

23
2 y



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"SELECCION DE DISPAROS EN
POZOS PETROLEROS"

T E S I S

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



MEXICO, D. F.

FALLA DE INGEN

1991



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.

SELECCION DE DISPAROS EN POZOS PETROLEROS

INDICE GENERAL

TEMARIO	PAGINA
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
I.1 CONCEPTOS GENERALES	3
I.1.1 DISPAROS	3
I.1.2 DIVERSOS TIPOS DE DISPAROS	4
I.1.3 PISTOLAS	7
I.1.4 CARGAS	7
I.1.5 TIPOS DE CARGAS	9
I.1.6 EXPLOSION	8
I.1.7 DETONACION	8
I.1.8 EXPLOSIVOS MAS USUALES EN POZOS PETROLEROS	10
I.2 RECOMENDACIONES NECESARIAS EN LA SELECCION DE LAS PISTOLAS	10
I.2.1 PENETRACION DE LA CARGA	10
I.2.2 LAVADO DE LAS PERFORACIONES	14
I.2.3 DENSIDAD Y DISTRIBUCION RADIAL DE LAS PERFORACIONES	15
I.2.4 FASES DE DISPAROS	18
I.2.5 DIAMETRO DE LAS PERFORACIONES	21
CAPITULO II	
RELACION DE PRODUCTIVIDAD COMO UNA FUNCION DE LA PENETRACION Y DENSIDAD DE LOS DISPAROS	32
II.1 RELACION DE PRODUCTIVIDAD	32
II.1.1 DAÑO A LA FORMACION	33
II.1.2 DAÑO POR CONVERGENCIA DE FLUJO	33
II.1.3 DAÑO POR ZONA COMPACTADA	33

TEMARIO	PAGINA
II.1.4 DAÑO POR INCLINACION DEL POZO	33
II.2 DISEÑO DE LAS PERFORACIONES Y FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RELACION DE PRODUCTIVIDAD	35
II.3 EVALUACION DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RELACION DE PRODUCTIVIDAD DE LOS POZOS	36
II.3.1 DAÑO A LA FORMACION	36
II.3.2 DETERMINACION DEL FACTOR DE DAÑO REAL	37
II.3.3 DETERMINACION DE LA ANISOTROPIA DE LA FORMACION	37
II.3.4 DETERMINACION DE LAMINACIONES IMPERMEABLES	37
II.3.5 DETERMINACION DE FRACTURAS NATURALES	37
II.3.6 PENETRACION PARCIAL DEL YACIMIENTO	38
II.3.7 DETERMINACION DEL FACTOR DE TURBULENCIA	38
II.3.8 DETERMINACION DE PSEUDO FACTOR DE DAÑO CAUSADO POR LA DESVIACION DEL POZO	39
II.3.9 DETERMINACION DE RADIO DE DRENE Y RADIO DEL POZO	39
CAPITULO III	
METODOS PARA OPTIMIZAR LA RELACION DE PRODUCTIVIDAD	41
III.1 METODO DE MUSKAT	41
III.2 METODO DE HARRIS	43
III.3 METODO DE HONG	46
III.4 METODO ELECTRICO-ANALOGICO DE Mc DOWELL Y MUSKAT	50
III.5 METODO ELECTROLITICO DE HOWARD Y WATSON	51
III.6 METODO DE LOCKE	53
III.7 METODO DE KLOTZ Y COLABORADORES	55
III.8 METODO DE TARIQ Y COLABORADORES	57
III.9 METODO DE TODD Y BRADLEY	60

TEMARIO	PAGINA
III.10 LOS METODOS MAS PRACTICOS Y ACONSEJABLES	65
CAPITULO IV	
DIFERENTES TIPOS DE PISTOLAS	66
IV.1 A TRAVES DE LA TUBERIA DE PRODUCCION	66
IV.2 A TRAVES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO	68
CAPITULO V	
TECNICAS DIVERSAS DE DISPAROS	73
V.1 USANDO PRESION DIFERENCIAL NEGATIVA	73
V.2 USANDO PRESION DIFERENCIAL POSITIVA	74
V.3 TECNICAS HIBRIDAS	74
V.4 TECNICAS DE PISTOLAS BAJADAS CON TUBERIA DE PRODUCCION	76
CAPITULO VI	
EJEMPLOS DE APLICACION EN POZOS	90
VI.1 PROGRAMA SPAN SCHLUMBERGER	91
VI.2 VERIFICACION DE LOS DISPAROS REALIZADOS	95
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
NOMENCLATURA	
BIBLIOGRAFIA	

INTRODUCCION

A partir de 1970, año en que se inicio la tecnica de perforacion de tuberias cementadas en la formacion productora para conseguir la produccion de hidrocarburos, los métodos de disparo y el diseño de las cargas se ha ido perfeccionando cada vez mas con el fin de lograr una optima comunicacion entre el yacimiento y el pozo.

Disparar es la mas importante de todas las operaciones en la terminacion de los pozos con tuberias de revestimiento.

Un disparo bien diseñado posibilitara el flujo de los hidrocarburos en forma eficiente.

La operacion del disparo no es una técnica aislada, ya que debe prestarse particular atencion al tipo de tuberia cementada, la limpieza de los fluidos de terminacion, factores y parametros de los disparos asi como el diametro de la tuberia de produccion, ya que este condicionara el diametro exterior de las pistolas, las cuales tendran mayor o menor penetracion.

Una operacion con éxito, depende tanto de la calidad del trabajo desempeñado durante la etapa de planeacion como de una ejecucion adecuada.

El grado de la tuberia de revestimiento, densidad del disparo, tipo de formacion, humedad y temperatura, son algunos de los factores que pueden afectar el resultado de los disparos.

La etapa de terminación de un pozo, exploratorio o de desarrollo, es muy importante y dentro de esta la operacion de perforacion de la tuberia tambien lo es, porque, en pozos exploratorios, se trata con las perforaciones de poner en comunicacion el yacimiento que se explora con el pozo, para determinar que fluidos contiene, que es el objetivo principal de esta operacion; para ello, las pruebas de produccion que se efectuan deben ser confiables, esto es, la comunicacion entre el yacimiento y el pozo debe ser real y efectiva; una vez delimitado el campo hay que desarrollarlo, perforando pozos que deben producir eficientemente, de acuerdo con lo que se determine a través de las perforaciones. La eficiencia con que esto se realice dependerá del diseño de perforaciones que se haya hecho.

Antes de implantarse la técnica de disparos, la mayoría de las terminaciones en los pozos se hacían en agujero descubierto pero la producción de arena era un problema común, entonces se corría una rejilla o una tubería corta ranurada a través de la zona productora, cabe mencionar que teóricamente las terminaciones en agujero descubierto representan la situación ideal debido a que presentan la mayor cantidad de área de flujo y experimentan caídas de presión extremadamente bajas, sin embargo, muchos problemas aunados a este

tipo de terminación la hacen impráctica, estos problemas incluyen derrumbes e inestabilidad del agujero; además se tiene un control inadecuado sobre las relaciones gas-aceite y agua-aceite.

La mayoría de estos problemas pueden ser corregidos mediante la cementación de una tubería de revestimiento a través del intervalo productor y la operación posterior del disparo, para establecer el flujo de la formación hacia el pozo.

CAPITULO I

I.1. CONCEPTOS GENERALES

Aunque existe la tecnología necesaria en el mercado comercial para asegurar buenos disparos en los pozos petroleros, actualmente en muchas áreas de explotación regularmente se obtienen disparos deficientes. Las tres causas principales que originan disparos deficientes son:

a.- Desconocimiento de los requerimientos para obtener disparos óptimos.

b.- Control inadecuado del claro (espacio entre la carga y la tubería de revestimiento), particularmente cuando se corren las tuberías a través de la tubería de producción.

c.- La práctica generalizada de preferir realizar los disparos en función de su precio, en lugar de su calidad y objetivo.

I.1.1. DISPAROS

Disparo.- Es la operación mediante la cual se perfora la tubería de revestimiento de explotación, para establecer un conducto o canal que comunique los fluidos de la formación productora con el pozo y de este a la superficie.

Secuencia para efectuar un disparo de producción, suponiendo de antemano que el pozo reúne las condiciones favorables para el tipo de pistolas programadas.

1.-Probar líneas superficiales de control con 350 ó 700 kg/cm², dependiendo de la serie de árbol.

2.-Instalar lubricador, probarlo de acuerdo a las series del árbol de válvulas.

3.-Calibrar la tubería de producción y la parte inferior de la tubería de revestimiento hasta quedar libre el intervalo por disparar, esto se hará con una barra cuyo diámetro será de acuerdo a la tubería de producción ó al diámetro igual a las pistolas por utilizar, llevando además el localizador de coples para dejar bien definido el intervalo que se va a disparar.

4.-Se debe contar con un registro radiactivo con coples cuya correlación debió ser determinada con anterioridad de la curva neutrón en agujero entubado.

5.-Efectuar los disparos de producción.

6.-Observar pozos e inducir por sondeo, gas de bombeo neumático o nitrógeno de ser necesario.

1.1.2. DIVERSOS TIPOS DE DISPAROS

a) DISPAROS CON BALA

Este tipo de disparos se utilizó en 1930, necesitaron 8 días y 11 corridas para disparar únicamente 80 tiros a profundidades menores de 915 metros. Esto permitió correr en el pozo la tubería de revestimiento a través de la zona productiva, aislarla mediante la cementación y establecer un control sobre la exposición de la formación nunca antes logrado. Con la operación de disparo la exposición de la formación pudo ser limitada a las partes solamente deseadas, minimizando o excluyendo así la producción de agua y a menudo corrigiendo los problemas de arena.

Las pistolas a bala, de 3 1/2 pg. de diámetros o mayores, se utilizan en formaciones con resistencia a la compresión inferior a 5000 lb/pg², los disparos con balas de 1 1/4 pg. o tamaño mayor, pueden proporcionar una penetración mayor que muchas pistolas a chorro en formaciones con resistencia a la compresión inferior a 2000 lb/pg². (Fig. 1.1), sin embargo, deben efectuarse pruebas con pistolas específicas a chorro y a bala, con rocas de yacimientos con resistencia a la compresión variable, usando pruebas similares a las descritas en la sección 2 A.P.I.43, para validar estas conclusiones en casos particulares.

La velocidad de la bala en el cañón es aproximadamente de 3000 pies/sag. la bala pierde velocidad y energía cuando el claro excede de 0.5 pg. Este claro de 0.5 pg. es el que se utiliza al realizar la mayoría de las pruebas comparativas. Con un claro igual a cero la penetración aumenta cerca del 15 % sobre la obtenida con un claro de 0.5 pg. la pérdida en la penetración con un claro de 1 pg. es de aproximadamente el 25 % de la penetración con claro de 0.5 pg. y con un claro de 2 pg. la pérdida es de 30 %.

La eliminación de los residuos en los agujeros no depende de la descentralización si la bala lleva un instrumento eliminador de residuos en su oliva o punta. Este dispositivo es más efectivo, para eliminar los residuos, que utilizar un claro igual a cero.

Las pistolas a bala, pueden diseñarse para disparar selectiva o simultáneamente.

Este tipo de disparos dominó la industria petrolera en los años cincuenta, pero fue necesario mejorarla. Por medio de investigaciones aparecieron las cargas configuradas u operaciones de disparos a chorro los cuales resultaron más efectivos.

b) DISPAROS A CHORRO

El proceso de disparar a chorro se ilustra en la fig.1.2. un detonador eléctrico 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 internas y externas. El incremento continuo de la presión sobre el recubrimiento provoca la expulsión de un haz o chorro de partículas finas, en forma de aguja, a una velocidad aproximada de 20,000 pies/seg. en su punta, con una presión estimada de 5 millones de lb/pg².

La capa exterior del recubrimiento se colapsa para formar una corriente metálica que se mueve con una velocidad de 1500 a 3000 pies/seg. Este residuo del recubrimiento exterior puede tener la forma de un solo cuerpo llamado "Zanahoria" o corriente de partículas metálicas. Las cargas de calidad superior generalmente están exentas de la "Zanahoria", estando su residuo constituido por partículas del tamaño de arena o más pequeñas.

Debido a la sensibilidad del proceso de disparar 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 deficiente. Esta puede generar un tamaño irregular o inadecuado del agujero, una pobre penetración o ningún disparo.

Algunas de las causas del mal funcionamiento son:

- a) Corriente ó voltaje insuficiente al detonador.
- b) Un detonador defectuoso ó de baja calidad.
- c) Un cordón explosivo aplastado o torcido.
- d) Una carga intensificada pobremente empaçada.
- e) El explosivo principal de baja calidad o pobremente empaçado.
- f) El recubrimiento incorrectamente colocado o sin hacer contacto efectivo con el explosivo.

El agua o la humedad en las pistolas, el cordón explosivo ó las cargas, puede provocar el mal funcionamiento o una detonación de bajo orden; el añejamiento a altas temperaturas, del explosivo en el cordón explosivo o en la carga, puede reducir su efectividad o causar una detonación de baja potencia. Para asegurar un buen comportamiento y un trabajo seguro al disparar, debe seguirse cuidadosamente los procedimientos establecidos para cargar, correr y disparar las pistolas.

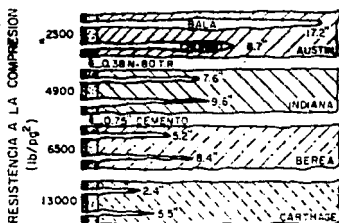


FIG.1.1 Efecto de la resistencia de la formación a la compresión sobre la eficiencia de penetración de pistolas a bala y a chorro.

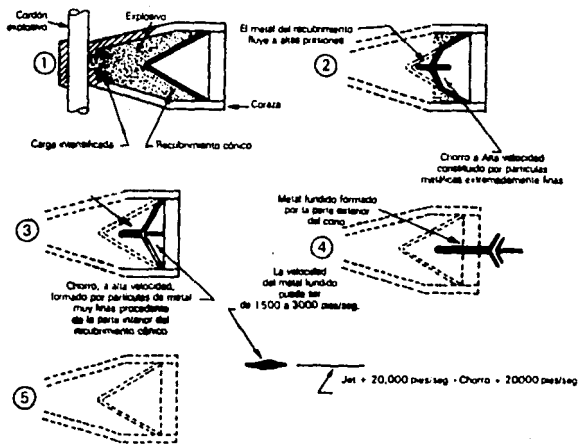


FIG.1.2 Proceso de disparo a chorro usando un recubrimiento de metal adido.

1.1.3. PISTOLAS

PISTOLA.-Es esencialmente el transportador de la carga y ésta es el elemento explosivo.

1.1.4. CARGAS

CARGA.-Es el elemento explosivo. La carga típica para pozos petroleros consiste de una cubierta de acero, explosivos, un cono forrador y un detonador operado por medio de un cordón explosivo.

El funcionamiento es el siguiente: Cuando detona la carga, la onda de detonación se expande esféricamente desde la columna del explosivo causando el colapso del cono forrador. Las partículas del cono forrador en su destrucción, chocan a lo largo del eje de la carga causando la creación de un haz o chorro metálico de partículas finas de alta velocidad en un estado plástico, acompañada con otra masa de metal mucho más lenta, la cual usualmente se nombra "slug" o cola que son los residuos del recubrimiento metálico que puede formar un tapón en el agujero.

Para evitar los residuos del recubrimiento metálico del cono forrador hechos de metal sólido y que taponan el agujero disparado, actualmente las cargas contienen un cono forrador hecho de metal en polvo forrados con prensa a presión. Los residuos producidos con los conos forradores de polvo de metal se desintegran con el chorro del disparo. La carga transforma entre el 30 y 35 % la energía química del explosivo a energía cinética del chorro. La velocidad de la punta del chorro es de aproximadamente 10,000 m/seg. (30,000 pies/seg), mientras la parte trasera tiene una velocidad de 1000 m/seg.

La presión o fuerza instantánea, generada por la onda de choque, puede ser del orden de 4,000,000 psi estas altas presiones resultan en un flujo unidimensional de alta energía, el cual se desgasta continuamente durante el proceso de penetración continuando hasta que el chorro se acaba totalmente o hasta el momento en que la velocidad de las partículas sobrantes del chorro bajan a menos de la velocidad mínima de penetración necesaria para perforar el material del caso en particular. Este proceso se puede visualizar imaginando una columna de agua a alta presión penetrando un barro suave.

Ahora podemos concluir que para que la carga sea efectiva, debe lograr la velocidad más alta posible la punta del chorro y decrementar la velocidad trasera del mismo, a un valor apenas arriba de la velocidad mínima de penetración del material en cuestión, así como la dirección recta de él también es importante para asegurar la entrada continua de la punta del chorro, sobre la misma cara del material por penetrarse. En esta forma se obtiene la extensión máxima del chorro efectivo (fig.1.3).

I.1.5. TIPOS DE CARGAS

Tenemos dos tipos de cargas clasificadas en el mercado:

a) Para altas temperaturas.

Las de temperaturas altas, utilizan explosivos conocidos como: "HMX", "HNS", "PYX", que son fabricadas especialmente para estas condiciones.

b) Para bajas temperaturas.

Las de temperaturas bajas, son las que comúnmente se utilizan y tienen como explosivos "RDX" (ciclonita en polvo). La fig.1.4 y 1.5, nos muestran el rango de auto detonamiento con respecto al tiempo de exposición a diferentes temperaturas.

Se recomienda no emplear las cargas para alta temperatura en pozos del orden de 300 a 400 'F, debido a la sensibilidad del disparo, la poca penetración, la escasez y el alto costo.

Como regla general se deben utilizar cargas para temperaturas bajas, aunque estén cerca del límite superior, ayudándose para su buen funcionamiento con la siguiente recomendación:

- Se puede reducir la temperatura en el fondo del pozo mediante la circulación de fluidos de baja temperatura. Este procedimiento es especialmente aplicable para pistolas que se corren a través de la tubería de producción, inmediatamente después de suspender la circulación del fluido.

Para pozos con temperaturas muy altas, no podemos tener otra alternativa que correr el paquete completo (detonador, cordón explosivo y la carga de alta temperatura).

Las presiones en el fondo del pozo pueden ser otra limitante sobre todo en aquellas cargas que están expuestas al medio, sin embargo, pocos pozos son disparados cuando la presión es un problema.

I.1.6. EXPLOSION

Es un evento caracterizado por la producción de una gran onda de choque de gran energía.

I.1.7. DETONACION

Cuando la oxidación del material se produce en un tiempo muy corto la liberación de energía en forma de calor y presión alcanza niveles muy altos denominándose al proceso de combustión así producido como detonación.

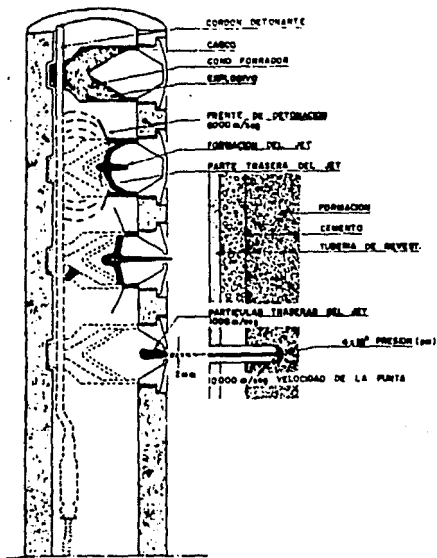


FIG.1.3 Funcionamiento de la carga.

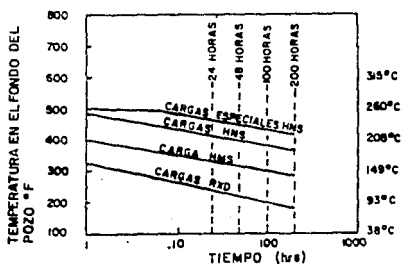


FIG.1.4 Rango de explosivos T° vs. tiempo.

1.1.2. EXPLOSIVOS MAS USUALES EN POZOS PETROLEROS

Sustancias o compuestos químicos, carbono, hidrogeno, oxigeno y nitrogeno, capaces de detonar. (tabla 1).

Los mas usuales son:

- a) RDX.- Trinitramina de ciclotrimetileno (clonita).
- b) HMX.- Tetranitramina de ciclotrimetileno.
- c) HNS.- Eranitrostilbeno (octogeno).
- d) PYX.- Dinitropiridina.

1.2. RECOMENDACIONES NECESARIAS EN LA SELECCION DE LAS PISTOLAS

1.2.1. PENETRACION DE LA CARGA

Las perforaciones deben extenderse algunas pulgadas dentro de la formacion, preferiblemente mas alla de la zona dañada debido a la invasion de los fluidos de perforacion.

La penetracion de la carga depende esencialmente del tipo de formacion (en terminos de densidad y fuerza compresiva), espesor del cemento y de la tuberia de revestimiento en el pozo. La penetracion se define como la distancia que el chorro de la carga penetra dentro de la formacion, su principal objetivo es el de traspasar la zona dañada.

Existe una grafica teorica que predice la penetracion para diferentes tipos de formacion, el procedimiento es el siguiente: Tomando la resistencia a la compresion de la formacion se sube hasta interceptar la curva correspondiente, prolongamos a la izquierda y obtenemos un factor que multiplicado por la penetracion obtenida de la prueba de arenisco Beres, nos da un valor semejante al real, ya considerando el espesor de cemento, tuberia de revestimiento y fluido de terminacion fig.1.6.

Para observar el impacto de la penetracion en la productividad, se tienen graficas, resultado de modelos matematicos, que muestran el comportamiento de la razon de productividad en función de la profundidad de penetracion. En estas se observa que el incremento de penetracion la productividad aumenta. Estudios anteriores indican que alrededor o arriba de 6 ps. de penetracion, la productividad tiende a disminuir y comienza en ese momento la influencia de la densidad de los disparos (fig.1.7).

Otros investigadores, estudiaron el comportamiento de este parametro, tales como Harris(14), Hong(15), Klotz(19), etc. Ellos concluyen al igual que Locke(18), que el incremento en la

* Referencias al final del trabajo

NOMBRE COMUN	NITROGLICERINA	TNT	FULMINEATO DE MERCURIO	AZIDE DE PLUMBO	PETN	RDX	HMX	HNS	PYX
FÓRMULA QUÍMICA	$C_3H_5NO_3$	$C_7H_5O_6N_3$	$Hg(CNO)_2$	PbN_3	$C_{15}H_{10}O_{12}$	$C_3H_5N_3O_6$	$C_4H_8N_8O_{16}$	$C_6H_6O_{12}$	$C_{12}H_8N_{16}O_{32}$
PESO MOLECULAR	227	227	285	291.3	316.2	221.1	296.2	450	621.3
PUNTO °C DE FUSIÓN	2 A 13	81	EXPLOTA	EXPLOTA	141	204	273	319	360
DENSIDAD (g/cm ³)	1.59	1.65	4.42	4.7	1.77	1.82	1.90	1.74	1.77
PRESIÓN DE DETONACIÓN (bar)	220	185	85	95	300	347	393	190	242
VELOCIDAD DE DETONACIÓN (m/s)	7380	6950	5400	5600	7980	8750	9100	7000	7448
CALOR DE EXPLOSIÓN	1600	1080	427	367	1385	1280	1365	1000	
VOLUMEN DE GAS (cm ³ /g)	715	690	315	308	790	908	908		

TABLA I. Propiedades físicas de altos explosivos.

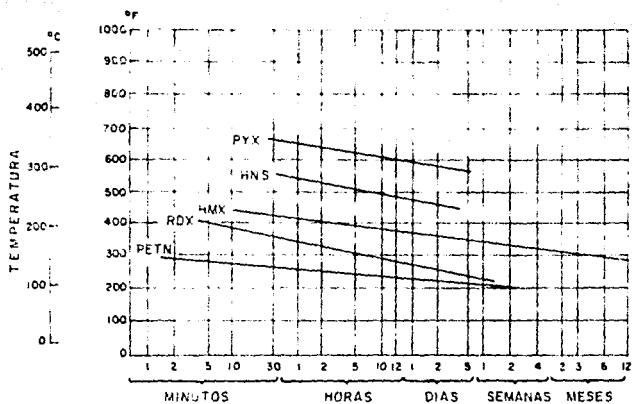


FIG.15 Gráfica de temperatura vs tiempo.

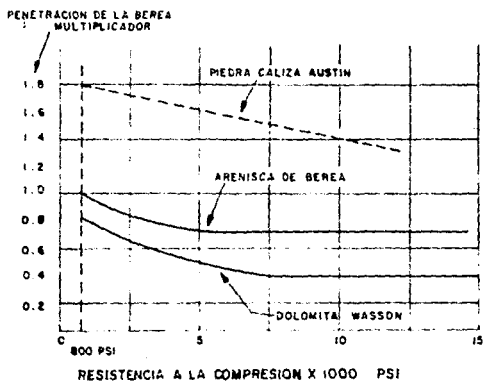


FIG. 1.6

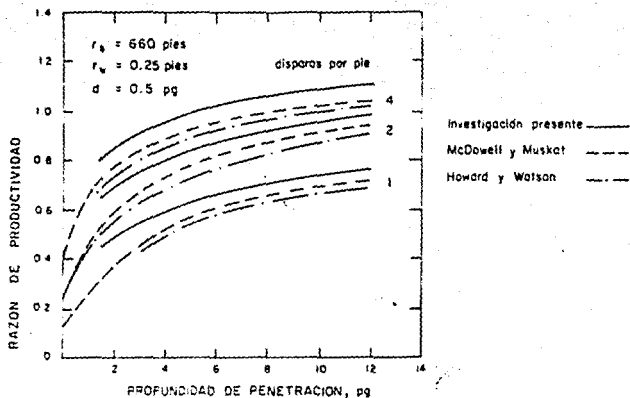


FIG. I.7 Efecto en la razón de productividad de la profundidad de penetración y densidad de disparos.

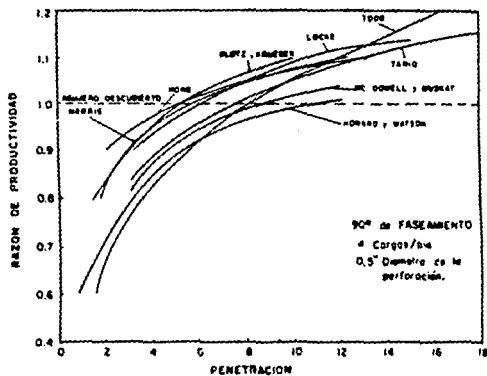


FIG. I.8 Relación de productividad vs profundidad de penetración del disparo.

productividad en función de la profundidad de penetración es muy significativa, para penetraciones bajas como aquellas esperadas con las pistolas bajadas a través de la tubería de producción. La fig.1.8, compara los resultados de Harris, Hong, Klotz, Locke, y recientemente Tariq(20).

La penetración contiene otro elemento que es el diámetro de entrada ocasionado por el disparo, aunque arriba de 0.25 pg. de diámetro el mejoramiento en productividad es mínimo. Es importante en pozos donde la penetración y la densidad es baja. También en terminaciones para estimulación el diámetro de entrada juega un papel importante, ya que las caídas de presión a través de estos, la distribución de disparos y los volúmenes de fluido bombeado deben planearse adecuadamente. Por último para terminaciones con empacamiento de grava el diámetro de entrada debe ser considerado, en estos casos es recomendable obtener diámetros mayores que los normales (fig.1.9).

1.2.2. LAVADO DE LAS PERFORACIONES

Detritos de cargas o de formación deben ser removidos de los pozos perforados.

Por esta razón se requiere una diferencial de presión a favor de la formación; de modo que las perforaciones se laven todas al mismo momento.

El fluido de terminación debe reunir ciertas características para no dañar la formación tales como:

- Debe ser compatible con el fluido de la formación, no usar ácidos y de preferencia disparar en seno de aceite, agua o ácido, hasta donde los márgenes económicos lo permitan. No es recomendable disparar en estas condiciones con una columna en la parte superior de lodo.

- Se recomienda utilizar una presión hidrostática, al momento del disparo, menor que la de la formación.

- Si se dispara con presión positiva (presión mayor que la de la formación), en general se debe realizar en pozos llenos con diesel o agua salada, y de ser posible usar una gelatina con densidad de 0.9 a 1.7 gr/cm³.

Debemos tomar en cuenta las consecuencias que acarrea cuando se dispara en el seno de lodos pesados o fluidos relativamente sucios, se tiene que:

- Es virtualmente imposible remover los tapones de lodo o sedimentos de todos los disparos por sonda o por flujo.

- Los tapones de lodo o sedimento no son fácilmente removidos de los

agujeros del disparo, con ácido o con otros productos químicos, a menos que cada disparo sea fracturado.

Hasta cierto punto en todos los pozos existirá una zona dañada, y la técnica de disparo y limpieza diseñadas para remover este daño, deben ser incluidas en todos los procedimientos de terminación (fig.1.10).

1.2.3. DENSIDAD Y DISTRIBUCION RADIAL DE LAS PERFORACIONES

Después de una óptima penetración y del lavado de las perforaciones, la densidad de los disparos, así como su distribución radial son los factores de mayor importancia ya que estos van a controlar la productividad del pozo.

Mientras mas anisotrópica o laminosa sea la formación, se requerirá una mayor densidad de disparos.

La distribución radial de los disparos es importante ya que diferencias de hasta el 15 % de productividad pueden ocurrir entre el mejor y el peor de los casos. Puede resultar necesario el uso de cañones sin distribución radial, para asegurar una penetración adecuada.

La densidad de disparo se define como el número de cargas por metro o pie dispuestas en la pistola, esta limitada por el tamaño de esta, siendo las comunes las de 13 cargas por metro.

La fig.1.11. Muestra que a mayor densidad de disparo existe un mejoramiento en la productividad. Ahora si se compara el efecto entre las fases de 0 y 90 grados (fig.1.12), se tiene una mejor respuesta en esta última en cuanto a productividad, producido por un mejor drenaje del fluido hacia el pozo con la fase de 90 grados.

Analizando las gráficas, si disminuimos la densidad del disparo de 4 a 2 cargas por pie igual sucede con la razón de productividad de un 10 a 30 %, por el contrario si aumentamos a 8 ó 12 cargas por pie. La razón de productividad se incrementa significativamente, esto solo es logrado con pistola de especificaciones para alta densidad.

Un argumento que se da con frecuencia para no aumentar la densidad de disparo es que se produce daño a la tubería disminuyendo su resistencia y debilitándola, esto se acentúa con una mala cementación y es mayor cuando se utilizan pistolas unidireccionales (ángulo de fase cero). En general, en tuberías de revestimiento con buenas

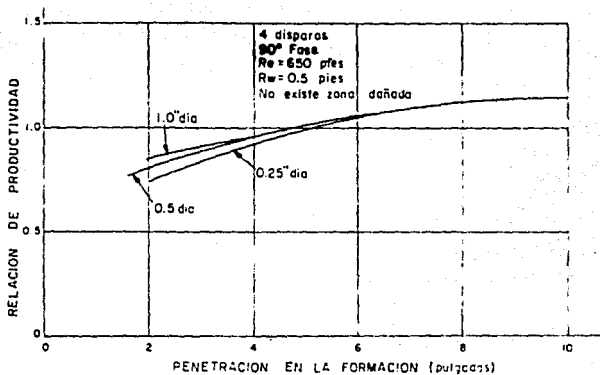


FIG.1.9 Relación de productividad como una función de la penetración y tamaño de agujero.

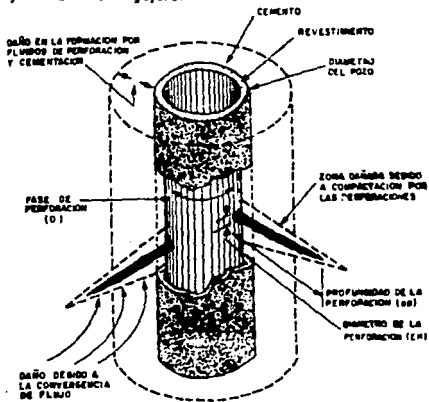


FIG.1.10 Parámetros que afectan la productividad.

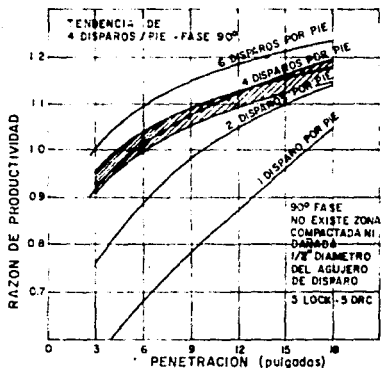


FIG. 1.11 Razón de productividad vs profundidad de penetración en función de la densidad de disparo.

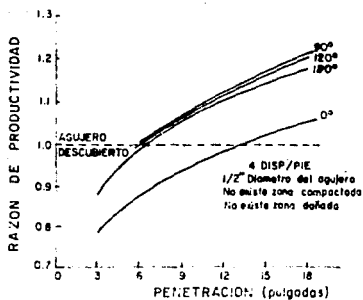


FIG. 1.12 Razón de productividad vs profundidad de penetración en función del ángulo de fase.

condiciones se pueden efectuar hasta 12 disparos por pie con fase de 60 o 90 grados. Los factores que determinan la magnitud del daño de la T.F., son principalmente el tipo de pistola, la cantidad de explosivos (gramos) y la calidad de la cementación dentro de la tubería.

Mientras más heterogénea y estratificada sea la formación, se requerirá una mayor densidad de disparo. Aumentando la densidad del disparo se aumenta el área de flujo y se reduce la caída de presión y el gasto por orificio, requeridos para mantener la producción deseada. En otros casos, sobre todo cuando se anticipa la producción de arena o conificación de agua o cuando el pozo sea empacado con grava, densidades de hasta 12 o 14 disparos por pie. Pueden utilizarse con diámetros de entrada de 0.75 in. o más.

Cuando se desea controlar el flujo en zonas de alta producción (espesor considerable) o se desea hacer fracturamientos con entrada limitada se utiliza menor densidad de disparo.

Los campos petrolíferos mexicanos usualmente se disparan con 13 cargas por metro, no obstante la productividad se incrementa con mayor densidad, dependiendo del tipo de formación:

- Formaciones con porosidad primaria.

En formaciones blandas (arenas) con porosidad primaria se recomienda la técnica de entrada limitada.

La densidad que generalmente se utiliza es: Para zonas de baja permeabilidad es de 8-12 cargas por metro y para alta de 4-8 cargas por metro.

- Formaciones fracturadas.

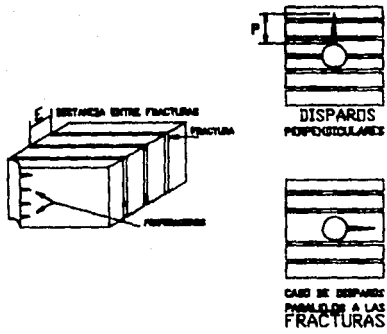
En algunas formaciones fracturadas es aconsejable aumentar la densidad de disparos para incrementar la probabilidad de hacer producir las fracturas que intersectan al pozo. (fig. 1.13, 14).

Para pozos con alta producción de aceite y gas, la densidad de disparo ayuda a optimizar la caída de presión requerida para una mejor explotación.

1.2.4. FASES DE DISPAROS

Se define como la distribución en una o varias direcciones que tienen las cargas dentro de la pistola para ser disparadas. La fase puede ser de 0, 60, 90, 120 y 180 grados.

El ángulo de fase entre las perforaciones sucesivas es un parámetro importante.



FRACTURAS VERTICALES

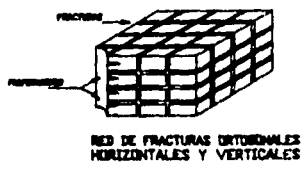


FIG. 113

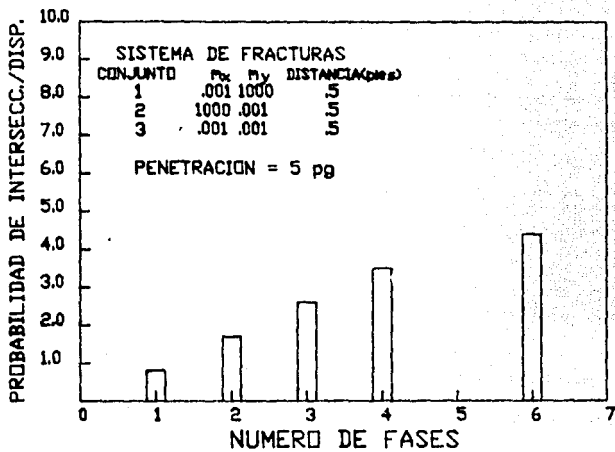


FIG. 1.14 Probabilidad de intersección de fracturas.

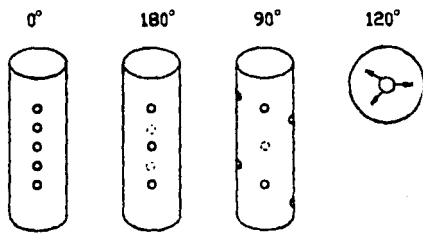


FIG. 1.15

Stanley Locke (18) realizó un estudio en el cual tomó como referencia una misma profundidad de penetración y varió la fase o ángulo de los disparos, como resultado de sus pruebas concluyó que el de 90 grados produjo mejores resultados en cuanto a productividad.

La fig. 1.15 y 16 muestra estos resultados. Esta condición se ha comprobado en la práctica.

Se tiene que la productividad de la formación es mejorada cuando se usan modelos espirales de disparos. Y en la fase de 0 grados (en línea) los disparos resultan en decrementos significativos en la razón de productividad sobre los modelos espirales.

La fase de cero grados es utilizada en terminaciones a través de la tubería de producción, la cual trae consigo tener pistolas de diámetros muy reducidos, entonces para una penetración buena y uniforme, estas pistolas deben ser posicionadas de tal forma que estén pegadas a la tubería de revestimiento, estas son comúnmente empleadas en la Sonda de Campeche.

En terminaciones para fracturamiento o estimulación la fase de 90 grados ofrece mejores condiciones, ya que existe una dirección preferencial hacia donde se desarrolla el fracturamiento.

1.2.5. DIAMETRO DE LAS PERFORACIONES

Para minimizar la caída de presión a través de perforaciones para empaque de grava el diámetro debe ser de 0.6 a 0.8 pg. Una caída de presión excesiva indica que la densidad de disparos debe ser aumentada. Operaciones de fracturamiento y de acidificación pueden también necesitar un aumento de la densidad de disparos.

En los demás casos se considera que un diámetro de perforación de 3/8 pg. o más es suficiente para permitir un lavado adecuado y para evitar el taponamiento de la perforación con asfalto o escamas (fig. 1.17).

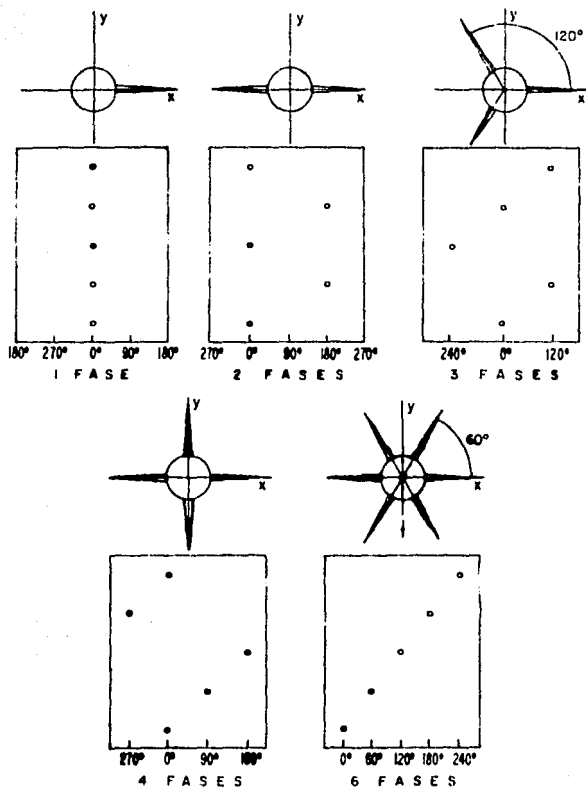


FIG. 1.16 Tipos de pistolas considerados en el estudio.

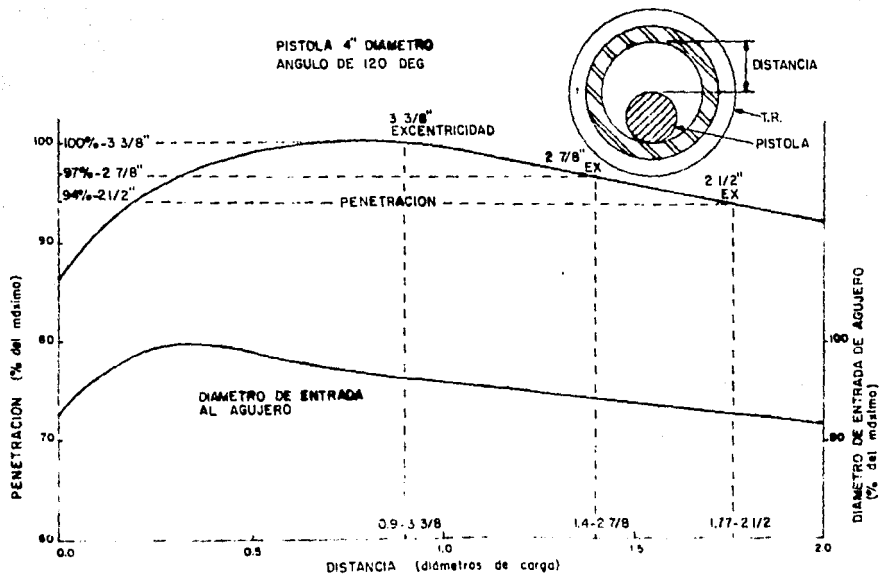
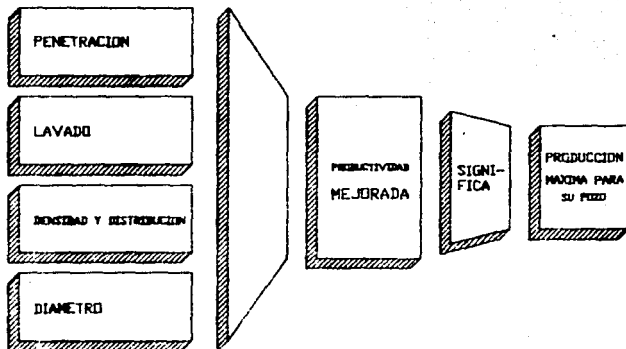


FIG. 1.17 Penetración característica y tamaño de entrada al agujero vs distancia.



PRUEBAS API PARA EVALUAR LAS PISTOLAS

Estas pruebas referente a la evaluación de las pistolas se controlan bajo las normas descritas en la sección 1, del boletín API RP-43, tercera edición de Octubre de 1974, son una revisión del sistema de pruebas superficiales desarrollado a principios de 1940.

Estas pruebas fueron diseñadas para evaluar las pistolas de bala y chorro, a condiciones superficiales, en probadores de concreto.

Para esto se utiliza un probador, que consiste de un tramo de tubería de revestimiento cementado dentro de un barril usando un saco de 94 lb de cemento clase A y 138 lb de arena seca, mezclado con 0.43 o 43.3 lb (5.1 gal) de agua potable.

Al tiempo de disparar, la mezcla de cemento y arena debe de tener un mínimo de 28 días de fraguado y una resistencia mínima a la tensión de 400 lb/pq².

Las pistolas a bala, se disparan en aire y las de chorro en agua. El tamaño del agujero, la altura de los residuos y la penetración de los disparos se miden y registran en las formas API RP-43 D.

Valor de las pruebas de la sección 1, de API RP-43. Estas pruebas superficiales son útiles para pruebas en el campo; para evaluar los cambios en el tamaño de los disparos, debido a los variantes claros de las pistolas; y para evaluar la consistencia del comportamiento de las pistolas. Pueden ser útiles para determinar si las cargas preformadas han sido dañadas durante su traslado al campo.

Los resultados de estas pruebas no indican el potencial de flujo a través de los disparos o la susceptibilidad de los disparos a ser limpiados, ni evalúan el taponamiento de los disparos con los residuos del recubrimiento fundido, o "Zanahoria", debido a que éstas tienden a saltar y desviarse fuera de los disparos cuando estos se efectúan a presión atmosférica, particularmente al usar pistolas con cargas descubiertas. Tampoco los residuos son lavados de los disparos como sucede en las pruebas de flujo.

En la forma 43 D del API se reportan los datos de las pruebas correspondientes a las secciones 1 y 2 del API RP-43, tercera edición de Octubre de 1974.

Las pruebas descritas en la sección 2, API RP-43, tercera edición, Octubre de 1974, están diseñadas para evaluar, bajo condiciones simuladas del yacimiento y del fondo del pozo, el tamaño del agujero, la penetración, y la habilidad de pistolas específicas para proporcionar disparos con alta eficiencia de flujo. En las pruebas de la sección 2 API RP-43, se usa el aparato y el procedimiento desarrollado por la compañía Exxon.

La investigación desarrollada por Exxon descubrió la trascendencia de las observaciones siguientes:

- a).- El taponamiento de los disparos con lodo o con residuos de las cargas preformadas.
- b) Disparar con una presión diferencial hacia el fondo del pozo.
- c) El efecto de la resistencia a la compresión de la formación sobre el tamaño del agujero de los disparos y su penetración.

Este trabajo condujo al desarrollo de:

- Cargas preformadas no obturantes.
- Pistolas disparables a través de la tubería de producción.
- Pistolas a bala mejoradas.
- La norma API RP-43, sección 2, para evaluar los disparos bajo condiciones de flujo simuladas en el pozo.

El desarrollo de pistolas a chorro efectivos, ha mejorado la penetración cuando se presentan formaciones de alta resistencia a la compresión, cementos de alta resistencia a la compresión, y/o tuberías de revestimiento de alta resistencia con espesor grueso.

Sin embargo, el método para calcular la eficiencia de flujo fue cambiado en el procedimiento estándar API revisado en 1971, cuyo procedimiento de evaluación actual se describe a continuación:

Evaluación del flujo a través de los disparos.- Antes de preparar el probador se mide la permeabilidad efectiva original (K_0), a la Kerosina de un núcleo de arenisca Berea en "estado restaurado", la permeabilidad efectiva a la Kerosina del probador de arenisca Berea disparado (K_p), después de dispararlo y limpiarlo a contra flujo.

A continuación se calcula la relación de la permeabilidad efectiva con disparo a la permeabilidad efectiva original del núcleo. Esta relación de permeabilidad experimental fue originalmente denominada IFP o índice de flujo del pozo en la sección 2, del API RP-43, de Octubre de 1962.

K_i .- Es la permeabilidad ideal de un núcleo disparado con un disparo limpio de la misma penetración que le del agujero usado para obtener K_p y está basada en un disparo de 0.4 pg. de diámetro.

El valor de K_i para cualquier penetración de disparo en un núcleo de longitud dada, puede determinarse usando el programa de cómputo disponible en el apéndice A del API RP-43, tercera edición, de Octubre de 1974.

K1/Ko.- Es la relacion de la permeabilidad efectiva del nucleo perforado idealmente a la permeabilidad del nucleo original.

La eficiencia de flujo del nucleo (EFN), $EFN = (k_p/k_o) / (k_1/k_o)$. Representa la efectividad relativa del disparo para conducir un fluido comparada con la proporcionada por una perforacion ideal 'sin daño' de 0.4 pg. de diámetro.

La penetracion total en el nucleo en pulgadas, se conoce como PTP. Es siempre inferior de 1/8 de pg. que la PTP, penetracion total en el probador.

La penetracion efectiva en el nucleo, PEN es la eficiencia de flujo en el nucleo, EFN, multiplicada por la penetracion total en el nucleo, PTN.

$PEN = (EFN)(PTN)$. Esto proporciona una manera de comparar la capacidad de flujo de los disparos con penetracion diferente (PTN) y con eficiencia de flujo diferente (EFN). El disparo con mayor PEN, en un probador, (nucleo), de la misma longitud, debiera de tener el menor gasto bajo condiciones de agujero limpio a una presion diferente dada.

Todas las pruebas de disparos reportadas por las compaÑias de servicios en las formas 40 D del API, seccion 2, se efectúan en arenisca Berea con una resistencia a la compresion promedio del orden de 6500 lb/pg², a menos, que se señale una resistencia diferente a la compresion. Por lo tanto la penetracion total en el probador (PTP) para cada pistola, debiera corregirse por la resistencia a la compresion de la formacion particular en el fondo del pozo, si los datos de la prueba API se usan para seleccionar una pistola para un pozo especifico.

Por ejemplo, los datos de la prueba API RF-40, seccion 2, reportados en la forma 40 D para una pistola disparable a traves de la tuberia de produccion de 1 11/16 pg. mostraron que el PTP fue de 5.00 pg., para ilustrar el efecto de la resistencia a la compresion de la formacion sobre la seleccion de la pistola, suponga que la resistencia a la compresion de una formacion es de 2,000 lb/pg² y la de otra formacion de 14,000 lb/pg² haciendo referencia a la (fig. 1.18, 19) (Comportamiento de las pistolas en formaciones con varias resistencias a la compresion), el valor corregido de PTP para la formacion de 2,000 lb/pg² es de aproximadamente 8.4 pg., y para la formacion de 14000 lb/pg² de aproximadamente 1.4 pg.

Para obtener el valor correcto de PTN, reste el espesor de 1 1/8 pg. correspondiente a la tuberia de revestimiento y el cemento, del valor de PTP, obteniéndose una penetracion de aproximadamente 7.3 pg., en la formacion con 2,000 lb/pg², y de 0.3 pg. de penetracion en la formacion con 14000 lb/pg² de resistencia a la compresion. La

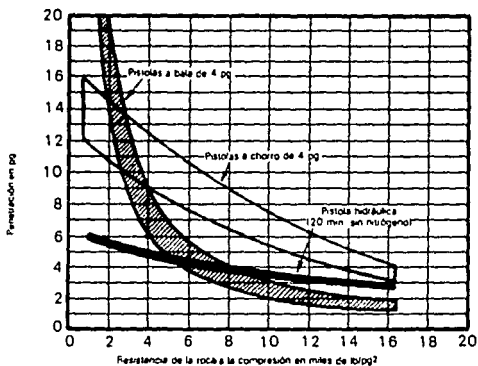


FIG. I.1B Comportamiento de pistolas hidráulicas, a chorro y a bala en formaciones de diferentes resistencias a la compresión.

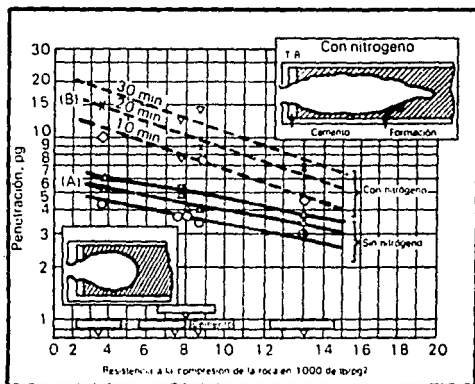


FIG. I.1B Efecto de la resistencia a la compresión de la roca sobre la penetración con pistola hidráulica.

penetración en la formación de baja resistencia a la compresión sería adecuada, mientras que la penetración en la formación con 14,000 lb/pg², es totalmente inadecuada.

Uso recomendado para los datos de las pruebas API RP-43.- Prueba con probador de cemento, sección 1, API RP-43. El diámetro del agujero de entrada, obtenido de acuerdo de las pruebas con probador de cemento, de la sección 1 es la parte más esencial de esta prueba, debido a que el diámetro del agujero de entrada es medido en la tubería de revestimiento, una superficie curva, recubierta con cemento.

Los datos del probador de concreto, de la sección 1, no deben usarse para evaluar la penetración debido a que el probador de arenamiento no es representativo de las formaciones existentes en el fondo del pozo.

Probador con núcleos de arenisca de Berea, sección 2, API RP-43, una indicación más confiable de la penetración. Puede obtenerse usando los datos obtenidos en un probador de arenisca Berea. Los probadores de arenisca Berea son más uniformes y no tienen la gran variación en resistencia observada con probadores de concreto. Los datos con probadores Berea proporcionarían una información más útil en relación a la penetración, a las características de flujos de los disparos, y a la productividad del pozo.

Los diámetros de los agujeros a la entrada del probador de arenisca Berea, son medidos en una superficie plana consistente en una placa de acero dulce. Los agujeros de entrada en los probadores de arenisca Berea son ligeramente mayores que los obtenidos en el probador de concreto.

Uso de datos de la formación API 43-D.- Los datos tanto de la sección 1 como de la 2 son reportados en la forma 43-D.

La fig.1.20.- Muestra los datos de una pistola Schlumberger Scallop de 2 7/8 pg, la penetración promedio en el probador de flujo Berea resultó de 10.53 pg, que es una penetración excelente para una pistola disparable a través de la tubería de producción.

Esta pistola tendría aplicación, en cualquier pozo en que se instalan tuberías de producción de diámetros grandes, para obtener alta productividad en pozos productores de aceite o gas.

La fig.1.21 muestra los datos de una carga a chorro, Jumbo 4 N C F V, de la Cia. Dresser-Atlas, usada en una pistola Konshot de 4 pg, la penetración promedio en el probador de flujo Berea resultó de 14.01 pg, con un tamaño promedio del agujero de 0.44 pg, esta carga es representativa de muchas similares que ofrecen diversas compañías para emplearse en pistolas convencionales para tuberías de revestimiento.

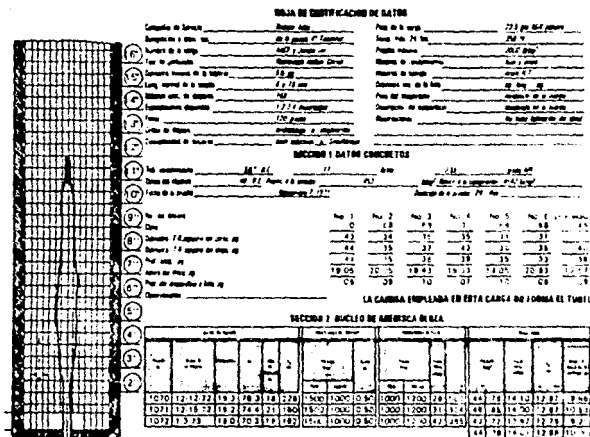


FIG.120

FIG.121

Este tipo de cargas debiera ser preferido cuando se tienen problemas de penetración. Debido a la posibilidad de obturamiento de los disparos con incrustaciones, parafina, asfaltenos y otros residuos, es conveniente en la mayoría de los disparos obtener un diametro mayor a 1/2 pg.

CAPITULO II

RELACION DE PRODUCTIVIDAD COMO UNA FUNCION DE LA PENETRACION Y DENSIDAD DE LOS DISPAROS.

Uno de los mayores objetivos de la terminación (disparos) en los pozos es obtener la máxima productividad con el mínimo de pérdida de energía del yacimiento.

El conocimiento detallado de la técnica y características de pistolas, así como equipo usado, es importante en la determinación de resultados favorables en la productividad de este.

Inicialmente estos aspectos se ignoraban, podría deberse a que se explotaban yacimientos con buen potencial y muchos de ellos a profundidades someras, sin embargo, a medida que los yacimientos petrolíferos se hacen mas profundos es necesario estudiar a fondo la eficiencia de la terminación (expresada como una razón de productividad).

II.1. RELACION DE PRODUCTIVIDAD.

La productividad o razón de productividad es definida como el cociente del gasto a cualquier condición, y el gasto a condiciones ideales de agujero descubierto sin daño en la formación.

Matemáticamente la podemos definir:

$$RP = q_s/q_i \quad 2.1$$

El gasto a condiciones ideales se expresa de la siguiente manera:

$$q_i = 7.08 k h t (P_e - P_w) / \mu \ln(0.47 r_e / r_w) \quad 2.2$$

Ahora incluyendo los efectos de daño, el gasto a cualquier condición se convierte en :

$$q_s = 7.08 k h t (P_e - P_w) / S t + \mu \ln(0.47 r_e / r_w) \quad 2.3$$

En este caso se introduce el daño total (St). Este dano, es la suma de aquellos que restringen el flujo del yacimiento al pozo, clasificándolos de la siguiente manera:

- Daño debido al efecto de pared o por fluidos incompatibles (S1).
- Daño por convergencia de flujo (S2).
- Daño debido al efecto de disparo o zona compactada (S3).

NOMENCLATURA AL FINAL DEL TRABAJO

- Daño por inclinación del pozo (S4).

La figura 2.1 muestra estos efectos.

II.1.1. DAÑO A LA FORMACION (S1)

Lo definimos como la obstrucción parcial o total, natural o inducida que se presenta alrededor del agujero del pozo y ocurre durante la etapa de perforación del pozo, su origen es debido a fluidos incompatibles provocando que las arcillas se hinchen y/o dispersen obstruyendo los canales conductivos, tapamiento por sólidos de lodos etc., también es llamado daño de pared.

Existen otras operaciones durante las cuales se presentan daños tales como: las cementaciones, al introducir la tubería se ejerce un efecto de pistón, ocasionando que los fluidos se filtren más y se compacte el enjarre de la pared del agujero.

II.1.2. DAÑO POR CONVERGENCIA DE FLUJO (S2)

Esta es debido a las pérdidas por los cambios de dirección del fluido del yacimiento en su entrada a las perforaciones, esta en la mayoría es ocasionado por la terminación parcial.

II.1.3. DAÑO POR ZONA COMPACTADA (S3)

Esta zona resulta de la acción compresiva del choque del disparo, dándonos por resultado una región de permeabilidad reducida alrededor de las perforaciones.

Resultados de laboratorio indican que la zona compactada es más o menos 13 mm (1/2 pulg) de espesor, con una permeabilidad reducida entre un rango de 0.1 a 0.2 veces que la original.

II.1.4. DAÑO POR INCLINACION DEL POZO (S4)

Como su nombre lo indica es debido a la desviación del pozo. Cinco Ley y sus colaboradores(6) usan el método fuente lineal para un comportamiento transitorio, de este análisis él deduce la siguiente ecuación:

$$S4 = - \left(\frac{2.06}{\text{ang } D/41} \right) - \left(\frac{1.865}{\text{ang } D/56} \right) \times \log(hd/100) \quad 2.4$$

$$0^\circ \leq \text{ang } D \leq 75^\circ$$

$$hd = h / (rw \times \sqrt{v/\mu k}) \quad 2.5$$

Por medio de las tablas 1 y 2 de la bibliografía 6 se puede calcular directamente este pseudo daño.

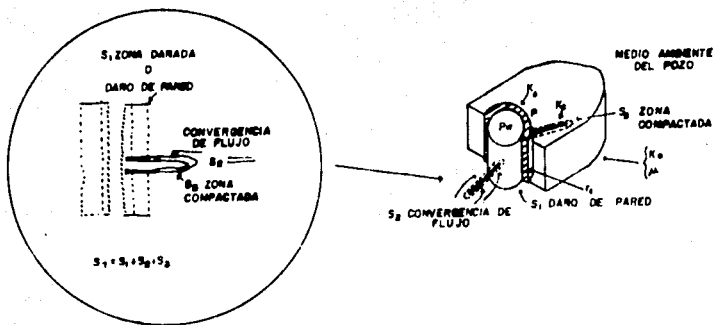


FIG. 21 RESTRICCIONES AL FLUJO

Matemáticamente el daño total lo representamos:

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad 2.6$$

Donde (S_1 , S_3) es debido a los efectos combinados de disparo y pared, (S_2) y (S_4) son usualmente referidos como pseudo daño.

Estos daños están en el orden de:

$0.5 < S_1 < 2$ corresponde a un daño ligero

$2 < S_1 < 7$ corresponde a un daño moderado

$S_1 > 7$ corresponde a un daño fuerte

La productividad de los disparos en pozos de gas o con alto gasto de aceite es afectada en gran medida por un flujo turbulento a través de la zona compactada y alrededor de cada perforación, esta turbulencia es considerada como un pseudo daño. La turbulencia depende de la permeabilidad de la zona compactada función de las condiciones de la perforación del disparo.

Dividiendo la ecuación (2.5) en (2.2) la razón de productividad se define ahora como:

$$RF = \ln (q/q_w) / \ln (q_w/r_w) + S_t \quad 2.7$$

Aplicando esta ecuación se concluye que cuando el daño total (S_t) se aproxima a un valor mínimo, la razón de productividad se aproxima a su valor máximo que es la unidad, por lo que la influencia del daño en la productividad del pozo es algunas veces impactante.

II.2. DISEÑO DE LAS PERFORACIONES Y FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RELACION DE PRODUCTIVIDAD.

Las perforaciones se diseñan para lograr una producción óptima, de acuerdo a las características del yacimiento, para lo cual se toma en cuenta los factores que influyen en la producción y que son:

- 1.- Daño a la formación.
- 2.- Anisotropía de la formación.
- 3.- Laminaciones impermeables.
- 4.- Fracturas naturales.
- 5.- Penetración parcial del yacimiento.
- 6.- Flujo de alta velocidad.

- 7.- Desviación del pozo.
- 8.- Radio del pozo y radio de drené.
- 9.- Daño por la convergencia del flujo hacia las perforaciones. Sp.
- 10.- Daño a las perforaciones.
- 11.- Penetración de las perforaciones.
- 12.- Densidad de las perforaciones.
- 13.- Arreglo de las perforaciones.
- 14.- Diámetro de las perforaciones.
- 15.- Distancia entre la carga explosiva y la T.R.

El diseño de las perforaciones consiste en determinar su penetración, densidad, arreglo y diámetro, en tal forma que permitan obtener una relación de productividades máxima; para ello se han clasificado de los métodos de determinación de productividades que se estudiarán adelante.

II.3. EVALUACION DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RELACION DE PRODUCTIVIDAD DE LOS POZOS.

II.3.1. DAÑO A LA FORMACION

El daño total de la formación, S_t , puede expresarse, de acuerdo a la visualización matemática de Hawkins(5) en la forma siguiente:

$$S_t = (k/Y_d - 1) L_n (rd/rw) \quad 2.8$$

La permeabilidad de la formación, k , se puede obtener:

- 1.- Midiéndola en núcleos.
- 2.- Calculándola de pruebas de formación y/o producción.
- 3.- De registros geofísicos tomados en agujero descubierta.
- 4.- Del análisis de presiones de fondo del campo.

Conociendo el valor de S_t se conoce la existencia del daño a la formación y de presentarse este, proceder a determinar el valor del factor de daño real, S_d .

II.3.2. DETERMINACION DEL FACTOR DE DAÑO REAL

Para calcular el factor de daño real (S_D) vemos dos métodos el de Hong(15) y el de Locke(18).

METODO DE HONG

Calculo de S_D para cuando la penetración de la perforación, (a) no atraviesa la zona de la formación dañada, se usa el nomograma de la fig.34(15), para ello es necesario conocer h , r_w , R , a y la relación de permeabilidades k_d/k .

Calculo de S_D para cuando la penetración de la perforación, (a) atraviesa la zona de la formación dañada, usando el nomograma de la fig.35(15).

METODO DE LOCKE

Para calcular S_D con el nomograma de la fig.31(8), dar valores a d_p , m , R y considerar $(k_{oz}/k)_{el}$ y determinar (a); este valor hay que corregirlo por la sobrecarga; si (a) corregido se encuentra dentro del rango de pistolas perforadoras convencionales, en caso contrario, cambiar el valor de las variables y hacer otro diseño.

II.3.3. DETERMINACION DE LA ANISOTROPIA DE LA FORMACION

La anisotropía de la formación puede ser conocida del análisis de núcleos de la formación productora. Aquí se trata de k_{vz}/k_{h} y k_{h} , esto es k_{vz}/k_{h} , factor que influye en la RA del pozo. Para contrarrestar este efecto es necesario emplear alta densidad de perforaciones, tres de cuatro perforaciones por pie. fig.2-5(20).

II.3.4. DETERMINACION DE LAMINACIONES IMPERMEABLES

Su presencia en el intervalo productor, se determina del análisis de núcleos del registro continuo de hidrocarburos y de registros geofísicos tomados en agujero descubierta. La extensión horizontal de las laminaciones debe comprobarse, correlacionando con pozos vecinos. La relación de productividad puede ser incrementada, aumentando la densidad de perforaciones, fig.7(20).

II.3.5. DETERMINACION DE FRACTURAS NATURALES

La existencia de fracturas naturales se determina del análisis de núcleos cortados en el intervalo productor, del análisis de registros geofísicos computados y del análisis de presiones de fondo.

La presencia de fracturas naturales es un factor muy importante que influye en la relación de productividad del pozo.

El intervalo productor puede tener uno, dos y hasta tres sistemas de fracturas. Para determinar la relación de productividad ver fig.9-19(20).

Para obtener mayor éxito al perforar intervalos naturalmente fracturados es necesario determinar la dirección de las fracturas y efectuar perforaciones orientadas, perpendiculares a la dirección de las fracturas.

II.3.6. PENETRACION PARCIAL DEL YACIMIENTO

El factor de pseudo daño por penetración parcial del yacimiento, S_{pp} , se obtiene empleando las expresiones siguientes (a) (pozos verticales y direccionales).

$$hD' = h_t / r_w \quad 2.9$$

$$z_w D = z_w / r_w \quad 2.10$$

$$h_w D = h_p / r_w \quad 2.11$$

$$\text{Relacion de penetracion adimensional} = (h_w D / hD') \cos \theta_w \quad 2.12$$

El S_{pp} , en pozos verticales, tambien se calcula con la expresion reducida por Papatzacos(7), publicada en mayo de 1987:

$$S_{pp} = (1/h_p D - 1) \ln(r_w / r_D) + (1 / h_p D) \ln[(h_p D / (2-h_p D)) (A-1/B-1)] \quad 2.13$$

donde :

$$h_p D = h_p / h_t \quad 2.14$$

$$r_D = r_w / h_t (K_v / k_h) \quad 2.15$$

$$A = 1 / (h_1 D + h_p D / 4) \quad 2.16$$

$$B = 1 / (h_1 D + 3 h_p D / 4) \quad 2.17$$

$$h_1 D = h_1 / h_t \quad 2.18$$

II.3.7. DETERMINACION DEL FACTOR DE TURBULENCIA

El termino D_q toma en cuenta las caidas de presión extras que corresponden a las condiciones de flujo de alta velocidad del gas alrededor del pozo, se calcula con la expresion siguiente(8).

$$SD_q = D_q = 2.2(10)^{-15} (\beta_{cz} / M_t)^2 (r_p) (k_h t / \mu) q_{sp} \quad 2.19$$

$$\beta_{cz} = 2.6 (10)^{10} K_{cz}^{-1.2} \quad 2.20$$

La relación de productividad, considerando la presencia del flujo de alta velocidad tambien se puede calcular con las graficas de Tariq fig.9-13(9).

11.3.8. DETERMINACION DEL PSEUDO FACTOR DE DAÑO CAUSADO POR LA DESVIACION DEL POZO S_D .

El pseudo factor de daño, S_D , originado por la desviación del pozo se obtiene de las tablas 1 y 2 de la referencia 6 calculadas por Cinco Ley y colaboradores. El valor de S_D es negativo siempre y está en función de ht , $hd = ht / rw$, rw , Z_w , $Z_wD = Z_w / rw$, Z_wD/hd y $h_wD \cos \theta_w / hd$.

11.3.9. DETERMINACION DE r_e Y r_w

El radio equivalente, r_e , del área de drenaje del pozo puede estimarse por medio de métodos derivados en la literatura 10 y 11.

El radio del pozo r_w , se debe tomar de registros de calibración tomados en agujero descubierta.

Evaluados los factores que influyen en la relación de productividad de un pozo, se procede a hacer el diseño de las perforaciones y calcular la relación de productividad.

En los métodos estudiados se observó que la relación de productividad se calcula una vez que han sido determinados el factor y los pseudo factores de daño con las ecuaciones siguientes:

$$(RP)_{ss} = \ln(r_e/r_w) / \ln(r_e/r_w) + S_t \quad 2.21$$

$$(RP)_{qss} = \ln(r_e/r_w) - 0.75 / \ln(r_e/r_w) - 0.75 + S_t \quad 2.22$$

Para flujo estacionario y pseudo estacionario, en pozos de aceite.

Estas ecuaciones funcionan también para pozos de gas agregando únicamente el pseudo factor de daño por flujo de alta velocidad en las cercanías del pozo D_q (SD_q), esto es, en forma general se tiene:

$$S_t = S_{pp} + (ht/hp) (S_p + S_d) + (ht/hp) S_{cz} + SD_q + S_\theta \quad 2.23$$

Ecuación 6.13 de los apuntes de la clase de explotación avanzada del Dr. F. Samaniego V. (12).

S_p , calcularlo, empleando los resultados de Harris o Hong.

S_d , calcularlo, empleando los resultados de Hong.

S_{pp} , calcularlo, empleando los resultados de Cinco y colaboradores.

Dentro de los modelos estudiados hay otros autores que presentan, la mayoría, sus resultados en nomogramas ó en gráficas para calcular la productividad.

Para el diseño de las perforaciones se propondrán juegos de valores de a , m , β , dp y L (distancia entre la carga explosiva y la T.R.).

Con estos valores se determinara una relacion de productividad, seleccionando el juego de valores que mayor relacion de productividad proporcione y que sea factible de realizarlo, quedandc fijos tambien las condiciones mecanicas del pozo y el fluido en cuyo seno se efectuara la perforación.

CAPITULO III

METODOS PARA OPTIMIZAR LA RELACION DE PRODUCTIVIDAD

En la industria petrolera, al implantarse la técnica de terminación de pozos con agujero revestido en 1932, como una alternativa a la terminación en agujero descubierto, perforando con balas la T.R. (tubería de revestimiento), cemento y formación para comunicar a esta con el pozo, surgieron problemas de reducción en la productividad de los pozos con respecto a la obtenida en agujero descubierto.

Por esta razón, en 1942, los investigadores empiezan a indagar sobre cuáles son los factores que influyen en la relación de productividad de los pozos.

El primer investigador empleó un método analítico; otros emplearon métodos analógicos electrolíticos y numéricos. Estos autores estudiaron el efecto causado por las perforaciones en la T.R. sobre la productividad del pozo, pero al no tener solución satisfactoria al problema, continúan las investigaciones en el laboratorio y con modelos matemáticos.

Entre los investigadores mencionaremos los más prácticos a continuación.

III.1. METODO DE MUSKAT

Muskat(17), haciendo cálculos analíticos, determinó la productividad de los pozos revestidos perforados. Dedució fórmulas para tipos generales de arreglos de perforaciones.

Para sus deducciones considera que el flujo es radial, el fluido del yacimiento es homogéneo, un radio de drenaje determinado, radio del pozo de 3 y 6, pulgadas arreglo de las perforaciones escalonado. Toma en cuenta además el espaciamiento entre las perforaciones, la densidad de estas y su diámetro de 1/8 y 1/4 de pulgada.

Fórmulas deducidas:

$$qp/qr = (\text{Log } r_e/r_w) / C + \text{Log } (r_e/r_w) \quad 3.1$$

Donde:

qp = Producción del pozo, considerando terminación además y perforada, (bl/día).

qr = Producción del pozo, considerando sin revestir (agujero abierto) y formación sin daño.

r_e = rs/h .

r_e = Radio de drenaje.

h = Espaciamiento vertical entre disparos.

$\Gamma_w = r_w/h$.

r_w = Radio del pozo.

C = Efecto de la T.R. y las perforaciones sobre la productividad del pozo.

Muñat haciendo las consideraciones mencionadas determino la siguiente expresión para calcular C :

$$mC = 2E \Gamma_o (2n \Gamma_p) + 2E E_k c (4n \Gamma_w \text{ sen } \theta_i / 2) \times \cos (2n \pi i / m) + \text{Ldg } (\Gamma_w / \Gamma_p) - \text{E Log } 2 \text{ sen } (\theta_i / 2) \quad 3.2$$

Donde:

m = Densidad de perforaciones (disparos/planos).

E = Sumatoria

Γ_o = Funcion Hankel de orden cero.

$n = 0, 1, 2$

$\pi = 3.1416$

$\Gamma_p = r_p/h$ (adimensional).

r_p = Radio de las perforaciones (pg).

h = Espaciamiento vertical entre las perforaciones de una misma línea (pg).

$\Gamma_w = r_w/a$.

r_w = Radio del pozo (pg).

θ_i = Ángulo de la columna i de perforaciones con respecto al eje x (grados).

i = iésima columna de perforaciones.

Cuando se reduce el espaciamiento h , entre las perforaciones, tendiendo a cero, entonces la Ec.3.2 se simplifica a:

$$mC = \text{Log } (\Gamma_w / \Gamma_p) - E \text{ Log } 2 \text{ sen } (\theta_i / 2) \quad 3.3$$

Para el caso en que la densidad de perforaciones $m = 2$, entonces:

$\theta_1 = \pi$, las líneas de perforaciones están separadas por 180 grados y la expresión queda en la forma siguiente:

$$C = E_{ko}(2n\pi F_p) + E_{ko}(4n\pi F_w) \cos n\pi + 1/2 \text{Log} (F_w / 2 F_p) \quad 3.4$$

Para el caso en que la densidad de perforaciones es: $m = 4$ y $\theta_1 = \pi/2$; $\theta_2 = \pi$; $\theta_3 = (3/2)\pi$.

$$C = 1/2 E_{ko}(2n\pi F_p) + E_{ko}(2\sqrt{2}n\pi F_w) \cos (n\pi/2) + 1/2 E_{ko}(4n\pi F_w) \cos n\pi + 1/4 \text{Log} (F_w/4F_p) \quad 3.5$$

Para el caso de una densidad de perforaciones de $m = 8$; entonces existirán ocho columnas de perforaciones tal que: $\theta_1 = \pi/4$; $\theta_2 = \pi/2$; $\theta_3 = 3/4 \pi$; $\theta_4 = \pi$; $\theta_5 = 5/4 \pi$; $\theta_6 = 3/2 \pi$; $\theta_7 = 7/4 \pi$. (separadas 45 grados).

$$C = 1/4 E_{ko}(2n\pi F_p) + 1/2 E_{ko}(1.5308n\pi F_w) \cos(n\pi/4) + 1/2 E_{ko}(2\sqrt{2}n\pi F_w) \cos(n\pi/2) + 1/2 E_{ko}(3.6956n\pi F_w) \cos(3n\pi/4) + 1/4 E_{ko}(4n\pi F_w) \cos n\pi + 1/8 \text{Log} (F_w/F_p) = 0.2600 \quad 3.6$$

En este método, el factor C, considera únicamente la influencia de la T.R. cementada y los disparos sobre la productividad del pozo. No se consideran la profundidad de la perforación, el daño a la formación, el daño a la perforación, la anisotropía, la penetración parcial de la formación, el factor de turbulencia ni el pozo desviado. Por lo anterior su aplicación es limitada a los casos que se consideren perforaciones muy sencillas y sin daño ni en la formación ni en los disparos. Se puede aplicar para cualquier densidad de perforaciones y cualquier diámetro de estas.

III.2. METODO DE HARRIS

Continuando con la investigación del efecto de la T.R. y las perforaciones sobre la productividad de los pozos terminados en agujero revestido, se abandonan los modelos analógicos y es Harris(14) quien prosigue con los modelos matemáticos para aprovechar la ventaja que las computadoras proporcionan.

En 1964 Harris presentó su trabajo en el que resuelve el problema del cálculo de flujo en un pozo terminado con la T.R. perforada. Para ello usa una perforación idealizada en forma de cuña con sección transversal cuadrada.

Matemáticamente, el problema se reduce a resolver la ecuación de Laplace en coordenadas cilíndricas para un conjunto específico de condición de frontera.

$$K_r \left(\frac{dp}{dr} \right) + (1/r) (sp/dr) + (1/r^2) (sp/dr^2) + K_z (z - p/Sz^2) = 0 \quad 3.7$$

En su modelo considero:

- 1.- Flujo radial.
- 2.- Fluido homogéneo, ligeramente compresible.
- 3.- Radio de drenaje de 660 pies.
- 4.- Radio del pozo de 3 pulgadas.
- 5.- Arreglo de las perforaciones, sencillo.
- 6.- Espaciamiento vertical de perforaciones.
- 7.- Espaciamiento horizontal de perforaciones.
- 8.- Penetración de las perforaciones.
- 9.- Densidad de las perforaciones.
- 10.- Radio de las perforaciones.
- 11.- Anisotropía de la formación.

De acuerdo a las consideraciones hechas en este trabajo, el método para determinar la relación de productividad de un pozo puede aplicarse en los casos siguientes:

- 1.- Yacimiento perforado en todo su espesor.
- 2.- Yacimiento que no tenga la formación dañada.
- 3.- Perforaciones sin daño / perforaciones hechas a contra presión, esto es $(P_h - P_y) < 0$, donde P_h es la presión hidrostática y P_y es la presión del yacimiento.
- 4.- Que no exista flujo turbulento en las vecindades del pozo.
- 5.- Que se tenga un arreglo sencillo de perforaciones (distribuidas en un plano horizontal o en un plano vertical).
- 6.- Que el pozo sea vertical.
- 7.- Las variables adimensionales dpD , aD , nD y m (se definen posteriormente estas variables) deben encontrarse en los rangos siguientes:

$$0.0833 \leq dD \leq 0.333$$

$$1.0000 \leq aD \leq 6.000$$

$$1.0000 \leq hD \leq 100.0$$

$$1.0000 \leq m \leq 2$$

En cuanto a los factores que considera este método, mejora a los métodos eléctrico-analógicos, porque ellos no toman en cuenta la anisotropía, con respecto al método analítico de Muskat, es mejor también porque Muskat no considera profundidad de las perforaciones, ni la anisotropía.

Al considerar Harris la anisotropía sus resultados debían ser semejantes a los de Mc Dowel y Muskat, Howard y Watson cuando la permeabilidad vertical de la formación sea igual a la permeabilidad horizontal, los valores de este trabajo que se comenta, deberían ser menores, cosa que no sucede de acuerdo a su fig. 18(14) (qpr/qs Vs Penetración de la perforación, donde se observa que los valores de Harris son más optimistas. Esta diferencia probablemente se deba a que el método de Harris es más exacto que los analógicos.

Los resultados fueron presentados en forma gráfica, en dichas gráficas se obtiene el valor del factor de daño causado por la F.R. y las perforaciones, Sp, en función de las variables adimensionales aD, hD, qD y m, figs. 6-14(14).

La suma de las constantes 3 y 4 a Sp fue con el objetivo de manejar números positivos.

Para las figuras 6-8(14) se tiene:

$$Sp = (Sp + 3) - 3$$

Para las figuras 9-14(14) se tiene:

$$Sp = (Sp + 4) - 4$$

Conocido Sp se calcula la relación de productividad, para el caso de flujo estacionario (ss).

$$(RP)_{ss} = \ln(r_e/r_w) / \ln(r_e/r_w) + Sp \quad 3.8$$

Para el caso de flujo pseudo estacionario (pss).

$$(RP)_{pss} = \ln(r_e/r_w) - 0.75 / \ln(r_e/r_w) - 0.75 + Sp \quad 3.9$$

Conocida la relación de productividad se puede conocer ahora qp.

$$qp = (qp / qr) qr \quad 3.10$$

Para flujo estacionario:

$$(qr)_{ss} = 7.07 \times 10^{-3} \frac{Kht \Pi p}{\mu L_n (re/rw)} \quad 3.11$$

Y para flujo pseudo estacionario:

$$(qr)_{pss} = 7.07 \times 10^{-3} \frac{Kht \Pi p}{\mu (L_n (re/rw) - 0.75)} \quad 3.12$$

Datos necesarios:

r_e = Radio de drenaje (pies).

r_w = Radio de pozo (tomado del registro de calibración) (pg).

h = Espesor del yacimiento (pies).

Πp = Caída de presión entre el yacimiento y el pozo (lb/pg²).

dp = $2r_p$ = Diámetro de la perforación (pg).

a = Penetración de la perforación (pg).

K_h = Permeabilidad horizontal (md).

K_v = Permeabilidad vertical (md).

m = Número de perforaciones por pie.

θ = Espaciamiento angular de las perforaciones ($^\circ$) (en el mismo plano).

K = Permeabilidad de la formación (md).

dpD = $(dp / rw) \sqrt{K_h / K_v}$ = Diámetro de la perforación (adimensional) 3.13

aD = a / rw = Penetración de las perforaciones (adimensional) 3.14

hD = $h / rw \times \sqrt{K_v / K_h}$ = Espaciamiento vertical (adimensional) 3.15

μ = Viscosidad del fluido del yacimiento (c.p.).

$(qr)_{ss}$ = Gasto (bls/día).

III.3. METODO DE HONG

Los investigadores anteriores sobre el tema que nos ocupa enfocaron sus trabajos para conocer el efecto que causan las T.E. y las

perforaciones sobre la productividad de un pozo. Hong(15) continua la investigación, ampliandola, al considerar en su modelo matemático el arreglo escalonado (las perforaciones estan distribuidas helicoidalmente) de perforaciones y el daño a la formación causado en el transcurso de la perforación y/o terminación del pozo (Hawkins, Muskat, etc.).

En 1975 Hong publico el resultado de su investigación en nomogramas con los que se determina el efecto que sobre la productividad del pozo ejercen la tubería de revestimiento, las perforaciones y el daño a la formación.

El problema lo soluciono matematicamente al resolver la ecuación de Laplace para flujo tridimensional en coordenadas cilindricas (r, θ , z) para un conjunto especifico de condiciones de frontera.

Las ecuaciones que empleo fueron:

Ecuacion general

$$kh [(z^2 p/r^2) + 1/r (sp/Sr) + 1/r^2 (s^2 p/Sr^2)] + Kv (S^2 p/Sr^2) = 0 \quad 3.16$$

Para zona dañada

$$Kd [(z^2 pr/Sr^2) + 1/r (Sps/Sr) + 1/r^2 (S^2 ps/Sr^2) + (S^2 ps/Sr^2)] = 0 \quad 3.17$$

Para zona no dañada

$$Kh [(z^2 pr/Sr^2) + 1/r (Spr/Sr) + 1/r^2 (S^2 pr/Sr^2) + (S^2 ps/Sr^2)] = 0 \quad 3.18$$

Estas ecuaciones las resolvió el autor empleando el método de diferencias finitas, para la solución de este modelo considero:

- 1.- Flujo radial.
- 2.- Flujo homogéneo ligeramente compresible en el yacimiento.
- 3.- Radio de drenaje, $r_e = 660$ pies.
- 4.- Radio del pozo, r_w , que varía de 3" a 6".
- 5.- Arreglo de las perforaciones, sencillo y escalonado.
- 6.- Espaciamiento vertical de las perforaciones, h, de 2" a 15".
- 7.- Penetración de las perforaciones, a, de 2" a 15".
- 8.- Densidad de las perforaciones, m, de 1 a 12 perforaciones por pie.

9.- Radio de las perforaciones, d_p , de 0.5 pg. y corrige para 1/4 y 1 pg. con la gráfica de la fig.2(15).

10.- Daño a la formación, considerando un radio de invasión, r_D , de 8 a 18 pg. y KD/kh de 1/8 a 1/2.

11.- Formaciones anisotrópicas.

12.- Se requiere además que:

a) Las perforaciones en plano horizontal deben dividirse en segmentos angulares iguales.

b) Las perforaciones en un plano deben estar derivadas 0, 90, o 180 grados con las de los planos adyacentes tabla 1(15).

c) Los planos horizontales deben tener igual espaciamiento vertical y estar separados de la cima y del fondo por la mitad de ese espaciamiento.

De acuerdo a las consideraciones hechas en este trabajo, el método puede aplicarse en los casos siguientes:

1.- Yacimiento horizontal perforado en todo su espesor.

2.- Yacimiento con formación sin daño y con daño, esto es, el caso general.

3.- Perforaciones sin daño, esto es, perforaciones hechas a contra presión.

4.- Que no exista flujo turbulento en las cercanías del pozo.

5.- Cuando se tengan arreglos de perforaciones sencillo o estacionado.

6.- Que el pozo sea vertical.

Debido a los factores que este método considera, sus resultados están más cercanos a la realidad con respecto a los resultados de los investigadores anteriores, es decir, que los resultados obtenidos con este trabajo deberían ser menores que los obtenidos con métodos anteriores, sin embargo, como se observa en la fig.4(15), estos son optimistas, probablemente la causa sea que Hong utiliza un método de cálculo más exacto.

Los resultados fueron presentados en forma de nomogramas, y estos son los siguientes (Figs.Nos. 1A, 1B, 2A y 2B de la referencia 15):

Fig. 1A, pag.102B. Nomograma para determinar el factor de daño, S_p , causado por las perforaciones, en arreglo de perforaciones sencillo y de diámetro de 0.5 pg.

Fig. 1B, pag.1029. Nomograma para determinar el factor de daño de las perforaciones, Sp, en arreglo escalonado de perforaciones, de diámetro de 0.5 pg.

Fig. 3A, pag.1020. Nomograma para determinar el factor de daño Sd cuando la perforación no alcanza a atravesar la zona dañada de la formación.

Fig. 3B, pag.1020. Nomograma para determinar Sd cuando la perforación atraviesa la zona dañada de la formación.

El diámetro de la perforación que se usó fue de 0.5", pero pueden usarse diámetros de 1/4" y 1", haciendo las correcciones correspondientes al Sp con la gráfica de la fig.2(15).

Conocidos los factores de daño Sp y Sd se determina el factor de daño total, St, que corresponde a la suma de los dos anteriores.

$$St = (ht/hp) Sp + (ht/hp) Sd \quad 3.15$$

Para el caso que Heng trata, $ht / hp = 1$.

Con St conocido se calcula la relación de productividad con las expresiones siguientes:

$$(RP)_{ss} = L_n (r_e/r_w) / L_n (r_e/r_w) + St \quad 3.20$$

$$(RF)_{qss} = L_n (r_e/r_w) - 0.75 / L_n (r_e/r_w) - 0.75 + St \quad 3.21$$

Conocida la relación de productividades se puede conocer ahora qp con las Ecs: 3.10, 3.11 y/o 3.12, según el caso.

DATOS NECESARIOS

- 1.- Radio de drenó, r_e , (pies).
- 2.- Radio del pozo, r_w (pg). (Tomarlo del registro de calibración).
- 3.- Separación vertical entre planos de perforación, h (pies).
- 4.- Permeabilidad vertical de la formación, K_v (md).
- 5.- Permeabilidad horizontal de la formación, K_h (md).
- 6.- Defasamiento de las perforaciones, θ (°).
- 7.- Penetración de las perforaciones, a (pg).
- 8.- Presión estática promedio del yacimiento, P_y (lb/pg²).

- 9.- Presión de fondo fluyendo, P_{wf} (lb/pg²).
- 10.- Densidad de perforaciones, m (disparos/pie).
- 11.- Viscosidad del fluido, μ (c.p).
- 12.- Radio de la zona de la formación dañada, r_d (pg).
- 13.- Permeabilidad de la zona dañada, K_d (md).
- 14.- Diámetro de las perforaciones, d_p (pg).

III.4. METODO ELECTRICO - ANALOGICO DE McDOWELL Y MUSKAT

En 1950 McDowell y Muskat(15) presentaron los resultados de su trabajo obtenidos en el modelo eléctrico - analógico sobre el efecto de la T.R. y las perforaciones para producción sobre la productividad del pozo.

En su modelo consideraron:

- 1.- Flujo radial.
- 2.- Fluido homogéneo.
- 3.- Radio de drenes de 660 pies.
- 4.- Radio del pozo de 3 pg.
- 5.- Arreglo de las perforaciones, sencillo (cuando las perforaciones están contenidas en un solo plano, ya sea vertical u horizontal).

El método se puede aplicar en las condiciones siguientes:

- 1.- Yacimiento disparado en todo su intervalo.
- 2.- Que el yacimiento no tenga la formación dañada.
- 3.- Que la permeabilidad horizontal y la permeabilidad vertical sean semejantes.
- 4.- Que las perforaciones no estén dañadas.
- 5.- Que en las vecindades del pozo no llegue a existir flujo turbulento.
- 6.- En pozos verticales.

Limitaciones:

El metodo únicamente se debe aplicar a pozos de tres y seis pulgadas de radio y perforar de 0.125" y 0.25".

Su informacion la presentan gráficamente en las figuras Nos.2-b(16).

Fig.No.	TITULO	pagina	rw(pg)	rp(pg)
2	qp/qr Vs. densidad de disparos	310	3	0.25
3	qp/qr Vs. densidad de disparos	311	3	0.125
4	qp/qr Vs. densidad de disparos	311	6	0.25
5	qp/qr Vs. profundidad del disparo	312	3	0.125
6	qp/qr Vs. profundidad del disparo	312	6	0.25

Información necesaria para la aplicacion del metodo.

rw = Radio del pozo (pg).

rp = Radio de la perforacion (pg).

a = Penetracion de la perforacion (pg).

m = Perforacion por pie.

III.5. METODO ELECTROLITICO DE HOWARD Y WATSON

Howard y Watson(17) continuan el estudio de la influencia de la T.R. y las perforaciones sobre la productividad del pozo con el modelo electrolitico, considerando ahora la penetracion de la perforacion en la formacion; concluyen que la productividad relativa es afectada por la profundidad de las perforaciones, dando mucha importancia a la primer pulgada, pudiendose obtener productividades relativas mayores de 1.0, sobre todo en yacimientos de baja permeabilidad.

Las consideraciones hechas en este segundo trabajo de Howard y Watson son :

- 1.- Que el flujo es radial.
- 2.- Fluido homogéneo.
- 3.- Radio de drenaje, $r_e = 660$ pies.
- 4.- radio del pozo.
- 5.- Arreglo de las perforaciones, sencillo.
- 6.- Diámetro de las perforaciones = 0.25".
- 7.- Las perforaciones no penetran en la formacion, únicamente penetran la tubería de revestimiento y el cemento (igual que Muskat).

8.- Penetración de las perforaciones en la formación.

Al considerar la penetración de las perforaciones el método se generaliza, pudiendo, ahora, calcular la productividad relativa en las condiciones siguientes:

- 1.- Yacimiento perforado en todo su espesor.
- 2.- Yacimiento que no tenga la formación dañada.
- 3.- Yacimiento isotrópico.
- 4.- Perforaciones sin daño.
- 5.- Que no exista flujo turbulento en las vecindades del pozo.

En estas condiciones se pueden comparar resultados con los obtenidos con el modelo electrolítico de McDowell y Muskat, siendo ligeramente inferiores los de Howard y Watson.

Sus resultados los presentan gráficamente en las Figs. Nos. 3-4-5-6-7-8.

La figura 3, pag. 324, qp/qr Vs densidad de perforaciones (perforaciones/pie). Variación de productividad relativa con la densidad de perforación para T.R. de diámetro igual a 6 pg. y diámetro de la perforación de 0.25 pg. para varias penetraciones de las perforaciones.

La figura 4, pag. 324, qp/qr Vs profundidad de las perforaciones. Variación en la productividad relativa con la profundidad de las penetraciones para T.R. de diámetro igual a 6 pg. con diámetro de perforaciones de 0.25 pg. para varias densidades de perforaciones.

Con el objetivo de hacer general el método, los autores presentan la siguiente ecuación:

$$(RP)' = (qp/qr)' = 1 / 1 + [(1/(qp/qr) - 1) / k(1 - (\ln r_e / \ln(r_e/r_w)))] \quad 3.22$$

donde:

(RP)' = Productividad relativa deseada.

RP = Productividad relativa conocida para cierta r_w y r_p .

r_e = Radio de drenaje para el caso conocido (pies).

r_e' = Radio de drenaje para el caso en que se desea conocer (RP)'.
 r_w = Radio del pozo para el caso conocido.

r_w = Radio del pozo para el caso en que se desea conocer (RP).

$$Kc = (r_p)(r_w) / (rp)(rw).$$

Para emplear la ecuación 3.22 se debe calcular una Kc para cada vez que se cambie r_w o r_p .

III.6. METODO DE LOCKE

En 1961 Locke (18) publicó un método para predecir la relación de productividad de pozos. Este método confirma los descubrimientos de los investigadores anteriores. El autor, empleando el método del elemento finito, amplía la investigación al considerar la zona triturada en torno a la perforación hecha en la zona dañada en el transcurso de la perforación y/o terminación.

En este trabajo se investiga la importancia de la profundidad, la densidad, el defasamiento y el diámetro de las perforaciones; también se investiga la influencia de la zona triturada en torno a la perforación cilíndrica, así como la influencia del daño de la formación sobre la productividad del pozo.

Las consideraciones hechas en este trabajo son:

- 1.- Flujo radial.
- 2.- Fluido homogéneo, ligeramente compresible.
- 3.- Radio de drenaje $r_e = 660$ pies.
- 4.- Arreglo de perforaciones, escalonado.
- 5.- Espaciamiento de las perforaciones (h).
- 6.- Penetración de las perforaciones (a).
- 7.- Densidad de las perforaciones (m).
- 8.- Radio de las perforaciones (rp).
- 9.- Daño a la formación (Sd).
- 10.- Daño de la perforación (Scz).

De acuerdo a las consideraciones hechas, este método, para determinar la productividad de un pozo, puede aplicarse a los casos siguientes:

- 1.- Yacimiento perforado en todo su espesor.

- 2.- Yacimiento con formación dañada en el transcurso de la perforación y/o terminación.
- 3.- Perforaciones dañadas (perforaciones hechas con $P_h > P_y$ y con fluidos de control sucios).
- 4.- Yacimientos con formaciones anisotrópicas.
- 5.- Yacimientos que sean perforados totalmente.
- 6.- Que no exista turbulencia en las vecindades del pozo.
- 7.- Pozos verticales.

En general los resultados obtenidos por Locke fig.1(18) concuerdan con los resultados de investigadores anteriores, observándose que para penetraciones mayores tienden a ser optimistas a pesar de que se está considerando un nuevo factor, el daño de la perforación, que es un factor que debe disminuir la productividad, sin embargo, no se aprecia su efecto negativo sobre esta.

El autor presenta información obtenida a través de su método de elemento finito aplicado a la obtención de la productividad de pozos petroleros, en el nomograma de la Fig.No.2(18).

Obtenida la relación de productividad, RP, se determina la producción que se espera del pozo en cuestión con la Ec.3.10 ya que q_r también puede calcularse con las Ecs.3.11 o 3.12, según sea el caso, flujo estacionario o flujo pseudo-estacionario.

Información necesaria:

- 1.- a = Profundidad de la perforación (pg).
- 2.- rd = Radio de la zona de daño en la formación (pg).
- 3.- dp = Diámetro de las perforaciones (pg).
- 4.- Kd = Permeabilidad de la zona dañada de la formación (md).
- 5.- K = Permeabilidad de la formación (md).
- 6.- Kcz = Permeabilidad de la zona triturada en torno a la formación (md).
- 7.- m = Densidad de perforaciones (perforaciones/pie²).
- 8.- θ = Ángulo de defasamiento entre perforaciones (°).
- 9.- ht = Espesor de la formación productora (pies).

10.- r_e = Radio de drenaje del pozo (pies).

11.- r_w = Radio del pozo (pg).

12.- Tipo de flujo (estacionario o pseudo estacionario).

13.- μ = Viscosidad del fluido (c.p.). El fluido debe ser ligeramente compresible, esto es, el método se aplica únicamente a yacimientos de aceite o agua.

14.- S_t = Factor de daño total.

III.7. METODO DE KLOTZ Y COLABORADORES

Con el afán de disponer de un método efectivo para determinar la productividad de un pozo y poder diseñar su terminación, los investigadores han continuado trabajando sobre el tema y así Klotz y colaboradores(19) publicaron en 1974 su trabajo en el que extienden las investigaciones hechas por autores anteriores, pero tomando en cuenta el daño causado a la formación en el transcurso de la perforación y/o terminación del pozo y la perforación dañada.

Klotz y colaboradores, en su trabajo, relacionan la eficiencia de flujo del núcleo, CFE, con el término similar eficiencia de flujo del pozo, WFE, a los que definen en la forma siguiente:

$CFE = K_p/K_i$ = (Permeabilidad del núcleo con perforación real dañada / Permeabilidad del núcleo con perforación ideal sin daño).

$WFE = q_p/q_i$ = (Producción de la zona adanada, dañada, perforada / producción de la misma zona adanada y perforada sin daño).

Para determinar tanto la CFE como la WFE usa el método del elemento finito y determina la presión y el flujo en el medio poroso. Este método consiste en tomar un plano de la sección de la roca del yacimiento o del núcleo de prueba, dividirlo en un número finito de elementos de cuatro lados cada uno.

En el desarrollo del trabajo se consideraron las condiciones siguientes:

1.- Flujo radial estacionario.

2.- Fluido homogéneo, incompresible y de una sola fase.

3.- Radio de drenaje, r_e , igual a 660 pies.

4.- Radio del pozo, r_w , igual a 3 pg.

5.- Arreglo de perforaciones, sencillo.

6.- Penetración de las perforaciones (pg).

7.- Densidad de perforaciones.

8.- Daño a la formación.

9.- Daño a las perforaciones.

De acuerdo a las consideraciones que se hicieron, este método puede ser aplicado para determinar la relación de productividades de un pozo en los casos siguientes:

1.- Yacimiento perforado en todo su espesor.

2.- Yacimiento con formación dañada.

3.- Perforaciones dañadas.

4.- Que no exista flujo turbulento en las vecindades del pozo.

5.- Que el arreglo de las perforaciones sea sencillo.

6.- Que el pozo sea vertical.

7.- Que la formación sea isotrópica.

De acuerdo a los factores que este método considera, mejora los resultados de los investigadores anteriores, siendo los suyos semejantes a los de Harris, (fig.14(19)). Al considerar los factores de daño a la formación, S_d , y daño a la perforación, S_{cz} , hace que sus resultados sean más realistas. Las diferencias que se observan con los otros métodos se puede considerar que se deben a las distintas formas de cálculo empleadas. Debe hacerse notar que Klotz y colaboradores son los primeros investigadores que considera tanto el daño a la formación, S_d , como el daño a la perforación, S_{cz} , en la determinación de la relación de productividades del pozo.

Para mostrar los resultados obtenidos presentaron ejemplos en forma gráfica, figuras Nos.7-12(19) que pueden ser empleadas, seleccionando la que se ajuste mejor a las necesidades propias, siendo su uso limitado a la información señalada en cada una de ellas.

Información necesaria para emplear las gráficas:

a = Penetración de las perforaciones.

CPE = Eficiencia de flujo del núcleo (en fracción).

d_w = Diámetro del pozo (pg).

h = Distancia vertical entre perforaciones (pg).

K = Permeabilidad de la formación virgen (md).

K_{cz} = Permeabilidad de la zona compactada y triturada por las perforaciones (md).

K_d = Permeabilidad de la formación dañada (md).

K_{dcz} = Permeabilidad de la zona dañada (por el fluido de perforación y/o terminación) compactada y triturada por las perforaciones (md).

K_i = Permeabilidad del núcleo perforado, considerando una perforación ideal limpia de la misma profundidad en el laboratorio, (md).

K_p = Permeabilidad del núcleo perforado, considerando una perforación real dañada en el laboratorio.

m = Perforaciones por pie.

r_d = Radio de la zona dañada (pg).

r_e = Radio de drenaje (pies).

Scz = Daño en torno a las perforaciones causado por el mismo espacio.

S_d = Daño de la formación causado en el transcurso de la perforación y/o terminación del pozo (md).

WFE = Eficiencia de flujo del pozo (en fracción).

Calculo de la relación de productividad:

Para calcular la relación de productividad se emplea la figura 13(19) en donde está en función de CFE, h_{ci} y del número de perforaciones.

III.8. METODO DE TARIQ Y COLABORADORES

Con la continua investigación en el área de productividad de los pozos petroleros se ha logrado aproximar cada vez más a la realidad al agregar a los factores ya estudiados por los investigadores anteriores el factor de heterogeneidades (material distinto al que constituye, principalmente, la roca, que se presenta diseminado o formando capas delgadas, impermeables y fracturas naturales en la roca) comunes.

En 1985 Tariq y colaboradores(20), publican los resultados de su trabajo sobre el funcionamiento de terminaciones con perforaciones bajo la influencia de heterogeneidades comunes, tales como

anisotropía, laminaciones y fracturas naturales, usando el análisis del elemento finito para evaluar la respuesta del flujo estacionario en la región cercana al pozo, con la presencia de las heterogeneidades comunes.

El estudio determinó que la eficiencia de la terminación está fuertemente influenciada por las heterogeneidades comunes de la formación, siendo necesario incluir una buena descripción de estas en el diseño y evaluación de un programa de disparos. Para llevar a cabo lo anterior se debe emplear información de núcleos, pruebas de pozo y registros eléctricos tomados en agujero descubierto.

Tariq y colaboradores determinaron con este trabajo que:

- 1.- En formaciones anisotrópicas y laminadas, es necesario emplear en la perforación altas densidades de disparos.
- 2.- El funcionamiento de las terminaciones con perforaciones varía con el tipo, orientación y densidad de fracturas naturales.
- 3.- Parámetros geométricos diferentes suponen significado diferente para diferentes tipos de fracturas.
- 4.- Para un diseño apropiado y evaluación de las terminaciones perforadas es necesario una detección sónica de fracturas.

Para desarrollar el trabajo, Tariq hizo las consideraciones siguientes:

- 1.- Empleo flujo radial en un sistema de coordenadas x , y , z .
- 2.- Fluido ligeramente compresible.
- 3.- Radio de drenaje, $r_e = 660$ pies.
- 4.- Radio del pozo, $r_w = 4.315$ pies.
- 5.- Arreglo de perforaciones: escalonado.
- 6.- Espaciamiento entre perforaciones, lo considera.
- 7.- Penetración de las perforaciones, lo considera.
- 8.- Densidad de las perforaciones, lo considera.
- 9.- Daño a la formación, no la considera.
- 10.- Daño a la perforación, no la considera.
- 11.- Anisotropía, la considera.

- 12.- Fracturas naturales, las considera.
- 13.- Penetración parcial de la formación, no la considera.
- 14.- Factor de turbulencia, no lo considera.
- 15.- Pozo desviado, no lo considera.

De acuerdo a las consideraciones que Tariq y colaboradores hacen en su trabajo, su método para determinar la relación de productividad de un pozo se puede aplicar en los casos siguientes:

- 1.- Yacimiento disparado en todo su espesor.
- 2.- Yacimiento con perforaciones no dañadas.
- 3.- Que no exista flujo turbulento en las vecindades del pozo.
- 4.- Que se tenga un arreglo escalonado de perforaciones.
- 5.- Que el pozo sea vertical.
- 6.- En formaciones con heterogeneidades comunes.
 - a) Formaciones con laminaciones.
 - b) Formaciones con lutita diseminada.
 - c) Formaciones fracturadas.

Tariq enriquece las investigaciones hechas para determinar la relación de productividad de los pozos, es decir, presenta resultados por primera vez que consecuentemente no pueden ser comparados con los obtenidos por investigadores anteriores.

Los resultados obtenidos con el programa de cómputo para el análisis del elemento finito se presentaron gráficamente en las figuras siguientes:

Figs. Nos. 2-3, 7, 9-19(20), págs. 2, 3, 4 y 6-8, respectivamente.

Limitaciones. La aplicación de las gráficas anteriores es para la información que en ellas se indica.

Información necesaria:

- 1.- a = Penetración de la perforación (pg).
- 2.- dp = Diámetro de las perforaciones (pg), se considera: con anisotropía, $dp = 0.4$ (pg).
 $dp = 0.2$ (pg). Con fracturas naturales.

- 3.- ϕ = Intervalo de fractura = 4, 8, 16, 24 y 40 (pg).
- 4.- K_f = Permeabilidad de fractura = 1 Darcy.
- 5.- K_h = Permeabilidad horizontal de la formación (md).
- 6.- K_m = Permeabilidad de la matriz = 1 (md).
- 7.- K_v = Permeabilidad vertical de la formación (md).
- 8.- n = Densidad de perforaciones (perforaciones/pies).
- 9.- r_e = Radio de drenaje del pozo = 660 (pies).
- 10.- r_w = Radio del pozo = 4.3125 (pg).
- 11.- w = Amplitud de la fractura (microns).
- 12.- θ = Desfasamiento de las perforaciones (grados).
- 13.- Lutita laminada (%).

III.9. METODO DE TODD Y BRADLEY

Para evaluar las terminaciones con perforaciones en pozos de alfiler y principalmente para determinar una densidad de perforaciones óptima para la terminación de estos pozos Todd y Bradley (2) presentaron resultados de su trabajo en marzo de 1956. Ellos desarrollaron un modelo de tres dimensiones para computadora, empleando el método de diferencia central para resolver la ecuación de Darcy para flujo radial.

El flujo de fluidos en este modelo está gobernado por la ecuación de difusión radial que en coordenadas cilíndricas es la siguiente:

$$(1/r) \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + (1/r) \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + (1/r) \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = - \frac{d^2 p}{dt^2} \quad (3.23)$$

La ley de Darcy para flujo de líquidos puede expresarse matemáticamente en la forma siguiente:

$$V = 0.00127 K \frac{DP}{\mu} \quad (3.24)$$

donde:

V = Término de velocidad, (q dividido entre el área).

K = Permeabilidad.

DP = Presión.

μ = Viscosidad del fluido.

Al sustituir la ecuación 3.24 en la ecuación 3.23, se obtiene la ecuación fundamental de flujo, la cual resolvió empleando el método de diferencias finitas.

Las consideraciones hechas en este trabajo son:

- 1.- Flujo radial en un sistema cilíndrico de coordenadas (r, θ, z) .
- 2.- Fluido homogéneo ligeramente compresible.
- 3.- Radio de drenaje, r_e , no lo menciona.
- 4.- Arreglo de perforaciones: escalonado.
- 5.- Penetración de las perforaciones.
- 6.- Densidad de las perforaciones.
- 7.- Radio de perforaciones.
- 8.- Daño a la formación.
- 9.- Daño a la perforación.
- 10.- Anisotropía.

De acuerdo a los factores considerados, este método, para determinar la productividad de un pozo, puede aplicarse a los casos siguientes:

- 1.- Yacimiento disparado en todo su espesor.
- 2.- Yacimiento con formación dañada en el transcurso de la perforación del pozo y/o terminación.
- 3.- Pozo con perforaciones dañadas.
- 4.- Yacimiento con formación anisotrópica.

Los resultados obtenidos por Todd y colaboradores, fig 1(21), son inferiores a los obtenidos por Hong hasta una penetración de doce pulgadas; son inferiores a los obtenidos por Harris hasta una penetración de trece pulgadas; y son inferiores a los de Locke hasta una penetración de diecinueve pulgadas, después tienden a ser iguales. Las condiciones en que se hace la comparación son:

- a.- Cuatro perforaciones por pie.

- b.- No existe zona triturada y compactada en torno a la perforación.
- c.- No existe daño en la formación.
- d.- Las perforaciones tienen un desfaseamiento de 90 grados.

Las causas principales de las diferencias con los otros métodos son las debidas a que Todd y Bradley consideran todo el intervalo perforado y no una unidad y trabajan con una mayor densidad de perforaciones de mayor profundidad.

La información obtenida por Todd y colaborador la presentaron en gráficas, figuras 1-10(21).

Las limitaciones del método son las condiciones que caigan fuera de las condiciones de las gráficas y no podrá ser empleado en pozos que tengan formaciones parcialmente penetradas, en donde exista flujo turbulento ni en pozos desviados.

Conocida la relación de productividad se puede conocer la producción de la terminación con perforaciones, qp, empleando la ec.3.10 y para qr las Ecs.3.11 y 3.12 según se trate de flujo estacionario o pseudo estacionario.

Información necesaria:

- 1.- a = Penetración de las perforaciones (pg).
- 2.- dp = Diámetro de las perforaciones (pg).
- 3.- ht = Espesor del yacimiento (pies).
- 4.- Koz = Permeabilidad de la zona triturada en torno a la perforación (md).
- 5.- KD = Permeabilidad de la zona dañada de la formación (md).
- 6.- K = Permeabilidad de la formación sin daño (md).
- 7.- s = Densidad de perforaciones (disparos/pie).
- 8.- re = Radio de drenaje del pozo (pies).
- 9.- rD = Radio de la zona dañada de la formación (pg).
- 10.- rw = Radio del pozo (pg).
- 11.- NP = Caída de presión del yacimiento al pozo (lb/pg²).
- 12.- θ = Desfaseamiento angular entre disparos adyacentes.

13.- μ = Viscosidad del fluido del yacimiento (cp).

III.10. LOS METODOS MAS PRACTICOS Y ACONSEJABLES

Los factores que se ha observado influyen en la relación de productividad son (tabla 3.1):

- 1.- Arreglo de las perforaciones.
- 2.- Espaciamiento de las perforaciones.
- 3.- Penetración de las perforaciones.
- 4.- Densidad de las perforaciones.
- 5.- Radio de las perforaciones.
- 6.- Daño a la formación.
- 7.- Daño a las perforaciones.
- 8.- Anisotropía de la formación.
- 9.- Penetración parcial de la formación.
- 10.- Factor de turbulencia.
- 11.- Desviación del pozo.

Algunos de estos factores han sido considerados en los estudios que en este trabajo se analizan, tanto en modelos analíticos y electrónico-analógicos como en modelos matemáticos. Al ver la fig.1.B se observa que en los tres métodos de estudio, la relación de productividad, RP, tiene una misma tendencia que es incrementarse al aumentar la profundidad de las perforaciones.

La variación de la relación de productividad con respecto a la penetración de las perforaciones está comprendida en un rango de 0.1, limitando este rango por la parte superior los autores Hong, Klotz, Locke y Todd y por la parte inferior los autores Todd, Howard y Watson, (Fig.1.B). Lo anterior comprueba que los conceptos fundamentales empleados en cada uno de los métodos son correctos y que las pequeñas variaciones se deben a las consideraciones y procedimientos de cálculo seguidos por cada autor.

La calidad de los resultados proporcionados por estos modelos, valores de relación de productividad, están en función del número de factores que hayan sido involucrados en ellos. Es válido considerar que el autor que haya trabajado con más factores en su estudio, sus resultados estarán más cercanos a la realidad y considerándoles el

TABLA 3.1—MODELOS EMPLEADOS PARA DETERMINAR LA RELACION DE PRODUCTIVIDAD DE UN POZO .

AUTOR	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA R.P.		FACTORES CONSIDERADOS EN LA DETERMINACION DE LA RELACION DE PRODUCTIVIDAD.									
	MODELO	TIPO DE PERFORACIONES	CONCIANZATO O TIPO DE PERFORACIONES (a)	PENETRACION DE LAS PERFORACIONES (b)	DEBIDA A LA RESISTENCIA (c)	RANGO DE VALORES POSIBLES (d)	RANGO ALA PERFORACION (ee)	RANGO ALA PERFORACION (ee)	ANILLO TAP PERFORACION (ee)	PENETRACION DE LA PERFORACION (ee)	FACTORES DE INFLUENCIA	DESVIACION DEL POZO
ARMAT	ANALITICO	ESCALONADO	X	—	X	X	—	—	—	—	—	—
HARRIS	MATEMATICO	SENCILLO	X	X	X	X	X	—	X	—	—	—
HEMS	MATEMATICO	ESCALONADO	X	X	X	X	X	—	X	—	—	—
MC DONNELL Y MURKIN	ELECTRICO	SENCILLO	X	X	X	X	—	—	—	—	—	—
HEMSHAW Y WINTER	ELECTRICO	SENCILLO	X	X	X	X	—	—	—	—	—	—
LOCHT	MATEMATICO	ESCALONADO	X	X	X	X	X	X	—	—	—	—
RELYE	MATEMATICO	SENCILLO (RADIAL)	X	X	X	—	X	X	—	—	—	—
TALBO	MATEMATICO	ESCALONADO	X	X	X	X	—	—	X	—	—	—
TOBB	MATEMATICO	ESCALONADO	X	X	X	X	X	X	X	—	—	—

mismo valor a éstos, se puede establecer el siguiente orden jerárquico de los modelos aquí analizados:

ORDEN JERARQUICO	AUTOR	NUMERO DE FACTORES CONSIDERADOS
1	LOCKE	8
2	TODD	6
3	HONG	7
4	HARRIS	7
5	TARIQ	6
6	KLOTZ	6
7	MCDOWELL-MUSIAT	5
8	HOWARD Y WATSON	5
9	MUSYAT	4

El hecho de que un estudio haya tomado en cuenta mayor número de factores, no quiere decir que este anule a los que consideraron menos, porque en primer lugar los factores tomados en cuenta no son los mismos, tabla 3.1, y en segundo lugar las condiciones en que fueron estudiados son también diferentes. Esto es, que en ocasiones se tendrá ventaja al aplicar un método que haya empleado un reducido número de factores, pero cuyas condiciones de estudio se asemejen mucho a las del caso real que se trata de resolver, obteniéndose así resultados más cercanos a la realidad.

CAPITULO IV

DIFERENTES TIPOS DE PISTOLAS

Existen diversos tipos de pistolas sin embargo todas caen en las características siguientes:

- Las pistolas bajadas a través de la tubería de producción son comúnmente usadas en México, pero los beneficios completos no han sido siempre realizados debido a reducciones bajas de presión al momento del disparo, por la seguridad de prevenir un descontrol del pozo.
- La técnica de disparo bajada con tubería de producción nos da un sistema seguro de obtener una penetración máxima y altas densidades de disparos efectivos, aunado a esto la presión diferencial negativa que proporciona una limpieza en las perforaciones, es actualmente la condición ideal para disparar un pozo y obtener la productividad máxima.
- El sistema de disparo llamado híbrido o tubería de succión por vacío en la cual un disco frangible permite la repentina apertura de la tubería evacuada al yacimiento, resulta de un surgimiento repentino del fluido productor debido a la diferencial de presión negativa existente. Este sistema es igualmente efectivo y de poca aplicación.
- Máxima limpieza del fluido de terminación y de todo el equipo usado en la operación del disparo es un requerimiento absoluto, al igual que las cargas adecuadas para las condiciones de presión y temperatura del fondo del pozo.

IV.1. A TRAVÉS DE LA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN

Estas pistolas (23) son de diámetros pequeños, ya que son bajadas con cable por el interior de la tubería de producción. En la superficie se requiere tener un equipo de control de presión pues al momento del disparo, permite flujo de la formación al pozo creando una presión a favor de éste, la cual puede expulsar el cable con la pistola a la superficie descontrolándola.

Se pueden tener intervalos largos donde se recomienda disparar primero aquellas zonas de menor permeabilidad y enseguida las de mayor permeabilidad, esto se hace con el objeto de asegurar la limpieza de las perforaciones.

Las pistolas que tenemos en esta categoría son :

a).- Tipo Scallop

Consta de un tubo portador de cargas de diámetros reducidos para permitir el paso por la T.P. (fig.4.1A). Se tienen pistolas de

dímetros de 1 3/8", 1 9/16", 1 11/16", 2 1/8", y 2 7/8", estas dimensiones son considerando la deformación que sufren con la deflagración.

Las características comunes en esta categoría son :

- Existe diferencial de presión al momento del disparo entre revestimiento y formación permitiendo el flujo de la formación.
- Ofrece una densidad de 4 a 12 cargas/pie y fases de 0 y 0-180 grados.
- Es recomendable utilizarlas en pozos profundos, altas temperaturas y en pozos de gas.
- No daña la tubería ni deja residuos en el pozo.

- La longitud de la pistola es normalmente para 41 y 81 cargas, para correrse en un intervalo máximo de 40 pies.

- Los rangos de presión y temperatura en los que operan son:

Con cargas convencionales "RD": temperaturas de 340 grados y 15000 psi de presión.

Con cargas para altas temperaturas y presiones son 470 grados y 25000 psi.

- Pueden dispararse selectivamente.
- Son recuperables, pero no pueden volverse a usar.

b).- Tipo Enerjet

Estas pistolas son semi-desechables, (fig.4.1B), las cargas se colocan en una lámina de metal semiflexible para transportarlas a través de la tubería, las cápsulas están expuestas directamente a los efectos de presión y temperatura del pozo. Las cargas son de mayor tamaño que en el diseño Scallop, por lo cual se obtiene mejor penetración.

Sin embargo sólo ofrece la fase de 0 grados y temperaturas menores de 340 °F.

Otras características comunes son:

- Diámetro de pistolas de 1 11/16" y 2 1/8".
- Densidad de disparo 4 cargas/pie.
- 41 cargas por corrida de la pistola (10 pies).

- Rangos de presión :

Para 2 1/8" ----- 15000 psi.

Para 1 11/16" ----- 20000 psi.

- Máxima longitud recomendada de 40 a 50 pies.

- Fácil de armar en el pozo, por su peso mínimo.

- Resistencia al HCL y precaución especial para no ser usada en HCS.

c) Tipo Ultrajet

Este tipo de pistolas, se fabricaron para proporcionar mejor penetración y fase de 60 grados, son de reciente fabricación, se especifican en la sección V.4, puesto que también son utilizadas en la técnica de pistolas bajadas con tubería de producción.

Cabe mencionar que este tipo de pistolas, corridas a través de la T.P., (Scallop o Enerjet) tienen algunos inconvenientes como:

- Debido al tamaño de la pistola la fuerza explosiva es limitada.

- Cuando se requieren varias bajadas de pistolas, la presión del fluido dentro del pozo, después del primer disparo, ya no permite conservar el diferencial de presión negativo.

- Diferencial de presión limitado por el riesgo de expulsión del cable.

Es necesario indicar la diferencia entre la carga y pistola, esta última es esencialmente el transportador de la carga y esta es el elemento explosivo. Algunas pistolas se denominan igual que sus cargas : Ultrajet, Enerjet, Hyperjet. También se puede tener pistola Scallop con carga Hyperdome y es posible utilizar pistola Scallop con carga Ultrajet.

Las pistolas bajadas por el interior de la T.F. tienen un posicionador de tipo magnético para que éstas se peguen a la pared de la T.R. (Fig.4.2).

IV.2. A TRAVÉS DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO (CONVENCIONALES)

Estas pistolas(22) constan de un tubo rígido cuyo espesor permite resistir altas presiones y esfuerzos laterales, además limitan el daño al revestimiento, están previstas en diámetros de 3 3/8", 4" y 5". Se utilizan en operaciones donde el pozo no está expuesto al flujo inmediatamente después del disparo, y además los residuos quedan encerrados en el tubo sin riesgo de contaminación del pozo (Fig.4.3).

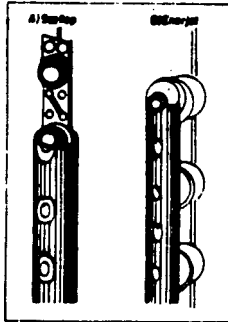
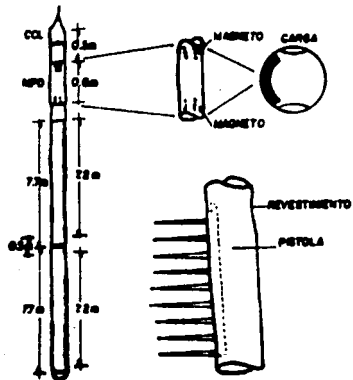


FIG. 4.1 PISTOLAS LIMPIAS A TRAVÉS DE LA T.P. (Sistema Schimberger).

FIG. 4.2 POSICIONADOR MAGNETICO PARA PISTOLAS LIMPIADAS POR EL INTERIOR DE LA T.P.



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

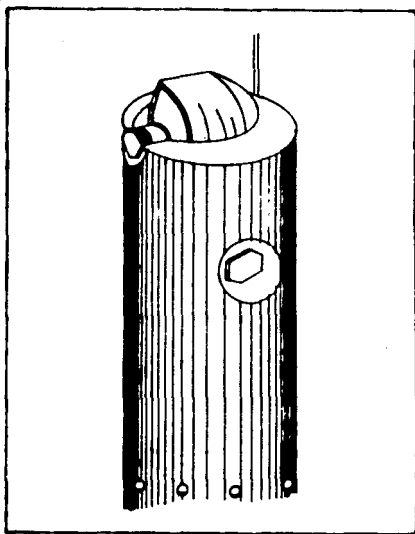


FIG. 4.3 PISTOLA ESTÁNDAR PARA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO.

Las pistolas de este tipo son designadas para densidades de 4 disparos por pie y ángulos de fase de 90 grados. La longitud de esta cubre unos 10 metros con 41 cargas, y pueden operarse de 15 a 20 veces.

Las características comunes de éstas son :

- Penetración adecuada y fase múltiple.
- La carga y el cordón de detonamiento se encuentran en el interior del tubo.
- El espacio anular entre pistola y revestimiento es reducido.
- Son de fácil manejo y mecánicamente fuertes.
- Se tiene para alta densidad de carga
- Resistente a productos químicos dentro del pozo.
- Se pueden disparar selectivamente, aunque no permite tener presión diferencial negativa.
- No daña la tubería de revestimiento.
- Rangos de operación.

a) Con cargas convencionales "RDX" 340 °F y 20000 psi.

b) Con cargas para altas temperaturas y presión 470 °F y 25000 psi.

Algunas de las ventajas es su rigidez y peso, el cual limita la longitud del ensamble con que puede ser corrida, no hay limpieza inmediata de las perforaciones, daño posible por invasión de fluidos en la formación.

La longitud común es de 30 pies. Cabe aclarar que éstas son bajadas por medio de cable.

La otra opción son las de alta densidad 12 cargas/pie son bajadas con el aparejo de producción, pero ésta se abordará más adelante en técnicas de disparo, ya que su operación es más sofisticada.

Hasta aquí se ha revisado los diferentes tipos de pistolas y sus características, con el objeto de seleccionar la adecuada para las condiciones requeridas del pozo.

Es recomendable correr la pistola más grande posible en cualquier tamaño del revestimiento dado. Hay dos razones fundamentales para esto:

Primero: es esencial tener una cierta distancia optima entre la carga moldeada y la pared de la pistola, de tal manera que el chorro de la carga moldeada se desarrolle completamente.

Distancias demasiado pequeñas resultan en un agujero grande en la pistola pero en un agujero pequeño en el revestimiento y poca penetración en la formación.

Segunda: las pistolas son bajadas sin centrado y obviamente permanecen en contacto con la pared interior del revestimiento. Por lo tanto, los disparos dirigidos deben atravesar la distancia mínima del fluido antes de penetrar el revestimiento. Entre más pequeña la pistola y por lo tanto, más grande la distancia, mayor será la reducción del diámetro del agujero como también la penetración en la formación.

Como consecuencia de lo anterior, debe considerarse la distancia pared del pozo-pistola, cuando se escoge el tamaño o diámetro de la pistola (ya que la distancia deberá ser la misma optima para alcanzar la penetración máxima).

CAPITULO V

TECNICAS DIVERSAS DE DISPAROS

La practica mas comun de terminar un pozo es la perforacion de la tuberia de revestimiento que se encuentra cementada en la formacion productora, con el fin de conseguir la produccion deseada, esta operacion se conoce con el nombre de tecnica de disparo.

El objetivo del disparo es lograr canales de flujo que permitan una optima comunicacion entre la zona de interes (yacimientos) y el interior de la tuberia de explotacion (I.R), para que la afluencia de fluidos sea en una forma eficiente y consistente con la explotacion planeada del pozo.

Es muy importante la terminacion de un pozo ya que constituye la culminacion de una exhaustiva exploracion primaria y de una ardua tarea de perforacion hasta llegar a los yacimientos petroliferos, es por eso que se debe tener una adecuada seleccion de cargas y un sistema optimo de disparos, de lo contrario podrian acarrear resultados adversos y en un caso extremo hasta se condenarian yacimientos que parecerian rentables a la vista del analisis de los registros geofisicos, repercutiendo a la vez, notablemente en el aspecto economico.

V.1. USANDO PRESION DIFERENCIAL NEGATIVA

No es mas que la tecnica de disparar con una presion en el interior del pozo, menor que la presion de formacion. Esto conduce en la mayoria de los casos a tener las siguientes situaciones:

- Asegura una maxima densidad efectiva del disparo.
- Mayor flujo de la formacion al pozo.
- Facilita el movimiento de fluidos hacia el pozo, limpiando los agujeros perforados y evita poner en contacto la formacion productora con fluidos extraños que pudieran dañarla.

Para obtener estas condiciones pueden usarse tres metodos:

- a).- El metodo bajado con cable a traves de la tuberia de produccion.
- b).- El metodo hibrido, bajado con cable a traves de la tuberia de revestimiento.
- c).- El metodo de pistolas bajadas con tuberia de produccion (TFC).

En Mexico para lograr la presion diferencial negativa la tecnica mas practicada es la de bajar pistolas a traves de la tuberia de

producción del tipo Enerjet o Scallop (fig.5.1). En yacimientos de gas, donde las perforaciones son más difíciles de limpiar, es recomendable disparar con altas presiones negativas mayores de 500 psi y pozos productores de aceite una diferencial negativa entre 200 y 500 psi ó en formaciones con permeabilidad mayor de 100 md se requieren de 200 a 500 psi y para aquellas que son menores de 100 md de 1000 a 2000 psi.

V.2. USANDO PRESION DIFERENCIAL POSITIVA

Se le llama a la técnica de disparar con una presión dentro del pozo mayor que la presión de la formación (fig.5.2). Esto es relativamente desventajoso a pesar de ofrecer una buena penetración, ya que pueden resultar los agujeros disparados dañados y/o taponados, al no haber una limpieza inmediata de las perforaciones.

Posiblemente al iniciar la producción del pozo solamente se puedan limpiar algunas perforaciones, mientras que las demás quedan parcialmente obstruidas, este efecto lo podemos visualizar en la fig 5.3, al momento del disparo el lodo obtura las perforaciones, y solo algunas producen. Esta técnica se logra con las pistolas de tipo convencional corridas a través de la tubería de revestimiento.

Esta técnica es poco practicada y se utiliza en yacimientos someros.

Para evitar este daño, el lodo debe ser desplazado con un fluido removedor del lodo, de ser posible circular con salmuera hasta que las cargas de partículas sean menor de 2000 ppm, y si lo permiten los márgenes económicos y de seguridad, colocar un fluido de terminación limpio y filtrado. Estas medidas de limpieza son especialmente importantes, debido a que cualquier sedimentación o restos en el sistema del fluido, serán forzados dentro de la formación y afectarán la permeabilidad. En esta técnica generalmente se recomienda tener el pozo lleno de diesel o agua salada para eliminar el daño, y en formaciones de calizas y dolomitas utilizar, en el fluido de terminación, una proporción de ácido clorhídrico o acético para que al momento del contacto con la formación estas reaccionen.

V.3. TECNICAS HIBRIDAS

Existe otro método para mejorar la respuesta del sistema disparado, llamado "FACT" (Técnica de terminación con acción positiva). El método implica disparar convencionalmente el pozo con presión positiva, usando pistolas de gran diámetro para tuberías de revestimiento, para mantener el daño de formación a un mínimo, las pistolas se disparan preferentemente en presencia de un fluido de terminación compatible.

Después la tubería de producción y el empacador se corren en el agujero con un disco sellado instalado como se muestra en la

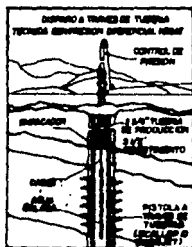


FIG. 5.1

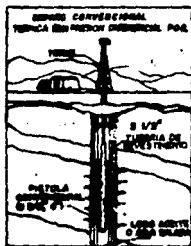


FIG. 5.2

(fig.5.4). El disco sellado permite que la tubería de producción se corra vacía en su interior (seca) o con un bache deseado. El empacador es puesto y ajustado con presión diferencial para lograr valores invertidos (inversos en presión). Enseguida una barra pesada se deja caer para eliminar el disco, resultando una imposición repentina, de grandes niveles de presión negativa en los agujeros disparados los cuales tienden a un surgimiento, limpiando a la vez las perforaciones.

Los resultados de la productividad se han reportado como favorables, tratando de aproximar a aquellos utilizados con el método de las pistolas bajadas con tubería de producción.

Las características comparadas con el método de disparo bajo con cable por T.P. son:

- Mejoramiento eficaz de la pistola en penetración y ángulo de fase.
- Mejores presiones diferenciales se pueden usar sin riesgo de estallamiento del ensamble cable/pistola.
- El tiempo requerido para bajar el aparejo es equivalente o menor.
- El método es simple.

Precauciones de operación:

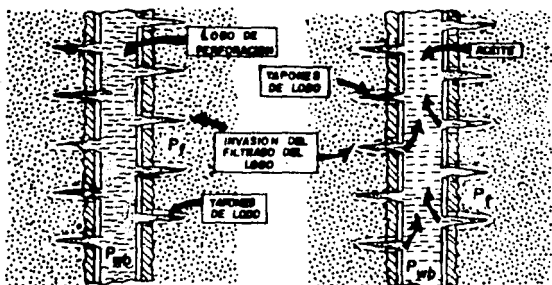
- La selección apropiada de la eliminación del disco es una consideración importante. Pueden emplearse diferentes discos dependiendo de la presión hidrostática.
- Como una precaución más, es recomendable correr la T.P. tapada inmediatamente encima del disco. Una vez colocado el empacador, recuperar el tapón por la línea de deslizamiento y proceder con la operación.

V.4. TÉCNICAS DE PISTOLAS BAJADAS CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN

En esta técnica(24) las pistolas son instaladas al final de la serie de la tubería de producción (fig.3.5). Se analizará con más detalle que las anteriores, pues a pesar de ser una vieja técnica de disparo considerada en otro tiempo fuera de lo común e insegura, actualmente, con versiones mejoradas de la técnica, se han tenido excelentes resultados en otros países.

En México se introdujo por primera vez en 1985 en el pozo Luna-1, y otra operación, en 1986, en el pozo Nilo-1D, desafortunadamente hubo complicaciones operacionales que hicieron fracasar estos dos primeros intentos. Sin embargo en Nov.de 1987 se disparó el pozo Reynosa 1001 con excelentes resultados de la técnica. Con lo que Pemex está aceptando esta técnica como otra alternativa de puesta en producción de los pozos.

FIG 3-3 RESTRICCIONES DE FLUJO CREANAS CUANDO $P_{wb} > P_f$
DURANTE EL DISPARO



Debido a P_f
DURANTE EL DISPARO
EL SEBALTADO ES DE
PERFORACIONES OBTURADAS
CON LODO

DESPUES DE LA TERMINACION
 $P_f > P_{wb}$
SOLO UNAS POCAS PERFORACIONES
PRODUCEN

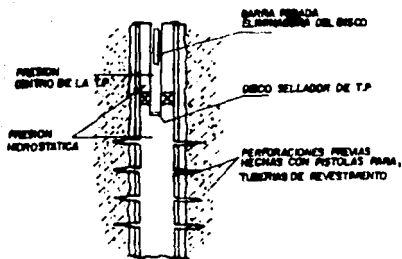
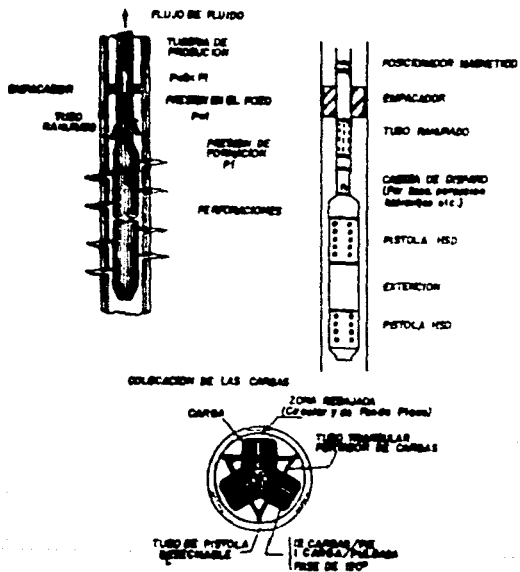


FIG. 3-4 TÉCNICA NBRBA

FIGURA 3.3. TÉCNICA DE DESPUNDO BALAS CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN (Por P1).



Cabe hacer mención que para utilizar esta técnica se deben tener una serie de requerimientos tanto del personal, como de las condiciones del pozo, de lo contrario fracasaría la operación.

Primeramente las pistolas se componen de:

- Un transportador hueco.
- Adaptadoras.
- Cordon detonante.
- Extensiones.
- Paquete de explosivos etc.

Todas las pistolas son desechables, aún las recuperadas del pozo. Los diámetros van desde 2 7/8" a 7 1/4".

Las pistolas de 2 7/8", 3 3/8" y 4 1/2" proporcionan una densidad de 6 cargas pie, con una fase individual de 50 grados entre disparos, la distancia vertical entre cargas es de 2". Las de 5" a 7 1/4" ofrecen una densidad de disparo de 12 cargas pie con cada carga individual espaciada 1" y fase de 120 grados.

La distancia vertical comparada con las pistolas convencionales que tienen espaciamiento de 3" entre cargas, tiene ventajas importantes en formaciones con laminación delgada. La tabla 5.1 muestra las especificaciones API y un esquema de la distribución de las cargas para esta técnica.

Las cargas usan un diseño básico como aquellos utilizados con cable telemétrico.

Se tienen cargas para ocasionar diámetros de agujero grande, para terminaciones de empaque de grava en formaciones no consolidadas, que combinan un agujero de tamaño grande con una penetración media de la formación. Estas cargas son del tipo Ultrapack.

Cargas de penetración profunda: Utilizadas en formaciones consolidadas y terminaciones múltiples, que combinan un agujero de tamaño mediano con una penetración profunda, las cargas son del tipo Hyperjet y Ultrajet. Se debe considerar que las cargas utilizadas en esta técnica, estarán expuestas a temperaturas de fondo por periodos muy largos, por lo cual debe utilizarse explosivos especiales.

La técnica proporciona buenos resultados en terminaciones naturales, particularmente en aquellas formaciones con baja o mediana permeabilidad, las que son severamente dañadas durante la etapa de perforación y en pozos profundos con alta carga litostática. La zona

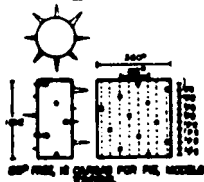
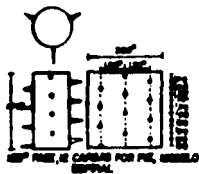
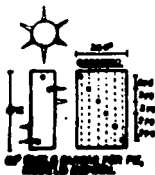
Nombre de la carga	Su medida en pulgadas (in)	Rango de SAGPY (Psi)	Cargas por Pie	Peso del Espolvo (gr)	APISEP-45 Prueba de Combate		
					Resultado de la TR (gr)	Resultado del espolvo disperso (gr)	Penetración (in)
Almagr * Almagr **	5 7/8 5 7/8	4,000	0	10	4 1/2	0.28	40.00
Almagr - Jet # 1 Almagr # 1	5 7/8 5 7/8	25,000 25,000	0 0	20 20	4 1/2 4 1/2	0.42 0.60	45.75 7.75
Almagr - Jet # 2 Almagr **	4 1/2 4 1/2	25,000 25,000	0 0	20 20	5 1/2 5 1/2	0.48	17.00
Almagr - Jet # 3 Almagr - Jet # 4 Almagr # 2	5 5 5	15,000 25,000 15,000	5 22 22	27 20 20	7 7 7	0.40 0.44 0.60	20.00 20.07 0.00
Almagr - Jet # 5 Almagr # 3	5 1/2 5 1/2	15,000 15,000	12 12	20 20	7 1/2 7 1/2	0.40 0.60	10.00 11.00
Almagr - Jet # 6 Almagr # 1 Almagr # 2	6 6 6	15,000 15,000 15,000	22 22 22	20 20 20	6 1/2 6 1/2 6 1/2	0.30 0.60 0.70	21.07 0.60 0.40
Almagr - Jet # 7 Almagr **	7 7	15,000 15,000	22 10				
Almagr - Jet # 8 Almagr # 3	7 1/2 7 1/2	15,000 15,000	22 22	37 20	6 1/2 6 1/2	0.47 0.60	27.00 22.25

* Marca de Schenker.

** Resulta en condiciones de API.

TABLA 3.1. ESPECIFICACIONES API PARA PISTOLAS Y CARGAS BAJADAS CON LA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN.

PRESENTES Y DISTRIBUCIÓN DE LAS CARGAS



compactada y los restos del chorro son removidos por medio de un diferencial de presión controlado, este sistema hace posible disparar cualquier longitud de intervalo en una sola corrida, además utiliza altas densidades reduciendo en el incremento de producción. Puesto que las pistolas de tipo convencional utilizadas en estos casos, además de ser disparadas con presión diferencial positiva, pueden dejar algún daño residual.

Procedimiento básico de esta técnica:

Las pistolas son instaladas verticalmente con una cabeza de disparo en lo alto.

Existen cuatro tipos para disparar las cabezas:

a).- Caída de barra o por percusión.

La detonación de la pistola se logra por medio de un detonador de percusión el cual es disparado por el impacto de un pistón o perno. Se requiere 50 lb/og² de momento de fuerza para detonarlo, no es posible detonarlo por medio de ondas de radio o electricidad estática (fig.5.5).

b).- Accionada con presión o hidromecánico.

El disparo de esta cabeza es activado por diferencia de presión entre el espacio anular tubería-revestimiento por encima del empacador y la presión hidrostática por debajo de este. Utilizando un adaptador especial, la presión es transmitida a la cabeza de disparo donde libera los seguros que sostienen al pistón de disparo. Luego, el pistón de disparo, asimismo es impulsado por la presión hidrostática del pozo.

De esta manera la cabeza es segura, puesto que para disparar se necesitan cumplir dos condiciones:

- Que exista presión diferencial por encima y por abajo del empacador, que solo pueda darse si el empacador está asentado correctamente.
- Que exista suficiente presión hidrostática para impulsar el pistón de disparo contra el resorte de seguros hasta el detonador. Este sistema es seguro, y el único que puede ser usado con éxito en pozos altamente desviados.

Es conveniente operar cuando los métodos de desplazamiento son utilizados para lograr una presión negativa. Una simple tubería ranurada debajo del empacador puede ser usada para hacer fluir el pozo. Este sistema puede combinarse con el probador de formaciones para poder tomar una prueba de pozo inmediata (fig.5.7).

c).- Conector hidroeléctrico por cable

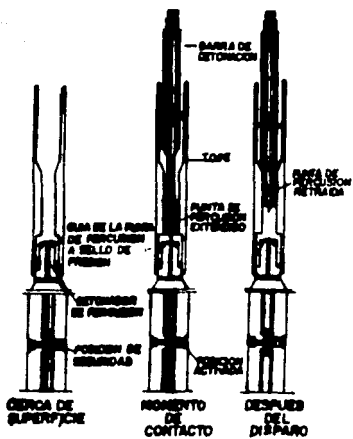


FIG. 3.6. CABEZA DE DISPARO MECANICO

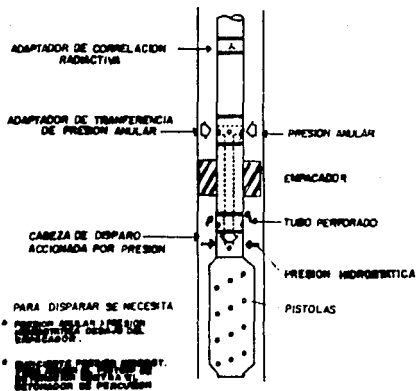


FIG. 3.7 PRINCIPIO DE LA CABEZA DE DISPARO ACCIONADA CON PRESION

La cabeza de disparo de la pistola es ajustada a un contacto eléctrico "macho" con la cara hacia arriba. Una herramienta de conexión hidroeléctrica que incorpora un contacto "hembra" viendo hacia abajo y un empalme con esta, es corrida con cable telemétrico. Un contacto positivo de los dos y una indicación positiva de acoplamiento son obtenidos por un sistema de seguro J. Una vez establecido el contacto, se aplican aproximadamente 300 libras sobre tensión normal del cable para asegurar el contacto. Ya acopiada la herramienta, se pasa corriente al detonador eléctrico para dispararlas. Este tipo es más confiable que el de percusión, ya que se obtiene una indicación positiva de disparo.

Teniendo también un sistema de seguridad para impedir el disparo ante la presencia de fluidos dentro de la pistola. Estos detonadores se pueden equipar con filtros de radio frecuencia, para utilizar en zonas donde existen transmisores de radio y no interrumpir los transmisores. Se puede bajar a la vez la herramienta de Rayos-Gamma, para control de profundidad.

La operación se puede hacer en un solo viaje resolviéndose como sigue:

- Correlación con RG-CCL.
- Asentamiento del empacador.
- Verificación de la profundidad del empacador con RG.
- Accionar la válvula de camisa.
- Acoplamiento de la conexión hidroeléctrica y disparo de la pistola.

El desacoplamiento de la cabeza hidroeléctrica se hace por eliminación de la tensión, (fig.5.8).

d).- Barra detonante con batería

Consiste de un cartucho que contiene una batería generando un voltaje suficiente para hacer explotar el detonador. Este cartucho contiene en su parte inferior un contacto "hembra" que empalma con el contacto "macho" del sistema de conexión hidroeléctrica previamente descrito.

Junto a la barra detonante con batería se incorpora la herramienta para operar la válvula de presión diferencial de camisa corrediza, cuando es utilizada.

Las ventajas de la barra detonante con batería sobre la barra detonante de percusión, radican en la seguridad de operación. La detonación de las pistolas es efectuada únicamente con la corriente

eléctrica suministrada por la batería. Objetos que pudieran caer accidentalmente encima de la cabeza no la detonarían. En caso de haber una falla en el disparo no es necesario pescar la barra detonante, puesto que una resistencia eléctrica descarga las baterías en aproximadamente 30 minutos, o las baterías se degradan con la temperatura y se auto-destruyen después de aproximadamente 1 hora a la temperatura de fondo.

Entonces, en caso de que las pistolas no detonen después de lanzar la barra detonante con baterías, debido a que la barra estuviera atorada en la batería, es necesario esperar 1 hora y poder sacar la sarta. No se necesita pescar la barra porque las baterías no tendrán voltaje alguno para detonar las pistolas, aun si la barra se libera y conecta correctamente a la cabeza de disparos de pistolas.

Esto contrasta totalmente con el sistema de barra de percusión simple que es esencialmente inseguro hasta que la barra detonante es recuperada (fig. 5.9).

Sobre la cabeza del disparo están instalados varios tramos de tuberías y otros accesorios, lo que provee la comunicación del fluido entre la tubería de producción y el revestimiento. El emparador es fijado encima de la cabeza del disparo. Todo este conjunto es bajado al pozo al final del aparejo. Alrededor del 20% de las veces el emparador es puesto de antemano usando cables. Esto permite precisar el control de la profundidad para el emparador, pero condiciona el tamaño de la pistola al diámetro interior del emparador, generalmente es usada una pistola de 3 3/8".

A grandes rasgos el procedimiento general de la operación es como sigue: las pistolas son posicionadas aproximadamente usando un cable marcador y localizado precisamente con registro CCL-RG a través de la tubería. Un marcador radioactivo opcional podría ser insertado en el aparejo para una correlación positiva.

Antes de que se ponga el emparador, el fluido podría ser circulado abajo de la tubería a través de la comunicación de las extensiones hacia el espacio anular, limpiando la tubería de residuos, una vez que las pistolas se posicionan, el emparador es anclado y el pozo preparado para la puesta en producción. Esto incluye establecer las condiciones requeridas de presión diferencial negativa en la tubería y enfrente de la pistola. Las pistolas son disparadas como observadas en la (fig. 5.10), y asumiendo que los cálculos de todos son correctos, los hidrocarburos surgen hacia el pozo a través de la tubería y hacia la cabeza del pozo. Si es necesario, las pistolas podrían ser abandonadas en el fondo del pozo, de otra manera, se dejan colgando de la tubería.

Ventajas:

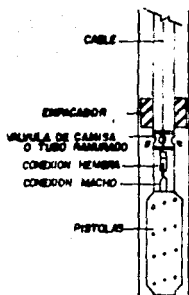


FIG. 3.8 - SISTEMA DE ESPARO CON CABLE Y CONEXION HIDROELECTRICA.

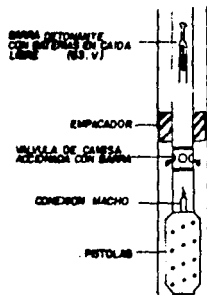


FIG. 5.9 - SISTEMA DE ESPARO UTILIZANDO LA BOBINA DETONANTE CON BATERIAS

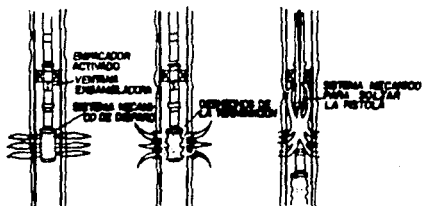


FIG. 8.10 PROCEDIMIENTO GENERAL

Esta técnica permite una seguridad completa, pistolas de gran diámetro y presión diferencial negativa. El equipo de control en la cabeza del pozo es instalado y el empacador anclado antes de los disparos. Lo que elimina el posible riesgo de usar un preventor para descontrol por cable.

La presión diferencial entre la formación y el pozo permite que cada disparo produzca el fluido de la formación, limpiando el conducto perforado tanto de residuos como de la zona compactada. Esto incrementa las posibilidades de que la mayoría de las perforaciones contribuirá a la producción.

El tamaño del agujero es controlado por el diámetro interior del revestimiento más que el de la tubería o del empacador.

Pistolas de diámetros mayores (5", 5 1/2", 7 1/4") permiten:

- Un espacio anular óptimo entre la pistola y el revestimiento.
- Cargas moldeadas más poderosas y si es necesario una densidad de disparo mucho más alta.

Por ejemplo, el volumen de formación removido por una pistola de 5" y una densidad de 12 disparos/pie es cerca de once veces más grande que el removido por una pistola de 2 1/8" y una densidad de 4 disparos/pie. Consecuentemente, la pistola de 5" expone 6 veces más área superficial de la formación. Este rendimiento adicional podría ahorrar el gasto de una limpieza, nitrogenar o quizá de una estimulación. En situaciones extremas cuando la velocidad promedio del flujo es reducida suficientemente a través de la carga del pozo, esta técnica podría eliminar la necesidad de un costoso empaque de grava.

Otra ventaja es la facilidad con la cual puede disparar espesores grandes. Las pistolas de gran diámetro utilizadas en disparos convencionales son pesadas, por lo tanto sargas muy largas de estas pistolas exceden fácilmente la fuerza de tensión del cable. Por otra parte, la longitud de las pistolas a través de la tubería es restringida por su altura más elevada. Sin la necesidad de estos inconvenientes, la técnica de pistola bajadas con tubería de producción no tiene prácticamente ninguna limitación de longitud. Realmente las operaciones han envuelto instalaciones de pistolas cubriendo 1000 pies o más.

Trabaja perfectamente en pozos desviados a cualquier ángulo debido a que las pistolas pueden simplemente ser empujadas hacia el fondo. El control de la profundidad es doblemente chequeado con un cable marcador y un registro CCL-RG. La orientación de las pistolas es simplificada puesto que la sarga puede ser rotada desde la superficie.

Las pistolas no pueden ser expelidas del pozo durante la producción inicial debido a que son seguramente fijadas al empacador.

Cuando la barra detonante es operada por percusión o hidráulicamente, se usan detonadores, la completa ausencia de cables eléctricos significa que radios, equipos de soldadura, tormentas eléctricas, protectores catódicos y otras fuentes de interferencia no imponen ya un riesgo.

Los pozos con H2S no son difíciles de operar. Una ventaja frecuentemente observada, es la eliminación del deterioro del revestimiento debido a numerosos viajes generalmente necesarios para disparar grandes secciones.

Desventajas:

La aplicación de esta técnica fue disminuyendo por un defecto. Era imposible confirmar si la sarta completa disparó apropiadamente, a menos que las pistolas fueran sacadas. Un incremento en la presión del pozo, no obstante, indica claramente que los disparos han ocurrido. Sin embargo existe un nuevo detector de disparos que señala una detonación exitosa, pero el costo es elevado.

Puesto que estas pistolas no son recuperables, se desea frecuentemente dejarlas caer al fondo del pozo. Hay lugares, no obstante como en el mar del norte donde podrían ser reutilizadas y perforar más profundo debido a las barrenas. Matar el pozo para sacar las pistolas podría ser igualmente inaceptable.

El costo es elevado, ya que una faceta de la economía de las operaciones de esta técnica, costaría a las compañías petroleras y provendría probablemente para desplazar completamente los disparos convencionales. En un área como la costa de California podría haber 300 pies de yacimiento en 1000 pies de formación.

Esto requiere blanquear secciones en la sarta de las pistolas. El caso extremo son los disparos con entrada limitada, en estas aplicaciones no podría ser económico y es ciertamente improbable desplazar los disparos por cable.

Otro problema concierne a la degradación de explosivos durante la operación, puesto que los explosivos se degradan a las temperaturas de fondo y debido a que toma hasta 100 veces más tiempo correr una pistola bajada con tubería de producción que con cable, existe la posibilidad de perder potencia. Anteriormente, explosivos resistentes a altas temperaturas fueron un compromiso, aunque eran menos potentes y más caros que los RDX.

Hoy en día los explosivos recientemente introducidos de alta temperatura proporcionan tanta potencia como los "RDX" a cualquier temperatura.

Finalmente, la seguridad es importante. Un gran número de personas está envuelta en una operación de este tipo, que las que existen en disparos convencionales. Esto supone un énfasis renovado en los procedimientos de seguridad y educación del personal.

CAPITULO VI

EJEMPLOS DE APLICACION EN POZOS

Para estimar la penetración y la productividad en un pozo se hace necesario contar con diseño a priori que permita evaluar los efectos de diferentes modelos de terminación con diferentes sistemas de disparos. Para comprobar lo antes mencionado, se proceso el programa "SP4N" propiedad de la compañía Schlumberger en el pozo Paredon III.

El programa consiste de dos módulos independientes que podrían ser corridos separadamente o en combinación. El primer módulo calcula la penetración hacia la formación y los diámetros de entrada hechos por un chorro de carga, dada la siguiente información:

- Diámetros de las tuberías.
- Grados de los revestimientos.
- Diámetro del pozo.
- Densidades (gr/cm^3) de las diferentes capas (tubería, cemento, formación), que el chorro encuentra en su camino.
- Composición mineralógica de la roca.
- Presión de sobrecarga, presión de formación.
- Posición de la tubería en el pozo.
- Información en fase y posición de la carga seleccionada.

Los valores para los parámetros que se utilizan en la caracterización de cada carga individual son derivados de los experimentos en pruebas API sección 2.

Con respecto a la predicción de los diámetros dejados en la tubería por los disparos, están basados en las pruebas de la sección 1 del API.

En cuanto al segundo módulo, este calcula la productividad de la terminación usando los nomogramas de S.Locke y K.C.Hong.

Estos nomogramas son actualmente los más avanzados y versátiles, aunque tienen algunas restricciones. La razón de productividad utilizada en este programa emplea las ecuaciones vistas en el capítulo II.

Otros parámetros que se incluyen son:

- Se toma en cuenta el porcentaje de arcillosidad para corregir la densidad de disparo nominal.

- Considera la fracción del espesor productivo abierto al flujo. Admite anisotropía de permeabilidades cuando el daño (S_D) es igual a cero utilizado en nomograma de Hong.

- Admite hasta cinco tuberías para diseñar la penetración etc.

VI.1. PROGRAMA "SPAN" SCHLUMBERGER

Para el análisis de la penetración se utilizó información proporcionada por el departamento de Ingeniería Petrolera del distrito Villahermosa de Pemex.

Datos de terminación y formación:

Diámetro del agujero	= 14"
Densidad de la formación	= 2.7 gr/cm ³
Diámetro exterior del revestimiento	= 5"
Diámetro interior del revestimiento	= 4.239"
Peso de la tubería	= 18 lb/pie
Densidad de la tubería	= 7.82 gr/cm ³
Grado de la tubería	= P-110
Densidad del cemento	= 1.55 gr/cm ³
Posición de la tubería	= Centralizada

Para estimar la productividad se utilizó el método de Loebe, requiriendo la siguiente información:

El área de drenaje se supuso circular con un radio de 1600 pies, el espesor de la zona productiva igual con 177 pies, ángulo de desviación 8 grados, fracción de la zona abierta al flujo ($b=1$), 15% de arcillosidad, no se consideró anisotropía en la formación ($k_v/k_h = 1$).

Se probó con daño a la formación de 0, 5 y 10. La razón de permeabilidades, entre la zona virgen y la dañada fue considerada de 0.1, es decir la invasión de fluidos provocó una disminución de permeabilidad en 10 veces respecto a la permeabilidad original.

Del valor del daño a la formación ($S_D=5$) y de la razón de permeabilidades (K/K_d) el programa estima un radio de la zona dañada

igual a 2.41 pg. Para un daño de 10 (S=10) se tiene 6.62 pg de zona dañada. El daño por convergencia de flujo no se asumió pero se consideró el daño por inclinación del pozo.

La densidad de disparos para cada carga se consideró hasta de 12 disparos/pie, aunque el diseño de las pistolas se tiene hasta 4 disparos/pie. La fase fue seleccionada de acuerdo a los diseños de cada carga: 90 grados para las cargas Ultrajet 3 3/8" y para las restantes 0 grados.

Procesamiento:

El pozo terminado con una tubería de revestimiento de 5" se probó para 4 tipos de cargas, todas bajadas con cable:

Carga Hyperdome de 1 11/16"

Carga Enerjet de 2 1/8"

Carga Ultrajet de 2 1/8"

Carga Ultrajet de 3 3/8"

Los resultados de penetración, en términos de la sección 2 del AFI, para cada una de las cargas es:

		DAF	TTP	EH
Hyperdome	1 11/16"	5.46"	5.03"	0.29"
Enerjet	2 1/8"	11.0"	10.25"	0.36"
Ultrajet	2 1/8"	9.50"	8.69"	0.33"
Ultrajet	3 3/8"	13.08"	12.45"	0.35"

A partir de esta información se tiene que la mejor penetración se alcanza con la carga Ultrajet 3 3/8" RDX, esta misma carga es posible utilizarla en pistolas de 2 7/8", aparte de su mejor penetración su diseño contempla una fase de 90 grados con lo que se logra aumentar la productividad con respecto a una carga de 0 ó 180 grados.

La segunda mejor penetración se observa con la carga Enerjet, aunque este contempla fases de 0 y 180 grados. En este caso para el pozo Paredón 312, fue considerado el caso de 0 grados. Igualmente se tiene que la carga Ultrajet 2 1/8" en tercer lugar de penetración posee versiones de 0 y 180 grados y fue considerado el caso de una fase. Finalmente la carga Hyperdome 1 11/16" utilizada en la pistola Scallop posee una pobre penetración la que impactará en la productividad final, y se hará menos favorables para formaciones dañadas.

Se consideraron tres casos para cada carga antes descritas:

- a).- Sin daño en la formación ($S_i=0$).
- b).- Daño moderado ($S_i=5.0$) y mediano espesor de la zona dañada.
- c).- Un daño severo ($S_i=10.0$) y por consiguiente una ancha zona de daño.

En todos los casos que la zona dañada redujo 10 veces la zona virgen. El cálculo de la productividad se efectuó considerando la penetración promedio de las cargas colocadas a diferentes fases. Asimismo, en todos los casos se estimó la productividad para 2, 4, 8 y 12 disparos/pie, aunque en su diseño original se contempla hasta 4 disparos/pie. Finalmente se consideró la pistola pegada a la tubería.

VI.2. VERIFICACION DE LOS DISPAROS REALIZADOS

La fig.6.1 presenta el resumen de productividades para las cuatro cargas, asumiendo un factor de daño igual a 5.0 (con una razón de permeabilidades, $K_d/k_o = 0.1$) dándonos un espesor de zona dañada 10.0 a 2.41". Este caso puede considerarse el más real con valores medios de daño y permeabilidades. Como es de esperarse la mejor productividad corresponde a la carga más penetrante y con mejor tasa (Ultrajet 3 3/8", 90 grados) y que logra sobrepasar la zona dañada (fig.6.2a) en 8" a partir de la posición que guarda la pistola, esta productividad es de 1.07, para 12 disparos/pie y se conserva como la máxima. Para 4 disparos/pie se tiene también una productividad alta 0.96. La parte sombreada corresponde a la densidad de disparos diseñada para las cargas, es decir 4 disparos/pie. Por lo que el valor de 0.96 anterior se tendrá como referencia u sea el 100%.

La carga Enerjet 2 1/8" (fig.6.2b) penetra satisfactoriamente después de salvar la zona dañada, por lo que su productividad para 4 disparos/pie resulta de 0.84, con lo que logra llegar al 88% de la máxima.

Por otra parte la carga Ultrajet 2 1/8" (fig.6.2c) logra salvar aproximadamente en 3" la zona dañada. Su productividad llega a ser de un 80% con respecto a la máxima. Esta productividad tiene un valor de 0.77 con una densidad de 4 disparos/pie.

Finalmente, la carga Hypardome 1 11/16" alcanza aproximadamente la mitad (49% que la lograda con la Ultrajet 3 3/8"). Esto es debido en gran parte a su poco poder de penetración la que salva escasamente la zona dañada (fig.6.2d).

La tabla 6.1 resume los resultados de penetración y productividades para estos tres diseños.

PRODUCTIVIDAD VS. DENSIDAD NOMINAL DE DISPAROS

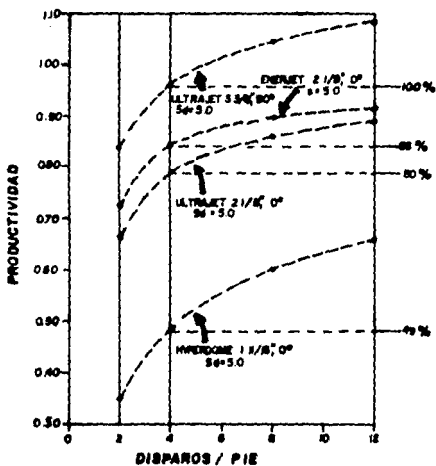


FIG. 8.1 - PRODUCTIVIDADES PARA 4 CARGAS EN EL POZO
 PARSONS - 342, CON FACTORES DE DAÑO S_d = 3.0

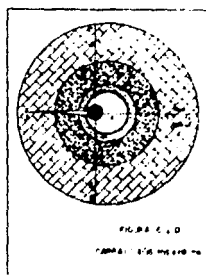
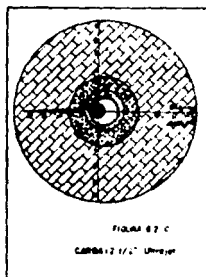
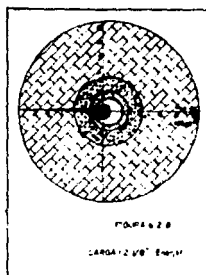
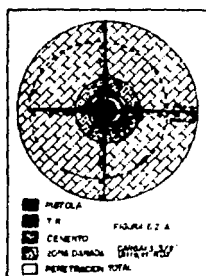


TABLA 6.1

CARGA	FASE	PENETRACION TOTAL	PENETRACION DE PERFORACION	DIAMETRO T.R.	DENSIDAD DE DISPAROS	PRODUCTIVIDAD
Ultrejet (3 3/8")	0°	11.00"	9.75"	0.31"	2	0.83
	90°	9.65"	7.94"	0.31"	4	0.96
	180°	9.98"	8.48"	0.31"	8	1.04
	270°	9.65"	7.94"	0.31"	12	1.08
Enerjet (2 1/8")	0°	9.70"	8.40"	0.32"	2	0.73
					4	0.84
					8	0.80
					12	0.88
Ultrejet (2 1/8")	0°	8.43"	7.18"	0.30"	2	0.67
					4	0.79
					8	0.86
					12	0.89
Hypardome (1 1/8")	0°	4.83"	3.88"	0.23"	2	0.58
					4	0.66
					8	0.60
					12	0.68

Cabe mencionar que la arcillosidad en la formación reducirá el número de disparos por pie, considerando 9% de arcilla en el espesor a disparar, se ha estimado la siguiente reducción.

DENSIDAD NOMINAL	DENSIDAD EFECTIVA
2.0	1.7
4.0	3.4
8.0	6.8
12.0	10.2

Considerando un daño más fuerte en la formación ($S_1=10$) este se reflejará en la productividad como se ve en la fig.6.3, donde se observa que en línea general todas las cargas han disminuido su rendimiento en términos de productividad, debido a que ahora el espesor de la zona dañada es más severo igual a 6.62".

Las curvas conservan su orden: Primero las cargas Ultrajet 3 3/8" mantienen su supremacía sobre las demás, basándose en su mejor diseño de fase (fig.6.4A) logrando 0.67 de productividad para 4 disparos/pie (100%) En segundo término se encuentra la Enerjet con 0.62 para 4 disparos/pie que representa un 90% de la máxima, debido a que logra rebasar también la zona dañada (fig.6.4B). En tercer lugar se tiene la carga Ultrajet 2 1/8" su penetración logra ir más allá del daño (fig.6.4C) aunque más ligeramente, con lo que alcanza tener 0.52 de productividad que significa el 76% de la máxima. Finalmente la carga Hyperdome, que es pobre en su penetración, sostiene solo 0.18 de productividad, que se traduce a tener un 26% de la máxima lograda por la Ultrajet 3 3/8", esto es debido a que toda la longitud de la penetración se queda dentro de la zona dañada (fig.6.4D). La tabla 6.2 presenta el resumen de los resultados asumiendo un factor de daño igual a 10.

Ahora si asumimos que no existe daño a la formación (caso hipotético) las curvas de productividad se incrementan, manteniendo el orden de los casos anteriores, (fig.6.5): La carga Ultrajet consigue ahora 1.2 de productividad (que significa que la producción conseguida con estas condiciones es superior a la de agujero descubierta) con 4 disparos/pie.

Las fig. de 6.6.A,B,C y D presentan las cuatro penetraciones sin daño en la formación, observándose que en todos los casos la penetración es semejante.

La tabla 6.3 resume los resultados de productividad.

Otro factor que intervendrá en la productividad final de la técnica de disparo: Se sabe que al disparar con una presión negativa es el medio más eficiente para lograr una limpieza efectiva de los conductos. Por lo que en estos cuatro casos la densidad nominal de

PRODUCTIVIDAD VS. DENSIDAD NOMINAL DE
DISPAROS

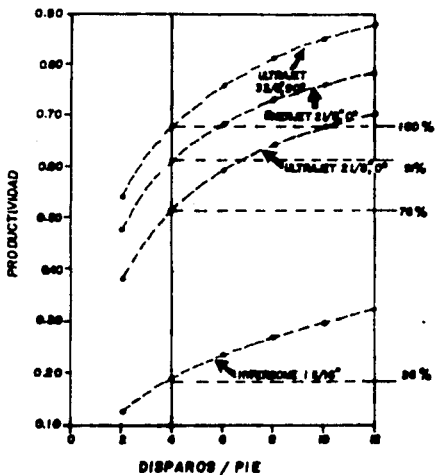


FIG. 6.3 - PRODUCTIVIDADES PARA 4 CARGAS EN EL PRZO
RABBIT-312 CON BARRO 24-10

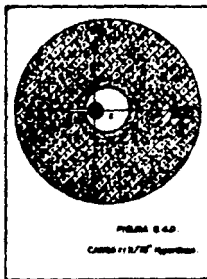
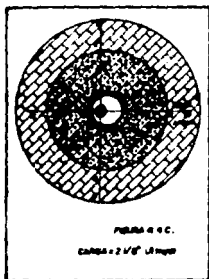
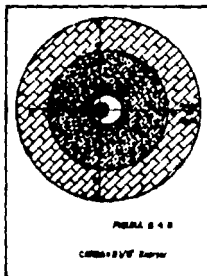
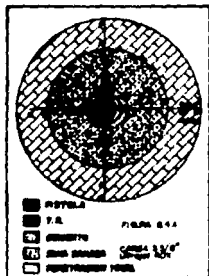


TABLA 6.2

CARGA	DENSIDAD DE DISPAROS	PRODUCTIVIDAD
Ultrejet 3 3/8"	2	0.54
	4	0.88
	8	0.81
	12	0.88
Emerjet 2 1/8"	2	0.47
	4	0.82
	8	0.75
	12	0.78
Ultrejet 2 1/8"	2	0.38
	4	0.82
	8	0.84
	12	0.71
Alpacoma 1 2/16"	2	0.13
	4	0.18
	8	0.27
	12	0.39

PRODUCTIVIDAD VS DENSIDAD NORMAL DE DISPAROS

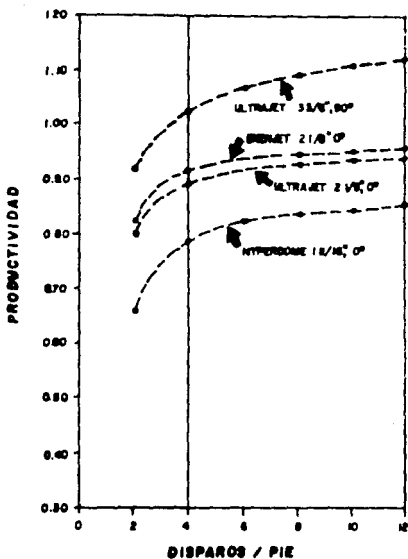


FIG 6 3 - PRODUCTIVIDADES PARA 4 CARBAS EN EL POZO PAREDON - 312 SIN DADO, Sd=0.

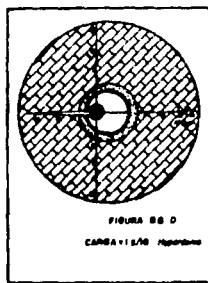
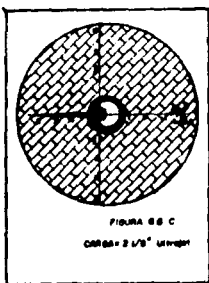
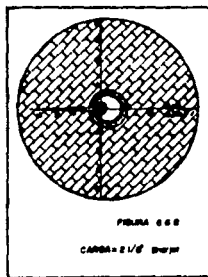
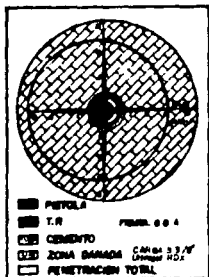


TABLA 6.3

CARGA	DENSIDAD DE DISPAROS	PRODUCTIVIDAD
Ultrajet 3 3/8"	2	0.92
	4	1.03
	8	1.09
	12	1.02
Enerjet 2 1/8"	2	0.82
	4	0.91
	8	0.94
	12	0.98
Ultrajet 2 1/8"	2	0.79
	4	0.89
	8	0.95
	12	0.94
Hyperboreo 1 5/8"	2	0.64
	4	0.75
	8	0.84
	12	0.88

disparos se verá reducida, se asume regularmente que solo un 50% de los disparos fluirán después de una limpieza, la efectividad puede ser confirmada con un registro de producción (molinete).

De los resultados anteriores se concluye:

1.- La mejor carga, en términos de penetración y productividad es la Ultrajet 3 3/8" (misma carga utilizada para una pistola de 2 7/8").

2.- La zona dañada no interviene en la penetración pero "sí" en la productividad final, de donde se desprende la importancia de rebasar la zona dañada.

3.- Aún considerando hipotéticamente altas densidades en todas las cargas, el incremento en la productividad es debido esencialmente a que la penetración ha logrado rebasar la zona dañada. Superando entonces, en importancia a la densidad y a la fase, en una primera etapa de diseño, pero estos dos últimos factores cobran relevancia si se elige la técnica de presión diferencial positiva, donde se disminuirá notablemente el número efectivo de disparos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Con anticipación a la operación del disparo se debe tener más en cuenta el tipo de pistola a usar. Sin embargo, para obtener una mejor respuesta se requiere plantear y aplicar un programa completo de esta operación, por ejemplo el "SPAN".
- 2.- Del conocimiento y dimensión de los diferentes tipos de daños que pueden existir en la zona productora y de su discretización, nos dará la alternativa para mejorar la productividad. Pues es práctica común en pruebas de campo obtener el efecto del daño total (S_t), no obstante debe notarse que una estimulación o tratamiento no puedan remover el daño por turbulencia componente del daño total, al contrario resultaría en un incremento de turbulencia. Para este caso un incremento en la densidad de disparo es la mejor solución.
- 3.- Emplear, para el diseño de perforaciones o disparos, cada uno de los diferentes métodos analizados con el fin de determinar su aplicabilidad.
- 4.- Utilizar el método de Locke para yacimientos homogéneos, ya que este diseño contempla un mayor número de factores, además presenta un nomograma para el cálculo de la relación de productividad. Para yacimientos heterogéneos emplear el método de Tariq.
- 5.- Recabar la información necesaria para obtener la relación de productividad mediante el análisis de núcleos, presiones de fondo, registros geofísicos, así como de información del campo en desarrollo.
- 6.- Intentar obtener una relación de productividad de uno o mayor, una vez de efectuadas las perforaciones, evaluarlas.
- 7.- En yacimientos de rocas carbonatadas con heterogeneidades, determinar estas y también las zonas dolomitizadas y fracturadas para perforarlas y poder explotarlas.
- 8.- Antes de efectuar las perforaciones verificar que el intervalo a perforar tenga la cementación en buenas condiciones, usar fluidos de control limpios, emplear en el momento de la perforación, presiones diferenciales negativas, inducir, lo más pronto posible, el pozo.
- 9.- Al perforar intervalos naturalmente fracturados, determinar la dirección de las fracturas y efectuar perforaciones orientadas, perpendiculares a esta dirección.
- 10.- Para diseñar y/o analizar la operación de disparo es necesario contar con información de intervalo por perforar, de las pistolas a emplear, de la operación de perforación y de presiones de fondo. El conocimiento de esta información auxiliará para la selección del método de determinación de la relación de productividad a usar.

11.- Se concluye que los factores que mas influyen en la relacion de productividad son : Arreglo de las perforaciones, espaciamiento vertical de las perforaciones, penetracion, densidad, radio, daño de la formacion, daño de la perforacion, anisotropia de la formacion, intervalo perforado, factor de turbulencia y desviacion del pozo.

12.- En los metodos de estudio analitico, electrico-analogico y de modelos matematicos empleados por los investigadores, la relacion de productividad tiene una misma tendencia, incrementarse al aumentar la profundidad de las perforaciones, comprobando con esto que los conceptos fundamentales, empleados en cada uno de los metodos, son correctos y que las pequenas variaciones que se tienen se deben a las consideraciones hechas y a los procedimientos de calculos seguidos por cada investigador.

13.- Utilizar una presión hidrostática menor que la de la formacion al momento del disparo (Técnica con presión diferencial negativa) y usar equipo de control de presión en la cabeza del pozo.

14.- La técnica de pistolas bajadas con tubería de producción es superior a la técnica híbrida y convencional, esta conclusión está apoyada en estudios teóricos y de campo, como el que se realizó a 90 pozos terminados con esta técnica. Sin embargo este tipo de operación requiere de condiciones más especiales y de condiciones particulares del pozo, de lo contrario podría acarrear resultados adversos y erróneamente se tacharía de inefectiva.

15.- El diseño de la operación del disparo debe realizarse, dependiendo de los tipos de formación y de la experiencia que se tenga en los diferentes campos. En un campo nuevo si los márgenes económicos lo permiten podría evaluarse diferentes tipos de terminaciones (agujero descubierto y variando la técnica de disparo) con el objeto de seleccionar aquella que proporcione las mejores condiciones de producción para poder hacer recomendaciones a las futuras terminaciones.

16.- En formaciones blandas (arenas) usar la técnica de entrada limitada, es decir, disparos selectivos: Mayor densidad en zonas poco permeables y despues de estimular o fracturar, aumentar el número de agujeros.

17.- En formaciones homogéneas el parámetro de mayor importancia es la penetración de la carga, esta debe traspasar el daño ocasionado en la pared del pozo. Aumentando la densidad existe un mejoramiento en la razón de productividad, la condición es que la penetración esté más allá de la zona dañada, cabe aclarar que la densidad debe aumentarse solo cuando se tienen buenas condiciones tanto de la cementación como de la T.R.

Se encontró que en México la densidad que generalmente se utiliza es:

- Para zonas de baja permeabilidad de 8 a 13 cargas metro.
- Para zonas de alta permeabilidad de 4 a 8 cargas metro.

Se concluye que en los yacimientos homogéneos no es necesario alta densidad de disparos.

En cuanto al faseamiento, las pistolas unidireccionales (fase de cero grados) resultan a veces de efectos negativos en la productividad del pozo, debido al flujo convergente que se origina a la entrada de las perforaciones. Sin embargo en pozos desviados este efecto no es muy significativo. La condición más apropiada es la fase de 90 grados entre cargas. En terminaciones para fracturamiento o estimulación la fase de 60 grados, ofrece mejores condiciones, ya que existe una dirección preferencial hacia donde se desarrolla el fracturamiento.

18.- En formaciones heterogéneas la eficiencia de la terminación está mayormente influenciada por:

- Formaciones Anisotrópicas.
- Formaciones con intercalaciones de lutitas.
- Formaciones naturalmente fracturadas.

Dependiendo de la presencia de estas se debe planear la geometría del disparo.

- En formaciones Anisotrópicas debe usarse la mayor densidad posible con una penetración mayor de 5'. El faseamiento entre cargas no es muy significativo.

- Para formaciones con intercalaciones de capas delgadas de lutitas, primeramente se debe establecer una distribución física de los espesores de las capas, mediante la correlación de Registros Geofísicos de pozo a pozo y dependiendo de esto planear la densidad efectiva del disparo. Por lo regular la productividad es mejorada notablemente con un aumento en la densidad.

- En formaciones naturalmente fracturadas, depende del tipo y la dirección de fractura, así como de la comunicación hidráulica de perforaciones y red de fracturas. La penetración del disparo es el parámetro de mayor importancia y si la fractura provee buena comunicación vertical la densidad cobra menor relevancia que el desfaseamiento de las pistolas.

Se debe tener información de la orientación de la fractura para planear los disparos, de tal forma que sean perpendiculares a esta dirección con el objeto de intersectarla.

19.- Las pruebas a pozos además de proporcionar parámetros del yacimiento, proveen una indicación de la efectividad de los disparos en pozos terminados normalmente, debido a que un coeficiente de turbulencia alto indica pocas perforaciones abiertas.

Un medio efectivo de analizar estos resultados es, haciendo recomendaciones de cambios o planeando apropiadamente un sistema de disparos para un pozo nuevo, puede realizarse mediante el análisis del sistema nodal. Este procedimiento ofrece un medio de optimizar más económicamente los pozos productores en base a las caídas de presión en todo el sistema.

NOMENCLATURA

- A = Constante (adimensional).
- a = Profundidad de las perforaciones (pg).
- B = Constante (adimensional).
- D = Parámetro de velocidad para flujo no-Darcy (10^3 pies³ a condiciones standar/día).
- h = Profundidad desviada (pies).
- hi = Altura de la cima del yacimiento a la cima del intervalo disparado (pies).
- hD = Profundidad por espesor de la zona desviada (pies).
- hiD = Altura (adimensional).
- h'D = Espesor del yacimiento (adimensional).
- hpD = Fracción del espesor del yacimiento disparado.
- ht = Intervalo total (pies).
- hWD = Espesor del yacimiento perforado (adimensional).
- K = Permeabilidad (Darcy's).
- Kcz = Permeabilidad de la zona dañada y compactada alrededor de las perforaciones (md).
- Kd = Permeabilidad de la formación dañada (Darcy's).
- Kh = Permeabilidad horizontal (Darcy's).
- Kv = Permeabilidad vertical (Darcy's).
- Nt = Número total de perforaciones en el intervalo perforado.
- Pe = Presión de drené (psi).
- Pw = Presión del pozo (psi).
- qgp = Producción de gas (10^3 pies³ a condiciones standar/día).
- qi = Gasto a condiciones ideales (bi/día).

q_s = Gasto a cualquier condición (bl/día).
 RF = Razon de productividad (adimensional).
 rD = Radio del pozo (adimensional).
 rd = Radio de la zona dañada (pies).
 re = Radio de drene (pies).
 rp = Radio de las perforaciones (pies).
 rw = Radio del pozo (pies).
 S_{cz} = Factor de daño causado por el daño a las perforaciones.
 S_c = Factor de daño real, causado por el daño en la formación (adimensional).
 S_{Dq} = Pseudo factor de daño causado por la turbulencia del flujo.
 S_{θ} = Factor de pseudo daño causado por la desviación del pozo.
 S_c = Pseudo factor de daño causado por la convergencia del flujo hacia las perforaciones (adimensional).
 S_{pp} = Factor de pseudo daño causado por penetración parcial del yacimiento.
 S_t = Daño total a la formación (adimensional).
 S_{θ} = Pseudo daño en pozos desviados.
 I_w = Elevación del punto medio de la zona perforada con respecto a la base de la formación.
 I_{wD} = Elevación del punto medio del intervalo perforado con respecto a la base de la formación (adimensional).
 ang = Ángulo absoluto de desviación.
 $\text{ang } D$ = Ángulo ajustado de desviación.
 β_{cz} = Coeficiente de velocidad (por efecto de turbulencia o flujo no-darcy a través de los medios porosos 1/pie).
 θ = Desviación del pozo (ángulo que forma el pozo con respecto al plano de la formación).
 μ = Viscosidad del fluido (c.p.).

TTP = Penetración total de la muestra.

EH = Diámetro de entrada del disparo.

DAP = Penetración total.

BIBLIOGRAFIA

1. "History of Petroleum Engineering", A.P.I. Div. of Production, Dallas, (1961).
2. Francisco Garalacochea P. y Miguel A. Benitez M. "Apuntes de Terminación de Pozos" Facultad de Ingeniería, U.N.A.M, Abril de 1983.
3. Pemex, Subdirección de Producción Primaria "Procedimiento de Operación de Ingeniería Petrolera" Gerencia de Desarrollo de Campos, Mexico, D.F. 1989.
4. Schlumberger "The Technical Review" Volume 33 Number 2 Perforating, 1985
5. Hawkins M.F. "A note on the Skin Effect", AIME Louisiana State University, Pag. 356-357.
6. Cinco L.H. y Colaboradores "Pseudo Skin Factors For Partially Penetra-Ting-Directionally-Drilled Wells" SPE 5589, 1972 Dallas.
7. Paul Pacatjacobs "Approximate Partial-Penetration Pseudo Skins for Infinite-Conductivity Wells", SPE Reservoir Engineering, (Mayo 1987), Pag.227-234.
8. McLeod, H.O.Jr. "The Effect of Perforating Conditions on Well Performance, JPT (Enero, 1983) Pag. 21-29.
9. Tariq S.M. "Evaluation of Flow characteristics of Perforations Including non-Linear Effects Using Finite Element", Articulo SPE 12781, 1984 California Regional Meeting, Long Beach Ca. (Abril 1984).
10. Russell D.G. "Extensions of Pressure Build-Up Analysis Method" SPE Reprint Series No.9, Pressure Analysis Methods, Pag.175-187.
11. Mathews, Erns y Hazebroek "Method for Determination of Average Pressure in a Bounded Reservoir", SPE Reprint Series No.9, Pressure Analysis Methods.
12. Samaniego V.F. Apuntes de la clase de explotación avanzada, 1984.
13. Muskat M. "The Effect of Casing Perforation on Well Productivity" Trans.,AIME (1943) 151,175-184.
14. Harris M.H. "The Effect of Perforating on Well Productivity", JPT (Abril,1966) 518-528.
15. Hong K.C. "Productivity of Perforated Completions in Formations With Out Damage", JPT (Agosto,1975) 1027-1028.

16. McDowell J.M. y Muskat M. " The Effect on Well Productivity of Formation Penetration Beyond Perforated Casing ", Trans., AIME (1950) 199, 309-312.
17. Howard R.A y Watson M.S. " Relative Productivity of Perforated Casing, II ", Trans., AIME (1950) 187, 323-324.
18. Locke S. " An Avanced Method for Predicting the Productivity Ratio of a Perforated Well ", JPT (Dic.1981) 2481-2486.
19. Klots J.A., Krueger R.F. y Dye D.S. " Effect of Perforation Damage on Well Productivity ", JPT (Nov.,1974) 1303-1314.
20. Tariq S.M., Ichara M.J. Ayestaran L. " Performance Completions in the Presence of Common Heterogeneities, Anisctropy, Lamination or Natural Fractures ", articulo SPE 14320, 1985 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE, las Vegas, Nv. (Sep.,1985).
21. Todd S.J. y Bradley D.J. " Perforation Geometry and Skin Effect on Well Productivity ", Articulo SPE 15009, Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference of SPE, Midland, Tx, (Marzo 1981).
22. Bell W.T. " Perforating Techniques for Maximizing Well Productivity " Articulo Presentado en el Simposio Tecnico de la AIPM en Beijing China, Marzo, 1982 SPE No.10033.
23. J. Aitken " Perforating Training Book " Schlumberger Dic.1981
24. Bell, W.T: " Perforating Underbalanced-Envolving Techniques " SPE, Octubre, 1984.
25. Arnulfo Ramirez Fimentel " Analisis del Flujo de fluidos a Traves de Disparos " Tesis de Maestria, Facultad de Ingenieria, Division de Estudios de Posgrado, U.N.A.M.