

20702



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS Y EVALUACION DE LOS
DISPAROS EN LA TERMINACION DE POZOS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
HECTOR ARREDONDO MALDONADO

MEXICO, D. F.

1987.



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 está 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.

C O N T E N I D O

- I.- INTRODUCCION
- II.- DISEÑO DE DISPAROS EN LA TERMINACION DE POZOS
 - II.1.- TIPOS DE DISPAROS
 - II.2.- EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PISTOLAS
 - II.3.- CONSIDERACIONES PARA OPTIMIZAR LOS DISPAROS
 - II.4.- TIPOS DE EXPLOSIVOS
 - II.5.- DISEÑO DE DISPAROS
- III.- FACTORES QUE AFECTAN LA OPERACION DE LOS DISPAROS
 - III.1.- TAPONAMIENTO DE LOS DISPAROS
 - III.2.- EFECTO DE LA PRESION DIFERENCIAL
 - III.3.- EFECTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION
 - III.4.- EFECTO DEL USO DE FLUIDOS LIMPIOS
 - III.5.- DENSIDAD DE DISPAROS
 - III.6.- COSTO
 - III.7.- LIMITACION DE PRESION Y TEMPERATURA
 - III.8.- DAMO EN EL CEMENTO Y LA TUBERIA DE ADEME
 - III.9.- CLARO DE LAS PISTOLAS
 - III.10.- PROFUNDIDAD
 - III.11.- ORIENTACION
 - III.12.- PENETRACION Y TAMAÑO DEL AGUJERO
- IV. - ANALISIS DE LOS DISPAROS EN LA TERMINACION
 - IV.1.- RELACION DE PRODUCTIVIDAD
 - IV.2.- INDICE DE FLUJO
 - IV.3.- FACTOR DE DAMO
- V.- METODOS PARA AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD
 - V.1.- CAUSAS DE BAJA PRODUCTIVIDAD
 - V.2.- TECNICAS PARA AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD
- VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
 - NOMENCLATURA
 - REFERENCIAS.

CAPITULO I

INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como objetivo principal, el dar un breve análisis de la eficiencia de los disparos en la terminación de pozos petroleros, el cual es un factor que influye en gran medida para aprovechar al máximo la energía del yacimiento en la recuperación de los hidrocarburos. También se describen los diversos factores que afectan la operación de disparos en pozos, como algunas técnicas para aumentar la productividad de los mismos considerando la zona de los disparos. La operación eficiente de los disparos permitirá tener al pozo en óptimas condiciones para su explotación, racionalizando la extracción de los fluidos del yacimiento.

La producción óptima de pozos petroleros depende de muchos factores, tales como la correcta programación de las tuberías de revestimiento y de producción, de la penetración del pozo en el yacimiento, de la posición y longitud del intervalo productor, del tipo de yacimiento, diámetro de los disparos, de las estimulaciones efectuadas, del diámetro del estrangulador, de la longitud y diámetro de la línea de descarga y de la presión de separación. Por lo tanto, la eficiencia total en una terminación será el conjunto de las eficiencias de cada factor descrito.

Entre los factores mencionados está el de los disparos, que deben estar bien planeados en una operación de terminación para contribuir con la capacidad productiva de los pozos, con máxima eficiencia en la recuperación de los fluidos de interés. Para

planear una buena distribución de los disparos es necesario -
conocer las condiciones de operación ya que en ocasiones no se -
elige la pistola adecuada para su aplicación por no tomar medida
de las limitaciones de algunas herramientas. Las pruebas hechas a
las pistolas nos proporcionan información de mucha ayuda en lo -
que se refieren a las condiciones reales de operación y los re -
sultados nos derivan la elección de la pistola mas conveniente.

CAPITULO II

DISEÑO DE DISPAROS EN LA TERMINACION DE POZOS

En una terminación, efectuar la comunicación adecuada entre la formación y el interior del pozo (disparar) es la más importante de las operaciones ya que permite evaluar y optimizar la producción y la recuperación de cada horizonte de interés. Para efectuar dicha comunicación se requiere de las pistolas las cuales pueden ser de bala o del tipo cas usado "jet". La perforación de orificios ha sido aceptada por muchos años ya que permite la selección de la(s) zona(s) por producir.

II.1.- Tipos de Disparos.

a).-Disparos con Bala.

Las pistolas de bala de $3/2$ pg. de diámetro o mayores se utilizan por sus resultados en formaciones con resistencia a la compresión inferior a 6000 lb/pg^2 . La velocidad de la bala es aproximadamente de 3300 pies/seg., la bala pierde velocidad y energía cuando el claro (distancia entre la carga y la tubería de revestimiento) excede de 0.5 pg. Este claro, de 0.5 pg., es el que se utiliza al realizar pruebas comparativas. Se ha demostrado que con un claro igual a cero la penetración aumenta cerca del 15% sobre la obtenida con un claro de 0.5 pg.

La pérdida de penetración con un claro de 1 pg. es aproximadamente 25% de la penetración con un claro de 0.5 pg. y con un claro de 2 pg. la pérdida es de 30%. Al disparar se pueden originar residuos en los agujeros de la bala, de la formación o de la propia tubería, la eliminación en los orificios no es muy crítica si la bala lleva un instrumento en la punta, este dispositivo es más efectivo para eliminar dichos residuos que utilizar un claro igual a cero.

b).- Disparos a Chorro (Jet)

El proceso para disparar una pistola "Jet" ,es por medio de un detonador eléctrico;este inicia una reacción en cadena que detona sucesivamente el cordón explosivo, la carga intensificada de alta velocidad y finalmente el explosivo principal.La alta presión generada por el explosivo origina el flujo del recubrimiento metálico,separando sus capas interna y externa.El incremento continuo de la presión sobre el recubrimiento provoca la expulsión de partículas finas en forma de aguja a una velocidad aproximada de 30,000 pies/seg. en la punta, con una presión directa de 5 000 000 lb/pg² y una lateral de 100,000 lb/pg² .

La capa exterior del recubrimiento se colapsa para formar una corriente metálica que se mueve con una alta velocidad este recubrimiento exterior puede tener la forma de una "zanahoria", estando constituido por partículas del tamaño de la arena o mas pequeñas (Fig.II.1).Debido a la sensibilidad del proceso de disparos a chorro, por la casi perfecta secuencia de eventos que siguen al disparo del detonador hasta la formación del chorro,cualquier falla en el sistema puede causar su funcionamiento en forma deficiente.Esta puede generar un tamaño de orificio irregular, una penetración pobre o ninguna penetración;cabe señalar que las cargas tipo "Jet" son utilizadas en un 90% de los casos hoy en día.

Algunas causas del mal funcionamiento de las pistolas "Jet" son:

- Corriente o voltaje insuficiente al detonador.
- Detonador defectuoso o de baja calidad.
- Un cordón explosivo aplastado o torcido.
- Una carga intensificada pobremente empacada.
- El explosivo principal de baja calidad o mal empacado.
- El recubrimiento incorrectamente colocado o sin hacer contacto efectivo con el explosivo.

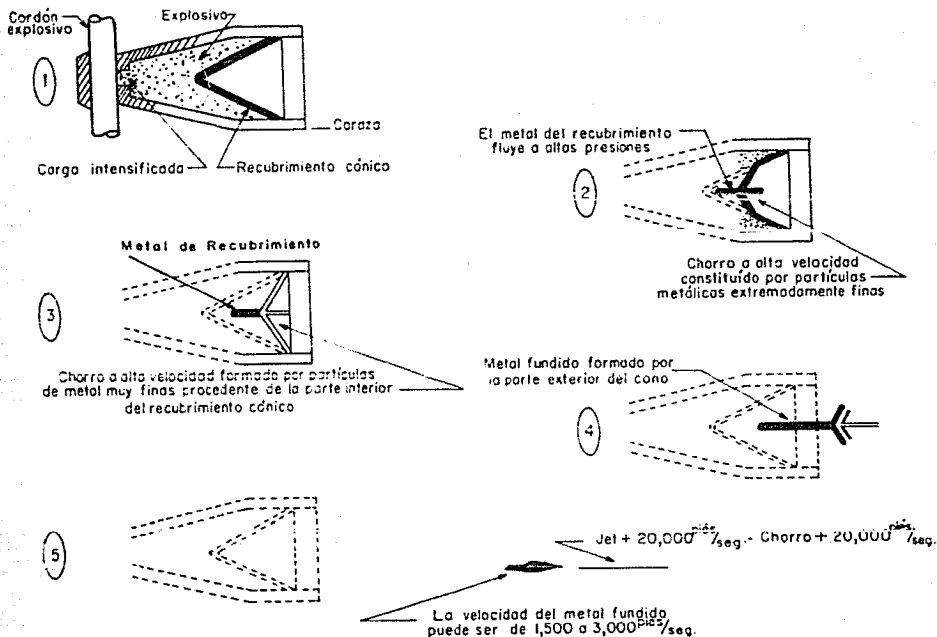


FIG. II. 1 PROCESO DE DISPARO A CHORRO USANDO UN RECUBRIMIENTO DE METAL SOLIDO.

- Humedad en las pistolas, cordón explosivo o cargas.
- Añejamiento a altas temperaturas del explosivo en el cordón.

Existen pistolas recuperables convencionales con tubo de acero, normalmente proporcionan una penetración adecuada, sin dañar la T.R.; estas pistolas tienen una presión atmosférica dentro del cargador y pueden correrse a través de la T.P. incluyendo las pistolas encapsuladas (desintegrables) con cargas giratorias; pistolas con cargas soportadas en alambre y con cargadores tubulares. La ventaja principal de éstas es correrse y recuperarse a través de la T.P. y dispararse con una presión diferencial hacia el pozo. Las pistolas a chorro con cargas giratorias proporcionan suficiente penetración en la mayoría de los casos, su desventaja principal es la manipulación mecánica requerida y la gran cantidad de residuos que quedan después de disparar. Las pistolas con cargas expuestas como las encapsuladas dilatan la T.R. y la pueden agrietar; también es difícil obtener un claro adecuado para conseguir una penetración efectiva. Las pistolas desechables evitan el desquebrajamiento de la T.R. y los residuos que se dejan dentro de los orificios, también eliminan el problema del claro si la pistola se coloca en posición adecuada pero afectando la penetración.

c).-Pistolas Hidráulicas.

Una acción cortante se obtiene lanzando a chorro un fluido cargado de arena a través de un orificio contra la T.R., la penetración se reduce en gran medida al aumentar la presión en el fondo del pozo; la penetración puede incrementarse apreciablemente adicionando N_2 a la corriente del fluido.

(7)

II.2.- Evaluación del Comportamiento de las Pistolas.

Antes de 1952 todas las evaluaciones de las pistolas se efectuaban mediante pruebas en el fondo del pozo o a presión y temperatura atmosféricas.

a).- Programa de Prueba.

En 1952 se desarrolló el primer procedimiento de prueba con fiable para simular los disparos a condiciones de fondo del pozo. El programa de prueba diseñado para simular las condiciones reales, incluye:

- 1.- Empleo de núcleos de la formación de diámetro relativamente grande, acondicionados para contener saturaciones de hidrocarburos y de agua intersticial específicos.
- 2.- Determinación de la permeabilidad efectiva de la formación antes y después de disparar.
- 3.- Aislamiento de la formación con la tubería de revestimiento y un material cementante adecuado.
- 4.- Disparos a través de la T.R., cemento y la formación con diversos fluidos en el pozo.
- 5.- Mantenimiento de la temperatura de la formación y de la presión del fondo del pozo, así como de la formación antes y después de disparar.
- 6.- Simulación de flujo hacia el pozo para limpiar los disparos.
- 7.- Evaluación de los resultados de la prueba.

(16)

Las pruebas de penetración reportadas por Oliphant y Farris demostraron que las pistolas de bala disponibles fueron capaces de penetrar hasta 2 1/2 pg. en placas de T.R. de gran espesor utilizadas en el experimento. Estas placas o blancos consistieron de T.R. de 5 1/2 pg. de diámetro exterior de 17 lb/pie, localizada en un tanque con aceite y cementada en una formación de arena representando la formación productora.

(7)

Pruebas realizadas por Huber, Allen y Abendroth, confirman estos resultados y presentaron información adicional sobre el mejoramiento de las pistolas de bala así como las "Jet". Estas pruebas fueron llevadas a cabo experimentalmente con cada tipo de pistola y un blanco de T.R. usando agua y bajos rangos de presión hasta de 4500 lb/pg². Los blancos consistieron de acero de 0.435 pg. de espesor, N-80, y un cemento con una resistencia a la compresión de 500 lb/pg². Se disparó una pistola de 4 pg. de diámetro exterior en un blanco individual para cada prueba. Se observó en los resultados de estas pruebas que el promedio de las penetraciones fueron de 7 1/2 pg. para cargas de las pistolas "Jet" y de 1 a 7 pg. para 5 de las 10 pistolas de bala. Como las penetraciones mostradas en otras pistolas de bala fueron menores de 1 pg. pruebas adicionales llevadas a cabo sobre los mismos blancos con pistolas de 4 pg. de diámetro exterior y mayores indicaron un incremento en la penetración, directamente proporcional al diámetro de la pistola.

b).- Equipo de Laboratorio.

El diagrama de la figura II.2 muestra el arreglo utilizado del equipo de prueba. Se observa que la cámara de pruebas contiene un cilindro interno o blanco con una muestra de formación. La cara superior de este blanco representa la pared de la T.R. y la pistola de prueba es una de bala o "Jet" de 4 pg. de diámetro exterior. Tanto el blanco como la pistola están en todo simulando una terminación en el pozo. El sistema de presión provee de las presiones requeridas a la muestra de formación (yacimientos) y al fluido del pozo bajo condiciones específicas de éste. La temperatura es suministrada por el sistema de circulación de agua caliente, manteniendo la temperatura en el fondo del pozo como la del yacimiento.

La cámara de prueba, constituida de acero de 16 pg. de diámetro exterior y 13 1/2 pg. de diámetro interior, tiene una longitud-

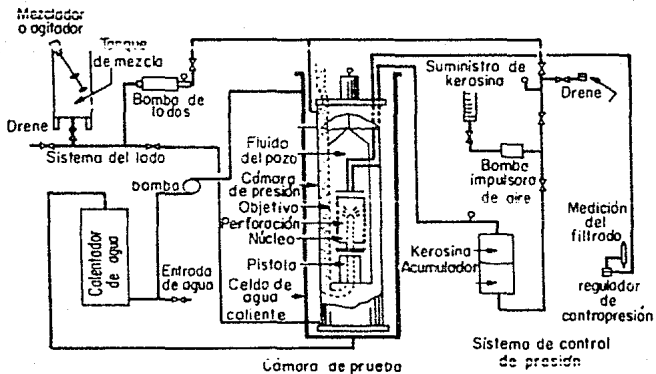


FIG. II. 2 ESQUEMA DEL EQUIPO UTILIZADO PARA PROBAR LAS PISTOLAS SIMULANDO LAS CONDICIONES DEL POZO.

de 100 pg., tiene dos cabezas removibles las cuales están equipadas con sellos.

El blanco consiste en una tubería de acero de 4 1/2 pg. de diámetro exterior, 16.6 lb/pie y 3/8 pg. de espesor para pistolas de bala y 1 pg. para pistolas "Jet".

La hidromita, un cemento compuesto de yeso y resina, fue utilizado por su buena adherencia y resistencia a la compresión, las muestras de formación son areniscas "BEREA", elegida por su disponibilidad y relativa uniformidad dichas muestras fueron de 3 - pg de diámetro exterior y de 8 pg. de longitud con corte paralelo al plano de la capa. La muestra es previamente saturada con agua de 30,000 ppm de sal y luego, desplazándola con kerosina - hasta obtener una saturación mínima de agua.

c). - Procedimiento de prueba.

El procedimiento de prueba fue planeado para un lodo de bajo PH. Las condiciones de prueba son con 250 md de permeabilidad de la formación, presión hidrostática de 2000 lb/pg², presión de formación de 1500 lb/pg², temperatura del pozo de 180 °F y el fluido - con las siguientes características:

ρ = 9.5 lb/gal.	Filtrado del lodo = 10.3 cc
% sólidos = 19.7	PH = 7.5
μ = 40 cp	

Las pistolas de pruebas representativas usadas son:

- Pistola de bala de 4 pg. de diámetro exterior.
- Pistola "Jet" con carga estándar de 21 gr.
- Pistola "Jet" con carga experimental de 29 gr.

La carga experimental fue diseñada para dar mayor diámetro - de orificio. Una vez armado el equipo, se procede a calentar la - cámara de pruebas hasta llegar a los 180 °F durante un periodo -

de 15 a 18 hrs; así se adquiere la temperatura del yacimiento, se dispara la pistola por medio de un dispositivo eléctrico, perforando T.R., cemento y la formación con una presión diferencial de 500 lb/pg² hacia el pozo, en esta fase, el lodo se filtra a los orificios y provoca que el yacimiento tienda a mantener la presión ocasionada por las diversas partículas que se generan en la operación. La fase de filtración es seguida por un período en el cual el pozo está controlado para meter el aparejo de producción diseñado, hablando de la terminación práctica: la cual no es muy conveniente ya que se daña severamente la formación.

Siguiendo a la fase de filtración la presión hidrostática del pozo es reducida lentamente, el propósito es determinar la presión diferencial requerida para iniciar el flujo a través de los disparos. Después se provoca que el filtrado y los residuos se remuevan simulando la producción inicial de pozo, obteniendo el flujo representativo en los orificios después de que el pozo ha sido lavado. Las muestras de acero se sacan de la cámara de pruebas, se inspeccionan visualmente, posteriormente se toman medidas y descripciones para ser fotografiados.

d).- Evaluación de los Datos.

El gasto a través de las muestras de formación con dimensiones dadas depende de la presión diferencial, de la viscosidad del fluido y de la permeabilidad efectiva del fluido de la formación. Cuando la muestra de formación tiene cementada la T.R. y es disparada, el gasto depende de las dimensiones del orificio. El gasto a través de las perforaciones taponadas medidas en volumen por unidad de tiempo, refleja la influencia combinada de estos factores. Apoyándose en la ecuación de Darcy podremos conocer el gasto para las condiciones específicas dadas.

El gasto a través de un orificio disparado, de diámetro y longitud determinados y el orificio disparado en condiciones reales (taponado), en un mismo tipo de formación, se consideró para saber la reducción del gasto causado por taponamiento y alteración de-

la formación alrededor de los orificios disparados. Los gastos son expresados en fracción decimal.

Estas fracciones o relaciones, son definidos como índices de flujo para cada orificio disparado (ideal y real). Estos son designados por q_c y q_p , respectivamente. Para conocer estos gastos se deberán de conocer las características de la formación y los fluidos y además aplicando la ecuación de Darcy.

La reducción del gasto, es por lo tanto, $q_c - q_p$ y el porcentaje de reducción, basado en el gasto por los disparos es:

$$\% \text{ reducción} = (1 - q_p/q_c) * 100$$

e).- Resultados de la Prueba.

Los resultados presentados fueron 22 pruebas realizadas en condiciones simuladas de una terminación. Los resultados están en función de:

- 1.- Las características físicas de los orificios, y
- 2.- Los gastos obtenidos y las reducciones en los gastos calculados.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las 3 pistolas usadas:

TIPO DE DISPARO	DIAM. ORIFICIO (pg.)	PENETRACION (pg.)		
		Acero y Cemento	Muestra de formación	Total
Bala de 4 pg D.E	1/2	1 1/8	1	2 1/8
Carga "Jet", 21 gr.	1/4	2	4 3/4	6 3/4
Carga "Jet", 29 gr.	1/2	2	3	5

Como se observa las cargas de 21 gr. guardan una penetración efectiva en la muestra a diferencia del disparo con bala que pierde penetración en la formación, el acero y el cemento son factores que afectan en gran medida la penetración de las balas. La obstrucción del orificio disparado con bala es relativamente dura y densa y consiste de arena y sólidos del lodo, pero además incluye una gran cantidad de residuos de las cargas.

Cuando se usa la carga de 21 gr. los residuos de la carga están constituyendo una obstrucción dura y densa.

Los datos de fujo calculados para cada prueba son:

Pistola Empleada	Bala	carga 21 gr	carga 29 gr.-
Número de pruebas.	10	9	3
Diámetro y long.del orificio. (pg.)	1/2 x 1	1/4 x 4 3/4	1/2 x 3
Indice de flujo ideal. (qc).	0.76	1.29	1.04
Indice de fujo real. (qp)	0.46	0.45	0.81
Reducción en el gasto.	39%	64%	22%

Si se toma como ejemplo la pistola de bala, estos indices significan que si la permeabilidad de la formación, la viscosidad del fluido y la presión diferencial a través de la muestra son tales que sea producido un volumen unitario de fluido por unidad de tiempo; por tanto si 0.76 u3/t son producidos a través de un orificio limpio, con las mismas dimensiones que uno taponado se producirán solamente 0.46 u3/t en condiciones reales. Esto corresponde a un gasto de 39% menos que aquel que debería ser obtenido sin taponamiento.

Aunque las pistolas son afectadas por las propiedades del acero y del cemento, el gasto a través de la perforación con carga de 21 gr. es aproximadamente el mismo que a través de las perforaciones con bala. Esto es indicado mediante un indice de flujo de 0.45 comparado al de 0.46 en condiciones reales.

La restricción promedio por unidad de longitud de penetración es mayor para la carga "Jet" de 21 gr. mostrado por el 64%, para la pistola de bala 39% y 22% para la experimental. Debe tomarse en cuenta que las cargas de 29 gr. son exclusivas de un diseño experimental. Ya que la caída de presión en los disparos es alta para 4 disparos/pie, la reducción del gasto (porcentaje) nos da una idea de la magnitud de la efectividad de la pistola bajo

condiciones particulares del pozo.

(2)

II.3.- Consideraciones Para Optimizar los Disparos.

El cálculo teórico demuestra la importancia de obtener máxi -
mas penetraciones en la formación, dado que una variación mínima -
de este parámetro se refleja en el índice de productividad de -
cada pozo.

(17)

Thompson encontró que para una pistola dada, la penetración -
puede determinarse relacionándola con la resistencia a la compresión de la formación mediante las siguientes expresiones:

Para pistolas "Jet":

$$Pe = Pb \times 10^{(3.7 (10^{-5}) (Cb - C))} \text{----- II.1 (*)}$$

Para pistolas de bala:

$$Pe = Pb (Cb/C)^{1.15} \text{----- II.2 (*)}$$

a).- Condiciones Requeridas.

Con el fin de efectuar un disparo en óptimas condiciones, se -
recomienda lo siguiente:

- 1.- Seleccionar la carga adecuada, considerando la resistencia a la compresión de la formación.
- 2.- Tratar de minimizar el claro, para esto elegir la pistola que no proporcione valores críticos.
- 3.- En calizas y dolomías es recomendable disparar en seno de ácido clorhídrico o acético.

4.- No se recomienda disparar en seno de ácido si se tiene una columna de lodo sobre éste.

5.- Si se usan fluidos de control sucios se debe de tomar en cuenta que:

- Es muy difícil remover los tapones de los orificios, especialmente cuando se usa lodo bentonítico.
- El ácido a veces no disuelve eficientemente los tapones creados.

6.- Los disparos taponados pueden provocar :

- Bajo índice de productividad.
- Disminución de la eficiencia de barrido en pozos inyectoras.
- Defectos en cementaciones forzadas defectuosas.

7.- Un mal diseño puede aumentar la posibilidad de confinación y digitación.

8.- El método mas usado para disparar, consiste en usar fluidos limpios (AD, Diesel), libres de sólidos dañinos y manteniendo una presión diferencial hacia el pozo, normalmente de 200 a 500 lb/pq².

b).- Selección del Fluido de Control.

Para seleccionar el fluido de control en una terminación además de economía y disponibilidad se deben de cubrir los siguientes requisitos:

- Densidad.- Que sea suficiente para proporcionar una carga -

hidrostática que contrarreste la presión del yacimiento.

- Contenido de sólidos.- Debe ser esencialmente limpio, no debe contenerlos en suspensión, de manera que evite el taponamiento del disparo o daño a la formación.
- Filtrado.- Un bajo filtrado previene el hinchamiento de las arcillas.
- Composición.- Que sus elementos sean solubles en ácido clorhídrico (químicamente estable para que no reaccione con la formación expuesta). Y que no contenga productos corrosivos que dañen las tuberías y los tanques de almacenamiento.
- Transportación.- De fácil maniobrabilidad y que no requiera cuidados especiales.

La tabla II.1, muestra los fluidos más utilizados en la actualidad así como las condiciones más relevantes.

La tabla II.2, muestra los resultados de pruebas de índice de flujo del pozo, usando pistolas "Jet" y de bala, disparadas en el seno de varios fluidos.

Como se muestra en la figura II.3, los disparos a chorro penetran más que las balas en una formación dura. Sin embargo, algunas balas de pistolas especiales pueden penetrar más que algunos disparos a chorro en formaciones de baja resistencia a la compresión, particularmente si las pistolas se disparan con un claro igual a cero.

La figura II.4 muestra que la penetración de las pistolas "Jet", bala o hidráulicas se reduce al aumentar la resistencia a la compresión de la formación; la penetración declina a un ritmo-

Tabla II.1.- Fluidos de Control.

FLUIDO	DENSIDAD (gr/cm3)	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Lodo Base Agua	1.08 - 1.75	Buena densidad pozos con alta presión. Bajo costo.	Tapona los disparos. El filtrado contiene arcillas, finas, dis- persantes, así como una alta concentra- ción de sólidos que tapan la formación.
Lodo base Aceite	0.85	Daño mínimo a la formación, aún en pozos de alta presión.	Alto costo.
Acidos Inhibidos	--	No daña las formaciones, aumenta la per- meabilidad.	Corrosivos Costo.
Nitrogeno	0.00099 0.809 (S.G.)	No tóxico Gas inerte Baja solubilidad en líquidos.	Costo.
Fluidos de baja densi- dad.	0.83-0.87	Todos sus compo- nentes son solu- bles en Acido clorhídrico. Buena disponibilidad.	Pueden romper su emulsión en ausencia de electrolitos ade- cuados.
Aceite Crudo	0.86	No daña la for- mación. Minimiza la corrosión. Buena densidad, si se usa en po- zos con baja presión.	Puede taponar los disparos con acumu- lación de parafinas y asfaltenos. Nece- sita análisis de con- tenido de sólidos. Puede disolver gas de la formación.

Tabla II.1.-Fluidos de Control. (Continuación)

FLUIDO	DENSIDAD(gr/cm3)	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Diesel	0.86	Idealmente limpio Buena densidad.No daña la formación. No forma emulsiones estables.Ayuda a la degradación de para- finas y asfaltenos. No cambia la mojabi- lidad de la roca.	Flamable.
Agua salada de formación.	1.08-1.12	Bajo costo. Daño mínimo a la formación.	Aún filtrada puede contener - surfactantes, los cuales crean pro- blemas de -- emulsiones.
Agua de mar	1.12	Buena densidad. Gran disponibi- lidad.Bajo costo.	Altas temperatu- ras provocan -- cristalización y precipitación de sal.Gran cantidad de sólidos.
Salmueras	1.01-1.60	Son recuperables. Daño mínimo a la formación. Buena densidad.	Provocan -- corrosión en el equipo. No degrada para- finas y asfalte- nos.Pueden alte- rar la mojabili- dad de la forma- ción.

Tabla II.2.- Resultados de Pruebas de Índice de Flujo.

Tipo de Carga.	Fluido	Penetración (pg)	Diámetro (pg)	P. Inic. (lb/pg ²)	IF	Observaciones
JET 10 lb/gal. 200 lb/pg ² hacia el pozo.	Agua salada	6 1/2 - 8	1/4 - 1/2	0	1.0	Limpio totalmente después del flujo.
500 lb/pg ² hacia la formación.	Agua salada	6 1/2 - 8	1/4 - 1/2	0	0.61	Parcialmente Tapado con residuos de carga y arena.
10 lb/gal. 500 lb/pg ² hacia la formación.	Lodo Cáustico	6 1/2 - 8	1/4 - 1/2	30	0.55	Parcialmente Tapado con lodo y resi- duos de la carga.
16 lb/gal. 500 lb/pg ² hacia la formación.	Lodo cálcico.	6 1/2 - 8	1/4 - 1/2	100	0.41	Parcialmente Tapado con lodo y resi- duos de la carga.
BALA 10 lb/gal. 500 lb/pg ² hacia la formación.	Agua salada	3 - 3 1/2	1/2	0	0.61	Limpio, par- cialmente tapado con arena.
10 lb/gal. 500 lb/pg ² hacia la	Lodo cáustico	3 - 3 1/2	1/2	1/2	0.53	Parcialmente Tapado con lodo y arena

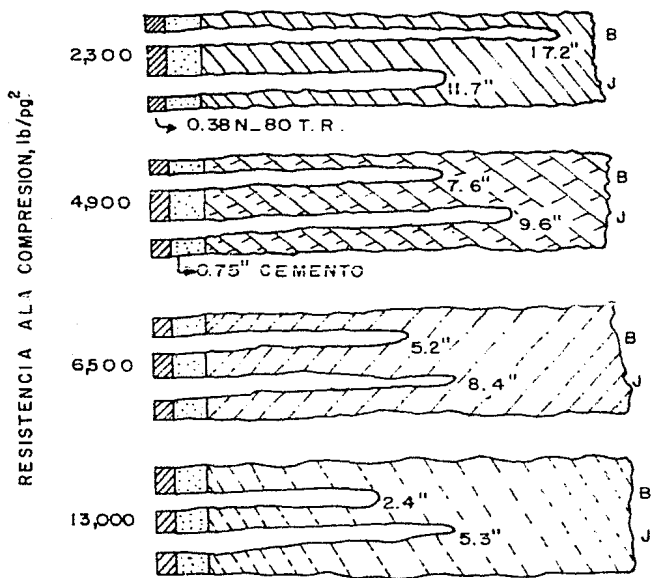


FIG. II 3 EFECTO DE LA RESISTENCIA DE LA FORMACION A LA COMPRESION SOBRE LA EFICIENCIA Y PENETRACION DE PISTOLAS DE BALA Y CHORRO (JET)

mayor a medida que aumenta la resistencia de la roca, cuando se usa pistola de bala.

c).- Selección de la Pistola.

La selección de la pistola depende de las condiciones que se tengan en el pozo y de las características deseadas del orificio. Se afirma que es preferible la penetración a chorro que la convencional con bala cuando el objetivo perseguido es la penetración máxima y fractura mínima del cemento alrededor de la tubería de ademe. En formaciones consolidadas se cree que el uso de las pistolas de tipo bala produce un cierto grado de compresión de material en el paso de las balas. Debido a que se puede disparar una carga a profundidades premeditadas, la pistola de bala tiene mayor selectividad que la pistola de carga dirigida, la cual está diseñada para disparar muchas cargas simultáneamente intervalos uniformes. Otra ventaja de este tipo de pistolas es el bajo costo y que no deja residuos en el pozo.

II.4.- Tipos de Explosivos

Se usan tres tipos de explosivos en los disparos a pozos:

- Nitroglicerina líquida.
- Gelatina explosiva.
- Varias clases de dinamitas.

De éstas se utiliza con más frecuencia la nitroglicerina por su disponibilidad, aún cuando se obtienen resultados satisfactorios con la gelatina explosiva. La nitroglicerina, se prepara tratando glicerina con ácido nítrico; cada 450 gr. de nitroglicerina dan a explotar 4.47 m³ de gases permanentes desarrollando una fuerza rompiente cuando están confinados generando una temperatura hasta de 3471 °C y la velocidad de propagación es de

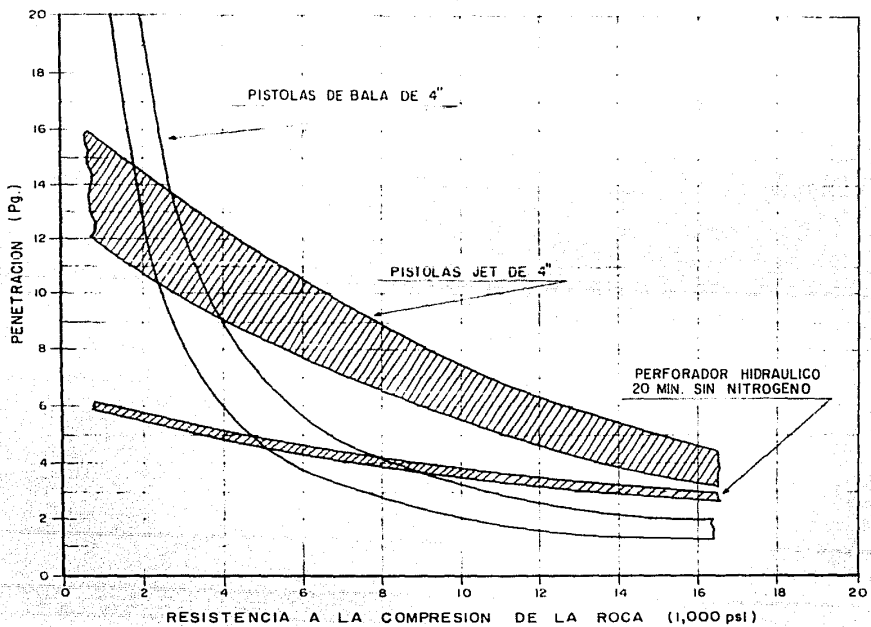


FIG.II.4. EFECTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION SOBRE LA PENETRACION DE LOS DISPAROS

719 m/seg. El explosivo puede usarse en una sola carga dependiendo de la naturaleza y espesor de la formación que se va a disparar. Las cápsulas con el explosivo se colocan de extremo a extremo en el intervalo que se va a disparar. en la parte superior del explosivo se coloca un dispositivo detonante, la carga se empaca con arena o cemento.

No existe una forma precisa para determinar la cantidad de explosivos que produzcan los mejores resultados en un conjunto dado de condiciones, pero se sabe que los resultados satisfactorios se logran con frecuencia en rocas frágiles como las calizas con 12 a 16 litros de explosivo por metro de intervalo que se va a disparar. Las rocas dolomíticas y las areniscas bien cementadas son menos frágiles y requieren mas explosivo que las calizas de 20 ó 30 litros por metro.

El explosivo se puede detonar por varios métodos:

- 1.- Un dispositivo de disparo montado en la parte superior de las cápsulas, equipada con un perno de disparo, sobre el cual cae un diablo (barra de hierro).
- 2.- El barrilete detonador que consiste de un cubo metálico que contiene dinamita o gelatina explosiva, que consta de una cápsula detonadora y un fusible lleno con arena. El fusible se enciende y el detonador se deja caer desde la superficie.
- 3.- El detonador de tope que consiste de un tubo lleno de nitroglicerina y equipado con una cabeza de disparo ubicado en la parte superior de detonador. Al bajar la pistola a la posición de disparos el detonador descansa sobre la carga y al cesar la tensión en el cable, desciende la cabeza de disparo y detona la carga.
- 4.- El detonador eléctrico que contiene dinamita o gelatina explosiva que consta de una cápsula eléctrica fijada en

un cable doble de disparos, que sirve para transmitir la corriente eléctrica desde el circuito de fuerza en la superficie.

- 5.- Una bomba de tiempo montada en una caja a prueba de humedad y alta presión, la cual contiene una carga de dinamita, 2 cápsulas de disparo y encendedores eléctricos, una batería de pilas secas que suministra la corriente eléctrica y el cronómetro de control.

Debido al carácter sensible de la Nitroglicerina se deben tomar todas las precauciones necesarias en su manejo para evitar la explosión accidental. El cable de acero del torpedo y el carrete junto con los frenos de éste, usados para bajar las cargas dentro del pozo deben inspeccionarse cuidadosamente para estar seguros de que están en condiciones de operación antes de bajarlos explosivos. Se debe tomar con seguridad la profundidad de la pistola que se está introduciendo al pozo para evitar disparar zonas sin interés, para esto es necesario conocer la elevación de la mesa rotaria que es el punto desde el cual se empieza a medir la profundidad.

(3, 12)

II.5.- Diseño de Disparos.

Para la elección de los disparos en la terminación de un pozo se deben de considerar las características de este, antes de efectuar la operación, ya que las condiciones del pozo (Presión, temperatura, estado mecánico, etc.) constituyen una limitante para su aplicación práctica, además de considerar la efectividad y el aspecto económico.

En la terminación de un pozo, con el fin de obtener una eficiencia máxima posible en la operación de los disparos, es necesario considerar las dos siguientes características como primer paso para elegir los disparos:

- Diferencial de presión entre la formación y el pozo, en la-

operación.

-Tamaño de pistola compatible con las condiciones del pozo a utilizar.

II.5.1.- Elección de la Terminación.

El pozo se puede terminar de 3 formas prácticas (Fig. II.5) - que son:

a).- Disparos con Diferencial de Presión Positiva.

Esta opción es relativamente desventajosa, a pesar de ofrecer una buena penetración, ya que no permite efectuar una limpieza - inmediata de las perforaciones. En este tipo de terminación no se tiene inicialmente tubería de producción, por lo tanto se puede - utilizar una pistola de diámetro grande. La presión hidrostática en el pozo es mayor que la presión de la formación.

b).- Disparos con Diferencial de Presión Negativa.

Esta opción es muy usada en México y se practica generalmente con pistolas de diámetro reducido del tipo "ENERJET" y "SCALLOP", las cuales permiten una eficiencia razonable en la penetración y diámetro de orificio. En este tipo de terminación existe aparejo de producción que restringe el diámetro de la pistola (general - mente 1 11/16 o 1 9/16 pg.). Se ha demostrado que una diferen - cial de 200 lb/pg es una medida estándar para iniciar el flujo, pero esto depende principalmente de la presión del yacimiento.

c).- Disparos con Pistolas Bajadas con Aparejo de Producción.

Esta opción permite combinar las ventajas de la presión dife - rencial, tamaño de la pistola y densidad de los disparos (hasta 12 disparos/pie). Sin embargo se requiere de un procedimiento - especial para su aplicación, el cual no es conveniente en algunos casos.

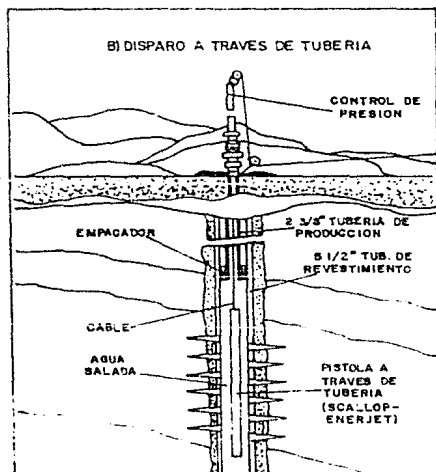
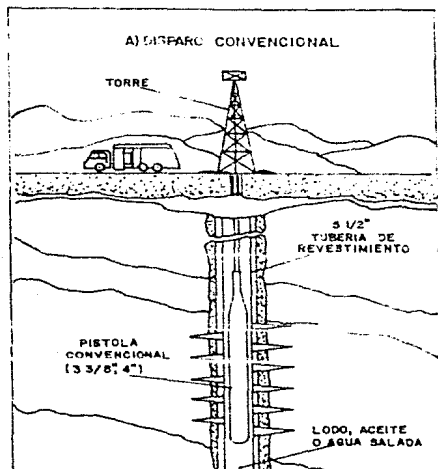


FIG. II.5 OPCIONES DE OPERACION DE DISPAROS SEGUN LA CONFIGURACION DE TUBERIAS.

II.5.2.- Elección de la Pistola.

Una vez determinada la terminación que mas se ajuste a las condiciones particulares de cada pozo, se determinará el tipo de pistola en cuanto a:

a).- Diámetro de la pistola.

Se debe seleccionar el diámetro máximo compatible con el diámetro de la tubería por disparar y la de producción; con el objetivo de aprovechar la fase múltiple (disparos en varias direcciones).

b).- Tipo de Pistola.

Las pistolas de tipo convencional bajadas por cable, tienen diámetros comunes de 3 3/8 y 4 pg., con una densidad no mayor de 4 cargas/pie. Este tipo de pistolas garantiza eficiencia y seguridad, aunque no permite conciliar los requerimientos de diferencial de presión negativa, es decir se usa en terminaciones de tipo convencional. Las limitaciones son:

- Temperatura de 300 °F (149 °C) y con 2000 lb/pg². Para pistolas estándar.
- Temperatura de 470 °F (243 °C) y 2500 lb/pg². Para pistolas de alta temperatura.

Las pistolas de alta densidad (12 cargas/pie), se pueden bajar con cable o con el aparejo de producción; este tipo se utiliza en las terminaciones convencionales, para obtener altas productividades.

Pistola SCALLOP.

Este diseño, cuenta con un tubo portador de diámetro reducido-

que permite el paso en la T.F. El rendimiento de las cargas es menor en razón al tamaño de las mismas. Estas pistolas se usan en pozos con terminaciones con diferencial negativa, es decir que exista un flujo inmediato hacia el pozo después de disparar. Este tipo ofrece una fase de disparos de 0 a 180 grados y es recomendable en pozos profundos y con altas temperaturas (470 °F, - 2500 lb/pg²).

Pistola ENERJET.

Son pistolas semidesechables, esto significa que los estopos están expuestas directamente a los efectos de presión y temperatura del pozo, las cargas se encuentran colocadas sobre una lámina de metal semi-flexible que permite el paso a través de la T.F. siendo el tamaño de las cargas mayor que en el diseño SCALLOP, y se obtiene así mayor penetración. Sin embargo, este sistema ofrece una sola fase de disparos y su uso se limita a temperaturas menores de 340 °F.

II.5.3.- Elección de la Densidad de Disparos.

Generalmente las pistolas están diseñadas para densidades de 4 disparos/pie; Sin embargo, es posible mayor densidad usando pistolas especiales siempre y cuando el estado de la tubería lo permita. Un incremento en la cantidad de orificios/pie, produce a su vez un aumento notable en la relación de productividad.

La densidad de los disparos depende de:

- Tipo de roca (Porosidad, Permeabilidad).
- Espesor de la formación.
- Posición estructural (Tipo de yacimiento).
- Resistencia de la T.R.
- Producción requerida.

En la tabla II.3 se observan algunas características de las pistolas disponibles en el mercado y sus especificaciones para uso en el campo.

	DIAMETRO	T I P O	DIAM. TR.	TEMP.	ORIFICIO		PENETRACION ^m	
	Pg.				Pg.	°F	Pg.	Cm.
SCHLUMBERGER	1 3/8	SCALLOP	4 1/2	340	0.23	0.58	4.28	10.87
	1 9/16	SCALLOP	5 Y 4 1/2	340	0.29	0.74	5.46	13.87
	2	SCALLOP	4 1/2	340	0.34	0.86	8.83	22.43
	1 11/16	ENER-JET	5	340	0.34	0.86	8.11	20.60
	2 1/8	ENER-JET	5	340	0.36	0.91	11.00	27.94
	3 3/8	ULTRA-JET	4 1/2	340	0.35	0.89	13.08	33.22
	1 11/16	SCALLOP	4 1/2	470	0.25	0.63	4.03	10.24
2 1/8	SCALLOP	4 1/2	470	0.33	0.84	7.40	18.80	

M & CULLOUGH	2 1/8	TORNADO-JET	4 1/2	325	0.49	1.24	7.54	19.15
	2 1/8	NO-LINE	4 1/2	325	0.36	0.91	8.75	22.22
	1 9/16	NO-LINE	4 1/2	350	0.29	0.74	5.60	14.22
	2 1/8	OMEGA-1	4 1/2	350	0.36	0.91	8.61	21.87
	2 1/8	DINA-CAP	5	350	0.51	1.29	10.39	26.39
	3 1/8	OMEGA-JET	4 1/2	350	0.39	0.99	9.77	24.82

TABLA II.3. ESPECIFICACIONES DE PISTOLAS PARA POZOS PETROLEROS

* TR + CEMENTO + ARENISCA

CAPITULO III

FACTORES QUE AFECTAN LA OPERACION DE LOS DISPAROS

Para realizar la operación de los disparos en forma óptima se deben de tomar en cuenta los siguientes parámetros o factores :

III.1 Taponamiento de los Disparos.

El taponamiento de los disparos se debe a los residuos que--- dejan las cargas y partículas de roca, producto del disparo efectuado. Mediante el empleo de recubrimientos cónicos elaborados--- con metal pulverizado se provoca un taponamiento parcial o total de los orificios. los residuos mayores han podido ser eliminados utilizando dispositivos que eviten el desprendimiento excesivo--- de partículas finas que dañan la formación.

Los disparos tienden a llenarse de sólidos de roca triturada--- de la formación, del lodo y residuos de las cargas. Estos tapones--- son difíciles de remover por el contraflujo ya que la presencia--- de partículas compactas reduce la posibilidad de limpiar los--- disparos. Los fluidos de alta densidad mezclados con sólidos--- provocan la formación de tapones densos en los orificios.

La presión diferencial requerido para iniciar el flujo de la--- formación al pozo varia por lo general de 100 a 500 lb/pg². Cuan--- do se abren intervalos que requieren una presión diferencial---- baja, el flujo a través de los disparos dificulta la creación de--- la caída de presión requerida para abrir mas disparos. En forma--- ciones estratificadas como las constituidas por secuencias de--- lutita y arena, un gran número de disparos pueden permanecer---- taponados evitando que se drenen algunas zonas específicas. Cuan--- do están parcialmente obturadas una o varias zonas en un yaci--- miento esto ocasiona que las pruebas de formación, las de --- producción y estimación del índice de productividad, proporcionan

la evaluación errónea del daño a la formación y la productividad del pozo.

En arenas no consolidadas las herramientas de sondeo y las lavadoras de los disparos han sido usadas con éxito para limpiar los disparos. Si los orificios en pozos terminados en arenas no pueden limpiarse con este equipo especial es conveniente limpiar el intervalo con diesel o agua limpia utilizando bolas selladoras o si es posible ampliando el intervalo disparado.

Los tapones de sólidos (lodo) son más difíciles de remover en otro tipo de formaciones que en rocas carbonatadas, debido a que al entrar el ácido en una estimulación, generalmente éste disuelve la roca pero deja el lodo en la zona de los disparos. En pozos terminados en formaciones de calizas y dolomías se recomienda disparar en seno de ácido, con una presión diferencial a favor de la formación; sin embargo, los disparos en seno de diesel o agua tratada, con presión diferencial hacia el pozo son muy satisfactorios. El taponamiento de los disparos con parafina, asfaltos o incrustaciones, es un gran problema en muchas áreas; los tratamientos con solventes, generalmente remueven con gran eficacia estos tapones. Si los disparos están obstruidos con incrustaciones solubles o insolubles es aconsejable redisparar el intervalo y tratar con ácido u otros productos químicos.

III.2.- Efecto de la Presión Diferencial.

Cuando se dispara en seno de lodo con una presión diferencial hacia la formación, los disparos se llenan de partículas sólidas de lodo, de la formación y residuos de las propias cargas. Los tapones de este tipo son muy difíciles de remover produciendo obstrucción permanente y reduciendo la productividad del pozo.

Aún cuando se dispare en fluidos limpios tales como el diesel o el agua, las partículas procedentes de las arcillas, residuos de las cargas o de otro tipo pueden originar un daño profundo a la formación. Las formaciones con permeabilidad de 250 md o mayores-

permiten que partículas del tamaño de las arcillas se desplacen hacia los poros de la formación obturando los mismos.

En formaciones carbonatadas es frecuente obtener altas productividades de los pozos y bajas presiones de fracturamiento de la formación, cuando se dispara en seno de ácido clorhídrico o ácido acético con presión diferencial pequeña hacia la formación, debido al bajo ritmo de reacción del ácido acético con las formaciones calizas. Generalmente es conveniente dejar el ácido frente a los disparos por varias horas después de disparar. Cuando los disparos se efectúan con una presión diferencial hacia el pozo y con fluidos limpios, se ayuda a obtener una limpieza efectiva de los disparos. Este es un método para disparar en formaciones de arenisca y carbonatadas.

III.3- Efecto de la Resistencia a la Compresión.

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

III.4.- Efecto del Uso de Fluidos Limpios.

Si la pistola proporciona un tamaño y penetración adecuados del orificio bajo ciertas condiciones del pozo, la productividad de éste se optimizará disparando en seno de diesel o agua limpia manteniendo una presión diferencial hacia el pozo al disparar.

III.5.- Densidad de Disparos.

La densidad de los disparos depende del ritmo de producción requerido, de la permeabilidad de la formación y del espesor del intervalo productor. Para pozos con alta producción, la densidad de los disparos debe permitir el gasto deseado con una caída de presión en condiciones óptimas. En los pozos que serán fractura -

dos, los disparos que se planean deberan permitir la comunicacion con todas las zonas deseadas para obtener resultados favorables. Para operaciones de empacamiento con grava se prefieren de 4 a 8 disparos/pie de 0.75 pg. de diametro.

Los disparos de 4 ó mas cargas por pie, en tuberias de revestimiento de diametro pequeño y de baja resistencia, ocasionan que las pistolas con cargas expuestas fracturen la T.R. y cemento - siendo necesario efectuar cementaciones forzadas posteriores para evitar la producción indeseable de gas o agua.

III.6.- Costo.

El costo de los disparos varia ,sin embargo, son bajos cuando se usan bajas densidades de disparos.

apreciable en las intervenciones cuando se tienen zonas productoras separadas. El empleo de pistolas que se corren a través de la I.P. permite el ahorro de tiempo si la tubería de producción está abierta en su extremo inferior y situada arriba de la zona de interés. En los pozos recién terminados la tubería de producción puede colocarse después de cementar la última TR, posteriormente se puede disparar a través de la T.P. sin tener un equipo convencional de terminación, de esta forma no se carga tiempo de operación por equipo.

III.7.- Limitación de Presión y Temperatura.

Existen especificaciones sobre la operación de cualquier tipo de pistolas; las presiones en el fondo del pozo pueden limitar el uso de algunas con cargas expuestas. Sin embargo, pocos pozos son disparados cuando la presión afecta la operación.

Como regla general, las cargas para alta temperatura tienden a fallar con mas facilidad ya que:

- a).-La mayoría de las cargas para alta temperatura proporcionan poca penetración.
- b).-El explosivo de alta temperatura es poco sensible, originando fallas en la detonación.
- c).-Las cargas para alta temperatura son más costosas.
- d).-Existen pocas cargas para seleccionar.

III.9.- Control del Claro de las Pistolas.

Un claro excesivo con cualquier pistola "Jet", ocasiona una penetración y tamaño de agujero pobre y en forma irregular. Generalmente las pistolas de bala deberán dispararse con un claro de 0.5 pg., para evitar una pérdida apreciable en la penetración. Las pistolas "Jet" convencionales de diámetro grande comúnmente presentan poco problema, excepto cuando se disparan en tuberías de revestimiento de 9 5/8 pg. de diámetro o mayores. Dependiendo del diseño de las pistolas y las cargas, generalmente se obtiene una máxima penetración y tamaño del agujero con claros de 0 a 0.5 pg cuando se usan pistolas "Jet". Con algunas pistolas de cargador tubular se han observado cambios notables en el tamaño de los disparos al aumentar el claro de cero a 2 pg. Cuando los claros son mayores de 2 pg., es conveniente descentralizar y orientar la dirección de los disparos. La centralización de las pistolas Jet no es recomendable, ya que éstas son diseñadas para dispararse con un claro igual a cero.

III.10.- Profundidad.

El método adecuado para asegurar un control preciso de la profundidad consiste en correr un registro localizador de coples (CCL), para conocer la profundidad de los coples en la TR, respecto a las zonas por disparar; así se afina la posición exacta del-

intervalo de interés (comparándolo con otro registro en agujero - descubierto).

III.11.- Orientación.

Los disparos orientados se requieren cuando se usan dos tuberías de producción o en terminaciones múltiples en las que se dispara la T.F., cuando están juntas varias tuberías.

Se dispone de dispositivos mecánicos, radioactivos y electromagnéticos para orientar las pistolas. Cuando se usan pistolas orientadas en terminaciones múltiples, se debe usar pistolas con cargadores tubulares de pared delgada. Las pistolas encapsuladas pueden provocar el colapso de alguna tubería de producción adyacente.

III.12.- Penetración y Tamaño del Orificio.

Al diseñar cualquier carga puede obtenerse una máxima penetración aunque sacrificando el diámetro del agujero. Cuando se perforan TR's de alta resistencia, probablemente se requiera una penetración máxima, aún cuando el tamaño del orificio sea reducido. Sin embargo, en situaciones normales, debido a la dificultad de remover el lodo, los residuos de las cargas, la arena y partículas diversas se recomienda tener un diámetro y longitud uniforme.

CAPITULO IV

(15)

ANALISIS Y EVALUACION DE LOS DISPAROS EN LA TERMINACION

En pozos con tubería de revestimiento, los fluidos de la formación fluyen a través de las perforaciones realizadas; por lo tanto, el gasto de producción que un pozo pueda aportar dependerá en gran parte de la efectividad de los disparos.

Sin embargo, durante el desarrollo normal de la perforación - las formaciones son dañadas (reducción de la permeabilidad original) por la invasión del fluido de control hacia el interior de las mismas. Generalmente la permeabilidad en la vecindad del pozo es reducida sustancialmente como resultado de operaciones - diversas (Figura IV.1.A); esta reducción de la permeabilidad causa una caída de presión adicional a la que se obtendría en el caso ideal (sin daño) en el que la permeabilidad fuera k_e .

Esta caída de presión puede calcularse con la ecuación de Darcy para fluidos incompresibles con suficiente exactitud:

$$\Delta P_s = \frac{q \mu \ln(r_s/r_w)}{2\pi K_s h} - \frac{q \mu \ln(r_s/r_w)}{2\pi K_e h} \quad \text{----- IV.1}$$

Donde el primer término representa la caída de presión en un pozo con daño y el segundo, la caída de presión en un pozo sin él, entonces:

$$\Delta P_{\text{es}} = \frac{h}{2\pi r^3 n} \left(\frac{N_e - N_0}{N_0} \right) \text{ INTRINSICO} \quad \text{----- 11.2}$$

El signo de la cifra de presión indica el signo (será positivo o negativo) y sea que la permeabilidad sea menor o mayor que la original, respectivamente.

Con el fin de evaluar la eficiencia de los disparos considerando este factor se realizaron estudios en modelos de laboratorio con buenos resultados de productividad en pozos con T.R. y en agujeros de explotación los experimentos a evaluar son: El índice de flujo y la relación de productividad.

La prueba del índice de flujo es un medio de determinación de la capacidad relativa de flujo en las perforaciones en un sistema lineal la relación de productividad es derivada de condiciones simultáneas en la operación de los disparos.

4)

El método que se ha usado utiliza un método llamado del elemento finito el cual determina las condiciones de flujo en una cuarta línea de todo elacimiento (para flujo lineal) este modelo se le determina una expresión matemática la cual se le da solución mediante procedimientos matriciales y que arroja resultados de velocidad y dirección de flujo, presión en cada punto o nodo de la muestra de roca. Dicho modelo matemático es un elemento de volumen unitario que tiene características para simular las condiciones de los disparos.

IV.1.- Relación de Productividad.

La relación de productividad está representada en forma de un factor de corrección (relacional) que tiene como función del re-

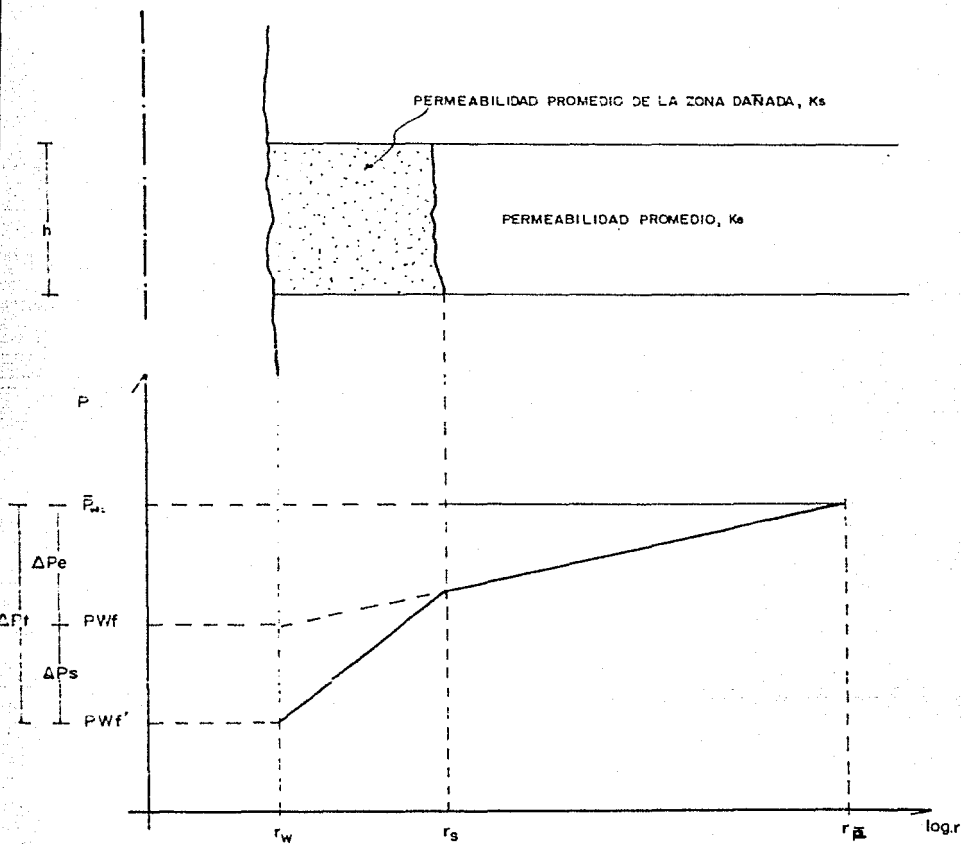


FIG. IV. LA. DIAGRAMA DE P VS. $\log.r$ PARA FLUJO RADIAL EN UN POZO CON DAÑO.

dio del pozo (r_w), del diámetro de las perforaciones (d), de la penetración (a), del intervalo disparado (h) y del número de disparos por plano (m).

Las 5 variables antes mencionadas se definen en términos adimensionales como sigue:

$$d_0 = \frac{d}{r_w} \sqrt{K_r/K_z} \quad \text{----- IV.3}$$

$$s_0 = \frac{a}{r_w} \quad \text{----- IV.4}$$

$$h_0 = \frac{h}{r_w} \sqrt{K_r/K_z} \quad \text{----- IV.5}$$

$$m = 360/\theta \quad \text{----- IV.6}$$

Los valores calculados de " s_0 " son graficados en función de las variables descritas (Figuras IV.1 a IV.9). Se relacionamos de esta manera el daño adimensional con la relación de productividad mediante la siguiente expresión.

$$[q_p/q_r] = \frac{\ln (r_e/r_w)}{\ln (r_e/r_w) + s_0} \quad \text{----- IV.7}$$

El efecto del diámetro de la perforación, d_p , sobre la productividad del pozo ha sido muy discutido ya que este factor como la densidad de los disparos, penetración, etc. influyen mucho en la productividad del pozo.

La relación de productividad es graficada en función de la penetración de los disparos, (Figura IV.10). La curva muestra que

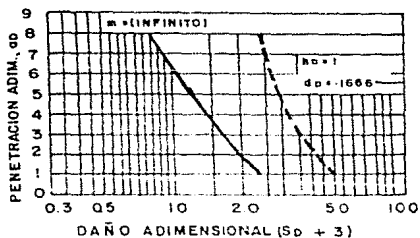


FIG. IV. 1

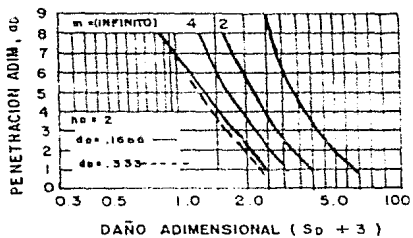


FIG. IV. 2

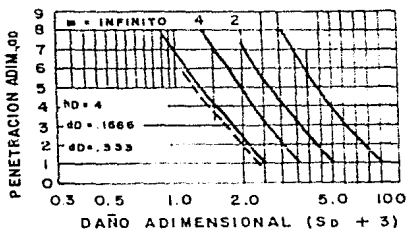
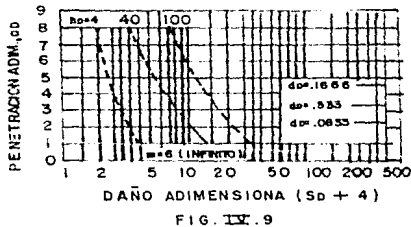
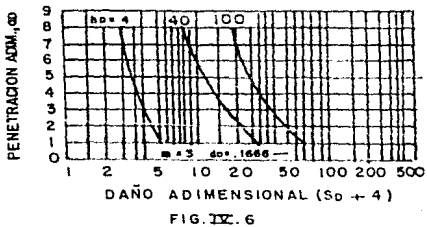
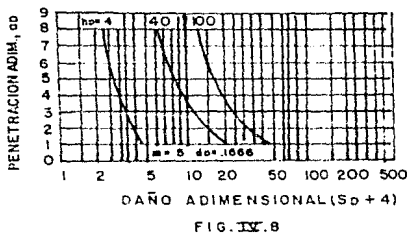
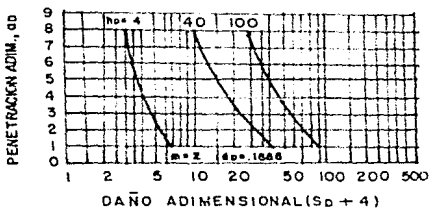
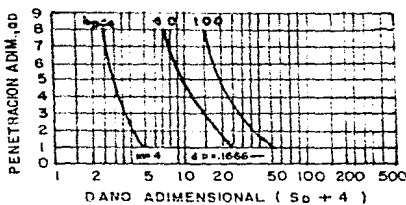
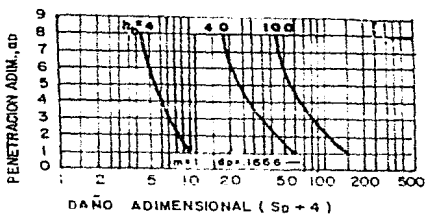


FIG. IV. 3



la penetración adicional aumenta la relación de productividad. -

Como ejemplo, si la penetración es de 2 pg., la relación de productividad es de 0.87; pero para una penetración de 24 pg. la relación aumenta en un 44%, hasta un valor de 1.25.

La densidad de disparos también juega un papel importante en lo que se refiere al aumento en la relación de productividad, la figura IV.11 tiene un comportamiento similar al de la penetración; la densidad de los disparos es variada por el número de disparos por plano. La figura indica que es ventajoso tener por lo menos 4 disparos/plano, para obtener una relación de productividad de casi 1.12 ó 90% del máximo valor.

Para conocer el gasto real e ideal (con daño) partiendo de la ecuación de Darcy, tenemos:

$$q_r = \frac{7.08 K_e h (P_{ws} - P_{wf})}{\mu \ln(0.47 r_e / r_w)} \quad \text{----- IV.8}$$

$$q_p = \frac{7.08 K_e h (P_{ws} - P_{wf})}{\mu [\ln(0.47 r_e / r_w) + s]} \quad \text{----- IV.9}$$

La eficiencia de flujo en función de las caídas de presión será:

$$EF = \frac{P_{ws} - P_{wf} - \Delta P_s}{P_{ws} - P_{wf}} \quad \text{----- IV.10}$$

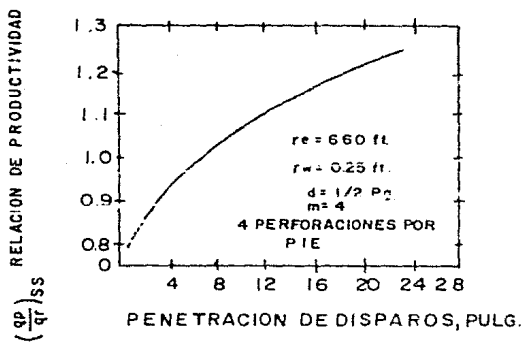


FIG. IV. 10 RELACION DE PRODUCTIVIDAD VS PENETRACION DE LOS DISPAROS.

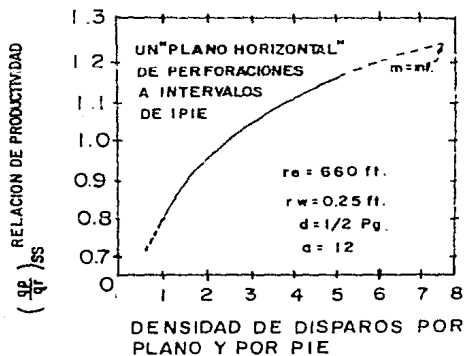


FIG. IV. 11 RELACION DE PRODUCTIVIDAD VS DENSIDAD DE DISPAROS.

IV.2.- Evaluación del Daño por Disparos.

(14)

Para ilustrar el efecto del daño por disparos, se modeló un sistema radial para determinar las condiciones de terminación disparando pistolas con 4 cargas/pie con una penetración de 6 pg. Como se observó en el Capítulo III, el efecto de usar fluidos de perforación ocasionará daño severo a la formación, ya que las partículas en suspensión provocan taponamiento de los orificios - muy difíciles de remover; para ilustrar la efectividad de los disparos se define como índice de flujo del pozo (W F E) a la relación de la permeabilidad aparente de la formación y la permeabilidad sin daño.

Mediante pruebas de laboratorio, se define eficiencia de flujo de la muestra (CFE) a la relación de la permeabilidad medida en la muestra de la roca disparada, (k_p) y la permeabilidad original de la muestra:

$$C F E = \frac{k_p}{k_e} \quad \text{----- IV.11}$$

La correlación para conocer éstos parámetros, está en función de la relación de permeabilidades de la formación dañada y la original (K_1), para diferentes penetraciones. Figura IV.12.

Para cada CFE se determinará su permeabilidad con daño y su respectiva WFE; esta correlación está basada en pruebas de laboratorio con muestras de arenisca "BEREA", aunque no es crítica su aplicación para otro tipo de roca. De la figura IV.12, observamos que para cada CFE dado se determina la permeabilidad con daño, es decir, después de disparar y su correspondiente WFE. Por ejemplo, suponiendo una CFE=0.7, medido en el laboratorio para una muestra de formación disparada proporcionando 6 pg. de penetración, la relación de permeabilidades es de 0.085 que equivale a -

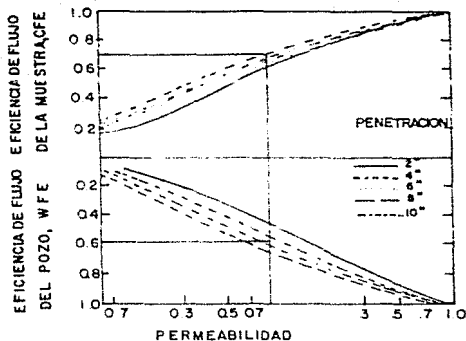


FIG. 12 RELACION ENTRE LA EFICIENCIA DE FLUJO DEL POZO Y LA EFICIENCIA DE FLUJO DE UNA MUESTRA; PARA UN DIAMETRO DE POZO DE 6 Pq., RADIC D E DRENE DE 660 PIES Y 4 DISPAROS/PIE, ESPACIADOS 90°.

Tabla IV.1.- Efecto de las condiciones de los disparos y la penetración, sobre la productividad de un pozo con potencial en agujero descubierto de 800 bl/día.

(Sin daño por Perforación del pozo)

CFE	Pistola	Fluido	Diferencial de Presión	Productividad (bl/día)	
				4 pg	8 pg
0.3	Estándar	Con sólidos	+ ΔP	115	154
0.5	Pobre	Agua salada	+ ΔP	253	330
0.7	Estándar	Agua salada Filtrada.	+ ΔP	429	569
0.8	Estándar	Agua salada Filtrada	- ΔP	538	689
0.9	Mejorada	Limpio sin ocasionar daño	- ΔP	653	792
1.0	Ideal	Limpio sin ocasionar daño	- ΔP	768	800

+ ΔP = Presión Hidrostática > Presión de Formación.

- ΔP = Presión Hidrostática < Presión de Formación.

Tabla IV.2.- Efecto de las condiciones de los disparos y daño ocasionado por la perforación del pozo sobre la productividad con un potencial de 800 bl/día.

(Penetración de 8 pg., 4 disparos/pie)

CFE	Pistola	Fluido	Diferencial de Presión	Productividad del pozo (bl/día)					
				Penetración					
				4 pg		8 pg		12pg	
Ks/Ke		Ks/Ke		Ks/Ke					
0.3	Estándar	Con sólidos	+ ΔP	91	136	15	114	9	112
0.5	Fobre	Agua salada	+ ΔP	219	297	54	259	36	254
0.8	Estándar	Agua salada Filtrada	- ΔP	576	661	247	615	162	601
1.0	Ideal	limpia sin daño.	- ΔP	803	843	530	813	331	794

Ks= Permeabilidad de la zona Dañada.

Ke= Permeabilidad de la zona No-Dañada.

disparar 4 cargas/pie en un pozo terminado con agua salada y -
presión diferencial hacia el pozo;causando una WFE=0.58,estos -
valores son típicos para terminaciones con las condiciones antes
descritas.

(14)

Para ilustrar mejor los resultados de los estudios realiza-
dos se hizo una comparación con respecto a la producción de un -
pozo terminado en agujero ademado y disparado con 4 cargas/pie,-
con uno en agujero descubierto con un potencial de 800 bl/día. -
Las condiciones de terminación y los resultados comparativos se-
observan en las Tablas IV.1 y IV.2. Los valores de productividad
muestran claramente que cuando el daño por la perforación no se
puede evitar, es importante seleccionar una pistola que propor-
cione un valor de CFE alto y una penetración tal que exceda la -
zona dañada, particularmente cuando la reducción de la permeabi-
lidad sea severa.

Por otro lado, si el pozo es perforado causando un daño peque-
ño a la formación, el efecto de la longitud de penetración es me-
nos crítica, aunque es importante disparar de tal manera que pro-
porcione valores altos de CFE (Tabla IV.2).

IV.3.- Efectos de la Densidad de los Disparos y la Penetración.

(7,8)

Algunos investigadores han concluido que en un sistema de
flujo radial (ideal), primeramente la densidad de los disparos -
gobierna la productividad del pozo y es mas importante que la -
penetración. Como medida del daño ocasionado por los disparos se
utilizaron muestras de formación para determinar valores de CFE,
suponiendo un radio de daño de $1/2$ pg. y una penetración de 6 pg.-
dichos resultados se muestran en la Figura IV.13. La curva super-
ior (CFE = 1.0, $K_s = 1.0$) corresponde a los resultados en con-
diciones ideales.

(14)

Se ha demostrado que un incremento en la densidad de los -

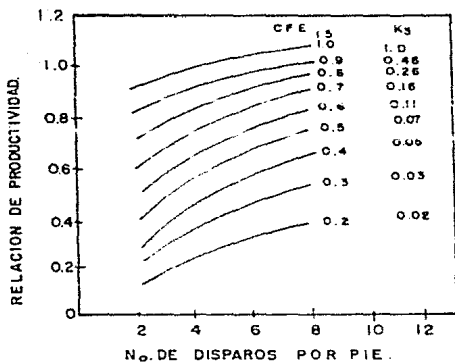


FIG.IV.13 EFECTO DEL DAÑO EN LOS DISPAROS, CARACTERIZADO POR VALORES DE CFE EN LABORATORIO O CALCULANDO VALORES DE K_3 SOBRE LA DENSIDAD DE LOS DISPAROS, PROFUNDIDAD DE PENETRACION (6 Pg.).

disparos es mas benéfico cuando la perforación es dañada que cuando no lo es y que duplicando la profundidad de penetración se obtiene el mismo efecto que duplicando la densidad. Sin embargo, para disparos severamente dañados ($K_1 = 0.05$) una penetración profunda es mas efectiva que un incremento en la densidad de los disparos. Por ejemplo, un incremento en la densidad de los disparos de 4/pie a 8/pie para una penetración de 4 pg. aumenta la relación de productividad de 0.35 a 0.52, el cual comparándola con un aumento en la profundidad de penetración de los disparos de 4 a 8 pg. con una densidad de 4 cargas/pie la cual aumenta la relación de productividad de 0.35 a 0.79, venciendo así una sustancial porción de los efectos de daño por disparos (Figura IV.14).

La penetración de los disparos es sin duda importante: dos disparos por pie con 18 pg. de penetración es más efectivo que 8 disparos/pie con 4 pg. de penetración. En general, dentro de los límites prácticos aumentando solamente la densidad de disparos no pueden vencerse los efectos de daño ocasionados por las operaciones de Perforación y Terminación.

(5)

IV.3.- Determinación del Factor de Daño Total.

Para conocer la capacidad de producción que un pozo puede aportar, se debe estimar el valor de "s" (Factor de daño) con el cual se puede saber la relación de productividad, aplicando la ecuación IV.7.

El factor "s", se puede obtener mediante varios métodos, siendo el mas común las pruebas de variación de presión en los pozos. Las fórmulas que relacionan el factor de daño dependiendo del tipo de prueba efectuada son:

a).- Pruebas de Incremento de Presión.

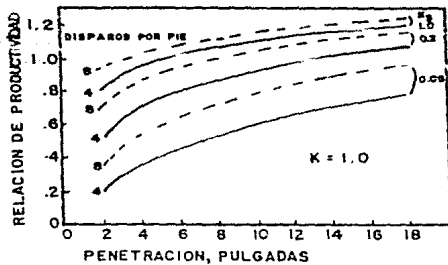


FIG. IV-14. EFECTO DE LA PENE-
TRACION EN LA PRO-
DUCTIVIDAD DE UN POZO
SIN DAÑO

$$s = 1.151 \left[\frac{P_{1hr} - P_{wf}}{-m} - \text{Log} \left(\frac{K_o}{\phi \mu C_t r_w^2} \right) + 3.2275 \right] \text{----IV.12}$$

b).- Pruebas de Decremento de Presión.

$$s = 1.151 \left[\frac{P_i - P_{1hr}}{-m} - \text{Log} \left(\frac{K_o}{\phi \mu C_t r_w} \right) + 3.2275 \right] \text{---- IV.13}$$

Y la caída de presión ocasionada por el daño es:

$$\Delta P_s = 0.87 m s \text{----- IV.14}$$

La determinación de "s" implica conocer por separado otros - pseudo factores que se deben a las operaciones de perforación, - terminación y producción del pozo, por eso es conveniente deter-- minar que operación contribuye a dañar la formación. El factor de daño "s", se puede definir también como :

$$s = (s_{p1} + s_{p2}) h/hc + s_f + s_c + s_d h/hc \text{----- IV.15}$$

Es decir que el daño total es una combinación de los efectos- del diámetro de los disparos, convergencia de flujo hacia los dis- paros, fracturas, penetración parcial y de la formación.

De la ecuación anterior se nota que los factores de daño por disparos y por daño a la formación tienen una corrección por espesor terminado ya que dependen mucho de la longitud de dicho espesor.

IV.3.1.- Cálculo de "sd".

De la ecuación deducida por Van Everdingen para determinar la caída de presión ocasionada por el daño, se tiene:

$$\Delta P_s = 141.2 \left(\frac{q B^2}{K_e h} \right) s \quad \text{----- IV.16}$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación IV.2 (en unidades prácticas), se obtiene una aproximación para determinar "sd".

$$sd = \left(\frac{K_e - K_s}{K_s} \right) \ln (r_s/r_w) \quad \text{----- IV.17}$$

IV.3.2.- Cálculo del Pseudo-Factor de Daño Debido al Flujo a Través de las Perforaciones, "sp1".

(6)

Se puede conocer "sp1" haciendo la analogía con la magnitud de la caída de presión en un estrangulador al fluir un líquido, mediante:

$$P = 1.08 \times 10^8 \sqrt[4]{\frac{q}{A_o}} \quad \text{----- IV.18}$$

Combinando las ecuaciones IV.16 y IV.14, y transformando a unidades prácticas:

$$sp1 = 4185 \times 10^{-9} \frac{\int q \cdot h}{A^2 \mu B N} \text{----- IV.19}$$

Este valor de "sp1" debe tomarse en cuenta cuando se tienen bajas densidades de disparos o cuando se realicen trabajos de estimulación:

(15)

IV.3.3.- Cálculo del Pseudo-Factor de Daño por Convergencia de Flujo Hacia los Disparos, "sp2".

A medida que el fluido del yacimiento converge a las perforaciones el patrón de flujo pierde su característica radial en la zona disparada, lo que provocará una caída de presión adicional a la producida por la condición exclusivamente radial. La diferencia entre las dos caídas de presión definen a "sp2".

Entre las correlaciones para determinar "sp2", están las de Hong (2,8)

y Harris. Este último presenta su correlación en forma de gráficas relacionando "sp2", en función de variables adimensionales tales como la penetración, espaciamento vertical de cada intervalo disparado y el diámetro del disparo.

El método tiene las desventajas de que los parámetros adimensionales en los cuales se basa deben determinarse con precisión y además, supone que la formación no ha sido dañada por la perforación del pozo.

Hong ajustó dicho método a condiciones más reales de campo utilizando un modelo que describe el flujo tridimensional hacia los disparos en una zona con daño y sin él. Tiene la ventaja de manejar arreglos de disparos simples y escalonados y de presen--

tar sus resultados en forma de nomogramas fáciles de emplear.

Los nomogramas relacionan al Pseudo-Factor de daño por disparos con cinco parámetros del pozo y del yacimiento:

- 1).- El intervalo de repetición del patrón (distancia entre planos, h).
- 2).- Diámetro del pozo (d_w).
- 3).- La relación de permeabilidades vertical y horizontal (K_z/K_e)
- 4).- El defasamiento de las perforaciones (θ).
- 5).- La profundidad de penetración (ap).

Hong preparò 2 nomogramas para, además de "sp2", conocer "sd" - uno para cuando las perforaciones no penetran mas allá de la zona de permeabilidad alterada y el otro para cuando la penetración va mas allá de dicha zona.

Los parámetros necesarios para determinar "sd" son:

- 1).- El intervalo de repetición (h).
- 2).- El diámetro del pozo (d_w).
- 3).- La relación de permeabilidades de la zona dañada y la original (K_s/K_e).
- 4).- El radio de daño (r_s).

IV.3.4.- Cálculo del Pseudo-Factor de Daño por Fractura, "sf".

Si al calcular "s" de una prueba de variación de presión se -

obtiene un valor negativo, puede sospecharse la existencia de -
fracturas de alta conductividad en la vecindad del pozo, ya que -
normalmente existe una reducción de la permeabilidad alrededor -
del agujero debida a la acción de los fluidos de perforación y -
terminación.

(13)

Para calcular "sf" se utiliza la correlación de Van Poolen, -
el cual considera fracturas de conductividad infinita en un sis -
tema isotrópico radial.

Los valores de "sf" están graficados en función de la eficien -
cia de flujo para diferentes valores de h/r_e y r_f/r_w , en donde -
 r_f es el radio de fractura; existen 2 gráficas, una para fractura -
horizontal y otra para vertical. Ya que los valores de "sf" serán -
siempre negativos, deben de tomarse en cuenta, ya que la determi -
nación de la cantidad de daño "tratable" requiere que se evalúen -
todos los Pseudo-Factores por separado y se resten del factor -
total obtenido de las pruebas de presión.

V.3.5.-Cálculo del PseudoFactor por Efecto de Terminación, "sc".

Cuando sólo una porción de la zona productora es disparada, -
aparece también un efecto de convergencia del flujo hacia la -
zona terminada, lo que provoca una caída de presión, definida en -
términos del Pseudo-Factor de daño debido a la longitud del in -
tervalo terminado, "sc".

La diferencia básica entre "sp" y "sc" consiste en que para el -
cálculo de "sc" se supone que el intervalo terminado está sin re -
vestir y sin daño a la formación. Un método para conocer "sc", es

(11)

el de Odeh, el cual permite determinar directamente dicho -
Pseudo-Factor para cualquier lugar en que se coloquen los dispa -
ros en la zona productora. También permite calcular la reducción -
en la productividad del pozo en función de la localización y -
y longitud del intervalo disparado, el espesor de la formación, el -
radio de drene, y la relación r_e/r_w . Para aplicar dicho método -

se plantearon las siguientes suposiciones:

- a).- El pozo de radio r_w penetra en un medio isotrópico de espesor h .
- b).- El intervalo abierto al flujo es h_c , donde $h_c \leq h$.
- c).- El pozo está localizado en el centro de un yacimiento circular cerrado de radio r_e .
- d).- El pozo no está revestido.
- e).- La cima y el fondo de la formación productora son fracturas impermeables.
- f).- El pozo está produciendo a un gasto constante un fluido ligeramente compresible.

(11)

Odeh presenta sus resultados en forma de gráficas, en donde cada figura proporciona la relación " q_p/q_r " contra " Z_{d1} " para un intervalo abierto específico y varios espesores " h ". " Z_{d1} " es la fracción de formación arriba del intervalo disparado.

Para calcular " s_c " el autor define la pérdida fraccional de productividad, " f ", como:

$$f = \left(\frac{q_r - q_p}{q_r} \right) = \left(1 - \frac{q_p}{q_r} \right) \text{----- IV.20}$$

Esta pérdida de productividad es función directa de " s_c ", así:

$$f = 1 - \frac{qp}{qr} = \frac{sc}{\ln(0.47 re/rw) + sc} \quad \text{----- IV.21}$$

En donde :

$$sc = \frac{\ln(0.47 re/rw)(1 - qp/qr)}{(qp/qr)} \quad \text{----- IV.22}$$

Procedimiento para calcular "sc":

- hc
- a).- Determinar el valor de $hD1 = \frac{hc}{h}$
- b).- Determinar el valor de $Zd1$, el cual se obtiene dividiendo la distancia de la cima de la formación productora a la cima del intervalo disparado entre el espesor total de la formación.
- c).- De acuerdo con el valor calculado de $hD1$, seleccionar (11) de las gráficas la que mejor ajuste . Entrar con el valor de " $Zd1$ " y obtener qp/qr .
- d).- Calcular "sc" con la ecuación IV.22.

CAPITULO V

METODOS PARA AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD DE LOS POZOS

En todos los pozos petroleros, debido a las operaciones de Perforación, Terminación y Producción, se alteran las condiciones originales que reducen su productividad. Si se encuentra que el pozo no está produciendo de acuerdo con su capacidad, se deben investigar las causas de los problemas de su baja productividad, mismas que pueden corresponder a los siguientes problemas: del yacimiento, de los fluidos y del equipo.

(5)

V.1.- Causas de Baja Productividad.

Los problemas que provocan baja productividad en los pozos se pueden clasificar en tratables y no-tratables dependiendo de su propia naturaleza.

V.1.1.- Problemas NO-TRATABLES.

Estos se refieren a aquellos problemas que solamente tienen una solución parcial o no tienen solución:

- a).- Baja Capacidad de Flujo del Yacimiento.- Puede ser debida a que se tienen bajas permeabilidades y/o espesores, lo cual trae como consecuencia bajos gastos de producción; para mejorarlos se pueden realizar tratamientos con ácido o fracturamientos que aumentan la permeabilidad del yacimiento en la vecindad de los pozos.

- b).- Reducción de la Permeabilidad Absoluta.- A medida que la presión de confinamiento aumenta, la permeabilidad absoluta disminuye ; los esfuerzos sobre la roca almacenante aumentan en la vecindad del agujero; según se ilustra en la Fig. V.1, resultados de experimentos realizados en muestras de rocas de diferentes permeabilidades muestran que la reducción de la permeabilidad absoluta es mayor en muestras de menor permeabilidad a medida que se incrementa la presión de confinamiento.
- c).- Baja Presión de Yacimiento.- La recuperación de aceite depende de la presión del yacimiento y de los procesos de desplazamiento. A medida que disminuye el gradiente de presión en el yacimiento baja dicha recuperación.
- d).- Alta RGA.- A medida que declina la presión del yacimiento, aumenta la saturación de gas y al aumentar esta saturación empiezan a producirse grandes volúmenes de gas, es decir que aumenta la RGA, reduciéndose la producción de aceite.
- e).- Alta Viscosidad.- De la ecuación de Darcy (Ecuación IV.8) se observa que el gasto es inversamente proporcional a la viscosidad del aceite. Si el yacimiento tiene mecanismo de empuje por gas disuelto liberado, la viscosidad del aceite se incrementa a medida que el gas es liberado, y por tanto se reduce la productividad del pozo.
- f).- Alta Relación Agua-Aceite.- La producción de agua tiene las siguientes desventajas:

- Aumenta los costos de producción.
- Reduce la saturación de hidrocarburos y por tanto, su permeabilidad relativa.
- Aumenta el gradiente de presión en las tuberías, con lo cual aumenta la presión de fondo, disminuyendo la producción de fluidos.

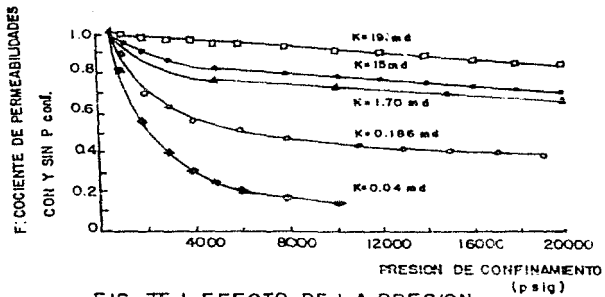


FIG. V.1. EFECTO DE LA PRESION DE CONFINAMIENTO SOBRE K

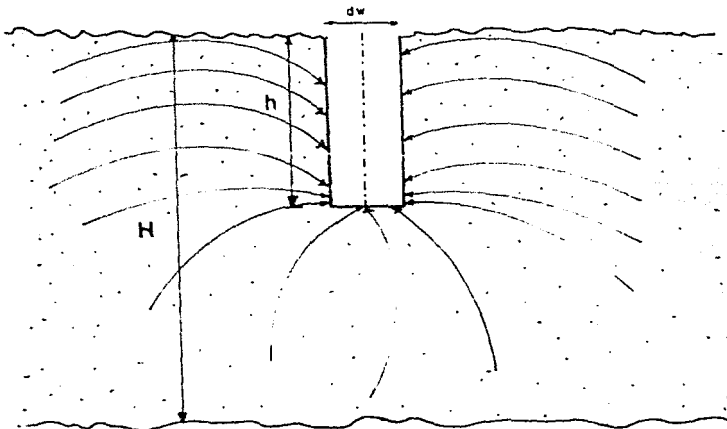


FIG. V.2. DAÑO DEBIDO A LA RESISTENCIA DEL FLUJO POR EFECTO DE PENETRACION PARCIAL AL YACIMIENTO.

V.1.2.- Problemas TRATABLES.

Son aquellos que pueden reducirse o eliminarse totalmente, ya que se tiene un control más directo sobre ellos y por tanto, se puede elegir el tratamiento más adecuado.

A.- Problemas de la Formación.

a).- Precipitados Orgánicos.- Estos precipitados orgánicos han causado problemas en la superficie, en las tuberías de producción y en el yacimiento, los cuales pueden ser parafinas o ceras y asfaltenos. La precipitación de parafinas se debe a la disminución de la temperatura; La composición del aceite influye en la depositación de éstos materiales.

El depósito de asfaltenos es un problema de fluoculación o dispersión coloidal ocasionados principalmente por el cambio de presión y temperatura.

b).- Precipitados Inorgánicos.- Las aguas de formación contienen sólidos en suspensión. A medida que éstas son producidas, las condiciones de equilibrio se modifican y puede ocurrir la precipitación de sólidos que restringen la capacidad de flujo de la formación. Los precipitados más comunes son: Sulfato de Calcio, Sulfato de Bario, Carbonato de Calcio y Carbonato de Magnesio. La temperatura, presión, concentración de Cloruro de Sodio en el agua y la presencia de ciertos tipos de bacterias afectan las características de solubilidad de las aguas de formación.

c).- Daño por Materiales de Estimulación.- Los ácidos precipitan materiales asfálticos. En zonas de anhídritas se pueden formar precipitados insolubles de sulfatos. En zonas que contienen más del 10% de carbonato de calcio, éste se puede precipitar si se usa ácido fluorhídrico, pudiendo disolver el material cementante, con lo cual la resistencia de la roca disminuye. Los ácidos pueden contribuir a la formación de emulsiones estables, que pueden dañar la roca. Cuando se-

inyecta agua, ésta puede taponar los poros si no es tratada previamente.

d).- Daño Causado por el Lodo de Perforación.- Básicamente existen dos problemas que se deben a los fluidos de perforación Invasión del filtrado de lodo dentro del medio poroso y penetración de partículas sólidas en los poros. Además, todos los fluidos de perforación causan daño aunque esté cumpliendo con su función.

e).- Hinchamiento y Migración de Arcillas.- El agua dulce causa más daño en algunas rocas que el agua salada. Los dos fenómenos principales que ocurren y causan daño son: (1) Hinchamiento de las partículas de arcilla, que reduce los canales de flujo y (2) Dispersión de las partículas, que se transportan hasta que ocurre un taponamiento de algunos canales de flujo. Se ha comprobado que las aguas que contienen concentraciones de 5 a 10 mil FPM de cloruro de sodio ha ocasionado estos dos problemas descritos.

f).- Arenamiento.- La producción de arena puede ser muy costosa particularmente en casos donde se produce agua; además de erosionar el equipo de producción, se pueden arenar y taponar las tuberías superficiales y el equipo de separación.

B.- Problemas de los Disparos.

a).- Arreglo de Disparos.- Las condiciones y el arreglo de los disparos (baja densidad de los mismos, poca penetración, etc) originan una baja productividad ya que al aumentar el número de disparos por pie aumenta la relación de productividad, también al aumentar el número de planos de disparo se incrementa dicha relación.

b).- Taponamiento.- Puede ser por depósitos de tipo orgánico o -

inorgánico, incluyendo material pulverizado de la carga, cemento y la propia formación.

c).- Terminaciones Parciales.-Se planea para evitar producciones excesivas de gas o de agua del yacimiento. En otras palas, si sólo una parte del intervalo abierto a producción es disparado, Figura V.2, existe un daño aparente debido a la restricción del flujo que disminuye la producción de fluidos

C.- Problemas en el Equipo de Producción.

a).- T.R. y Cementaciones.- Cuando el cemento no está bien adherido a la tubería pueden formarse canales de comunicación entre zonas que no son de interés.

b).- Tubería de Producción.- Las causas de baja productividad asociadas por esta razón son:

- Fugas.- Producidas por la acción corrosiva de los fluidos, u otros factores ligados a la etapa de producción del pozo.

- Mal Diseño de la T.P.- El flujo multifásico en tuberías verticales ocasiona caídas de presión excesivas por mal diseño.

- Depósito de Parafinas y Escamas Inorgánicas.-Estos depósitos reducen la producción en gran medida, incrementando la caída de presión al reducirse el área de la sección transversal.

c).- Equipo de Producción Artificial.- La corrosión y desgaste de partes del equipo subsuperficial de bombeo, reducen la capacidad de producción aumentando su costo de operación. La producción de arena y el volumen de gas producido son algunos de los factores que reducen la eficiencia de produ--

cción en este tipo de sistemas.

V.2.- Técnicas Para Aumentar la Productividad.

Dentro de las técnicas para el aumento de la productividad - que toman en cuenta únicamente la zona de los disparos, se consi- - deran principalmente: la selección del intervalo productor, la - limpieza de los orificios, la selección de la densidad, carga y - tipo de pistola y cambio de intervalo de interés.

Como se ha discutido en capítulos anteriores, es conveniente - tomar en consideración la programación de los disparos y los - factores que afectan la operación de los mismos.

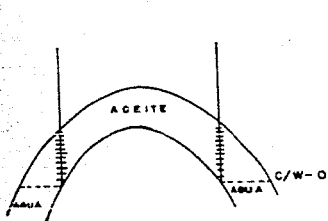
(1)

V.2.1.- Selección del intervalo Productor .

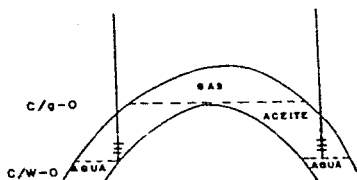
Básicamente la selección del intervalo productor es función - del tipo de yacimiento, del mecanismo de empuje que prevalece y - de las propiedades del sistema roca-fluidos. Para seleccionar - el intervalo de flujo es esencial conocer la variación de las - saturaciones de fluidos con la profundidad y el espesor de la - zona de transición. En los yacimientos productores por empuje - de gas disuelto liberado, sin empuje hidráulico y sin casquete - de gas (primario o secundario), se recomienda disparar todo el - intervalo, Figura V.3. (a).

Si por el contrario el yacimiento produce exclusivamente por - empuje del casquete de gas, se procurará disparar los intervalos - en la parte inferior del yacimiento, sin descuidar la posible - conificación del agua o digitación del gas del casquete y contro - larse los ritmos de producción para obtener un avance horizontal - uniforme del contacto aceite-gas, según se muestra en la Figura - V.3. (b).

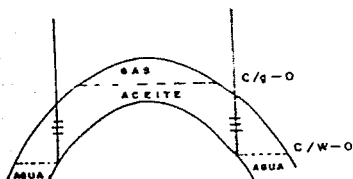
Cuando se tiene a su vez un yacimiento con empuje hidráulico - y con casquete de gas, los intervalos por disparar se harán en -



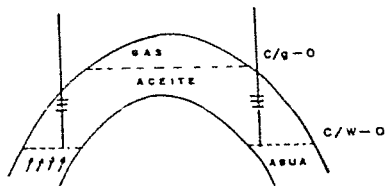
a) YACIMIENTO QUE PRODUCE POR EMPUJE DE GAS DISUELTO LIBERADO



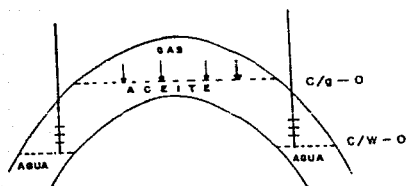
b) YACIMIENTO QUE PRODUCE POR EMPUJE DE CASQUETE DE GAS



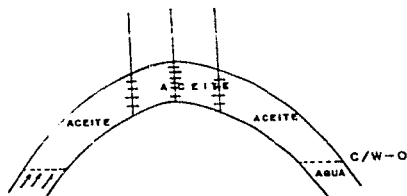
c) YAC. QUE PRODUCE POR EMPUJE HIDRAULICO Y CASQUETE DE GAS



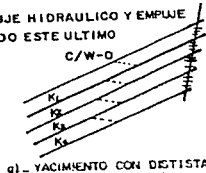
d) YAC. QUE PRODUCE POR EMPUJE DEL CASQUETE DE GAS Y EMPUJE HIDRAULICO, CUANDO ESTE ULTIMO PREVALECE



e) YAC. QUE PRODUCE POR EMPUJE HIDRAULICO Y EMPUJE DE CASQUETE DE GAS CUANDO ESTE ULTIMO PREVALECE



f) YACIMIENTO DE ACEITE BAJO-SATURADO



g) YACIMIENTO CON DETISTAS CARACTERISTICAS

FIG. XV. 3. SELECCION DEL INTERVALO PRODUCTOR SEGUN EL TIPO DE YACIMIENTO.

la parte media del yacimiento, esto depende de la intensidad de la entrada de agua o empuje del gas, Figura V.3(c).

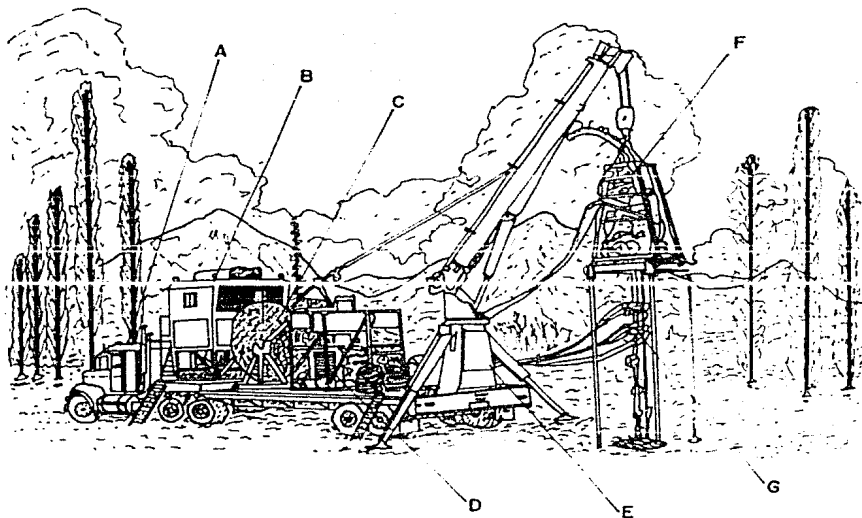
Si prevalece el empuje por entrada de agua se seleccionará el intervalo arriba de la parte media, según se ilustra en la Figura V.3.(d). Si por el contrario, prevalece la expansión del gas se seleccionará el intervalo productor abajo de la parte media, Figura V.3.(e).

En yacimientos bajo-saturados con empuje hidráulico y buena comunicación vertical, el intervalo productor se abrirá en la parte superior del yacimiento, Figura V.3.(f). Cuando se tienen diferentes yacimientos estratificados con distintas características (porosidad, permeabilidad, saturaciones), se requerirá conocer el espesor y tipo de empuje ya que se dispararán todos los cuerpos productores de acuerdo a esto y con la densidad de disparos elegida de acuerdo al ritmo de producción requerido, Figura V.3.(g).

V.2.2.-Limpieza de los Disparos.

Para el aumento de la productividad, la limpieza de los disparos es muy importante y se puede realizar mediante baches de ácido y efectuando estimulaciones de limpieza. Para efectuar la limpieza se han utilizado con buenos resultados los equipos especiales tales como: La Tubería Flexible y el Generador de espuma, principalmente.

La primera, se utiliza para efectuar la limpieza del pozo y los disparos utilizando ácido, agua, diesel y N_2 ; éste último se usa mucho para reducir la presión hidrostática del fluido de control e inducir el pozo. La unidad consta de un carrete en donde se aloja la tubería de diámetro de 1 ó 1 1/4 pg., una cabeza inyectora que se conecta al árbol de válvulas del pozo, una cabina de control de presión y profundidad y una unidad de bombeo integrada, Figura V.4. Su aplicación es muy común ya que su diámetro permite usarse en los pozos con T.P.



DESCRIPCION DEL EQUIPO.

- A._ TRACTOR _CAMION MOTRIZ
- B._ CASETA DE CONTROL QUE SE ELEVA PARA VISIBILIDAD MAXIMA DEL OPERADOR. CUENTA CON CONTROLES DE TODOS LOS COMPONENTES DE LA U.
- C._ CARRETE DE TUBERIA QUE CONTIENE HASTA 4,900 mts. DE TUBERIA DE 1"Ø. CUENTA CON GUIA PARA ACOMODAR TUBERIA SIN TRASLAPARLA Y CONTADOR DE PROFUNDIDAD. NO TIENE POTENCIA PARA INTRODUCIR Y EXTRAER LA TUBERIA; ESTA ES FUNCION DE LA CABEZA INYECTORA.
- D._ UNIDAD DE POTENCIA... CONSISTE EN UN MOTOR GM_ 471, BOMBAS HIDRAULICAS, TANQUES Y VALVULAS DE CONTROL.
- E._ PLUMA HIDRAULICA... PARA MANIOBRAS DE INSTALACION Y DESMANTELAMIENTO DE LA UNIDAD.
- F._ CABEZA INYECTORA... CONSISTE DE UN CUELLO DE GANSO" PARA GUIAR LA TUBERIA, ROLES Y CADENAS QUE FRICCIONAN DURANTE SU INYECCION O EXTRAQCAL POZO
- G._ PREVENTOR... CON CAPACIDAD DE TRABAJO DE 350 Kgs./Cm.² PARA TUB. DE 1" Ø

FIG...V... 4. UNIDAD DE TUBERIA FLEXIBLE.

La unidad generadora de espuma se utiliza en trabajos de desarenamiento de pozos utilizando un fluido de baja densidad (espuma) para limpiezas de fondo del pozo. En la limpieza de los orificios existen factores que gobiernan su efectividad como son:

a).- Tipo de Formación.

Como se explicó anteriormente, se ha utilizado arenisca "BEREA" para las pruebas de las pistolas; sin embargo, se han hecho pruebas en otro tipo de formación las cuales muestran algunas variaciones no críticas en los resultados.

b).- Tipo de la Carga.

Se requiere tener uniformidad al penetrar a la formación para evitar el taponamiento por los residuos de la carga. Las indicaciones de laboratorio muestran que los residuos de las cargas de alta calidad pueden ser removidos por el flujo hacia el pozo - requiriendo menor presión de flujo.

c).- Presión Diferencial.

Es un factor que afecta en gran medida el grado de limpieza y la eficiencia de flujo. La eficiencia para limpiar los orificios de residuos y restaurar la permeabilidad de la formación se logra utilizando una alta diferencial de presión entre el pozo y el yacimiento (diferencial negativa). Los resultados se pueden aplicar al flujo de gas, excepto que en estas condiciones se requiere una mayor diferencial de presión que en líquidos por las características del fluido.

La dirección de la presión diferencial es muy importante para la eficiencia en la limpieza de los disparos, ya que las pruebas de laboratorio (Capítulo II) han demostrado que cuando el fluido de control no penetra a los orificios facilita el flujo y la limpieza de los mismos; de lo contrario el fluido tiende a con-

solidar los residuos de las partículas de la formación y de las cargas haciendo mas difícil la limpieza, además presenta el riesgo de formar emulsiones las cuales obstruyen el paso de los fluidos del yacimiento hacia el pozo.

(2)

A continuación se dan algunas recomendaciones para terminar o efectuar una reparación mayor de un pozo, con el objetivo de optimizar la producción de un pozo:

- Evitar la reducción de la permeabilidad original por hidratación de arcillas y taponamiento de las perforaciones. Para esto deben mantenerse diferenciales de presión a favor del pozo.
- Aumentar la permeabilidad del intervalo expuesto, efectuando la operación de disparos en seno de ácidos.
- Disminuir la viscosidad del aceite que existe en la vecindad del pozo y las perforaciones, efectuando la operación de disparos en seno de diesel.
- Tratar de disminuir al mínimo posible el daño por efecto de los disparos, "sp", manteniendo el daño por efecto de invasión de fluidos del pozo o partículas, "sd" y modificando la orientación o defasamiento de las cargas disparadas.

V.2.3.- Selección de las Cargas, Pistola y Densidad.

La carga debe seleccionarse de acuerdo a la penetración, tal que proporcione una alta relación de productividad, sin descuidar el daño a la formación. Es conveniente la máxima penetración posible cuando se tiene la formación dañada, básicamente el objetivo es penetrar por lo menos de 5 a 6 pg. mas allá de la zona de permeabilidad reducida o dañada para tener movimiento de los fluidos hacia el pozo.

Como se mencionò en el Capitulo II la selecciòn de la pistola depende del tipo de formaciòn y de la terminaciòn a efectuar. A continuaciòn se recomiendan algunas pistolas para su uso, segùn los requerimientos en el campo:

- Pistolas para Tubería de Revestimiento.- La ventaja es que se aprovecha el mayor diámetro de pistola y la mayor penetraciòn.- Son tan eficientes que perforan la T.R. sin ocasionarle daño, - estàn diseñadas para contener todos los residuos para su recuperaciòn. Se cargan hasta 4 disparos por pie .

- Pistolas Para Tubería de Producciòn.-Existen pistolas desechables y recuperables. Dentro de las primeras està la de "Cápsula de Aluminio", la cual es parte integral de la pistola, se dispara hasta con 4 disparos por pie. Sus diámetros son de 1 " hasta 2 1/8". En cuanto a las recuperables estàn las de "Alambròn", en donde alojan las cápsulas con la carga, se disparan hasta 4 disparos por pie.

Las pistolas de "Placa de Acero" tienen un mínimo de residuo. Las cápsulas se alojan a lo largo de dicha placa, se cargan con 4 disparos por pie. Las pistolas "Huecas de Acero" constan de un tubo de acero, dejan un mínimo de residuos y las cargas se pueden disparar simultáneamente, además de tener un control de la orientaciòn sobre ellas. Se pueden cargar hasta 4 disparos por pie. Dentro de las pistolas de este tipo estàn las usadas para operaciones especiales como son las siguientes:

- . Pistolas Para Disparar T.F. sin Dañar la T.R..-Para obtener circulaciòn de fluido cuando no se puede abrir la camisa o - válvula de circulaciòn.

- . Pistolas Para el Control de Arenamiento.- El diámetro del - orificio es de gran ayuda para controlar la producciòn de - arena. Los granos grandes de arena forman un puente atrás de los orificios formando un colador efectivo contra la arena -

suelta manteniendo el flujo adecuado. Las pistolas se pueden cargar hasta con 16 disparos por pie, tipo placa de acero.

Pistolas con Cargas sin Borde.- Las cuales producen orificios de diámetros consistentes que son muy deseables por su buena acción de sellar cuando se usan pelotas selladoras, en operaciones de Estimulación. Además, permiten altos porcentajes de inyección debido a la reducción de las pérdidas de presión - por fricción.

(9)

Existen 2 métodos especiales de Terminación con los cuales se puede utilizar una herramienta que nos permita aprovechar las condiciones del pozo para obtener la mayor producción posible y condiciones favorables de limpieza. La herramienta ("SURGE") es un sistema de Terminación rápida y económica, produce disparos sin residuos y con características favorables para la limpieza de los disparos. Consiste de un ensamble de válvula que contiene un disco cerámico que sirve como sello contra la presión del fondo, Figura V.5. La herramienta se baja con el aparejo de producción después de disparar el intervalo y opera como una Terminación con diferencial hacia el pozo. La varilla que rompe el disco se suelta desde la superficie, iniciando el flujo a la T.P. y limpiando cualquier residuo, tanto en la tubería como en los disparos.

El otro método consiste de una combinación de dicha herramienta con una pistola (para T.R), la cual se baja conjuntamente con el aparejo de producción. El sistema produce disparos de alta resolución, es decir no produce residuos, además de aprovechar la diferencial de presión hacia el pozo. Se utiliza un arreglo con empacador con el fin de establecer la diferencial de presión entre el intervalo productor y la TP, obteniendo las condiciones requeridas para la limpieza.

Para operar el sistema se deja caer desde la superficie una varilla desde la superficie que rompe el disco cerámico, luego hace contacto con el cople de disparo mecánico o "Sub-mecánico"-

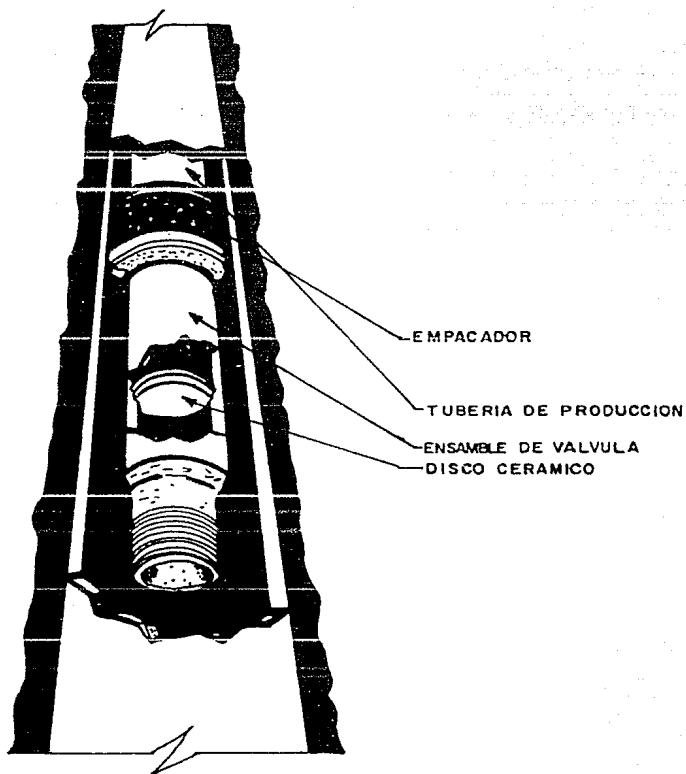


FIG. V - 5 . SISTEMA DE TERMINACION CON LA TECNICA
" SURGE "

que acciona la pistola, efectuando el disparo. La pistola se posiciona a la profundidad deseada, auxiliándose del registro de rayos gamma y el detector de coples (RGN-CCL). La ventaja de esta terminación es el uso de pistolas de diámetro grande, las cuales proporcionan altas penetraciones.

Las condiciones de terminación son de gran importancia en la selección de la densidad de los disparos, pues el objetivo es producir un sistema de flujo sin reducir la capacidad de drenaje del yacimiento. Como se observa en la Figura V.6. que para 4 disparos por pie de 5 a 6 pg. de penetración la producción es teóricamente la equivalente a la de un pozo en agujero descubierto. Es notable la importancia de penetrar las primeras pulgadas en la formación con daño ya que rebasando dicho radio(rs), la relación de productividad aumenta. De la figura descrita notese que para 6 a 12 pg., el aumento de la relación de productividad es de 10% comparándolo con el valor anterior; así si se aumenta la densidad, el incremento en la relación de productividad será muy pobre.

La producción de aceite en un intervalo se agota por invasión de agua salada o gas; además, cuando la producción sea incosteable se deberá de obturar el intervalo para probar otro, para esto se requiere hacer un estudio enfocado a conocer las condiciones del yacimiento y el mecanismo por el cual está produciendo. La invasión de agua salada es un indicio de que el contacto agua-aceite ha llegado al intervalo productor, tomando en cuenta que no se puede atribuir a una canalización en el cemento. La invasión de agua hace incosteable la producción, además de ocasionar daño al equipo de producción.

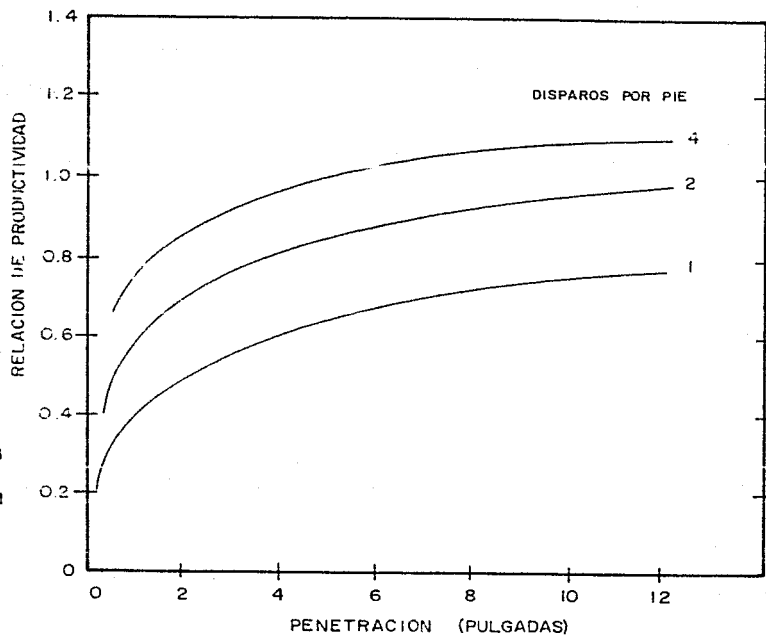


FIG. 6. RELACION DE PRODUCTIVIDAD CONTRA PENETRACION PARA DISTINTAS DENSIDADES DE DISPAROS.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para la operación de los disparos es conveniente elegir adecuadamente el tipo de pistola según las condiciones del pozo y de la formación.
- Se ha demostrado que las pistolas "Jet" proporcionan altas penetraciones en formaciones con alta resistencia a la compresión y capaces de proveer productividades equivalentes a las de un pozo en agujero descubierto.
- Cuando se dispara en lodo con diferencial hacia la formación existe una alteración en las condiciones de flujo en la vecindad del pozo, que ocasiona un daño severo, por esto este tipo de Terminación no es conveniente. Se debe elegir el fluido de control y el tipo de terminación mas adecuado, según los requerimientos del pozo.
- Se deben cuidar las condiciones que afectan la operación de los disparos (fluido, diferencial de presión, densidad, penetración, etc.), ya que de esto depende la producción óptima del pozo y su vida fluuyente.
- La efectividad de los disparos para obtener condiciones de flujo favorables depende de:
 - . Propiedades de flujo en los orificios y la formación.
 - . Condiciones de terminación bajo las cuales se dispara.
- La productividad de un pozo puede ser incrementada mediante el aumento de la penetración de los orificios cuando el daño a la formación es severo. Cuando dicho daño no es crítico, es mas

efectivo aumentar la densidad de disparos.

- Cuando se dispara en varios planos, la penetración disminuye a medida que la pistola está más alejada de la T.R.
- El daño total "s" se debe tomar muy en cuenta para evaluar la efectividad de las Estimulaciones y Fracturamientos.
- La limpieza de los disparos se obtiene:
 - . Con diferencial de presión a favor del pozo.
 - . Cargas de alta resolución que proporcionen el mínimo de residuos.
 - . Fluido de control sin partículas sólidas.
 - . Utilizando unidades especiales de limpieza con la Tubería Flexible o el Generador de Espuma.

N O M E N C L A T U R A

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDADES
Ao	Area del Orificio	pg ²
aD	Penetración Adimensional	(adim.)
B	Factor de volumen del Aceite	bl/bl
C	Resistencia a la Compresión de la Roca.	lb/pg ²
Cb	Resistencia a la Compresión de la Armadura General.	lb/pg ²
Ct	Compresibilidad Total Roca-Fluidos.	(lb/pg ²) ⁻¹
h	Espesor Neto Disparado.	pies
hD	Espesor Disparado Adimensional.	(adim.)
K	Permeabilidad.	md
Kf	Permeabilidad Efectiva del fluido.	md
m	Pendiente de la Linea Recta Semilogarítmica. $= - \frac{162.6 q \mu B_o}{K h}$	
N	Número de Disparos Abiertos.	
P	Presión.	lb/pg ²
Pb	Penetración del Probador Hco.	pg.
Pe	Penetración Real.	pg.
Pwf	Presión de Fondo Fluyendo.	lb/pg ²
Pws	Presión de Fondo Cerrado.	lb/pg ²
q	Gasto.	bl/día
qc	Gasto Real.	bl/día
qp	Gasto Ideal.	bl/día
re	Radio de Drene.	pies
rs	Radio de la Zona Dañada.	pies
rw	Radio del Pozo.	pies
s	Factor de Daño.	(adim.)
sd	Daño Ocasionado por Reducción de Permeabilidad Original de la Formación.	(adim.)
sc	Pseudo-Factor de Daño por efecto de Penetración Parcial al Yacimiento.	(adim.)

sf	Pseudo-Factor de Daño por Fractura.	(adim.)
sp1	Pseudo-Factor de Daño Debido al Flujo a Través de los Orificios.	(adim.)
sp2	Pseudo-Factor de Daño por Efecto de Convergencia de Flujo hacia los Disparos.	(adim.)
μ	Viscosidad.	c.p.
ϕ	Porosidad.	Fracción
ρ	Densidad.	lbm/pt ³

Subíndices

e Original.
o Aceite.
p Zona de Disparos.
r Dirección Radial.
s Zona Dañada.
z Dirección Vertical.

REFERENCIAS

- 1.- Alonso C.I., Garaicochea P.F. y Benitez H.M.A.-
"Apuntes de Terminación de Pozos".
Fac. Ingeniería. U.N.A.M., 1983.
- 2.- Niño Ch. M.A.
"Técnicas Para Aumentar la Productividad de los Pozos
Petroleros en su Etapa de Terminación y Durante su
Reparación". Pemex, Depto. de Reparación y Terminación
de Pozos. Distrito Agua Dulce, Ver., Junio 1984.
- 3.- Mc Cullough NL Industries, Inc.
"Manual de Datos de Disparos", 1986
- 4.- L.G. Jones and M.I. Slusser,
"The Estimation of Productivity Loss Completion by
Perforations Including Partial Completion and Forma-
tion damage". S.P.E. 4798, AIME, 1974.
- 5.- Valderrábano H.A. y Rayón C.R.
"Apuntes de Evaluación de la Producción".
Fac. Ingeniería, U.N.A.M., 1984.
- 6.- Garaicochea P.F.
"Apuntes de Transporte de Hidrocarburos".
Fac. Ingeniería, U.N.A.M., 1983.
- 7.- Allen T.O. and Atterbury J.H. Jr.
"Effectiveness of Gun Perforating".
Trans. AIME (201), 1954.

- 8.- Harris M.H.
"The Effect of Perforating on Well Productivity".JPT
April, 1966.Trans.AIME(237)
- 9.- Bonomo J.M.and Young W.S.
"Analysis and Evaluation of Perforating and Perfora-
tion Cleanup Methods".JPT,March, 1985
- 10.- Uren L.Ch.
Ingenieria de Producción del Petróleo.,1965.
- 11.- Odeh A.S.
"Steady-State Flow Capacity of Wells with Limited
Entry to Flow". SPE.Trans.AIME,1968.
- 12.- Schlumberger.
"Evaluación de Formaciones en México".México,1984.
- 13.- H.K. Van Poolen
"Productivity Vs Permeability Damage in Hydraulically
Produced Fractures".API,Drilling and Production
Practice,1957.
- 14.- Klotz J.A,Krueguer R.F.and Pye D.S.
"Effect of Perforation Damage on Well Productivity".
SPE-AIME.Union Oil Co.of California.,1983.
- 15.- I.M.P. Poblano O.R.
"Análisis y Efecto de los Disparos sobre la Producti-
vidad de los Pozos".Proyecto D-37 A.
Subdirección de Tecnología de Explotación,Junio 1978.

16.- Oliphant S.C. and Farris R.F.

"A Study of Some Factor Affecting Gun Perforating".
Trans.AIME, 1947.

17.- Thompson G.D.

"Effect of Formation Compressive Strenght on Perforator Performance".API Drilling and Production Practice, 1962.