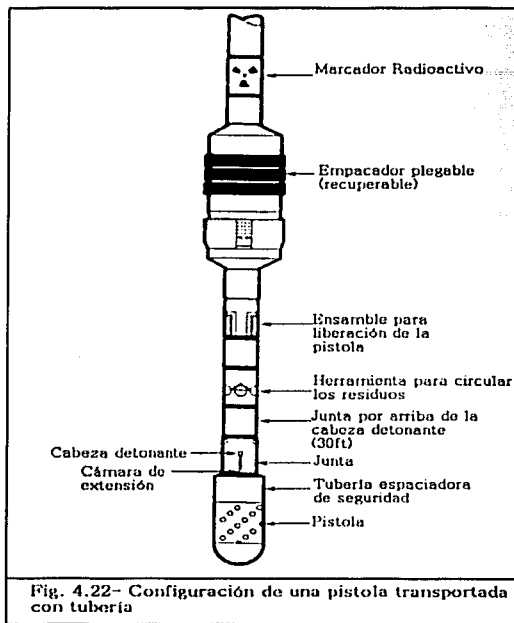
La figura 4.22 esquemáticamente muestra una configuración para disparos transportados con tubería, la cual consiste en: pistola, cabeza de disparo, ensamble para liberar la pistola, la tubería de la pistola, un empacador y una tubería corta de referencia. Para una operación típica con profundidad de disparo de 10 000 pies, de 6 a 8 horas se requieren para completar la secuencia de disparos del pozo. Este incluye los tiempos para ensamblar la sarta, el correr la sarta a la profundidad y su posicionamiento, el instalar el equipo superficial en la cabeza del pozo, el establecer y planear las condiciones de presión de pozo a la profundidad de la pistola, el disparar la pistola y el sacar la sarta.

Ya que la sarta de la tubería tiene una alta capacidad de soporte de carga (comparado con el cable), ensambles de pistola de longitud similar puede ser corrida junto con el equipamiento y accesorios necesarios para la terminación.

⁹ Prueba de flujo del pozo se refiere al análisis de pruebas de presión tanto Isocronales como Flow after flow para pozos de gas o bien el análisis con Método de Fetkovich-Vogel para IPR o Método de Standing.

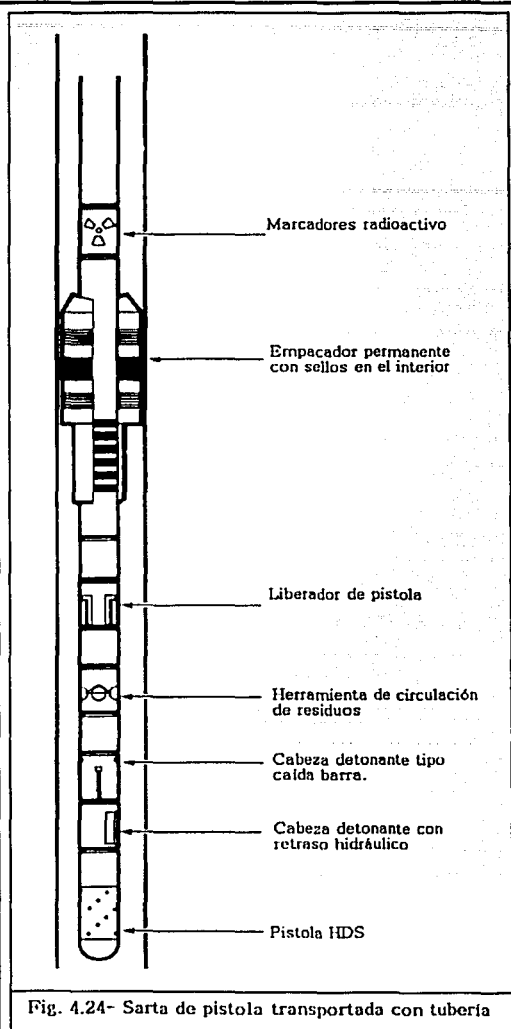
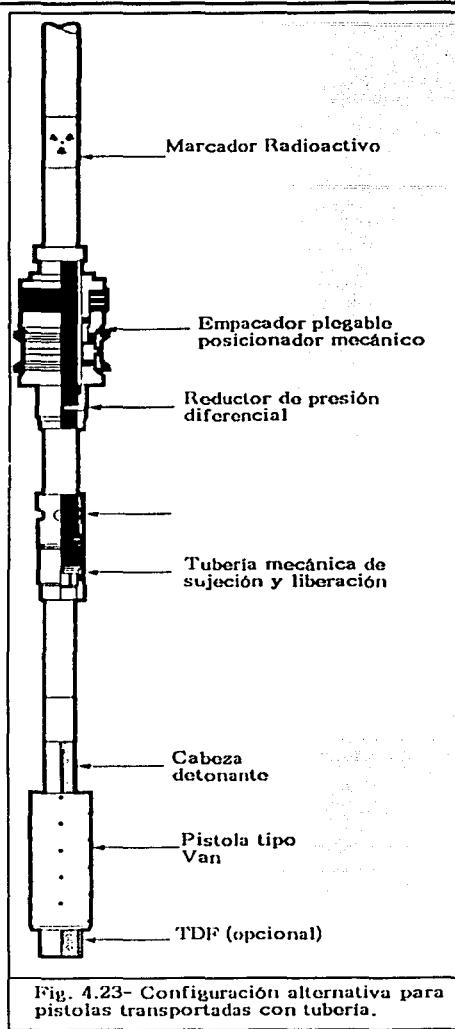
Configuración Básica.

La configuración de la sarta para pistolas transportadas con tubería son muchas y variadas, pudiéndose adaptar esencialmente a cualquier requerimiento de terminación. Las figuras 4.23 a 4.26 son esquemas de cuatro configuraciones representativas de disparos transportados con tubería que abarcan la mayoría de terminaciones.



Una configuración utilizada comúnmente (figura 4.22) incluye la pistola, el emparador y los accesorios. El emparador se coloca cuando la pistola se encuentra a la profundidad deseada. El marcador o referencia radioactiva provee un punto de referencia para el control de la profundidad, como se establecerá más adelante, las condiciones deseadas de presión en el pozo se establecen en la zona de disparo por medio de la circulación a través tubería de soporte antes que el emparador se ajuste o por remoción de fluido desde la tubería por sondeo o por desplazamiento de fluido con gas después que el emparador sea ajustado. Otro sistema popular envuelve el uso de un emparador removible y un sistema de tubería cerrada con un elemento de desahogo que usualmente es abierto con una barra de tirar o rompimiento (drop bar) utilizada para disparar la pistola (figura 4.23).

La sarta de la pistola es disparada y el fluido de la formación fluye hacia arriba alrededor de la pistola, a través de la tubería de soporte y hacia la superficie a través de la tubería. Si se desea la pistola puede desecharse en el agujero secundario perforado en el pozo o "rathole" para permitir operaciones futuras a través de la tubería completa. Alternativamente el emparador puede ser corrido con cable y la sarta de disparos transportada con tubería ajustada a través del emparador (figura 4.24), por supuesto las pistolas de menor diámetro deben ser utilizadas como si éstas fueran a ser suspendidas por debajo del emparador. Esta configuración usualmente es corrida cuando los empaadores con rango de alta presión y alta temperatura son requeridos.



La figura 4.25 muestra otra combinación de transporte cable / tubería para la configuración de disparos. La pistola y el empacador se corren hasta la profundidad con cable y ajustada a la profundidad predeterminada relativa al intervalo de producción. La sarta de terminación es conducida dentro del empacador. Este sistema es limitado para el uso de sargas cortas de pistola (20 a 25 pies) como resultado de la restricción del esfuerzo por el peso envuelto en la corrida con cable (la resistencia del cable).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Configuraciones especiales son utilizadas para operaciones tales como terminaciones duales y terminaciones de control de arenas. La figura 4.26 muestra un tipo de sarta doble, donde mientras más abajo se encuentre situado el empacador en el cable y la sarta conducida a través del empacador, éste se encuentra ajustado más arriba junto con la sarta de tubería.

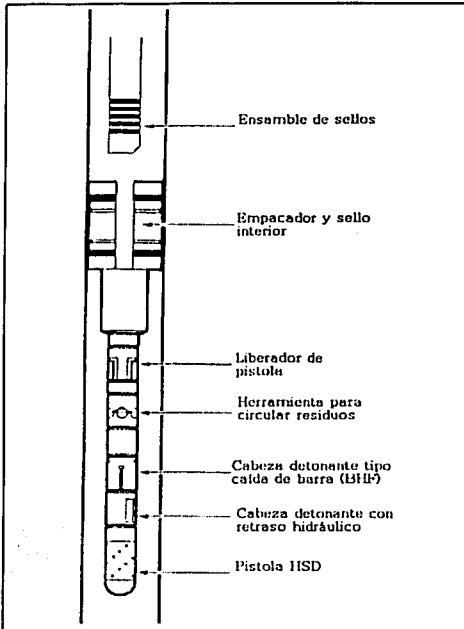


Fig. 4.25- Combinación de pistola transportada con cable/tubería.

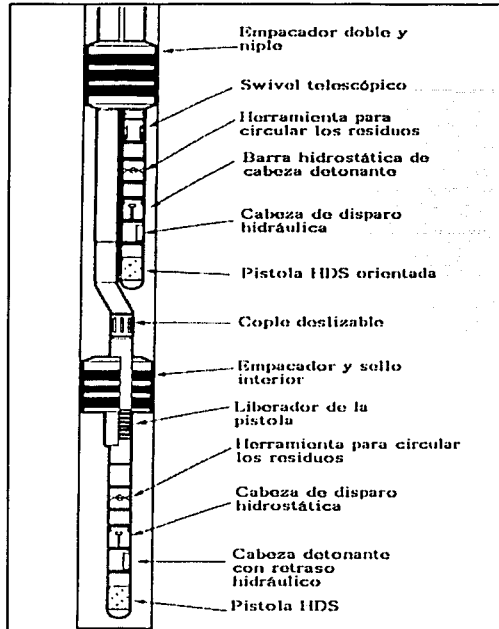


Fig. 4.26- Sarta doble para pistola transportada con tubería.

Control de Funciones.

La sección de los componentes o accesorios para ser utilizados en ensambles de disparos transportados con tubería depende de los requerimientos específicos de la terminación. Como muestra la figura 4.27 se cuenta con una flexibilidad considerable en términos de la selección del equipamiento o métodos para desempeñar la función deseada, además de los sistemas de detonación (los cuales serán discutidos después) los accesorios pueden ser los siguientes:

1. Un marcador radioactivo que es utilizado para el control de la profundidad, la tubería corta de referencia no es necesario si empacadores se encuentran preajustados en el cable.
2. Un sistema circulatorio de residuos el cual permite que los residuos puedan ser circulados de la sarta de tubería, por lo que es necesario que se realicen arreglos a la barra de disparo para prevenir que los residuos interfieran con el impacto de la barra en la cabeza detonante. La tubería corta de referencia no es obligatoria con cabezas detonadas actuadas bajo presión.
3. El aislamiento de los fluidos de la tubería o la presión sobre balanceada puede ser controlado con un simple disco de vidrio (que actúa como barrera) o con el uso de válvulas que funcionen por medio de barra de tiro, procedimientos cable de acero o presión hidráulica.

4. Los sistemas de liberación de la pistola se encuentran disponibles para dejar las pistolas disparadas dentro del agujero auxiliar del pozo o "rathole", dejando la sarta completamente libre para operaciones subsiguientes. Estos sistemas pueden ser adecuados para cable de acero, hidráulicamente, o automáticamente como resultado de las fuerzas de disparo de la pistola.

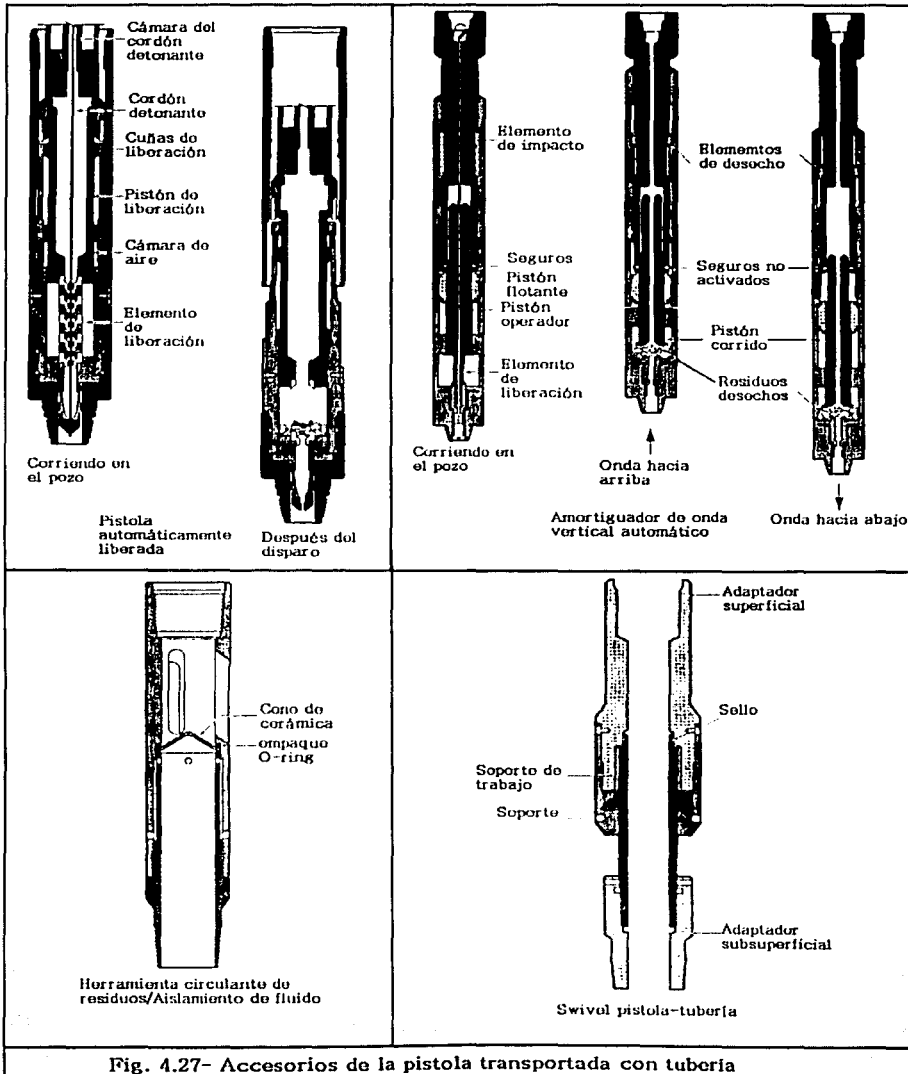


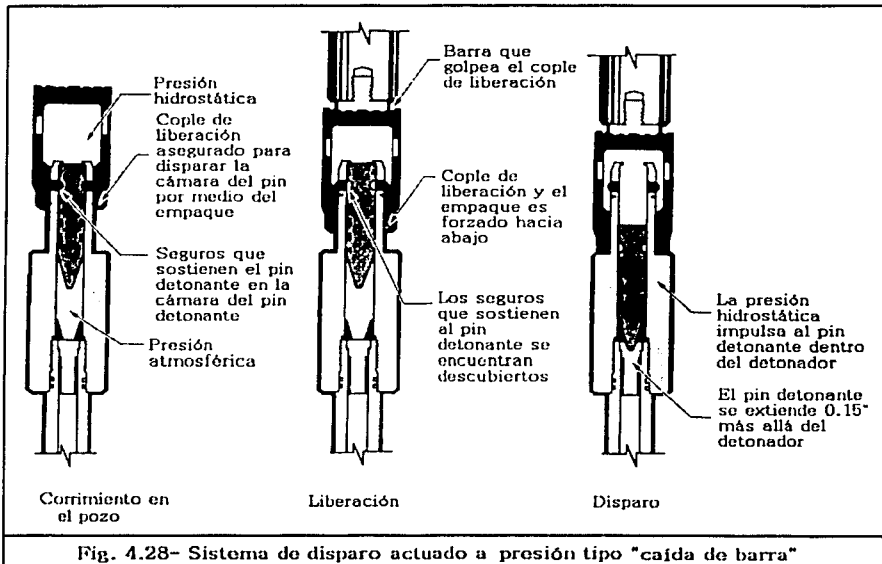
Fig. 4.27- Accesorios de la pistola transportada con tubería

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5. Tanto los amortiguadores de ondas verticales como horizontales se encuentran disponibles para absorber las cargas de las ondas de la pistola disparada en equipos de prueba, particularmente manómetros y montajes electrónicos, que pueden ser parte de la sarta de prueba.
6. Otros accesorios incluidos, pero que no están limitados a su utilización son: equalizadores de presión subsuperficiales, equipo para orientar en el fondo del pozo los disparos en pozos desviados, herramientas de terminación doble y sistemas de detección de disparos.

El armado de la pistola y el disparo.

El armado y el disparo de las pistolas transportadas con tubería difieren en algunos aspectos de los procedimientos utilizados en las pistolas transportadas con cable. Así la sarta de la pistola es armada en una o dos vías; en la superficie, similar a los métodos descritos para cable, excepto que el detonador se encuentra localizado en la cima de la pistola más superficial (disparos de arriba hacia abajo) o bien en el fondo del pozo, por medio de correr un ensamble detonador reemplazable dentro del pozo con cable o línea de cable y conectados a la sarta de la pistola, la cual fue previamente ajustada a la profundidad deseada.



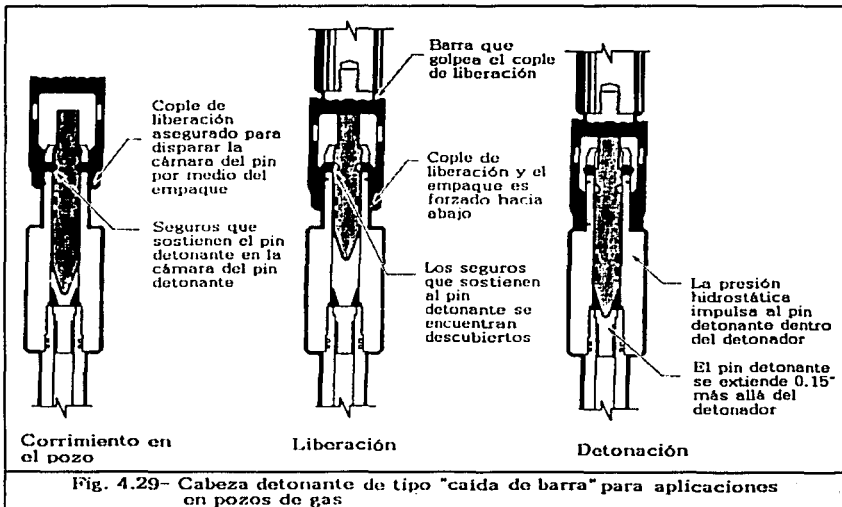
Las pistolas se encuentran configuradas para dispararse de arriba hacia abajo (primeramente por razones de seguridad). La sarta de la pistola es armada en superficie solo hasta después de que la pistola ha sido bajada dentro del pozo y puesta a una distancia segura por debajo del piso de trabajo usualmente por medio de instalar una junta segura 10 pies o más en longitud entre la pistola más superficial y la cabeza detonante. Esta junta de seguridad contiene un cordón detonante sin contener cargas. En el caso de una mala corrida y la remoción de una sarta de pistola no detonada, la cabeza de detonación se remueve primero, permitiendo un manejo seguro de una sarta con problemas en su funcionamiento, cuando la pistola es bajada ya armada con una cabeza de detonación reemplazable, la cabeza ya no se corre dentro del pozo hasta inmediatamente antes de la operación de disparo.

En caso de no dispararse, la cabeza es recuperada antes que la sarta sea retirada del pozo. La mayoría de las sargas de disparos transportadas con tubería son disparadas con detonadores de percusión, los cuales son activados por el impacto de un pin de disparo similar a la detonación de un rifle común o revolver. EED's corridos en cable son utilizados con menor frecuencia, su uso envuelve sistemas eléctricos en el fondo del pozo de conexión húmeda (electrical wet connect systems)

Cuatro tipos básicos de sistemas de disparos son utilizados.

Sistema de tipo "Caída de barra" (drop bar).

Los sistemas modernos de "caída de barra" normalmente dependen en el impacto de la barra para activar el pin detonante. Presión hidrostática es requerida para manejar el pin dentro del detonador de disparo de percusión de la pistola (figura 4.28) Los requerimientos de presión hidrostática permiten el manejo seguro de la cabeza en la superficie.



Una opción especial de en pozos de gas utiliza el impacto de la barra para enviar el pin detonante dentro del detonador (figura 4.29) este último sistema, envuelve algunos riesgos en la seguridad en superficie y un cuidado especial debe ejercerse en el manejo e instalación.

Disparos con presión en tubería.

Incrementando la presión en la tubería a un determinado nivel, el pin detonante es liberado y la presión lo lleva dentro del detonador. La mayoría de los sistemas incluyen una estipulación para un tiempo de retraso ajustable entre el desprendimiento del pin y la detonación. Durante el retraso la presión en la tubería puede ser reajustada para establecer las condiciones deseadas de disparo la figura 4.30 muestra un sistema de retraso controlado hidráulicamente.

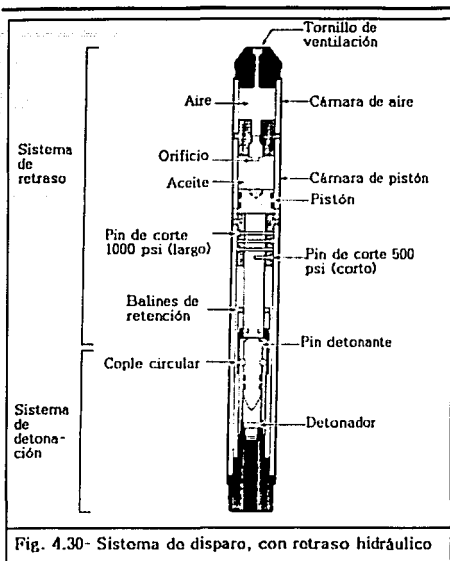


Fig. 4.30- Sistema de disparo, con retraso hidráulico

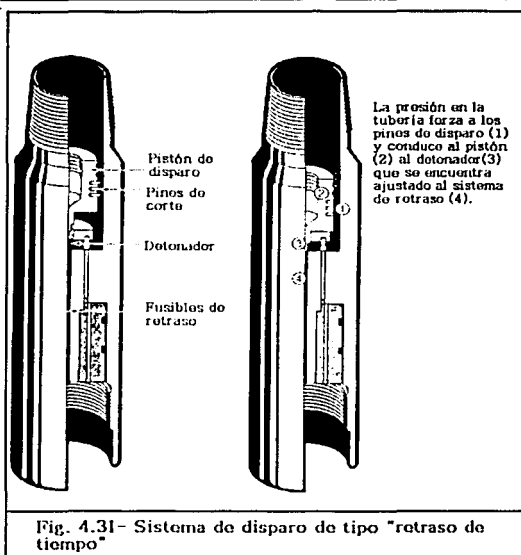


Fig. 4.31- Sistema de disparo de tipo "retraso de tiempo"

Un sistema detonador de retraso con fusibles electrónico mostrado en la figura 4.31 se encuentra disponible, en este sistema la presión en la tubería libera un pistón de disparo que pega en el encendedor iniciando al detonador electrónico de retraso, después del retraso diseñado, el fusible electrónico inicia el disparo de la pistola. La longitud en el retraso es predeterminada, cuando se lleva a cabo el ensamble por la instalación de uno o más fusibles electrónicos arreglados en serie.

Disparo con presión diferencial.

Después de que el empaquetado es colocado, la presión en el espacio anular (tubería/TR) se incrementa, creando una presión diferencial a través de la cabeza de disparo. A una presión diferencial predeterminada, el pin detonador es liberado y la presión en la tubería lleva al pin dentro del detonador (figura 4.32)

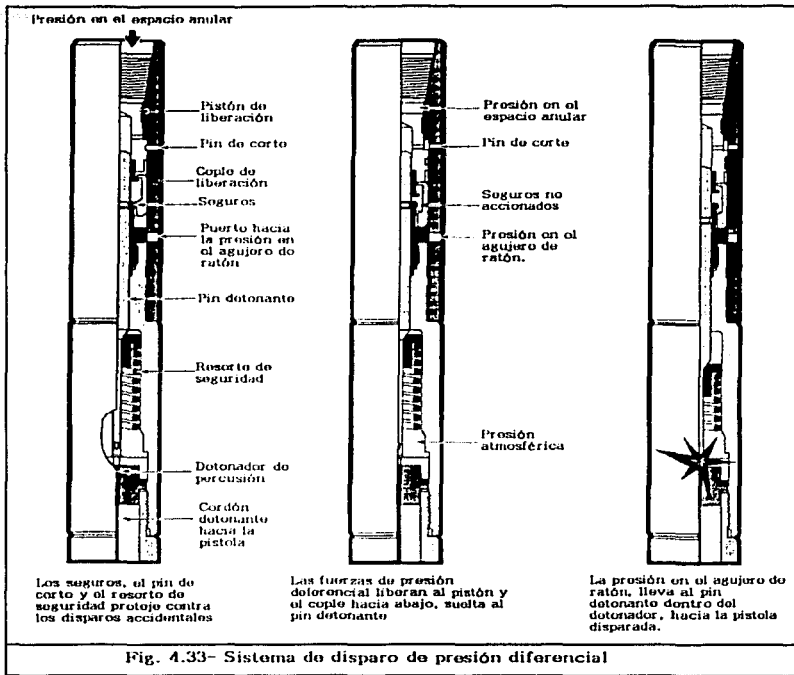
Disparo eléctrico

Un cable eléctrico acopla un conector húmedo en la cabeza de disparo y corriente eléctrica es aplicada para disparar un detonador convencional (figura 4.33)

Cabezas de disparo reemplazables

Todos los sistemas exceptuando el sistema de disparo por presión diferencial pueden ser corridos con cabezas de disparo reemplazable, esto permite un incremento en la seguridad y confiabilidad por medio de permitir que la sarta de la pistola ser corrida dentro del pozo sin cabezas de disparos. Una vez que la pistola es posicionada, la cabeza de disparo se corre en el pozo con cable o "slickline" y coloca la pistola en posición. El cable o "slikline" se remueve o se puede dejar en el lugar dependiendo en el tipo de sistema, la pistola es después disparada. La figura 4.34 muestra un sistema común de cabeza de disparo reemplazable que actúa por impacto.

Sistemas de disparo redundantes.



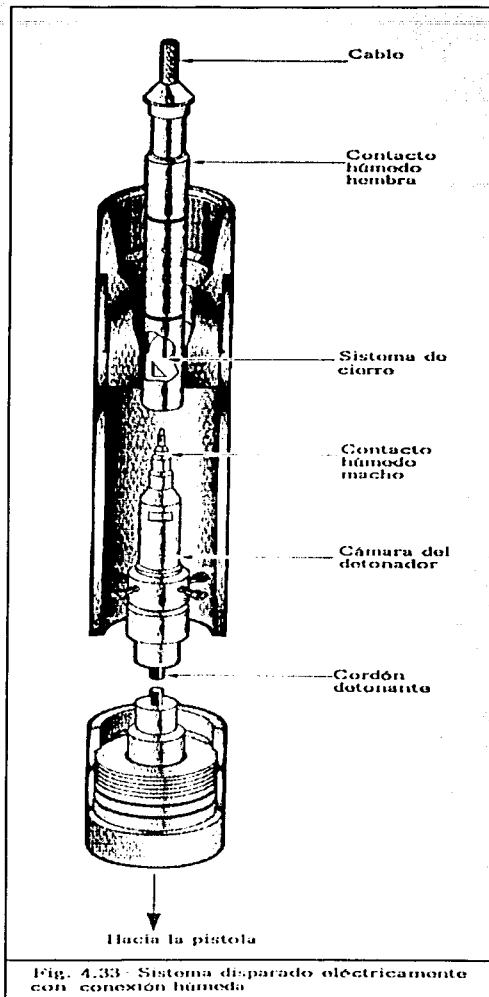
La confiabilidad de los sistemas de disparo es muy importante en vista del tiempo y el costo envueltos en la remoción y la corrida nuevamente de la sarta de la pistola que fallo en el disparo.

Los sistemas de disparo redundantes reducen grandemente la posibilidad de un fallo en la corrida si una de las cabezas de disparo falla en la detonación la figura 4.35 ilustra una variedad de cabezas de disparo redundantes y su configuración. Opciones adicionales se encuentran disponibles por medio del uso de cabezas de detonador eléctrico de retrazo (figura 4.31) o bien de otro diseño de cabezas multifuncionales. El orden de activación de las cabezas se determina por las condiciones específicas del pozo. Todas las cabezas modernas de disparos transportados con tubería pueden ser combinados para establecer la redundancia porque las cabezas también pueden ser corridas secuencialmente como sea requerido.

Disparos selectivos

Una aplicación particularmente útil de los sistemas redundantes de disparo es la habilidad de disparar dos zonas por separado en un intervalo largo (figura 4.36). La primera zona para ser disparada usualmente es la más baja, por medio de una cabeza detonada a presión (figura 4.30 a 4.32), después de que la zona más baja es disparada y probada, se procede con la siguiente zona disparada. La cabeza de disparo para esta zona no debe ser del tipo de disparo por presión en tubería por que las perforaciones en la zona más profunda impiden el uso de un incremento de presión en tubería para disparar la segunda pistola.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

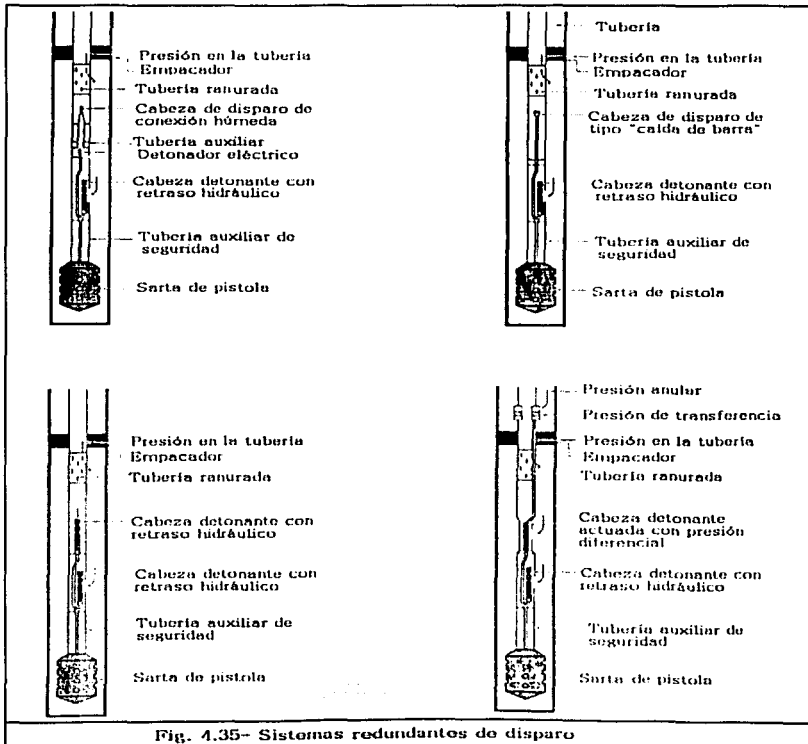
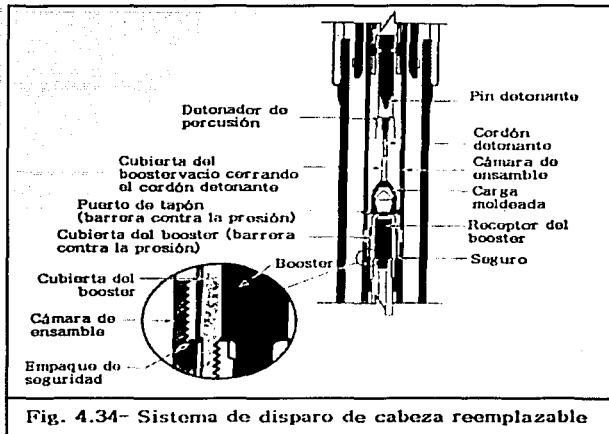


Las terminaciones con sarta doble (figura 4.26) son también disparadas selectivamente. Las sartas son separadas, así que hay una considerable amplitud en la selección del sistema de disparo.

Aplicaciones de las pistolas transportadas con tubería.

Las Terminaciones con éste sistema caen dentro de dos tipos básicos, Temporales (representan la mayoría, de 70% a 90% de las terminaciones de disparo transportadas con tubería) y Permanentes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



En las Terminaciones Temporales las pistolas se corren dentro del pozo en una sarta de trabajo después de que las pistolas son disparadas, algunas veces permite la limpieza de los disparos y una posible prueba al pozo, el pozo es matado con el menor daño o el mejor fluido de terminación compatible para la formación (todos los fluidos crean un mayor o menor grado un daño en la permeabilidad) y la sarta de disparos transportados con tubería es removida, los procedimientos de terminación son después implantados (acidificaciones, fracturamientos, empacamientos de grava, etc.).

En las Terminaciones Permanentes con pistola transportada con tubería las pistolas son corridas dentro del pozo al final de la sarta de producción. Las pistolas permanecen en el pozo después de las operaciones de disparos y pueden ser arrojadas dentro del agujero secundario en el pozo o "rathole" si se desea (figura 4.37) no se requiere matar al pozo después de los disparos.

Las pistolas modernas liberan los instrumentos, dejando una entrada completa en la tubería de la sarta de producción, facilitando las operaciones subsecuentes con cable como registros de producción o trabajos de corrección.

Terminaciones temporales de disparo transportadas con tubería

Hay cuatro aplicaciones básicas para terminaciones temporales.

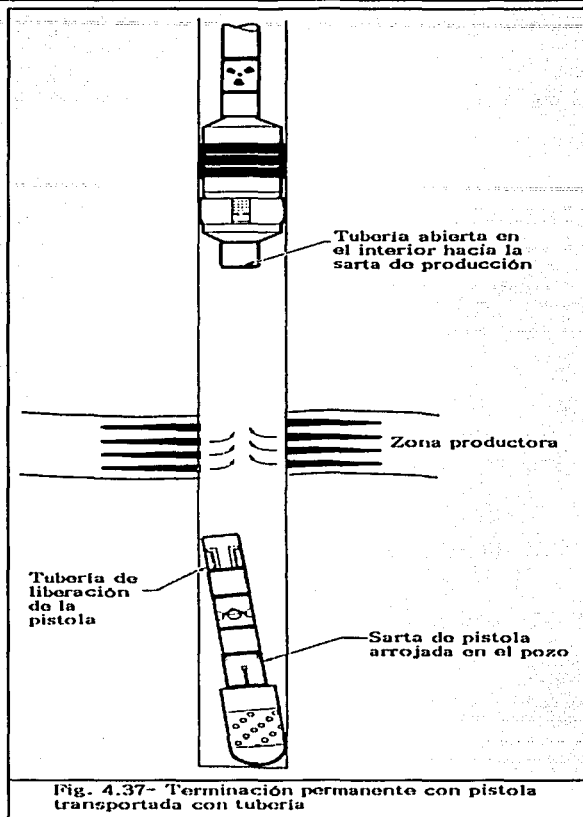
1. Grandes intervalos o pozos multizonas. Grandes intervalos o pozos que envuelven producciones de diversas zonas espaciadas mezcladas dentro de una sola sarta de producción, son terminados eficientemente con una sarta de trabajo temporal. Este acercamiento provee los beneficios de disparos transportados con tubería mientras provee la remoción de sargas de pistola grandes para que no interfieran con operaciones futuras.
2. Empacamientos de grava. Nuevas técnicas proveen la instalación para empacamiento de grava en el mismo viaje junto con las operaciones de disparos transportados con tubería.
3. Pozos con ambientes hostiles. Con una planeación cuidadosa, las terminaciones permanentes pueden establecer una seguridad mejorada en operaciones donde la alta presión alta temperatura o gas amargo (H_2S) predominan.
4. Terminación doble. Dos zonas de producción pueden ser perforadas selectivamente con una sarta doble.

4.4 Pistolas transportadas con tubería flexible.

La introducción de la tubería de diámetro pequeño hacia abajo del pozo productor para desarrollar operaciones simples de trabajo fue probada por primera vez en 1960. Desde entonces, la tubería flexible ha crecido uniformemente en popularidad y su uso se ha expandido desde el transporte de fluidos a la zona a ser retrabajada hasta una gran variedad de aplicaciones, incluyendo los disparos.

La tubería flexible es altamente resistente sin embargo es tubería de acero muy dúctil, usualmente de diámetro externo de 1 ¼ pulgada (aunque 1 ½ o 1) pulgada en diámetro en tubería puede ser utilizada). La tubería es enredada en un riel portátil en longitudes de más de 19 000 pies. En el sitio del pozo, la tubería es desenrollada del tambor, carrete o "reel" y conectada alrededor del cuello de ganso y alimentada a través del inyector, preventor tipo "stripper" y el preventor de reventones (BOP) dentro del pozo. El inyector mueve la tubería flexible dentro y fuera del pozo y soporta la misma en el pozo.

El "stripper" mantiene un sello de presión alrededor de la tubería. Como se establecerá en el capítulo 8, los dispositivos con tubería flexible proveen una solución efectiva al reto de disparar en pozos altamente desviados o bien horizontales. Si bien no cuenta con la resistencia de las sargas transportadas con tubería convencionales, el sistema de tubería flexible provee ahorros significantes en costo y tiempo con sargas de pistolas de menor diámetro y más ligeras.



En este caso una línea de cable eléctrico es preensamblado dentro de la tubería flexible, en el sitio del pozo, el montaje de tubería flexible / cable es conectado a la sarta de la pistola con una cabeza de cable modificada. El sistema provee comunicación hacia los sensores de la sarta de herramientas y a los medios de detonación de la pistola. La tecnología de la tubería flexible se desarrolla rápidamente y avances significativos en el disparo de pozos se están llevando a cabo.

4.5 Colocación de la pistola a la profundidad

Disparos transportados con cable

Las pistolas son posicionadas a la profundidad con referencia a las mediciones de registros a pozo descubierto. El procedimiento envuelve el volver a correr el registro en el pozo después de que la TR es colocada, con herramientas de rayos gamma y / o neutrón se corre en combinación con el detector de coples. La herramienta rayos gamma / neutrón, la cual registra a través de la TR, se correlaciona con el registro de agujero descubierto (por ejemplo la herramienta rayos gamma /

neutrón es ajustada para leer precisamente la misma profundidad que el registro de pozo descubierto).

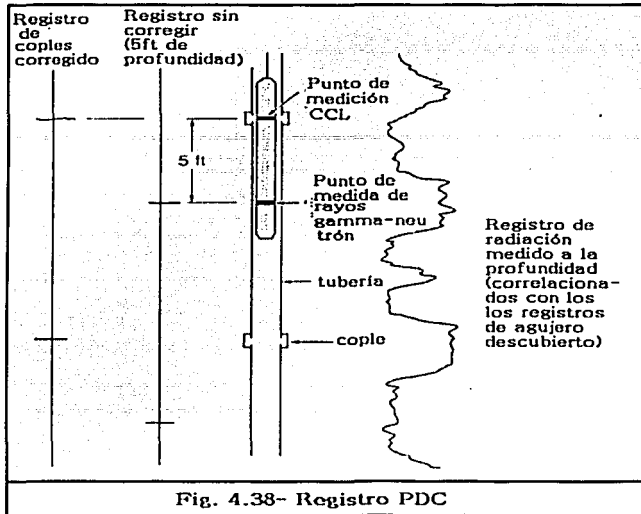


Fig. 4.38- Registro PDC

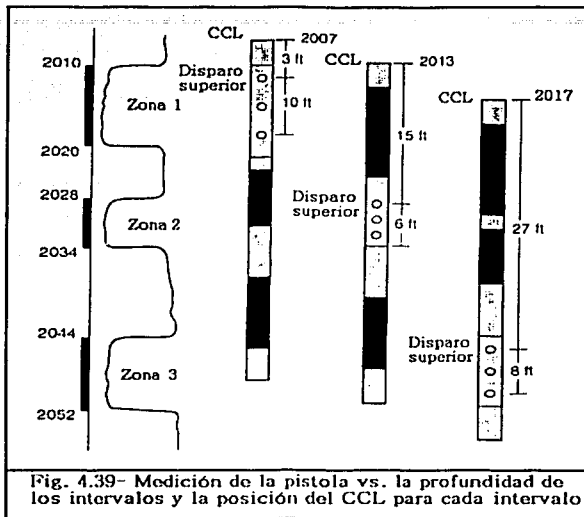
El registro de detector de coples de TR es leído con referencia al registro de rayos gamma / neutrón y éste con el registro de agujero descubierto. Esta adaptación o acomodo de registros es comúnmente llamado "registro de control de profundidad de disparo" (Perforating Depth Control log PDClog). Antes de poderse utilizar las mediciones iniciales de profundidad de coples PDC, los coples deben ser ajustados para indicar la profundidad correcta, así son ajustados por el espaciamiento entre los puntos de medición del localizador de coples de TR y las herramientas rayos gamma/neutrón.

La determinación adecuada de éste desplazamiento en la superficie es fundamental para un adecuado control de la profundidad. Debe notarse que el desplazamiento varía dependiendo de la configuración de la sarta de herramientas. Un ejemplo de desplazamiento de 5 pies (representado el error en la profundidad que pudiera haber ocurrido si no se hubiese realizado la corrección), se muestra en la figura 4.38. Los collares en el registro PDC sin corrección se encuentran 5 pies más abajo con respecto al registro de radiación, el cual ha sido correlacionado con el registro original de pozo descubierto.

Con registros de PDC revisados para ajustar correctamente y los localizadores de coples son corregidos en el desplazamiento, la sarta de la pistola equipada con un localizador de coples (y / o herramientas de rayos gamma o neutrón) se corre dentro del agujero. Antes de llegar a la profundidad a disparar (determinada por el registro a pozo descubierto), los coples son ajustados en los coples correctos del registro PDC. Consecutivamente los coples son registrados sobre el intervalo de interés para establecer un registro permanente.

Antes que la sarta de la pistola sea corrida dentro del pozos, el desplazamiento entre el punto de medición de localización del cople de la TR y la superficie cima o la referencia para cada pistola se determina adecuadamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La sarta de la pistola es después posicionada a la profundidad para los disparos, corrigiendo de nueva cuenta por el desplazamiento entre el punto de medición del localizador de coples de la TR y el disparo superior de cada pistola. La figura 4.39 presenta un ejemplo de una sarta de tres pistolas que serán disparadas selectivamente para perforar tres zonas separadas. Debe notarse el desplazamiento entre el cope localizador y el disparo superior en cada una de las tres pistolas, también debe resaltarse que son requeridas las profundidades del cope localizador para corregir el posicionamiento de la sarta en cada zona.

La confianza del control de la profundidad puede ser mejorada por medio de la inclusión de una junta corta o larga en la sarta de TR con cerca de 500 pies de la zona a dispararse (como referencia) o bien alguna otra anomalía en la sarta de TR/tubería de manejo (la parte de arriba del liner, empacador, etc.) también puede servir como punto de referencia.

El marcado del cable puede acelerar el proceso de registro PDC, esta marcar (marcas con cinta en el cable) provee un indicador de control de profundidad independiente. La necesidad de múltiples coples extendidos de ajuste son eliminados. El cable es detenido en la marca, la profundidad es ajustada, uno o dos collares son registrados y la pistola es disparada.

La precisión del posicionamiento con los procedimientos de registros PDC es de cerca de 1 pie, asumiendo que no hay movimiento o corrimiento de la pistola después que el carrete de cable es detenido en la superficie. El corrimiento ocurre como resultado de la elasticidad del cable y la fricción dentro del pozo. Los factores que contribuyen al corrimiento incluyen: una excesiva velocidad del cable durante el registro de ajuste, la profundidad, pata de perro o desviación del pozo con la presencia de grandes pesos que aumentan la tensión en el cable, pesados ensamblajes de pistola, fluidos viscosos en el pozo o espaciamentos cortos entre la pistola y la TR.

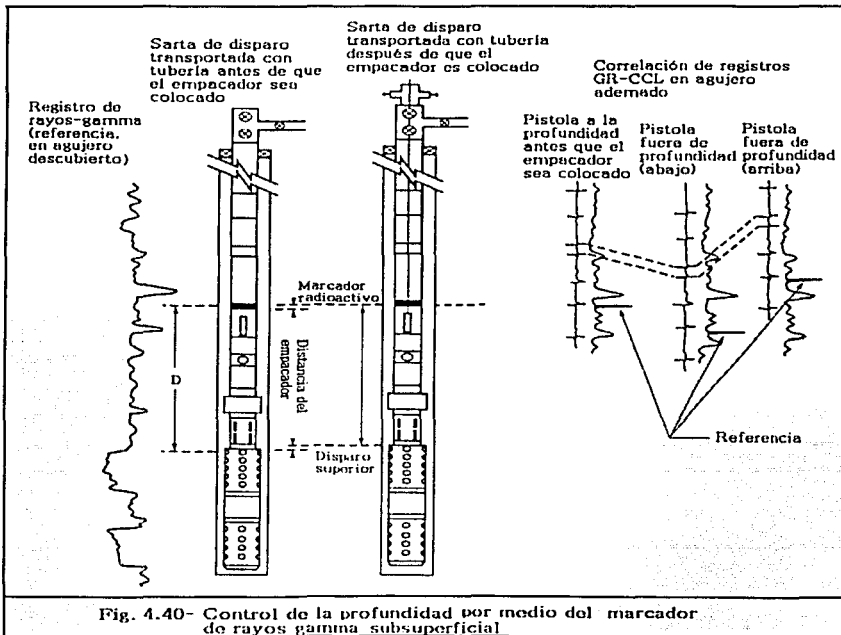
El corrimiento puede detectarse por medio de detener la herramienta en un collar y notar la diferencia en la lectura de la profundidad entre la profundidad real en el registro y la profundidad medida por el aparato de medición (odómetro). El valor determinado debe ser el desplazamiento entre el punto de medición del cope localizador de la TR y el disparo de referencia en la pistola. Cuando hay la presencia de corrimiento, la distancia puede variar por algunos varios pies. Si el corrimiento es un problema serio y no puede ser eliminado, se recomienda que la pistola sea

disparada "en el viaje" (la sarta de herramientas soportada adecuadamente y la sarta moviéndose despacio a una velocidad consistente). Una lectura meticulosa de la medición de control de profundidad es esencial para operaciones subsiguientes y para problemas en los disparos.

Disparos transportados con tubería.

Las pistolas que se corren con tuberías son posicionadas a la profundidad de referencia obtenida de mediciones de registros de pozo abiertos. Cuatro técnicas básicas son usadas para posicionar la pistola a la correcta profundidad de disparo.

1. El correr un registro a través de tubería (rayos gamma o neutrón) junto con un registro localizador de coples en TR para identificar un punto de referencia en la sarta (marca subsuperficial) y el ajustar a un registro a pozo descubierto.
2. Colocar un empacador con cable a una profundidad conocida y el pasar a través del mismo, la pistola y la sarta de terminación.
3. Colocar un empacador y la pistola en cable a una profundidad conocida y atravesar la sarta de terminación por el empacador.
4. Alcanzar un punto de referencia arreglado y preciso, como es un tapón en el fondo o empacadores.



El método 1 recae en un marcador radioactivo subsuperficial en la sarta, con la distancia desde el marcador radioactivo hasta el disparo mas alto medido en la superficie con precisión. La sarta es corrida dentro del agujero a aproximadamente la profundidad correcta y una sección corta de registrador localizador de coples rayos gamma/neutrón/TR es corrida sobre la zona donde la marca se encuentra localizada.

El rayo gamma indica la posición de la marca subsuperficial o la TR corta de referencia ahí habrá un crecimiento en el registro radioactivo o anomalía en el marcador subsuperficial relativos al registro de rayos gamma de agujero descubierto (figura 4.40)

Ya que la distancia desde la marca subsuperficial al disparo de referencia es conocida la posición de la pistola puede ser calculada y corregida por el espaciamiento que se tenga de la sarta en la superficie.

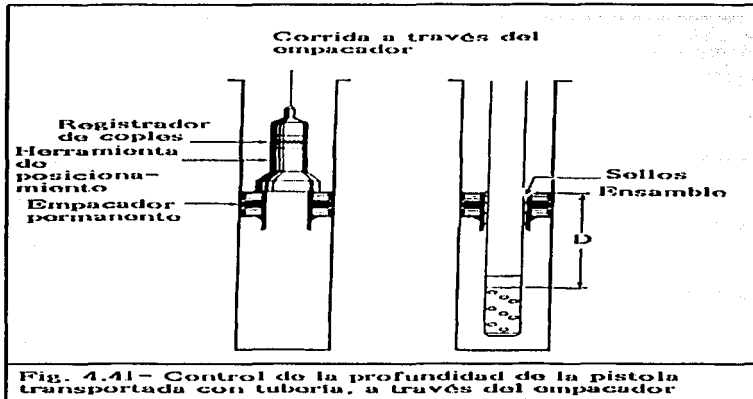


Fig. 4.41- Control de la profundidad de la pistola transportada con tubería, a través del empacador

Después de que el empacador es colocado, el registro localizador de coples de rayos gamma/neutrón/TR debe ser corrido nuevamente como una última confirmación que la pistola se encuentra a la profundidad adecuada.

El método 2 recae en la colocación de un empacador permanente a la profundidad con cable y después el asentamiento de la pistola y la sarta de terminación (con el ensamble sellado) a través del empacador (figura 4.41)

El método 3 envuelve el correr la pistola con cable por debajo del empacador, el cual es colocado con cable. La sarta de terminación y el ensamble sellado son manejados dentro del ensamble empacador / pistola (figura 4.42) El sistema es limitado a sarts de pistolas cortas (cerca de 20 a 25 pies) como resultado de la resistencia del cable que lo limita.

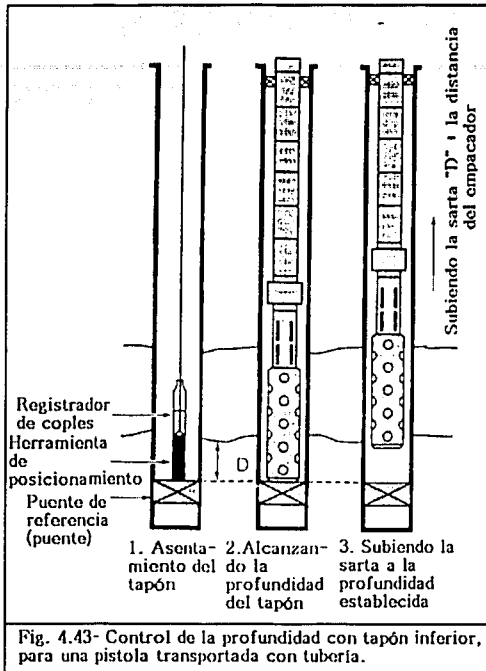
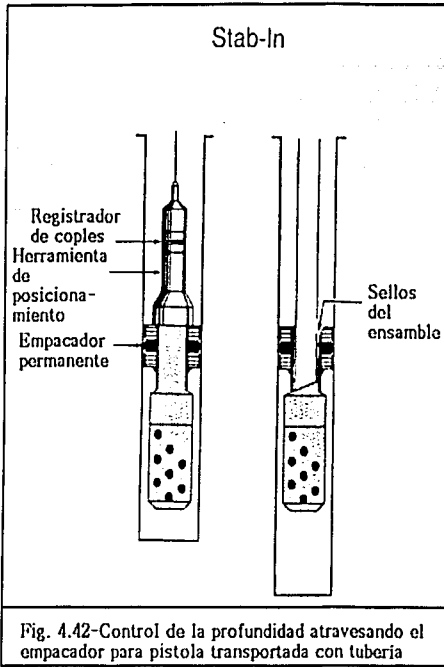
Los métodos del primero al tercero proveen un control de profundidad preciso de cerca de ± 1 pie. El método 4 envuelve la colocación de un tapón retenedor a una profundidad deseada, después el corrimiento de la sarta hasta la profundidad del tapón y el retraer la sarta hacia arriba a una cantidad precalculada (figura 4.43) sin embargo con éste método la precisión puede reducirse si se encuentran residuos en la parte superior del tapón.

Disparos en pozos horizontales

Como se presentó en el capítulo 3 el control de la profundidad en pozos horizontales puede ser menos crítico que en los pozos verticales, sin embargo los métodos de control de profundidad son necesariamente diferentes. En la terminación horizontal, el control de la profundidad no puede estar basado en las usuales correlaciones de rayos gamma, porque generalmente se encuentra un inadecuado comportamiento en el registro de rayos gamma. De esta forma el control recae en el

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

reconocimiento de una junta de tubería corta de indicación o bien en una junta marcada radiactivamente insertada dentro de la sarta de TR justo antes de la zona productora. En la sarta de tubería flexible, la junta de tubería corta puede ser detectada con localizador de coples de la TR. Alternativamente, la junta marcada radiactivamente puede ser detectada con una herramienta de rayos gamma.



4.6 Consideraciones en la Planeación

Se debe tener precaución en los métodos individuales de transporte, los cuales deben ser considerados para asegurar que los objetivos de terminación no se vean afectados.

Pistolas transportadas con cable.

Además de los problemas operacionales generales, diversos problemas son específicos al tipo de pistola básica.

Problemas operacionales generales

Las corridas que fallan, son resultado del mal funcionamiento del sistema de pistola y representan el problema más común. Las fallas en la detonación usualmente son causadas por circuitos sin la longitud adecuada o circuitos abiertos que no permiten el disparo del detonador. La fuente de tales dificultades típicamente es en el equipo asociado (el cable conductor de energía, cabeza del cable, las herramientas de localizador de coples, rayos gamma/neutrón/TR, o adaptadores subsuperficiales) en lugar de la pistola misma. La frecuencia de fallas en los disparos es baja, va del 3% al 5%, las fallas son minimizadas por medio de un mantenimiento preventivo del equipo y un cuidadoso ensamble de la sarta de disparo.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fallas de la pistola para disparar correctamente (suponiendo una conexión eléctrica adecuada del detonador) pueden presentar dificultades especiales, tales funcionamientos inadecuados caen dentro de dos categorías básicas:

- Detonaciones de bajo orden; el cordón detonante y las cargas explosivas arden rápidamente en vez de detonar. Una conexión balística pobre entre el detonador y el cordón detonante resultado de procedimientos incorrectos de armado generalmente es la causa de un completo bajo orden. Los jets no se forman.
- En las pistolas de soporte hueco el gas de los explosivos quemados es atrapado en el soporte y puede resultar en presiones que van de 900 a 3500 psi, dependiendo de la pistola. Se debe poner especial atención al drenaje del gas de las pistolas recuperadas para evitar una situación peligrosa.

Una situación mucho más seria que se presenta en el fondo del pozo es experimentada con las pistolas de soporte hueco cuando una parte de la pistola es disparada normalmente, seguida por detonaciones de bajo orden de las cargas restantes. La condición resulta generalmente del daño al cordón detonante durante la carga de la pistola aunque un cordón detonante defectuoso resulta ser un factor adicional. Cuando el cordón detonante es interrumpido, las cargas sin disparar son estalladas en forma ascendente (o descendente si la secuencia de disparo va de arriba hacia abajo) por la onda de detonación de la parte más baja de la pistola. Estas cargas detonan en bajo orden o "abombamiento" al final de la pistola resultando en un excesivo abollamiento o ruptura del soporte. Los problemas van desde dificultades de recuperación hasta la pérdida de la sarta de la pistola.

Detonaciones de bajo orden con pistolas completamente expandibles o semi expandibles pueden causar la repetición de corridas y pérdida de tiempo, pero generalmente no resultan en operaciones de pesca. Los problemas de detonación de bajo orden en todos los tipos de pistola pueden ser minimizados por medio de la cuidadosa atención que se ponga a la carga detonante de la pistola y los procedimientos de armado.

Los problemas de control de profundidad y los disparos fuera de la profundidad deseada resultan primeramente de los errores en la corrección de mediciones de desplazamiento. La no-identificación de los coples resulta común cuando las sargas de TR se corren junto con las juntas de tubería corta y todas de la misma longitud y además de no incluir marcas de distinción en la sarta. Los problemas asociados con el control de la profundidad son minimizados por una planeación cuidadosa de la sarta de terminación, de la examinación detallada de las lecturas de control de profundidad y de una rigurosa atención a los registros PDC y sus procedimientos de ajuste.

Pistolas "a través de tubería"

Las consideraciones operacionales y de control de presión limitan la longitud del intervalo que puede ser perforado en una sola corrida. Cuando el intervalo excede la longitud de la pistola, viajes o corridas adicionales son requeridos para completar la operación. No sólo el tiempo de operaciones incrementa, también se pueden encontrar problemas para mantener el control de la presión sobre balanceada en las subsiguientes corridas de pistola (por que el pozo está fluyendo durante las corridas subsiguientes.).

Los disparos a altos niveles de presión bajo balanceada (requerida en algunos pozos para asegurar la limpieza de los disparos) crean el riesgo de estallamiento de las pistolas y el cable en el agujero con el empuje repentino o surgencia de los fluidos de la formación. Resultados potenciales son los nudos en el cable y costosas operaciones de pesca y un bajo desempeño de flujo del pozo.

El desempeño del pozo puede ser inadecuado por el funcionamiento generalmente bajo de los disparos y su baja penetración de las pistolas "a través" de diámetro pequeño. Aún durante los disparos a razonables niveles de bajo balance, la presencia del daño extensivo a la formación alrededor del pozo puede resultar en un bajo desempeño del pozo también.

Sin embargo el uso de los disparos "a través de tubería" en operaciones de corrección tiene ventajas significantes. El pozo no tiene que matarse y la tubería removida para permitir los disparos nuevamente, resulta una operación con sus propios riesgos y costos adicionales.

Pistola de TR.

Mientras que el desempeño de los disparos es máximo, las pistolas más grandes deben ser disparadas a niveles relativamente bajos de bajo balance, más aún la limitación de la longitud de la pistola necesita de múltiples corridas para disparar intervalos grandes. Sin embargo con cuidadosa atención a la selección de fluidos de terminación y un adecuado nivel de bajo balance o sobre balance, ésta pistola provee un buen desempeño y son utilizadas en un número considerable de terminaciones. Así la pistola de gran diámetro, alta densidad de disparo y multifase utilizada en operaciones de disparos transportadas con tubería frecuentemente son corridas con cable.

Pistolas transportadas con tubería

Las dificultades básicas es decir: las pistolas que falla en los disparos y errores en el control de la profundidad, son similares a aquellos experimentados con sistemas transportados con cable. El fallo de disparos en las pistolas es el principal problema y su seriedad no puede ser sobre enfatizada. Un fallo en los disparos o detonaciones parciales, requieren que el pozo se mate y que la tubería completa sea removida. Dependiendo en el equipo corrido, puede ser necesario el remover el sistema en la cabeza del pozo, barrenar el empacador, etc.

El tiempo adicional de operación al pozo puede ser grande y costoso; los problemas pueden ser minimizados por medio de una adecuada atención a la preparación de la pistola, el ensamble de la sarta y los procedimientos de desplazamiento en el pozo. El uso de sistemas redundantes de disparo pueden ayudar a minimizar los problemas y mejorar la confiabilidad del disparo de la pistola.

La falla en la detonación de la pistola cae dentro de dos categorías:

- Falla en la cabeza de disparo para disparar el detonador y
- La falla en la sarta de la pistola para disparar completamente.

Las fallas para disparar el detonador frecuentemente esta asociada con residuos en la sarta de la tubería, los cuales interfieren con los sistemas de: operación de la caída de barra, disparo a presión o bien con disparo con detonador reemplazable. Ya que la tubería frecuentemente es reusada, fuentes de residuos incluidos: parafinas, propelentes de fractura y otros sólidos precipitados de fluidos sucios en la tubería, son otra fuente de residuos.

Estas dificultades pueden reducirse por medio del uso de fluidos limpios, correr un diablo en la tubería antes de ser corrida dentro del pozo, utilización de menores cantidades de grasa durante el ensamble de la tubería y la instalación de una herramienta para circular los residuos que permitan que los sólidos puedan ser circulados fuera de la tubería antes de las operaciones de disparo o bien operaciones de limpieza con ácido (acid pickling) antes de que la operación para eliminar los residuos de la tubería.

La detonación parcial de la sarta de pistola es usualmente asociada con la interrupción del tren detonante en cualquiera de las transferencias balísticas de la pistola. Así la falla en las conexiones balísticas es la fuente primaria de los disparos parciales o la falla en los mismos. El problema generalmente envuelve conexiones mal realizadas del booster al cordón detonante (usualmente fallan en el aseguramiento del contacto entre el explosivo y el booster). De esta forma si el detonador en la cabeza detonante no se encuentra propiamente instalado en el cordón detonante la pistola entera fallará en el disparo.

Detonaciones parciales en la pistola tienen los mismos efectos que las pistolas transportadas con cable: excesivo abollamiento o ruptura de la pistola cuando las cargas son activadas por la onda detonante. Los resultados tienden a ser más severos en las operaciones de disparo transportados con

tubería debido al menor espesor en la pared del soporte, mayor densidad de disparo y un explosivo incrementado o en el peso por pie de pistola, siendo algunas características de éstas pistolas. Las pistolas transportadas con tubería y disparadas de arriba hacia abajo son también susceptibles a un daño severo si el líquido se introduce dentro de la sarta de la pistola.

La detección en la superficie es importante bajo la luz del alto potencial de la pérdida de tiempo en el equipo, por la incertidumbre acerca del disparo de la pistola. Así la detección del disparo usualmente recae en el uso de acelerómetros y sensores hidrófonos/presión para medir el choque y el sonido. Desafortunadamente la mayoría de los sistemas de detección de disparo sólo indican el disparo de la pistola cualitativamente, ya que estas no indican si toda o sólo una parte de la pistola fue disparada. Un sistema de detección de último disparo, montado en el fondo provee una mejor indicación. Tal sistema puede ser activado por medio del cordón detonante en el fondo de la pistola y provee una señal única después de que un retraso adecuado para permitir que la onda de disparo de la pistola sea disipada. Sin embargo incluso éste sistema no indicará las detonaciones omitidas o no disparadas de algunas de las cargas.

Los problemas de control de profundidad son similares a aquellos encontrados con las pistolas transportadas con cable. Un problema usual en el espacio de salida es que no se encuentren alineadas la marca radioactiva subsuperficial y la pistola, los problemas pueden ser minimizados por medio de una buena planeación, el uso de varias marcas radioactivas subsuperficiales y una adecuada atención a las mediciones y los procedimientos de control de profundidad.

Las pistolas transportadas con tubería exponen los componentes explosivos a las temperaturas de fondo de pozo por periodos extendidos comparado con las operaciones con cable. Por tanto, los rangos de temperatura deben ser minimizados. El uso de explosivos de mayor rango de temperatura es requerido excepto para pozos con temperaturas modestas en la zona de disparo (por debajo de 250 °F), los explosivos de alta temperatura son significativamente más caros que los explosivos estándar y su uso requiere una planeación adecuada, una cuidadosa carga de explosivos en la pistola, ensamble y una rigurosa atención a los sistemas de operación.

Disparos con tubería flexible

Las terminaciones con tubería flexible siguen estando en su primera etapa y generalmente están confinados a operaciones especiales, ya que el equipo usualmente está diseñado específicamente para operaciones individuales, resulta difícil el presentar un análisis comprensivo de las varias fallas que deben ser consideradas, así la precisión en el control de la profundidad y la confiabilidad del disparo de la pistola son los temas de importancia primaria. Es suficiente decir que las terminaciones con tubería flexible y su tecnología tendrán un avance significativo en los próximos años y que la validación en el campo y confiabilidad aumentarán significativamente.

CAPITULO V EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS DISPAROS

5.1 Perspectiva Histórica.

El diseño efectivo de la terminación del pozo depende en un conocimiento razonablemente preciso de las características del sistema seleccionado de disparo. Las pistolas que se desempeñan según lo esperado, proveerán el deseado comportamiento del pozo, un desempeño por debajo del esperado, puede resultar no solo en una baja producción pero también en la incertidumbre sobre su causa.

El API RP en sus distintas ediciones es el estándar reconocido para evaluar el desempeño de una pista, la edición 5 presentada en 1991 es la culminación de 35 años de estudios y recomendaciones del comité del API (las prácticas recomendadas fueron publicadas por primera vez en 1962). Aún que son aceptadas como el estándar para el desempeño de las pistolas, se han creado preguntas acerca de los procedimientos RP como el método confiable de asegurar el desempeño en campo. Sin embargo diversas revisiones a través de los años no han resuelto estas preguntas por completo.

En 1984 preocupaciones acerca de la consistencia en campo de las pistolas llevó a más de veinte compañías operadoras a reunirse en un programa de pruebas especiales de "shoot-out"¹⁰. Los resultados confirmaron que muchas pistolas cargadas con cargas moldeadas similares a las presentadas en catálogos no tenían el desempeño de acuerdo a lo publicado por el API. En 1985 nuevas pruebas indicaron mejoras, así algunas compañías publicaron nuevamente su información API y establecieron información sobre el desempeño más realista. Sin embargo las pruebas "shoot-out" son inadecuadas ya que ellas no indican el problema fundamental de asegurar la consistencia de la calidad del desempeño del disparo.

En 1986 una nueva metodología fue implantada, el nuevo procedimiento de sistema de auditorio de manufactura, el API RP 43 se reconoció como el estándar en la industria resultando en pruebas rápidas, flexibles y bajas en costos con control a nivel del campo.

En noviembre del 2000 se introdujo una nueva versión del API RP 43, así se presentó API RP 19b primera edición la cual fue desarrollada sobre la base de sus antecesores. Estas prácticas recomendadas describen procedimientos estándar para evaluar el desempeño del equipo de disparo para que la caracterización de este desempeño pueda ser revisado por cualquier ora compañía bajo ciertos lineamientos. Así las normas API RP19b reemplazan todas las publicaciones anteriores de API RP43.

Este capítulo señala las nuevas normas API RP 19b primera edición y presenta la ventaja que se obtiene de su implantación.

5.2 Revisión de la Prueba API RP 19b

Los procedimientos señalan algunas de las prácticas y su estandarización tocante a la validación de la información de las pruebas API como una base confiable para comparar las pistolas comerciales y lo más importante el poder simular el desempeño de la pistola a las condiciones en el fondo del pozo.

Algunos elementos de estas normas son:

1. Efectos de los esfuerzos de la roca en la penetración y el desempeño del flujo.
2. Flujo en régimen radial.
3. Son incluidas estipulaciones para la prueba de flujo tanto en núcleos de la formación como en arenas Berea.
4. La información de flujo es expresada en términos relacionados a los métodos analíticos actualmente utilizados para predecir el flujo del pozo.

¹⁰ Las pruebas shoot out se define como las pruebas que se realizan en laboratorio, donde se modelan todos los parámetros que intervienen en los disparos. Se llevan a cabo a Presión y Temperatura Atm.

5. Procedimientos de prueba estandarizados y métodos de reporte son adicionados para la evaluación del desempeño a presiones y temperaturas elevadas.
6. Información más consistente es presentada como resultado de especificaciones más rigurosas para las pruebas.

Así el comité API a tratado de proveer metodología tanto para la simulación en el fondo del pozo como para la parte práctica, estableciendo un balance entre la complejidad de la prueba, calidad de la información y costo.

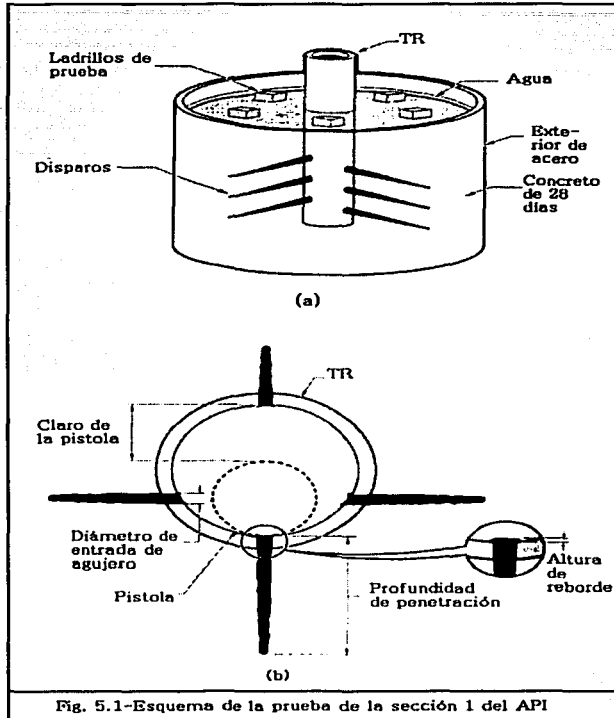


Fig. 5.1-Esquema de la prueba de la sección 1 del API

5.3 API RP19B Procedimientos de Prueba

Desde Noviembre del 2000, toda la información de las pruebas de disparo ha sido desarrollada de acuerdo con API RP19B, la cual es dividida en cuatro secciones:

Sección I Evaluación de los sistemas de disparos a condiciones de superficie en objetivos de concreto.

Objetivo: El propósito de esta sección es el describir la práctica recomendada para la evaluación de los sistemas de disparos utilizando objetivos de concreto/TR bajo múltiples disparos, temperatura y presión atmosféricas (figura 5.1). Información obtenida: Muestra el desempeño del sistema de disparos bajo condiciones representativas de espaciamento entre pistola / tubería, la información abarca el diámetro de entrada de agujero con tuberías de grado L-80, altura de reborde en la TR y la penetración alcanzada en el objetivo.

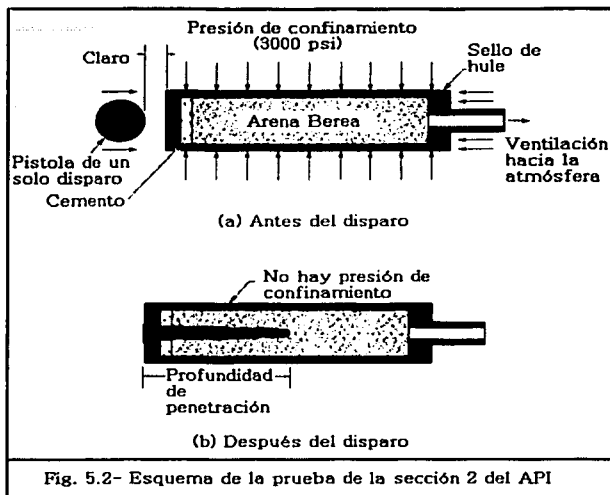


Fig. 5.2- Esquema de la prueba de la sección 2 del API

Aplicación de la información: La información de entrada de agujero puede ser utilizada para predecir los valores de entrada en el fondo del pozo. La validación de esta información resulta de (1) efectos despreciables de la presión del pozo y la temperatura en el tamaño de agujero y la altura de reborde y (2) el uso de TR de grado L-80 en los objetivos disparados. La información de entrada de agujero puede también ser utilizada para comparar las diferentes pistolas, así como la penetración puede ser utilizada para predecir el desempeño en el fondo del pozo y para comparar las diferentes pistolas, el uso de TR de grado L-80 con su estrecho rango de propiedades físicas y sus rigurosas especificaciones de control, permite una calidad consistente en la información y es posible la correlación con otros grados de TR.

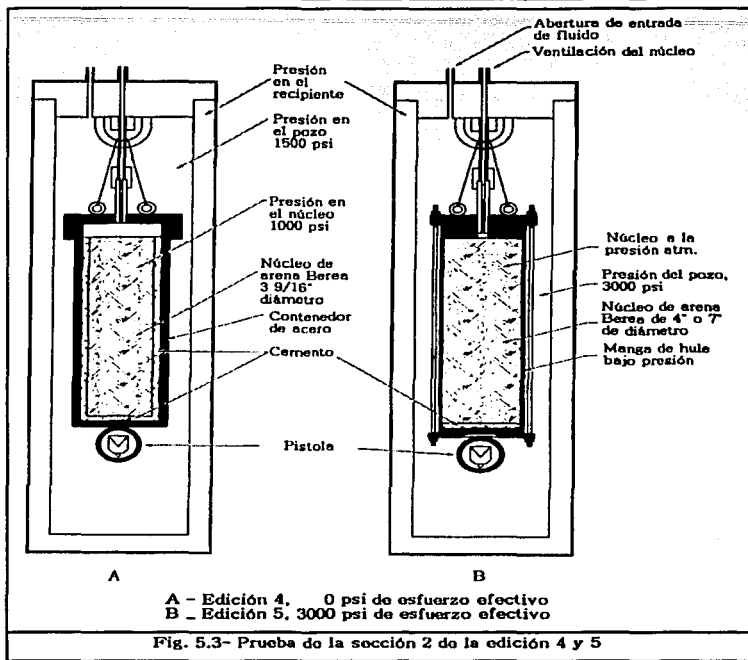
Sección 2 Evaluación de los disparos en objetivos de arena Berea bajo condiciones de esfuerzo.

Esta sección establece el procedimiento de prueba a ser seguido para medir el desempeño de la pistola en arenas Berea sometidas a esfuerzos aplicando la presión encontrada en el pozo a un definido espaciamiento pistola / objetivo (figura 5.2). Esta prueba excluye las pistolas diseñadas para operaciones de empacamiento de grava y aquellas que proporcionan entradas de agujero excepcionalmente grandes y cargas que contengan más de 600 granos (3.9 g de explosivo).

Información obtenida: Se obtiene información acerca de la penetración sobre la base de una roca sometida a esfuerzos, para ser más preciso se incluye la penetración en arena Berea sometida a esfuerzos y el tamaño de entrada de agujero a un espaciamiento simple en una placa de acero objetivo de grado A-36 (de acuerdo a la clasificación ASTM).

Aplicación de la información: La información de entrada de agujero es útil solo como referencia y no puede ser utilizada para predecir los valores en el fondo del pozo. Los agujeros en la placa de acero de grado A-36 (ASTM) son excesivamente grandes y estos valores no pueden ser correlacionados confiablemente a otros grados de TR.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

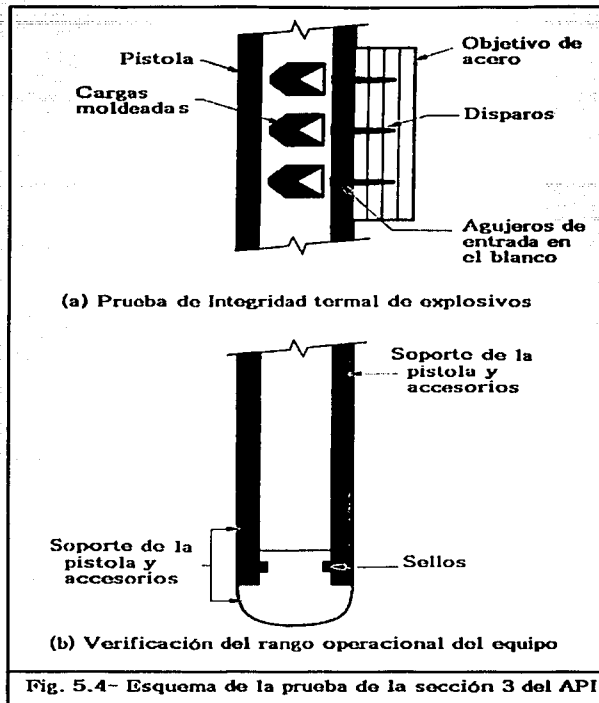


Los disparos en arenas Berea sometidos a esfuerzos (3 000 psi sin presión de poro¹¹) establecen valores de penetración realistas, la información de la penetración es útil para comparar el desempeño relativo a las cargas comerciales y para predecir el desempeño en el fondo del pozo después que la información sea corregida por las variaciones de las propiedades físicas del objetivo (figura 5.3)

Sección 3 Evaluación de los sistemas de disparo a altas temperaturas en objetivos de acero.

Objetivo: El propósito de esta prueba es el evaluar los sistemas de disparos a elevada temperatura y presión atmosférica, los sistemas que utilizan cualquier tipo de explosivo deben ser evaluado por éste método. La prueba es llevada a cabo a temperatura y presión atmosférica externa a las pistolas para evaluar la confiabilidad del sistema explosivo y utilizar acero como el material objetivo. Pruebas separadas son conducidas a temperaturas, presión y tiempo para verificar el rango de operación del sistema. Esta sección provee información sobre los sistemas de disparos evaluados a elevadas temperaturas y presión, la prueba (figura 5.4) incluye lo siguiente.

¹¹ La presión de poro se define como la presión que ejerce el fluido saturante a las paredes del poro y se relaciona con la presión de sobrecarga para determinar la presión efectiva.



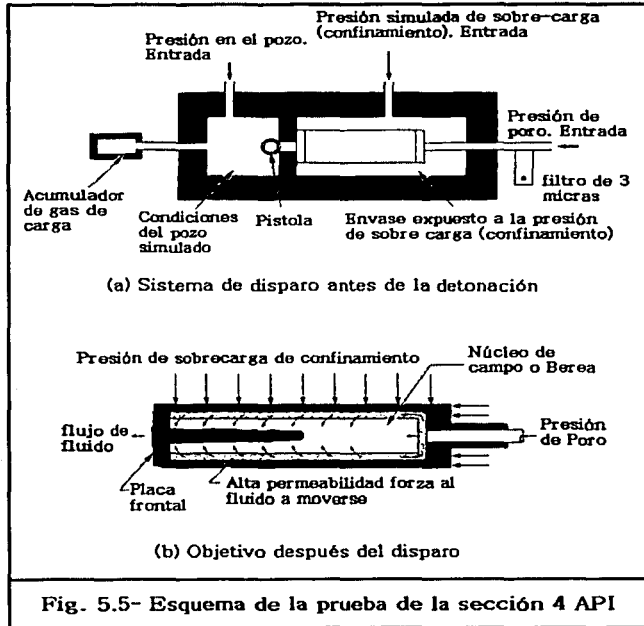
1. Evaluación de la integridad térmica de los sistemas explosivos (por ejemplo; la confirmación de que los sistemas soportarán el rango temperatura / tiempo sin un deterioro significativo del desempeño de la carga o detonación automática de cualquier componente explosivo).
2. Verificación de la resistencia a la presión de la pistola (por ejemplo; confirmar que el sistema soportará el rango de condiciones temperatura/presión/tiempo bajo la condición del peor caso de mínimo material sin la entrada de fluido, deformación de los componente o colapso).

Información Obtenida

Cuatro situaciones discretas son evaluadas.

1. Desempeño a la temperatura. Carga / penetración y entrada de agujero son la información obtenida de las pistolas disparadas en los objetivos de acero después de estar expuestos a un rango de condiciones temperatura / tiempo. El desempeño es comparado con el obtenido con los disparos a condiciones ambientales. El rango de "caliente" o "frío" usualmente se establece de 1.10 a 0.95, por razones técnicas y económicas, el objetivo a disparar es acero. La información de penetración en acero no puede correlacionarse con los objetivos disparados de la sección 1 o 2 o a las condiciones en el fondo del pozo. Así mismo la información de entrada de agujero es útil solo para referencia y no para comparación de las cargas o en la predicción del desempeño en el fondo del pozo.

2. Auto detonación. La resistencia a la automática o propia detonación de cualquier componente explosivo es confirmada.
3. Transferencia de la detonación. Se confirma la transferencia de la detonación de pistola a pistola (el cual representa un factor clave en operaciones con pistolas múltiples transportadas con tubería).
4. Resistencia a la presión. Los resultados del soporte de la pistola y los accesorios, expuestos a 1.05 veces la presión media y a mayores condiciones de temperatura / tiempo, confirman la resistencia al sellado (entrada de fluido) y la deformación del equipo y colapso. Correcciones son incorporadas para asegurar el desempeño satisfactorio bajo el peor caso de condiciones de mínimo material.



Aplicación de la información.

Un desempeño adecuado de la pistola o pistola, después de la exposición a condiciones tiempo/temperatura/presión indican que los sistemas explosivos son estables bajo las condiciones que se encuentren en el pozo. La realización de un desempeño satisfactorio en el campo supone que el equipo y accesorios fueron probados de acuerdo a las especificaciones y que un adecuado procedimiento de aseguramiento de calidad esta siendo observado. También se comprueba que los sistemas funcionarán confiablemente y correctamente bajo ciertas condiciones.

Sección 4 Evaluación del desempeño de flujo bajo condiciones en el fondo del pozo simuladas.

Objetivo: Proveer una medición de desempeño de flujo de un disparo (figura 5.5). Dos juegos independientes de condiciones de prueba pueden ser utilizados:

- Un procedimiento general utilizando arenas Berea, rocas de cantera o núcleos de pozo bajo condiciones específicas (esfuerzos de sobrecarga y poro, presión en la cabeza del pozo y presión diferencial de flujo).
- Procedimientos de prueba estándar utilizando arenas Berea expuestos a flujo radial o axial simulando (dependiendo en la orientación de los planos de estratos), esfuerzos de sobrecarga (4500 psi), presión de poro (1500 psi), presión de poro (1000 psi) y presión de flujo diferencial (500 psi).

Información Obtenida.

La información obtenida de sitio específico y pruebas estándar incluyen CFE¹² (flujo observado bajo 300 psi de esfuerzo efectivo dividido por el flujo teórico para condiciones de prueba dadas), Factor de Reducción de Permeabilidad (PRF¹³) (calculado con CFE, la relación de la permeabilidad de la zona dañada por el disparo a la permeabilidad original del objetivo), configuración del disparo de flujo fluyendo y limpieza, profundidad de la penetración en objetivos de roca sometidas a esfuerzos y tamaño de entrada de agujero con un espaciamiento simple en placa de acero de grado A-36 ASTM.

Aplicación de la información

CFE y PRF pueden ser utilizados para comparar las diferentes cargas comerciales. Sin embargo el traslado PRF a las condiciones de pozo debe realizarse con precaución y cuidado, particularmente para las pruebas estandarizadas en arenas Berea. Las rocas de alta permeabilidad incluyendo Berea, tienden a establecer información optimista de PRF, más aún el daño a la permeabilidad causado por los disparos en el fondo del pozo diferirá de la obtenida por pruebas en la sección 4 del API, aún para los núcleos de pozo. De esta forma la limpieza después de los disparos diferirá de los resultados de las pruebas de laboratorio dependiendo de las propiedades reales de la roca, nivel de bajo balance, efectos dinámicos de almacenamiento de pozo, caídas de producción, composición del fluido y viscosidad, fase de la pistola, densidad de disparo y otros factores. Sin embargo PRF representa la mejor estimación disponible para daño de permeabilidad alrededor del disparo. PRF puede ser usado en modelos analíticos y para predecir el desempeño de la terminación. Las pruebas de la sección 4 del API utilizan tanto rocas de cantera o bien núcleos de pozo bajo condiciones específicas para simular las condiciones de sitio específico en el pozo, estableciendo la información de presión de entrada bajo-balanceada, presión diferencial o diferencial de flujo requerido para una limpieza efectiva y relaciones de volumen de flujo para un tiempo.

La información real de penetración de núcleos obtenida bajo condiciones de sitio específico puede ser utilizada directamente para predecir el desempeño en el fondo del pozo y para la comparación del desempeño de diferentes cargas. La información de penetración en las arenas Berea también puede ser utilizada para la comparación relativa de desempeño de cargas y la predicción de la penetración en el fondo del pozo después de que la información de las pruebas es corregida para la variación de las propiedades físicas del objetivo.

5.4 Validación de la información del API RP 19b

Mientras que un número de mejoras han sido incorporadas a la edición 1 del API RP19b sobre la edición 5 del API RP43, algunas limitaciones permanecen.

Resumen

El API RP19b provee fuentes confiables de los parámetros de desempeño de los disparos.

¹² CFE (Core Flow Efficiency) la eficiencia de flujo en el núcleo.

¹³ PRF (Permeability Reduction Factor) Factor de reducción de la permeabilidad.

1. Tamaño de entrada de agujero y altura del reborde. La sección 1 provee los valores más probables en la base de efectos de simulación en el fondo del pozo de espaciamiento de pistola a tubería (clearance) y por este medio arrojan información que puede ser correlacionada a las condiciones del pozo.
2. Profundidad de penetración. Las secciones 1, 2 y 4 establece información confiable y consistente del desempeño en arenas Berea y concreto que pueden ser correlacionadas a las formaciones en el fondo del pozo o para núcleos del pozo como objetivos de disparos a condiciones de sitio específico que directamente establecerán información sobre la penetración en el fondo del pozo.
3. Propiedades de flujo de los disparos. La información CFE y RPF de las pruebas estandarizadas de la sección 4 son propias para la comparación de diferentes tipos de cargas comerciales pero no pueden ser correlacionadas a las condiciones de pozo.

La prueba de la sección 4 de "sitio específico" en núcleos de pozos reales pueden ser usados para comparar diferentes cargas comerciales y pueden ser utilizadas con precaución para predecir el desempeño de flujo en el fondo del pozo (hay limitaciones en la transformación en la mayoría de las pruebas de simulación en superficie a condiciones de pozo como se describió anteriormente) la información de flujo y el grado de daño en la permeabilidad y el daño alrededor del disparo son la mejor información disponible por la predicción del desempeño en el fondo del pozo. Una limitación es la falta de especificaciones para el control de calidad en el disparo. Históricamente el API ha consistentemente excluido cualquier provisión para el control de la calidad que pudiera asegurar que los disparos en el campo se desempeñarán de acuerdo a la información publicada por el API. Soluciones a éstas limitaciones son presentadas más adelante.

Precisión.

El API RP19b no incluye especificaciones sobre la precisión. Como se presentó en la sección 1 de la prueba, la información de la penetración es aceptable para predecir la penetración en el pozo para los cálculos de flujo en el pozo (ejemplo análisis de sensibilidad). Más aún la normalización de la información no es requerida porque las correcciones necesarias son realizadas automáticamente en los procesos de cálculo. La sección 1 provee el más completo y la mejor medición del desempeño del sistema de pistola de todas las pruebas API, eliminando lo concerniente a que las cargas disparadas individualmente (sección 2 y 4) no siempre podrán desempeñarse como lo hacen en una pistola particularmente a altas densidades de disparo. Estadísticamente también son mejores porque más información se encuentra disponible a las condiciones de interés específico.

Mientras que las pruebas de la sección 2 se realizan bajo esfuerzos, se mejora la calidad de la información de penetración, la especificación de la arena Berea permite que la porosidad varíe de 19% a 21%, resultando en una variación de esfuerzos compresivos húmedos de 9100 a 7000 psi. Estas variaciones pueden resultar en rangos de penetración en arenas Berea que van de 18% (cuando se prueban bajo condiciones específicas de esfuerzo). Obviamente el uso de la información de la sección 2 sin ser corregida para las variaciones que pueda presentarse el objetivo a disparar puede establecer información errónea.

El usuario debe mantener la idea de las correcciones o normalizaciones porque el API no provee procedimientos recomendados para la normalización. La información de la penetración precisa y real puede estar solo dentro del $\pm 20\%$ sin correcciones a la porosidad (esfuerzo) pero con $\pm 10\%$ con tales correcciones (estas desviaciones resultan del comportamiento de la carga misma) El tamaño de entrada de agujero es substancialmente más preciso con la información del API RP19b ($\pm 5\%$) que con la información de las ediciones anteriores ($\pm 10\%$)

5.5 Predicción del desempeño en el fondo del pozo de la información del API obtenida.

Un número de compañías de servicio y operadoras utilizan las técnicas de simulación por computadora en el diseño de la terminación y evaluación basados en la combinación de la teoría y resultados experimentales. Estos programas señalan la predicción de tamaño de entrada de agujero en la TR en el fondo del pozo, penetración de la formación y la productividad del pozo. También adicionalmente características específicas de la carga (sensitividad a los esfuerzos de formación y otros factores) Sin embargo el tamaño de entrada de agujero y la penetración en el fondo del pozo de las pruebas y los resultados de API también pueden ser predichos de algunas relativamente simples expresiones matemáticas. Estas predicciones estarán en un acuerdo razonable con los resultados obtenidos de los productos más sofisticados de simulación computarizados. Desviaciones de menos de 15% pueden ser esperadas en una configuración normal de tubería simple.

Las desviaciones entre los resultados de las expresiones simples y aquellas de los simuladores son mayores (20% a 25%) para terminaciones múltiples de tubería o cuando el espaciamento entre la pistola-tubería (claro) es muy grande.

Tamaño de entrada de agujero.

La dureza de la tubería tiene un efecto directo en el tamaño de agujero del disparo. Para cargas de mayor penetración, con sus mayores velocidades de jet, tamaño de entrada de agujero para TR de acero de varios grados puede ser estimado mediante:

$$d = [2250 + 4.2(x_r) / 2250 + 4.2(x)]^{0.5} dr \dots\dots\dots 5.1$$

donde:

d = diámetro de entrada de agujero en la TR de interés y en la TR de referencia (pulgadas)

x, x_r = dureza Brinell de la TR de interés y TR de referencia, 10 mm de pelota, 3000 kg carga (adimensional)

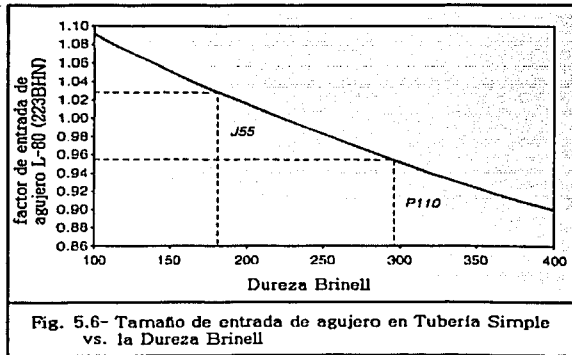


Fig. 5.6- Tamaño de entrada de agujero en Tubería Simple vs. la Dureza Brinell

La ecuación 5.1 fue utilizada para desarrollar la información en la figura 5.6 Entrando en el eje horizontal con la dureza media de la TR de interés (obtenida la dureza Brinell de la tabla 5.1), se procede verticalmente a la curva, reflejándose hacia el eje vertical, obteniéndose el factor de ajuste para los valores de entrada de agujero derivados de las pruebas API. En el ejemplo mostrado, el diámetro de entrada de agujero en una TR P-110 podrá decrecer cerca de 4.5% del valor API de referencia, mientras que el diámetro del agujero en tubería J-55 podrá incrementarse cerca de 3%.

Cualquier acercamiento alternativo con el esfuerzo de cedencia de TR establecerá resultados similares.

Para cargas con liners parabólicos o hemisféricos con menores velocidades asociadas de jet, el tamaño de entrada de agujero puede ser estimado con:

$$d = \left(\frac{\sigma_{yr}}{\sigma_y} \right)^{0.5} d_r \dots\dots\dots(5.2)$$

donde:

σ_{yr} y σ_y = esfuerzos de cedencia de la tubería de interés y la TR de referencia. (ksi)

La ecuación 5.2 fue utilizada para desarrollar la información en la figura (revisar la figura y tratar de obtenerla (figura 5.7) entrando en el eje horizontal con el esfuerzo de cedencia mínimo de la TR de interés (tabla 5.1) se procede verticalmente a la curva de API RP. El reflejo en el eje vertical establecerá el factor de ajuste para el valor de entrada de agujero derivado de las pruebas API.

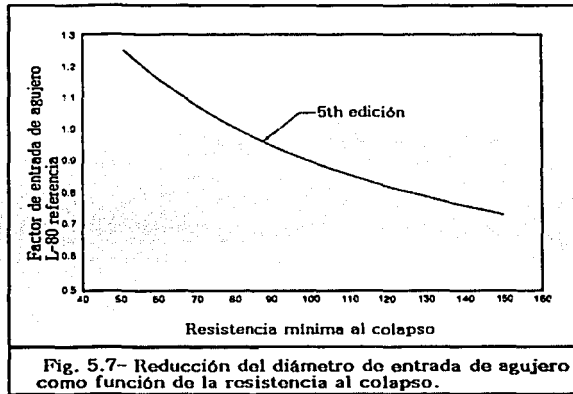


Fig. 5.7- Reducción del diámetro de entrada de agujero como función de la resistencia al colapso.

Algunas veces la información API no se encuentra disponible para un tamaño de TR en particular. La extrapolación de la información de entrada de agujero a un mayor espaciamiento de pistola-tubería clearance que aquella en las pruebas API es abierta a imprecisiones considerables, particularmente en el caso de cargas de grandes agujeros, el acercamiento recomendado es el de requerir que la compañía de servicio desarrolle la prueba en el tamaño de TR deseada.

Para las sarts de tuberías múltiples, el diámetro de entrada de agujero en la segunda o tercera tubería varía de pistola a pistola y de acuerdo al tipo de carga. La mayoría de los productos computarizados disponibles para la predicción del desempeño, pueden calcular el tamaño de entrada de agujero para cargas de mayor penetración en sarts múltiple. Si la información considerada de diámetro de entrada de agujero es crítica, el mejor de los acercamientos es una prueba en superficie en un objetivo simulado en sarta múltiple. Para aproximaciones poco precisas, debe asumirse que el diámetro de entrada de agujero en la segunda tubería mostrará una reducción de la tubería anterior de aproximadamente 10% en el lado donde la TR son separadas solo por el espesor del cople de la TR, y un 30% en el lado opuesto donde la separación es máxima. El diámetro de entrada de agujero en una tercera tubería será de 10% menos que aquella en la segunda tubería.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para cargas de gran tamaño, como aquellas utilizadas en las terminaciones de control de arenas, el único medio confiable para obtener información precisa de tamaño de agujero en sargas múltiples es el desarrollo una prueba en superficie en un objetivo simulado de múltiples sargas de tubería.

Penetración.

Las pruebas de la sección 4 de "sitio específico" en núcleos reales de pozo proveen la base más razonable para la predicción de penetración en el pozo, si no se tiene tal información, el esfuerzo compresivo de formación derivado de los núcleos de campo permiten una transición razonable de la información de la prueba de la sección 2 o 4, o bien la información de la sección 1 para condiciones en el fondo del pozo. El uso de la información de la sección 1 es el acercamiento recomendado.

La información de la sección 1 es correlacionada a condiciones en el fondo del pozo utilizando una versión modificada de la relación entre la penetración y los esfuerzos compresivos de la roca originalmente reportados por Thompson¹⁴. El método de Thompson correlaciona la formación real a la formación de referencia por medio de:

$$\frac{L_p}{L_r} = \exp[0.086[C_r - C]] \dots\dots\dots(5.3)$$

donde:

- L_p = la penetración total en la formación objetivo de interés (pulgadas)
- L_r = la penetración total en la formación objetivo de referencia (pulgadas)
- c = esfuerzo compresivo de la formación de interés (ksi)
- c_r = esfuerzo compresivo de la formación objetivo de referencia (ksi)

En trabajos subsiguientes indicaron que Thompson sobrestimó la reducción en la penetración en formaciones con esfuerzos altamente compresivos. El alto esfuerzo terminal en la relación de Thompson (más allá de 14 000 psi) fue modificado, resultando en la representación compuesta en la figura 5.8. Como lo indica esta figura, una pistola que provee una penetración de 11.8 pulgadas en rocas con un pobre esfuerzo compresivo uniaxial de 7000 psi (punto A) penetrará menos de 7 pulgadas en una formación de 14 000 psi, (punto B) pero penetrará 15pulgadas en un material de 3000 psi (punto C). esfuerzo compresivo C_{mw}, definido como el promedio de los valores de esfuerzos compresivos tomados en forma perpendicular y paralelos a los planos de estratificación de la roca saturada, deben ser usados en la aplicación de la relación de Thompson.

La utilización del esfuerzo de formación conocido para estimar la penetración en el fondo del pozo de la información sección 1 del API envuelve (1) modificación de la penetración de la sección 1 para espaciamentos de pistola-tubería que no se encuentran en el rango del API, (2) determinación en la sección 1 del esfuerzo compresivo interno del objetivo para muestras de esfuerzo compresivo, (3) cálculo del cambio en la sección 1 de penetración resultado de la presencia de una sarga de TR múltiple (si es aplicable), (4) cálculo del cambio en penetración resultado de la diferencia entre el esfuerzo compresivo interno de la sección 1 en objetivo y el esfuerzo compresivo real de la formación en el fondo del pozo, (5) cálculo del cambio en la penetración en el fondo del pozo resultado de los esfuerzos efectivos de la formación y (6) cálculo del cambio en la penetración resultado de TR y espesor de cemento, no considerado en el API RP19b.

Efectos de claro no recomendados por el API.

Como se indicó anteriormente se presentaran instancias donde la información de API no estará disponible para un particular tamaño de TR. Por ejemplo asumiendo que una pistola de 3 3/8 de

¹⁴ Op. Cit. p. 16

pulgada fue probada conforme el API en una TR de 5 ½ pulgadas, pero la configuración en el fondo del pozo envuelve una TR de 7 pulgadas. Hay dos acercamientos posibles para predecir el desempeño en el fondo del pozo.

El acercamiento preferido es el de requerir que la compañía de servicio desarrolle una prueba de la sección 1 en el tamaño deseado de TR. El segundo un acercamiento menos aproximado, que involucra la estimación de la penetración de la sección 1 en la tubería más grande por medio de suponer que la distancia desde el centro de la pistola al final del disparo es constante. Esta aproximación es válida solo para espaciamientos pequeños y su precisión disminuye a mayores distancias de espaciamientos.

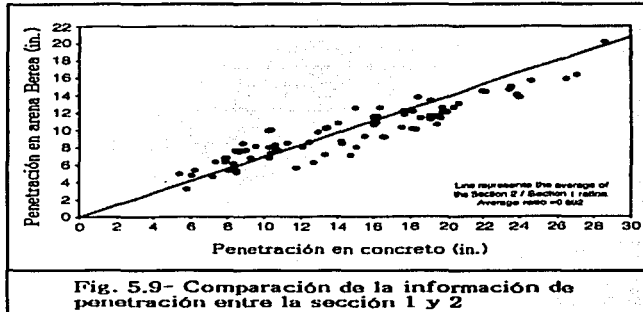


Fig. 5.9- Comparación de la información de penetración entre la sección 1 y 2

Esfuerzo interno del objetivo

La información publicada por el API, indican una relación lineal entre los desempeños de la sección 1 y sección 2 (figura 5.9 y figura 5.10) la reproducción de la información de la sección 1 y 2, para propósitos prácticos es idéntica.

Consecuentemente los resultados de cualquiera de las pruebas pueden ser aplicadas para la correlación de la información del API a las condiciones de pozo. Como muestra la figura 5.11 no hay una diferencia significativa entre los resultados de pruebas en objetivos sin esfuerzos sección 2 edición 4 y el objetivo con esfuerzos de la sección 2 y su configuración. Más aún porque la sección 1 muestra, una relación lineal específica con la sección 2 (figura 5.9 y 5.10), la información de la sección 1 puede ser aplicada directamente a las curvas de Thompson (figura 5.8) en lugar de la información de la sección 2 por simple observación, de la corrección apropiada de esfuerzo compresivo en el objetivo.

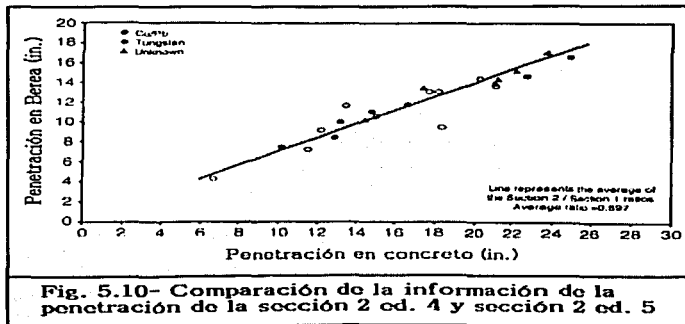


Fig. 5.10- Comparación de la información de la penetración de la sección 2 ed. 4 y sección 2 ed. 5

Un ejemplo de esas relaciones es mostrado en la figura 5.12, una pistola específica penetró 21.10 pulgadas en la sección 1 en el concreto, el cual estaba sujeto a un esfuerzo compresivo del bloque de 7140 psi (punto B). Para un esfuerzo de 7720 psi sección 2 en arenas Berea, la penetración fue de 13.98 pulgadas (punto A) para el punto B (sección 1) para mantener la relación de Thompson con el punto A (sección 2), tendrá que ser proyectado horizontalmente a la izquierda hasta que se intersecte con la curva de Thompson apropiada. La proyección de resulta en el punto C, el cual provee un equivalente o pseudo esfuerzo compresivo húmedo de 2930 psi para la sección 1. Aplicando el procedimiento de la información en la sección 1 resulta en un factor de corrección promedio de 0.41, para determinar el equivalente de la sección 1 del esfuerzo compresivo húmedo interno del objetivo utilizando:

$$C_{mw} = 0.41(\text{esfuerzo} - \text{compresivo} - \text{briquet} - \text{seco}) \dots\dots\dots(5.4)$$

c_{mw} = esfuerzo de compresivo húmedo (ksi)

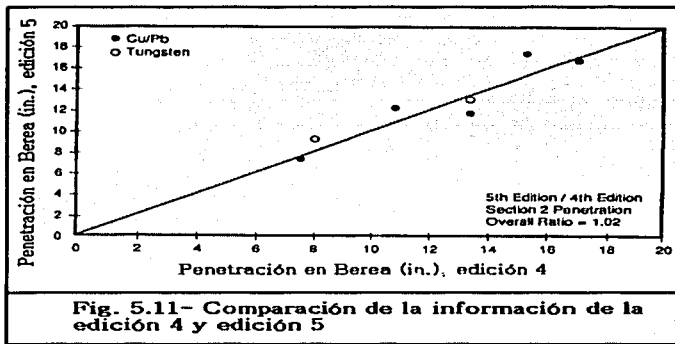


Fig. 5.11- Comparación de la información de la edición 4 y edición 5

Sartas de tubería múltiple

La penetración en el pozo será reducida por la presencia de sartas adicionales de TR, la reducción puede ser aproximada por medio de modificar la penetración de la sección 1, L_{API} y después correlacionar el resultado con las condiciones en el fondo del pozo. El acercamiento más usual para TR múltiples en la ecuación 5.5 donde la penetración modificada L_{API} para una configuración de 3 sartas es;

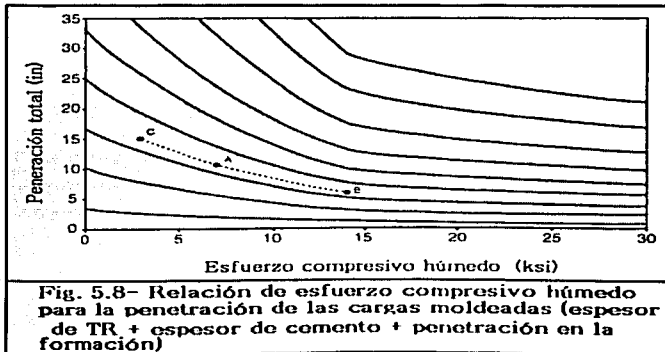


Fig. 5.8- Relación de esfuerzo compresivo húmedo para la penetración de las cargas moldeadas (espesor de TR + espesor de cemento + penetración en la formación)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

L_{API}' = para la configuración de tres tuberías resulta:

$L_{API}' = L_{API} - 3.5 (1^a + 2^o \text{ espesores de pared de la sarta}) - (\text{espesor total del cemento entre la primera y tercera sarta}) \dots\dots\dots(5.5)$

L_{API} = penetración total en el blanco (pulgadas)

L_{API}' = penetración total en el blanco modificada por el efecto de sartas múltiples (pulgadas)

Este acercamiento envuelve el uso de la información generada en la evaluación de disparos por Exxon¹⁵.

Efectos de Esfuerzos de Formación.

Con la penetración modificada con la sección 1, para la presencia de múltiples sartas en el pozo y con el esfuerzo interno del objetivo determinado con la ecuación 5.4 de la sección 1, la penetración en el pozo puede ser calculada con la relación modificada de Thompson mostrada en la figura 5.8 Cuando el valor de C_{mw} no se encuentra disponible para la formación en el fondo del pozo, este puede ser aproximado de la figura 5.13 el cual es derivado del resultado de diversas pruebas en arenas y arcillas.

Esfuerzos de Formación Efectivo

Se define como el esfuerzo de sobrecarga menos la presión de poro o la presión de yacimiento.

$S_e = P_{ob} - P_p \dots\dots\dots(5.6)$

Donde todos los factores son medidos en psi

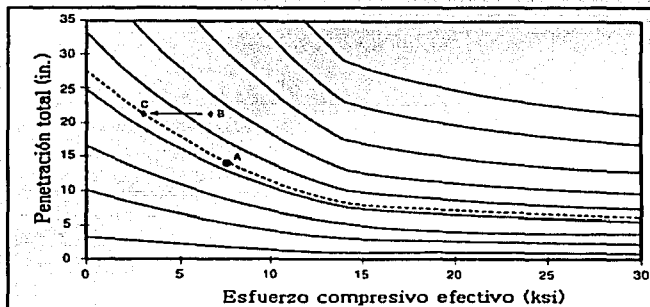


Fig. 5.12- Relación de la información generada en el estudio API, penetración total vs. esfuerzo compresivo húmedo.

El esfuerzo reduce la penetración, tanto como 45% a altos niveles de esfuerzos figura 5.14. Conceptualmente, el incremento del esfuerzo provoca que la formación parezca más fuerte. La influencia de los niveles de esfuerzos mayores o menores que los de referencia 3000 psi de esfuerzo efectivo pueden ser corregidos con la figura 5.15, la cual provee una buena aproximación bajo la gran mayoría de condiciones de esfuerzos en el fondo del pozo, particularmente a niveles de esfuerzos de 3000 psi o mayores como sugiere la figura 5.15, la precisión será menor a niveles reducidos de esfuerzos por debajo de los 3000 psi.

¹⁵ "The evaluation of the Potential Degradation of Perforation Charges as a Result of Exposure to Elevated Temperature" 1985 Exxon

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Efectos de espesores de cemento y TR.

La penetración en la formación real requerida para predecir el desempeño de flujo del pozo puede ser determinada por medio de la sustracción de la capa de cemento y TR, de la penetración total corregida.

$$L_p = (L_{pc}) - 0.5(d_{wb} - d_{ci}) \dots \dots \dots (5.7)$$

donde

L_p = penetración total en la formación objetivo de interés (pulgadas)

L_{pc} = L_{API} corregida por esfuerzos de formación y efectos de esfuerzos efectivo.

d_{wb} = diámetro del pozo

d_{ci} = diámetro interno de la TR.

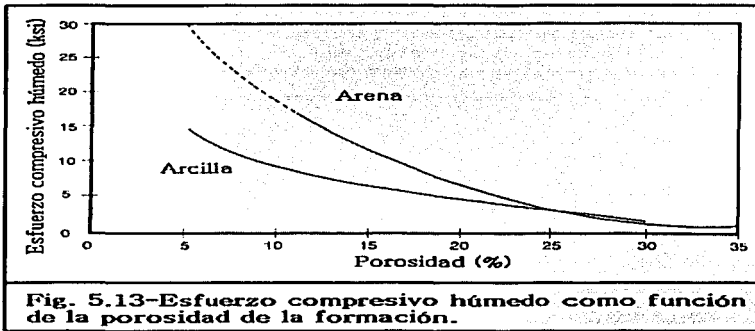


Fig. 5.13- Esfuerzo compresivo húmedo como función de la porosidad de la formación.

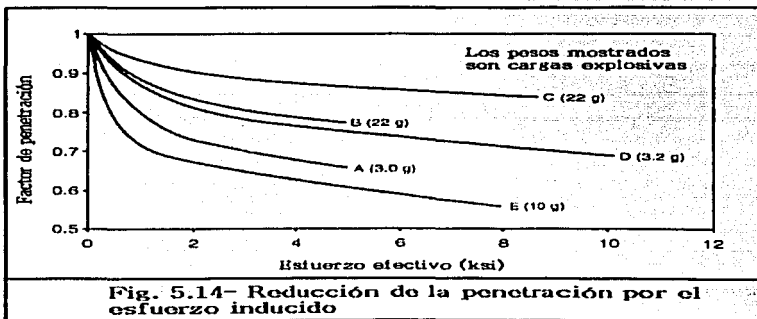


Fig. 5.14- Reducción de la penetración por el esfuerzo inducido

En terminaciones múltiples de sargas de revestimiento, el diámetro interno de la TR es aquel de la sarga exterior. El efecto de la otra sarga se determinó anteriormente ecuación 5.5

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Nomograma

Un nomograma (figura 5.16) derivado de las relaciones antes presentadas facilita la correlación de la información de la sección 1 a las condiciones en el pozo. Un ejemplo hipotético demuestra el uso del nomograma.

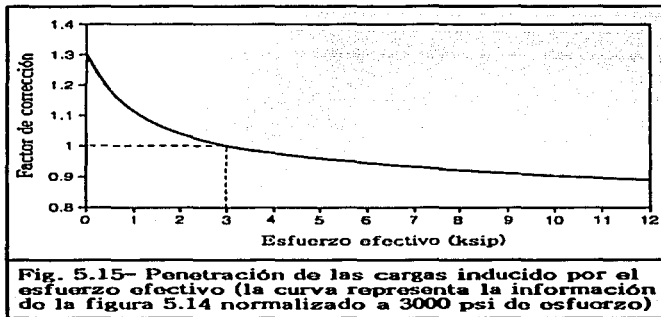
Información de la sección 1 de la hoja de datos API

Esfuerzo compresivo del tabique (briquet) (psi)	7560
Penetración total promedio del objetivo (pulg.)	15.6
Diámetro promedio de entrada de agujero en la TR	0.28

Condiciones en el pozo – Sarta simple de tubería

Esfuerzo compresivo uniaxial húmedo medio (núcleos de campo) (psi)	7200
Esfuerzo efectivo en el fondo del pozo (ecuación 5.6) (psi)	6000
Espesor combinado TR y cemento (pulg.)	1.5
Grado TR	P-110

Utilice el nomograma para determinar el desempeño en el fondo del pozo (down hole).



Punto A: Entre en el nomograma con la sección 1 y esfuerzo de briquet de 7560 psi y avance horizontalmente hacia la derecha.

Punto B: Intercepte la línea de compensación para esfuerzo interno de objetivo (ecuación 5.4) proyecte verticalmente hacia abajo.

Punto C: Entre en la sección 1 la penetración promedio en el objetivo, L_{API} de 15.6 pulgadas. Para sartas de tubería múltiples, utilice la penetración modificada sección 1 L_{API} de la ecuación 5.5

Punto D: Intersección de las proyecciones horizontal y vertical que representan la penetración de la sección 1 al esfuerzo compresivo húmedo del objetivo medio equivalente de la sección 1 ($C_{mw} = 3100$ psi de la ecuación 5.4).

Punto E: Entre con el esfuerzo compresivo húmedo de la formación medio en el fondo del pozo (7200 psi).

Si el esfuerzo de la formación no se tiene disponible, este puede ser estimado de la porosidad de la formación, por medio de entrar en el nomograma al punto G (porosidad de 19.7% determinado de los registros de formación o bien núcleos de pared) y procediendo al tipo de formación (arenas) al punto H y proyectando verticalmente hacia arriba.

Punto F: Continuando desde el punto D paralelo a la familia de curvas e interceptando la línea vertical del punto E o H provee la penetración en el fondo del pozo ajustado para esfuerzos compresivos húmedos medios.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Punto I: Proyectando horizontalmente desde el punto F e intersectando la línea de esfuerzos efectivo de la formación apropiada (6000 psi)

Punto J: Proyecte verticalmente hacia abajo para determinar la penetración total en el fondo del pozo (10.1 pulgadas)

Punto K: Continúe una línea vertical hasta interceptar el espesor combinado de TR y cemento (1.5 pulgadas)

Punto L: Proyecte horizontalmente para leer la penetración en el fondo del pozo y en la formación (8.6 pulgadas), el cual es utilizado en los cálculos de flujo de pozo.

El nomograma también puede ser utilizado para determinar el tamaño de agujero en la TR.

Punto M: Entre en el nomograma con la dureza media Brinell (BHN) de la tubería en el pozo (P-110, 296 BHN para la tabla 5.1). Proceda verticalmente hacia abajo.

Punto N: Intercepte la línea del factor adecuado y refleje horizontalmente hacia la izquierda.

Punto O: Lea el factor (0.955), el cual es aplicado en promedio arriba del diámetro de entrada de agujero para la sarta simple. Así la entrada de agujero de la sección 1 de 0.28 pulgadas en corregida a 0.27 pulgadas en el fondo del pozo.

Limitaciones.

La precisión en la penetración en el fondo del pozo y la predicción con éste método es enteramente aceptable en términos de cálculos de flujo de pozo (ejemplo: en análisis de sensibilidad), asumiendo por supuesto que la información de las pruebas API son representativas de las cargas de producción y que la información es generada de acuerdo con las especificaciones de las pruebas API. La normalización de la información (corrección para diferentes propiedades de objetivo permitidos dentro de las especificaciones API) no es requerida cuando éste método es utilizado para predecir la penetración en el fondo del pozo. Los valores reales de objetivos son usados directamente con la corrección siendo hecha automáticamente por el nomograma. Sin embargo, normalizaciones pueden ser utilizadas directamente para comparar el relativo desempeño de las pistolas de carga ajustada.

Desempeño de flujo.

Como se indicó en la sección 4 del API la información PRF derivada de la prueba de "sitio específico" de núcleos de pozos puede ser utilizada en modelos analíticos para predecir el flujo del pozo. Estudios adicionales a través del amplio espectro de los núcleos de campo pueden permitir una caracterización general de los tipos de roca al flujo, obviando la necesidad de llevar a cabo pruebas de flujo en núcleos de campo específicos indefinidamente. El uso de información Berea de tanto de "sitio específico" como de "pruebas estándar" en la predicción de flujo en el fondo del pozo debe ser aproximado con precaución.

5.6 Consideraciones de calidad de los disparos en el campo

Las practicas API recomendadas para las pruebas de pistolas no intentan señalar los aspectos de control de calidad en campo:

- o Pruebas de "shoot out", presentadas por un grupo operador como posible solución a la necesidad de control de pistolas en el campo, resultaron inadecuadas.
- o Otro grupo operador directamente señaló que los problemas únicos de control de calidad de producción de cargas moldeadas, adelantando el primer método efectivo para determinar como las cargas de campo se desempeñarán en forma similar a la información relativa al API.

El método reconoció que el desempeño de las cargas producidas pueden repentinamente cambiar como resultado de variables de manufactura y los procedimientos de control de calidad, deben ser monitoreados sobre una base continua. El sistema es único ya que utiliza las propias especificaciones y procedimientos de control de calidad como la base para verificar que el desempeño de las cargas sea de acuerdo a las especificaciones deseadas. Tres niveles de acción

están disponibles para el operador quien desee el auditar una compañía de servicios o equipo manufacturero en particular:

1. Examinar especificaciones de control de calidad y línea de producción, procedimientos y mediciones, y como esta información se relaciona con la información publicada del API. El seguimiento y la revisión de diversos productos aleatorios se corren para verificar que la información de control de producción esta siendo mantenida dentro de rangos aceptables de desempeño, lo cual asegura que el desempeño en campo de las cargas cumplirá con la información publicada por el API.
2. Si la información no verifica la relación entre la información de la línea de producción y de control de calidad y la información publicada por el API. Solicite una prueba controlada de la carga seleccionada y representativa. Las pruebas son llevadas a cabo en las instalaciones de la compañía manufacturera de acuerdo con sus procedimientos rutinarios de pruebas de control de producción, asegurando que las cargas de campo son evaluadas bajo el mismo criterio que cuando son producidas.
3. Si se presentan problemas durante el segundo nivel de prueba, una prueba completa API puede ser requerida para evaluar las corridas de producción de interés completamente.

Dos grupos operadores diferentes han sido formados para verificar la calidad del equipo, ambos grupos confían en los principios de audición citados anteriormente. El programa para la evaluación de desempeño de equipo fue formado para desarrollar verificaciones en cargas moldeadas estándar, además de evaluar el desempeño de sistemas de pistola que esta relacionado con el sistema completo de pistola / carga, junto con los accesorios de equipamiento asociado a elevadas presiones y temperaturas.

En consecuencia se alienta el desempeño de procedimientos estándar de control de calidad mejorados, donde el objetivo último, es el evitar problemas en el campo experimentados regularmente en la profundidad, a alta temperatura y alta presión. Tales problemas incluyen malas corridas resultado de fallas en la pistola o los componentes los cuales no funcionan correctamente, presión de colapso de la pistola o accesorios y detonaciones automáticas de explosivos. La sección 3 del API es un proceso de trabajo conducido por este grupo.

Como consecuencia de este esfuerzo, separado del API, el nivel general de calidad de equipo de disparo se a desarrollado marcadamente, con prospectos para un mejoramiento general y posterior con las mejoras propuestas del API RP19b y los procedimientos de prueba. Ya que el único problema y carácter de control de calidad con el equipamiento de cargas moldeadas la precisión de la información del API permanecerá abierta a preguntas donde las especificaciones de control de calidad son inadecuadas o no están siendo aplicadas regularmente y consistentemente. La precisión también será afectada por métodos específicos utilizados por manufactureros y el respectivo error en la correlación hacia los objetivos API.

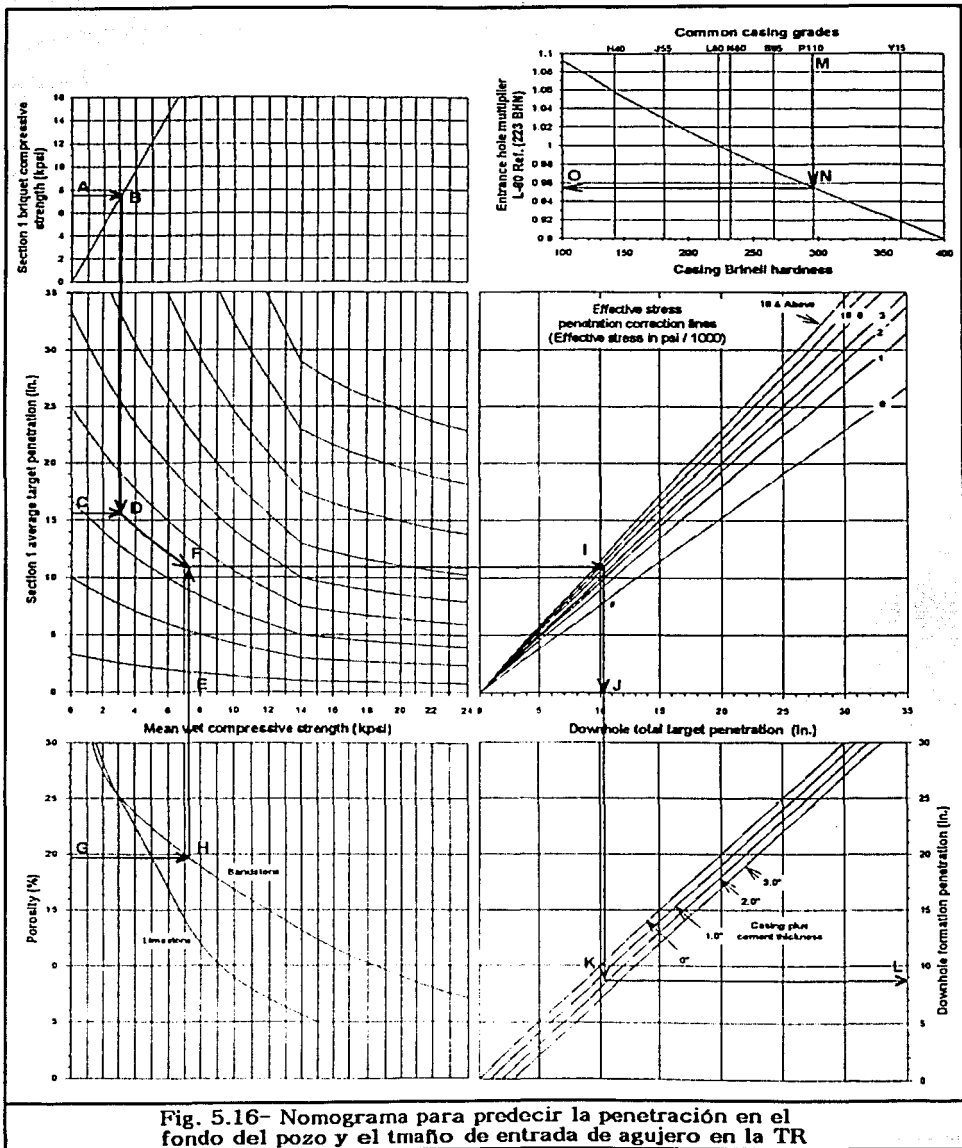


Fig. 5.16- Nomograma para predecir la penetración en el fondo del pozo y el tamaño de entrada de agujero en la TR

CAPÍTULO 6 EFICIENCIA DE FLUJO DE LOS SISTEMAS DE DISPARO.

6.1 La eficiencia de flujo del pozo.

Una eficiencia de flujo inadecuada de las terminaciones disparadas ha sido un aspecto importante desde el primer uso de la pistola en 1930. El problema inicial fue atribuido a las restringidas áreas realizadas por el disparo a través de la TR comparado con la mayor área superficial de una terminación en agujero descubierto de la misma longitud. En 1950 sin embargo, estudios experimentales indicaron que con la adecuada penetración y densidad de disparo, la eficiencia de flujo del sistema disparado debe ser mejor que aquel de una terminación en agujero descubierto con longitud comparable. Desafortunadamente, aún con la geometría apropiada de disparo, el desempeño del campo resultó menor que los resultados precedidos.

Las investigaciones continuaron indicando que la productividad estaba influenciada no sólo por la geometría de los disparos sino también por las características de la formación y el ambiente en que se realizan los disparos, con las tres áreas interactuando completamente en una manera compleja. El entendimiento de éstas interacciones resulta esencial si la productividad ha de ser optimizada.

La eficiencia de flujo o productividad de una terminación con disparos puede ser definida como (1) la relación de productividad: gasto de flujo de un sistema disparado dividido por el gasto de flujo ideal en agujero descubierto y (2) factor de daño: que es una medición de la caída de presión real a través del sistema perforado comparado con la caída de presión ideal precedido por la teoría de flujo radial para el mismo gasto de flujo.

Las dos definiciones son equivalentes y relacionadas por una simple expresión matemática:

$$J = \frac{q_p}{q_{oh}} = \frac{\ln\left(\frac{re}{rw}\right)}{\left[\ln\left(\frac{re}{rw}\right) + S_T\right]} \dots\dots\dots(6.1)$$

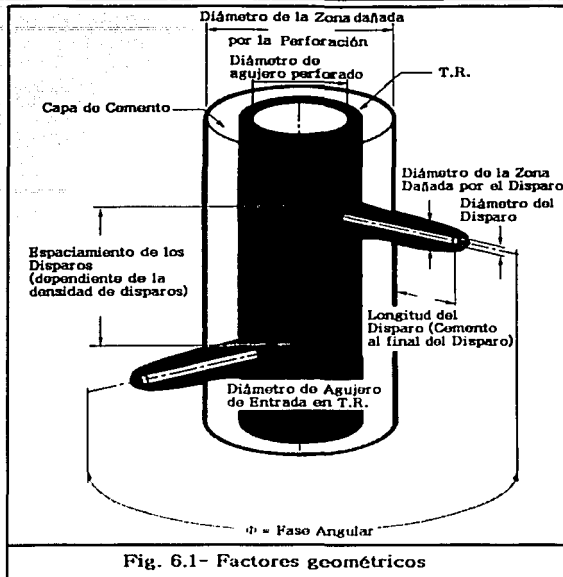
- donde J = Índice de productividad
- q_{oh} = gasto de flujo ideal de agujero descubierto
- q_p = gasto de flujo del sistema perforado
- re = radio de drene (ft)
- rw = radio del pozo (ft)
- s_T = daño total (adim)

El índice de productividad J, generalmente es utilizado para propósitos ilustrativos, el factor de daño es preferido para análisis cualitativo porque permite la estimación de elementos discretos que son parte del factor total de daño.

6.2 Daño al pozo

El efecto de daño inicialmente fue concebido como una zona delgada de formación alrededor del pozo, después, la zona de permeabilidad reducida alrededor de los disparos fue considerada como un daño adicional, en ambas situaciones el daño describe un fenómeno físico. Más de 30 años atrás, sin embargo, el daño empezó a ser utilizado como base para un tratamiento matemático de caídas de presión anormales. En un análisis de los elementos de daño, incluyendo efectos de flujo no Darcianos, la penetración parcial de la zona productora, geometría de flujo no radial y yacimiento inclinado, el concepto físico de daño crea una idea ambigua, sin embargo la representación matemática de las caídas de presión resultado de éstos efectos provee una herramienta muy poderosa para el análisis del pozo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Así mismo el concepto matemático de daño es esencial para el apropiado diseño de terminaciones y su análisis. Evidencia empírica sobrepasa los valores estimados concerniente a las caídas de presión como resultado de pozo y el daño de los disparos, disparos taponados, flujo no radial alrededor del pozo, efectos de la geometría de la terminación, características de la formación, ambiente de los disparos, etc. El análisis cuidadoso de éstos elementos y su respectiva contribución al daño total es fundamental para cuantificar el daño total, manteniendo en mente que los efectos de los elementos discretos son usualmente compuestos y no simplemente aditivos. Es imposible el exagerar sobre la importancia de una análisis completo de daño cuando se analiza una terminación ya que se puede determinar una acción correctiva y cuantificar el resultado de tal acción.

6.3 Factores de daño que influyen en la eficiencia de flujo del pozo.

La compleja interacción de la geometría de disparos, características de la formación y el ambiente de los disparos, hace imposible hallar una solución global y simple para diseñar o analizar la terminación del pozo. Cada caso debe ser tratado individualmente y toda la posible información considerada (ejemplo, registros, núcleos y pruebas de pozo), ya que cierta información es necesaria (ejemplo, la extensión y severidad del daño al pozo) y regularmente no se encuentra disponible o es de calidad cuestionable, los métodos descritos aquí deben ser considerados como una guía general. Sin embargo cuando se aplican consistentemente y son validadas por pruebas de campo, éstas técnicas resultan medios razonables de predicción del desempeño del pozo.

Geometría del pozo

La figura 6.1 muestra una geometría típica para una terminación natural¹⁶ disparada. Los parámetros que influyen mayormente la eficiencia de terminación son: la densidad efectiva de disparos

¹⁶ La terminación natural se define como aquella donde una vez ademado el pozo, se llevan a cabo disparos para lograr la comunicación entre el yacimiento y el pozo.

(número real de disparos produciendo por pies), penetración de los disparos en la formación, fase angular y el diámetro del disparo. La compleja geometría de la figura 6.1 conduce al uso de modelos analógicos y asumir disparos ideales (sin daño), no hay presencia de daño alrededor del pozo y un yacimiento isotrópico. Como la técnica de simulación evolucionó de procedimientos de diferencias finitas y después, de métodos más precisos de elementos finitos estos son utilizados para estimar los efectos de daño, culminando en soluciones generales teniendo buena precisión y requiriendo pocas suposiciones de simplificación.

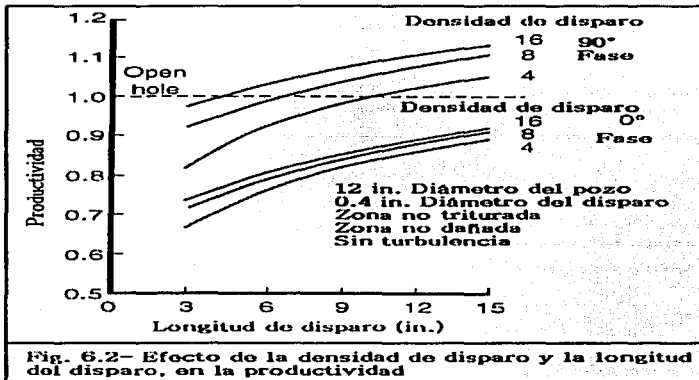


Fig. 6.2- Efecto de la densidad de disparo y la longitud del disparo, en la productividad

Generalmente los factores geométricos, influyen la relación de productividad, para una terminación natural en un yacimiento ideal e isotrópico.

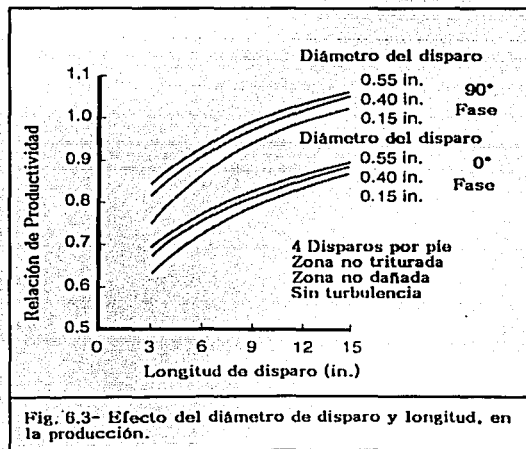


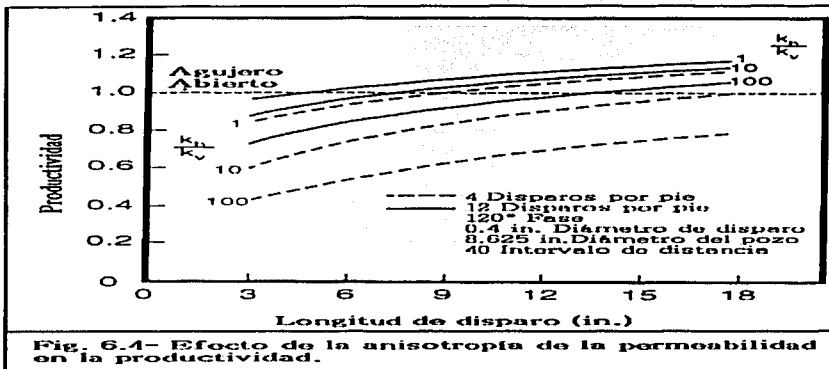
Fig. 6.3- Efecto del diámetro de disparo y longitud, en la producción.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1. La productividad incrementa cuando la densidad de disparos incrementa (figura 6.2)
2. La productividad incrementa cuando incrementa la penetración de los disparos (figura 6.2 y 6.3)
3. El efecto de incremento de penetración es más significativo para penetraciones someras que para penetraciones profundas (figura 6.2 y 6.3)
4. La fase angular diferente de 0° , incrementa la productividad por medio de la reducción de la interferencia con el flujo, resultado de la presencia del pozo (figura 6.2 y 6.3)
5. El diámetro del disparo juega un papel menor relativo en la determinación de la productividad (figura 6.3).

Características de la formación

Además de los factores geométricos, una variedad de características físicas de la formación deben ser consideradas:



Propiedades físicas

Tipo de formación (arena, arcillas, etc.), esfuerzos compresivos y las condiciones de esfuerzos in-situ, tienen gran influencia en la penetración de disparos, la extensión y el grado de daño alrededor de los disparos además de las características de limpieza de disparos.

Permeabilidad y fluidos de formación.

Estos dos factores determinan grandemente el nivel de presión diferencial requerida para limpiar los disparos en forma efectiva. Altas presiones diferenciales son requeridas para limpiar las perforaciones en formaciones relacionadas con gas y no así en las formaciones conteniendo aceite. Los efectos adversos de la reducción de la permeabilidad alrededor de las perforaciones aparentemente son amplificadas por flujo turbulento.

Anisotropía de la permeabilidad

La figura 6.4 muestra los efectos de anisotropía de permeabilidad en la eficiencia de disparos. Incrementos significativos en la productividad resultan de la alta densidad de disparos, particularmente conforme el grado de anisotropía incrementa. El efecto de la longitud de disparo no es tan significativo como el de la densidad de disparos.

Laminaciones de arcilla

Los efectos de laminaciones de arcilla son similares a aquellos de la anisotropía de la permeabilidad. La productividad es altamente insensible a la longitud de los disparos, mientras que

el incremento en la densidad de disparos incrementa la eficiencia de flujo por alcanzar un gran número de capas productoras.

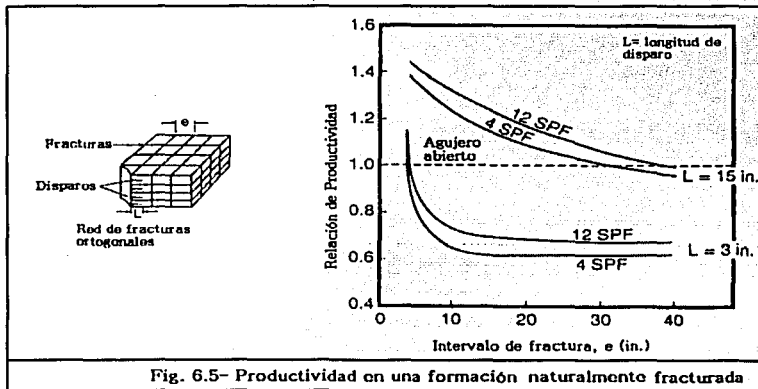
Fracturas Naturales

Una red de fracturas naturales provee un transporte eficiente de fluido dentro de la formación, así la productividad de terminaciones con disparos depende en la comunicación hidráulica entre perforaciones y la red de fracturas, variando con el tipo de fracturas, la orientación del intervalo. La figura 6.5 indica la productividad teórica de una terminación de disparos en una red natural ortogonal de fracturas donde la profundidad de la penetración y los pequeños bloques de matriz proveen una buena productividad. Los efectos de la densidad de disparo son relativamente insignificantes porque la red de fracturas provee una buena comunicación vertical.

Sin embargo diferencias significantes en la productividad pueden resultar de la diferente orientación de fracturas y cada caso debe ser analizado individualmente para establecer una terminación que asegure una conexión óptima entre fracturas y disparos, más aún el modelar el sistema de fracturas es difícil y los resultados son algunas veces decepcionantes.

Ambiente de disparos.

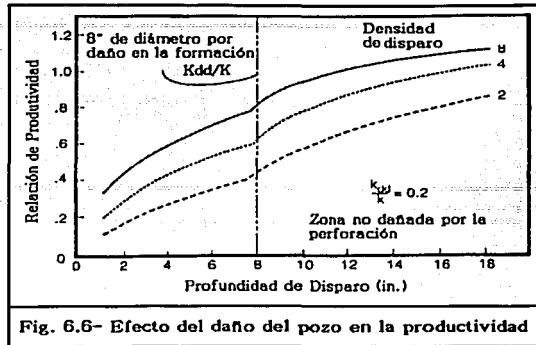
Una tercera consideración mayor en la productividad del pozo es el ambiente bajo el cual se realizan los disparos como los siguientes.



Daño al pozo.

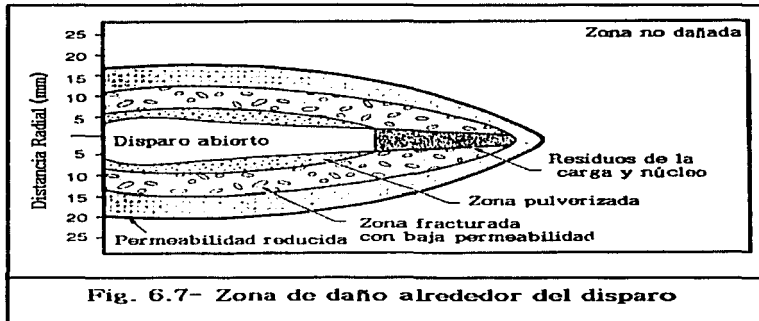
La perforación del pozo y las operaciones de cementación crean una zona de permeabilidad reducida alrededor del pozo como un resultado del filtrado lodo / cemento o invasión de sólidos. La figura 6.6 indica el efecto en la productividad de una zona de 8 pulgadas de profundidad de permeabilidad reducida alrededor del pozo. En la práctica la extensión y grado de daño generalmente resultan difíciles de determinar. Si daño significativo es sospechado, una máxima penetración en disparos debe ser utilizado, debe notarse que la figura 6.2 a 6.6 son teóricas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Daño de disparo

Los perfiles de productividad e inyectabilidad comúnmente muestran que solo una pequeña fracción de los disparos están fluyendo. Como se discutió en el capítulo 2, investigaciones en el campo y en el laboratorio sugieren que haya una zona de permeabilidad dañada alrededor de los disparos (figura 6.7), la extensión y grado de daño son dependientes del tipo de formación, permeabilidad y porosidad, tipo de carga moldeada y dirección y nivel de la presión diferencial cuando se realizan los disparos. Los disparos con bala crean una zona similar. El daño en los disparos puede ser magnificado por el filtrado de lodo o invasión de sólidos.



Presión diferencial

El nivel y dirección de la presión diferencial de la formación al pozo, influyen fuertemente la eficiencia de flujo. Los disparos bajo balanceados (presión de formación mayor que la presión del pozo) facilita la limpieza de los residuos de los disparos, mejorando la eficiencia de flujo. Los disparos sobre balanceados (la presión del pozo mayor que la presión del pozo) pueden resultar en una reducción significativa de la productividad.

Como se discutirá en el capítulo 8, sin embargo, a habido excepciones que favorecen a las terminaciones bajo balanceadas en uno de estos casos los disparos fueron seguidos por un fuerte flujo de fluido sobre balanceado en los disparos.

Fluidos de terminación

Mientras que los disparos en lodo pueden resultar en disparos taponados, particularmente en disparos sobre balanceados, el uso de fluidos limpios y compatibles, asociados con el apropiado

nivel de bajo balance, puede mejorar la productividad en ambas operaciones donde el transporte puede ser realizado con cable o tubería.

Desviación del pozo

La mayoría de los pozos no penetran la formación productora perpendicularmente. Así hay un ángulo entre el plano normal a la formación y el eje del pozo, tal como 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 incremento de la productividad porque un aumento en el área del intervalo productor es expuesto a flujo, este incremento en la productividad resulta en un efecto negativo de daño.

Penetración Parcial del Pozo.

En algunos pozos, solo una fracción del intervalo productor se encuentra abierto al flujo. Por ejemplo si existe casquete de gas, el intervalo abierto debe localizarse alejado del contacto gas-aceite, para prevenir conificaciones de gas. Pozos que intencionalmente han sido abiertos al flujo a lo largo de una fracción de su formación productora, son llamados pozos de entrada limitada. Obviamente terminaciones de este tipo no planeadas también existen y en todos los casos la entrada limitada decrementará la productividad del pozo.

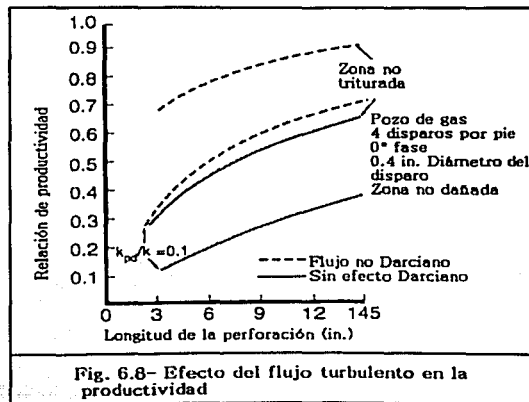
Flujo turbulento

Estudios de simulación y experimentos de flujo en disparos indican que el flujo turbulento o no Darciano, fuertemente influyen la eficiencia de flujo (figura 6.8)

Los efectos de turbulencia pueden ser reducidos por una mayor área para el flujo (ejemplo: alta densidad de disparo, gran profundidad de penetración y en algún grado, la fase angular de los disparos).

Factores de Productividad.

Durante el diseño de la terminación, todos los factores aplicables deben ser balanceados tan efectivamente como sean posibles, algunos factores pueden ser controlados, mientras otros pueden ser compensados para varios grados. Un rango global de todos los factores es esencialmente imposible por su compleja interacción. Los factores controlables incluyen los parámetros geométricos, nivel y dirección de presión diferencial y el poder escoger el fluido de terminación.



En el balance de los varios factores, una alta densidad de disparos puede ser utilizada para compensar la anisotropía de la permeabilidad o la laminación de arcillas o para maximizar el área

de flujo y reducir la turbulencia. Alta profundidad de penetración de disparos puede ser seleccionado para alcanzar más allá del daño del pozo para mejorar la productividad. Sin embargo el elegir el método de transporte (cable o tubería) es también significativo (capítulo 4). Cuando los factores económicos dictan la terminación con cable, algunas restricciones pueden ser impuestas en la geometría de disparos (ejemplo: terminaciones "a través de tubería" con penetración limitada y fase) o ambiente (ejemplo; disparos sobre balanceados que permiten el uso de pistolas grandes para maximizar la penetración y la densidad de disparo). Por otro lado, el uso de disparos transportados con tubería permite la optimización de factores tanto geométricos como ambientales, obviamente cada terminación debe ser señalada individualmente para un óptimo diseño.

6.4 Daño por los disparos.

La geometría de los disparos y el ambiente pueden ser controlados en varios grados. Un factor que no es tan controlable es el efecto negativo¹⁷ y de la zona de daño producida por los disparos, este efecto es importante y merece una cuidadosa atención durante la terminación y los procesos de diseño.

Evidencia empírica del daño por disparos.

Investigaciones de laboratorio y de campo, indican que se encuentra una zona dañada alrededor de las perforaciones individuales. Estudios de laboratorio indican que la permeabilidad de la zona puede ser tan baja como 10% a 20% de aquella de la formación no dañada, aún cuando se dispare en bajo balance, en fluidos limpios y compatibles.

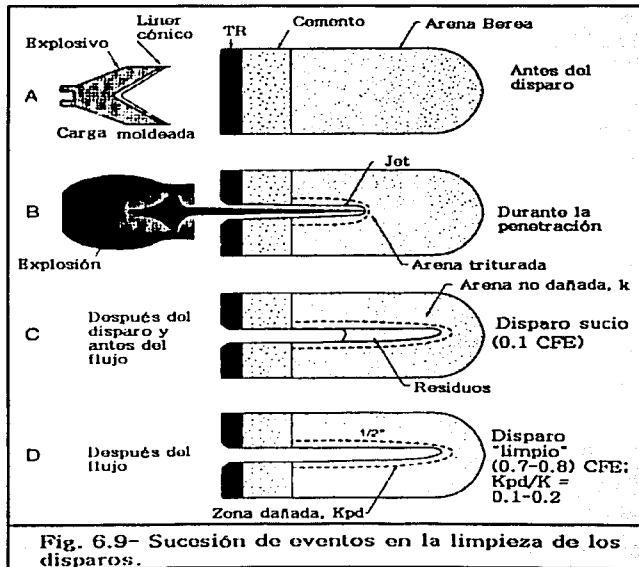


Fig. 6.9- Sucesión de eventos en la limpieza de los disparos.

Resultados de campo indican que las terminaciones disparadas regularmente tienen menores eficiencias que aquellas como terminaciones de tubería ranurada o empacamiento de grava en agujero descubierto. La recuperación de coples desechos o tubería ranurada (cedazo), así como

¹⁷ Los disparos que no fueron bien realizados o taponados.

observar los perfiles de productividad e inyectabilidad, sugieren que una significativa proporción de disparos, permanecen taponados aún después de una producción substancial. El grado de daño aparentemente se encuentra influenciado por el tipo de formación y fluido, tipo y calidad de la carga, nivel y dirección de presión diferencial, fluido de terminación y duración del flujo de limpieza.

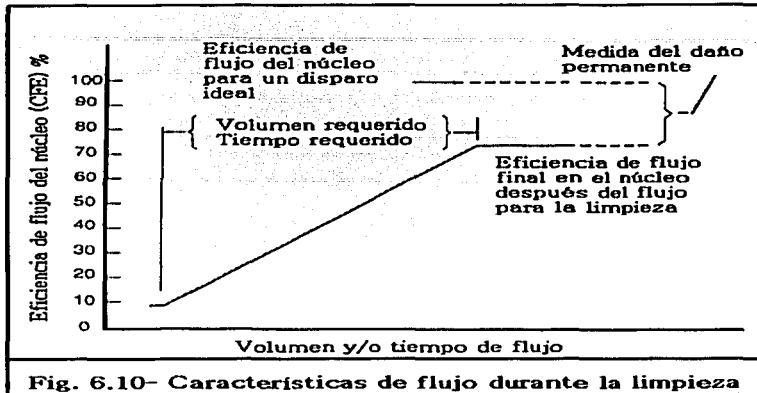


Fig. 6.10- Características de flujo durante la limpieza

Limpieza de los disparos

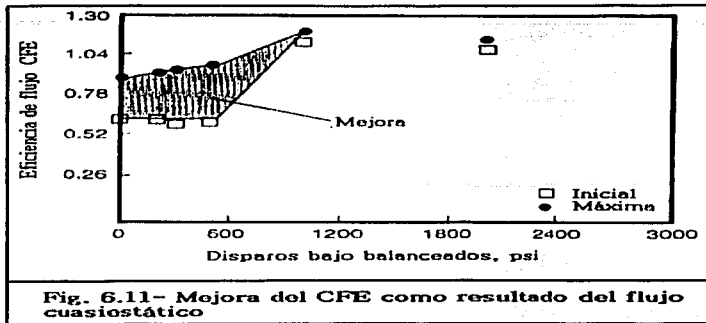
Pruebas de laboratorio demuestran que el efecto de la zona dañada por disparos puede ser reducida por flujo a través de los disparos la figura 6.9 y figura 6.10 presentan una serie común de eventos en la limpieza de los objetivos del API RP19b sección 2, es decir disparos sobre balanceados y después producido. La eficiencia de flujo inicial es baja como resultado del taponamiento de disparos y la disminución en valor de la permeabilidad en la zona de disparo dañada, la mayoría de los residuos en el túnel de los disparos, son expulsados rápidamente por el flujo de transición a grandes gradientes de presión. Adicionalmente el flujo en estado-estable gradualmente reduce el daño en la zona dañada (figura 6.11)

El proceso de limpieza y la eficiencia final de flujo en el núcleo (CFE) son afectados por la presión diferencial de flujo (figura 6.12), mientras el incremento de la presión diferencial más allá de 500 psi generalmente es considerado poco efectivo, en algunos casos altos niveles de bajo balance han sido benéficos en núcleos de tipo API. Sin embargo, siempre se presentará un daño residual, sin importar la presión diferencial o el volumen total de flujo.

Métodos para optimizar la limpieza.

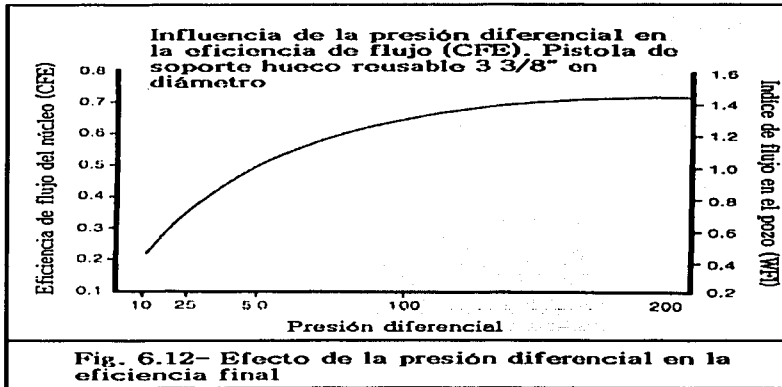
Ya que el daño producido por los disparos es inevitable, una limpieza óptima es esencial. Los métodos primarios envuelven disparos bajo balanceados o disparos sobre balanceados seguidos por un flujo de urgencia o lavado de disparos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Disparos bajo-balanceados

Los disparos bajo-balanceados, introducidos en 1950 estuvieron confinados a operaciones "a través de tubería" hasta la llegada de los disparos transportados con tubería expandiendo su uso, incluyendo todos los tamaños de pistola.



Óptimo nivel de bajo-balance

Un nivel de bajo-balance que sea muy bajo resultará en una inadecuada limpieza, a niveles que son muy altos puede resultar en una falla mecánica de la formación, movimiento de finos, estallamiento de la sarta de pistola del agujero, colapso en la TR, corrimiento del empacador y otros problemas, los niveles de presión diferencial suficientes para causar fallas en la formación, pueden ser derivados de las propiedades mecánicas de la formación estimadas de los registros sísmicos. Mientras que de experiencias pasadas en campos dados resultan la mejor guía para seleccionar el óptimo nivel de bajo balance, guías generales están disponibles, la tabla 6.1 basada en cientos de terminaciones alrededor del mundo, presentan rangos recomendados para bajo balance.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

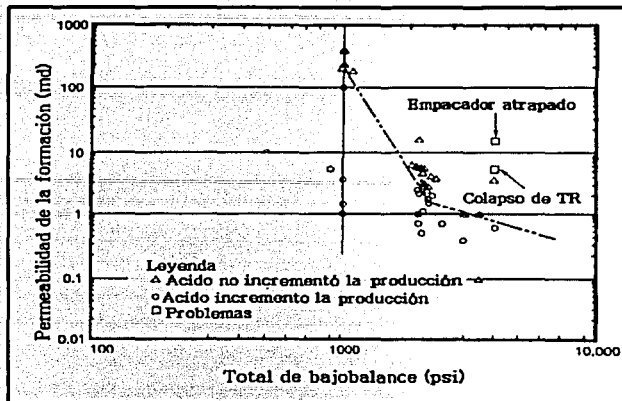


Fig. 6.13- Balance requerido para terminaciones en pozos de gas

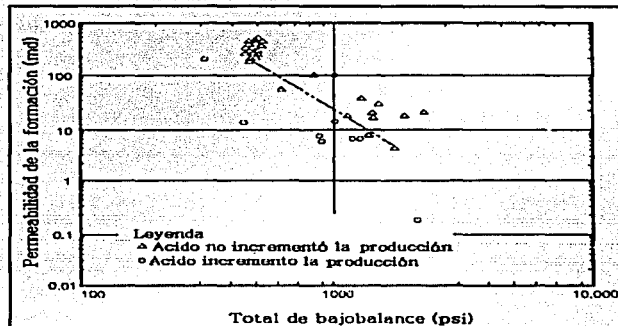
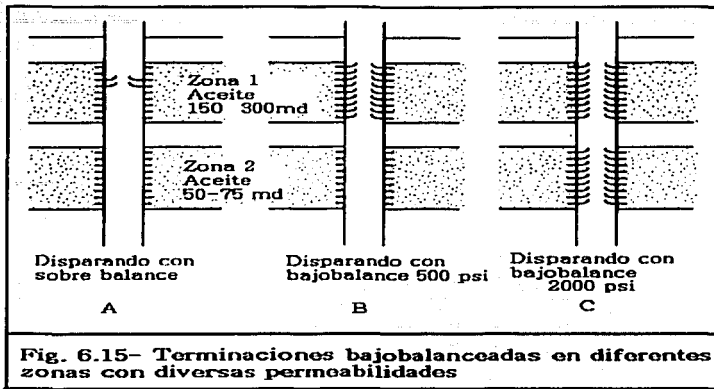


Fig. 6.14- Bajobalance requerido para la terminación en pozos de aceite.

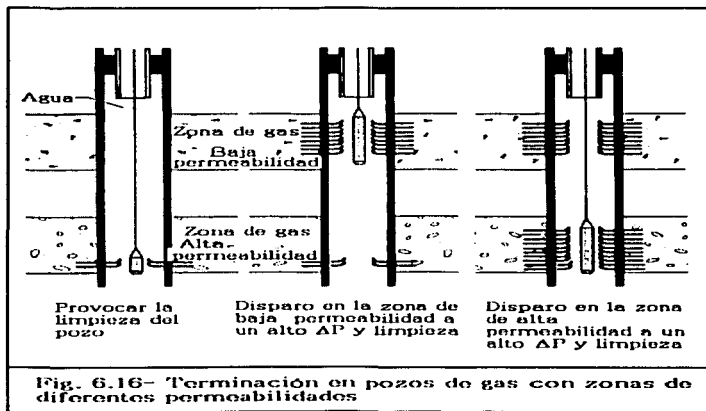
La figura 6.13 y figura 6.14 presentan resultados de estudios de campos de 90 terminaciones transportadas con tubería en formaciones de arena, el bajo balance fue considerado suficiente cuando subsiguientes acidificaciones no incrementaron el desempeño del pozo, debe notarse que los niveles mayores de bajo balance son requeridos para pozos de gas. Otros estudios proveen señalamientos adicionales para establecer rangos seguros de bajo balance.

Disparos bajo balance en terminaciones multizonas.
El nivel de bajo balance requerido para limpiar los disparos dependen de la permeabilidad y la viscosidad del fluido (figura 6.13 y 6.14) porque los disparos en zonas de alta permeabilidad responden más fácilmente que aquellos en capas de menor permeabilidad, el nivel de bajo balance debe ser seleccionado para asegurar una respuesta óptima (figura 6.15)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Las terminaciones multizonas con cable, requieren más de un viaje pueden llevar a problemas en el establecimiento del bajo balance requerido después de la primera corrida, una solución es el disparar primero las zonas de baja permeabilidad. El pozo fluyendo puede establecer un adecuado bajo balance para disparar las zonas de mayor respuesta de alta permeabilidad (figura 6.16), disparos transportados con tubería permiten la terminación de todas las zonas actuales con un nivel de bajo balance que pueda permitir la limpieza simultánea.



Disparos sobre balanceados

Aunque los disparos bajo balanceados estimulan la limpieza de los disparos, los disparos sobre-balanceados siguen siendo utilizados ampliamente. Factores económicos y algunos otros pueden establecer el uso de pistolas de mayor tamaño transportados con tubería, disparados en fluidos de terminación compatibles a niveles modestos de sobre-balance (capítulo 3 y 4) un acercamiento razonable, efectivo en formaciones altamente permeables, particularmente cuando son seguidos de flujo de surgencia de los disparos. Operaciones sobre balanceadas también pueden establecer

buenos resultados cuando los efectos de daño son reducidos por el lavado de los disparos o por la acidificación.

Fluidos de terminación

Los fluidos de terminación limpios, compatibles y bajos en sólidos son esenciales para operaciones efectivas de disparos sobre balanceados. El disparar en lodo usualmente resulta en disparos taponados, la limpieza de tales disparos es difícil y la probabilidad de una alta eficiencia de densidad de disparos es remota. Aún cuando fluidos limpios son utilizados se debe tener cuidado para evitar contaminación de sólidos en la sarta de terminación porque aún pequeñas cantidades de sólido pueden causar decrementos significantes en la productividad.

Flujo de Surgencia.

El flujo de surgencia tan pronto como sea posible después de los disparos, puede aumentar la productividad, la efectividad de la surgencia es proporcional al volumen de flujo de fluido, un mínimo de cerca de 1 galón por disparo es recomendado. Un beneficio secundario de la surgencia es la oportunidad de probar el pozo para transmisividad y daño.

Comparación de resultados

Los resultados de campo indican que aún prestando cuidado y atención a la selección de fluido de terminación y flujo de surgencia, disparos sobre-balanceados generalmente resultan en menores productividades que las obtenidas con disparos bajo-balance. Como se discutió anteriormente, se han encontrado excepciones a esta regla general.

6.5 Predicción del desempeño del pozo.

Estudios de simulación, analíticos y técnicas semi-analíticas son utilizados ampliamente para los diseños de terminación, evaluación de las terminaciones con disparos y análisis de los sistemas. Tres acercamientos básicos para predecir la productividad, basados en procedimientos analíticos en ecuaciones generales de flujo radial, nomograma de Locke¹⁸ y un acercamiento semi analítico son presentados. Aun que no tan precisos como el nomograma o el acercamiento semi analítico, el procedimiento analítico provee un medio simple, conveniente de la estimación de la eficiencia de terminación. Mientras que el nomograma de Locke es fácil y rápido de usar, este no toma en cuenta la anisotropía de la formación y la penetración parcial o el daño por desviación del pozo, y tampoco tienen cabida a las nuevas pistolas multifase de alta densidad de disparos. Los métodos semi analíticos proveen una ventaja sobre el métodos Locke y los acercamientos analítico ya que permite una comprensiva y precisa examinación de los distintos elementos que son parte del daño total asociado con las terminaciones con disparos. Los sistemas de simulación por medio de programas de computadoras, basados en gran parte en métodos semi analíticos, están disponibles para estimar las eficiencias de terminación para los sistemas perforados.

Procedimientos analíticos para predecir eficiencias de flujo en el pozo.

Los procedimientos analíticos basados en ecuaciones generales de flujo radial envuelven un número de suposiciones y simplificación que incluyen una distribución de flujo uniforme a lo largo del disparo, flujo radial puro en la zona molida, flujo radial cerca del pozo en el yacimiento y componentes simples aditivos de daño. Estos procedimientos son menos precisos que tanto el nomograma o el semi analítico, pero cuando se validan por resultados del campo, ellos proveen un medio simple y conveniente de la estimación de la eficiencia de terminación. Los procedimientos están basados en el modelo mostrado en la figura 6.17

¹⁸ Lock, S. An advanced Method for Predicting the Productivity Ratio of a Perforated Well JPT 1981.

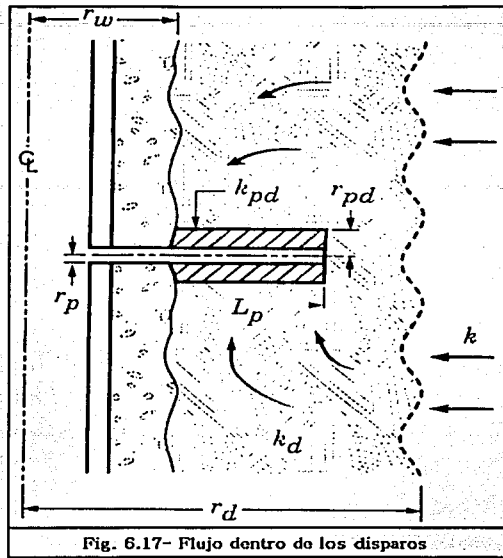


Fig. 6.17- Flujo dentro de los disparos

Pozos de aceite

Un procedimiento de dos pasos es utilizado, en el primero se señala la caída de presión a través de los sistemas de disparos y después considera la caída de presión a través del yacimiento.

Caída de presión a través de los disparos

Suponiendo flujo radial en la zona de disparo dañada, la ecuación 6.2 permite la estimación de éste parámetro:

$$\Delta P_p = A \left(\frac{q_o}{n} \right) + B \left(\frac{q_o}{n} \right)^2 \dots\dots\dots(6.2)$$

donde

n= número de disparos

ΔP_p = caída de presión a través de los disparos (psi)

q_o = gasto de aceite a través del disparo (B/D)

$$A = \frac{(141.2)(\mu_o)(B_o)}{(L_p)(k_{pd})} \ln \left(\frac{r_{pd}}{r_p} \right) \dots\dots\dots(6.3)$$

B_o = Factor de volumen de aceite

K_{pd} = permeabilidad de la zona dañada por el disparo (mD)

L_p = longitud del disparo (ft)

r_p = radio del disparo

r_{pd} = radio de la zona dañada por el disparo (ft)

μ_o = viscosidad del aceite (cP)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

$$B = \frac{(2.3)(10^{-14})(\beta_{pd})(B_o^2)(\rho_o)}{Lp^2} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{pd}} \right) \dots\dots\dots(6.4)$$

ρ_o = densidad del aceite (lbm/cft³)

β_{pd} = coeficiente de velocidad para flujo a través de los disparos en la zona dañada (1/ft)

$$\beta_{pd} = (2.33)(10^{10})(k^{-1.201}_{pd}) \dots\dots\dots (6.5)$$

Los coeficientes de velocidad calculados β , reproducen cercanamente el resultado experimental. El valor de β también puede ser estimado de las mediciones en el laboratorio en núcleos y de otras fuentes en la literatura.

Caídas de presión en el yacimiento

Las caídas de presión a través del yacimiento pueden ser calculadas de la siguiente manera:

$$\Delta P_R = (C)(q_o) + (D)(q_o^2) \dots\dots\dots(6.6)$$

donde:

ΔP_R = caída de presión a través del yacimiento (psi)

$$C = \frac{141.2(\mu_o)(B_o)}{(k)(h_t)} \left[\ln \left(\frac{0.472r_e}{r_w} \right) + S \right] \dots\dots\dots(6.7)$$

h_t = espesor total de la formación (ft)

k = permeabilidad de la formación (mD)

$$S = S_d + S_{bf} + S_{dl} \dots\dots\dots(6.8)$$

$$D = \frac{(2.3)(10^{-14})(B_o^2)(\rho_o)}{h_p^2} \left[\beta_{dd} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_{dd}} \right) + \beta_f \left(\frac{1}{r_{dd}} - \frac{1}{r_e} \right) \right] \dots\dots\dots(6.9)$$

h_p = espesor disparado (ft)

r_{dd} = radio de la zona dañada por la perforación del pozo (ft)

$$\beta_{dd} = (2.33)(10^{10})(k_{dd}^{-1.201})$$

$$\beta_f = (2.33)(10^{10})(k_f^{-1.201})$$

k_{dd} = permeabilidad de la zona dañada por la perforación del pozo

β_{dd} = coeficiente de velocidad para flujo a través de la zona dañada or la perforación, (1/ft)

β_f = coeficiente de velocidad para flujo a través de los disparos en la zona dañada por los disparos (1/ft)

Los componentes del daño "s" pueden ser determinados con técnicas disponibles en la literatura. Para flujo no turbulento el coeficiente de velocidad puede ser supuesto como cero.

Las caídas de presión adicionales ΔP_P y ΔP_R dan las caídas aproximadas a través del yacimiento y cerca del pozo y permiten la estimación de la eficiencia de flujo de la terminación disparada.

Pozos con Gas

Caídas de presión a través de los disparos.

La ecuación 6.10 para flujo radial de gas puede ser utilizada para estimar caídas de presión a través de los disparos

$$P_{sf}^2 - P_{wb}^2 = A \left(\frac{q_g}{n} \right) + B \left(\frac{q_g}{n} \right)^2 \dots\dots\dots(6.10)$$

donde:

Psf = presión en la formación (psi)

Pwb = presión en el pozo (psi)

q_g = gasto de flujo de gas (Mcf/D)

$$A = \frac{(141.2)(10^3)(\mu_g)(Z)(T)}{(L_p)(k_{pd})} \ln \left(\frac{r_{pd}}{r_p} \right) \dots\dots\dots(6.11)$$

r_p = radio del disparo (ft)

T = temperatura de la formación (°R)

z = factor de compresibilidad (adim)

μ_g = viscosidad del gas (cP)

$$B = \frac{(3.16)(10^{-12})(\beta_{pd})(\gamma_g)(Z)(T)}{L_p^2} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{pd}} \right) \dots\dots\dots(6.12)$$

γ_g = densidad relativa (aire = 1.0)

$$\beta_{pd} = (2.33)(10^{10})(k_{pd}^{-1.201}) \dots\dots\dots(6.13)$$

Coefficientes de velocidad calculada

β_{pd} reproduce cercanamente los valores experimentales. El valor de β_{pd} puede también ser estimado de las mediciones de laboratorio en núcleos y de otras fuentes en la literatura.

Caídas de presión a través del yacimiento

Las caídas de presión a través del yacimiento pueden ser calculadas con la ecuación de flujo radial para flujo de gas.

$$P_R^2 - P_{sf}^2 = C(q_g) + D(q_g)^2 \dots\dots\dots(6.14)$$

$$C = \frac{1.424(10^3)(\mu_g)(Z)(T)}{(k)(h_r)} \left[\ln \left(\frac{0.472r_e}{r_w} \right) + S \right] \dots\dots\dots(6.15)$$

$$S = S_d + S_{bf} + S_{dl} \dots\dots\dots(6.8)$$

$$D = \frac{(3.16)(10^{-12})(\gamma_g)(Z)(T)}{h_p^2} \left[\beta_{dd} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) + \beta_f \left(\frac{1}{r_{dd}} - \frac{1}{r_e} \right) \right] \dots\dots\dots(6.16)$$

$$\beta_{dd} = (2.33)(10^{10})(k_{dd}^{-1.201})$$

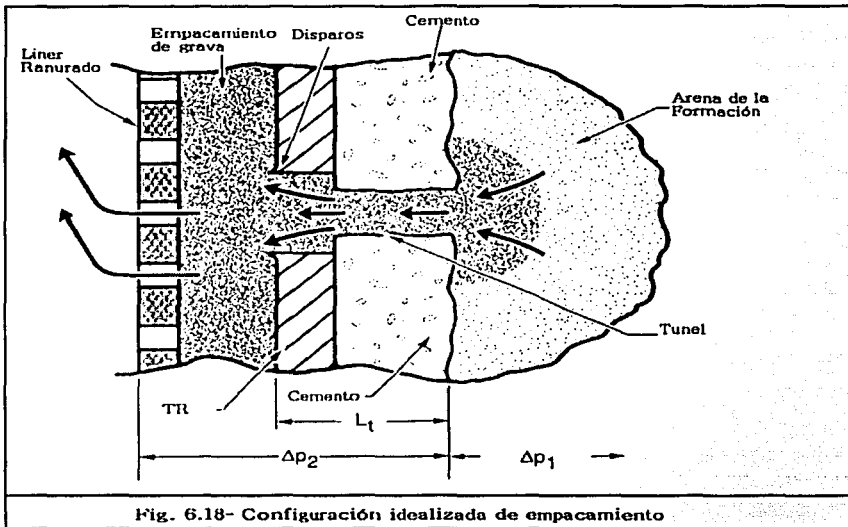
$$\beta_f = (2.33)(10^{10})(k_f^{-1.201})$$

De nueva cuenta la caída de presión a través del sistema indica la eficiencia de la terminación disparada.

La influencia de la turbulencia generalmente es muy substancial para pozos de gas y no debe ser ignorada; entre los acercamientos utilizados para predecir el desempeño de los pozos de gas con flujo turbulento se utiliza la técnica de Mc Leod¹⁹ junto con su extensión para flujo en dos fases.

Terminaciones de empacamiento de grava

La figura 6.18 muestra una configuración idealizada de empacamiento de grava perforada. Ahí usualmente no es abierto un canal perforado en la formación, pero en cambio hay un volumen esférico donde la grava ha desplazado la arena de la formación. La caída de presión de la frontera del yacimiento hacia el pozo incluye la caída de flujo convergente en la región cercana al pozo (ΔP_1 en la figura 6.17) y la caída de presión a través del túnel pasando el cemento, la TR y el liner (ΔP_2 en la figura 6.17)



ΔP_1 puede ser calculada con los procedimientos señalados para aceite y gas, generalmente ΔP_1 es insignificante comparado con ΔP_2 , más aún experimentos indican que el flujo a través del túnel puede ser turbulento, resultando en incluso mayores caídas de presión que las predecidas con las ecuaciones con flujo laminar. La figura 6.19 muestra un ejemplo de caídas de presión a través de túneles rellenos con grava.

Pozos de aceite

ΔP_2 puede ser calculado de

$$\Delta P_2 = 0.888 \frac{L_1 \mu_o B_o q_o}{k_g A_1} + (9.1)(10^{-13}) \beta_g B_o^2 L_T \rho_o \left(\frac{q_o}{A_1} \right)^2 \dots \dots \dots (6.17)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

²² Mc Leod, The effect of Perforating Conditions on Well Performance. JPT 1983

donde:

A_1 = área transversal total del túnel (ft²)

k_g = permeabilidad del material del túnel (D), determinados de la tabla 6.2

L_T = longitud del túnel (diámetro interno de la TR a la cara de la arena ver figura 6.18) (ft) (debe notarse que las pérdidas de presión a través del empacamiento de grava y el liner ranurado son insignificantes comparados con las pérdidas en el túnel).

$$\beta_g = (1.47)(10^7)(k_g)^{0.55} \dots\dots\dots(6.18)$$

$1/\beta$ puede también ser aproximado de la información del laboratorio.

ΔP_1 es calculado con la ecuación 6.6 a 6.9, la caída de presión total del yacimiento hacia el pozo es la suma de ΔP_1 y ΔP_2

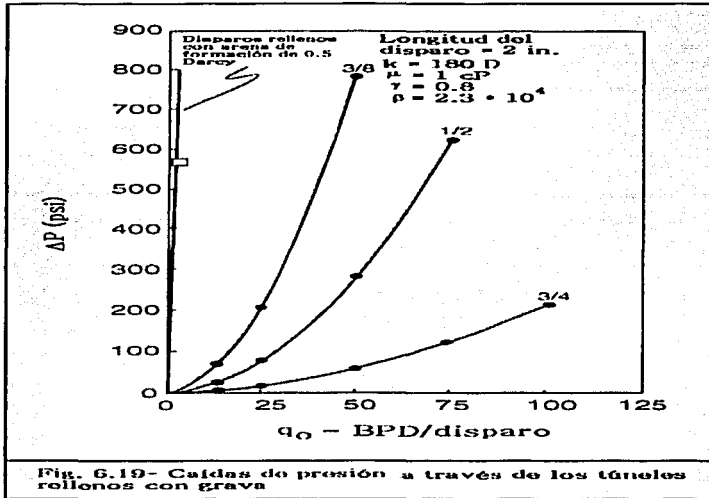


Fig. 6.19- Caídas de presión a través de los túneles rellenos con grava

ΔP_2 puede ser cuantificado en términos del factor de daño con:

$$s_g = \Delta P_2 \left(\frac{(k)(h)}{141.2(q_0)(B_o)(\mu_o)} \right) \dots\dots\dots(6.19)$$

donde:

h = espaciamento entre disparos (ft)

k = permeabilidad de la formación (mD)

s_g = daño causado por el túnel (adim)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Los componentes darcianos y no darcianos del daño pueden ser cuantificados separadamente con la ecuación 19. Los daños por empacamiento de grava pueden ser sumados a la contribución de otros daños para obtener un valor compuesto de daño para la terminación.

Pozos de Gas

ΔP_2 puede ser determinado de

$$\Delta P_2^2 = \frac{(8.93)(10^3)(\mu_g)(T)(z)(L_T)(q_g)}{(k_g)(A_t)} + (1.247)(10^{-10})(\beta_g)(\gamma_g)(T)(z)(L_T) \left(\frac{q_g}{A_t} \right)^2 \dots\dots(6.20)$$

donde

$$\beta_g = (1.47)(10^7)(k_g^{-0.55}) \dots\dots\dots(6.21)$$

β puede ser aproximado de la información del laboratorio

ΔP_1 es calculado con la ecuación 6.14 a 6.16. La caída de presión total del yacimiento al pozo es la suma de ΔP_1 y ΔP_2

ΔP_2 puede ser cuantificado en términos del factor de daño de:

$$s_g = \Delta P_2 \left(\frac{(7.02)(10^4)(k)(h)}{(q_g)(T)(z)(\mu_g)} \right) \dots\dots\dots(6.22)$$

Tabla 6.2 Permeabilidad del material en el tunel

Tamaño de arena (in.)	Medida de malla	Diámetro medio aproximado		Permeabilidad Darcies
		In.	μm	
0.006*0.017	40/100	0.012	300	30
0.008*0.017	40/70	0.013	330	35
0.010*0.017	40/60	0.014	350	40
0.012*0.023	40/50	0.017	325	60
0.017*0.033	20/40	0.025	630	120
0.023*0.047	16/30	0.035	880	250
0.033*0.066	12/20	0.050	1260	450
0.039*0.066	12/18	0.053	1340	480
0.033*0.079	10/20	0.056	1410	500
0.047*0.079	10/16	0.063	1590	630
0.066*0.094	8/12	0.080	2020	1000
0.079*0.132	6/10	0.106	2670	1800

Los componentes darcianos y no darcianos pueden ser cuantificados separadamente con la ecuación 6.22. El daño de empacamiento de grava puede ser sumado a la contribución de otros daños para obtener un valor compuesto de daño para la terminación.

Nomograma de Locke

La utilización del nomograma de Locke (figura 6.20) es demostrado en el siguiente ejemplo y sirve para conocer la relación de productividad y el factor de daño causado por los disparos y la perforación del pozo.

Parámetros del pozo

Longitud del disparo (API RP43 sec. 2)(in)*	12.0
Diámetro del disparo (API RP43 sec. 1)(in)*	0.5
Espesor de zona dañada de pozo (in)	6.0
Reducción de la permeabilidad de la zona dañada del pozo (k_{fd}/k)	0.4
Reducción de la permeabilidad de la zona dañada por el disparo (k_{pd}/K)	0.2
(el nomograma esta basado en una constante de 0.5 pulgadas, espesor de la zona dañada del disparo k_{pd}/k puede ser derivado del API RP 43 o información similar)*	
Disparos por pie	4
Fase angular	90°

* longitud, diámetro y permeabilidades ajustados para condiciones en el pozo, como se estableció en el capítulo 5.

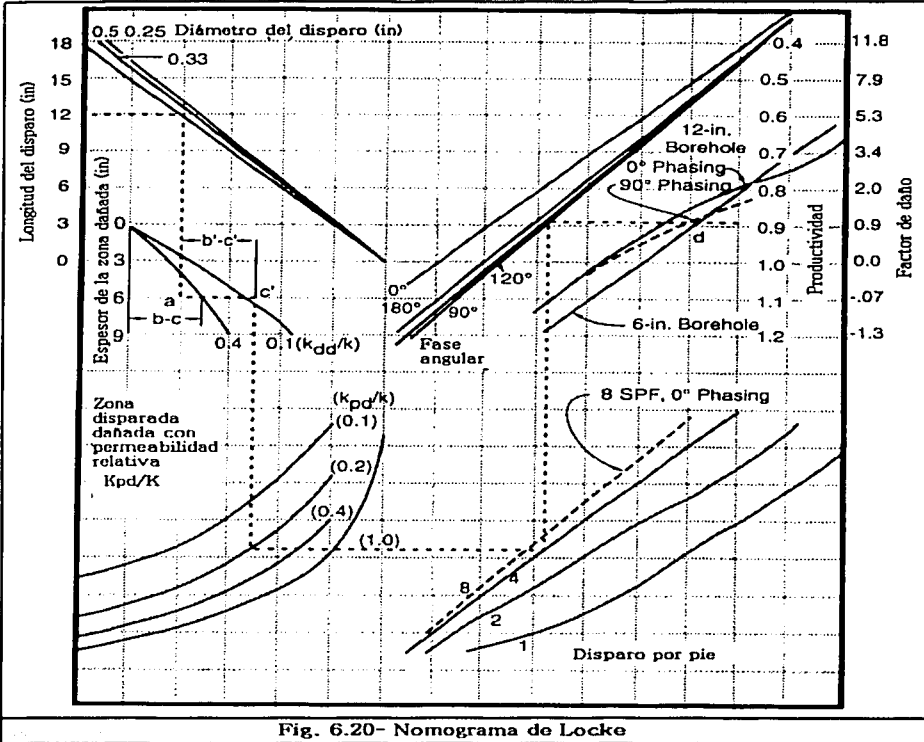


Fig. 6.20- Nomograma de Locke

1. Entrando con la longitud de disparo de 12.0" a la izquierda superior y procediendo horizontalmente al apropiado diámetro de disparo, 0.5".
2. Proceder verticalmente hacia abajo al espesor de zona dañada de pozo 6.0". Midiendo a lo largo de la línea de 6.0" desde el eje vertical a la línea apropiada k_{da}/k 0.4. La distancia es b-c, midiendo del punto a, transfiriendo la distancia b-c a b'-c'.
3. Proceder verticalmente hacia abajo a la línea de valor de reducción de permeabilidad de la zona dañada de disparo (k_p/k) 0.2.
4. Proceder horizontalmente a la línea de densidad de disparos.
5. Proceder verticalmente hacia arriba a la línea de fase angular 90°.
6. Procediendo horizontalmente a la relación de productividad y factor de daño. La relación de productividad es 0.8, el factor de daño causado de disparos y perforación del pozo es 0.92.

El nomograma esta basado en el diámetro de agujero de 6", pero los efectos en la variación del tamaño de agujero no son significativos, y el nomograma puede ser utilizado sin modificaciones sobre un rango considerable de tamaños de agujero de diámetro de disparo.

El rango del nomograma de alguna forma es limitado y resulta aparente en la figura 6.20. Las modernas pistolas multifásicas de alta densidad de disparos no se encuentran representadas. Más aún, los resultados de daño de la penetración parcial, desviación del pozo, anisotropía de la formación y flujo no Darciano no están determinados. Sin embargo el nomograma sigue permitiendo un rápido análisis de los resultados de daño de los disparos y de la perforación del pozo.

Método semi-analítico

Un acercamiento semi-analítico simple, sistemático y preciso (dependiendo de la calidad de la información de entrada), para la examinación del daño envuelven expresiones algebraicas simples para determinar los elementos discretos de daño total. Estos elementos son combinados para establecer una expresión para el daño total S_{ST}

$$S_t = S_{bf} + \frac{1}{b_f} \left[\frac{1}{\gamma} (S_p) + \frac{1}{20} (9 + 11b_f) S_{af} \right] \dots\dots\dots(6.23)$$

donde:

b_f = fracción de la formación abierta al flujo (Adm.)

γ = factor de corrección (Adm.)

Daños individuales que conforman el daño total S_{ST} están determinados como siguen:

Daño del disparo.

El daño resultante del disparo es compuesto de diversos elementos:

$$S_d = S_{H} + S_{V} + S_{wb} + S_{pd} \dots\dots\dots(6.24)$$

Donde

S_H = daño horizontal o plano de flujo (adim)

S_V = daño de flujo vertical o convergente (adim)

S_{wb} = daño resultado por efectos del pozo (adim)

S_{pd} = componente del daño resultado de los disparos (adim)

S_p = daño causado por el disparo (adim)

Daño horizontal para fase de disparo 0°

$$S_H = \ln \left(\frac{r_w}{0.25Lp} \right) \dots\dots\dots(6.25)$$

Longitud del disparo es determinado como se describe en el capítulo 5 y pueden ser ajustados como se describe en la ecuación 6.36 para compensar el daño en el pozo por la perforación del mismo.

Daño horizontal para diversas fases

$$S_H = \ln \left(\frac{r_w}{\alpha_\theta (Lp + r_w)} \right) \dots\dots\dots(6.26)$$

donde:

α_θ = parámetro de fase de la tabla 6.3, éste parámetro α puede ser utilizado para configuraciones de disparo en grupo o grupos. Sin embargo la presión disminuye con los arreglos de este tipo.

Tabla 6.3 Parámetro α_0 para varias fases

Fase de los disparos (grados)	α_0
0 (360)	0.250
180	0.500
120	0.648
90	0.726
60	0.813
45 (135)	0.860
30 (150)	0.912

Daño vertical

$$S_v = 10^a h_D^{b-1} r_{pD}^b \dots\dots\dots(6.27)$$

donde

$$a = a_1 \log_{10}(r_{pD}) + a_2 \dots\dots\dots(6.28)$$

Con a_1 y a_2 determinados de la tabla 6.4 para la apropiada fase de disparo;

$$b = (b_1)(r_{pD}) + b_2 \dots\dots\dots(6.29)$$

Con b_1 y b_2 determinados de la tabla 6.4 para la apropiada fase de disparo; h_D = espaciamiento del disparo (adim)

$$h_D = \frac{h}{L_p} \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} \dots\dots\dots(6.30)$$

h = espaciamiento del disparo (ft)

k_H = permeabilidad horizontal de la formación (mD)

k_V = permeabilidad vertical de la formación (mD)

r_{pD} = radio del disparo (adim)

$$r_{pD} = \frac{r_p}{2h} \left(1 + \sqrt{\frac{k_V}{k_H}} \right) \dots\dots\dots(6.31)$$

con r_p = radio del disparo (ft)

Tabla 6.4 Parámetros a_1, a_2, b_1 y b_2 para varias fases

Fase (grados)	a_1	a_2	b_1	b_2
0 (360)	-2.091	0.0453	5.1313	1.8672
180	-2.025	0.0943	3.0373	1.8115
120	-2.018	0.0634	1.6136	1.7770
90	-1.905	0.138	1.5674	1.6935
60	-1.898	0.123	1.3654	1.6490
45 (135)	-1.788	0.2398	1.1915	1.6392
30 (150)	-1.670	0.3460	1.0243	1.6300

Efecto del daño del pozo.

$$S_{wb} = c_1 \exp \left[c_2 \left(\frac{r_w}{L_p + r_w} \right) \right] \dots\dots\dots(6.32)$$

donde: c_1 y c_2 están dados en la tabla 6.5 para varias fases de disparos.

Fase (grados)	c_1	c_2
0 (360)	0.16	2.675
180	0.026	4.532
120	0.0066	5.320
90	0.0019	6.155
60	0.0003	7.509
45 (135)	0.000046	8.791
30 (150)	0.000008	9.930

Efecto del daño de la zona dañada disparada

$$S_{pD} = \frac{h}{L_p} \left(\frac{k}{k_{pd}} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_{pd}}{r_p} \right) \dots\dots\dots(6.33)$$

Daño de disparo combinado

Como se indicó en el principio, el daño combinado de disparo S_p es:

$$S_p = S_{H1} + S_v + S_{wb} + S_{pd} \dots\dots\dots(6.24)$$

Efectos de la zona dañada por la perforación del pozo

S_p debe ser modificado para que tome en cuenta el efecto de la zona dañada por la perforación del pozo que se encuentra alrededor del pozo. Para disparos que no se extienden más allá de la zona dañada por la perforación del pozo.

$$S_p' = \left(\frac{k}{k_{dd}} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_{dd}}{r_w} \right) + \left(\frac{k}{k_{dd}} \right) (S_p + S_x) \dots\dots\dots(6.34)$$

donde

S_p' = es el daño de disparo modificado (adim)

S_x = está dado en la tabla 6.6 y es despreciado para $r_d \geq 1.5 (r_w + L_p)$

$re / (r_w + L_p)$	s_x
18.0	0.000
10.0	-0.001
2.0	-0.002
1.5	-0.024
1.2	-0.085

Para disparos extendidos más allá de la zona dañada debe modificarse el radio del pozo y la longitud del disparo por medio de:

$$L_p' = L_p - \left(1 - \frac{k_{dd}}{k} \right) L_{dd} \dots\dots\dots(6.35 \text{ y } 6.36)$$

$$r_w' = r_w + \left(1 - \frac{k_{dd}}{k} \right) L_{dd}$$

donde:

L_p' = longitud del disparo modificado (ft)

r_w' = radio del pozo modificado (ft)

Utilice L_p' y r_w' en lugar de L_p y r_w para determinar S_{fi} , S_{wb} y S_{pd}

Daño por desviación del pozo

Cinco-L et. al.²⁰ desarrollaron la siguiente expresión para el daño, resultado de la desviación del pozo, S_{od} :

$$S_{od} = -\left(\frac{\theta_d'}{41}\right)^{2.06} - \left(\frac{\theta_d'}{56}\right)^{1.865} \log_{10}\left(\frac{h_{ID}}{100}\right) \dots\dots\dots(6.37)$$

$$h_{ID} = \left(\frac{h_i}{r_r}\right) \sqrt{\frac{k_{II}}{k_V}} \dots\dots\dots(6.38)$$

$$\theta_d' = \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{k_V}{k_{II}}} \tan \theta_d\right) \dots\dots\dots(6.39)$$

donde:

h_{ID} = espesor de la formación (adim)

θ_D = desviación del pozo (suma de la desviación o ángulo de desviación y la verdadera inclinación por ejemplo el ángulo que el pozo hace cuando con un plano normal imaginario en la zona productora) (grados)

θ_D' = desviación ajustada del pozo (grados)

Daño por penetración parcial

La expresión más simple para el cálculo del daño causado por la penetración parcial de la zona productora está dada por Odeh²¹:

$$S_{bf} = 1.35 \left\{ \left(\frac{h_i}{h_p} - 1\right)^{0.825} \left[\ln\left(h_i \sqrt{\frac{k_{II}}{k_V}} + 7\right) - \left[0.49 + 0.1 \ln\left(h_i \sqrt{\frac{k_{II}}{k_V}}\right) \right] \ln(r_{wc}) - 1.95 \right] \right\} \dots(6.40)$$

$$r_{wc} = (r_w) \exp\left[0.2126 \left(\frac{z_m}{h_i} + 2.753\right) \right] \text{ para } y > 0 \dots\dots\dots(6.41)$$

(para $0 < z_m/h_i < 0.5$, utilice la ecuación 6.41; cuando $z_m/h_i > 0.5$ reemplace z_m/h_i por $(1 - z_m/h_i)$)

r_{wc} = radio corregido del pozo (ft)

$r_w = r_{wc}$, $y=0$ (6.42)

y = distancia entre la pared de arriba de la arena y la parte de arriba del intervalo abierto (ft)

y $Z_m = y + (h_p/2)$(6.43)

Vrbick²² estableció un superior pero más complejo acercamiento, para determinar el daño por penetración parcial.

²⁰ Cinco-L et. al. Unsteady State Pressure Distribution Created by a Directional Drilled Well JPT 1975

²¹ Odeh, A.S: An Equation for Calculating Skin Factor Due to Partial Well Completion JPT 1980

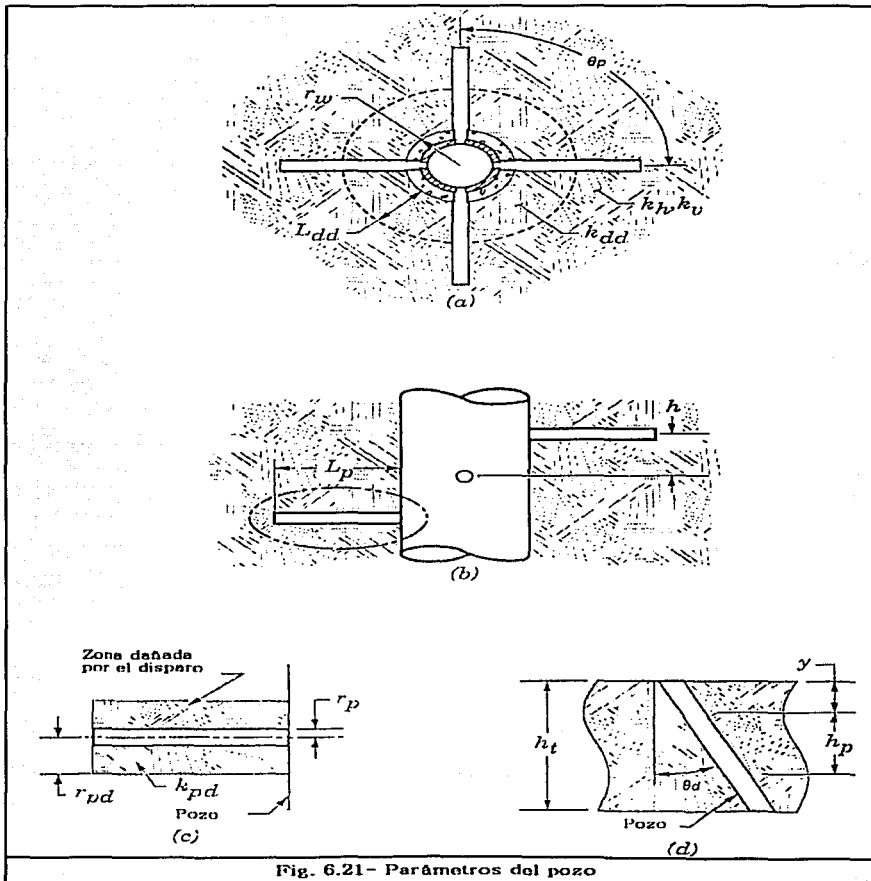
²² Vrbik, J. Calculating the Pseudosteady State flow Capacity of Oil Wells UIT Limited Entry and an Altered Zone Around the Wellbore SPEJ 1977

Efectos no Daricanos

El daño no Darciano puede ser determinado como se describió anteriormente en la discusión del acercamiento analítico para predecir el flujo del pozo. El daño no darciano es adicionado al daño total determinado en la sección siguiente.

Daño total

Cuando el valor del factor de corrección γ es determinado, los diversos elementos del daño pueden ser combinados por medio de la ecuación 6.23. El valor de γ depende en el radio de la zona dañada por la perforación del pozo y el grado de anisotropía de la formación. Odeh presentó un simple pero preciso juego de expresiones para determinar γ .



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Si el intervalo abierto al flujo empezaba en la cima de la zona productora

$$\gamma = \log_{10} \left(\frac{h_p}{r_w} \right) \left[0.66 - 0.62 \left(\frac{r_{dd}}{h_p} \right)^{0.33} \right] + 1.12 \left(\frac{r_{dd}}{h_p} \right)^{0.33} \dots\dots\dots(6.44)$$

Ecuación 6.46 es sujeta a la limitación de que $\gamma = 1.0$ cuando

$$r_{dd} \leq (0.13)(h_p)/r_w \dots\dots\dots(6.45)$$

$$\text{o cuando } h_p \geq (0.85)(h_i) \dots\dots\dots(6.46)$$

Más aún si γ es determinada para ser < 1.0 , este debe ser ajustado a 1.0

Si el intervalo abierto no empieza en la cima de la zona productora la ecuación 6.44 se transforma en:

$$\gamma = \log_{10} \left(\frac{h_p}{r_{wc}} \right) \left[0.66 - 0.62 \left(\frac{r_{ddc}}{h_p} \right)^{0.33} \right] + 1.12 \left(\frac{r_{ddc}}{h_p} \right)^{0.33} \dots\dots\dots(6.47)$$

donde $r_{ddc} = r_{wc}/r_w \dots\dots\dots(6.48)$
y r_{wc} es determinado con la ecuación 6.41

La ecuación 6.47 es válida cuando $\gamma \geq 0.05h_i$

Cuando $\gamma < 0.05h_i$, utilice la ecuación 6.44

La anisotropía de la formación requiere correcciones adicionales:

$$h_p' = (h_p) \sqrt{\frac{k_{H1}}{k_V}} \dots\dots\dots(6.49)$$

$$h_i' = (h_i) \sqrt{\frac{k_{H1}}{k_V}} \dots\dots\dots(6.50)$$

los valores corregidos de h_p' y h_i' deben ser utilizados en lugar de h_p y h_i en las ecuaciones 6.44 a 6.47.

6.6 Ejemplo de predicción de eficiencia de flujo.

La utilización de un acercamiento semi analítico en la predicción de la eficiencia de terminación es demostrada en el siguiente ejemplo. Los diversos parámetros de entrada (figura 6.21) son los siguientes:

h = espacio entre disparos	0.25ft
h_p = longitud vertical del intervalo disparado	60.0ft
h_i = espesor de la formación	100.0 ft
θ_d = desviación del pozo	30.0°
θ_p = fase de la pistola	90.0°
k_{da} = permeabilidad de la zona dañada por la perforación del pozo	40.0 mD
k_{H1} = permeabilidad horizontal de la formación	100.0 mD
k_{pd} = permeabilidad de la zona dañada por el disparo	20.0 mD
k_V = permeabilidad vertical de la formación	20.0 mD
L_{da} = longitud de la zona dañada de la zona dañada por la perforación del pozo	0.5 ft
L_p = longitud de los disparos (corregidos como	

se describió en el capítulo 5, penetración real

<i>más allá del pozo</i>	<i>1.0 ft</i>
$r_p =$ radio de disparo	<i>0.0208 ft</i>
$r_{pd} =$ radio zona dañada por perforación del pozo	<i>0.0625 ft.</i>
$r_w =$ radio del pozo	<i>0.3646 ft</i>
$y =$ distancia entre la cima de la arena y la cima del intervalo abierto	<i>20.0 ft</i>

Flujo darciano es supuesto.

Daño por disparo

Este es el resultado de diversos daños como lo establece la ecuación 6.24

$$S_p = S_{H1} + S_v + S_{wb} + S_{pd} \dots \dots \dots (6.24)$$

Efectos de daño por la perforación

El daño por la perforación alrededor del pozo requiere modificaciones de la longitud del disparo, L_p y el radio del pozo, r_w , porque la extensión de los disparos va más allá de la zona dañada, las ecuaciones 6.35 y 6.36 son utilizadas.

$$L_p' = L_p - \left(1 - \frac{k_{dd}}{k}\right) L_{dd}$$

$$L_p' = 1.0 - \left(1 - \frac{40}{100}\right) (0.5)$$

$$L_p' = 0.700 \text{ ft}$$

$$r_w' = r_w + \left(1 - \frac{k_{dd}}{k}\right) L_{dd}$$

$$r_w' = 0.3646 + \left(1 - \frac{40}{100}\right) (0.5)$$

$$r_w' = 0.6646 \text{ ft}$$

Los valores de L_p' y r_w' son utilizados para determinar los elementos específicos del daño por disparo.

Daño horizontal

De la ecuación 6.26

$$S_H = \ln \left(\frac{r_w'}{\alpha (L_p' + r_w')} \right)$$

$$S_H = \ln \left(\frac{0.6646}{(0.726)(0.7000 + 0.6646)} \right)$$

$$S_H = 0.3992$$

donde α es determinado de la tabla 6.3

Daño vertical

De la ecuación 6.27 a 6.31

$$S_v = 10^a h_D^{b-1} r_{pD}^b$$

$$r_{pD} = \frac{r_p}{2h} \left(1 + \sqrt{\frac{k_v}{k_H}} \right)$$

$$r_{pD} = \frac{0.0208}{2(0.25)} \left(1 + \sqrt{\frac{20}{100}} \right)$$

$$r_{pD} = 0.0602$$

$$a = a_1 \log_{10}(r_{pD}) + a_2$$

$$a = (-1.905) \log_{10}(0.0602) + 0.1038$$

$$a = 2.4287$$

a_1 y a_2 determinados de la tabla 6.4

$$b = (b_1)(r_{pD}) + b_2$$

$$b = (1.5674)(0.0602) + 1.6935$$

$$b = 1.7879$$

b_1 y b_2 determinados de la tabla 6.4

$$h_D = \frac{h}{L_p} \sqrt{\frac{k_H}{k_v}}$$

$$h_D = \frac{0.25}{0.700} \sqrt{\frac{100}{20}}$$

$$h_D = 0.7986$$

finalmente:

$$S_v = 10^a h_D^{b-1} r_{pD}^b$$

$$S_v = (10^{2.4287})(0.7986^{0.7879})(0.0602^{1.7879})$$

$$S_v = 1.4784$$

Efecto de daño del pozo

De la ecuación 6.32

$$S_{wb} = c_1 \exp \left[c_2 \left(\frac{r_w'}{L_p' + r_w'} \right) \right]$$

$$S_{wb} = (1.9 * 10^{-3}) \exp \left[(6.155) \left(\frac{0.6646}{0.700 + 0.6646} \right) \right]$$

$$S_{wb} = 0.381$$

Donde c_1 y c_2 fueron determinados de la tabla 6.5

Daño de la zona dañada por los disparos

De la ecuación 6.33

$$S_{pD} = \frac{h}{L_p} \left(\frac{k}{k_{pd}} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_{pd}}{r_p} \right)$$

$$S_{pD} = \frac{0.25}{0.700} \left(\frac{100}{20} - 1 \right) \ln \left(\frac{0.0625}{0.0208} \right)$$

$$S_{pD} = 1.5717$$

Daño combinado de disparo

Combinando los elementos de daño se obtiene el daño total por disparo

$$S_p = S_H + S_v + S_{wb} + S_{pd}$$

$$S_p = -0.3992 + 1.4783 + 0.0381 + 1.5717$$

$$S_p = 2.6889$$

Daño por desviación del pozo

S_{0d} puede ser determinado con el acercamiento propuesto por Cinco-L et. al. de las ecuaciones 6.37 a 6.39.

$$h_{iD} = \left(\frac{h_i}{r_w} \right) \sqrt{\frac{k_{II}}{k_V}}$$

$$h_{iD} = \left(\frac{100}{0.3646} \right) \sqrt{\frac{100}{20}}$$

$$h_{iD} = 613.3$$

$$\theta_d' = \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{k_V}{k_{II}}} \tan \theta_d \right)$$

$$\theta_d' = \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{20}{100}} \tan 30 \right)$$

$$\theta_d' = 14.48^\circ$$

$$S_{0d} = - \left(\frac{\theta_d'}{41} \right)^{2.06} - \left(\frac{\theta_d'}{56} \right)^{1.865} \log_{10} \left(\frac{h_{iD}}{100} \right)$$

$$S_{0d} = - \left(\frac{14.48}{41} \right)^{2.06} - \left(\frac{14.48}{56} \right)^{1.865} \log_{10} \left(\frac{613.3}{100} \right)$$

$$S_{0d} = -0.1804$$

Daño por penetración parcial

Dado que la zona de producción completa no se encuentra abierta al flujo, el efecto de S_{br} debe ser determinado con las ecuaciones 6.40 a 6.43

$$Z_m = y + (h_p/2)$$

$$Z_m = 20 + (60/2)$$

$$Z_m = 50$$

$$r_{wc} = (r_w) \exp \left[0.2126 \left(\frac{z_m}{h_i} + 2.753 \right) \right]$$

$$r_{wc} = (0.3646) \exp \left[0.2126 \left(\frac{50}{100} + 2.753 \right) \right]$$

$$r_{wc} = 0.7281$$

$$S_{bf} = 1.35 \left(\frac{h_i}{h_p} - 1 \right)^{0.825} \left\{ \ln \left(h_i \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} + 7 \right) - \left[0.49 + 0.1 \ln \left(h_i \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} \right) \right] \ln(r_{wc}) - 1.95 \right\}$$

$$S_{bf} = 1.35 \left(\left(\frac{100}{60} - 1 \right) \right)^{0.825} \left\{ \ln \left(100 \sqrt{\frac{100}{20}} + 7 \right) - \left[0.49 + 0.1 \ln \left(100 \sqrt{\frac{100}{20}} \right) \right] \ln(0.7281) - 1.95 \right\}$$

$$S_{bf} = 3.6887$$

Daño total

De la ecuación 6.23

$$S_t = S_{bf} + \frac{1}{b_f} \left[\frac{1}{\gamma} (S_p) + \frac{1}{20} (9 + 11b_f) S_{at} \right]$$

De la ecuación 6.47 a 6.50

$$h_p' = (h_p) \sqrt{\frac{k_H}{k_V}}$$

$$h_p' = (60) \sqrt{\frac{100}{20}}$$

$$h_p' = 134.2$$

$$h_i' = (h_i) \sqrt{\frac{k_H}{k_V}}$$

$$h_i' = (100) \sqrt{\frac{100}{20}}$$

$$h_i' = 223.6$$

$$Z_m = y + (h_p'/2)$$

$$Z_m = 60 + (134.2/2)$$

$$Z_m = 127.1$$

$$r_{wc} = (r_w) \exp \left[0.2126 \left(\frac{z_m}{h_i} + 2.753 \right) \right]$$

$$r_{wc} = (0.3646) \exp \left[0.2126 \left(\frac{127.1}{223.6} + 2.753 \right) \right]$$

$$r_{wc} = 0.7387$$

donde:

$$r_{ddc} = r_{dd}(r_{wc}/r_w)$$

$$r_{ddc} = (0.8646)(0.7387/0.3646)$$

$$r_{ddc} = 1.7517$$

$$\gamma = \log_{10} \left(\frac{h_p}{r_{wc}} \right) \left[0.66 - 0.62 \left(\frac{r_{ddc}}{h_p} \right)^{0.33} \right] + 1.12 \left(\frac{r_{ddc}}{h_p} \right)^{0.33}$$

$$\gamma = \log_{10} \left(\frac{134.2}{0.7387} \right) \left[0.66 - 0.62 \left(\frac{1.751}{134.2} \right)^{0.33} \right] + 1.12 \left(\frac{1.7517}{134.2} \right)^{0.33}$$

$$\gamma = 1.4241$$

Finalmente

$$S_t = S_{bf} + \frac{1}{b_f} \left[\frac{1}{\gamma} (S_p) + \frac{1}{20} (9 + 11b_f) S_{at} \right]$$

$$S_t = 3.6888 + \frac{1}{0.6} \left[\frac{1}{1.4241} (2.6884) + \frac{1}{20} (9 + (11)(.06))(-0.1805) \right]$$

$$S_t = 6.60$$

El efecto de S_{bf} es evidente, como lo es el efecto del daño por disparos, resultado de la zona dañada por disparo y el efecto del daño extensivo de la perforación del pozo a la zona alrededor del pozo.

Si se tiene el mismo pozo y planeando terminar con una pistola con fase 45°, con densidad de 12 disparos / pie y todos los otros parámetros constantes, S_t resultaría de 3.99, de lo cual se puede notar que el daño de la penetración parcial es ahora dominante. (El lector interesado experimentará con otros ejemplos para incrementar el entendimiento de la influencia de varios elementos de daño y como ellos pudieran ser compensados).

6.7 Diagnóstico de la eficiencia de flujo resultante

Una vez que el pozo es terminado una variedad de métodos pueden ser utilizados para examinar la eficiencia de flujo del pozo resultante y diagnosticar los posibles problemas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Registros de Producción

Los registros de producción miden el flujo o gasto de inyección y puede detectar movimientos de fluidos por la parte posterior de la TR y tuberías de producción, flujo cruzado entre dos o más zonas y conificación de fluidos. La examinación incluye medidores de flujo, temperatura, densidad de fluido, marcadores radioactivos, activación de oxígeno y registro de neutrón pulsado. La medición de ruido y el análisis de muestras de fluido son utilizados para aplicaciones especiales y la evaluación de terminación adecuada generalmente requiere el uso de múltiples mediciones en serie o combinaciones.

En la figura 6.22 un medidor de flujo muestra que solo 18 de 32 disparos están produciendo, este pozo fue terminado con una pistola "a través de tubería" en múltiples viajes. La presión bajo balanceada fue efectiva sólo para el primer viaje, en la figura 6.23 medidores de flujo y de temperatura muestran que solo los disparos superiores en la inyección de agua al pozo están aceptando fluido.

Registros de neutrón pulsado pueden detectar hidrocarburos no producidos en secciones perforadas, indicando disparos no productores. Marcadores radioactivos combinados con registros de temperatura, pueden detectar comunicación vertical por la parte trasera de la TR. La combinación de varios sensores con la sarta de disparos pueden establecer la evaluación de los disparos y la terminación, en un solo viaje al pozo con monitores en tiempo real y control.

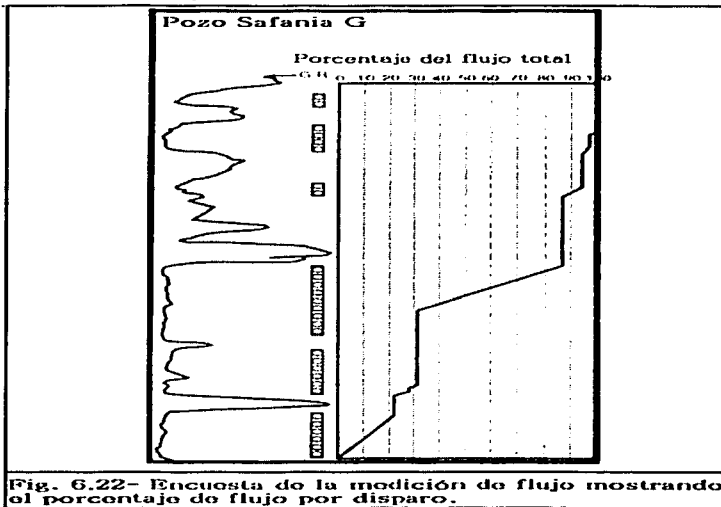


Fig. 6.22- Encuesta de la medición de flujo mostrando el porcentaje de flujo por disparo.

Pruebas de pozo

Pruebas de transición de presión proveen información del desempeño del pozo a un punto en el tiempo donde las condiciones de flujo del pozo son perturbadas y la presión o el gasto de flujo resultantes son comparados con los modelos matemáticos. La información cuantitativa (factor de daño) de pruebas de transición de presión puede responder la pregunta crítica de si la baja productividad resulta de una inadecuada operación de disparos, baja permeabilidad de la formación o baja presión del yacimiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Prueba de Formación.

Una prueba DST es una terminación temporal para producir una limitada cantidad de fluido del yacimiento, una DST en agujero descubierto indica el grado de daño a la formación alrededor del pozo. Las operaciones de terminación pueden ser evaluadas por comparación de una prueba DST en agujero abierto y en agujero revestido.

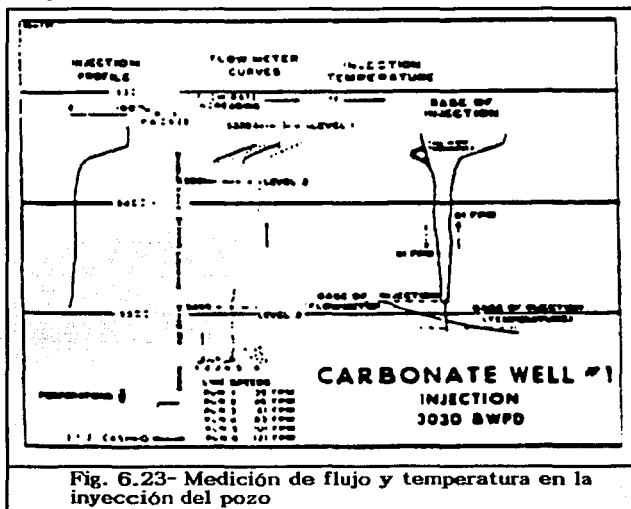


Fig. 6.23- Medición de flujo y temperatura en la inyección del pozo

Pruebas de incremento y decremento de presión.

En una prueba de decremento de presión, el fluido del yacimiento es producido, generalmente a un gasto constante y la presión es monitoreada. En una prueba de incremento de presión, el pozo es fluido lo suficiente para establecer condiciones de estado estable y cerrado para observar las presiones en el fondo del pozo y su comportamiento.

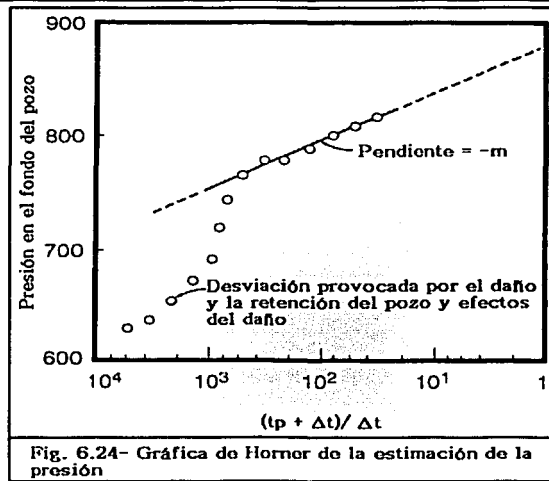
La figura 6.24 presenta una típica gráfica Horner²³ de comportamiento de presión. Un comportamiento lineal indica flujo radial hacia el pozo, la pendiente de la línea recta indica la permeabilidad de la formación y permite la estimación de la presión en el yacimiento y el factor de daño, los valores de daño deben ser comparados con aquellos de pozos adyacentes, para determinar la eficiencia de la terminación.

Análisis de Sistemas con método analítico

El análisis de sistemas puede determinar si la baja productividad siendo menor que la esperada es causada por deficiencias en el yacimiento, daño cerca del pozo o disparos, restricciones en las tuberías de producción del pozo o equipamiento superficial. Ya que estas caídas de presión son interdependientes, el sistema completo de producción debe ser analizado como una unidad, ejemplo: análisis nodal.

²³ Earlougher, R.C. *Advances in Well Test Analysis* SPE 1977

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La habilidad del yacimiento para entregar fluido al pozo es estimada con ecuaciones simples de flujo-estable para generar curvas de Relaciones de Desempeño de Flujo o IPR (inflow performance relationship) figura 6.27. Las caídas de presión a través de los disparos, pueden ser aproximadas y sustraídas de las curvas IPR para indicar la capacidad del yacimiento y disparos para entregar fluido en el fondo de la tubería de producción a diferentes contrapresiones (figura 6.27). La curva de tubería, la cual incluye pérdidas de presión en la línea de flujo, sarta de tubería, válvulas de seguridad y otro equipo, representan el desempeño por un valor arreglado de presión en la cabeza del pozo y la configuración de tuberías, éste es obtenido con correlaciones multifásicas en tuberías verticales. La intersección de la línea de tubería y las curvas IPR indican el desempeño de un sistema específico de terminación. A través del análisis del desempeño de sistemas, las deficiencias pueden ser aisladas y acciones correctivas planeadas.

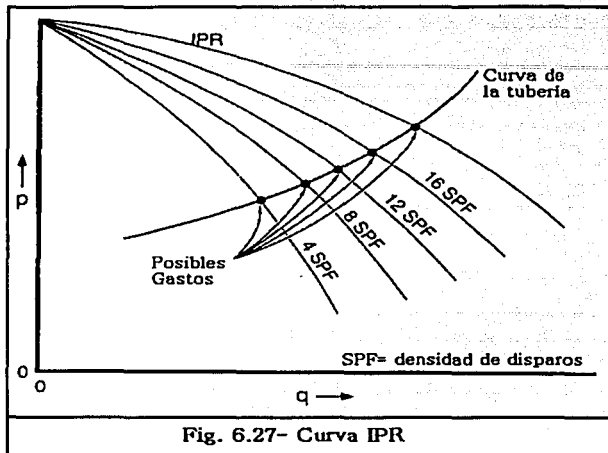
6.8 Conclusiones

Los diferentes métodos presentados en este capítulo son solo la base para predecir el desempeño del pozo, con productos de software disponibles, la predicción del desempeño se vuelve un proceso simple. El factor faltante sobre todo en las ecuaciones, es la validación en campo de las eficiencias de flujo de los pozos predecidos, así la validación en campo es un extrañamente raro procedimiento.

Mobil E&P servicio y Servicios de Pozo Schlumberger, establecieron información de 36 pozos de aceite y gas, en cada caso, el daño del pozo medido se encontraba disponible de pruebas de transición de presión conducidas después de la terminación del pozo. Mientras la información disponible, concerniente a la profundidad identificada de la zona de terminación en la formación, condiciones de terminación (bajo balance o sobre balance) y las características de los disparos utilizados, se pudo obtener otra información crítica para precisar la predicción de productividad que no fue posible obtenerse, sin embargo daños teóricos fueron predecidos de la información que se tenía a la mano, la figura 6.28 compara el daño teórico calculado y el medido.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una correlación razonable fue observada entre los valores de daño real y el predcido, en el rango de daño de -1 a $+4$, la correlación es muy buena a mayores valores de daño la diferencia entre los valores predcidos y observados aumentaron. Se cree que las altas mediciones anormales de daño resultaron de la invasión del fluido de perforación de pozo a la formación.



La falta de información precisa concerniente a la extensión y grado de daño a la permeabilidad alrededor del pozo aumentan la situación. Los tres daños mayores predcidos resultaron de disparos someros, bajas densidades de disparo y fases restringida. El otro relativamente alto daño predcido de valor igual a 5.4 para cuatro pozos fue el resultado de la baja penetración y fase restringida. La figura 6.28 indica una correlación estadística razonable entre la predicción y la medición de los daños cuando los daños son relativamente bajos ($\ll 4$).

Resulta muy decepcionante que la información limitada hace imposible un análisis completo de los pozos y un estudio en la profundidad de las altas mediciones de daño.

El método semianalítico presentado en este capítulo permite el análisis de elementos discretos del daño total y facilita el análisis detallados del complejo arreglo de factores que influyen el desempeño del pozo. Propiamente utilizado este método es una herramienta poderosa no solo en el diseño de la terminación pero también en el análisis de la terminación y el diagnóstico de problemas.

Así se forma un ciclo de diseño de la terminación, predicción del desempeño, terminación del pozo, elevación del desempeño y retro-alimentación en el modelo de predicción, que permite el refinamiento de los métodos de predicción y últimamente en establecer el potencial de esto métodos.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

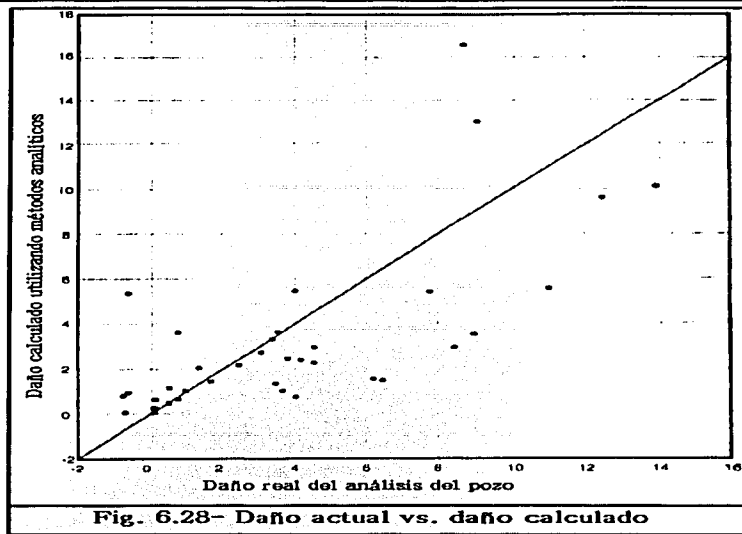


Fig. 6.28- Daño actual vs. daño calculado

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

CAPITULO VII DISPAROS, LA TERMINACIÓN NATURAL

7.1 Terminación con Disparos

Con los principios y procedimientos presentados en el capítulo 6 es posible el diseñar terminación que establecerán el desempeño deseado. En terminaciones naturales, el objetivo es el perforar el pozo para que un bajo nivel de daño sea obtenido sin estimular, un número de factores deben ser considerados en el diseño de la terminación.

El pozo a ser completado, deberá establecer el máximo flujo, mientras que idea parece responder afirmativamente en todos los casos, esto no es necesariamente verdad. En algunos casos la tubería e instalaciones de producción pueden imponer restricciones en el gasto de flujo, en otros casos requerimientos regulatorios o las características del yacimiento pueden dictar un flujo menor al máximo posible y finalmente el maximizar el gasto de flujo puede no ser deseable bajo el punto de vista de costo-riesgo y consideraciones de seguridad.

Una vez que el flujo del pozo deseado es establecido, los factores que deben ser considerados incluyen: presión del pozo y condiciones de fluido de terminación (ambiente de disparos), tipo y tamaño de pistola (geometría de los disparos) y características de la formación y del yacimiento.

El ambiente de disparo deseado es impuesto por las características del yacimiento, tales consideraciones incluyen el nivel y dirección de presión diferencial entre la formación y el pozo y la limpieza y compatibilidad del fluido de terminación. El objetivo es el proveer una buena limpieza de los disparos y una alta densidad de disparo efectiva tomando en cuenta la geometría de los disparos, el uso de pistolas de gran diámetro cargadas a altas densidades de disparo y una óptima fase, generalmente resulta indicado. Por supuesto el sistema de pistola debe ser compatible con las condiciones de presión y temperatura y con la configuración de la tubería.

La selección del medio de transporte de la pistola esta gobernado por la combinación de todos estos factores. El método debe establecer un control de las operaciones bajo la condición de presión y condiciones de flujo.

7.2 Ambiente de disparos

La decisión concierne al ambiente de disparo esta basado en la obtención de disparos limpios y una alta eficiencia de densidad de disparo. Estas decisiones se basen también en otras restricciones, incluyendo la económica.

Terminaciones de Presión bajo balanceadas.

Los disparos bajo balanceados (la presión de la formación es mayor que la presión del pozo) generalmente proveen una óptima limpieza de disparos y un mínimo daño, el nivel de bajo balance seleccionado es un factor clave en la limpieza de los disparos y el desempeño del pozo.

Bajo Balance Recomendado

El mínimo nivel de bajo balance para un máximo flujo es determinado por las propiedades de los yacimientos, particularmente permeabilidad con la relación empírica propuesta por King et. al.²⁴ Sus resultados para ambos tipos de pozos aceite o gas son combinados en la figura 7.1 lo cual sigue la relación:

$$\log_{10}(P_{ti}) = 3.46055 - 0.3812(\log_{10}(k)) \dots\dots\dots(7.1)$$

donde

²⁴ King, G. E. et. Al. A Field Study of Underbalance Pressures Necessary to Obtain Clean Perforations JPT 1986

k = permeabilidad de la formación (mD)
 P_u = presión bajo balanceada (psi)

Máximo bajobalance

Excesivos niveles de bajobalance pueden causar fallas mecánicas de la formación, movimiento de finos de formación, estallamiento de la sarta de la pistola y en casos extremos, colapso de la TR y otros daños a las tuberías. Se analizaron los problemas relacionados con las fallas de la formación en términos de flujo en estado estable, donde contaban con experiencias previas con producción de arena en un campo dado para modelo de túnel. Así se presentó una guía adicional para establecer un bajobalance seguro, en general niveles excesivamente altos de bajobalance deben ser evitados para minimizar el daño a la formación.

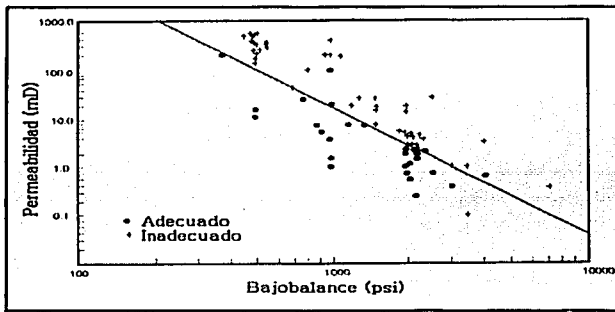


Fig. 7.1- Efecto de la permeabilidad en el bajobalance requerido

Más aún, la presión de bajobalance no debe exceder cualquiera de los siguientes valores:

- Rango de colapso de la TR o cualquier otra tubería (el máximo recomendado es 80% del rango API para tubería nueva y un valor reducido para tuberías viejas basados en medición del caliper.)
- Presión de colapso o diferencial de las herramientas y empacadores.
- Niveles de presión diferencial y condiciones de fluido que puedan causar que la sarta de cable sobrepase el nivel de tensión y sea reventada.

Aun que no están definidos los valores completamente, algunas compañías de servicio tiene programas para estimar límites. La tabla 7.1 establece una regla empírica.

Fluidos del pozo

Los efectos de los fluidos del pozo no están considerados como significantes en una terminación bajo balanceada si el fluido no le es permitido que invada los disparos seguidos a la detonación o si el fluido es no dañino a la formación.

Tabla 7.1 Límites de bajo-balance para operaciones con cable

Descripción	Presión (psi)		
	Gas	Aceite ligero (30°API)	Aceite pesado (20°API)
Pistola de TR	1500	1500	500
Pistola "a través de tubería"	2500	2000	1000

Las presiones indicadas son aproximaciones que deben ser utilizadas con precaución y deben compararse con otras obtenidas de medios de predicción.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Terminaciones de Presión Sobre Balanceada

Mientras que los disparos bajo-balanceados generalmente proveen un óptimo desempeño del pozo, en algunos casos, varios factores se combinan para dictar que los disparos se lleven a presión balanceada o aún a niveles modestos de sobre-balance (presión del pozo mayor que la presión de la formación), la selección cuidadosa de fluidos de pozo y el uso de métodos alternativos de limpieza de disparos son requeridos en tales situaciones.

Nivel de sobre balance

Normalmente el sobre-balance es mantenido al nivel mínimo para el control seguro del pozo y un bajo nivel de sobre balance, minimiza el grado de la invasión del fluido del pozo dentro de la formación.

Fluido del Pozo

Fluidos limpios y compatibles con la formación son cruciales para la terminación efectiva sobre-balanceada, los fluidos deben ser filtrados y algunas medidas deben ser tomadas para evitar contaminación con sólidos en la sarta de terminación ya que aún pequeñas cantidades de sólidos pueden decrementar la productividad.

Recomendaciones

Mientras los disparos sobre-balanceados eliminan grandemente el riesgo de daño en los disparos o en la formación como resultado de la invasión de fluido durante la terminación, en algunos casos terminaciones sobre balanceadas han establecido buenos desempeños del pozo, más aún métodos suplementarios que incrementen el desempeño del pozo son recomendados.

Para un incremento en el desempeño del pozo flujo de surgencia posterior (backsurgings) es recomendado después de los disparos sobre balanceados, con los niveles de presión de surgencia seleccionados de acuerdo con los criterios presentados anteriormente para niveles de bajo balance cuando se dispare.

La surgencia de fluido puede ser completado en tres formas:

1. Barrido. El barrido es aplicable cuando la permeabilidad de la formación es alta (>100mD) o cuando solo bajos niveles de presión diferencial son permisibles.
2. Discos de surgencia (figura 7.2) Para formaciones con baja permeabilidad o cuando altos niveles de presión diferencial son requeridos, disco de surgencia puede ser utilizado.
3. Válvulas de surgencia. Las válvulas son utilizadas cuando un volumen específico de fluido es fluido, ejemplo: cuando el objetivo es el de minimizar la influencia de arena.

Otros métodos de mejora del desempeño del pozo incluidos tratamientos de rompimiento, gas de alta energía de fracturamiento, fracturamiento hidráulico con arena y acidificación.

7.3 Selección de Pistola y Carga

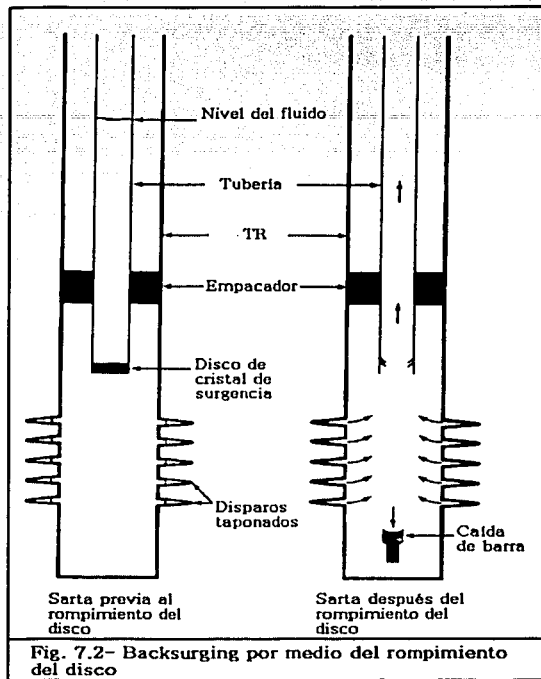
Bajo el punto de vista de las determinaciones alcanzada el sistema pistola / carga es seleccionado para establecer el desempeño deseado del pozo y para operar en forma segura, dependiente del ambiente particular del pozo.

Tamaño de Pistola

Para establecer un óptimo desempeño del pozo un análisis típicamente mostrará que las pistolas más largas posibles proporcionales al tamaño de tuberías de pozo deben ser utilizadas. Sin embargo la pistola debe establecer alguna forma de pesca si esta debe ser recuperada. Una regla conservadora para el uso de pistolas para TR de gran diámetro es:

"El diámetro máximo o expandido de pistola + 1.38 < diámetro drift de la TR."

(todas las dimensiones están en pulgadas). Para el corrimiento "a través de tubería", el espaciamento mínimo de pistola a tubería debe ser > 0.3 pulgadas y > 0.1 pulgadas cuando la pistola detonada es recuperada a través de restricciones de tubería.



Tipo de Pistola y Carga.

La pistola debe ser dispuesta con cargas de profunda penetración a la densidad de disparo y fase seleccionada, en la base de un análisis completo del pozo analizado. Una alta densidad de disparo y una fase múltiple, generalmente resultan indicados.

Cuatro requerimientos mecánicos deben ser satisfechos:

- o Características satisfactorias de deformación TR. (como se indicó en otros capítulos, pistolas de soporte cóncavo, incluso expandibles o reusables, generalmente satisfacen los requerimientos en esta área)
- o Un aceptable nivel de residuos que pueda permanecer en el pozo después de los disparos. Los desechos no deben interferir en el intervalo perforado, más aún, los residuos deben ser del tipo que no interferirán en la recuperación de la pistola y una consideración importante en casos de alto bajo balance es que los residuos no pueden ser arrastrados en la tubería.
- o Rangos adecuados y dependientes de presión / temperatura para las condiciones de pozo específico. Para exposición extendidas a condiciones de pozo, como en disparos transportados con tubería, las pistolas expandibles de soporte son preferibles que las del tipo tapón de puerto por que estas tienen una cantidad menor de sellos y resultan más confiables. Las características de expansión de las pistolas de soporte, deben ser

consideradas, particularmente en líquidos de baja presión o en gas seco. Cuando el equipo seleccionado es operado cerca del rango de presión temperatura, pruebas de evaluación especial deben ser llevadas a cabo antes de la operación.

- o Previsiones de señalización en el lugar de la examinación de la pistola utilizada, indicarán claramente si todas las cargas fueron disparadas. Este accesorio dicta el uso de pistolas de soporte hueco o expandible de tipo barra.

7.4 Método de transporte de pistola.

La pistola deseada y las características de desempeño del pozo interactúan con las restricciones operacionales incluyen las condiciones del pozo (presión, temperatura y nivel de bajo balance), longitud del intervalo a terminar y requerimientos superficiales de control de presión.

La tabla 7.2 presenta un rango funcional generalizado de los métodos de transporte para varias condiciones de pozo, Las consideraciones costo / riesgo no se encuentran incluidas. Nótese que el nivel de bajo balance o la necesidad de terminar todas las zonas actuales pueden sobre pasar las consideraciones de métodos de transporte.

Desempeño de la Pistola / carga

Donde el máximo desempeño del pozo es deseado, el uso de pistolas transportadas con tubería o pistolas de gran diámetro transportados con cable es indicado para establecer la máxima flexibilidad en el óptimo desempeño de la carga, densidad de disparo y fase del disparo.

Pistolas "a través de tubería" transportadas con cable son usualmente penalizadas por un bajo desempeño de carga, baja densidad de disparo y una fase limitada, un cuidadoso análisis y diseño de la terminación es requerido para resultados favorables con estas pistolas.

Tabla 7.2 Matriz de aplicación para técnicas de disparos.

Condiciones del pozo	Sistema de pistola		
	Pistola transportada con tubería	Pistola transportada con cable	Pistola "a través de tubería" con cable
Alto bajo-balance (>2500 psi)	3	----	----
Bajo bajo-balance (2500 psi)	3	3	2
Intervalo corto (<20 a 40 ft)	3	----	----
Intervalo largo (>20 a 40 ft)	3	3	1
Desempeño del pozo 1-bajo, 2-medio, 3-bueno			

Presión de Pozo

Las pistolas transportadas con tubería ofrecen mayores capacidades para soportar presiones para disparos bajo balanceados. Terminaciones con cable son aceptables si solo intervalos relativamente cortos están siendo terminados y todos los otros criterios de diseño de terminación pueden ser satisfechos con pistolas transportadas con cable.

Donde los disparos sobre balanceados son indicados, el equipo de disparo transportado con cable o tubería establecerá resultados equivalentes esencialmente, sin embargo experiencias con pistolas "a través de tubería" han arrojado usualmente resultados desalentadores, con alguna forma de estimulación extra requerida, para que los pozos den los gastos de flujo aceptables.

Longitud del intervalo

El desempeño del pozo óptimo generalmente será proporcionado por pistolas transportadas con tubería en terminaciones bajo balance de intervalos largos. Los disparos transportados con tubería permiten completar el intervalo en un solo viaje a un óptimo bajo balance, intervalos cortos pueden ser terminados por pistolas transportadas con tubería, tanto en TR y "a través de tubería". Sin embargo el desarrollar una terminación bajo balanceada con cable que envuelven zonas múltiples o terminaciones en una zona simple donde múltiples viajes son requeridos puede presentar dificultades, ya que una vez que la primera pistola es disparada puede resultar imposible el establecer niveles óptimos de bajo balance para las pistolas y viajes subsecuentes.

Factores Costo/Riesgo

El análisis de costo/riesgo/beneficio frecuentemente es una consideración dominante en la selección del método de transporte de la pistola. La decisión final es influenciada por la compleja interacción de los requerimientos del desempeño de la pistola, el método de transporte, condiciones de pozo específicas y factores costo / riesgo. A continuación se presentan algunos ejemplos de estas interacciones:

Terminaciones correctivas

Mientras que una terminación de disparos transportados con tubería puede probablemente mejorar el desempeño del pozo, el método de cable "a través de tubería" usualmente es utilizado porque este es más costoso / efectivo que jalar la tubería y el empacador. La posibilidad de los riesgos mecánicos con operación de disparos transportados con tubería refuerza la sabiduría de la selección pistola con cable "a través de tubería" en esta situación.

Baja Presión, terminaciones de bajo gasto.

En éste tipo de terminaciones, el equipo típico es transportado con tubería, complementado por métodos alternativos de limpieza de disparos o estimulación. La decisión se encuentra gobernada por las consideraciones económicas, desde la perspectiva del desempeño sin embargo los disparos transportados con tubería podría establecer mejores resultados en muchos aspectos.

Terminación de Intervalos largos

Los disparos transportados con tubería aparenta ser la mejor solución, sin embargo aspectos económicos pueden dictar una terminación transportada con cable. Estos factores económicos incluyen el incremento en el tiempo de uso del mástil que es una característica de los disparos transportados con tubería, un posible incremento en el tiempo de perforación del pozo para establecer un lugar en el fondo del pozo para operaciones donde la pistola se queda en el fondo, etc.

Terminaciones con H₂S

Operaciones de disparos transportados con tubería generalmente son indicadas por las consideraciones de seguridad aún cuando el pozo puede ser terminado con cable satisfactoriamente y económicamente.

Yacimientos de Gas sobre presionados.

Tanto las técnicas de disparos transportados con tubería y con cable son usadas efectivamente en yacimientos de este tipo. Las terminaciones generalmente son sobre balanceadas, operaciones con cable son seleccionadas frecuentemente para evitar los altos costos experimentados en malas corridas realizadas con tubería.

Equipamiento Premium

La utilización de equipos de calidad premium de alto costo en terminaciones cuidadosamente diseñadas puede ser altamente eficiente en el largo tiempo, porque estos provee un óptimo

desempeño del pozo desde el principio, mientras minimiza la necesidad de operaciones de servicio futuro.

7.5 Perspectiva global

Las técnicas óptimas de disparos no son necesariamente las que proveen el menor factor de daño. En cambio es la técnica que provee el desempeño deseado mientras que se satisfacen las consideraciones costo / beneficio. Recursos asignados para los disparos deben ser suficientes para asegurar un adecuado flujo del pozo sin crear excesiva capacidad de afluencia que no pueda ser utilizada o económicamente justificada.

CAPÍTULO VIII TÉCNICAS DE DISPAROS PARA MÉTODOS DE TERMINACIONES ESPECIALIZADAS.

8.1 Disparos para control de arenas

Terminación de empacamiento de grava.

Una adicional y única forma de daño, caracteriza a la terminación de disparos de empacamiento de grava, comparado con el liner ranurado o la terminación natural.

Daño único en control de arenas.

El daño detiene el flujo a través de los túneles disparados rellenos con grava (figura 8.1), el flujo es lineal y puede resultar en caídas de presión significantes. Como se indicó en el capítulo 6 (ecuación 6.18), las caídas de presión para flujo de líquido a través del túnel es expresado por la siguiente relación comúnmente utilizada.

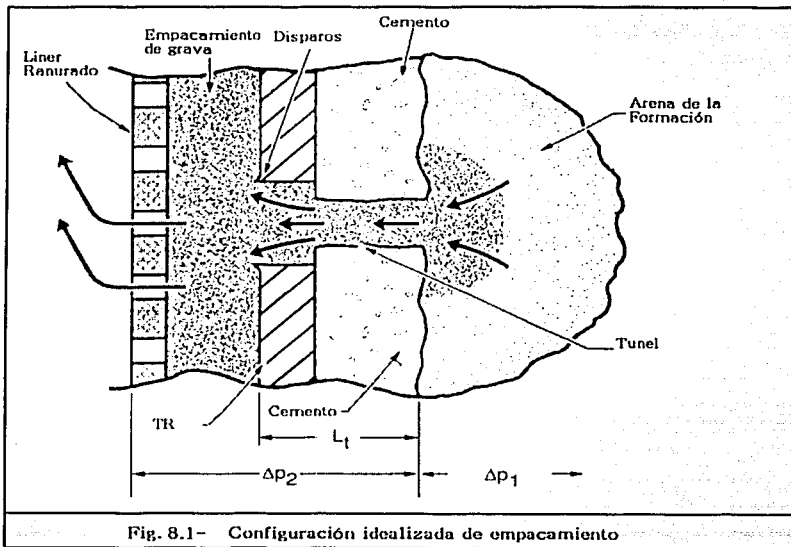


Fig. 8.1- Configuración idealizada de empacamiento

$$\Delta p_2 = (0.888) \frac{(L_t)(\mu_o)(B_o)(q_o)}{(k_g)(A_t)} + (9.1)(10^{-13})(\beta_g)(B_o^2)(L_t)(\rho_o) \left(\frac{q_o}{A_t} \right)^2 \dots \dots \dots (8.1)$$

Donde

A_t = Área en sección transversal del túnel perforado (ft²)

B_o = factor de volumen del aceite (adim)

k_g = permeabilidad del túnel perforado relleno con material (D)

L_t = longitud del túnel perforado (ft)

q_o = gasto de aceite por disparo (B/D)

Δp_2 = caída de presión en el túnel (psi)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\beta_g = \frac{[(1.47)(10^7)]}{k_g^{0.55}} \text{ (ft}^{-1}\text{)}$$

μ_o = viscosidad del fluido (cP)

ρ_o = densidad del fluido (lbm/ft³)

El efecto significativo de un pequeño cambio en el diámetro del agujero en la caída de presión es aparente.

Una excesiva caída de presión a través del túnel puede reducir la productividad del pozo a niveles inaceptables, particularmente en yacimientos de baja presión y dañar el liner ranurado ya que la caída de presión incrementa a un nivel donde las partículas finas son movilizadas y llevan a cortar el liner. Los esfuerzos son dirigidos a limitar la caída de presión a un máximo, de pocos cientos de libras por pulgada cuadrada.

Manejo de la Caída de Presión

La caída de presión puede ser mantenida a niveles aceptables por medio de un adecuado túnel con área en sección transversal suficiente en los disparos individuales con el área específica requerida, dependiendo del gasto de flujo deseado. El flujo de área total es controlado por el sistema disparado.

Los parámetros importantes en la geometría de disparos son el diámetro del disparo y la densidad de disparo efectiva, el diámetro de entrada de agujero en la TR usualmente va de 0.5 a 1 pulgadas o mayores, son 0.6 a 0.75 in. siendo estos los más comunes. Altas densidades de disparo son indicadas porque el túnel perforado a través de la TR y el cemento es rellenado con grava (figura 8.1), donde usualmente cerca de dos tercios del túnel de área en sección transversal es ocupado con grava.

Por lo tanto un pozo disparado con 12 disparos /pie tiene un área de flujo efectivo equivalente a solo cerca de 4 disparos / pie en una terminación natural.

La penetración de los disparos es de menor importancia, permitiendo que los disparos aseguren la comunicación con el yacimiento unas pulgadas más allá del cemento estableciendo una penetración adecuada. Sin embargo, pozos sobrepresionados y TR descentralizada, deben ser tomados en cuenta durante la consideración de la deseada penetración del disparo, la fase de disparo no es una consideración primaria en terminaciones de empacamiento de grava.

Selección de Pistola

Pistolas expandibles de soporte hueco y de cargas moldeadas con cavidades externas para localizaciones de carga, usualmente son utilizadas para establecer la densidad de disparo deseada y el tamaño de entrada de agujero en la TR. El diámetro de la pistola es generalmente el mayor que pueda ser corrido consistente con la habilidad de pescarse con técnicas de lavado si las pistolas se encuentran arenadas después de los disparos.

En el diseño de la terminación y la selección de la pistola, se debe poner atención a los efectos de espaciamiento de la pistola en el tamaño de entrada de agujeros en la TR, particularmente cuando las pistolas están excéntricas en la TR (el caso usual). Los resultados de las pruebas API, deben ser ajustados para contar no sólo con los espaciamientos sino también para tener información en los diferentes grados de tubería. Si el tamaño de agujero para altos espaciamientos de disparos, cae más del 10% por debajo del tamaño para el espaciamiento óptimo de la pistola, el lavado de disparos y subsecuentes posicionamientos de grava puede establecer ineficiencias, dejando estos disparos de diámetro pequeño inoperables, consecuentemente estos agujeros deben ser ignorados, reduciendo la

densidad efectiva del disparo. Si la reducida densidad de disparo establece ser insatisfactoria en el análisis de terminación, la pistola debe ser centralizada para reducir los efectos del espaciamiento. Una consideración adicional en el diseño de la terminación es que los resultados analíticos tienden a ser optimistas por que ellos no consideran la reducción de la permeabilidad, resultante de la mezcla del material de formación con grava. Así la densidad de disparo seleccionada debe ser siempre mayor que la calculada para asegurar el desempeño satisfactorio del pozo.

Condiciones de Pozo.

Los niveles de presión y los fluidos del pozo son seleccionados grandemente en la base del método escogido para la limpieza de los disparos antes de la colocación de la grava.

Tanto las técnicas de terminación de sobre-balance y bajo-balance son utilizadas, dependiendo de los requerimientos del yacimiento. Las operaciones sobre-balance usualmente envuelven subsecuentes lavados de los disparos, surgencia de fluido o bien una combinación de éstos métodos. Los disparos bajo-balanceados resulta el método preferido, usualmente seguido directamente por la colocación de grava, sin embargo la práctica del lavado de disparos después de los disparos bajo-balance y antes de la colocación de la grava esta volviéndose muy común. La presión de bajo-balance es típicamente cerca de 500 psi, para yacimientos de aceite y cerca de 1000 psi para pozos de gas.

Situaciones individuales o específicas pueden dictar diferentes valores de presión. Niveles máximos que pueden ser tolerados sin que la TR se colapse o la formación falle y que la producción de arena esta dada en otra parten el trabajo. Los disparos generalmente son conducidos con fluidos de terminación que no taponen y que sean compatibles los fluidos utilizados para lavar los disparos no solo deben ser limpios y compatibles, también deben tener una densidad considerada la mínima para el control del pozo para minimizar la invasión a la formación por este fluido de lavado.

Método de transporte.

El transporte con cable o bien con tubería de las pistolas, provee terminaciones satisfactorias de empacamiento de grava, el método seleccionado depende principalmente en las condiciones de presión del pozo durante los disparos y la longitud del intervalo perforado. Para condiciones de disparo sobre-balance el método de cable es aplicable hasta la longitud del intervalo al punto donde los disparos transportados con tubería se vuelvan más económicos en términos de costo de servicio y tiempo de mesa y equipo. Para terminaciones bajo balance las pistolas transportadas con tubería generalmente son preferidas por su gran flexibilidad y habilidad para acomodarse a la longitud del intervalo y niveles de bajo balance.

Claro esta que las pistolas transportadas con cable pueden ser utilizadas en intervalos cortos (hasta 40 ft), haciendo que el bajo-balance sea lo suficientemente bajo para asegurar que la sarta de la pistola no estalle cuando esta sea disparada. Las posibilidades de falla asociada con la predicción de estos riesgos alientan el uso de disparos transportados con tubería en todas las operaciones bajo balance.

Así como en las terminaciones naturales el análisis costo / riesgo puede dictar el método de limpieza de los disparos y aquellos métodos de transporte.

Otras técnicas de control de arenas.

En adición al empacamiento de grava, otros métodos están disponibles para el control de producción de arena:

Consolidación Plástica: En disparos, para la consolidación plástica de arenas, la geometría de los disparos y los métodos son idénticos a aquellos utilizados para la terminación natural. El establecer disparos limpios es enfatizado para asegurar que el plástico pueda ser inyectado fácilmente y para mejorar una distribución uniforme del mismo a lo largo del intervalo. Cuando se escogen los

métodos de diseño de terminación, debe tomarse en cuenta que el plástico reduce la permeabilidad de la formación. Así cargas de mayor penetración y mayores densidades de disparo son indicadas.

Grava cubierta de resina: Los procedimientos de disparo para grava cubierta con resina son idénticos a aquellos para terminaciones convencionales de empacamiento de grava.

Arenas marginalmente consolidadas: Arenas marginalmente consolidadas o deleznable usualmente son disparadas de la misma manera que las terminaciones naturales pero con mayor énfasis en altas densidades de disparo y penetración más profunda para reducir flujo por unidad de área de disparos. Un apropiado nivel de bajo balance es indicado para evitar rompimiento en la formación y producción de arenas.

8.2 Disparos para fracturamiento hidráulico

Los disparos para fracturamiento hidráulico juegan un papel importante en el control de la hidráulica de las operaciones de tratamiento, ellos proveen el tamaño de agujero específico, (las caídas de presión son controladas cuando cantidades diseñadas de fluido son bombeadas) acceso selectivo a las zonas a ser fracturadas y comunicación de la producción entre fracturas y el pozo, después de los disparos.

La figura 8.2 es una representación esquemática de una formación hidráulicamente fracturada, muestra los disparos que permiten el acceso a la formación rota por presión hidráulica. Las fracturas son disparadas para emanar típicamente de la base de los disparos. La orientación de fracturas es gobernada exclusivamente por las características de esfuerzos de la formación sin importar la orientación de los disparos.

El rompimiento de la formación, tratamiento y presión de cierre instantánea (ISIP's, instantaneus shut-in pressures) son influenciados por la orientación de los disparos considerando el azimut de las fracturas y el número y carácter de las fracturas. El recorrido del flujo tortuoso sugerido por la figura 8.2 influencia la efectividad de la comunicación hidráulica entre disparos y fracturas.

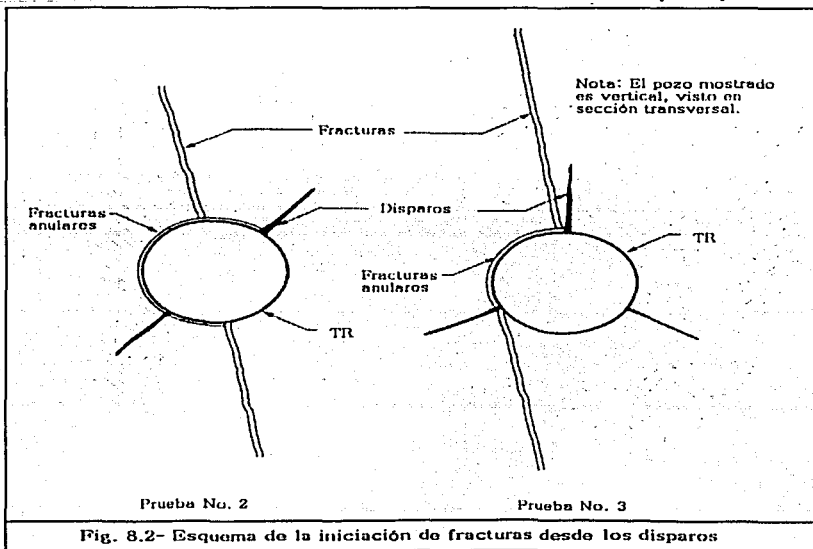


Fig. 8.2- Esquema de la iniciación de fracturas desde los disparos

Los parámetros de disparo de relevancia son en orden descendiente los siguientes:

- o Tamaño de agujero de entrada a la TR y características
- o Densidad de disparo efectiva
- o Fase de disparos
- o Características de los disparos en la formación.

Tamaño de entrada de agujero

Los agujeros de entrada en la TR actúan como orificios circulantes, el efecto de los orificios, expresados como presión de fricción P_f controla la caída de presión y gasto de flujo a través del sistema pozo a formación.

Este parámetro puede ser expresado como:

$$P_f = \frac{0.2369(q_t^2)(\rho_o)}{(n^2)(d^4)(C_d^2)} \dots\dots\dots(8.2)$$

donde

- C_d = coeficiente de descarga (adim)
- d = diámetro de entrada de agujero en TR (in)
- n = número de disparos
- q_t = gasto de flujo total (bbl/min)

Debe notarse que una carga pequeña en el diámetro de agujero de TR tiene un efecto grande en la presión de fricción. Cuando zonas múltiples son tratadas simultáneamente, la consistencia del tamaño de agujero es también importante si el fluido tratante será dispersado uniformemente. El control de entrada de agujero depende en la combinación específica seleccionada carga / pistola (por información API RP19b) junto con la calidad del sistema, el efecto del espaciamiento clearance de la pistola, las propiedades físicas de la TR y los efectos de erosión de los fluidos que causan agrandamiento de agujero durante el tratamiento.

Otro factor significativo es el coeficiente de descarga de entrada de agujero, C_d el cual tiende a incrementarse durante el tratamiento. La entrada de agujero realizado con cargas moldeadas, con las características propias de irregularidades y rebordes tienen un C_d inicial de 0.6 el cual puede incrementar a más de 0.8 como resultado del pulido del orificio causado por la erosión de la entrada de agujero durante el bombeo.

Características de entrada de agujero pulidas de algunas pistola de balas tienen mayores valores iniciales de C_d (cerca de 0.8), con subsecuentes incrementos conforme las operaciones progresan. La importancia de C_d en el diseño de la terminación no debe ser pasado por alto.

Un incremento sobre todo en el diámetro de agujero de tubería como resultado de la erosión, también puede tener un efecto significativo en P_f . En zonas múltiples el tratamiento puede fallar si el gasto de bombeo no esta ajustado para compensar el crecimiento del diámetro de agujero. La erosión y el agrandamiento del agujero, ocurren en terminaciones tanto de cargas moldeadas y de bala, a sido demostrado que disparos de menor diámetro se erosionan más rápido que aquellos mayores. Más aún el grado de erosión incrementa con el gasto de flujo de fluido y la concentración de arena.

Las pistolas de bala ofrecen una ventaja importante sobre el predominante uso de pistolas de carga moldeadas, el tamaño de agujero es inicialmente constantes, sin importar las propiedades físicas de la TR y espaciamiento de la pistola (suponiendo que la pistola seleccionada provee un adecuado desempeño a todos los espaciamientos de pistola tubería.)

Cuando se selecciona el diámetro de agujero mínimo, uno debe considerar el tamaño de partículas para evitar comunicación o conexión entre los disparos, el tamaño de diámetro no debe ser menor que seis veces el promedio de partículas en diámetro. También el tamaño de agujero debe ser adecuado para evitar la degradación de fluidos de baja viscosidad, lo cual puede ser un daño irreversible como resultado del corte, con las resultantes fallas creadas por el propelente. La mayoría de las empresas acepta como tamaño mínimo de entrada de agujero en la TR de aproximadamente 0.38", operaciones exitosas han sido desarrolladas con un diámetro mínimo de agujero de 0.28" a 0.30". Sin embargo el desempeño de agujeros de jet y de bala por debajo de 0.28" de diámetro ha sido muy errático.

Densidad de disparos

Para tratamientos de fractura comúnmente la densidad de disparo es determinada por el número de disparos requeridos para mantener la presión de fractura, la presión de tratamiento y ISIP a un razonable bajo nivel y P_f a 100 psi o menor en el gasto de diseño de fracturamiento. Generalmente 4 a 8 disparos / pie son indicados. Para operaciones de entrada limitada, el número de disparos requeridos es determinado por el P_f deseado, usualmente se encuentra en el rango de 500 a 2500 psi.

Fase del disparo

Para tratamiento de fractura la fase de 20 a 60° es sugerida para facilitar la intersección de disparos en fracturas y para mantener presiones bajas de bombeo. El tratamiento de entrada limitada, comúnmente utilizan 0° en fase con pistolas de cargas ajustadas para colocar los disparos localizados individuales requeridos, el uso de pistolas de fase 0°, facilita la posición de la pistola para establecer diámetros de agujero y sus características consistentes.

Características de los disparos en la formación.

La profundidad de la penetración dentro de la formación es considerada de importancia secundaria porque las fracturas usualmente emanan desde la base de los disparos. La utilización de cargas moldeadas de gran penetración pueden resultar en altas presiones de inyección como resultado de gran daño a la formación al disparo. (que incluye el rompimiento de la formación y la reducción de las características de permeabilidad cerca del disparo.) Altas presiones de inyección también pueden ocurrir con cargas pequeñas de baja penetración porque estas apenas penetran la formación.

Una penetración intermedia de cerca de 4" a 6" dentro de la formación resulta adecuada. La selección de la pistola para tratamientos usuales de fractura se basa en los requerimientos para tamaño de agujero, densidad de disparo y fase. Generalmente las pistolas de cargas moldeadas de soporte hueco son utilizadas, tanto para operaciones de TR y "a través de tuberías." Las pistolas de bala son una opción viable para utilizar en TR que exceden 4 1/2".

Para operaciones de entrada limitada, pistolas de disparo selectivo son recomendadas, éstas pistolas pueden ser detonadas disparo a disparo conforme la sarta de la pistola recorre ascendentemente el pozo, por tanto la operación generalmente puede ser terminada en un solo viaje al pozo, un ahorro considerable en el tiempo de mesa y equipo se realiza. La selección de este sistema de pistola esta basado en un adecuado control del espaciamiento clearance (posicionadores o descentralizadores para pistolas de cargas moldeadas), la calidad y la consistencia del desempeño de la pistola / carga y los medios de disparos selectivos, los cuales proveen un control de la localización del disparo y un altamente deseable desempeño e indicador de disparo.

Un adecuado desempeño de la pistola de balas es un excelente candidato para este tipo de operaciones. Algunos resultados comparativos para inyección de vapor en "entrada limitada" han favorecido frecuentemente a la pistola de balas.

Condiciones del pozo.

Pozos a ser fracturados hidráulicamente, pueden ser disparados bajo condiciones tanto de sobre-balance como de bajo-balance. La selección es basada en un número de factores, si las condiciones del yacimiento (ejemplo altamente geopresionada o formaciones altamente depresionados) dictan fracturamiento por bombeo a través de la tubería, una terminación bajo balanceada es indicada. En un yacimiento normalmente presionado que será tratado-fracturado por debajo de la TR, entonces una terminación sobre-balanceada con gran diámetro generalmente se lleva a cabo. La planeación cuidadosa y análisis del yacimiento son recomendados para asegurar la compatibilidad de los métodos de disparos y operaciones tratadas hidráulicamente.

Desviación del pozo

Los procedimientos de fracturamiento para pozos altamente desviados o bien horizontales son de alguna forma diferentes de aquellos para pozos verticales. Los varios temas relacionados con el fracturamiento en pozos desviados son presentados y discutidos más adelante.

Método de transporte

La decisión entre el transporte con cable o con tubería para la terminación esta basada en una variedad de factores:

- o Nivel de bajo-balance
- o Espesor de zona a terminar
- o Número de zonas a terminar
- o Condiciones del pozo (particularmente presión)
- o Requerimientos de control de arenas
- o Requerimientos de estimulación.

8.3 Disparos en pozos profundos, de alta presión y alta temperatura.

Temperatura.

El primer problema asociado con terminaciones en pozos profundos es la temperatura elevada y los problemas relacionados cercanamente incluyen alta presión hidrostática y alta presión en superficie e incremento de cargas mecánicas, en los cables.

Conforme la temperatura incrementa, los componentes de los sistemas se deterioran rápidamente, las aleaciones de metal pierden una fracción significativa de su fuerza, el grado de corrosión incrementa, la confiabilidad de equipo electrónico y eléctrico decremента, los elastómetros pierden sus propiedades deseables y los explosivos se degradan al punto de no poderse utilizar. La temperatura a la cual un sistema funcionará confiablemente depende en el tiempo de exposición, mientras mayor ser el tiempo, menor será la temperatura que el sistema tolerará. Consecuentemente, los sistemas de disparos son clasificados en una combinación de temperatura y tiempo, la importancia de ver los disparos como un sistema no puede ser ignorada cuando los efectos de temperatura son considerados, así el rango de los sistemas es, determinado por el componente más débil en el sistema.

Efectos de la temperatura.

Las elevadas temperaturas afectan los componentes de sistemas en una variedad de formas.

1. Los elastómetros sellantes pierden su elasticidad y fuerza. Si la temperatura se incrementa, ellos deben ser cambiados por aquellos que sobrepasan los niveles estándar de cerca de 300°F (NitrileTM, HycarTM y NeopreneTM) a 450°F (VitonTM) o 600°F (KalrezTM) con tendencia a incrementar el costo.
2. Los sellos pueden requerir modificaciones para prevenir fallas a la presión causados por un incremento presión hidrostática adicionado con un decremento mecánico de la fuerza del elastómetro.

3. Los componentes electrónicos, aislamiento de cables y conectores son afectados grandemente; componentes especiales y conectores pueden mitigar el problema, los elementos electrónicos pueden en casos extremos ser encerrados en contenedores de vacío para extender el tiempo de servicio a temperatura.
4. Los soportes de pistola de acero y accesorios así como los contenedores del equipo electrónico, se ven degradados en fuerza y se incrementa la susceptibilidad a la corrosión, las aleaciones comúnmente utilizadas en las pistolas pueden degradarse en resistencia en un 15% o más. Ya que las pistolas ordinariamente no tienen un gran diseño en los factores de seguridad, se debe tener cuidado en la compensación de las pérdidas en la resistencia a la presión resultado de la degradación. Las fuerzas de estallamiento internas asociadas con el colapso del soporte de pistola, pueden causar detonación de las cargas con resultados catastróficos.
5. Los explosivos se degradan rápidamente cuando la temperatura se incrementa o bien el tiempo de exposición aumentan arrojando diversos resultados. Los problemas varían desde la reducción del desempeño de las cargas hasta la auto detonación, aún si los jets no son formados en la autodetonación, una excesiva expansión de la pistola inferirá con su recuperación. Si los jets son formados, estos probablemente estarán fuera de la profundidad deseada. Como indica la figura 8.3, los explosivos RDX están clasificados para 1 hrs. a 325°F, si el tiempo de exposición se incrementa a 100 hrs. el rango de temperatura cae a 200°F y un tiempo estimado de exposición de 48 hrs. (para un trabajo de disparos transportados con tuberías) el uso de HMX puede ser requerido. Para condiciones más severas se requiere el uso de HNS o bien PYX como explosivos. El costo de los sistemas explosivos incrementa con los elevados rangos de tiempo / temperatura a los que se someterán.

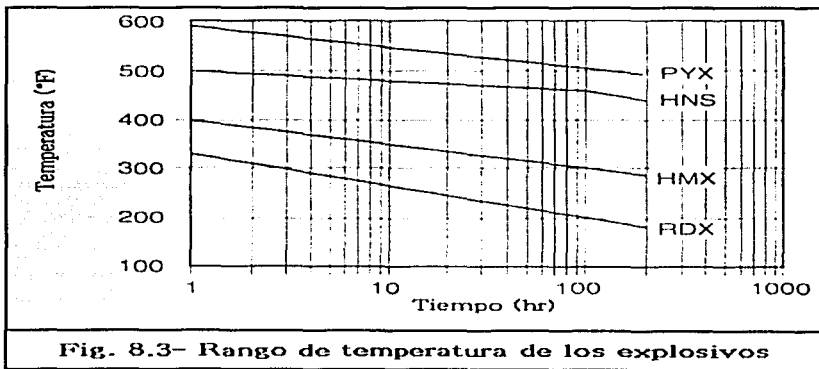


Fig. 8.3- Rango de temperatura de los explosivos

Condiciones del pozo

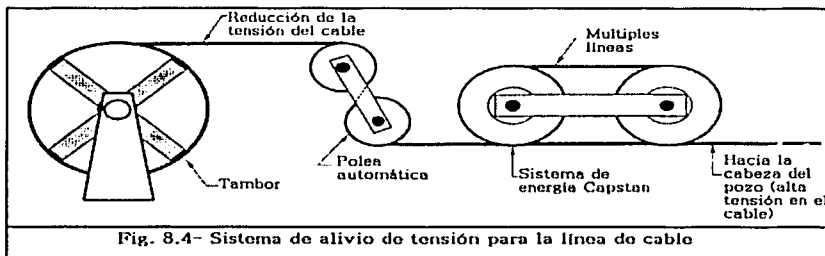
Un preciso conocimiento de la temperatura en el fondo del pozo (BHT bore hole temperature) es importante porque el factor de seguridad en las curvas tiempo / temperatura en la figura 8.3 es mínimo, cerca de 10°F (o cerca de 10%). La presión en el fondo del pozo es también una consideración importante en luz de los bajos factores de seguridad de los diseños mecánicos para pistolas. El peso de los fluidos del pozo y la presión en la cabeza debe ser monitoreada cuidadosamente.

La determinación de la BHT no se obtiene completamente de una manera directa, usualmente uno o más de los siguientes métodos son utilizados para llegar a un valor confiable.

1. Predicciones en la fase de planeación, aplicación de gradientes geotérmicos y experiencia local. Los valores arrojados de estos métodos deben ser utilizados con precaución porque ellos están sujetos a variaciones geográficas y fenómenos asociados con formaciones geopresionadas.
2. Medición durante la corrida del registro y extrapolación durante la perforación del pozo.
3. Medición durante la corrida final de registro con corrección de lodo. Temperaturas de lodo no corregidas son reportadas para ser tan grande como 25 a 75 °F abajo y el error incrementa cuando las mediciones son realizadas unas horas después de la circulación.
4. Una corrida de confirmación antes de la primera corrida de la pistola.

Problemas con la línea de cable.

Las cargas mecánicas en la línea de cable se vuelven más severas conforme la profundidad del pozo incrementa. La mayoría de las compañías de servicio operan con un máximo de 50% a 60% de la tensión del rompimiento del cable. El incremento en la profundidad (incremento del peso del cable en el pozo), la utilización fluidos de terminación ligeros (reducen la fuerza de flotación de herramientas y cable), condiciones de pozo adversas (desviaciones y "patas de perro" particularmente conforme la profundidad aumenta) y atrapamiento de la sarta de herramientas requiriéndose jalar el cable por encima del punto de rompimiento (tensión excesiva del cable, frecuentemente el cable se descalifica para uso futuro en pozos profundos) afectan la resistencia del cable.



Dependiendo en las condiciones individuales del pozo y cable específico, operaciones con cable pueden ser conducidas satisfactoriamente de 18 000 a 34 000 pies. Un factor limitante (además de la resistencia de tensión del cable) es la falla del núcleo del cable como resultado de altas tensiones de devanado en el tambor del cable. En la falla del núcleo del cable, una remoción mecánica del aislamiento del conductor individual se lleva a cabo con el acortamiento eléctrico, de los conductores dentro de la armadura de las cargas. El problema se soluciona por medio de eliminar la tensión del cable antes que los cables sea enrollado en el tambor (figura 8.4). La figura 8.5 muestra una unidad especial capaz de operar por debajo de los 35 000 ft. El efecto de los fluidos hostiles en el cable también deben ser considerados, fluidos corrosivos tienen un efecto adverso como es la presencia de H_2S que puede requerir del uso de materiales especiales.

Presión en la cabeza del pozo.

Altas presiones en la cabeza del pozo usualmente son experimentadas en terminaciones bajo balanceadas en pozos profundos. Presiones en superficie de hasta 17 000 psi han sido reportadas requiriendo equipo especial para el control de la presión en la cabeza del pozo, la importancia de un adecuado rango de presión y el certificado del desempeño del equipo de control de presión no puede ser pasado por alto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

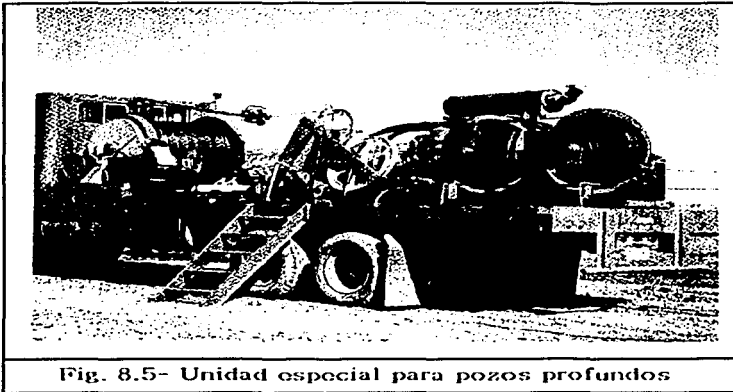


Fig. 8.5- Unidad especial para pozos profundos

Mientras que el equipo disponible de control de presión puede ser operado a elevadas presiones, tales operaciones se encuentran enfrentadas a varias dificultades: La longitud de la pistola generalmente está limitada, aún con lubricadores de máxima longitud, mientras mayor sea la presión en la cabeza, la pistola será menor y se incrementará la tensión en el cable (como resultado de los pesos requeridos para efectuar el descenso).

Algunas veces las pistolas se vuelven muy cortas para ser prácticas, requiriendo de muchos viajes para perforar el intervalo y se descarta la opción de las terminaciones bajo balanceadas con cable.

Selección de pistola

Pistolas de soporte hueco de acero, son utilizadas casi exclusivamente en terminaciones de pozo profundos por su inherente resistencia a la presión, mínimo número de sellos y protección adicional para los componentes explosivos (contenidos dentro del soporte de la pistola). La selección de los componentes explosivos (cargas, cable detonante y detonador) se basa en las condiciones anticipadas de tiempo/temperatura.

Método de transporte

Pistolas grandes transportadas con cable, disparadas a presiones sobrebalanceadas, son utilizadas para disparar varios pozos profundos y con alta temperatura porque las operaciones pueden ser completadas rápidamente (en efecto, estableciendo un rango de temperatura mayor). Sin embargo los disparos transportados con tubería son una opción viable cuando la terminación es diseñada cuidadosamente para minimizar el tiempo de exposición a temperaturas elevadas. Así los disparos transportados con tubería es el método preferido para pozos donde las cargas para la línea de cable son excesivas.

Planeación de la Terminación en pozos profundos.

La planeación cuidadosa y detallada es esencial, preparaciones extensas que frecuentemente requieren varios meses, son requeridas por las compañías de servicio. Los planes y especificaciones comúnmente cambian durante la perforación del pozo y operaciones de registro, la flexibilidad en la planeación y período de consulta con las compañías de servicios es vital para la evaluación del equipo disponible para operaciones de terminación adecuadamente.

Procedimientos comprensivos de control, complementados con la evaluación del sistema y los componentes son medidos a las condiciones esperadas para asegurar la confiabilidad y las operaciones libres de problemas, mucho del equipo es especial y frecuentemente es fabricado bajo especificaciones para alcanzar las necesidades específicas. El equipo de evaluación se vuelve más

importante conforme las condiciones del pozo, de temperatura y presión se acercan a las especificaciones del equipo.

Los métodos de evaluación deben ser guiados por API RP19b sección 3 y alguna otra guía apropiada en conjunto con los procedimientos propuestos por la industria de construcción por ejemplo: Programa para Evaluar Sistemas de Disparos (PEGS; Program to Evaluate Gun Systems).

El reducido desempeño de pistola bajo condiciones elevadas de temperatura, es una consideración mayor en el diseño de la terminación, la mayoría de los sistemas de explosivos de alta temperatura (arriba de los rangos RDX o HMX) proveen una reducida capacidad de penetración cerca de 10% a 20%. Menor penetración es exacerbada por el uso de pistolas de diámetro pequeño dictado, por tuberías pequeñas y liners instalados en pozos muy profundos, una opción para simulaciones del pozo deben ser incluida en el plan de la terminación en la tales circunstancias.

8.4 Disparos en pozos con producción de H₂S.

Dos problemas mayores se encuentran cuando pozos que contienen H₂S son disparados: Seguridad del personal y fallas potenciales del equipo. Sin embargo cuando la planeación de la terminación es adecuada abarca entonces estas dos áreas, y los procedimientos de disparos son esencialmente los mismo para terminaciones sin H₂S.

Riesgos de Personal.

H₂S es extremadamente tóxico y a cualquier nivel es peligroso, la ingestión de pequeñas concentraciones puede producir severos efectos fisiológicos o la muerte, después de tan solo pocos minutos de exposición (ejemplo una concentración de 0.06% puede causar la muerte en solo 2 minutos) El personal debe ser protegido por medio de la combinación de dos acercamientos:

- Procedimientos específicos operacionales y entrenamiento que prevenga la exposición al gas.
- Equipamiento especial, incluyendo sensores de H₂S y de dirección del viento y dispositivos para la protección de la respiración (mascaras anti-gas.)

Riesgos al equipo

Fallas potenciales al equipo son derivados por el efecto de la degradación del H₂S en los materiales, particularmente aleaciones de hierro y elastometros. Una falla rápida o tardía de los componentes de acero pueden resultar del ataque del ácido al acero reduciendo significante la resistencia o bien una corrosión acelerada. El equipo susceptible incluye: Las líneas de cable, equipo de control de presión superficial, la pistola, accesorios y sellos.

Los problemas incluyen el rompimiento de pistola o fallas de los elementos sellantes. Es imperativo que las fallas al equipo sean evitadas, además del tiempo de bajada usual y factores de costo, las fallas pueden comprometer seriamente la seguridad del personal.

La industria reconoce dos acercamientos básicos, del ataque de H₂S en las capas primarias expuestas en el equipo y la concentración de gas determina el procedimiento a seguir:

- A una concentración de 2% o menos, inhibidores son aplicados en la superficie del equipo expuesto
- En equipo especial resistente al H₂S utilizado cuando las concentraciones exceden el 2% incluyen: líneas de cable de una aleación especial resistente al H₂S (ejemplo MP35N no ferroso o Vecturalloy aleaciones de acero de baja resistencia < 75 000 psi de esfuerzo a la tensión para equipos de control de presión, elastometros resistentes al gas (Viton Kalrez, etc.) e inhibidores de superficie para ensambles en el fondo del pozo.

Método de transporte

Tanto línea de cable o tubería, pueden ser utilizados con seguridad, en algunas instancias, terminaciones permanentes transportadas con tubería son favorables porque la planeación cuidadosa

puede ofrecer un mínimo riesgo de la exposición del personal y establecer protección mejorada en contra de los problemas del equipo.

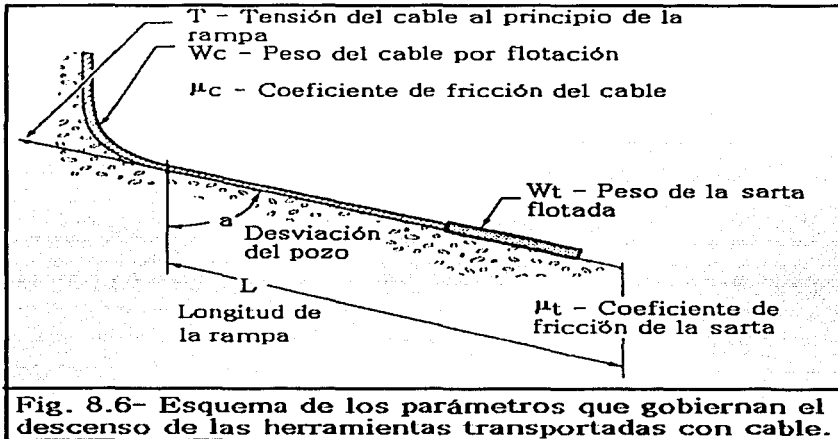
8.5 Disparos en Pozos altamente desviados y horizontales

Pozos desviados

Los parámetros principales del descenso del equipo de disparo transportado con cable y herramientas asociadas al registro en pozos desviados incluyen; ángulo del agujero, longitud de rampa, peso del sistema cable / herramientas, fricción y configuración del pozo (primariamente patas de perro y amplitudes) figura 8.6.

Dependiendo en los parámetros respectivos para un pozo en particular las configuraciones de herramientas estándar puede ser esperada que descendan a desviaciones máximas de 50 a 68°.

Reductores de fricción (uso de dispositivos especiales de baja fricción en la sarta, tales como patines y herramientas de incremento de peso pueden mejorar el descenso con cable), con tales mejoras el ángulo teórico que puede ser negociado es incrementado de 70° a 80°, dependiendo en la longitud de la rampa. Pozos han sido terminados a desviaciones que exceden los 70°, la capacidad de desviación puede ser influenciada fuertemente por las condiciones de agujero particularmente, las amplitudes, se deben utilizar accesorios que provean flexibilidad en los ensambles de herramientas a través de los lugares con poca amplitud.



La experiencia en campo indica que otras opciones más indicadas de transporte como: disparos transportados con tubería, el cual provee un buen desempeño en todas las desviaciones del pozo y la tubería flexible equipada con un cable interno deben ser considerados para los pozos desviados que exceden 55°, la tubería flexible provee ahorros en costos y tiempos con los sistemas de pistola pequeños y ligeros. Este ofrece un buen control de profundidad (registros y subsecuentes posicionamientos de pistola).

Los disparos transportados con tubería sin embargo ofrecen incremento en la flexibilidad en términos de la selección de la pistola por ejemplo: grandes, largos y pesados ensambles pueden ser corridos, también pozos más profundos pueden ser terminados como resultado del mayor esfuerzo de la sarta de tubería (con mayor alcance).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Pozos horizontales

Aún que disparar pozos horizontales se ha vuelto rutina, las técnicas de terminación continua en estado de desarrollo intensivo; anteriormente pozos horizontales fueron terminados con liners ranurados no cementados o si la formación resultaba lo suficientemente fuerte, se termino en agujero abierto, ambos métodos hacían difícil el determinar cuales zonas estaban produciendo y si los problemas se incrementaban, un tratamiento selectivo de zonas resultaba prácticamente imposible.

Aislamiento de zonas.

El aislamiento de zonas discretas puede no verse como tan importante en pozos horizontales como en terminaciones verticales. Idealmente la terminación horizontal debe terminar en la formación y el intervalo horizontal entero debe producir. La experiencia muestra sin embargo que los yacimientos son usualmente horizontalmente heterogéneos. Esta heterogeneidad no es del todo malo y puede ser explotado con modelos de fractura natural o fallas que alcancen diversas formaciones productoras, pero solo si es posible el aislamiento de zonas.

El aislamiento zonal es alcanzado con empacadores externos de TR en liners ranurados o perforados, o por la cementación y disparos convencionales, el último método establece el aislamiento más confiable y es aconsejable si el pozo será fracturado hidráulicamente, sin embargo algunos pozos horizontales han sido fracturados satisfactoriamente con empacadores externos de TR.

Cementaciones

En general operaciones de cementaciones horizontales son similares a aquellos requeridos para pozos verticales, sin embargo los detalles hacen una diferencia significativa. El establecer un trabajo de cementación, libre de canalizaciones es intrínsecamente más difícil en pozos horizontales mas que en verticales. Atención cuidadosa debe prestarse al centrado de la TR, diseño de los fluidos de perforación del pozo y escurrimiento de la lechada de cemento, y el uso de técnicas operacionales especiales mitigan los problemas.

Método de transporte

Un reto mayor en pozos horizontales es hacer que la sarta de disparo llegue a la profundidad, los disparos transportados tanto con tubería como con tubería flexible son utilizados, los disparos transportados con tubería tienden a ser costosos, pero el sistema es lo suficientemente fuerte y provee una amplia selección de pistolas y accesorios. En pozos desviados, ahorros en tiempo y costo hacen que la tubería flexible sea una opción atractiva para pistolas menores.

Longitud de zona

La cementación y los disparos de la longitud entera de un pozo horizontal pueden ser caro, resultados de campo indican que disparar la zona horizontal entera es innecesario particularmente cuando la zona a ser completada es delgada. La misma producción puede ser obtenida por medio de terminar solo una fracción de la longitud total, más aún la mayoría de los yacimientos exhibe heterogeneidad horizontal suficiente para garantizar producción selectiva, la tendencia es hacia el disparar intervalos cortos.

Tratamiento y control de Arena

Alta densidad de disparo y fases múltiples, son utilizadas para fracturamiento hidráulico reduciendo la interferencia entre disparos, una variedad de equipo esta disponible para facilitar la evaluación de la formación y el tratamiento. Pistolas transportadas con tubería o pistolas corridas con tubería flexible son equipadas con empacadores para colocar correctamente la pistola y que permiten disparos y pruebas selectivas o bien disparos y tratamientos de zonas discretas.

Cuando se llevan a cabo tratamientos de fractura tanto en pozos con altos ángulos de desviación y pozos horizontales, el espaciamiento entre disparos individuales pueden ser un criterio importante en el diseño, disparos con poco espaciamiento alineados en un plano simple (fase cero) maximizan las conexiones cercanas al pozo de los disparos a lo largo del eje del pozo y minimizan la tendencia de fracturas estrechas, aisladas para crecer desde los disparos. Otra consideración importante de diseño, es que el área de intersección del pozo y las fracturas hidráulicamente creadas pueden ser muy limitadas, consecuentemente la longitud del túnel creado por el disparo es un criterio de diseño importante ya que incrementando el radio efectivo del pozo, el área de intersección de las fracturas y el pozo incrementa.

Los disparos en el fondo del pozo (perforando solo la mitad baja de la TR) son utilizados para el control de arenas. La experiencia indica que es difícil de terminar con empacamiento de grava efectiva en el lado superior de la tubería. Las pistolas en el fondo del pozo requieren una variedad de aditamentos especiales, incluyendo swivels entre la sarta y medios de orientación para asegurar el posicionamiento deseado de la pistola y por tanto los disparos, una consideración en los disparos en el fondo del pozo es el posible efecto adverso en el control de la conificación.

Selección de Pistola.

Consideraciones en la selección de pistolas incluyen las características específicas del yacimiento, método de terminación y orientación del pozo relativa a la zona de fracturas y fronteras. Pistolas de alta densidad de disparo y multifásicas son utilizadas antes de la estimulación o empacamiento de grava y también son ventajosas en instancias donde el pozo intercepta las fracturas de formación natural.

Otros puntos importantes son la profundidad del disparo y el tamaño de entrada de agujero en la TR. Los disparos superiores detonados de las pistolas excéntricas, sufren no solo de efectos de espaciamiento "clearance" con la TR pero también tiene que atravesar una mayor capa de cemento, que los disparos inferiores detonados. La centralización de la pistola puede resolver el problema de tamaño de agujero inconsistente y puede en algún grado, mitigar las dificultades de penetración, sin embargo las técnicas de centrado no son perfectas y están disponibles sólo con pistolas transportadas con tubería. La tendencia actual es la de utilizar la mayor pistola que puede ser pescada con técnicas de lavado (washover) y que provean los mejores medios posibles para ser centrada.

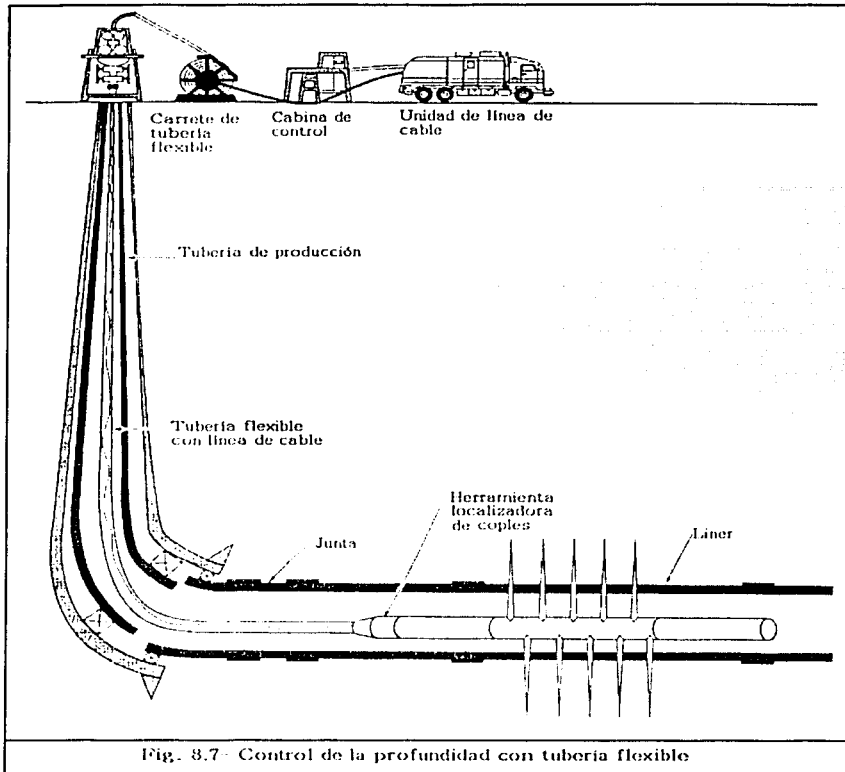


Fig. 8.7- Control de la profundidad con tubería flexible

Control de Profundidad

La precisión requerida de control de profundidad puede ser menos crítica en pozos horizontales que en verticales, la clave es el grado de heterogeneidades del yacimiento, mientras más heterogénea sea la formación, debe ser más preciso el control de profundidad. En ambientes horizontales, el control de la profundidad no puede caer en la correlación convencional de rayos gamma, ahí generalmente es insuficiente la definición en los registros de rayos gamma. La medición precisa de la longitud de la tubería, medición mientras se perfora (MWD²⁵) o técnicas de "conexión húmeda" y "puerta lateral" puede establecer la posición de la pistola en forma precisa. Para tubería flexible equipada con cable, el establecimiento convencional de la técnica de cable, de insertar una tubería corta dentro del liner de TR justo arriba de la zona productora es efectivo, esta junta corta es identificada con el convencional localizador de coples en la sarta de tubería flexible. (figura 8.7)

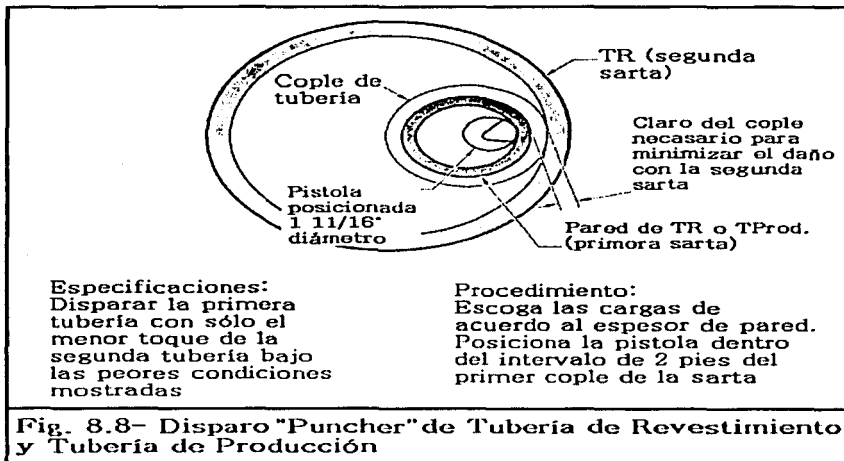
²⁵ La herramienta MWD nos ayuda a conocer la dirección de la perforación del pozo y la desviación que se ha generado.

Alternativamente una sección del liner marcado radiactivamente puede ser identificado con herramientas de rayos gamma en la sarta de tubería flexible. La precisión de éste sistema está controlado por la precisión de la localización de la anomalía identificada en el liner de TR.

8.6 Disparos tipo "Puncher" de TR y TP.

Es algunas veces necesario el comunicar la tubería de producción con el espacio anular entre la TR o bien el espacio anular de TR/TR para establecer circulación, etc.

Cargas de penetración limitada tipo "puncher" de cargas moldeadas son utilizadas, estas son diseñadas para penetrar solo la tubería inicial o la sarta de TR sin daño material alrededor de la sarta que los rodea (figura 8.8). La mayoría de los diseños envuelven pequeñas cargas de explosivo bajo con penetración especial en liners que proveen tamaño de agujero razonable, pero que tienen una capacidad de penetración mínima. Estas generalmente son cargadas en pistolas de soporte cóncavo en 1 3/8 a 1 11/16 en diámetro externo equipadas con posicionadores para el control del espaciamento clearance usualmente a cero, el equipo esta disponible para operaciones en altas presiones y altas temperaturas.



Las pistolas son relativamente cortas porque solo pocos disparos son requeridos, el daño posible a la sarta que lo rodea es minimizado por medio de disparar la pistola cerca de una junta de Tubería de Producción o de TR para asegurar una abertura TP/TR o TR/TR (figura 8.8)

El espesor de pared de TP y TR varía ampliamente así que una serie de cargas es requerido para adaptar las posibles combinaciones en el campo. fallas ocasionales a estos disparos son usualmente: posicionamiento de pistola impropia para control de espaciamento o drift de la tubería, lo cual nulifica al posicionador; inadecuado control de calidad de las cargas moldeadas y una incorrecta selección de cargas para la tubería específica o el peso de la TR a ser disparada.

8.7 Disparos para la inyección

El proceso de inyección de fluidos dentro de los disparos puede ser visto como el reverso del flujo de yacimiento a pozo, experimentado en terminaciones naturales. La efectividad de la inyección es mejorada por la limpieza de los disparos antes de las operaciones de inyección, empezando por disparos bajobalanceados, surgencia en la parte trasera, corta producción del pozo, lavado de los

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

disparos o tratamiento en casos donde el daño del pozo es el problema y asegurando una apropiada geometría de disparos para minimizar el daño y permitir la inyección selectiva.

Cuando las técnicas de entrada limitada son utilizadas para el perfil de control de inyección o inyección selectiva, el efecto de la fricción de disparos deben ser considerado. En tales casos el tamaño de entrada de agujero a la TR, uniformidad y consistencia son importantes, en todos los casos los efectos de espaciamento de la pistola deben ser considerado. Tanto las pistolas de cargas moldeadas y pistolas de bala son candidatos para los disparos.

CAPITULO IX SEGURIDAD EN LOS DISPAROS.

9.1 Seguridad en los disparos

El seguir los procedimientos operacionales seguros resulta crítico en operaciones de disparos de pozos. Una pequeña desviación de las prácticas de seguridad puede tener consecuencias devastadoras. Los peligros únicos a los disparos son encontrados en tres áreas separadas pero interactivas; almacenamiento, transporte, manejo y operación de elementos que contienen explosivos, control de presión en la cabeza del pozo y la presencia de gases tóxicos, particularmente H₂S.

El accidente más significativo a evitar es la detonación de la pistola en la superficie, la cual puede resultar en lesiones serias o la muerte. Resultando en daño al equipo o al pozo y perder el control del mismo que también resultan de importancia considerable.

Criterios de Seguridad

Grupos operacionales, compañías de servicio, equipos manufactureros y agencias de gobierno, han presentado muchas publicaciones sobre seguridad, colectivamente estas publicaciones proveen una base para la seguridad y operaciones de disparos libres de accidentes.

Registro de Seguridad.

Estadísticamente los registros de seguridad de disparo son muy buenos, sólo cerca de seis accidentes serios son reportados cada año, de las miles de operaciones de disparos llevadas a cabo, pero dado lo serio de las consecuencias, aún estas pocas son inaceptables.

Causas de incidentes

Los accidentes usualmente derivan de uno o varios factores:

- o Inadecuadas reglas de seguridad.
- o Implantación de criterios de seguridad impropias.
- o Procedimientos de seguridad inconsistente (de una compañía de servicios u operadoras a otra).
- o Equipo diseñado impropiamente.
- o Equipo deficiente o pobremente mantenido.
- o Falta de supervisión o entrenamiento de personal.
- o El no tomar en cuenta los procedimientos de seguridad.

Responsabilidad de la seguridad

La llave para disparos libres de incidentes es el compromiso con la seguridad por todos aquellos en la operación. La compañía de servicio debe establecer equipo diseñado para la operación segura y el mantenimiento del pozo, asegurando que el personal esta adecuadamente capacitado considerando la utilización correcta del equipo, garantizando un correcto seguimiento al sistema de procedimientos seguros y manteniendo una cercana conexión con el operador antes y durante las operaciones de disparos.

El operador es responsable de establecer condiciones seguras de trabajo y familiarizar al personal de la compañía de servicio con las condiciones anticipadas y estableciendo los procedimientos de seguridad. La planificación y la anticipación de los peligros potenciales resultan esenciales para operaciones seguras. El API ha desarrollado prácticas recomendadas para la seguridad en los disparos que señalan efectivamente y comprensivamente los temas de seguridad¹.

9.2 Seguridad con explosivos

Un numero de factores deben ser considerados para la seguridad con explosivos, por ejemplo, hay muchos tipos de elementos explosivos y la naturaleza de los elementos son afectados por el

almacenamiento, manejo y transporte. Los procedimientos en el pozo también tienen influencia por el tipo de equipo explosivo a ser utilizado.

Elementos explosivos

Los elementos explosivos envueltos en las operaciones de disparos incluyen: las cargas moldeadas, cordón detonante, detonadores, cargas de pólvora para pistolas de bala y herramientas de posicionamiento e iniciadores de carga de pólvora para pistolas de bala y herramientas de posicionamiento.

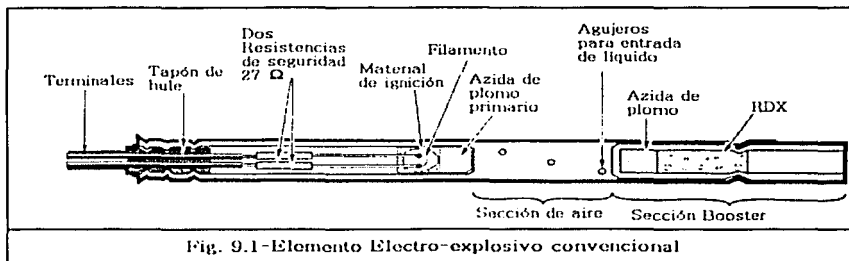
Como se discutió en el capítulo 2, las cargas moldeadas y el cordón detonante están fabricados de explosivos secundarios y son relativamente seguros de manejar, así mismo pistolas de bala o las herramientas de posicionamiento de las cargas de poder, hechos de componentes propelentes también son relativamente seguros aún que muy flamables.

Los encendedores de las cargas de poder son sensibles a las cargas eléctricas y al calor, pero generalmente no envuelven problemas de seguridad tan serias como aquellas experimentadas con detonadores para pistolas de cargas moldeadas. Los detonadores convencionales para pistolas de cargas moldeadas contienen explosivos primarios y son intrínsecamente más peligrosos que otros componentes. Detonadores no convencionales no contienen explosivos primarios y generalmente son más seguros para manejar, que aquellos detonadores convencionales. Los detonadores son clasificados como elementos electro explosivos (EED's; electro explosive devices) o elementos de percusión.

Almacenamiento, Manejo y Transporte

Un gran número de regulaciones gubernamentales, señalan que el almacenamiento y transporte de elementos que contienen explosivos, como regla general, pistolas cargadas con cargas moldeadas nunca deben ser transportadas armadas (detonadores ajustado al cordón detonante). Excepciones pueden ser las pistolas especiales diseñadas específicamente para ser transportadas con detonadores instalados. Agencias gubernamentales han exentado a estas pistolas porque están armadas en forma segura por ejemplo; el tren balístico es bloqueado hasta el armado final en el sitio del pozo.

Todas las cargas de la pistola deben tener un dispositivo de detonación para presión interna en caso de exposición al encendido durante el almacenamiento y transporte, sin este dispositivo la pistola podrá detonarse si es expuesta a temperaturas elevadas si la presión es descargada, las cargas moldeadas y el cordón detonante simplemente arderán sin explotar.



Los detonadores y encendedores son transportados separadamente de las pistolas en contenedores apropiados para asegurarlos en contra de la manipulación incorrecta. Así mismo contenedores separados y asegurados son utilizados para transportar cable de reserva o los pedazos restantes de explosivos (ejemplo: piezas del cordón detonante remanentes de la preparación para operaciones de disparo). Se debe tener precaución para asegurar que todos los remanentes de explosivos sean reportados.

Peligros en el lugar del pozo

El problema primario resulta en una detonación inadvertida de la pistola, la explosión de una pistola de cargas moldeadas en la superficie puede ser catastrófico. Los jets de las cargas moldeadas son letales a una distancia considerable y cargas modernas de alto desempeño pueden penetrar el preventor de reventones principal (BOP). Dada la alta densidad de disparos, no hay área segura alrededor de la pistola, la detonación de una pistola expandible o semiexpandible adiciona fragmentos de la pistola a los peligros del jet.

El disparo de la pistola en un elevador o "riser" presurizado es muy posible que resultará en la fragmentación del elevador o "riser", si una pistola de bala es disparada en la superficie, el resultado puede ser malo aunque generalmente no es tan catastrófico.

9.3 Seguridad en las operaciones de disparos transportados con línea de cable.

El elemento crítico en las pistolas transportadas con tubería es el EED, las pistolas armadas con un EED's convencional (figura 9.1) pueden ser disparada inadvertidamente en la superficie por:

- Aplicación accidental de energía eléctrica a la pistola, tanto en la corrida de verificación como en los problemas de malas corridas antes de la recuperación de la pistola.
- Entrada de voltajes parásitos desde el sitio del pozo dentro del sistema de cable / pistola dañado. (Ejemplo: voltajes parásitos de unidades de poder, operaciones de soldadura eléctrica (figura 9.2), elementos dispositivos de protección catódica (figura 9.3), energía de radio frecuencia).

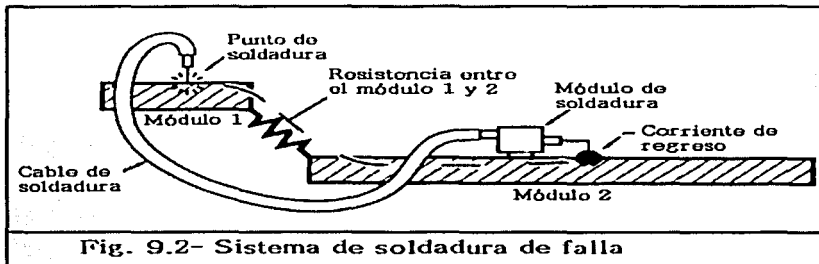


Fig. 9.2- Sistema de soldadura de falla

- Instalación de la cabeza del cable dentro de la pistola armada cuando energía acaba de ser aplicada al cable.

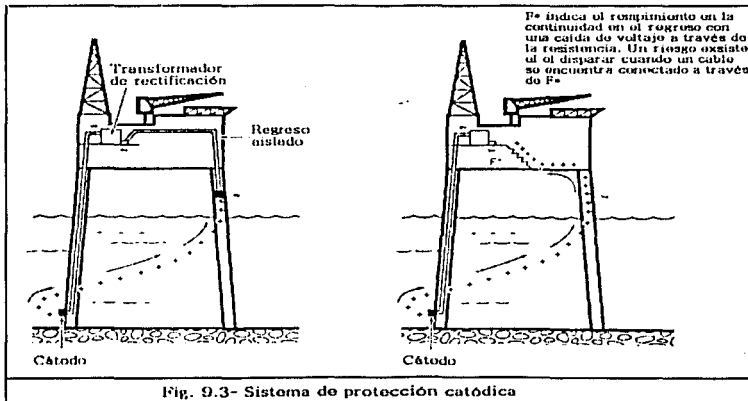


Fig. 9.3- Sistema de protección catódica

9.4 Seguridad en las operaciones de disparos transportados con tubería.

Las operaciones de disparos transportadas con tubería requieren procedimientos únicos de seguridad. Aún cuando EED's convencionales no son utilizadas ya que las pistolas transportadas con tubería generalmente son disparadas con detonadores de percusión, así las operaciones de disparos transportadas con tubería no son intrínsecamente más seguros que las operaciones con cable.

El equipo de disparo transportado con tubería es pesado y debe tenerse cuidado en el manejo y la conexión vertical en la rotaria.

El uso de explosivos primarios debe ser evitado en las conexiones balísticas de pistola a pistola. Aún si explosivos primarios no son utilizados en la transferencia balística entre pistolas, los seguros y tapones deben mantenerse en su posición hasta que la pistola sea ensamblada para proteger los componentes explosivos de un impacto accidental.

La detonación es generalmente de arriba hacia abajo de la pistola así que la sarta de la pistola será armada solo inmediatamente antes de ser corrida dentro del pozo. Más aún una tubería corta de seguridad de al menos 10m de longitud conteniendo solo cordón detonante (sin cargas) deben ser corrido entre la parte superior de la pistola y la cabeza detonante para asegurar que la pistola se encuentre debajo de la mesa cuando la cabeza detonante es instalada (figura 9.4). En tal caso si una detonación de la pistola inadvertida ocurre, no habrá peligro para el personal en la mesa, obviamente el personal no se le permite estar en la parte inferior de la mesa durante el armado de la pistola. Sin embargo sistemas de detonación en el fondo del tipo; retraso de tiempo pueden ser corridas en forma segura en el fondo del sistema de pistola.

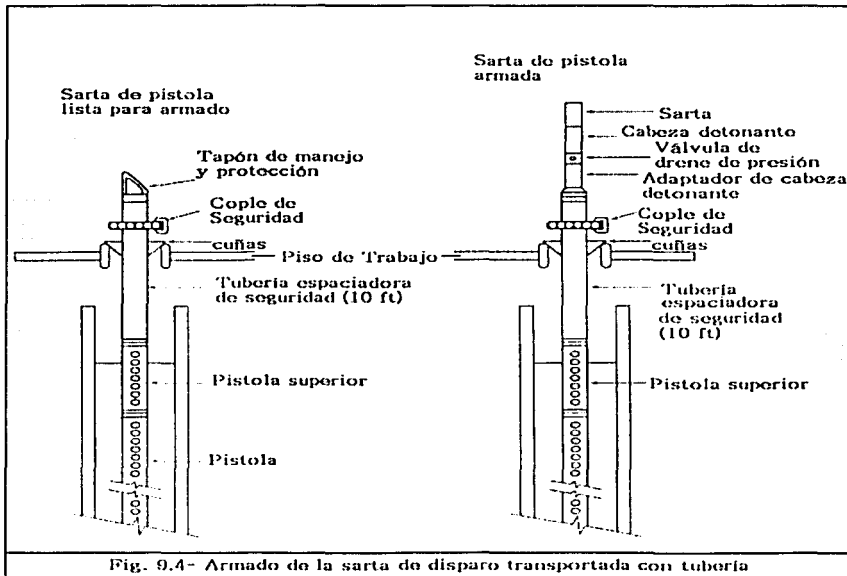


Fig. 9.4- Armado de la sarta de disparo transportada con tubería

Los sistemas de detonación de los disparos transportados con tubería, incorporan elementos de seguridad únicos para prevenir detonaciones accidentales en la superficie, sin embargo un ensamble cuidadoso de cabezas detonantes es requerido para prevenir detonaciones inadvertidas del detonador y el cordón detonante.

Detonadores

Los detonadores utilizados en las operaciones de disparo caen dentro de tres categorías:

- EED's convencionales
- EED's no convencionales
- Percusión.

EED's convencional puede ser dividido sobre la base de la energía requerida para disparar el detonador:

Tipo	Energía de seguridad de no disparo
No resistivo	0.01 a 0.4 W
Con resistencia de seguridad (ejemplo 2 27 Ω)	2.0 a 4.8 W
Resistencia, además de filtros de radio frecuencia	20 W (para radio frecuencias > 20 MHz.)

Detonadores no resistivos

Estos detonadores no deben ser usados porque no ofrecen protección esencial en contra de aún muy bajos niveles de energía eléctrica, corrientes parásitas, etc.

Detonadores con resistencia de seguridad.

El uso de estos detonadores (figura 9.1) esta bien establecido en la industria de servicio, sin embargo estas no ofrecen adecuada protección en contra de fallas eléctricas pequeñas o fuertes campos de radio frecuencia.

Detonadores con filtro de radio frecuencia

Estos protegen en contra de detonaciones inadvertidas, cuando los sistemas son expuestos a fuentes de poder de transmisión de radio frecuencia por arriba de los 20 MHz. Desafortunadamente el grado de protección en contra de los transmisores de radio frecuencia es de cierta frecuencia establecida, dependiendo del diseño del detonador en específico y las características de atenuación en particular, consecuentemente un buen conocimiento del potencial de los campos de radio frecuencia es esencial para asegurar operaciones seguras con estos elementos, desafortunadamente, la determinación de las características de los campos de radio frecuencia no es común. En plataformas costa afuera diversos transmisores pueden ser operados a diferentes frecuencias, además barcos de trabajo cercanos, navíos, plataformas adyacentes y helicópteros con fuentes de radio frecuencia deben ser considerados. Más aún una gran variedad de configuraciones de antena que pudieran generar una detonación en inesperado resulta del manejo y conexión de los cables principales del detonador.

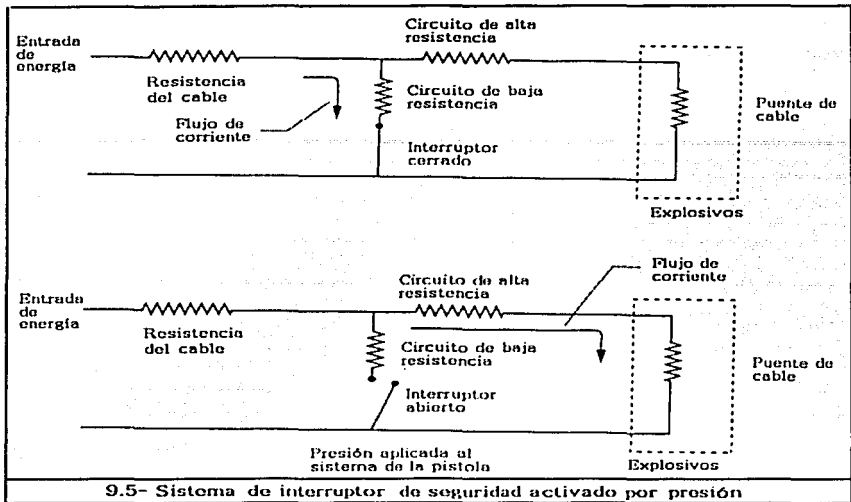
Una vez que el detonador se encuentra instalado, el efecto de los cables actuando como antena debe ser considerado. La complejidad de estos fenómenos, decrementa la confiabilidad en la predicción del grado del campo de radio frecuencia inducidos en el detonador.

Aún si los campos de radio frecuencia puede ser determinado con un razonable grado de confianza, el detonador con filtro de radio frecuencia continua sin ofrecer ventajas sobre otros EED's en protección en contra de posibles fuentes de corriente eléctrica asociadas con protección catódica, soldadura eléctrica y fuentes de poder AC y DC. Un punto importante es que el uso de detonadores con filtro de radio frecuencia pueden llevar a un falso sentido de seguridad.

Seguridad auxiliar para EED's convencional.

Elementos auxiliares están disponibles para mejorar la seguridad con radio frecuencia convencional u otros EED's. Un sistema envuelve el uso de un interruptor eléctrico que actúa a presión, que desconecta una baja resistencia eléctrica en el circuito de detonación de la pistola, como muestra la figura 9.5 una baja resistencia "by pass" en el circuito previene la detonación si una corriente es

inadvertidamente aplicada en la superficie o cuando la presión hidrostática se encuentra por debajo del valor preestablecido requerido para abrir el interruptor (ejemplo 250 psi).



9.5- Sistema de interruptor de seguridad activado por presión

Sin embargo el sistema no protege en contra de peligros encontrados en el manejo del detonador mismo durante la instalación y armado (por ejemplo efectos de radio frecuencia, golpes mecánicos, etc.) y más aún el contacto de la resistencia del interruptor es crítico para el apropiado sistema de funcionamiento (ejemplo: el contacto de alta resistencia reduce o elimina el efecto de "by pass", comprometiendo seriamente la seguridad), también el interruptor de presión puede ser abierto durante las pruebas rutinarias de presión del equipo de control de presión en la cabeza del pozo, otro aspecto en la seguridad y confiabilidad por lo que se debe tener cuidado especial.

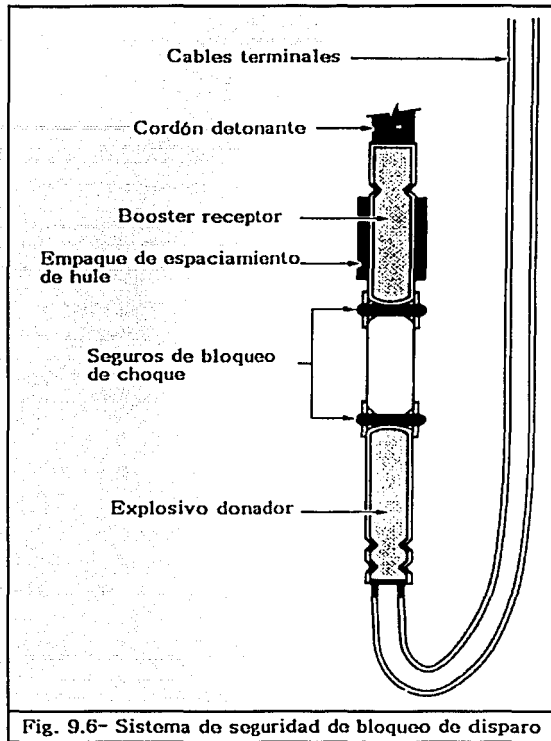
Un segundo acercamiento para mejorar la seguridad es la del sistema de bloqueo del disparo es la utilización de pines fabricados de una aleación de metales que son instalados para bloquear la transferencia del explosivo desde la sección detonante, al receptor o sección booster (figura 9.6). Estos pines generalmente se funden a 120-180° F permitiendo detonaciones normales del detonador arriba de estos niveles de temperatura. El sistema funciona similarmente al sistema EED desensibilizado por fluido, el cual se basa en no permitir la detonación en las dos secciones del booster si fluido se encuentra en estas secciones.

El sistema de bloqueo de disparo no detiene la sección detonante de detonarse, pero si previene el disparo de la pistola. Este sistema no señala los peligros en el manejo del detonador conteniendo explosivos primarios durante la instalación y el armado. En cualquier sistema mientras seguridad adicional se establezca en la superficie, algunos otros peligros siguen existiendo y sobre todo la confiabilidad del sistema se pone en duda.

EED's no convencionales

Sobre todo la seguridad y confiabilidad del sistema son mejorados significativamente a través del uso de EED's no convencionales; dos acercamientos similares son utilizados; EFI (Detonadores de cubierta de metal) y EBW (Detonadores de puente de cable), ambos representan un avance

significativo, asegurando las operaciones de disparo que no son afectadas por radio transmisiones, soldadura eléctrica, elementos de protección catódica e instalaciones eléctricas de energía.



EFI

La figura 9.7 muestra un elemento de este tipo, un poderoso estallido de energía eléctrica proveniente de un cartucho o pastilla electrónica vaporiza la sección metálica del puente y golpea una partícula de explosivo secundario con suficiente energía para detonarlo, este elemento detonante corta una pequeña partícula voladora la cual es expulsada a través del espacio de seguridad dentro del booster del explosivo secundario. El booster el cual es conectado al cordón detonante en la pistola, detona cuando la partícula voladora pega en ésta e inicia la detonación de la pistola.

Los detonadores EFI no contienen explosivos primarios porque ellos pueden iniciar directamente cualquiera de los explosivos utilizados incluyendo HINS (haciendo que EFI sea ideal para servicios a altas temperaturas). La barrera o espacio de aire en el detonador EFI provee dos importantes características comunes a muchas EED's convencionales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1. Capacidad de armado seguro: Un pin de acero instalado a través de la barrera de aire, provee una interrupción del tren balístico hasta que es removido inmediatamente antes de correrse en el pozo.
2. Desensibilizado al fluido: La entrada de líquido en la pistola llena el espacio de aire y previene que la partícula voladora llegue al booster.

La sección del puente se vaporizará solo cuando esté sujeto a una muy alta energía del capacitor de poder en el cartucho electrónico, más aún el cartucho provee características adicionales; uso de engría AC sin importar su frecuencia incluyendo señales de radio frecuencia, bloqueo de cualquier corriente DC de bajo voltaje (protección catódica o fallas por soldadura eléctrica), control de la acumulación de energía para el disparo intencionalmente aplicada en la superficie y dejando que la energía pase al detonador solo bajo la correcta instrucción y poder descargar el capacitor de poder en forma lenta y segura en el evento de un mal disparo permitiendo una remoción segura de la sarta de pistola del pozo.

Mientras que el equipo es más caro que el EED's convencional, el uso de EFI tipo EED's puede resultar en un ahorro significativo para el operador porque la necesidad de desconectar los elementos con protección catódica, interrumpe las operaciones de soldadura eléctrica o las transmisiones de radio son evitadas.

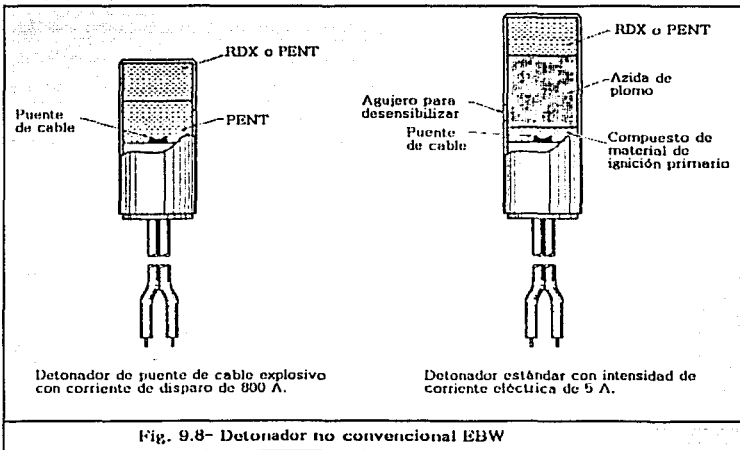
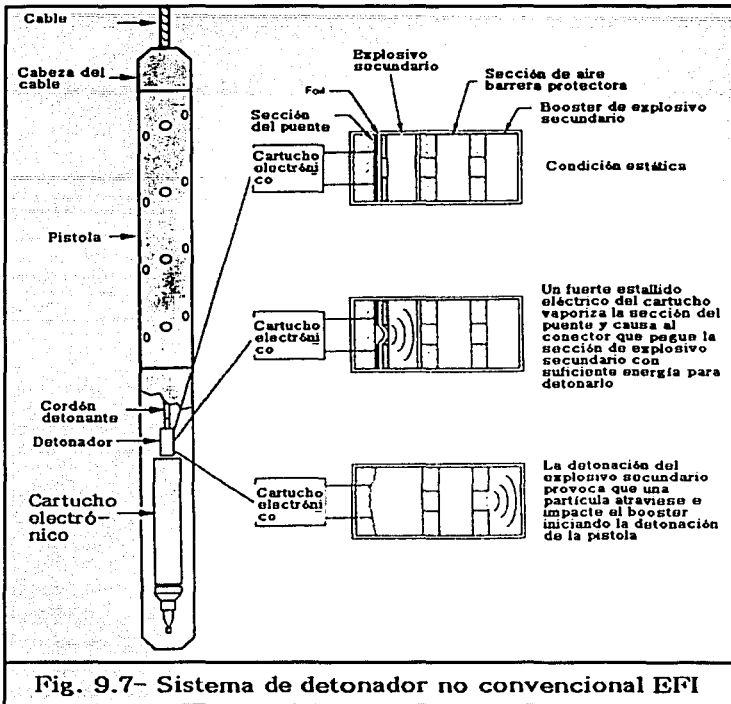
Detonadores EBW, son similares en el método de iniciación a los elementos EFI, sin embargo en lograr de utilizar un arreglo puente de cable/cubierta de metal el detonador EBW utiliza un puente de cable similar a aquel utilizado en EED's convencionales. Como con los sistemas EFI, una carga relativamente grande es aplicada muy rápida al puente del cable, el cable tiene una sección transversal muy pequeña y la alta corriente provoca que el cable se vaporice rápidamente y el de producir una onda de choque, ésta onda de choque inicia la detonación del explosivo alrededor del cable y es lo suficientemente fuerte para eliminar la necesidad de explosivos primarios en el detonador (figura 9.8)

En la actualidad la tecnología del EBW es utilizada exitosamente en detonadores que contienen explosivos RDX con altos rangos de temperatura (ejemplo HNS) son más difíciles de detonar y los sistemas EBW actuales no pueden iniciar la detonación de estos explosivos. Otra característica incluyendo capacidad de armado seguro, desensibilización al fluido y seguridad eléctrica similares a aquellos utilizados en detonadores EFI pueden ser incorporados.

Detonadores de percusión

El detonador de percusión es iniciado por impacto de un pin disparador similar al detonador de un rifle común o pistola. Este contiene explosivos primarios y es sensible al impacto, sin embargo es insensible a la corriente eléctrica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Seguridad en las operaciones de disparos transportados con cable.

Consideraciones primarias de seguridad en las operaciones de disparos transportados con tubería envuelven el uso de ambos EED's convencional y no convencional.

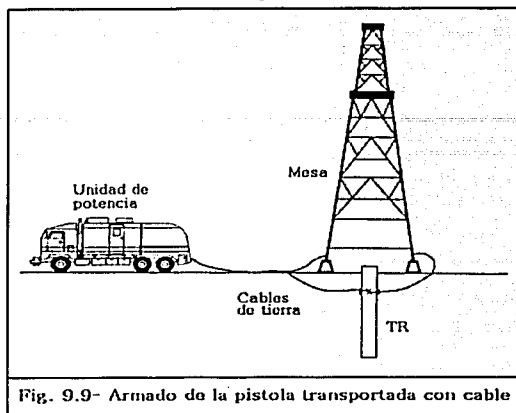


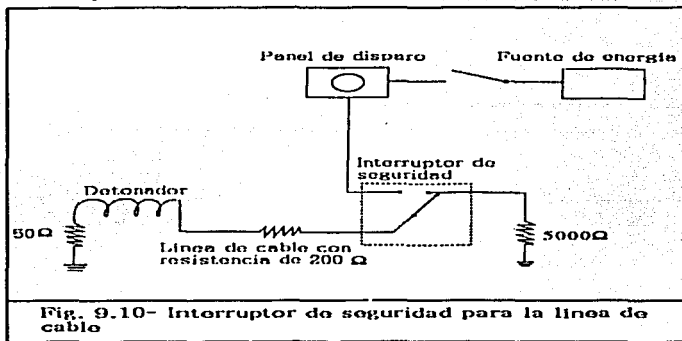
Fig. 9.9- Armado de la pistola transportada con cable

Operaciones con EED's convencional

Estos son susceptibles a la corriente eléctrica de diversas fuentes, pero añadiendo procedimientos de seguridad bien establecidos pueden resultar en operaciones seguras con estos detonadores. Procedimientos recomendados incluyen los siguientes.

1. Antes del armado o desarmado, revisar el voltaje entre el piso, TR y armadura del cable, si cualquier voltaje es observado se debe eliminar la fuente. Esto puede necesitar corregir el piso o las fallas de alimentación de poder en la unidad de perforación, desactivar la protección catódica de los elementos y suspender las operaciones de soldadura eléctrica.
2. Instalar cables que hagan "tierra física" entre la mesa, TR y la unidad de perforación (figura 9.9)
3. Evitar la posibilidad de potencial estático, no opera durante tormentas eléctricas, de arena o de nieve.
4. Estar seguro de que el personal que no sea esencial haya evacuado el área.
5. Eliminar los peligros de radio frecuencia por medio de apagar todos los transmisores, excluyendo transmisores de acuerdo a los procedimientos aprobados o el uso de detonadores calificados de radio frecuencia segura.
6. Deshabilitar o aislar el sistema de poder de la unidad de perforación durante el armado de la pistola y hasta que la sarta de la pistola se encuentre al menos a 230 ft dentro del pozo y por debajo del nivel de mesa rotaria. Este procedimiento debe ser realizado cuando se recobre la sarta de la pistola del pozo.
7. Observar prácticas de armado seguro.
 - a. Desconecte el circuito de la línea de cable de la cabina de instrumentación por medio de un bloqueo o un interruptor asegurado (estableciendo características adicionales de "aterizaje" del cable conductor a través de alta impedancia y corriente limitada como se muestra en la figura 9.10) Debe notarse que la persona responsable del armado de la pistola debe mantener un absoluto control del bloqueo o del interruptor de seguridad todo el tiempo.

- b. Instale la cabeza del cable dentro de la pistola desarmada (a menos que el elemento armado ha sido específicamente creado, como en algunos sistemas de armado seguro que pueden interrumpir el tren balístico)
 - c. Coloque el detonador dentro de un elemento protector y conectarlo eléctricamente a la pistola (figura 9.11).
 - d. Conecte el detonador al cordón detonante (figura 9.11).
 - e. Complete el ensamble de la pistola e inmediatamente introducir la pistola dentro del pozo.
8. Desarmar la pistola mal disparada inmediata a la recuperación antes de tratar de resolver cualquier problema que se presente.
 9. Fugue cualquier presión interna de la pistola recuperada (disparada o no) antes de su manejo o transporte. Una pistola mal disparada puede contener presiones tan altas como 3000 psi. Niveles intermedios de presión pueden ser atrapados en los residuos que llenan las pistolas recuperadas.



Operaciones con EED's no convencionales

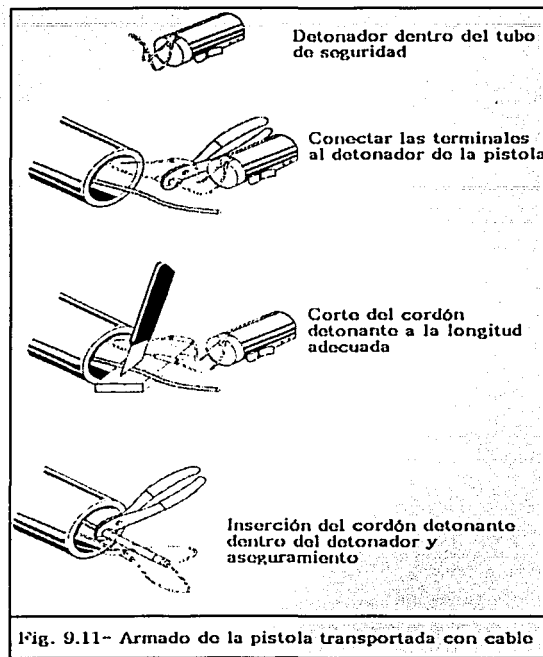
El uso de EBW y EFI como detonadores proveen operaciones seguras sin la necesidad de mediciones o interrupción de radio frecuencias o transmisiones de micro ondas, desactivación de elementos con protección catódica o el cese de operaciones de soldadura eléctrica u otras operaciones utilizando energía eléctrica. Consecuentemente riesgos adicionales son eliminados y los costos asociados al tiempo en que estos son desconectados (esperando que varios sistemas eléctricos sean desconectados) son evitados.

De otra forma, procedimientos de seguridad asociados con el armado de la pistola, la introducción de la sarta dentro del pozo y la recuperación y desarmado de la pistola son esencialmente idénticos a aquellos para operaciones con EED's convencionales.

Seguridad en las operaciones transportadas con tubería.

Estas requieren procedimientos únicos de seguridad. Operaciones con detonadores no eléctricos (percusión) envuelven precauciones especiales en el manejo del equipo para asegurar la seguridad. El uso de EED's requieren que los procedimientos de seguridad para EED's y para el manejo y ensamble de los equipos de disparos transportados con tubería sean seguidos completamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Procedimientos en la Mesa Rotaria.

Procedimientos generales operacionales incluyen los siguientes.

- Protección en contra de potenciales estáticos, no opere durante tormentas eléctricas, de arena o de nieve.
- Asegure que todo el personal no necesario se encuentre fuera del área de operación. También asegurar que no se encuentre personal por debajo de la mesa rotatoria cuando la sarta de la pistola esta siendo ensamblada y armada en la mesa.
- Asegurar que todas las pistolas sean equipadas con el manejo apropiado de los tapones y cubiertas y que aquellas conexiones balísticas entre pistolas no son expuestas durante el manejo y movimiento.
- No arme las cabezas detonantes en el piso de la mesa. Estas deben ser armadas por separado como por ejemplo en la perrera.
- Después del armado, instalar las cabezas detonantes en elemento de protección o colocarles los adecuados protectores o tapones antes de ser transportados hacia el piso de trabajo.
- Debe tenerse cuidado cuando el ensamble de la sarta de la pistola para evitar un posible impacto entre cualquier conexión balística entre pistola o el forzar y jalar las conexiones balísticas.
- Siempre instalar una tubería corta de al menos 10 ft de longitud arriba de la parte superior de la pistola (figura 9.4). "Nunca conectar la cabeza detonadora directamente a la parte superior de la pistola" Esta tubería asegura que la carga más superficial de la pistola se encuentre segura por debajo del nivel de la mesa cuando la cabeza detonante sea instalada.

- Transporte la cabeza detonante armada al piso dentro del tubo de seguridad con los elementos de protección instalados y realice la conexión en la parte superior del espaciador de seguridad (tubería corta).
- Una vez que la cabeza detonante es instalada, no coloque la pistola por arriba de la mesa por cualquier razón sin primero remover la cabeza detonante.
- Corra la sarta de la pistola dentro del pozo inmediatamente después de instalar la cabeza detonante.
- Cuando recupere la sarta de la pistola inmediatamente desconecte la cabeza detonadora de la parte superficial de la sarta (del espaciador de seguridad) antes de realizar cualquier otra operación con la sarta de la pistola. Estar seguro que el adaptador de disparo de la pistola y el espaciador de seguridad no contengan presión y tome las precauciones necesarias para drenar, en caso contrario la presión antes de desconectar la cabeza.
- Inmediatamente después de remover la cabeza detonante de la sarta de la pistola, coloque los elementos de protección o instale los adecuados tapones para el manejo.
- Drene cualquier presión interna de la pistola recuperada (no importa si fue disparada o no) antes del manejo o transporte, una pistola mal disparada puede contener presiones tan altas como 3000 psi. Niveles no determinados de presión pueden ser atrapados dentro de los residuos que llenan la pistola. Siempre asuma que la pistola, disparada o no disparada, contiene presión y seguir procedimientos seguros durante la despresurización y desarmado.
- Inmediatamente instale las adecuadas protecciones al equipo, en las pistolas desarmadas.

Armado de la cabeza detonante.

Cada tipo de cabeza detonante tiene características únicas que pueden requerir procedimientos especiales de seguridad, por ejemplo: sistemas con detonadores de percusión no requieren implantación de varios procedimientos para evitar cargas eléctricas parásitas, sin embargo los detonadores de percusión son sensibles a los golpes mecánicos o a ser aplastados y se debe tener cuidado durante la instalación y armado.

Precauciones en contra de potenciales estáticos (tormentas) deben ser tomadas en cuenta durante el manejo de todos los detonadores. Operaciones que envuelven sistemas de disparos transportados con tubería con EED's convencionales deben ser conducidos de acuerdo con los procedimientos establecidos para operaciones con cable que utilicen detonadores similares, en todas las instancias solo el detonador o cordón detonante están envueltos, sin embargo una explosión inadvertida puede tener serias consecuencias.

Sistemas de disparos del tipo "drop bar"

Este sistema generalmente requiere de un mínimo nivel de presión hidrostática (150 psi o más) que será impuesta antes que el detonador sea detonado. El impacto de la "caída de la barra" (drop bar) libera el pin dentro del detonador de percusión con suficiente fuerza para iniciar el explosivo. Como resultado el detonador no puede ser disparado a presión atmosférica, más aún el ensamble de la cabeza usualmente es equipado con un elemento de retención para prevenir impacto de cualquier otra fuente que no sea la barra misma.

Algunos sistemas de disparo de "caída de barra" pueden ser equipados para operaciones de pozo seco, en estos sistemas el impacto de la "barra de caída" no solo libera el pin detonante, también lleva al pin dentro del detonador. Este sistema requiere atención especial en la superficie para evitar cualquier impacto que pudiera soltar el elemento de retención del pin y permita disparar accidentalmente el sistema.

Sistemas de disparo actuados a presión.

Este sistema requiere presión hidrostática para la operación y no puede ser disparada a presión atmosférica, debe tenerse cuidado durante la corrida en el pozo para evitar presiones diferenciales

que puedan iniciar la secuencia de disparo. En sistemas hidráulicos de tipo retrazado, la secuencia de disparo no puede ser detenida una vez que ha sido iniciado, esta característica es crítica en operaciones donde el bajo-balance planeado debe ser establecido durante el retraso.

Sistemas de disparos actuados eléctricamente

Cuando EED's convencionales son utilizados, todas las precauciones de seguridad para operaciones con línea de cable con EED's convencional deben ser observadas.

Sistemas de disparo reemplazables.

Una variedad de sistemas de disparo pueden ser corridas dentro del pozo desarmados y después armados cuando son posicionados a la profundidad de disparo, incluyendo las que actúan por caída de barra, por presión y sistemas eléctricos transportados con cable, los elementos de seguridad descritos previamente son incorporados con anterioridad. Un elemento único de estos sistemas es que estos sean corridos dentro del pozo al último momento posible después que la sarta completa es posicionada a la profundidad.

Elementos importantes de seguridad y de operaciones incluyen los siguientes:

- No hay explosivos primarios en el pozo mientras la sarta de la pistola esta siendo corrida.
- El detonador es introducido en el último momento posible.
- El control sobre las operaciones que envuelven el detonador se ve mejorado.
- El tiempo que el detonador es expuesto a la temperatura del pozo se reduce.
- Un sistema simple de disparo contiene un sistema redundante (un nuevo elemento es corrido en el caso de un mal disparo).

Sistemas redundantes de disparo.

Cuando dos sistemas de disparo son corridos en combinación para establecer redundancia, todas las reglas de seguridad para ambos tipos deben ser seguidos durante todo el tiempo. Una variedad de combinaciones es posible.

9.5 Operaciones de control de presión en la cabeza del pozo.

La presencia de presión en la cabeza del pozo crea un diferente pero no menos importante clase de peligro adicional a aquella que envuelve a los elementos explosivos.

Operaciones seguras.

El equipo de control de presión es requerido para operaciones seguras cuando presión alta se presenta en la cabeza del pozo. Cada trabajo viene con peligros y riesgos únicos, por lo que no hay operaciones rutinarias donde se involucra la presión, pero si el personal se encuentra correctamente entrenado y el equipo en buen estado, con el mantenimiento adecuado son los prerrequisitos que se deben satisfacer para todos los trabajos donde se involucre la presión.

Factores a considerar incluyen el peso y usualmente el difícil manejo del equipo, el cual puede contribuir a lesiones del personal adicional a la gran longitud del ensamble, el gran número de conexiones selladas y la gran probabilidad de falla a la presión.

La información sobre la presión de cabeza del pozo de trabajos previos es requerida así como; la producción de fluidos (ejemplo aceite, gas e hidratos), la presencia de inhibidores, fluidos corrosivos o tóxicos (ejemplo: H_2S y CO_2), equipo de la mesa rotaria, peso de la mesa, resistencia del BOP, adaptadores, rebordes o pestañas (flanges), rangos de presión de todo el equipo y restricciones TP, TR, desviaciones del pozo, válvulas de sistema neumático, etc. (un diagrama del pozo es preferido)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Otras consideraciones de operaciones anteriores incluyen la selección del equipo apropiado (el elemento con el menor rango de presión define el rango actual del ensamble completo), verificación de todo el equipo utilizado por la compañía de servicio en buen estado, probado y certificado y para superar todos los peligros potenciales que se predicen en la planeación, es necesario contar un plan de contingencia para el peor de los casos.

Pruebas al equipo de control de presión.

Las pruebas de presión del ensamble completo en la cabeza del pozo (generalmente de 1000 psi por arriba de la presión máxima anticipada) se llevan a cabo para asegurar la integridad del equipo y que todos los sellos funcionen adecuadamente. Solo fluidos no inflamables deben ser usados en estas pruebas.

El requerimiento de probar la integridad en superficie del equipo de control de presión debe ser balanceado en contra de la necesidad de minimizar el riesgo asociado con pistolas presurizadas y armadas en el piso de la mesa. Esta es particularmente una consideración seria en sistemas de pistolas expandibles o semi-expandibles que utilizan el detonador expuesto.

Diversas alternativas son seguidas.

1. Instale una válvula de paso en el ensamble de control de presión, inmediatamente encima de la trampa de herramientas (figura 9.12). Cualquiera de los diversos modelos puede ser utilizado siempre y cuando la válvula se encuentre dentro del rango de presión de control del ensamble específico que se está utilizando.
2. Realice el ensamble de las herramientas en el cable (excepto para la pistola) y posicione la sarta en la sección superior del ensamble de control de presión. Debe notarse que el ensamble completo de control de presión debe ser ensamblado a este tiempo.
3. Monte el ensamble de control de presión en la cabeza del pozo, abra la válvula de balín y pruebe la presión del ensamble entero.
4. Elimine la presión después de una prueba satisfactoria. Habrá la válvula de balín y desconecte el ensamble de control de presión debajo de la válvula de balín.
5. Conecte la sarta de la pistola al resto del ensamble de cable siguiendo los procedimientos de seguridad antes presentado para el manejo y transporte de la pistola.
6. Posicione la sarta dentro de la sección superior del ensamble por encima de la válvula de balín.
7. Reconecte el ensamble de control de presión a la cabeza del pozo.
8. Cierre la válvula de balín y aplique presión por debajo de la válvula de balín para probar las conexiones abiertas para instalar el ensamble de la pistola.
9. Elimine la presión de prueba y abra la válvula de balín y después las válvulas de la cabeza del pozo. Después siga los procedimientos normales para introducir la sarta dentro del pozo.

Procedimientos de operación.

Los siguientes son procedimientos de operación observados comúnmente:

- o Nunca exceda el rango de presión de trabajo de cualquier componente en la sarta de control de presión.
- o Posicione la unidad contraria al viento de la cabeza del pozo en un área relativamente libre de tráfico. Mantenga una perspectiva no obstruida de entre la unidad de servicio y la cabeza del pozo.
- o Plan para la disposición de fluidos inflamables o tóxicos liberados de las líneas de flujo o elementos de escurrimiento de presión. Estableciendo una adecuada colección de contenedores en los lugares necesarios.
- o Ancle la descarga de flujo o la presión de descarga de las líneas para prevenir el movimiento durante la descarga de fluido.

- Garantice que no haya cargas laterales en el lubricador, estas cargas pueden crear peligrosamente esfuerzos altamente mecánicos en el lubricador, particularmente en conjunción con altas presiones internas.
- Asegure que el personal no necesario se encuentre en un área lejana al pozo.
- Asegure que la supervisión sea adecuada
- Asegure que todo el manejo del equipo sea adecuado para el trabajo.

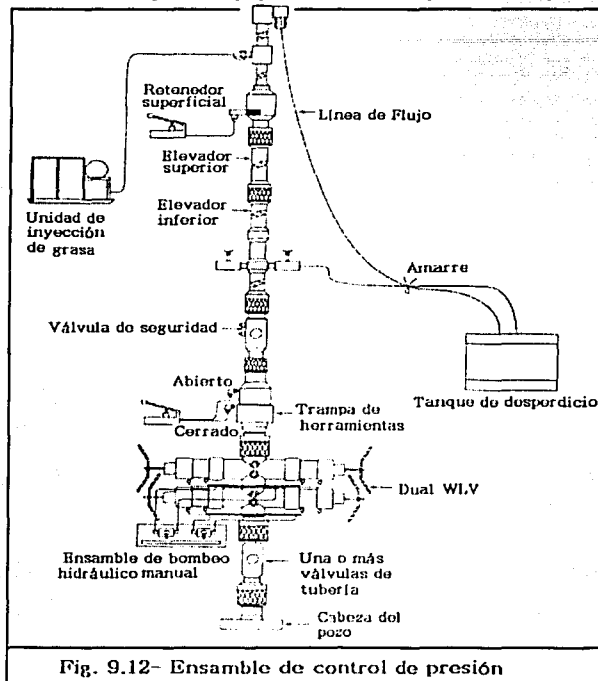


Fig. 9.12- Ensamblaje de control de presión

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

9.6 Seguridad en el pozo en la presencia de aparatos radioactivos de registro.

Los aparatos radioactivos (rayos gamma, neutrón, etc.) son regularmente corridos en las sartas de cable para correlacionar la posición de la pistola a los registros de formación previos. Las compañías de servicio se adhieren a procedimientos estrictos, observando el almacenamiento, manejo, transportación, uso y disposición del material radioactivo. En general el personal no esencial debe permanecer alejado de la operación mientras la compañía de servicio maneja las herramientas radioactivas. Medidores de bajo nivel deben ser utilizados para monitorear los niveles de radiación en el área, de principio a fin de la operación y determinar cualquier exposición o contaminación. En el no deseado caso de contaminación accidental se debe seguir los procedimientos estándar de emergencia para radiación.

9.7 Operaciones con presión y presencia H₂S

Una variedad de gases pueden estar presentes en el sitio del pozo y pueden directamente afectar las operaciones. La mayor seguridad se deberá tener cuando se incluyan disparos o explosiones de gases combustibles, efectos letales en el personal o los gases tóxicos y fallas al equipo resultado del

ataque químico por gases. Tabla 9.1 lista algunos de los gases peligrosos y sus efectos en el personal. Debe notarse que algunos gases son más pesados que el aire la cual es una consideración que debe tomarse en cuenta.

Tabla 9.1 Toxicidad de varios gases

Nombre común	Formula química	Densidad relativa	Límite de trabajo (ppm)	Límite peligroso	Concentración letal.
	H ₂ S	1.18	10	250	300
Hidrógeno sulfurado	H ₂ S	1.18	10	250	600
Dioxido de sulfuro	SO ₂	2.21	5	---	1000
Cloro	Cl ₂	2.45	1	4	1000
Monoxido de carbono	CO	0.97	50	400	1000
Dioxido de carbono	CO ₂	1.52	5000	50 000	1 000 000
Metano	CH ₄	0.55	90000	50 000	---

H₂S es por mucho el gas más peligroso entre todos los listados en la tabla 9.1. Este no solo es combustible, sino también altamente tóxico para el personal, aún en concentraciones muy bajas puede ser letal (ver tabla 9.2) Así efectivamente cualquier nivel de H₂S es peligroso, más aún el H₂S tiene un efecto adverso en el acero, por medio del ataque corrosivo (en la presencia de agua, incluso en pequeñas cantidades) ataque al carbón que reduce significativamente la resistencia del acero después de solo una breve exposición y el fracturamiento de las paredes de la tubería que lleva a niveles de esfuerzo de colapso y tensión muy por debajo de la resistencia normal del material.

Materiales inhibidores pueden proteger el acero en concentraciones menores al 2% (20 000 ppm) y el equipo especial debe ser utilizado. Aceros de menor resistencia (ejemplo esfuerzos de resistencia por debajo de 75 000 psi) son mucho menos susceptibles al H₂S que los de alta resistencia. Los materiales resistentes al H₂S incluyen las aleaciones no férricas como el MP35N también están disponibles para componentes del equipo.

Los peligros al personal son la consideración mayor, el H₂S es letal en concentraciones mucho menores que los niveles en que causa problemas al equipo.

Requerimientos especiales de seguridad

Además de los procedimientos de seguridad presentados en la sección 9.5 requerimientos especiales incluyendo: medios para monitorear la dirección del viento, medios para detectar la presencia de H₂S, aparatos de protección de respiración, entrenamiento especial de personal y equipo de control de presión especial resistentes al H₂S.

Guía operacional

Además de la guía presentada en la sección 9.5, los siguientes pasos son recomendados para las operaciones con H₂S.

1. Asegure que los sensores de gas y de dirección de viento son desplegados adecuadamente y que son funcionales.
2. Revise que todo el equipo sea resistente al H₂S y que sea del rango adecuado de presión.
3. Asegure que los aparatos apropiados para la respiración están disponibles en las cantidades requeridas

4. Coloque la unidad de servicio contrario al viento de la cabeza del pozo y al menos 60 ft de distancia si es posible.
5. Localice la línea de desfogue de control de presión al menos 60 ft a favor del viento de la cabeza del pozo.
6. Debe tenerse precaución cuando se desfogue la presión del equipo. Pistolas y otros elementos recuperados de pozo pueden contener H₂S.
7. Tener un plan de contingencia médica para al caso de la exposición al H₂S de algún miembro del personal.
8. Terminar el trabajo en el menor tiempo posible.
9. Evite cualquier posibilidad de chispas eléctricas, metal-metal o abrasión.

Tabla 9.2 Efectos físicos del H₂S

Concentración			Efectos físicos
porcentaje	ppm	Granos/100 scf	
0.001	10	0.65	Tiene un olor no placentero
0.002	20	1.30	Es seguro en una exposición de 8 h.
0.010	100	6.48	Muere por respiración de 3 a 15 min. Puede irritar los ojos y la garganta
0.020	200	12.96	Muere por respiración en exposición corta.
0.050	500	32.96	Causa mareo y la respiración cesa en pocos minutos
0.070	700	45.36	Causa pérdida de conciencia y puede causar la muerte
0.100	1000	64.80	Causa la pérdida de la conciencia y la muerte inmediata

Conclusiones

Este trabajo integra los procedimientos requeridos más comúnmente utilizados por los profesionistas, para el diseño de las terminaciones con las diferentes tecnologías que se encuentran actualmente a disposición de la industria petrolera, apegados a las normas y especificaciones del API.

Dichos procedimientos incluyen factores relevantes como: las propiedades del yacimientos y sus alteraciones por los procesos que se llevan a cabo durante la perforación y terminación del pozo.

1. La planeación estratégica de los disparos y la información determinarán el éxito de la operación.
2. La pruebas en superficie normatizadas de los disparos (API RP 19b "shoot out") son fundamentales para determinar la calidad de los mismos.
3. Las pistolas de soporte hueco (reusables y expandibles) son la alternativa para cuando se tiene alta presión y alta temperatura, no deforman la TR y no dejan residuos.
4. Las pistolas de diámetro extendido (expandibles y a través de tubería) son la alternativa cuando se tenga restricción en el diámetro ya que son flexibles y versátiles, sin embargo dejan residuos y dañan la TR.
5. En espesores pequeños la mejor opción son las pistolas transportadas por cable, son las económicas y menor tiempo de operación.
6. Las pistolas bajadas con tubería permiten realizar diversas tareas en la misma corrida (acidificaciones, registros, etc) teniendo amplios rangos de presión y temperatura.
7. Los factores geométricos de los disparos que afectan la productividad del pozo son: la densidad de disparos, penetración, fase y limpieza.
8. Las técnicas óptimas de disparos no son necesariamente las que proveen el menor daño a la formación, sino las que generan el mejor costo beneficio.
9. Es de vital importancia las medidas de seguridad en el almacenamiento, transporte, manejo y operación de disparos.

Recomendaciones

- a. Siempre que se contrate un servicio de disparos, el proveedor deberá presentar el resultado de pruebas normatizadas.
- b. Es fundamental seguir los medios de seguridad para garantizar la integridad del equipo y sobre todo del personal.
- c. Obtener toda la información posible y realizar el adecuado diseño para la selección de la pistola y el éxito de la operación.
- d. Respalda el diseño con el software adecuado (WEM) para asegurar la mejor selección de los disparos.
- e. Siempre se deberá seguir los procedimientos operacionales en estricto orden para garantizar la ejecución.
- f. Es recomendable que el estudiante de ingeniería petrolera reciba un mayor conocimiento sobre este tema y que realice prácticas en donde vea la operación.
- g. Este trabajo puede servir como una plataforma que pudiera ser complementada de acuerdo a los avances que se generen en el futuro en materia de procedimientos y tecnología.

Nomenclatura

A_t = área transversal total de túnel de flujo, ft ²	P_{sr} = presión en la cara de la arena (formación), psi
b_r = fracción de formación abierta al flujo, adimensional	P_{wb} = presión del pozo, psi
B_o = Factor de volumen del aceite, adimensional	ΔP_p = caída de presión a través de los disparos, psi
c = esfuerzo compresivo de la formación de interés, ksi	ΔP_R = caída de presión a través del yacimiento, psi
c_{mw} = esfuerzo compresivo húmedo, ksi	ΔP_1 = caída de presión a través del yacimiento para terminaciones a través del yacimiento, psi
c_r = esfuerzo compresivo del blanco de referencia Brea, ksi	ΔP_2 = caída de presión a través del yacimiento para terminaciones a través del yacimiento, psi
d = diámetro de entrada de agujero en la TR de interés, in.	q_g = gasto de flujo de gas, Mcf/D
d_{ci} = Diámetro interno de la TR, in	q_o = gasto de flujo de aceite, B/D
d_r = Diámetro de entrada de agujero de referencia en la TR, in	q_{oh} = gasto de flujo ideal de agujero descubierto, B/D o Mcf/D
d_{wd} = diámetro del pozo, in	q_p = gasto de flujo del sistema perforado, B/D o Mcf/D
h = espaciamiento entre los disparos, ft	r_{dd} = radio de la zona dañada por la perforación del pozo, ft
h_p = espaciamiento de disparos, adimensional	r_{ddc} = radio de la zona dañada por la perforación del pozo corregido por efectos de anisotropía, ft
h_p = espesor disparado, ft	r_e = radio de drenaje, ft
h'_p = espesor disparado corregido por efectos de anisotropía, ft	r_p = radio del disparo, ft
h_i = espesor total de la formación, ft	r'_p = radio del disparo modificado para tomar en cuenta los efectos de la anisotropía, ft
h'_i = espesor total de la formación corregido por efectos de anisotropía, ft.	r_{pd} = radio de la zona dañada por el disparo, ft
h_{ID} = espesor de formación adimensional, ft	r_{pD} = radio del disparo, adimensional
J = Índice de productividad	r_w = radio del pozo, ft
k = permeabilidad de la formación, mD	r'_w = radio del pozo modificado para tomar en cuenta los efectos de la anisotropía, ft
k_{da} = permeabilidad de la zona dañada por la perforación del pozo, mD	$r_{w,c}$ = radio del pozo modificado por efecto de la penetración parcial, ft.
k_g = permeabilidad del material del túnel, mD	s = esfuerzo efectivo de la formación, psi
k_{H1} = permeabilidad de la formación horizontal, mD	s_{bf} = daño causado por la penetración parcial de la zona productora, adimensional
k_{pd} = permeabilidad de la zona dañada por el disparo, mD.	s_d = daño causado por el daño, adimensional
K_v = permeabilidad de la formación, mD.	s_g = daño causado por la grava que rellena el túnel del disparo, adimensional
L_{API} = penetración total en el blanco, in	s_{H1} = componente horizontal del daño, adimensional
L^*_{API} = penetración total en el blanco modificada por el efecto de sartas múltiples, in	s_{da} = daño resultado por la desviación del pozo, adimensional
L_p = penetración total en la formación objetivo de interés, in	s_p = daño resultado por los disparos, adimensional
L_{pc} = L_{API} corregida por el esfuerzo de la formación y efectos de esfuerzo efectivo, in	s'_p = daño resultado por los disparos modificado para tomar en cuenta el efecto del daño por la perforación del pozo, adimensional
L_{pr} = penetración total en la formación objetivo de referencia, in.	s_{pd} = daño por el disparos en la zona dañada, adimensional
L_{dd} = espesor de la zona dañada por la perforación del pozo, ft	s_r = daño total, a dimensional
L_p = longitud del disparo, ft	s_v = componente vertical del daño por disparo, adimensional
L'_p = longitud del disparo modificado para tomar en cuenta los efectos de la zona dañada por la perforación del pozo, ft	s_{wh} = componente del daño por el disparo del pozo
L_t = longitud del túnel disparado, ft.	T = temperatura de la formación, °R
n = número de disparos	x = Dureza Brinell de la TR de interés, 10 mm balín, 3000kg de carga, adimensional
P = presión	
P_R = presión del yacimiento, psi	

x_r = Dureza Brinell de la TR de referencia, 10 mm
balín, 3000kg de carga,
adimensional

y = distancia entre la parte superior de la arena y
la parte superior del intervalo abierto, ft

z = factor de compresibilidad del gas,
adimensional

β = coeficiente de velocidad, o factor de
turbulencia, 1/ft

β_{dd} = coeficiente de velocidad para flujo a través
de la zona dañada por la perforación, 1/ft

β_r = coeficiente de velocidad para flujo a través de
la formación, 1/ft

β_{pd} = coeficiente de velocidad para flujo a través
de los disparos en la zona dañada por los disparos,
1/ft

γ = factor de corrección, adimensional

γ_g = densidad relativa del gas (aire = 1)

θ_d = desviación del pozo, grados

θ'_d = desviación ajustada del pozo, grados

θ_p = fase angular del disparo, grados

μ_g = viscosidad del gas, cp

μ_o = viscosidad del aceite, cp

ρ_o = densidad del aceite, lbm/ft³

σ_y = esfuerzo de cedencia de la TR de interés, ksi

σ_{y_r} = esfuerzo de cedencia de la TR de referencia,
ksi

Sub índices

e = efectivo

ob = sobrecarga

p

=

poro

Bibliografía

W. T. Bell, R. A. Sukup & S. M. Tariq. Perforating Ed. SPE 1995 1a edición
Monografía Vol. 16

G.C. Howard, C.R. Fast. Hydraulic Fracturing Ed. SPE 1970 1a edición
Monografía Vol. 2

Economides M. J., Nolt K. G., Reservoir Stimulation Ed. Prentice Hall 1989 1a edición.

Neal J. Adams. Drilling Engineering a Complete Well Planning Approach Ed. PennWellBooks
1985 1a. edición

John L. Gidley Ph. D. et. al. Recent Advances in Hydraulic Fracturing Ed. SPE 1989 1a edición.
Monografía Vol. 12

Neal Adams Workover Well Control Ed. PennWellBooks 1981 1a. edición

Economides J. M. & Hill A. D. Petroleum Production System Ed. Prentice Hall 1994 1a edición.