

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Petróleo

La Efectividad del Método de Baleo en la Completación de Pozos

Proyecto para optar el Título de Bachiller en
INGENIERIA DE PETROLEO

ENRIQUE FLORES ARCINIEGA

Promoción "Ing. JUAN RODRIGUEZ DEL CASTILLO"

LIMA - PERU

1963

----- *****

A LA MEMORIA DE MI PADRE

***** -----

————— *****

A MI MADRE CON TODO CARÍÑO

***** —————

AGRADEZCO AL CUERPO DE CATEDRATICOS DE LA FACULTAD

Por las enseñanzas y atenciones recibidas
durante mis estudios universitarios,
en especial al Ing° ARTURO BURGA
que bajo su dirección redacté este trabajo

—— * ——

UNIVERSIDAD

22 05

I N D I C E

	Pág.
Cap. I.- HISTORIA	6
Cap. II.- DESCRIPCION DE LOS METODOS DE BALEO Completacion de pozos, Formas de Comple- tacion. Perforacion de forros productores Métodos de perforación con balas. Perfora- cion con "Jet".	8
Cap. III.- CONSIDERACIONES TEORICAS Y ASPECTOS DE LA OPERACION	12
Cap. IV.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA TIPO Escopeta Recuperable. Escopeta desintegra- ble. Tipo de Escopeta de proyectiles.	16
Cap. V.- EQUIPOS DE BALEO PARA LA COMPLETACION Tipos de proyectiles. Tipos de escopetas.	19
Cap. VI.- EFECTIVIDAD DEL METODO DE BALEO Primeras Investigaciones. Procedimiento y discusión de una investigación. Evaluación de los datos. Resultado de los Tests.	24
CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFIA	43

CAPITULO I

HISTORIA

Anteriormente al desarrollo del equipo de perforación de forros con balas, el mayor número de pozos petrolíferos de buenas arenas, era completado por el método de "hueco abierto".

En casos cuando la formación productiva era incapaz de soportar la perforación propiamente dicha, por ser las arenas flojas o mal consolidadas, corriendo los forros se aguantaba la pared del hueco, generalmente estos forros estaban con huecos o perforaciones al entrar en el pozo.

Actualmente en algunos campos petrolíferos todavía se usa esa técnica con ciertas mejoras, por lo general en formaciones de gravas, aunque también en áreas donde arenas no consolidadas están prevaleciendo.

Se utilizaba mucho perforadoras mecánicas que en el mismo terreno podían efectuar las perforaciones de los forros un momento antes de bajarlos, también se hacía uso de cualquier herramienta que pudiera abrir huecos a voluntad de una manera más o menos uniforme, pero estos elementos tenían una serie de desventajas y su uso era por demás limitado. Esta desconfianza e inseguridad en los métodos empleados aceleró el desarrollo del equipo de perforación a balas.

Avances en la técnica de cementación, en la estimulación de los pozos, como los fracturamientos hidráulicos, acidificación, con mejoras de equipo de perforación, han hecho que sea común, en algunos campos es un paso obligado la completación con el método de baleo. En rocas duras se usa siempre por ser lo más efectivo.

La completación a "hueco abierto" puede tener ciertas ventajas sobre el baleo, pero esta última es más deseable debido a una serie de factores, como selectividad de las zonas productivas, mayor control del G.O.R. o relación gas-petróleo y W.O.R. o relación agua-petróleo, facilidad de seleccionar tratamientos de estimulación y trabajos de reacondicionamientos o "Work overs", reparaciones y mantenimiento económicos etc.

Existen dos métodos muy conocidos, para perforar forros cemento y formación, son 2 técnicas distintas, estas son:

- 1).-Uso de proyectiles o balas
- 2).-Perforación por explosión dirigida de gases, conocida comunmente como "Jet".

CAPITULO II

DESCRIPCION DE LOS METODOS DE BALEO

COMPLETACION DE POZOS

Denomínase completación de pozos, a todas las operaciones que se realizan en el pozo, desde el momento de alcanzar el tope de las formaciones productivas, hasta ponerlo en producción normal.

Cualquier operación durante este lapso, tiene un efecto permanente sobre la formación, esto significa que debe tenerse mucho cuidado, pues influye sobre la producción acumulada del pozo.

En las prácticas de completación, cada vez se va dando mayor importancia a los efectos permanentes que producen las diferentes técnicas aplicadas sobre formaciones productoras, para conseguir la máxima recuperación primaria, produciendo con el mínimo gasto de la energía del reservorio y dejando el pozo preparado para futuros programas de recuperación secundaria, mantenimiento de presión etc.

FORMAS DE COMPLETACION

- a).-Completación con forros corridos hasta el fondo de la formación productiva, cementado y baleado.
- b).-Completación con forros asentados en el tope de

la formación productiva, a hueco abierto o con lana perforada.

PERFORACION DE FORROS PRODUCTORES

En todo tipo de completación donde se bajan forros hasta cubrir las arenas productivas, estos deben ser perforados para que el pozo produzca.

El objetivo final de toda perforación de forros es conseguir:

- 1).-Penetración profunda del proyectil sin que deje rebada en los forros.
- 2).-Evitar el fracturamiento del cemento.

Como dijimos anteriormente existen dos métodos de perforar los forros, el que usa proyectiles y el denominado comunmente "Jet", haremos un breve estudio de ambos.

METODO DE PERFORACION CON BALAS

Este método de perforar con balas vino a usarse recién a principios del año 1930.

Los fundamentos teóricos y los rasgos corrientes del equipo que se usaba, son los mismos que ahora, sin embargo las mejoras introducidas son considerables tanto en los materiales usados, como en la performance obtenida.

El equipo es esencialmente una escopeta que puede disparar varios proyectiles, radialmente en sentido horizontal y en distintos planos, esta se introduce mediante un ca-

ble en el pozo y se dispone o coloca frente a los intervalos productivos, un control eléctrico desde la superficie dispara uno a uno los proyectiles, estos perforan el casing, el cemento y penetran en la formación.

Esta penetración perfecta se debe a la alta velocidad del proyectil.

En el equipo corriente se puede seleccionar el disparo de una bala o de un grupo, esto depende del criterio del operador.

Una interesante aplicación del equipo de disparo es la fractura de la formación mostrada en el dibujo N° 1.

Este aparato dispara un gran proyectil, verticalmente hacia abajo, el cañón está desviado 90°, luego la bala sale horizontalmente, como lo muestra el dibujo anterior, además de la penetración aproximada de 2 á 5 pies es considerable la fractura que efectúa en la formación, igual mecanismo ha tenido gran suceso usado como una potente descarga hueco abajo, con el fin de limpiar de escoria el pozo.

PERFORACION CON "JET"

La mal llamada bala "Jet" en razón que no existe proyectil, es una carga cuya explosión es dirigida horizontalmente hacia la formación, efectúa el mismo trabajo de la bala común, aunque tiene ciertas ventajas sobre aquella.

Existen dos tipos de escopeta "Jet", la de tipo lla-

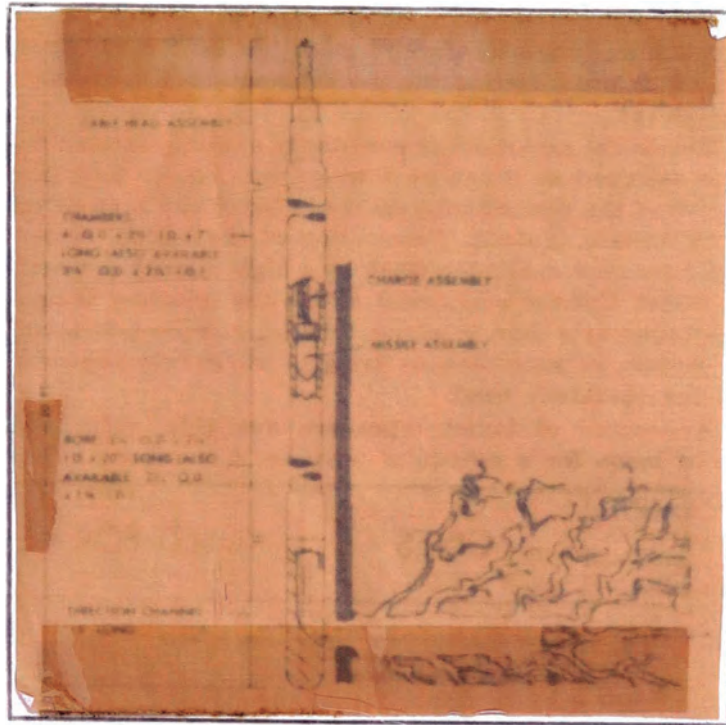


FIG. # 1

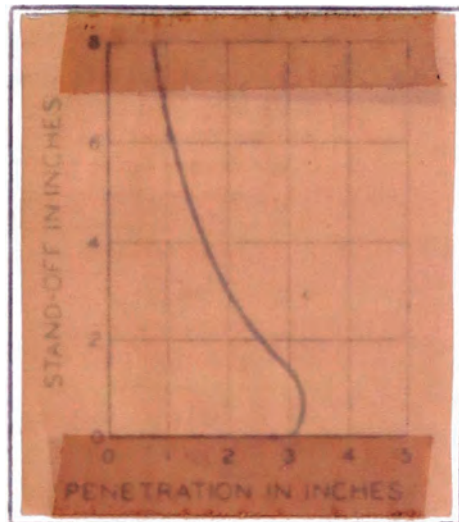


FIG. # 2

mada recuperable y la otra llamada desintegrable.

La escopeta de tipo recuperable está compuesta de un cilindro de acero, que transporta las cargas, éstas están situadas opuestamente una a una, para ser accionadas radialmente en el eje vertical en cada disparo, el control está en la superficie.

La escopeta desintegrable está compuesta de un material que se disgrega íntegramente cuando el disparo es efectuado, por lo general es de aluminio o de hierro colado (fundido), la caja que contiene las cargas es de vidrio aluminio, hierro colado, plástico o material de cerámica.

CAPITULO III

CONSIDERACIONES TEORICAS Y ASPECTOS DE LA OPERACION

La investigación en estos últimos años ha estado orientada para poder encontrar una escopeta considerablemente más pequeña que el diámetro interno de los forros que comúnmente se usan.

Esto requeriría que un proyectil corriente o una carga "Jet" deba gastar parte de su energía, en atravesar mayor espesor de fluido de perforación o aceite, disminuyendo la penetración en la formación después de haber perforado forros y cemento.

Este efecto es más crítico en el equipo "Jet" que en el de balas, esto es fácilmente apreciable debido a que el elemento perforante en el equipo "Jet" no es sólido, luego disminuye la penetración en forma notoria. Este factor ha sido denominado "Efecto Standoff" o sea la distancia o espacio que debe recorrer la "Jet" o bala, antes de encontrar la superficie interior de los forros a perforarse.

El efecto Standoff en la penetración de la "Jet", bajo algunas condiciones, ha sido estudiado por Reed y Gran. El gráfico N° 2 nos dá el valor de la penetración en pulgadas versus el efecto Standoff.

LA OPERACION

La medida de la profundidad debe ser de la forma más

exacta, generalmente se encuentra esta para efectuar los disparos con el uso combinado del "Collar locator" y registros radioactivos y la medida está hecha en relación a los collares o uniones de los forros, los cuales son localizados por el alambre del detector, anexo a la escopeta, ya sea de tipo "Jet" o de proyectiles.

El factor crítico en una perforación satisfactoria depende, del tipo de fluido presente en el hueco, donde se realiza la operación.

Se puede formar una considerable restricción al flujo debido a la deshidratación de algunos fluidos de perforación lo cual puede formar una completa o parcial obstrucción.

Otros fluidos pueden dañar la formación por simple contaminación de una sección expuesta por las perforaciones.

Aceite, lodo a base de aceite o agua salada, en el lugar opuesto al intervalo designado, determina en muchos casos ventajas con preferencia en el orden designado de los fluidos, es decir primero aceite, después de base aceite etc.

Existen muchos otros factores que deben tenerse en cuenta para la selección del equipo óptimo para una tarea particular. También en ciertas ocasiones se han usado ambos tipos de equipo, la última palabra la tiene el operador en cuanto a la elección de este.

CONSIDERACIONES TEORICAS

Como dijimos anteriormente, el objeto de la comple-

tación por perforación es obtener la mayor producción, su función es poner en contacto la formación con el interior del casing.

Los principales factores a considerar al respecto son:

- 1).-Diámetro de la perforación (por los proyectiles)
- 2).-Densidad de la perforación (Nº de huecos por pié).
- 3).-Profundidad del Baleo.

Los efectos de estas variables sobre la productividad del pozo han sido sujetos a considerables estudios, un resumen de éstos aparece como sigue:

- 1).-El efecto del diámetro del baleo no es crítico si el tamaño de este permanece encima de $\frac{1}{4}$ de pulgada, en densidades normales de baleo.
- 2).-Para una longitud de penetración de $\frac{1}{2}$ diámetro á 1 diámetro de pozo, se puede obtener un pequeño incremento en la productividad, aumentando la densidad de baleo hasta unos 4 ó 6 huecos por pié usando balas de $\frac{1}{2}$ " de diámetro.
- 3).-Mayor penetración incrementa la producción del pozo, lo cual puede exceder teóricamente la capacidad del hueco, a densidades moderadas de baleo.

La anterior investigación, también reportó un de -

crecimiento de la productividad de un 5 a 9 % si el diámetro de la perforación adelgaza un poco en forma uniforme.

El factor de longitud de penetración puede ser más crítico que el señalado en la curva Fig. N° 3, si la presencia de daño o invasión de la zona es considerable.

Actualmente se experimenta un nuevo método, que consiste en reducir al máximo la densidad de perforación, es decir abrir menos huecos en el casing, se llega hasta a disparar una sola bala en cada arena productiva.

Se seleccionan las zonas a balearse con los estudios de los registros litológicos, de fluorescencia de muestras, micropaleontológicas, de permeabilidad, porosidad, fluidos que se deduce de los registros eléctricos, pero estos últimos son los que deciden realmente.

En posterior capítulo haremos un estudio más detallado de las investigaciones efectuadas sobre la efectividad del método de perforación por baleo.

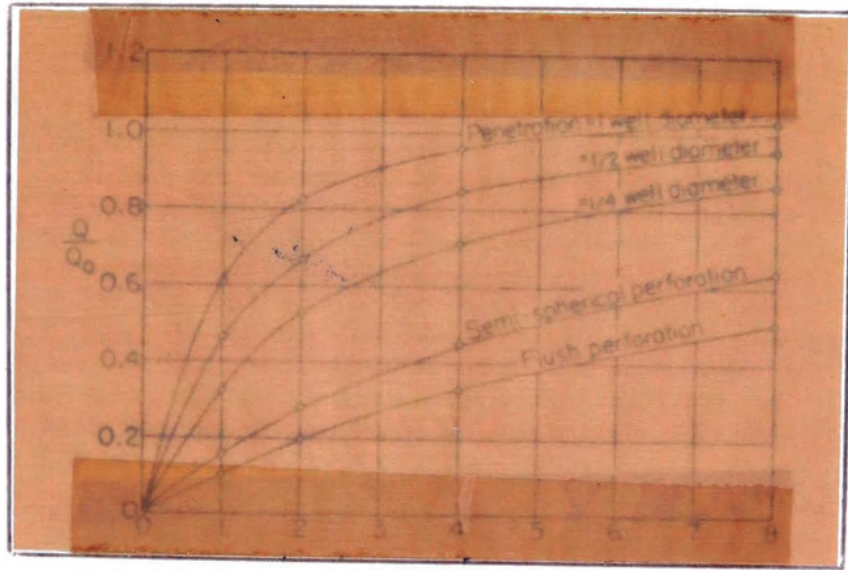


FIG N° 3

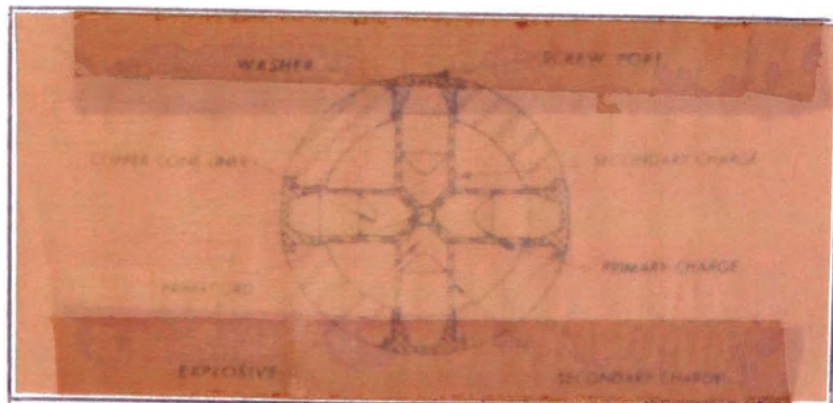


FIG N° 4

CAPITULO IV

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA TIPO

El problema es cuando se aplica cada uno de los tipos de equipo para la completación por perforación.

Esta cuestión de si escogemos bala o "Jet" para efectuar una operación, es continuamente confrontada por la mayor experiencia de operación.

Estos son algunos factores, los cuales podríamos considerar cuando seleccionamos o escogemos alguno de los 2 tipos de equipos perforadores:

- 1.- Resistencia del casing o forros, del cemento que cubre y de la formación a la perforación.
- 2.- Tamaño de los forros dentro de los cuales la escopeta debe correr.
- 3.- Factor económico de la tarea particular de perforación a llevarse a cabo.
- 4.- Tipo de formación expuesta a la perforación y tipo de tratamiento final de completación.
- 5.- Efecto de la temperatura y profundidad del pozo en el equipo a usarse (Máximo 275°F para balas corrientes).
- 6.- El tamaño de fractura deseable.
- 7.- Tipo de completación del pozo (Cased Hole, Hueco abierto, permanente o convencional).

Estos factores, algunos están relacionados, pero nin

guno de ellos puede ser usado como una guía para determinar un proceso de perforación.

Ha sido definitivamente determinado que la dureza y densidad del casing, cemento y formación, tienen un efecto substancial sobre la penetración de la bala y uno relativamente pequeño sobre la penetración de la "Jet".

Podríamos así ver cada factor y analizarlo, mas viendo las ventajas y desventajas de cada tipo, se puede seleccionar el más apropiado para una tarea particular dada. Veamos las ventajas de la "Jet".

- 1.- Penetra profundamente en las rocas duras y se usa para sarta múltiple de casing.
- 2.- Mínima rebaba en la pared de los forros (casing)
- 3.- Mínima fractura del cemento y de las rocas blandas.
- 4.- Igual o mayor fractura que los proyectiles en formaciones duras.
- 5.- Utilizable para tipos de completación permanente o para huecos reducidos.

Siguiendo con el tipo "Jet", veamos las ventajas y desventajas, de los dos tipos de escopeta; la recuperable y la no recuperable o desintegrable.

ESCOPETA RECUPERABLE:

- 1.- Mínima escoria queda en el pozo
- 2.- Semiselecciona la descarga

- 3.- Está menos expuesta a dañarse mientras penetra en el hueco.

ESCOPETA DESINTEGRABLE:

- 1.- Máxima escoria deja en el hueco al desintegrarse.
- 2.- No efectúa acción de suabeo al no recuperarse
- 3.- Acción de limpieza en el hueco abierto, debido a la desintegración del artefacto.
- 4.- Puede disparar grandes cargas en el hueco abierto.
- 5.- Facilidad para armarse, disparo regular, con gran espaciamento.

Expondremos ahora las ventajas del tipo proyectiles o balas.

TIPO DE ESCOPETA DE PROYECTILES :

- 1.- Igual penetración a la Jet en rocas blandas
- 2.- Máxima fractura en rocas blandas, con mínima penetración en formaciones compactas.
- 3.- Selecciona la descarga conveniente
- 4.- Diámetro uniforme de hueco
- 5.- Controla la penetración al seleccionar la bala necesaria.
- 6.- Menor rebaba puede ser obtenida con la selección del tipo del proyectil a usarse, pero solamente a expensas de la penetración.

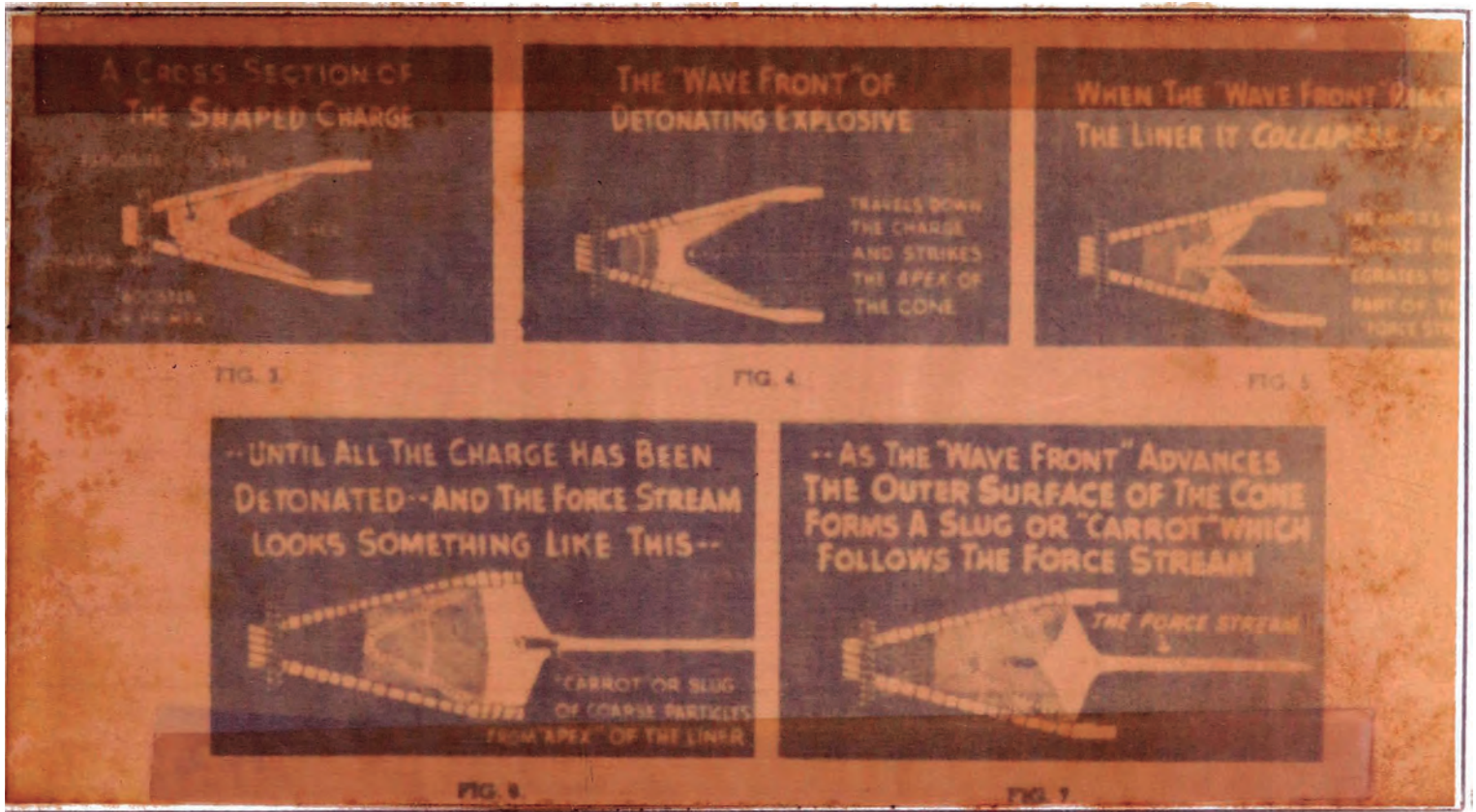


FIG N° 5

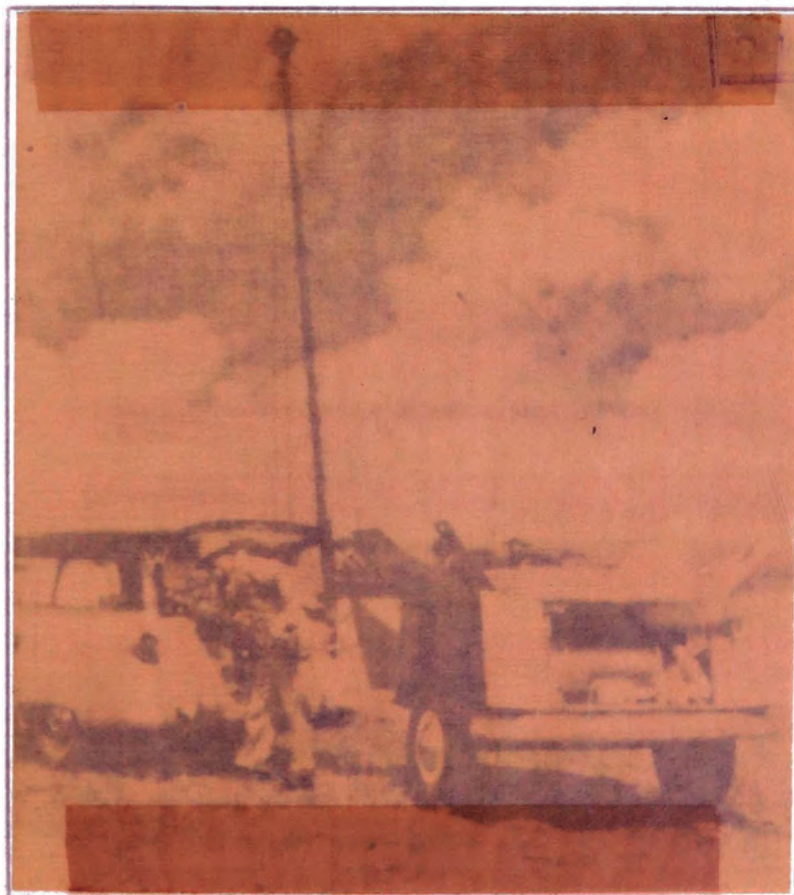


FIG N

CAPITULO V

EQUIPOS DE BALEO PARA LA COMPLETACION

La escopeta del tipo de proyectiles no tiene muchas variantes de un fabricante a otro, cada año se efectúan mejoras para aumentar la potencia de la carga, la perforación y disminuir la rebaba, se han diseñado varios tipos de proyectiles dependiendo su efectividad de su forma, se conocen 6 tipos, haremos una breve exposición de cada uno de ellos, dando sus características, sus ventajas y cuando debe usarse cada proyectil.

TIPOS DE PROYECTILES

STEELFLO :

En cuatro tamaños de diámetro: $1/4''$, $3/8''$, $15/32''$, $9/16''$.

Tiene las siguientes ventajas:

- 1.- Máxima penetración
- 2.- Mejora el reborde de la rebaba.
- 3.- Las paredes del espacio formado en la arena por el recorrido del proyectil son más consistentes

Se usa cuando se necesita penetrar la formación en una profundidad máxima.

Este tipo de proyectil perfora con diámetros de huecos iguales al tamaño mismo, o sea que una bala de $1/4''$ de diámetro hace un agujero también de $1/4$ de pulgada.

BURRFREE :

En cuatro diámetros como el anterior: $1/4''$, $3/8''$, $15/32''$, $9/16''$.

- 1.- Elimina la rebaba
- 2.- Tiene menor penetración que la Steelflo, pero posee cierta ventaja sobre la anterior.

Se usa cuando se necesita tener lisa la tubería, sin rebaba y la penetración es de importancia secundaria.

SEMI-MUSHROOM :

Sólo en 2 tamaños, de diámetros $15/32''$ y $9/16''$.

Características:

- 1.- Hace perforaciones en el casing más grandes que el tamaño de las balas, estos son de $18/32''$ y $10/16''$ correspondientes a los diámetros de los proyectiles nombrados anteriormente.
- 2.- Fractura considerablemente el cemento
- 3.- Menor penetración

Se usa para casing recuperable, debido a que fractura el cemento.

FULL-MUSHROOM

También en dos tamaños como el anterior: $15/32''$ y $9/16''$.

Características:

- 1.- El hueco hecho en el casing por el proyectil es

considerablemente más grande que el tamaño de éste.

Es decir la bala de $15/32''$ hace un hueco de $20/32''$ y la $9/16''$ lo hace de $10/16$ de pulgada.

2.- Mayor fractura que el tipo anterior

3.- La reducción de la penetración es considerable.

Tiene los mismos usos que la Semi-Mushroom.

NEEDLE :

Más pequeña que las anteriores, en dos tamaños: $1/16''$ y $1/8''$.

Características :

1.- La perforación es del mismo diámetro que el proyectil.

2.- Sirve para perforar el tubing.

3.- La rebaba es despreciable.

Se usa para perforar dos casings sin dañar el interior.

ESCOPETA "JET" ;

Como sabemos existen dos clases: la recuperable y la desintegrable, a su vez de cada uno hay varios tipos, veamos algunos de escopeta desintegrables:

A).- Escopeta con las cargas dispuestas en posición horizontal.

B).- Escopeta standard, igual a la anterior con las

cargas siempre horizontales, sólo varía la forma de la armazón que las transporta, el material es de aluminio.

- C).- Escopeta con las cargas dispuestas con cierta inclinación o ángulo, se usa para formaciones de permeabilidad vertical.
- D).- Escopeta standard, con cargas en sentido horizontal, las cajas de las cargas son de vidrio.
- E).- Escopeta de acero, con las cajas de las cargas de vidrio, además tiene un indicador o localizador de cuellos en la parte superior y una barra de acero que hace de plomada situada en la parte inferior.

Este tipo al disparársele no se desintegra toda pues el armazón de acero es recuperable.

En la figura No. 7 aparecen todos estos tipos de escopeta.

En el tipo de escopetas recuperables, luego de efectuado el disparo se recupera toda la escopeta, pues tanto el cilindro transportador como las cajas que tienen las cargas son de acero de gran dureza.

De las escopetas de proyectiles existe un tipo corriente o standard y un tipo especial para completación permanente (de menor diámetro), que corre por el tubing, las car-

gas están metidas en cavidades como indica la figura No. 8 al salir del tubing o tubería de producción ya frente a la zona a balearse se abren, quedando en posición horizontal.



FIG N° 7



FIG N° 8

CAPITULO VI

EFFECTIVIDAD DEL METODO DE BALEO

El método de baleo se considera durante los últimos años como una rutina de la completación de pozos, por que aparte de tener ciertas ventajas, permite la selectividad de las zonas productivas.

Actualmente surge el problema de la efectividad de la comunicacion del fluido de las arenas productivas con el interior del casing.

Los estudios realizados sobre este problema no habían tenido los resultados deseados, pese a anticiparse el "rate" continuo de fluidos para la elección del equipo de baleo, en el caso específico de un pozo.

Esta baja productividad, simultáneamente con el frecuente recobro de los proyectiles que efectuaron la perforación son considerables y fuertes evidencias de una inadecuada penetración.

Algunos laboratorios investigaron sobre la penetración de los proyectiles, pero los progresos fueron muy lentos debido a que la situación no permitió más, el mundo se encontraba convulsionado por la segunda guerra mundial.

Subsecuentes estudios realizados sobre el mismo tema indicaron que la profundidad de penetración requerida para proporcionar productividades equivalentes a las de completa-

ción a hueco abierto, iban más allá de la capacidad del mejor equipo de baleo que existía en esa época.

Estos resultados simultáneamente con el advenimiento del equipo "Jet", estimularon el interés de ambos lados, es decir, productores y compañías de servicios, para desarrollar y mejorar los métodos de baleo.

Los dos tipos de equipos perforadores, escopetas de proyectiles y de "Jet", con el desarrollo alcanzado, demostraron ser capaces de sobrepasar la penetración teórica requerida.

Sin embargo algunos pozos malograron su rendimiento satisfactorio al ser baleados con la más poderosa escopeta, esto hace renacer el problema de la efectividad de la operación de baleo.

Estos hechos, conjuntamente con disparos preliminares sobre tarjetas preparadas con cores o testigos de formaciones, indicaban que existen factores asociados a la operación de baleo, como el fluido presente en el interior del pozo, que pueden reducir la penetración efectiva de la formación y como consecuencia de este fenómeno decrece la productividad del pozo.

Los laboratorios realizan sus estudios a base de los datos de campo y bajo condiciones similares a los pozos.

El objeto de este trabajo es:

1).- Establecer un paralelo entre la investigación de

laboratorio y los resultados en el campo, sobre la efectividad del baleo.

2).- Describir en detalle los progresos experimentados recientemente en el método de baleo.

PRIMERAS INVESTIGACIONES

Los trabajos reportados por los investigadores Oliphant y Farris en 1947 muestran que la capacidad de penetración va desde cero hasta 2-1/2" dentro de la tarjeta usada en el experimento, dicha tarjeta estaba formada de: Casing de 5-1/2" de 17 lbs. J-55, aceite y cemento, adjuntados a arena no consolidada o concreto que representa la formación.

Trabajos posteriores de Huber, Allen y Abendroth en 1950 confirmaron los resultados anteriores y presentaron información adicional sobre perfeccionamiento o mejoras de los equipos de proyectiles y "Jets" disponibles en ese tiempo.

Estos últimos tests fueron realizados en una cámara de presión, con ambos tipos de escopetas y con las tarjetas sumergidas en agua fría, bajo un rango de presiones de cero a 4,500 psi.

Las tarjetas empleadas consistían de: casing de acero N-80 de 0.435 pulgadas de espesor, adherido a 12 pulgadas de cemento puro, de un esfuerzo de tensión de 500 psi. Una escopeta de tipo comercial de 4" de diámetro, era disparada en una tarjeta individual por una sola vez en cada test.

Se nota claramente en los resultados expuestos en las

figuras N° 9 y N° 10 que la penetración promedio para la bala "Jet" es de 7-1/2" y para las balas comunes va de 1 a 7 pulgadas.

Estos resultados son para 5 casos de 10 balas disparadas en cada test.

Nuevos trabajos con escopetas de gran diámetro que disparaban proyectiles de mayor tamaño que los corrientes, tenían más penetración, esto indicaba un incremento en la penetración en relación con un incremento en el diámetro de la escopeta.

Estos resultados se ilustran en la figura N° 11 la desventaja de esta escopeta es que es muy costosa.

Así una escopeta de 4-1/8" de diámetro indicaba una penetración de 5-7/8" y otra de 5-7/16" de diámetro penetraba en una tarjeta igual a la anterior 8 pulgadas de longitud.

La razón de productividad de los pozos completados por el método de baleo, ha sido tratado matemáticamente por Nuscat y así mismo se hicieron estudios eléctricos análogos por Mc Dowell y Nuscat y por Howard y Watson.

Estos datos exponen que la productividad de un pozo completado por baleo puede igualar o exceder la productividad del mismo pozo completado a hueco abierto, bajo condiciones análogas.

Por ejemplo, una razón de productividad igual a la

unidad es lograda en un pozo completado por baleo si las perforaciones son de 6 pulgadas de penetración, en un pozo de 6 pulgadas de diámetro, con una densidad de baleo de 5.5 huecos por pie, usando balas de 1/2" de diámetro; o 6.5 huecos por pie con balas de 1/4" de diámetro.

PROCEDIMIENTO Y DISCUSION DE UNA INVESTIGACION

Primero se obtenía datos básicos de los cores a ser trabajados, estos eran de arenisca.

El lodo usado era de bajo PH y de tipo Quebracho-cáustico.

Se acondicionaba la cámara a iguales temperaturas y presiones que las que se encuentran en los pozos.

La primera fase de los tests se hacía con cores de una permeabilidad de 150 a 250 milidarcys.

El lodo estaba a una presión de 2,000 psia y la formación o reservorio representado por el core a 500 psia.

La temperatura de la cámara que simulaba el pozo a 180°F, como vemos estos experimentos se hacían con todas las condiciones existentes en los pozos, a fin de que los resultados tuvieran el mínimo error y el máximo de realidad.

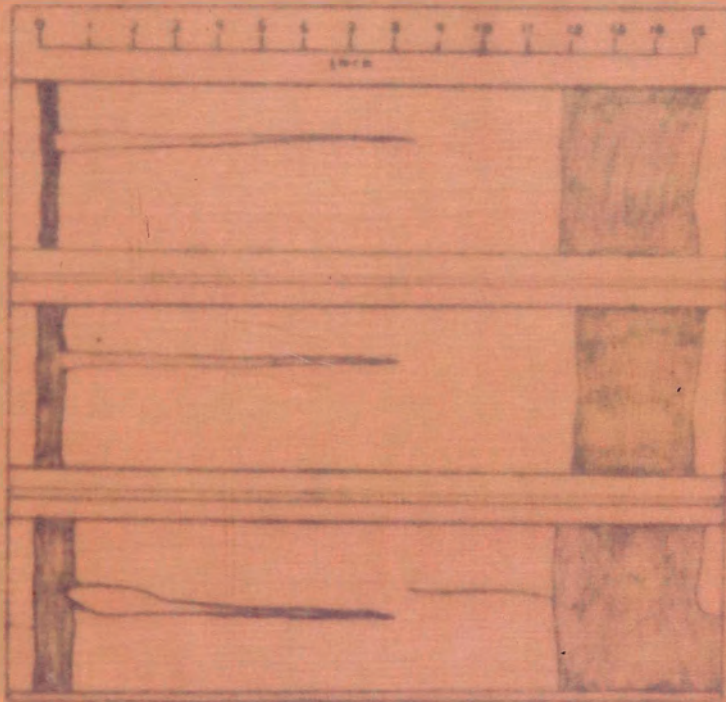
El lodo usado tenía las siguientes condiciones:

Peso	9.5 lb/gal.
Viscosidad	40 centipoises
Filtrado A.F.I.	10.3 centímetros cúbicos
Fuerza de gel inicial	5 gramos
F. de gel a los 10 min	23 gramos
PH	7.5
Contenido de sólidos	19.7%

Un simple test se hacía con distintos equipos, estos

ran:

FACULTAD DE INGENIERIA
BIBLIOTECA



EJEMPLO DE PENETRACION DE LA PALA
"JET", USANDO ESCOPETA DE 4" G.D.
Y CARGAS STANDARD DE 21 GRAMOS

FIG N° 9

- a).- Una escopeta de tipo convencional de balas corrientes, con un diámetro exterior de 4 pulgadas, entre las escopetas de proyectiles, ésta es la que mejores resultados daba.
- b).- Una escopeta con balas "Jet", usando cargas de 21 gramos o sea la standard.
- c).- Una escopeta también de balas "Jet" pero con cargas más grandes, de 29 gramos. Estas cargas no son usadas sino en esta clase de experimentos. Este tipo de equipo se usaba para dar mayor diámetro al hueco abierto por la explosión, pero sacrificando algo la penetración.

Para preparar un test típico bajo las condiciones dadas, la tarjeta y la escopeta son montadas en un soporte e introducidas en la cámara, que luego se llenaba de lodo de perforación.

El sistema que representa el reservorio y la celda están a 1,500 y 2,000 psi respectivamente, la cámara con su contenido es calentada hasta 180°F en un período de 15 a 18 horas. Posteriormente se chequean las presiones para ver si se encuentran en los rangos designados, hecho esto se dispara por control eléctrico la escopeta, perforando casing, cemento y formación.

El disparo produce una diferencial de 500 psi en la formación, debido a esto el lodo que ocupa el conducto dejado

por la bala o "jet" se filtra por los poros del core.

Esta fase de la filtración del lodo corresponde a lo que sucede en el pozo durante la completación o sea el tiempo en que la presión diferencial es cambiada por el suabeo o por el desplazamiento del lodo por fluidos más livianos (agua salada o aceite).

El filtrado al entrar en el core tiende a cambiar la presión "build up" del reservorio, pero se regula al ponerse en circulación el exceso de fluidos.

El core se encuentra con kerosene, el volumen de éste, desplazado por el filtrado que entra en el core, es medido y el tiempo que dura la filtración es registrado, esta fase es de aproximadamente 24 horas.

Luego se hace pasar kerosene en flujo continuo a una presión dif. constante de 100 a 300 psi, el objeto de esta fase es limpiar el core del filtrado del lodo, simulando la producción inicial del pozo y obtener un "rate" de flujo continuo representativo del pozo abierto por el baleo y antes de que sea limpiado.

Aparte de la presión del control del equipo, el "rate" constante indispensable para el éxito del experimento, es logrado después de estar fluyendo un volumen cuarenta veces mayor que el volumen poroso del core.

Por último la tarjeta es sacada de la cámara y abierta para una inspección visual. Cuidadosas mediciones y su

descripción y estudio es anotado, luego se le saca fotos.

EVALUACION DE LOS DATOS

El "rate" de flujo continuo de un core de dimensiones dadas, depende de la presión diferencial a través de éste, de la viscosidad del fluido presente y de la permeabilidad efectiva del fluido en el core.

Cuando el core es cementado a una plancha de acero y baleado como es el caso del test, el "rate" de flujo depende del diámetro del baleo, de la profundidad de penetración del proyectil y del grado de taponamiento u obstrucción que puede ocurrir, también de las condiciones de la formación adyacente a la zona baleada.

El "rate" de flujo continuo de un core o testigo de perforación obstruida, medido en volumen por unidad de tiempo, refleja la influencia combinada de los factores anteriormente nombrados.

El efecto de la viscosidad, presión diferencial y permeabilidad puede ser determinado por la aplicación de la ley de Darcy.

El efecto del diámetro y la profundidad del baleo sobre el "rate" de flujo es encontrado por la perforación de varias tarjetas con diámetros de huecos y profundidades de penetración distintas, midiendo el "rate" de flujo para cada caso y analizando los resultados obtenidos.

Debemos considerar que en esta investigación se asume igual permeabilidad en todas las direcciones, luego el "rate" de flujo obtenido por las tarjetas no sería tan representativo desde que ésta tiene estratos planos.

La diferencia entre el "rate" de flujo continuo en una formación baleada, con un diámetro dado y una cierta penetración y el "rate" de flujo de la misma formación con otro diámetro de hueco y distinta profundidad de penetración, es considerado en este trabajo como la reducción del "rate" de flujo causado por 2 factores; la obstrucción de las perforaciones y la alteración de la formación alrededor del hueco, debido a la operación de baleo. El "rate" encontrado para ser válido debe ser corregido en la viscosidad, permeabilidad y condiciones de presión, para poder aplicar la ley de Darcy.

Por conveniencia en la evaluación de los datos de flujo obtenidos por el test, el "rate" de flujo continuo del core con ambas caras abiertas al flujo es tomado como unidad.

El "rate" de flujo continuo con una cara abierta al flujo y la opuesta cementada al casing, es expresada como una fracción de la unidad de flujo.

Estas fracciones son arbitrariamente definidas como el "rate" de flujo indicado para dos casos distintos, para un hueco limpio y para otro obstruido respectivamente.

Estas medidas son designadas por los símbolos \bar{Q}_c y \bar{Q}_p , donde \bar{Q}_c es una medida del "rate" de flujo que sería obte-

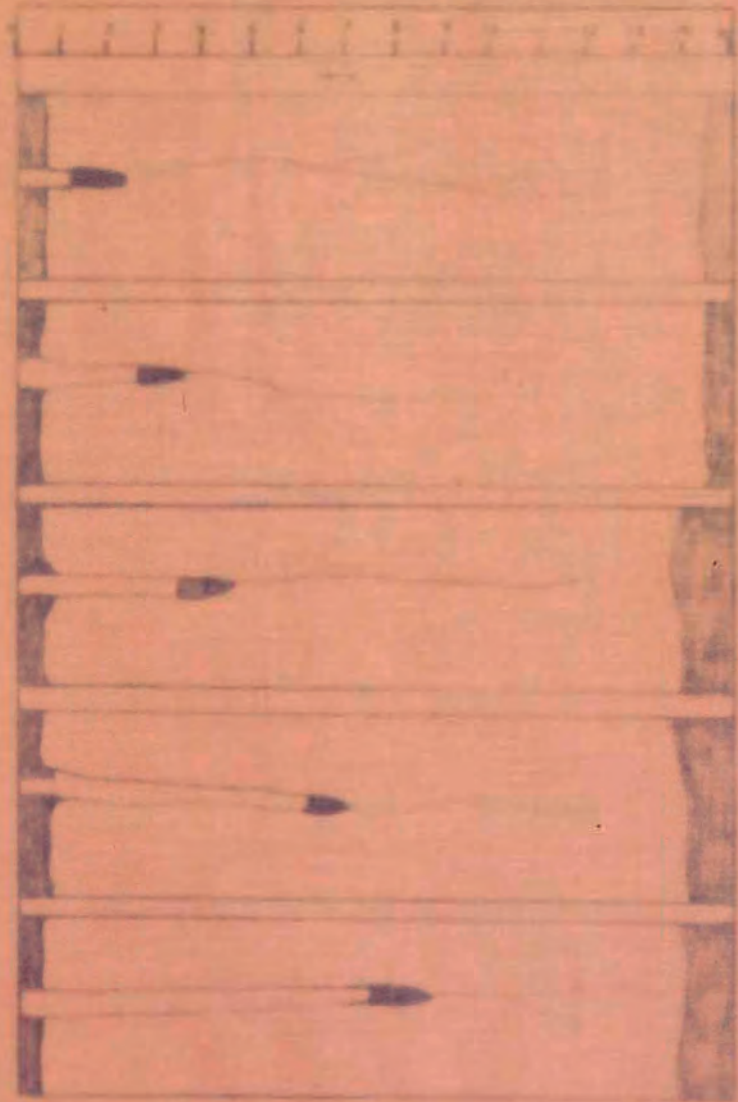
nido sin restricciones alrededor del hueco y \bar{Q}_p es la medida del "rate" práctico o sea con ciertas restricciones.

Para convertir \bar{Q}_c y \bar{Q}_p a los correspondientes "rates" de flujo expresados en volumen por unidad de tiempo, tal como cc por segundo o barriles por día, para una presión, permeabilidad y viscosidad dadas, esos índices deben ser multiplicados por el "rate" de flujo continuo del core con ambas caras abiertas al flujo, expresado en la unidad deseada. Ambas medidas en las condiciones descritas son calculadas por la ley de Darcy.

La reducción en el "rate" de flujo en términos de dichos índices es $\bar{Q}_c - \bar{Q}_p$, el tanto por ciento de reducción basado en el "rate" de flujo continuo que sería obtenido en una formación dada es:

$$\text{Tanto por ciento de reducción} = \left(1 - \frac{\bar{Q}_p}{\bar{Q}_c}\right) 100$$

FACULTAD DE FÍSICA
BIBLIOTECA



EJEMPLO DE PENETRACION USANDO LA
ESCOPETA STANDARD DE 6 INCH. O.D.

FIG Nº 10

RESULTADOS DE LOS TESTS

Los resultados presentados son de 22 disparos efectuados sobre tarjetas preparadas con la mayor similitud posible a los pozos. Anteriormente se hicieron 26 disparos que fortalecen los resultados obtenidos, dándoles mayor consistencia.

Los resultados son discutidos en términos de:

- a).- Las características físicas (de la zona baleada) y el grado de taponamiento u obstrucción.
- b).- El "rate" de flujo obtenido con su consiguiente corrección, el diámetro promedio del baleo y la profundidad de penetración para cada caso, usando los tres equipos conocidos.

PENETRACION EN PULGADAS

	Diámetro en pulg.	Acero Hydro- mite	Core	Total
a - BALA CO- RRIENTE	1/2	1 1/8	1	2 1/8
b - BALA "JET" 21 Gm.	1/4	2	4 3/4	6 3/4
c - BALA "JET" 29 Gm.	1/2	2	3	5

La penetración de las balas corrientes es medida desde la parte posterior del proyectil, la penetración de la Jet se mide desde un punto situado a 3/4 de pulgada del fondo, por-

que el diámetro del fondo es pequeñísimo.

DATOS DE FLUJO DE LOS 21 TESTS EFECTUADOS

TEST N°	Equipo usado (Escopeta)	"Rate" de flujo indicado		Reducción en ($1 - \frac{\bar{Q}_p}{\bar{Q}_c}$)
		\bar{Q}_c	\bar{Q}_p	
1 "JET"	4" OD con 21 gm.	1.22	0.39	68
2 "JET"	4" OD con 21 gm.	1.20	0.44	63
3 "JET"	4" OD con 21 gm.	1.45	0.39	73
4 "JET"	4" OD con 21 gm.	1.39	0.43	69
5 "JET"	4" OD con 21 gm.	1.34	0.53	60
6 "JET"	4" OD con 21 gm.	1.20	0.75	37
7 "JET"	4" OD con 21 gm.	0.82	0.40	52
8 "JET"	4" OD con 21 gm.	1.54	0.35	77
9 "JET"	4" OD con 21 gm.	1.45	0.32	78
10 "JET"	4" OD con 29 gm.	1.05	0.86	18
11 "JET"	4" OD con 29 gm.	1.16	0.88	24
12 "JET"	4" OD con 29 gm.	0.92	0.68	25
13 Escopeta Standard	4" OD.	0.72	0.43	40
14 Escopeta Standard	4" OD.	0.81	0.22	73
15 Escopeta Standard	4" OD.	0.81	0.48	40
16 Escopeta Standard	4" OD.	0.81	0.49	38
17 Escopeta Standard	4" OD.	0.76	0.51	32
18 Escopeta Standard	4" OD.	0.76	0.53	30
19 Escopeta Standard	4" OD.	0.69	0.51	26
20 Escopeta Standard	4" OD.	0.76	0.44	42

21 Escopeta Standard 4" OD.	0.76	0.68	11
22 Escopeta Standard 4" OD.	0.71	0.32	54

Los huecos hechos por los disparos en cada uno de los tests estaban rellenos por un material que restringía el flujo, esta obstrucción no era eliminada con el flujo en sentido contrario, en el caso de la bala corriente el tapón formado era duro y denso, consistía principalmente de arena y lodo sólido.

La bala "Jet" también deja material que obstruye el hueco, es de lodo sólido y arena pero además incluye gran cantidad de desecho o residuos de la carga.

Cuando se usan 21 gramos de carga "jet", los restos o escoria formados, se ubican en el fondo del hueco y son extremadamente duros y densos, sin embargo con la carga experimental de 29 gm. ambos, el lodo sólido y el residuo de la carga son dispersados desigualmente a lo largo de todo el hueco y comparándolo con los de la bala de 21 gm. de "Jet" es relativamente blando.

Este fenómeno puede ser debido al gran diámetro de hueco que forma la carga experimental de 29 gramos o también a la distribución de fuerzas alrededor del curso de la "JET", durante la acción de la carga al producirse el impacto.

En las paredes de la trayectoria de la bala corriente o de la "Jet" sin considerar el material de obstrucción descrito, existe una zona de la formación afectada por el baleo,

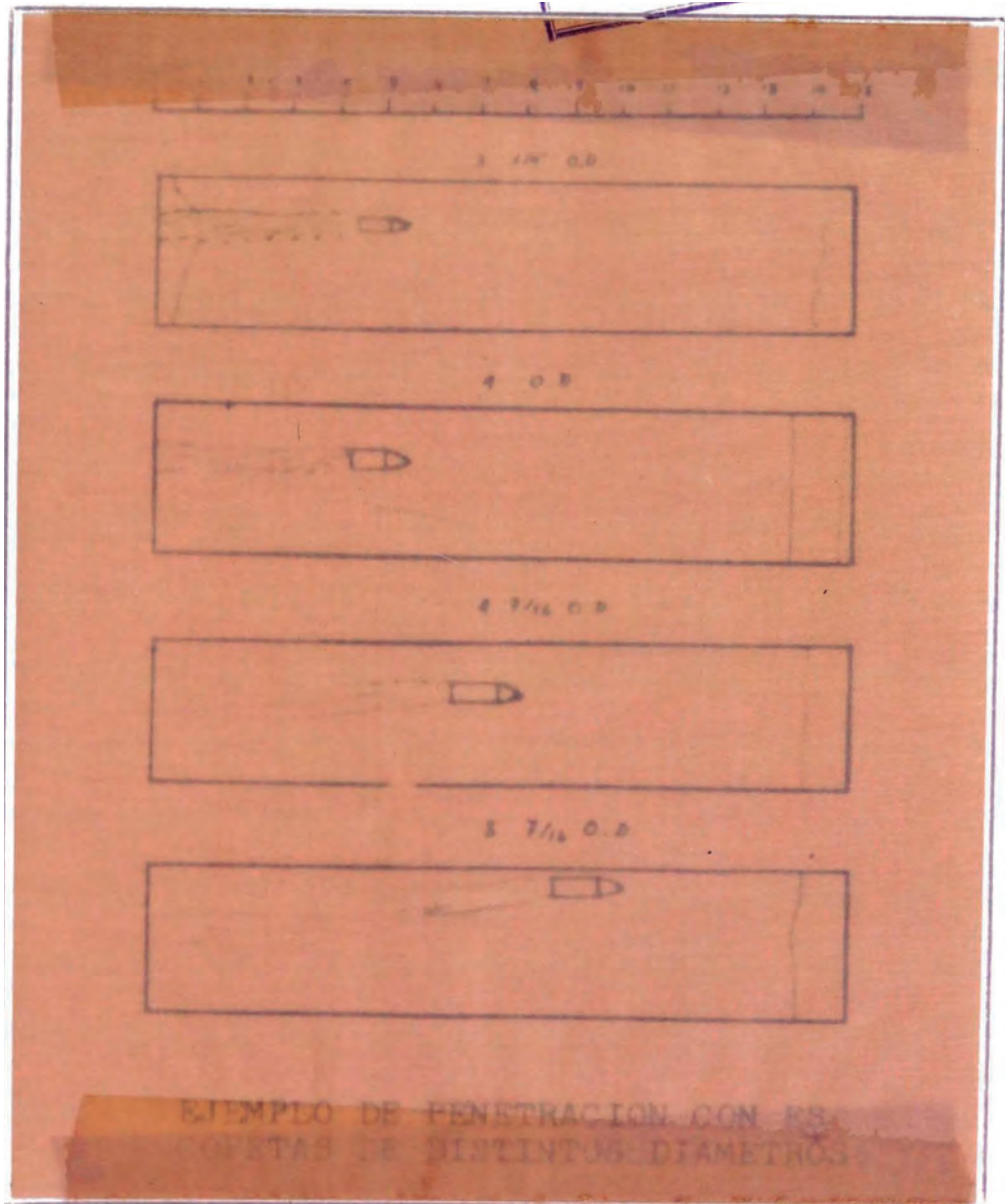
esta parte está compuesta de granos de arena triturados y compactados, retenidos en el lugar por el lodo sólido que obstruye el hueco.

La bala "Jet" no agrieta el core al ejercer su acción perforante, en cambio la bala común raja o cuartea radialmente en su trayectoria casi toda su penetración.

A continuación exponemos un resumen de los datos de la tabla N° 1:

ESCOPETA EMPLEADA	PROYECTIL	"JET" 21 gm.	"JET" 29 gm.
NUMERO DE TEST	10	9	3
DIAMETRO en pulg	1/2	1/4	1/4
PROFUNDIDAD en pulg	1	4 3/4	3
RATE DE FLUJO \bar{Q}_c	0.76	1.29	1.04
RATE DE FLUJO \bar{Q}_p	0.46	0.45	0.81
COEFICIENTE DE REDUCCION DEL RATE DE FLUJO %	39	64	22

Tomemos por ejemplo la bala común (en los datos anteriores los índices de menor valor). Supongamos que dadas la permeabilidad de la formación, la viscosidad de los fluidos y la presión diferencial a través del core son tales que un barril de fluido es producido continuamente por el core con ambas caras abiertas al flujo, entonces 0.76 Bbl por día serían producidos continuamente en un hueco limpio, en un pozo con idénticas dimensiones de hueco al anterior caso, pero solamen-



EJEMPLO DE PENETRACION CON ES
COFETAS DE DISTINTOS DIAMETROS

FIG Nº 11

te produce 0.46 por estar obstruido el hueco, esto corresponde al 39% menos que el "rate" que sería obtenido si el hueco no estuviera con obstrucciones.

Como la penetración de la "Jet" es castigada en 5/8 de pulg. por el acero adicional y en 1/4 de pulg. por el Hydromite (2 - 1 1/8), el "rate" de flujo continuo de 21 gramos de "Jet" es aproximadamente el mismo que el de la bala común, esto lo notamos comparando los índices de 0.45 de la "jet" y 0.46 del proyectil.

También vemos que el "rate" de flujo de la carga "jet" de 29 gramos es mucho mayor que la carga de 21 gramos, esto se explica porque la carga de 29gm. no es castigada con el acero adicional y con el hydromite, correspondiéndole un "rate" de flujo mucho más elevado.

La restricción al flujo promedio por unidad de longitud de la penetración, es máxima para 21 gms de carga "Jet" como podemos observar: el 64% de reducción del "rate" del flujo comparado con el 39% para la bala corriente y 22% para la carga experimental de 29 gms. Es necesario recalcar que esta carga es sólo usada en el experimento y no es comercial o práctica.

Los tests efectuados con este tipo de carga son limitados, el uso de ella en el baleo produce un hueco de gran diámetro, esto parece que proporciona una reducción del efecto de daño, debido a la minimización de la obstrucción o taponamiento.

miento y por consiguiente se obtiene mayor productividad del pozo.

Si consideramos que la zona vecina a la formación baleada y el flujo radial que ocurre adyacente al pozo, no es simulado en estos tests, el porcentaje de reducción del "rate" de flujo presentado aquí, no sería directamente aplicado a los pozos.

Sin embargo como la caída de presión a través de una perforación taponeada u obstruida es grande comparada con la caída de presión calculada de un pozo con un radio de drenaje de 1,000 pies, de igual volumen de fluidos, viscosidad y permeabilidad, asumiendo cuatro tiros por pie, esto nos muestra que el porcentaje de reducción da números del mismo orden de magnitud que los usados para estimar la efectividad del baleo, bajo condiciones particulares de los pozos.

CONCLUSIONES

PENETRACION:

- 1).- Los equipos de baleo están considerados capaces de proveer suficiente penetración, en muchos casos pueden proporcionar productividades equivalentes o mayores que las del "Hueco Abierto", ésto basado en los estudios análogos ya mencionados.
- 2).- El baleo usando proyectiles o balas es afectado en forma más notoria (adversamente) cuando hay casing grueso y cemento y formación duros, que el equipo "Jet".

OBSTRUCCION:

- 1).- Cuando disparamos en lodo, bajo condiciones similares a las usadas en los tests, se forma un tapón en el hueco, dicha obstrucción no es removida por el reflujó, además la formación circunvecina al hueco es alterada, de modo que el "rate" de flujo continuo es restringido en grado considerable. No es pues recomendable disparar en lodo.
- 2).- El flujo total es aproximadamente igual para una perforación hecha con 21 gramos de carga

"Jet" y otra ocasionada por una bala corriente. La restricción al flujo por unidad de longitud de penetración era mayor para la carga "Jet" de 21 gramos que para las balas, desde que obteniéndose mayor penetración con la "Jet" el "rate" de flujo resultaba igual para ambos.

El "rate" de flujo continuo obtenido por la carga experimental de 29 gramos era cerca del doble del hallado por los otros 2 equipos, pero debiendo tenerse en cuenta que el "rate" de flujo del equipo de 21 gramos de carga es reducido al ser penado con el acero adicional y el hydromite.

- 3).- Un posible paso para un aumento de la productividad en la completación por baleo, es hallar una carga que pueda producir un hueco de mayor diámetro que el hecho por la carga "Jet" de 21 gramos y que alcance mayor penetración que la bala corriente. El uso de la carga de 29 gramos "Jet" es con ese fin pero si bien aumenta el diámetro del hueco, disminuye la penetración.

En cuanto a la disminución del daño (debido a la obstrucción) se considera que puede ser función de otros factores relativos a la cantidad de carga designada para el baleo.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- "Perforating of all Types", Carl Gatlin, The Petroleum Engineer de Marzo de 1963.
- 2.- Mc Lomore, R.H.: "Application of the Shaped-Charge Process to Petroleum Production", The Petroleum Engineer, Agosto de 1948.
- 3.- "Oil Field Services", Manual de la Perforating Guns Atlas Corporation, Catálogo N° 5859, Bulletin or Jet Perforating.
- 4.- "Effectiveness of gun perforating". T.O. Allen, Petroleum Development and Technology, 1954.
- 5.- Muskat, Morris and Mc Dowell, James M.: "The effect on Well Productivity of Formation Penetration Beyond perforated casing", AIME, 1950, 189, 309.
- 6.- Howard, Robert A. and Watson, Marsh S.: "Relative Productivity of perforated Casing". AIME 179-323, 1950.

THESIS

JIRON AREQUIPA 323

TELEFONO 84-071

(Fundada en 1937)

ESPECIALIDAD: TESIS DE GRADO

✦ IMPRESIONES EN MIMEOGRAFO, OFFSET O IMPRENTA

✦ DIBUJOS

✦ EMPASTES

CUIDADO ESPECIAL DEL CASTELLANO ACADEMICO

12,655 TESIS COPIADAS