

24.34



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

Facultad de Ingeniería

**Métodos y Evaluación del Fracturamiento con  
Explosivos Químicos en Formaciones Productoras  
de Hidrocarburos**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A

José del Carmen Pérez Damas

MEXICO, D. F.

1984



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# I N D I C E

INTRODUCCION..... 1

## CAPITULO I

Objetivos y antecedentes del fracturamiento con explosivos químicos..... 4

## CAPITULO II

Aplicación de la teoría de los esfuerzos del subsuelo - al fracturamiento con explosivos químicos..... 20

## CAPITULO III

Técnicas de campo que se utilizan en el fracturamiento con explosivos químicos..... 32

a. Explosivos utilizados..... 32

b. Técnicas de campo..... 40

c. Métodos de evaluación de las técnicas del FEQ..... 54

CONCLUSIONES..... 65

BIBLIOGRAFIA..... 71

## I N T R O D U C C I O N

En la actualidad gran cantidad de pozos petroleros - se encuentran sometidos a tratamientos de estimulación. En - la República Mexicana, el fracturamiento hidráulico se ha ca racterizado por ser el método que ha proporcionado buenos re sultados desde hace algunos años, pero también ha tenido bas tantes problemas por lo que se hace necesario investigar -- otras técnicas de estimulación, ya sea para complementarlo, - mejor aún para substituirlo. Además, se ha observado que can tidades importantes de hidrocarburos quedan atrapados en el yacimiento como aceite residual; aún después de incrementar la producción, debido al fracturamiento hidráulico. Queda la posibilidad de que estos yacimientos puedan estimularse por por el método de fracturamiento con explosivos, tanto quími- cos como nucleares. Con este último método de estimulación - se han inducido fracturas múltiples, proporcionando un radio de alcance de las fracturas bastante grandes, lo cual es muy ventajoso para extraer hidrocarburos de zonas lejanas de los pozos.

Durante el proceso de terminación de pozos se presen ta, algunas veces, el caso en que el potencial observado en un pozo es inferior al promedio registrado en los otros pro- ductores de la misma formación, en el mismo campo. Las cau- sas de la baja producción en este caso, pueden ser de origen muy diverso, pero la más frecuente es la existencia de cier- tos tipos de obstrucciones que dificultan el flujo de hidro- carburos hacia el pozo, principalmente. Los métodos de esti- mulación están encaminados a encontrar la forma de facili--- tar, al máximo posible el flujo de fufdos a través de dichas obstrucciones.

Como ya se mencionó anteriormente, el propósito principal de cualquier método de fracturamiento es incrementar la productividad de un pozo, o del yacimiento, pero también puede tenerse como objetivo aumentar la inyectabilidad de los pozos en proyecto de recuperación secundaria.

En cuanto a yacimientos petrolíferos se refiere el desarrollo productivo de los campos, en ocasiones lo impide la baja permeabilidad natural de la formación productora. Sin embargo, el fracturamiento con explosivos, el fracturamiento hidráulico y el uso de ácidos en una forma conjunta o aislada han sido muy efectivos para incrementar la producción en arenas, calizas y lutitas. Los dos primeros métodos consisten en proporcionar a la pared del pozo una presión necesaria que sea superior a la presión para fracturar la roca, induciendo así nuevos caminos o canales de permeabilidad, los cuales a su vez intercomunican las zonas existentes de baja y alta permeabilidad.

La estimulación con explosivos también puede proporcionar una caverna o cavidad en la zona tratada del pozo, dando como resultado una área adicional de drenaje de la formación hacia el pozo.

En ocasiones el valor de la permeabilidad media de la formación se toma como parámetro para decidir si la formación amerita o no la estimulación, así como, el tipo de método de fracturamiento a utilizar ya que en estos casos es muy importante obtener una conveniente permeabilidad, la cual está en función del ancho de la fractura lograda.

Puesto que se desea el máximo fracturamiento posible, es mejor utilizar un explosivo de alta potencia, y casi siempre es necesario que tenga alguna resistencia al agua ya que puede ser un factor muy importante si el pozo tiene varios miles de metros de profundidad. Como es de esperarse, la detonación de explosivos requiere de equipo especial y experiencia del operador; en consecuencia, dicho trabajo lo suelen efectuar organizaciones que proporcionan el servicio completo.

La tecnología del fracturamiento con explosivos químicos se han venido aplicando para mejorar la recuperación de hidrocarburos desde hace mucho tiempo, sin que se haya observado un progreso significativo hasta hace pocos años. En la mayoría de las detonaciones efectuadas en los pozos se han utilizado explosivos a base de nitroglicerina. Recientemente la energía de los explosivos nucleares se ha utilizado para mejorar la productividad de yacimientos petroleros.

## C A P I T U L O I.

### OBJETIVOS Y ANTECEDENTES DEL FRACTURAMIENTO CON EXPLOSIVOS QUIMICOS.

Actualmente, los yacimientos de baja permeabilidad - se están investigando para determinar sus características de producción óptima y bajo ciertas condiciones esas bajas permeabilidades pueden aumentarse mediante la aplicación de las técnicas del fracturamiento con explosivos químicos (FEQ).

Por ejemplo, en los Estados Unidos existen bastantes yacimientos constituidos por areniscas con menos de 10 milidarcys de permeabilidad, los cuales fueron abandonados prematuramente en espera de que se desarrollaran métodos más eficientes de estimulación.

Esos métodos de estimulación deben proporcionar una cavidad o caverna, y/o un sistema de fracturas inducidas, de tal manera que incrementan en forma satisfactoria la permeabilidad promedio de la formación de interés. De acuerdo a lo anterior, es necesario establecer objetivos para el programa de estimulación de una formación de baja permeabilidad por ejemplo, lutitas, utilizando las técnicas del FEQ.

A continuación se mencionan esos objetivos, los cuales no necesariamente están en orden de importancia.

- a. Determinar que tipo de formaciones pueden estimularse económicamente, de tal manera que se incremente la producción de hidrocarburos en forma satisfactoria.

- b. Investigar la efectividad del uso de grandes cantidades de explosivos químicos, en cualquiera de sus presentaciones: Líquido, gelatinizado, sólido o una combinación de ellos. Dicha efectividad debe incluir diferentes litologías, profundidades, presiones, temperaturas, reacciones químicas con otros fluidos, etc.
- c. Evaluar los factores de seguridad asociados con el transporte, la instalación y la detonación de los explosivos en los pozos.
- d. Hacer una comparación razonable con otros métodos de estimulación como son el fracturamiento hidráulico y el uso de los ácidos.
- e. Determinar la posibilidad de implementar en el campo un fracturamiento masivo con explosivos químicos.
- f. Ver la posibilidad de inducir fracturas extremadamente largas por el método del FEQ. como un medio para capturar hidrocarburos de zonas impermeables y lejanas del pozo; es decir, como incrementar el gradiente horizontal de la presión del yacimiento.
- g. En el caso de que en el yacimiento existan un fracturamiento natural, investigar la interconexión de las fracturas inducidas a través de las técnicas del FEQ., con el sistema de fracturas naturales del medio rocoso.

- h. Desarrollar medios de adquisición de datos científicos y ampliar el conocimiento de la ingeniería involucrada en este tipo de yacimientos de baja permeabilidad, ya estimulados y modificados por el método del FEQ.
- i. Investigar si existen publicaciones acerca de nuevas fuentes de energía explosiva, encaminadas a mejorar la permeabilidad del yacimiento, especialmente los altos explosivos químicos.
- j. Incrementar al máximo el diámetro del pozo en el intervalo productor, ya que de esta forma se incrementará aún más la producción de cada pozo estimulado.
- k. Investigar en particular la técnica de campo del FEQ., -- con lo cual se efectúa el bombeo y la detonación de un explosivo químico líquido en el interior de un sistema de fracturas naturales o previamente inducidas por otro método de estimulación, para incrementar el ancho y la extensión de un sistema de fracturas preexistentes, además de proporcionar una buena comunicación entre dos pozos estimulados.
- l. Hacer énfasis en el estudio de formaciones productoras de hidrocarburos compuestas de lutitas y areniscas. También una mejor función de los pozos inyectores de gas y agua en un proyecto de recuperación secundaria, mediante la aplicación adecuada de las técnicas del FEQ.

- m. Efectuar estudios de campo y de laboratorio sobre el uso del FEQ. para auxiliar y fomentar el desarrollo de técnicas de recuperación mejorada, en particular aquellas basadas en métodos térmicos.
  
- n. Determinar si los parámetros de la fractura final (natural o inducida), pueden ser registrados y cuantificados por varios métodos de evaluación.
  
- o. Por último en lo que respecta a los métodos de estimulación con explosivos nucleares, el objetivo principal es -- crear o inducir una caverna o chimenea bastante grande, -- así como, una zona fracturada que se extiende en forma radial a partir de la chimenea inducida. Cabe mencionar que este tipo de explosivos se tratará someramente en este trabajo.

A continuación se presentan algunos antecedentes de la aplicación en el campo de las técnicas de fracturamiento con explosivos químicos, con el objetivo de estimular formaciones de baja permeabilidad productoras de hidrocarburos, para mejorar la recuperación.

Tonnessen publicó un artículo donde se utiliza la técnica del FEQ., llamada Astro-flow II para estimular lutitas de 914 a 1067 m (3 000 a 3 500 pies) de profundidad. Esta formación pertenece al Devónico y se extiende bajo la región apalachiana en el este de los Estados Unidos. Esta formación por lo general, esta caracterizada por lutita con permeabilidades de microdarcys y tiene un sistema de fracturamiento natural -

distribuido aleatoriamente. El campo donde se utilizó la --- técnica del FEQ. es el Big Sandy. Este campo tiene un pozo - monitor que fue detonado en 1964 de los 866 a 996 m (2842 a- 3267 pies) usando 1907 kg. (4200 libras) de explosivo nitro- gel (nitroglicerina gelatinizada); como el tratamiento no tu- bo éxito comercial el pozo fué abandonado. En 1976 este mis- mo pozo fué estudiado y reparado encontrándose indicios de - gas de los 670 a 907 m (2200 a 2075 pies), en capas delgadas de caliza y arena, lo que alentó un nuevo tratamiento con el FEQ. De acuerdo con las características de este yacimiento - de gas, se colocó la cantidad de 13 620 kg. (30 000 libras)- del explosivo llamado PTC-4 (perclorato de amonio e hidrazi- na). De estos 13 620 kg., 3541 fueron desplazados dentro del sistema de fracturas naturales. Por razones de seguridad ca- da componente del explosivo PTC-4 se desplazó individualmen- te hasta 91 m (300 pies) de profundidad, donde fueron mezcla- das. Paralelamente a este trabajo, se han llevado a cabo --- otras técnicas de estimulación, como son acidificaciones y - el fracturamiento hidráulico masivo; todo ésto para que pos- teriormente se efectúe una comparación con las técnicas del FEQ. en condiciones similares de campo; después de la deto- nación del explosivo, se utilizó el método sísmico para eva- luación de las fracturas. Como resultado de la estimulación con explosivos se tuvo una producción comercial de gas en el intervalo operado.

Mc Lamore publicó una prueba de campo utilizando el método del FEQ. La Petroleum Technology Corp. y la organiza- ción ERDA usaron el campo Little Capon del estado West Vir- ginia, USA para esta prueba. El objetivo fué intentar despla- zar un explosivo líquido en el interior de una fractura natu- ral. Se efectuó una detonación en tres pozos de gas seco, la cual en todos los casos generó gases a alta presión dando co-

mo resultado varias fracturas radiales y un incremento en el diámetro del pozo. La formación productora es la arenisca -- Oris Rany y está naturalmente fracturada. La profundidad del primer pozo es de 1654 m (5425 pies) con intervalo abierto - de los 1329 a los 1569 m (5425 a los 5127 pies); la produc-- ción inicial fué de 1 416.000 litro/día (50 000 pies<sup>3</sup>/día), - la presión promedio de la formación fue de 175 kg/cm<sup>2</sup> (2500- lb/pg<sup>2</sup>) y la temperatura promedio fué de 49°C ( 120° F). --- Esas compañías llevarón a cabo pruebas del FEQ en tres fases; un pozo en cada fase, de tal manera que todos los datos obte-- nidos durante la primera prueba puedan usarse para mejorar - el diseño de las pruebas y procedimientos de operación de -- los pozos restantes. Aproximadamente 9 080 kg (20 000 lb) de explosivo líquido se inyectarón y bombearón al pozo en dos - componentes separadas y se mezclaron después a 46 m (150 --- pies) bajo la superficie. La detonación se efectuó por medio de una bomba de tiempo. No se publicaron los resultados ni - las pruebas en los otros pozos.

En el artículo Nicklen se informa que la cantidad de 4 750 litros (5000 quarts) de nitroglicerina (NGL) se despla-- zarón al interior de la formación productora por medio de un pozo. Posteriormente en el pozo se instaló el dispositivo de -- tonador, se taponeó con arena y finalmente se detonó todo el sistema en campo Turney Valley en Canadá. No se incrementó - el flujo de aceite y después de este intento no se efectua-- rón detonaciones posteriores.

Brewer informó que las operaciones Tar Springs Jackson Y --- Benoist en la cuenca de Illinois tuvieron buena respuesta -- cuando los poros cercanos al pozo se saturaron con un explo-

sivo líquido, ya que estas formaciones tienen baja permeabilidad. Posteriormente se detonó dicho explosivo. No fueron publicados los datos sobre las pruebas individuales ni sobre los resultados detallados. El tipo de cuerpos arenosos que se presenta en estas formaciones pocos permeables es en forma de estratos delgados, lo que permite que exista una saturación con explosivo líquido bastante alta en la vecindad del pozo. El trabajo lo efectuó la Compañía Pringle Powder.

En 1970 Walker y sus colegas publicaron un programa de campo en el cual una carga de 950 litros (1 000 quarts) de NGL líquida se detonaron dentro de una formación de 152 m. (500 pies) de profundidad en dos pozos de gas para evaluar de una manera técnica al trabajo del FEQ. Uno de los pozos fue terminado con tubería de revestimiento y el otro tubo una terminación en agujero descubierto. Los trabajos fueron hechos por U.S. Bureau of Mines y la Sun Oil Co-Dix. En esta prueba la NGL agrandó de 5 3/4 a 31 pulgadas el diámetro del pozo terminado en agujero descubierto. En el otro caso del pozo con tubería, el resultado fue que se indujeron fracturas verticales anchas y que se extienden radialmente, pero la cavidad resultante es muy pequeña debido a la influencia de la tubería.

Moree aplicó un nuevo método de campo referente al FEQ, en la formación Anona, en el estado de Luisiana U.S.A. Esta formación presenta un problema particularmente difícil en la recuperación de aceite. Está constituida principalmente por yesos de muy baja permeabilidad. Por lo anterior, es necesario estimularla de tal manera que se incremente la produc

ción y se induzca un mayor radio de drenaje. La formación se encuentra generalmente a una profundidad de 457 m (1500 pies), con un espesor que varía de 31 a 61 m (100 a 200 pies) y con una porosidad que varía de 25 a 35 % de volumen total pero las permeabilidades son cercanas a 0.2 milidarcys; por lo que la producción primaria típica de estos yacimientos -- es del orden del 5 al 10 % del volumen total de aceite en el yacimiento. El método propuesto comprende la instalación de los explosivos en los puntos predeterminados dentro de la formación de tal manera que se fracture eficientemente una región grande de la formación. Después sigue la detonación del explosivo, dando como resultado una zona dentro de la -- formación de interés muy fracturado. Después se perforó un pozo hasta la zona que fué fracturada para recuperar de ahí el aceite, como puede verse en las figuras 3.2 a,b. En la -- formación compuesta de yesos la técnica aplicada dió buenos resultados ya que se mejoró bastante la permeabilidad de la formación.

Eckard publicó un estudio hecho en el campo West -- Avant situado en el estado de Oklahoma, U.S.A. El petróleo se produce en tres formaciones: Las areniscas Skinner y Bartlesville y la caliza Mississipi con profundidades que varían de 503 a 564 m. El espesor promedio es de 4 a 10 m y la permeabilidad promedio es de 3 a 8 milidarcys. En estas formaciones se hizo un programa que incluyó varios pozos; el -- trabajo fué realizado por la Bureau of Mines utilizando técnicas del FEQ, en los cuales los pozos se detonaron con NGL líquida, con cargas que varían de 14 a 236 litros. Ya estando el explosivo colocado en el pozo, éste varió de 3 a 30 litros por metro en el intervalo de interés, con un promedio de 15.5 litros por metro. Las pruebas de producción promedia

rón 1.76 m<sup>3</sup>/día antes de la detonación y 5 m<sup>3</sup>/día después de la detonación.

Este autor también incluye un programa experimental en dos pozos de gas utilizando la técnica del FEQ. El primer pozo se perforó a 146 m en la arena Buzzard de 20 milidarcys de permeabilidad. El intervalo abierto del pozo comprendió de los 161 a 171 m. Primero fué fracturado hidráulicamente; después se inyectaron 184 litros de explosivo líquido en la fractura anterior y posteriormente se detonó. El diámetro -- del pozo en el intervalo detonado aumentó de 15 a 79 cm y la producción de gas se incrementó en un 40 % debido a las fracturas inducidas. El segundo pozo se perforó hasta 191 m de profundidad y se le inyectaron 946 litros de NGL, pero antes se fracturó hidráulicamente. Se observaron los resultados -- muy similares a los obtenidos en el primer pozo.

Higgins estudió la posibilidad de utilizar cargas cilíndricas y largas de altos explosivos químicos para la estimulación de la producción en formaciones poco permeables. -- Los métodos de operación y cálculo para el uso de este tipo de explosivos químicos fueron similares a los utilizados con explosivos nucleares, para tener una comparación entre ambos métodos de estimulación; además, dicha comparación fué efectuada en el campo, en el experimento llamado Rulison.

A partir de lo anterior se concluyó que las cargas de los altos explosivos químicos con 61 cm. (24 pulgadas) de diámetro y 610 m. (2000 pies) de longitud (espesor de la formación de arenas productoras de gas), son las más adecuadas.

Cargas de explosivos con las mismas características anteriores se detonaron en cuatro pozos distribuidos de tal manera que sus efectos y resultados son comparables con un pozo estimulado con una explosión nuclear de 100 kilotonnes. Los cálculos de producción de un pozo estimulado generan una gráfica como la mostrada en la figura 2.5.

Miller y colegas repotaron pruebas del FEQ que se practicaron en formaciones compuestas de lutitas saturadas de aceite, en siete lugares cercanos a Rock Springs, Wyo, U.S.A. En general los procedimientos incluyeron desplazamiento y detonación de NGL y otros explosivos químicos en el pozo y en otras fracturas preexistentes (naturales e hidráulicas). El patrón de disparos de pozos a 31 m (100 pies) de profundidad con diferentes explosivos químicos desarrolló una zona fracturada entre pozos que se considera satisfactoria. Las pruebas efectuadas en otras profundidades, con un promedio de 119 m (390 pies), causaron fragmentación en zonas cercanas al pozo. También se mejora la comunicación entre pozos por medio de fracturas. Se practicaron catorce métodos para evaluar los parámetros de las fracturas y el grado de fragmentación de la formación de lutitas que fué estimulada por técnicas del FEQ. Los métodos utilizados para fracturar la formación difieren de un sitio a otro, debido a las diferentes profundidades y saturaciones de aceite de los estratos de lutita.

Los siete lugares donde fué practicado el FEQ están localizados al sur de la Montaña Blanca y a 13 Km (7.5 millas) al oeste de Rock Springs. A través de toda el área se encuentra aflorando una capa delgada de suelo y en algunos lugares aflora la lutita. Las lutitas más ricas en aceite están sepultadas al oeste del área en estudio. A continuación se describen brevemente las operaciones efectuadas en cada lugar

en donde se aplicó la estimulación con explosivos químicos:

Rock Springs, Sitio 1. Este sitio se utilizó para probar lo siguiente; (1) si un explosivo líquido puede desplazarse dentro de un sistema de fracturas naturales saturadas de agua; - (2) si dicho explosivo puede detonarse de una manera continua dentro de la formación, y (3) si la extensión de la fractura final puede registrarse y determinarse por varios métodos de evaluación, para que posteriormente sea posible practicar un método de recuperación térmica. Una carga de 47 litros (50 quarts) de NGL se introdujeron en un pozo y en varias formas se le obligó a esparcirse dentro de la formación. Las pruebas de flujo efectuadas antes y después de la detonación mostraron que en promedio mejoró en ocho veces la conducción del fluido. En las muestras de núcleos en los pozos se encontraron bastantes fracturas horizontales. Los sistemas de fracturas naturales y la región de agua se encontraban en la zona de interés dentro de la formación. El explosivo líquido fue inyectado con éxito dentro de la zona de interés y desplazó al agua del sistema de fracturas naturales. - El explosivo se detonó sucesivamente y la explosión se propagó por las fracturas.

Rock Springs, Sitio 2. Se utilizó la electricidad de alto voltaje para originar zonas de mayor permeabilidad entre dos pozos utilizando el método llamado "Electrolinking". Aunque se introdujeron zonas con algo de permeabilidad mejorada, se concluyó que la permeabilidad de fractura no fué suficiente, por lo que se recurrió a la detonación de NGL líquida dentro de pozos, dando como resultado un incremento en la capacidad de flujo de las fracturas existentes en las cer

canfas del pozo, así como, la inducción de zonas adicionales de fracturas; la aplicación de la técnica del FEQ coincidió en profundidad con el método de electricidad.

Rock Springs, Sitio 3. Se utilizaron resultados de pruebas del FEQ efectuadas en grietas o fracturas preexistentes en calizas densas y una prueba en una zona permeable natural; se efectuó a una profundidad de 12.8 m (42 pies) en las lutitas saturadas de aceite de la formación Green River, con el objeto de dar un incentivo adicional al incrementar aún más el uso de las técnicas del FEQ, a profundidades, mayores para recuperar más aceite del lugar, a través de la zona fragmentada o del sistema de fracturas. En este sitio se bombeó una carga de 181 litros (190 quarts) de NGL a los pozos y se desplazó al interior de la formación mediante la aplicación de una presión hidrostática y la interface agua--NGL fue determinada con hidrómetro.

Mediante un muestreo se dedujo que el explosivo migró en el interior de la formación una distancia de 7 m (22 pies) a una profundidad de 45 m (147 pies). Antes de detonar la carga los pozos se taponaron con arena hasta la superficie. El explosivo detonó en forma continua y la explosión se propago principalmente por el sistema de fracturas. Los métodos de evaluación mostraron un incremento en la capacidad de flujo de la formación, así como algo de fragmentación en las cercanías del pozo.

Rock Springs, Sitio 4. En este sitio se utilizaron tres métodos para incrementar la permeabilidad debido a la fractura. Ellos son: electricidad de alto voltaje, FEQ y ---

fracturamiento hidráulico. Debido a la combinación de estos de estos métodos de estimulación, se lograron inducir la suficiente fragmentación y fracturamiento para que después fuera posible practicar un método de recuperación mejorada. Estos intentos de fracturamiento fueron evaluados por pruebas de flujo de aire a través de la formación.

Rock Springs, Sitio 5. Los resultados obtenidos de los estudios en los sitios anteriores indicaron que la detonación de un explosivo líquido dentro de fracturas naturales o hidráulicas vence con efectividad la influencia de la presión de sobre carga, extendiendo mucho las fracturas existentes, induciendo nuevas fracturas y fragmentando las rocas cercanas al pozo. Para lograr el máximo fracturamiento posible, se utilizó una combinación de los tres métodos siguientes del FEQ: desplazamiento y detonación de un explosivo químico líquido dentro de un sistema de fracturas naturales, usando cartuchos especiales de dinamita al 60% y TNT gelatinizada en forma de pequeñas esferas para su mejor manejo. Una parte adicional de este estudio fue el desarrollo y la aplicación de diferentes técnicas de evaluación de las fracturas para conocer en gran parte la extensión de la zona fracturada.

Rock Springs, Sitio 6. La aplicación de los métodos térmicos de recuperación y la producción de aceite en Rock Springs, Sitio 4, alentaron la planeación de este nuevo sitio. El propósito fue el uso de los explosivos como un medio para inducir la fragmentación necesaria; después se efectuó un experimento de recuperación mejorada insitu a una profundidad mayor a las anteriormente usadas. Los pozos fueron detona

dos utilizando cartuchos especiales de TNT y usando las técnicas de disparo efectuadas en Rock Springs, Sitio 5.

Rock Springs, Sitio 7. Este sitio fué preparado para probar la orientación de las fracturas inducidas con el método hidráulico; también para inducir fracturas horizontales -- con métodos del FEQ, a través de la formación así la porosidad total, y el flujo de fluidos hacia los pozos productores. Debido a que se tuvieron problemas con el fracturamiento hidráulico, se hicieron en los pozos detonaciones con cartuchos especiales de TNT. Después, se logró generar una ignición con éxito en la zona fracturada con explosivos.

En el artículo publicado por Rodríguez, se menciona -- que con el descubrimiento de métodos para el uso subterráneo de los explosivos termonucleares (fusión y fisión), se han -- ido desarrollando una serie de experimentos con el propósito -- de averiguar si es posible aplicar tales métodos a yacimien-- tos petroleros que, siendo ricos en hidrocarburos, no se pueden explotar económicamente. Estos experimentos se han enfoca-- do principalmente hacia dos tipos de yacimientos: (1) los que tienen una gran cantidad de gas, pero con permeabilidad dema-- siado baja y (2) las lutitas bituminosas cuya extracción, uti-- lizando métodos convencionales, es muy difícil. Con el propó-- sito de obtener información sobre estos dos tipos de yacimien-- tos de gran importancia cabe destacar los de Gasbuggy, ----- Rulison, Miniata y Laramie, en los U.S.A.; también existe una serie de experimentos hechos en la U. R. S. S.

El ensayo de Gasbuggy se realizó en la formación --- Pictured Cliffs, en el condado de Rio Arriba, Nuevo México, ejecutado por la compañía El Paso Natural Gas a un costo total de 4.7 millones de dólares. Su principal objetivo fué de terminar la aplicación de los explosivos nucleares en la producción de gas natural en formaciones con baja permeabilidad. Se utilizó un explosivo termonuclear de 26 Kilotones ubicado en un pozo de 71 cm (28 pulgadas) de diámetro y a 1292 m --- (4240 pies) de profundidad. Las principales características del yacimiento antes de la explosión nuclear fueron: permeabilidad 0.02 milidarcys; porosidad 11.9%; espesor neto 46 m (150 pies); capacidad de flujo 3 milidarcys por pie, saturación inicial de gas 50%; temperatura de la formación 47°C -- (117°F), presión absoluta 88 kg/cm<sup>2</sup> (1260 lb/pulg<sup>2</sup>). Los resultados aportados por el ensayo realizado en dicho yacimiento fueron los siguientes: (1) una caverna con un radio de -- 24 m (80 pies), (2) no se produjo escape de material radioactivo a la atmósfera, (3) los pozos vecinos y la superficie del terreno no fueron dañados, (4) las fracturas producidas por el yacimiento alcanzaron un promedio de longitud de 134-m (440 pies), (5) la productividad y la permeabilidad de la zona detonada aumentaron, aunque no en la cantidad esperada, (6) se observó después de la detonación una mayor cantidad de tritio que la supuesta previamente, que ocasionó una contaminación del gas natural y del agua subterránea. Una solución al problema de contaminación es la substitución de los explosivos termonucleares por explosivos netamente de fisión, pero estos últimos son más caros.

El experimento Rulison se realizó en Garfield Colorado en el año de 1969, por la compañía Austral Oil y el go---

bierno de la E.O.A., con el propósito de determinar el comportamiento de un yacimiento bajo los efectos de un explosivo -- más potente y colocado a mayor profundidad. Con ese fin se -- usó un explosivo termonuclear de 40 Kilotones a una profundidad de 2542 m (8340 pies) y con un costo total de 6.5 millones de dólares. Con este ensayo se demostró que es posible explotar técnica y comercialmente un yacimiento de gas natural de baja permeabilidad.

El ensayo de Miniata fue realizado en el año de 1971 por la comisión de Energía Atómica de U.S.A., en Nevada. Con él se logró por vez primera construir explosivo capaz de ajustarse al diámetro convencional de los pozos petroleros y doble potencial al usado en Rulison, o sea de 80 Kilotones. En este ensayo se logró reducir la cantidad de tritio en gran -- proporción. Se calcula que del 10 al 15 % de tritio producido durante la explotación se encuentra combinado con el gas natural y el porcentaje restante se combina con el agua presente en la cavidad dejada por explosión. En el octavo Congreso --- Mundial del Petróleo, llevado a cabo en la U. R. S. S., en -- 1971, se informó que con el uso de explosivos nucleares subterráneos se puede aumentar tanto el flujo, como la recuperación en yacimientos con muy alto contenido de carbonatos. También se logró mantener todo el material radioactivo dentro -- del yacimiento, eliminando de esta manera cualquier perjuicio de contaminación radioactiva a la salud pública. Estas conclusiones estuvieron basadas en cinco explosiones efectuadas en un período de cuatro años en campos petroleros rusos.

## C A P I T U L O   I I

### APLICACION DE LA TEORIA DE LOS ESFUERZOS DEL SUBSUELO AL FRACTURAMIENTO CON EXPLOSIVOS QUIMICOS

En este capítulo se trata de exponer en forma breve, los fenómenos físicos que intervienen cuando se genera una serie de esfuerzos de tensión y compresión instantánea, dentro del sistema rocoso, por medio de la detonación de un explosivo químico, modificando de esta manera la distribución de esfuerzos en el subsuelo y el flujo de fluidos de una formación productora de hidrocarburos.

Hay que tener en cuenta que un pozo tiene un diámetro pequeño en comparación con la magnitud del yacimiento, y además funciona como desagüe o salida de los fluidos de una cierta área de drenaje. Esta condición es comparable con la existencia en el cuello de una botella, o con la de un embudo.

El estudio sobre gradientes de presión y energía del movimiento de los fluidos en la zona cercana al pozo, muestra que esta es la zona donde se concentra el consumo de energía y la presión disminuye en gran proporción. Además, generalmente, esta zona abarca de 0.9 a 1.8 m (3 a 6 pies) alrededor del pozo.

Las características mecánicas del yacimiento prácticamente son fijas para un pozo dado y sólo el radio del pozo está sujeto a alguna variación. Por otro lado, los cambios -

hechos en dicho diámetro causan variaciones despreciables en el volumen del yacimiento. Pero, con la inducción de fracturas en las rocas se produce un cambio apreciable en la mecánica del flujo de fluidos; de flujo radial a flujo lineal en varias regiones circundantes del pozo.

Cuando una fractura es inducida en la formación los fluidos circundantes a esta fractura o alguna rama secundaria de la fractura principal, se comporta en forma lineal como puede verse en la figura 2.1. Esta forma de flujo permite un rápido agotamiento de los hidrocarburos situados en las cercanías de la fractura. Los puntos más allá de la fractura como lo muestra el punto B de la figura 2.1., siguen una ley de flujo radial convergiendo al final de la fractura. Esta forma de alterar el flujo da origen a un gradiente de presión mucho más alto, influyendo así en regiones distantes del pozo y a la vez implicando un aumento en la productividad estimulando con técnicas del FEQ.

Se han efectuado estudios, los cuales intentan relacionar los efectos de la detonación de un explosivo, como pueden ser, la presión de choque, la velocidad de propagación, el esfuerzo constante, etc. Con la estimulación de la formación y la producción de hidrocarburos.

Se sabe que las técnicas del FEQ han influido bastante en la inducción de fracturas múltiples, y actualmente donde son aplicados proporcionan un radio de alcance o área de fracturas bastante grande, lo que es muy importante para extraer hidrocarburos de ciertas zonas del yacimiento produc-

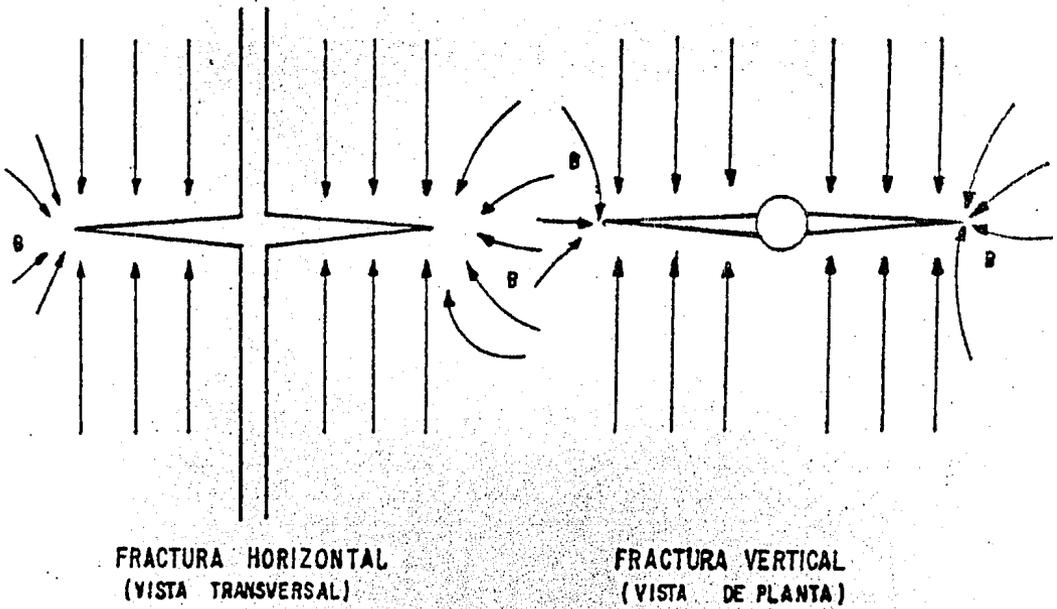


FIG. 2.1 .- FLUJO DE FLUIDOS. EN EL INTERIOR DE UNA FRACTURA.

tor.

La roca es más resistente a la tensión que a la comprensión, debido a que en aquel, antes de llegar a la falla primero se forman grietas en la roca. Langefors demostró que la presión desarrollada por un explosivo químico al detonar dentro de un pozo aislado por medio de empaques y tapones puede exceder las 100 000 atmósferas. Este pulso de alta presión fracciona a la roca cercana al pozo y además vence a los esfuerzos tangenciales y el esfuerzo de sobrecarga. Estas fuerzas tienen lugar bajo la influencia de la onda de choque que al principio de la detonación se transmite radialmente hacia afuera y viaja con velocidades que varían de 3 000 a 50 000 m/seg. (9 800 a 16 400 pies/seg), dependiendo principalmente de la potencia del explosivo químico y del medio donde se transmiten las ondas. La presión lateral primero tiene un valor positivo ( de comprensión ), antes de que el frente de onda llegue, pero cuando dicho frente de onda pasa por un punto determinado de la formación, el valor de la presión lateral cambia súbitamente de ese valor positivo a valores negativos ( de tensión ), es decir, en muy poco tiempo existe un cambio brusco de estado de esfuerzos de comprensión a uno de tensión. Se observa que durante la primera etapa de agrietamiento, prácticamente no existe roca fracturada.

La carga contenida en el pozo donde se va a efectuar el disparo, al momento de la detonación se transmite un esfuerzo directamente a la roca con frente de ondas paralelo al eje del pozo si los explosivos usados solo están en el pozo y están distribuidos en una sección considerable de la forma

ción, pero en el caso de que el explosivo esté contenido en el pozo y en fracturas preexistentes de la formación, los esfuerzos se transmiten en forma radial y con un frente de onda esférico. En todos los casos las ondas se propagan a través del medio rocoso en todas direcciones. Se observa que la onda de choque se debilita conforme se transmite; sobre todo en las cercanías del punto de detonación en el pozo, suele abrir algunas grietas adicionales, y estas generalmente quedan distribuidas en forma radial (figura 2.2.).

Inmediatamente después de efectuada la detonación del explosivo en el pozo, su diámetro se incrementa hasta casi el doble, ya sea por trituración o por fragmentación de las rocas o bien por deformación plástica, originando así una cavidad con paredes paralelas al eje del pozo.

Después, cuando las ondas de choque o compresionales están viajando por el medio rocoso, pueden reflejarse en cualquier superficie que divida dos medios con diferente velocidad de propagación; por ejemplo, las superficies del terreno, produciendo así esfuerzos adicionales de tensión, los cuales originan un agrietamiento o fracturamiento adicional secundario. Esto se explica porque existen sistemas heterogéneos en velocidad, además de las fracturas naturales en la mayoría de los estratos de la formación productora de hidrocarburos los cuales a su vez cambian de carácter rocoso, en estratigrafía y en contenido de fluidos. Estas características pueden ser suficientes para reflejar esas ondas de choque, causando además una serie de fracturas secundarias alrededor de la fractura principal. Además, se espera dichas heterogeneidades de la

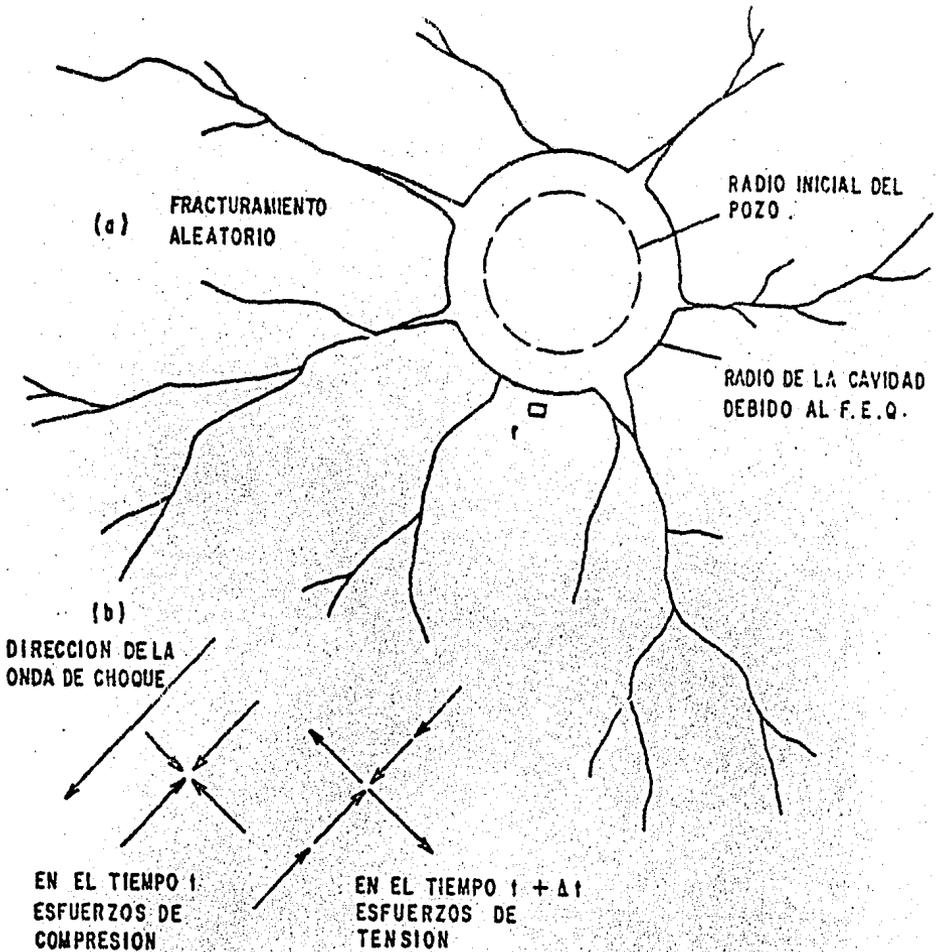


Fig. 2.2 (a) Distribución del sistema de fracturas inducidas por la estimulación con explosivos.

(b) Modificación de esfuerzos en el subsuelo debido a la influencia de la onda de choque, la cual a su vez es inducida por la presión desarrollada por un explosivo químico.

Este es un esquema de lo que sucede en una porción de roca  $r$  cercana a la pared del pozo, como se observa en la parte (a).

roca alteren la velocidad de esa onda de compresión creando una serie de esfuerzos cortantes y normales, los cuales podrían agrietar aún más la roca (figura 2.3).

La inducción y la expansión del sistema de fracturas serían resultados de la expansión instantánea de los productos gaseosos de la detonación del explosivo confinado dentro de un pozo a varios cientos de metros de profundidad. Se calcula que aproximadamente 14 160 litros (500 pies<sup>3</sup>) de productos gaseosos se reducen a partir del estallido de 0.95 litros (un quart) de MGL; la temperatura alcanzada por la explosión es de 3 471°C (6 280°F), la cual expande el gas inicial ocho veces el volumen de gases generados instantáneamente, es decir, en poco tiempo generaron 28 320 litros (1 000 pies<sup>3</sup>) de producto gaseoso a una presión de casi 100 000 atmósferas.

Bajo estas condiciones la roca es vulnerable para el desarrollo de las fracturas; sin embargo, el incremento en la capacidad de flujo depende en gran proporción de la extensión del sistema de fracturas existentes después de efectuar el -- FEQ.

Dentro de la teoría de la reflexión de ondas de Atchison, la detonación de una carga explosiva en un pozo genera una transferencia efectiva de la presión originada por la detonación, a la roca de la formación por medio de un esfuerzo que se transmite en el interior de dicho sistema rocoso, y depende de la impedancia encontrada entre el explosivo y la roca circundante. Se observa que un ratio de impedancia explosivo-roca más pequeño comparado con uno mayor, mejorará

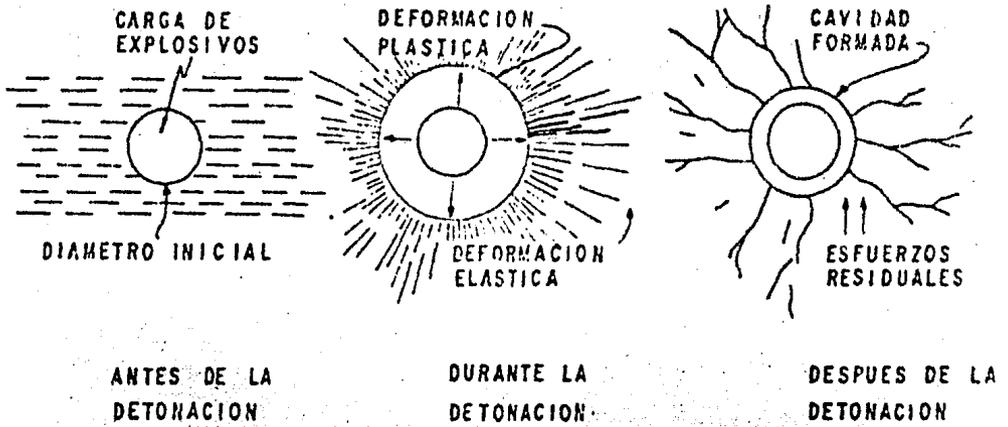


Fig.2.3 Comportamiento general de la detonación de una carga explosiva, confinada dentro de un pozo.

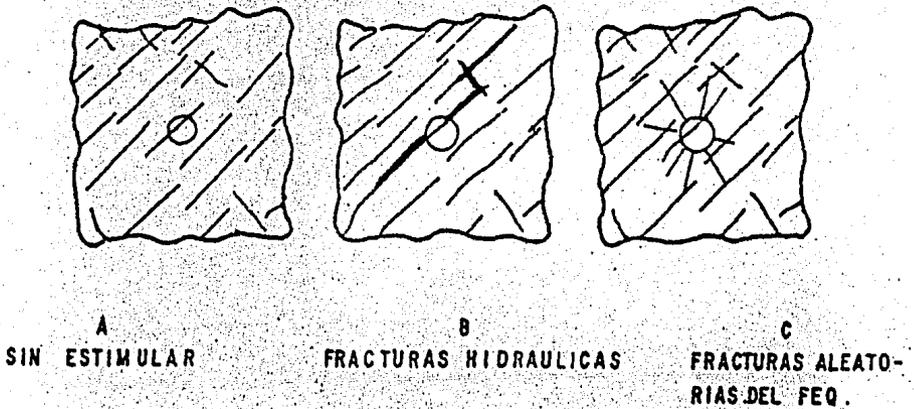


Fig.2.4 Comparación entre el fracturamiento con explosivos químicos y el fracturamiento hidráulico. Dicha comparación se hace en un yacimiento naturalmente fracturado.

mucho mejor la transferencia de presión de detonación a es--  
fuerzo de compresión transmitido. Atchinson muestra la si---  
guiente relación de la teoría elástica:

$$P_m = \frac{2 p}{1 + Z}$$

Donde:

$P_m$  es el esfuerzo transmitido al medio rocoso.

$P$  es la presión proporcionada por la detonación.

$Z$  es el radio de impedancia explosivo-roca.

De la relación anterior se desprende que la veloci--  
dad de detonación está relacionada con la presión de detona--  
ción y es muy importante en el estudio de la transferencia --  
de energía de una explosión hacia la formación a estimular.--  
La carga de explosivos químicos detonada en un pozo se trans  
forma en energía elástica de presión en la roca, debido a --  
que se generan grandes cantidades de gases a muy alta pre---  
sión y temperatura.

La forma en que la energía del explosivo está siendo  
transferida a la roca no se entiende totalmente, y además el  
problema es más complicado cuando el explosivo está confina--  
do en una fractura preexistente o en una capa delgada hori--  
zontal de roca porosa.

Ya en el medio poroso, las ondas usualmente viajan -  
con una velocidad constante determinada por la energía explo

siva proporcionada durante la detonación, la proporción en la cual dicha energía se transfiere al medio rocoso circundante, la densidad del explosivo y por el diámetro efectivo de la carga.

Fracturamiento aleatorio. Los tratamientos de estimulación utilizando el FEQ incrementan en forma significativa la productividad del pozo mediante la inducción de muchas fracturas distribuidas en forma aleatoria en el interior de la formación (fig. 2.4).

Por otro lado, el fracturamiento hidráulico induce o extiende pocos planos de fractura, tal vez sólo uno o dos, restringiendo así las rutas de flujo por medio de las fracturas inducidas.

La fragmentación y las fracturas aleatorias inducidas por el FEQ en rocas competentes (compactas y de baja permeabilidad), proporcionan una capacidad de flujo muy alta. Esto beneficia a aquellas formaciones donde los patrones de flujo o de permeabilidad alta no pueden alcanzarse por otros métodos de estimulación.

La formación de cavidades o cavernas por técnicas -- del FEQ, implican un incremento adicional en la producción del pozo. Por ejemplo, el radio de la cavidad inducida, calculado para una profundidad de 2 134 m (7 000 pies), dentro de rocas típicas de los yacimientos petroleros se muestra en la figura 2.5, la cual hace una comparación entre los altos explosivos químicos y los explosivos nucleares de un Kiloton

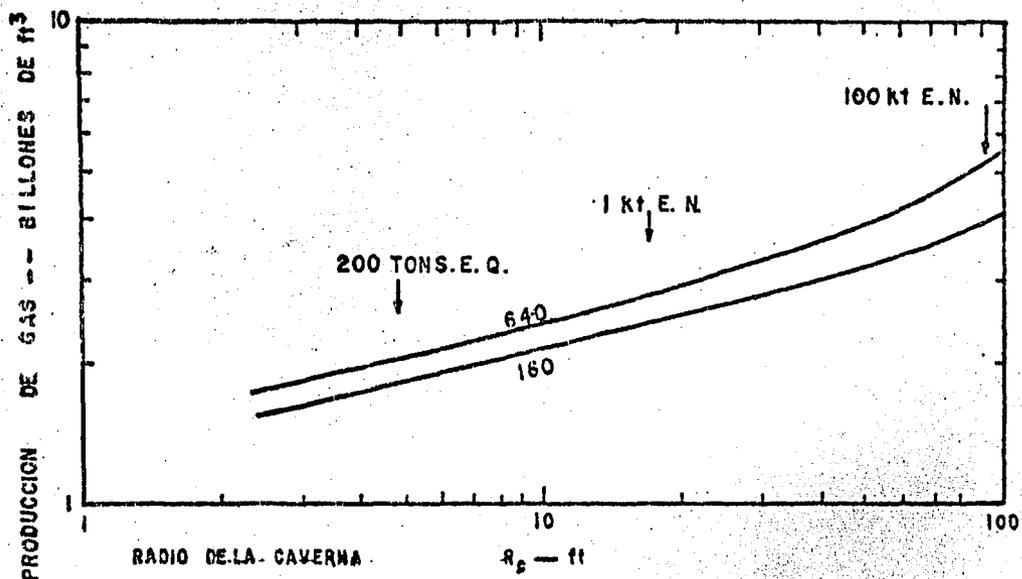


FIG. 2.5.- Producción acumulativa de gas para 20 años a partir de pozos estimulados con explosivos químicos y nucleares como una función del radio de la cavidad inducida.

y de cien Kilotones, con radio de caverna de 6 a 26 m -----  
 (18 y 86 pies), respectivamente.

Otra forma de calcular el radio de la cavidad inducida debido a la detonación de cargas cilíndricas de altos explosivos químicos son 305 m (1 000 pies) o más de longitud, de tal manera que abarquen toda la columna geológica de la formación por fracturar, se basa en el cálculo de la densidad o del volumen específico de la carga. Otros métodos ---- usan fórmulas empíricas como la siguiente:

$$R_c = \frac{CW^{1/3}}{(e H_e)^{1/4}}$$

Donde:

$R_c$  es el radio de la caverna formada

$W$  es el potencial del explosivo

$e$  es la densidad de la roca a fracturar

$H_e$  es la profundidad donde se sitúa el explosivo

$C$  es una constante, la cual varía según el tipo de roca; de 261 para arenas hasta 343 para granitos.

## C A P I T U L O   I I I

### TECNICAS DE CAMPO QUE SE UTILIZAN EN EL FRACTURAMIENTO CON EXPLOSIVOS QUIMICOS (FEQ)

Dada la importancia que este capítulo tiene y para su mejor comprensión y desarrollo se divide en los siguientes puntos:

- a. Explosivos utilizados
- b. Técnicas de campo
- c. Métodos de evaluación

a. Explosivos utilizados. Algunos de los objetivos del FEQ, dependen en gran parte de las principales propiedades de los explosivos, como son la potencia, la densidad y presentación comercial, que pueden ser sólida, líquida o gelatina. De tal manera que la energía liberada por la detonación del explosivo, en el interior de la formación de interés, sea lograda al máximo aumentando el diámetro del pozo e incrementando la permeabilidad debido a las fracturas.

A continuación se mencionan los siguientes puntos -- importantes para la selección y uso del material explosivo.

1. Facilidad y seguridad en el manejo de los explosivos, tanto en el transporte como en la instalación y detonación.

2. No deben existir rocas o fluidos de perforación - con reacciones químicas ni miscibilidad.
3. La densidad del material explosivo debe ser mayor que la del agua, los hidrocarburos y los fluidos de perforación.
4. Los explosivos deben tener características propias que ayuden a su desplazamiento dentro del - pozo, de las fracturas preexistentes y de la matriz de la roca.
5. Deben tener capacidad de detonación dentro de --- grietas delgadas y dentro de la matriz de la roca.
6. Para un fracturamiento extensivo deben proporcionar una gran energía.
7. Deben tener bajo costo.

Después de 1960, durante los primeros años fué muy utilizado el explosivo llamado nitrogel, que es nitroglicerina gelatinizada, en la estimulación de pozos que se encontraban a una profundidad promedio de 914 m (3 000 pies) y utilizan cargas promedio de 1716 Kg (4 000 libras).

En los estudios hechos por Cook indican que algunos explosivos, especialmente la nitroglicerina gelatinizada y la dinamita, comúnmente presentan dos velocidades diferentes de propagación estables y diferentes que llegan a tener una diferencia hasta de un factor de 5. En algunos ex-

plosivos se muestran velocidades pasajeras en las etapas de iniciación del proceso de propagación de la onda de choque que se genera; algunas veces la detonación empieza con una velocidad de propagación baja, que cambia súbitamente a un valor alto. En algunos explosivos este fenómeno es aleatorio, pero en los mencionados el cambio ocurre en posiciones bien definidas. La detonación de propagación alta viaja a velocidades similares a aquella de detonación hidrodinámica ideal del sistema rocoso que está siendo investigado; o sea que se alcanza la velocidad de propagación máxima.

En los estratos delgados las detonaciones de baja velocidad ocurren con mayor frecuencia que las de alta velocidad. Para los explosivos líquidos como la nitroglicerina las velocidades de propagación pueden variar ampliamente. En varios experimentos se encontró que la velocidad de detonación de la nitroglicerina varía entre 700 a 915 m/seg -- (2 300 a 29 900 pies/seg.). Cuando va ocurrió el cambio de la velocidad de propagación de bajo a alto orden, es muy difícil que un cambio contrario suceda; por lo que este fenómeno es diferente de las detonaciones de bajo orden encontradas frecuentemente en los explosivos militares. La detonación de bajo orden es prácticamente desconocida en cualquier tipo de explosivo utilizado por el FEQ, excepto en la dinamita gelatinizada.

En el trabajo de Walker se indica la utilización de la nitroglicerina desensibilizada que está hecha a base de una mezcla llamada EL-389-B. Este es un producto Dupont, el cual satisface la mayoría de los requerimientos antes mencionados; este explosivo líquido está compuesto de nitrogl

cerina, dinitrotolueno, trinitrotolueno y aditivos desensibilizadores. Esta mezcla es comunmente utilizada en este tipo de operaciones del FEQ, es relativamente segura en cuanto a una detonación prematura, ya sea por golpeo o por cambios bruscos de temperatura. Este explosivo líquido no se puede bombear a presión, es inmiscible con el agua de la formación pero en ocasiones se desensibiliza por la presencia de hidrocarburos líquidos. La densidad de esta mezcla es de  $1.47 \text{ gr/cm}^3$  (12.25 libras/galón). La viscosidad varía de 7 a 35 centipoises según la temperatura que exista en el yacimiento, lo que permite un fácil desplazamiento en el interior de las fracturas preexistentes; además, desplaza a los fluidos existentes en esas fracturas. Por último, puede desplazarse dentro de una roca porosa y detonarlo posteriormente.

Como ya se indicó, la nitroglicerina, u otro explosivo líquido, puede introducirse en el interior de las fracturas naturales o artificiales y también pueden inyectarse en la porosidad primaria o matriz de la roca cercana al pozo. Miller presenta el ejemplo de la arenisca Berea con densidad de  $2.2 \text{ gm/cm}^3$  en estado seco. En las pruebas de absorción con agua y con nitroglicerina, se mostró que esta roca fué capaz de retener del 11 al 13% del volumen total de roca. La porosidad de la matriz obtenida para esta roca fué del 17%. Las muestras de roca para estas pruebas consisten en pequeños bloques de  $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}$  ( $2 \times 2 \times 6$  pulgadas), los cuales se secaron previamente a  $100^\circ\text{C}$  ( $212^\circ\text{F}$ ), por más de 16 horas. Dichos bloques fueron sumergidos en un explosivo líquido a base de nitroglicerina llamado NGL-EGDN durante varias horas, absorbiendo el 8.2% del volumen total de la roca. Después, en las pruebas de detonación se observó que to

do el explosivo consumido durante la absorción fué eliminado durante la detonación.

Eckard publicó que el explosivo utilizado consistió de una mezcla comercial desensibilizada teniendo como base nitroglicerina, dinitrotolueno y trinitrotolueno o sea los mismos que utilizó Walker. Este explosivo es un líquido --- aceitoso, con una viscosidad de 33 centipoises y con una densidad de  $1.47 \text{ gm/cm}^3$  y es capaz de generar una velocidad de detonación máxima de 7 407 m/ seg.

En el artículo publicado por Brewer, se indica que se usó un explosivo llamado P.E.X., el cual está fabricado a base de nitroglicerina y otros compuestos. Es un explosivo líquido y tiene un punto de detonación bajo y seguro.

Higgins, muestra en su trabajo que los explosivos químicos usados fueron cargas cilíndricas, continuas y largas, generalmente con un diámetro ligeramente menor que el del pozo y con una longitud igual al intervalo de formación que se va a fracturar; las dimensiones en este caso fueron de 60 cm (24 pulgadas) y 610 m (2000 pies) respectivamente. Estos altos explosivos químicos tienen como base nitrato de amonio, presentan alta sensibilidad, son resistentes a la temperatura y compatibles con las rocas y fluidos del yacimiento. Higgins relaciona las propiedades del explosivo químico con el radio de la cavidad esperada. El método más simple para calcular el radio de una cavidad producida por una explosión, es el cálculo de la densidad o del volumen específico de la carga a utilizar, así como el de la presión inducida sobre el medio rocoso. En este trabajo se hace el --

análisis del nitrometano y un explosivo comercial.

Se usaron las siguientes ecuaciones de expansión:

$$pV^{1.44} = \text{cte}$$

$$P_o V_o^{1.44} = P_c V_c^{1.44}$$

$$\frac{V_c}{V_o} = \left(\frac{P_o}{P_c}\right)^{1.44}$$

Donde:

$P_o$  es la presión de detonación.

$V_o$  es el volumen específico del explosivo.

$P_c$  es presión de la cavidad.

$V_c$  es el volumen de la cavidad.

Y para la expansión cilíndrica, o sea la forma física del explosivo se tiene que:

$$\frac{V_c}{V_o} = \frac{R_c^2}{R_o^2}$$

Donde:

$R_o$  es el radio de la carga de explosivo.

$R_c$  es el radio de la caverna.

De las fórmulas anteriores se concluye que:

$$R_c = R_o \left( \frac{P_o}{P_c} \right)^{1/2.88}$$

Con la ecuación anterior se obtiene casi los mismos resultados que una expresión polinómica más precisa para -- las relaciones presión-volumen.

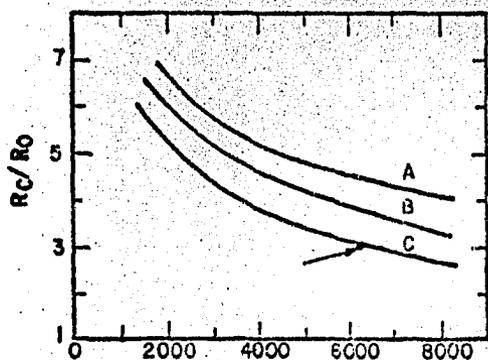
La figura 3.1 indica que la relación  $R_c/R_o$  es función de la profundidad del centro de la carga explosiva; la curva A fué calculada con la ecuación antes mencionada. Las curvas B y C fueron hechas utilizando propiedades adiábricas del nitrometano.

Finalmente el explosivo propuesto es una mezcla de nitrato de amonio, nitrometano y aluminio, con una densidad mayor o igual a  $1.40 \text{ gm/cm}^3$  y con una energía específica -- más alta que la del nitrometano.

El FEQ de yacimientos de baja permeabilidad con este tipo de explosivos químicos es técnica y económicamente competitivo con otras técnicas.

Moore, en su trabajo, señala que utilizó lo que él llamó explosivos convencionales, típicos de ingeniería petrolera, destacando aquellos explosivos basados en componentes de trinitrotolueno y trinitroglicerina.

En la revista The Oil and Gas Journal del mes de septiembre de 1968, se menciona que la división Dowell de la compañía Dow Chemical, ha desarrollado dos nuevos explosivos para mejorar el porcentaje actual de producción de yacimientos de baja permeabilidad de aceite y de gas.



PROFUNDIDAD DEL CENTRO  
DE LA CARGA EXPLOSIVA. ----- ft.

FIG. 3.1.- Gráfica del radio  $R_c/R_o$  contra la profundidad de enterramiento del centro de una carga larga de los llamados altos explosivos químicos. Además, se debe de cumplir con la siguiente condición: la longitud de la carga debe ser mucho mayor que el radio de la caverna  $R_c$ .

Uno de los explosivos consiste de un sistema líquido y uno de sus componentes principales es un combustible - del tipo de los utilizados en los cohetes; es muy similar a aquellos que se están usando en el programa espacial, pero alterado de tal manera que se comporta como un explosivo líquido. El otro de los explosivos se llama Dowell MS-80, el cual básicamente es un nitrato de amonio metalizado y su presentación principal es en cartuchos.

En el trabajo de Tonnessen, se refiere a la estimulación de un pozo a 1 036 m ( 3 400 pies ) de profundidad, mediante el uso de 13 600 Kg ( 30 000 libras ) del explosivo llamado PTC-4, el cual está fabricado a base de nitrato de amonio, perclorato de amonio e hidrazina. Además, dicho explosivo se presenta líquido, gelatina y en pequeñas esferas sólidas.

Hurst menciona en su trabajo el uso de explosivos - en forma de pasta se desplazan al interior de un pozo donde no exista tubería de revestimiento y posteriormente son detonados con seguridad. Como resultado se obtuvo un fracturamiento aleatorio, además el pozo fué altamente productivo. Los componentes de esa pasta básicamente son nitrato de amonio, agua y algún metal. Este explosivo es muy utilizado en voladuras mineras.

b. Técnicas de Campo. En esta parte del capítulo se mencionan las diferentes técnicas de campo utilizadas en el FEQ.

A continuación se discuten en forma general las ca-

racterísticas de cada técnica utilizada en los tratamientos de estimulación con explosivos.

La primera etapa en la preparación de un pozo para efectuar un tratamiento con explosivos químicos requiere - que se limpie el pozo para disminuir la posibilidad de contaminación por partículas de moho, errumbre y lodos secos, - ya que estos materiales podrían originar una detonación prematura.

Técnica de Tonnessen. La instalación del explosivo dentro del pozo se lleva a cabo por medio de una tubería y mangueras especiales, las cuales están comunicadas con los carros tanques. Dichas tubería y manguera bajan en forma independiente hasta una profundidad adecuada, que generalmente varía de 31 a 91 m ( 100 a 300 pies ), donde finalmente se mezclan los componentes individuales del explosivo, los cuales originalmente son compuestos químicos no detonables. Un ejemplo de este tipo de explosivos es el llamado PTS-4. Posteriormente, esta mezcla explosiva se desplaza hasta el punto de interés a un gasto promedio de 3.78 lt/seg ( 1 galon/seg) Todo este proceso o técnica se hace por razones de seguridad, ya que al emplear otras técnicas de trabajo han tenido problemas y accidentes con los explosivos. La técnica se llama Astro-Flow II (fig. 3.2).

Otra técnica es la usada por Hurst en los comienzos de los años cincuentas, en los que se realizaron algunos intentos de combinar el fracturamiento hidráulico con explosivos químicos. Básicamente éstos fueron tratamientos de frac

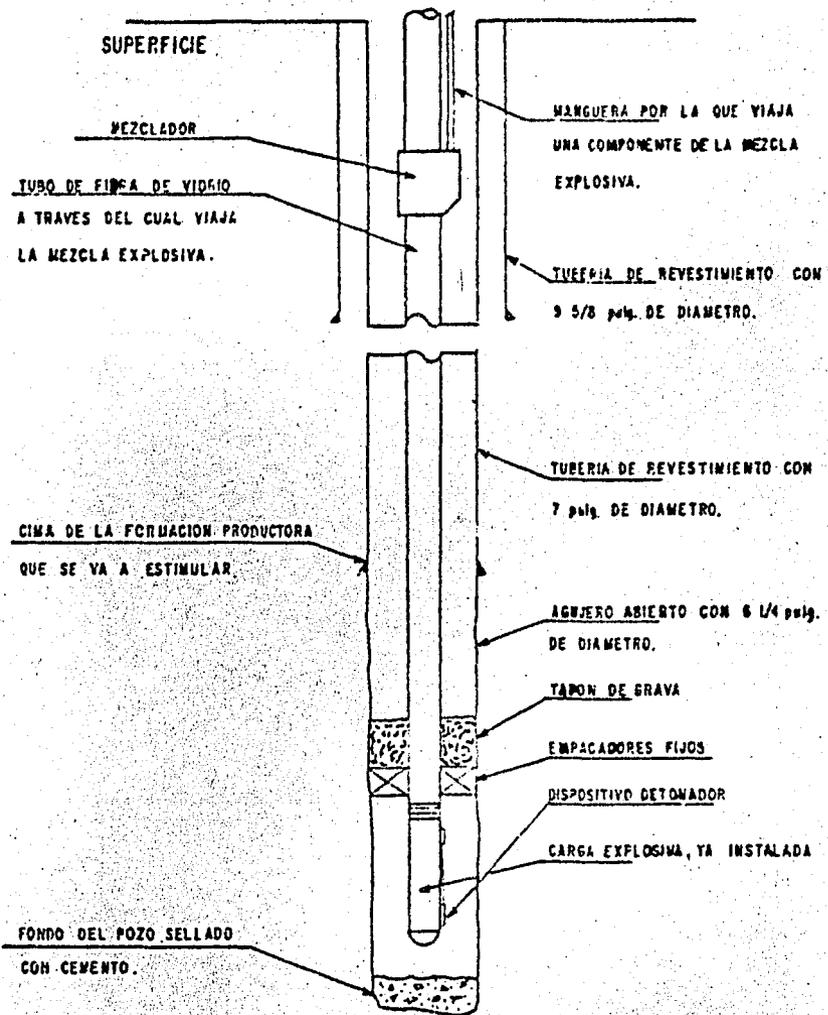


Fig. 3.2 (a) Primera etapa de un tratamiento con explosivos químicos, según se muestra en el trabajo de Tonnessen<sup>15</sup>.

turas hidráulicas en las cuales el agente sustentante fué un explosivo químico sólido, en forma de pequeñas esferas. Después de situar ese explosivo químico dentro de la fractura hidráulica, aquel se detona con el disparo de un dispositivo en forma de cohete, el cual perfora la formación. Teóricamente este tipo de tratamiento da excelentes resultados proporcionando un patrón de fracturas aleatoria, las cuales penetran aún más la formación. Pero esta técnica quedó sólo en desarrollo por muchos años, debido a que el proceso de campo es más sofisticado y caro que otras técnicas del FEQ ya que es necesario efectuar operaciones de bombeo y mezclado de los componentes del explosivo; además, se necesita el auxilio del fracturamiento hidráulico. Pero aún así y debido a que el manejo de los materiales explosivos ofrece pocos peligros, se aplicó a varios pozos.

Otra técnica que utilizó Hurst incluye la utilización de los explosivos líquidos llamados hipergólicos. Tales fluidos aunque no explotan por sí mismos si detonan en el momento en que se mezclan. La técnica generalmente es usada como sigue: primero se desplaza un fluido hipergólico al interior de la formación, seguido de un fluido que tiene la función de espaciador entre dos fluidos hipergólicos; posteriormente se desplaza el segundo fluido hipergólico para indicar la detonación. Este tratamiento es efectivo en pozos profundos, pero existen bastantes problemas del control de los fluidos que originan detonaciones prematuras, problemas que aún no han podido resolverse.

La última técnica mencionada por Hurst, consiste en bajar al pozo un explosivo en forma de pasta, hasta la zona

de interés que será estimulada; dichos explosivos se colocan dentro de una bolsa de plástico flexible sobre un gancho que contiene el dispositivo de disparo. Momentos después de haber instalado los agentes detonantes y el dispositivo de disparo, el pozo se taponea con grava y luego se detona. Por último, el pozo se repara y se pone a producir.-- La utilización de esta técnica con este explosivo tiene algunas limitaciones que son:

a. El pozo deberá tener una presión estática de fondo menor que  $105 \text{ kg/cm}^2$  (  $1\ 500 \text{ lb/pg}^2$  ).

b. La temperatura en la zona que se desea estimular deberá estar comprendida entre  $18$  y  $121 \text{ }^\circ\text{C}$  (  $65$  y  $250^\circ\text{F}$  ).

c. El pozo no debe tener ningún tipo de tubería en la zona de interés ( fig. 3.2 ).

Walker y sus colegas publicaron dos técnicas de campo del FEQ, una cuando el pozo se termina con tubería de revestimiento y otra en agujero descubierto.

Analizaremos el caso en que el pozo se termina en agujero descubierto. Se introdujo y colocó hasta el fondo del pozo una carga de  $845 \text{ lt}$  (  $890 \text{ quarts}$  ) de nitroglicerina; de esta manera, el frente hidrostático de nitroglicerina se desplazó lentamente al interior de las fracturas y la matriz de la roca. Se estimó que sólo  $95 \text{ lt}$  (  $100 \text{ quarts}$  ) de nitroglicerina no se consumieron durante la detona--

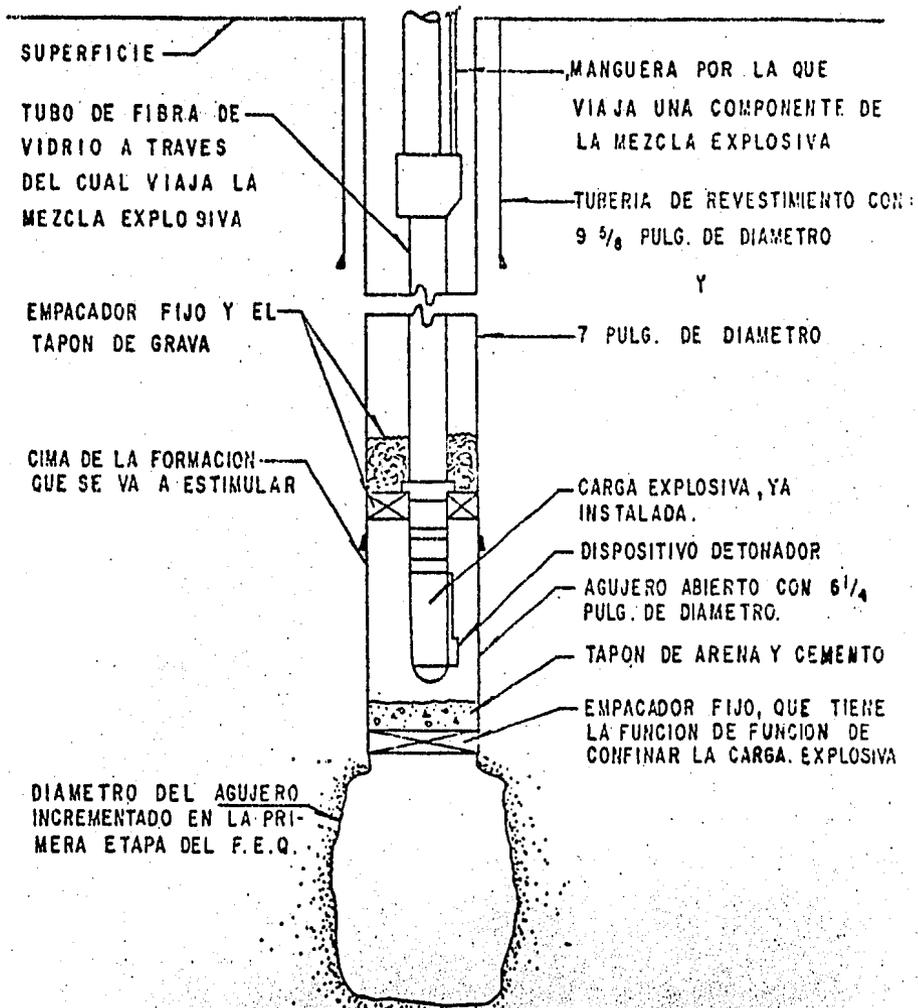


FIG. 3.2- (b) Segunda etapa de un tratamiento con explosivos químicos, según se muestra en el trabajo de Tonnessen<sup>15</sup>.

ción. El dispositivo detonador estuvo formado por tres tanques de nitroglicerina, con 1.5 m ( 5 pies ) de longitud cada uno, con un detonador eléctrico en el tanque inferior. - Todo el conjunto se instaló en el intervalo de los 136 a -- los 168 m ( 535 a 550 pies ) de profundidad. Posteriormente se puso un empacador fijo en la parte superior de la zona a estimular, después el pozo se llenó con una columna de 61 m ( 200 pies ) de arena malla 8-12 con el objetivo de aislar y confinar lo mejor posible la detonación. Todo el dispositivo se comunicó por medio de un cable para permitir el control de la detonación desde la superficie mediante una caja de tiro.

En el caso de pozos terminados con tuberías de re-vestimiento, la carga de explosivos se instaló dentro del pozo en forma semejante a la anterior utilizando 950 lt - - ( 1000 quarts ) de nitroglicerina. Se cree que 855 lt(950 quarts ) se desplazaron al interior de las fracturas pree--xistentes y a la matriz de la formación y 95 lt ( 100 --- quarts ) permanecieron en el interior de la tubería. Aquí - el dispositivo detonador consistió en un tanque de 1.5 m -- ( 5 pies ) lleno de nitroglicerina y una bomba de tiempo el cual fué instalado en la zona por estimular. También se ins--talaron el empacador y una columna de 30 m ( 100 pies ) de arena apisonada ( fig. 3.3 ).

En el estado de Wyoming Miller y colegas trabajaron utilizando las siguientes técnicas.

- a. Desplazamiento y detonación de nitroglicerina en el interior de fracturas preexistentes (natura--

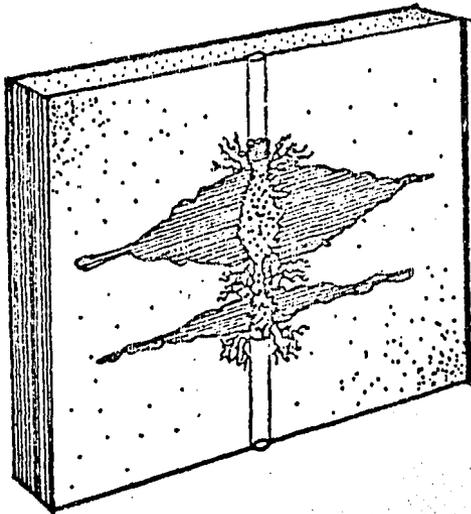


FIG. 3.3.- (A)

Esquema de la detonación de un explosivo líquido a base de nitroglicerina dentro de un pozo con un sistema de fracturas verticales preexistente, resultando finalmente un fracturamiento aleatorio. El explosivo líquido es desplazado y detonado dentro de una fractura vertical, la cual intercepta al pozo. La energía liberada incrementa el diámetro del pozo y crea un fracturamiento adicional más extensivo a partir del principal sistema de fracturas.

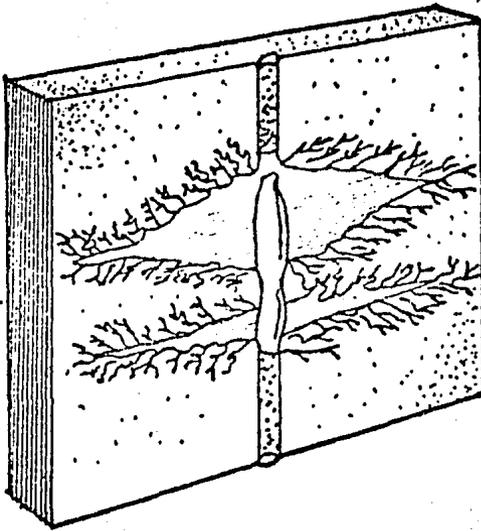


FIG. 3.3.- (B) En la prueba de Walker<sup>16</sup>, el 90% de los 1000 cuartos de nitroglicerina detonó sucesivamente a partir del pozo hasta 500 ft que es el alcance de la fractura hidráulica, con características muy similares a este croquis.

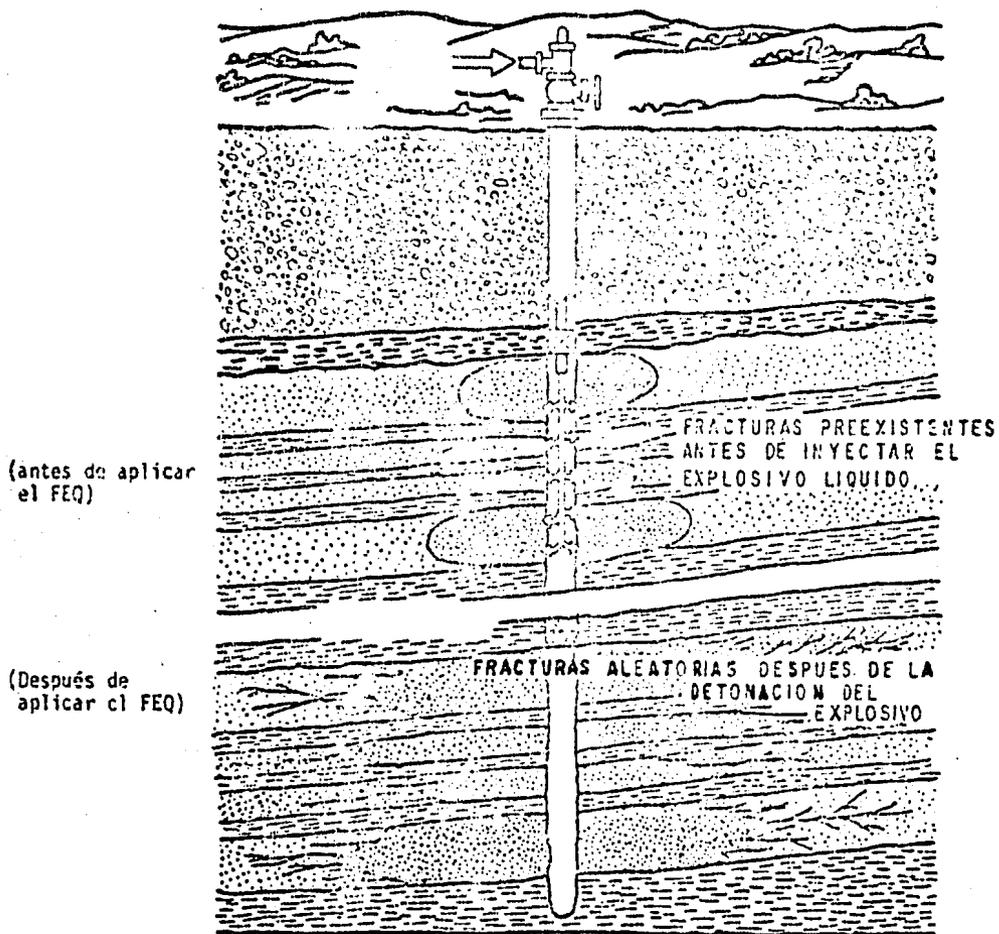


Fig. 3.3 (c) En esta gráfica se muestra como la inyección y detonación de un explosivo líquido incrementa la producción de petróleo de formaciones poco permeables.

les e hidráulicas).

- b. Diferentes formas de instalación de la nitroglicerina en uno o varios pozos, así como, formas de detonación del explosivo, como puede ser una detonación simultánea o bien secuencial.
- c. Desplazamiento y detonación de nitroglicerina en el interior de fracturas preexistentes en combinación con la detonación de cartuchos especiales de dinamita en el interior del pozo.
- d. De tonación exclusiva de cartuchos especiales de dinamita en el interior del pozo.

Brewer introdujo la técnica de llenar el pozo y los vacíos de la fractura hidráulica con un explosivo líquido; el nivel de dicho explosivo se determina continuamente y -- cuando la columna se estabiliza, se instala una bomba en -- forma de tanque vertical. Después, en la parte superior se instala un empacador y luego se taponea con grava graduada. Por último, el explosivo se detona originando ondas de choque que ocasionan las fracturas inducidas. El disparo del sistema por medio del tipo de bomba mencionada se implementa en la operación de campo, como un intento para mejorar -- aún más la eficiencia del drenaje.

Cuando el explosivo líquido está penetrando en la -- fractura preexistente ejerce una presión de 0.927 Kg por me -- tro ( 0.623 lb por pie ) de altura de la columna de explosi -- vo líquido y tiene una gravedad específica más alta que la -- de los fluidos encontrados generalmente en los pozos petro --

leros y por consiguiente, se desplazará a dichos fluidos, llenando así la parte que interesa de la formación (fig. -- 3.4 ). Cuando finalmente el pozo y la fractura se llenaron con explosivos líquidos P.E.X., y posteriormente todo el sistema fué detonado, dió como resultado un nuevo sistema de fractura, y una cavidad. Por tanto, mejoró la productividad del pozo.

En un artículo publicado por la revista The Oil and Gas Journal en septiembre de 1968, se informa que se utilizó un método de campo parecido al de los explosivos líquidos hipergólicos. En todo el sistema el explosivo líquido se bombeó al interior del pozo seguido por un líquido no reactivo, cuya función fué aislar y servir como espaciador entre el explosivo líquido y otras sustancias. El explosivo líquido se desplazó al interior de la formación por un bombeo adicional. Después se bombeó un líquido incendiario de tal manera que pasó a través del líquido espaciador y además que no se mezcló con el explosivo líquido, quedando separado de este último.

También en este mismo artículo se menciona otra técnica en la que el agente explosivo llamado Dowell MS-80 se sitúa en el pozo en forma de suspensión, mediante un dispositivo mecánico que baja hasta el lugar indicado en el interior del pozo. Este agente explosivo debe tener el mejor contacto con la formación, debido a que es un explosivo sólido. La formación que se ha fracturado puede detonarse por varios métodos; por ejemplo, cargas apiladas o formadas o bien otro tipo de diseño de cargas especialmente preparadas. La explosión origina temperaturas superiores a los ---

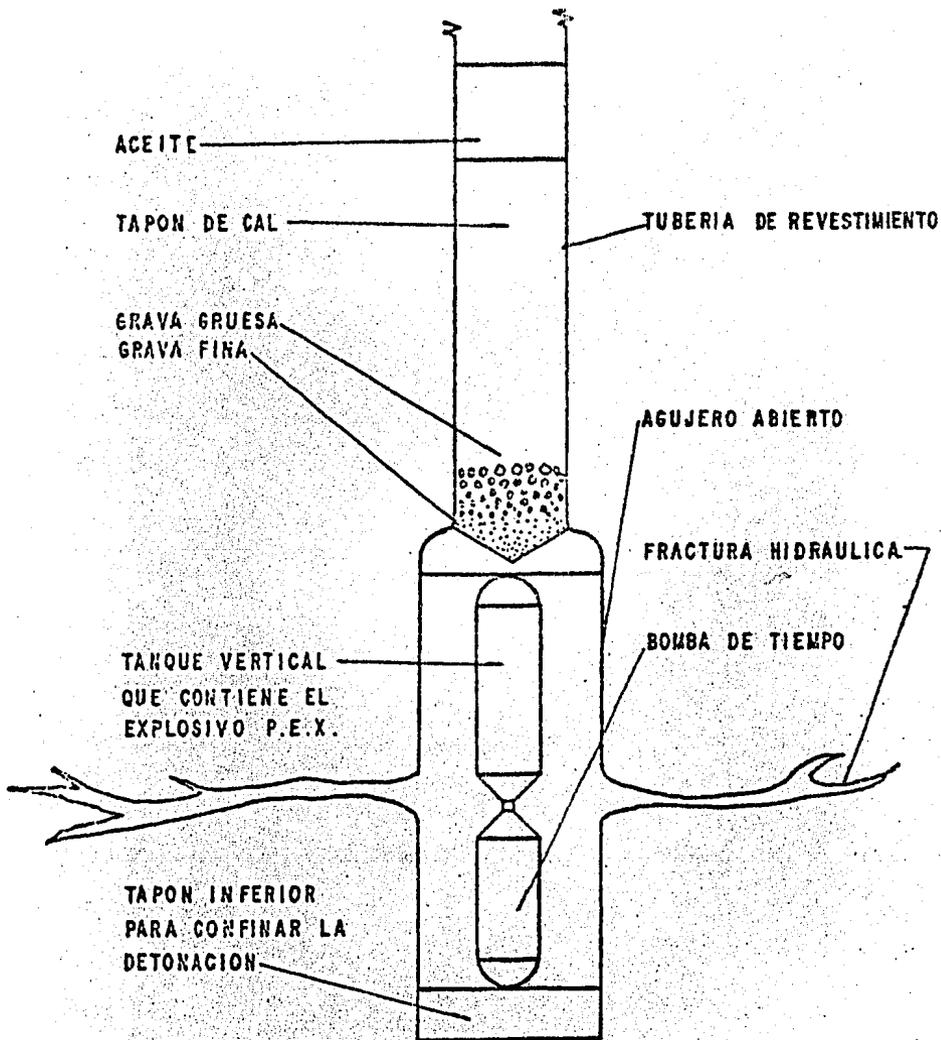


Fig. 3.4 Aquí se muestra un pozo con una parte terminada a agujero abierto con 7 7/8 pulg. de diámetro y la parte restante terminada contuberfa de revestimiento de 5 1/2 pulg. de diámetro y está cementada hasta la superficie.

3 316 °C ( 6 000 °F ) y los gases resultantes se expanden formando fracturas en la roca del yacimiento.

La compañía Dowell sostiene que un volumen considerado de este agente explosivo originará una energía tal que las fracturas serán extendidas a distancias tan lejanas como 30 m ( 100 pies ) en todas direcciones a partir del eje del pozo. En todas las pruebas el disparo se taponeo con -- una columna considerable de arena.

En el artículo publicado por Eckard se describe la técnica siguiente: se introdujo al pozo una carga de 47 litros de nitroglicerina a través de una manguera especial; después con una presión de 1.76 Kg/cm<sup>2</sup>, se desplazó la carga al interior de la formación ( sistema de fracturas y matriz ). La nitroglicerina fué determinada en pozos muy cercanos y luego fué detonada continuamente con un dispositivo, el cual contiene fulminantes y cápsulas eléctricas para el inicio de la detonación. Con esta técnica fué posible mejorar ocho veces en promedio las condiciones de flujo existentes antes de la detonación.

Higgins en su artículo menciona la siguiente técnica: un pozo con un diámetro nominal de 30 cm ( 12 pulgadas ) se perfora hasta la parte superior de la formación productora. Después, se instalan las cargas de altos explosivos químicos en el interior del pozo; luego se detona el explosivo, que en este caso es sólido. Se observó que todo el material que tiene la función de tapón es expulsado en los segundos siguientes. Esos explosivos químicos son cargas cilíndricas.

continuas y muy largas y están hechas a base de nitrato de amonio y de nitrometano.

Los objetivos del trabajo publicado por Moore están íntimamente relacionado con las técnicas del FEQ. Esta técnica comprende la perforación de uno ó más pozos hasta el interior de la formación productora. Los explosivos se emplazan en uno o más pozos sin la etapa de terminación y si es posible al interior de la formación en esos pozos. Después los explosivos se detonan de tal manera que la formación queda extensivamente fracturada. Los pozos sin terminación detonados son taponeados y abandonados. Posteriormente, se perfora otro pozo cuyo objetivo es de producción y se termina con las tuberías correspondientes dentro de la zona fracturada de la formación. En general se prefiere que sean cuatro pozos sin terminar y un quinto pozo totalmente terminado, como se muestra en la figura 3.5. De preferencia los explosivos deben detonarse simultáneamente para una propagación adicional de las ondas elásticas generadas por el explosivo dentro de la formación de interés y de este modo formar una zona de fracturamiento más extensa entre los pozos circundantes al pozo de producción. Si es posible los pozos detonados deben ser fracturados previamente por el método hidráulico para ampliar el área de influencia de la presión originada por el explosivo líquido al interior de las fracturas hidráulicas, aumentando así la eficiencia del fracturamiento total.

c. Métodos de evaluación de las técnicas del FEQ. - En los trabajos que fueron consultados se mencionan algunos métodos que se usaron o proyectaron para evaluaciones futu-

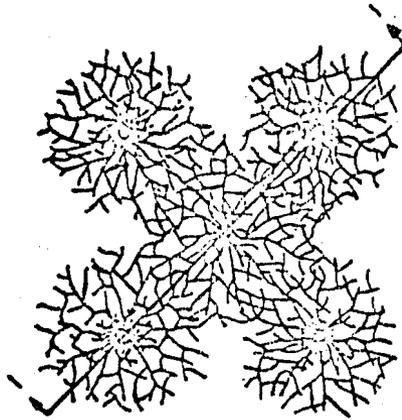


FIG. 3.5(a)

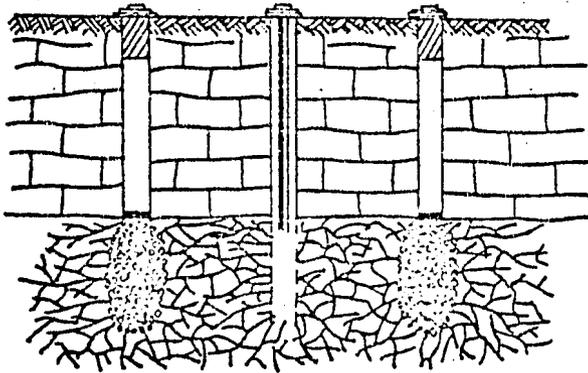


FIG. 3.5 (b)

Fig. 3.5 (a) Representa 4 pozos con terminación en agujero abierto, a partir de los cuales se ha formado una región fracturada, después se perfora y se entuba un quinto pozo con el objetivo de producir hidrocarburos.

Fig: 3.5 (b) Representa una vista transversal tomada a lo largo de la línea 1-1 de (a) mostrando la formación de interés y la roca de sobrecarga, se muestran los pozos con terminación abierta, el pozo de producción y la zona fracturada de la formación.

ras de los sistemas de fracturas que prevalecen antes y después de las detonaciones. Dicha evaluación consiste fundamentalmente en la determinación de diversos parámetros que caracterizan una fractura como son: extensión o alcance -- orientación, ancho, forma y número de fracturas principa--- les. Algunos métodos se aplicaron en el campo con dificultad; otros, principalmente aquellos en proyecto, son complicados, tanto en la teoría como en la práctica, y su aplicación en el campo requiere de personal experto principalmente en mecánica de rocas, registros geofísicos de pozos, --- electrónica y en otras áreas. También se requiere de equipo electrónico sofisticado. Así, cada método contribuye a un mejor acondicionamiento de las condiciones existentes en el subsuelo.

De los resultados que proporcionan los métodos de evaluación de fracturas dependerá la eficiencia de las operaciones in situ, con el objetivo de efectuar una mejor recuperación secundaria o terciaria de los hidrocarburos residuales.

A continuación se mencionan brevemente algunos métodos de evaluación de las técnicas del FEQ.

#### 1. Pruebas de flujo de aire.

Las pruebas de flujo de aire a través de ciertos intervalos de la formación tratada con el FEQ son unas de las más simples y más útiles de este tipo de técnicas.

Se llevan a cabo pruebas de flujo de aire antes de la detonación, para medir la comunicación inicial de los fluidos a través del sistema de fracturas naturales en la formación productora. El tipo de fracturas naturales (verticales u horizontales), se determina con anterioridad, ya sea usando cualquier método pero de preferencia con el método de impresiones marcadas en un empacador. Así, las zonas de interés quedan aisladas por medio de dos empacadores. Las pruebas de flujo de aire después de la detonación se efectúan para determinar la cantidad de flujo de aire que pasa a través del sistema de fracturas inducidas por el FEQ. Todas las pruebas se efectúan mediante la inyección de aire en un pozo del área en estudio, de preferencia en los centrales. Después se miden los porcentajes de flujo individual en cada pozo circundante al inyector. Si el aire no fluye a partir del pozo inyector hacia los pozos de medición, se concluye que no existen fracturas entre los pozos de la zona en estudio. Por el contrario, si se observa flujo de aire, éste debe medirse y registrarse en los pozos de medición.

## 2. Obtención de núcleos.

Las muestras de núcleos recuperadas a partir de una sección de rocas que son objeto de estudio, pueden proporcionar una serie de datos básicos a través de un examen visual, para una evaluación adicional de la producción potencial de dicha sección. Dichas muestras de núcleos pueden proporcionar información acerca de las propiedades de las rocas y los factores que las afectan. Las secciones de las rocas de la formación de interés bajo un considerable esfuerzo de sobrecarga dan buenas recuperaciones de núcleos;

es decir, que los núcleos obtenidos son largos, continuos, competentes y con fracturas presentes.

Los núcleos que se obtienen en varios lugares de la zona de estudio sirven para eliminar el petróleo que se puede producir a partir de la formación productora. Así, los resultados obtenidos a partir de estos análisis indican donde llevar a cabo el método del FEQ, sobre todo en las formaciones con mejor contenido de petróleo recuperable. Los cortes de núcleos antes de la detonación permiten observar evidencias de fracturas naturales, lentes de arena y arenas arcillosas. La obtención de núcleos después de la detonación ayuda a definir la zona influenciada por la explosión, así como, el área fragmentada alrededor de los pozos detonados.

### 3. Estudios con fotografías del interior del pozo.

Los estudios con fotografías del interior del pozo hacen posible un examen visual del mismo, permiten analizar las fotografías del estereoscopio en tercera dimensión. Las fotografías representan en forma detallada las condiciones actuales del pozo. El propósito de estos estudios es comparar las condiciones existentes antes y después de la detonación, para conocer el desarrollo del fracturamiento, el incremento del diámetro del pozo y alguna información adicional acerca del tamaño y número de fracturas inducidas.

En el campo la cámara estereoscópica se baja suspendida de un alambre, obteniendo fotografías a color y blanco y

negro en intervalos de agujero abierto y secos del pozo. La cámara se baja a través de la zona de interés a una velocidad constante y sincronizada para obtener fotografías a intervalos de profundidad deseados.

#### 4. Medidas de elevación de detalle de la superficie del terreno.

Otro método para calcular la extensión de las fracturas y la fragmentación de las paredes del pozo debido al fracturamiento hidráulico y al FEQ consiste en efectuar mediciones de levantamiento o hundimiento residual de la roca de sobrecarga, para ello se llevan a cabo mediciones de cambio de elevación tomando como referencia los coples de la tubería de revestimiento que salen a la superficie de los pozos que forman el patrón de fracturamiento. En general, se procede como sigue: después de que todos los pozos que intervienen en una operación de fracturamiento han sido perforados, entubados, cementados, se efectúan medidas precisas de elevación tomando como base marcas en bancos fotográficos conocidos. Poco después de la detonación se efectúa otra serie de mediciones.

Posteriormente se construyen mapas de contornos de las diferencias de elevación medidas y cuanto más gradiente se observe en este mapa, mayor será el grado de combamiento de la roca de sobrecarga causado por el método del FEQ.

#### 5. Pruebas con trazador radiactivo.

Este método utiliza un bache trazador radiactivo --

dentro de una corriente de aire que se inyecta con el objeto de medir el tamaño aproximado de vacíos o fracturas dentro de un medio poroso o fracturado. Para aplicar este método es necesario que no haya agua en la formación. El equipo de inyección del trazador consiste básicamente en un tanque que almacena el gas trazador radiactivo, así como, las manifestaciones necesarias del sistema de inyección. Después de haber inyectado el bache de gas radiactivo, se inyecta aire en forma continua. Posteriormente se efectúa un muestreo -- del gas radiactivo en los pozos circundantes.

#### 6. Técnica de resistividad eléctrica.

Esta técnica por lo general se aplica y se usa para ayudar y complementar los datos obtenidos por otros métodos de evaluación de fracturas. La técnica de resistividad --- usualmente proporciona valores más confiables cuando se combina con otros métodos geofísicos, por ejemplo, las técnicas sismológicas. Este método da respuestas cualitativas a muchos problemas y proporciona resultados cuantitativos para una distribución simple de estratos y para otros rasgos geológicos fundamentales como son las fracturas. El equipo básico que se usa en el estudio es un resistivímetro, que tiene como salida dos electrodos de corriente para a través de ellos se le proporcione energía al terreno; además, tiene dos electrodos de potencial como entrada con el objeto de hacer la medición del voltaje entre dos puntos cualesquiera según el arreglo de campo a utilizar.

Es posible investigar con este método de resistividad la variación de ésta, tanto en sentido vertical como en

sentido horizontal. También se les llama sondeo eléctrico - vertical y calicates eléctricas, respectivamente, para determinar el tamaño y el contraste de resistividad de la zona fracturada con la zona sin fracturar de la formación.

#### 7. Estudio de marcas impresas en empacadores especiales.

Las marcas físicas existentes en la pared del pozo, como pueden ser fracturas, contactos y tipo de grano de la formación, pueden tomarse con bastante confiabilidad por medio de empacadores inflables, en la profundidad de interés; esos empacadores se bajan y se inflan dentro del pozo en una sección sin tubería, con una presión casi siempre de 105 Kg/cm<sup>2</sup> ( 1 500 lb/pg<sup>2</sup> ); además la cubierta de esos empacadores es de caucho blando. En la superficie del empacador quedan marcas diversas características de la formación entre ellas están las fracturas. Para un trabajo de campo se deben hacer estudios de este tipo cada 30 m ( 10 pies ), dentro del intervalo de interés. El empacador está acoplado a un tubo de 5 cm ( 2 pulgadas ) de diámetro, a través del cual se infla hasta ejercer un contacto firme con la pared del pozo. Generalmente, este método ayuda al de fotografías en el interior del pozo para identificar y correlacionar los sistemas de fracturas existentes, así como, la zona fragmentada alrededor del pozo.

#### 8. Registros de calibración.

Los registros de calibración se usan extensivamente en trabajos de FEQ para determinar el tamaño y condición del pozo en cuanto a su diámetro, antes y después de la de-

tonación. Los registros que se toman antes de la detonación ayudan a determinar condiciones del pozo como medida del diámetro, irregularidades y la existencia de fracturas naturales. Los registros tomados después de la detonación ayudan a determinar evidencias de daño y derrumbés en el pozo y el incremento de diámetro. Más tarde, estos registros se usan en los pozos detonados para localizar zonas de rocas competentes en las cuales podrían aplicarse detonaciones adicionales.

#### 9. Registros de rayos gamma-neutrón.

En general los registros de rayos gamma-neutrón en todos los trabajos del FEQ, en el intervalo que comprenda la formación productora tienen como objetivo efectuar una correlación litológica en todos los pozos u obtener otra formación pertinente. Se observa que un bajo contenido de hidrocarburos en la información productora produce una alta respuesta en el registro neutrón y viceversa. Estos registros pueden apoyarse y correlacionarse con las pruebas de flujo de aire en la localización de zonas permeables.

#### 10. Delineación sísmica.

Esta técnica está encaminada a detectar y delinear las fracturas generadas por el FEQ a la profundidad de la formación de interés. La técnica más usada con este objetivo es la sísmología de refracción además de los estudios de velocidad en pozos.

#### 11. Holografía sísmica.

Para que se realice este análisis es necesario un

arreglo sísmico especial de campo, para que de esta manera sea posible construir la holografía sísmica a partir de los datos reunidos. Un holograma representa un patrón de interferencia producido por ondas dispersas o juntas que viajan a partir o pasan a través de un objeto, por ejemplo, una zona de fracturas en el subsuelo, que posteriormente se mezclan con una onda de interferencia. En forma particular, un holograma sísmico se puede hacer por la combinación de datos registrados de ondas sísmicas con una onda de referencia adecuada y después se grafica el resultado del patrón de interferencia sobre una película. Tal transparencia fotográfica contiene información acerca del objeto enterrado y a través del cual las ondas sísmicas están dispersas. Estos hologramas pueden reconstruirse pasando una luz láser a través de la transparencia y el resultado debe imprimirse y guardarse en una fotografía, la que constituye una imagen del objeto o fracturas sepultadas. Se obtiene finalmente una representación reconstruida de la zona fracturada.

#### 12. Estudios por medio de sellos periféricos alrededor de la zona fracturada.

En algunos trabajos o pruebas existen problemas de invasión de agua debido a la detonación, por lo que se hace necesario aislar, por medio de cementaciones forzadas el área de interés.

#### 13. Mediciones de velocidad de partículas.

Este método sofisticado en el cual las distancias medidas a partir de la detonación de cargas de explosivos confinados dentro de formaciones sepultadas, precisan de me

diciones de velocidades sísmicas del movimiento de partículas de la corteza terrestre, que pueden calcularse para precisar el desarrollo de las ondas de choque debidas al explosivo. En algunos trabajos, el equipo sísmico se usa para determinar si el movimiento registrado por medio de geófonos situados sobre la superficie del terreno, debido a las detonaciones, puede evaluarse ya que por medio de un proceso de computadora aplicado a las trazas sísmicas obtenidas, se puede determinar la velocidad de las partículas, es decir, la transmisión de las ondas de choque a través de un medio rocoso.

#### 14. Medidas con cámara de alta velocidad.

Se sabe que las ondas de choque (compresión), debidas a la detonación, se propagan con una velocidad de miles de pies por segundos. Para registrar las ondas que se observan directamente debido al movimiento de la superficie del terreno, se requiere que un equipo fotográfico de alta velocidad, especializado para registrar esos efectos debidos al explosivo para un estudio posterior. La cámara y el equipo de sincronización que se usaron durante varios trabajos con explosivos, tuvieron la capacidad de efectuar 3 000 tomas por segundo. Esta técnica de evaluación se ha utilizado para medir la deformación de la roca de sobrecarga. Las fotografías de los coples de la tubería de revestimiento respecto a un banco fijo y estacionario lejos del área de estudio indican objetivamente los efectos de una deformación instantánea de la superficie del terreno. Todo el proceso sólo dura unos segundos. Estos registros fotográficos indica un levantamiento total de la superficie y no un combamiento residual como el método mencionado en 4.

## C O N C L U S I O N E S

Actualmente varias organizaciones que se dedican a la estimulación con explosivos enfatiza sus investigaciones sobre yacimientos caracterizados por una baja permeabilidad la cual varía de 0.1 a 10 milidarcys.

Las fracturas producidas por el FEQ penetran a través de las barreras impermeables, haciendo posible un drenaje más eficiente y uniforme. El efecto total permite que el petróleo escurra al pozo por un espesor más grande. La resistencia al flujo es más reducida, la cual implica un mejor uso de la energía del yacimiento.

En la actualidad las técnicas de detonación y las propiedades de los fluidos difieren ampliamente.

Se puede observar en el desarrollo de la tesis que los trabajos más antiguos relacionados con el FEQ tuvieron las siguientes características generales: éxitos moderados, bastantes fracasos, daños y numerosas detonaciones prematuras que destruyeron pozos y propiedades.

En la mayoría de los autores consultados recomiendan que, antes de efectuar la aplicación masiva del FEQ, debe efectuarse suficientes pruebas preliminares para investigar: la propagación y la velocidad de detonación de la carga explosiva, los efectos positivos del confinamiento de la carga de explosivos químicos, el espesor de carga crítico y

en el caso de que se use nitroglicerina, determinar el espesor mínimo de la fractura preexistente con o sin agente sustentante.

Cuando un yacimiento se encuentra en la etapa de recuperación secundaria, el método del FEQ beneficia tanto a los pozos productores como a los inyectores, ya que los porcentajes de inyección de agua o gas son más altos y a baja presión en los pozos inyectores y aumenta la productividad con baja caída de presión en los pozos productores.

Cuando no existe un incremento significativo en el diámetro del pozo, se debe a que en la mayoría de los pozos la tubería de revestimiento actúa como amortiguador de la energía explosiva dentro del pozo. Por lo tanto, se recomienda efectuar las operaciones del FEQ sólo en pozos con terminación en agujero descubierto.

En lo que respecta la teoría del fracturamiento de la roca, no existe un acuerdo completo entre los autores e investigadores para fijar una teoría firme y básica en relación a este problema en virtud de que una parte considerable del costo de una operación de estimulación con explosivos está asociado precisamente con la cantidad de explosivos a utilizar, generalmente es deseable un número mínimo de cargas, siempre y cuando se satisfaga la demanda de energía explosiva necesaria para que se induzcan fracturas.

Los sistemas de fracturas inducidas ya sean verticales u horizontales, que alcanza una distancia suficiente a

partir del pozo, debido a las técnicas usadas del FEQ, pueden estimular la formación problema en una forma importante y por lo tanto, hacer del yacimiento estimulado un éxito financiero.

De acuerdo con los trabajos consultados, existe la posibilidad de desarrollar métodos de estimulación óptimas combinando las diferentes técnicas del FEQ tratadas en esta tesis, con otros métodos de estimulación, como pueden ser - el fracturamiento hidráulico, el fracturamiento con electricidad o alto voltaje, el fracturamiento con espuma, el uso de ácidos, etc.

En forma general el FEQ es aplicable a:

1. Intervalos largos de agujero abierto con múltiples zonas productoras, las cuales complican mucho un tratamiento hidráulico.
2. Barreras locales o algo lejanas, dentro de la formación, las cuales causan reducciones en la permeabilidad sobre todo a unos cuantos metros de la pared del pozo.
3. Formaciones compuestas de arena saturadas de gas o de otros fluidos, los cuales son sensibles a los fluidos usados en un fracturamiento hidráulico o con espumas.
4. En pozos muy viejos, con tubería de revestimiento y cementación, que limitan el uso de fracturamiento hidráulico y otro tipo de estimulaciones.

5. En pozos lejanos y aislados, donde el equipo convencional es difícil o caro para transportarse, o bien, cuando una operación de campo masiva resulta muy cara y lenta.
6. En zonas productivas cerradas o aisladas para prevenir la invasión de agua, ya que usualmente el fracturamiento hidráulico provoca esa invasión de agua.
7. En yacimientos que tienen patrones de fracturas naturales orientadas hacia áreas no productivas, casquete de gas, pozos inyectoros, etc.
8. En yacimientos con pozos igualmente espaciados para una recuperación máxima a partir del área de drene limitada.

En general, las técnicas de detonación son aplicables a problemas de producción con distancias hasta de 15 m ( 50 pies ) a partir del pozo.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del FEQ en pozos de gas parecen ser prometedores, sin embargo, son necesarios estudios adicionales.

Después de una evaluación general de todos los métodos de estimulación existentes como son fracturamiento con explosivos químicos, con explosivos nucleares, con espumas, hidráulico con electricidad a alto voltaje, etc., se concluye que ningún método es el mejor en todas las áreas y condiciones geológicas existentes.

El explosivo de bajo costo que se pretende utilizar, debe cumplir todos los requerimientos tratados en el inciso b del capítulo III. Esos requisitos son bastantes, pero ninguno de ellos se propaga con una velocidad de detonación alta.

Los componentes químicos que constituyen la mezcla explosiva que intervienen en un proceso del FEQ, por lo general, se consumen totalmente durante la explosión; así su eliminación no presenta problemas de posible contaminación de agua subterráneas. Uno de los autores menciona que los desechos o fragmentos resultantes de la explosión sirven para material sustentante de la fractura inducida, es decir la mantiene abierta. Por otro lado, los escombros o desechos de roca que quedan almacenados en la caverna o cavidad formada, pueden o no eliminarse o limpiarse dependiendo de las características finales y de la importancia del pozo.

Los materiales que se consumen durante el transcurso de una operación de fracturamiento y que irremediablemente se pierden, son: la cantidad de explosivo desplazado al pozo, todo el dispositivo de detonación de 30 a 61 m ( 100 a 200 pies ) de tubería de revestimiento, los empacadores, y el tapón limpiador.

Cada uno de los métodos de evaluación de los parámetros de las fracturas inducidas y de la fragmentación debido a la aplicación del FEQ, proporcionan datos útiles. La mayoría de estos métodos dan estimaciones cuantitativas y algo de cualitativas.

Entre los métodos utilizados para la estimación de la zona fragmentada y de los parámetros de la fractura en las rocas cercanas al pozo, se incluyen los siguientes: fotografías del interior del pozo, marcas o huellas impresas en los empacadores inflables, estudios con registro de calibración del diámetro del pozo, delineación sísmica, registros de calibración del diámetro del pozo, estudios con registros geofísicos (eléctricos, rayos gamma-neutrón, etc)

Entre aquellos métodos utilizados para estimar parámetros areales del sistema de fracturas se incluyen los siguientes: sondeos de resistividad eléctrica, pruebas de flujo de aire, uso de trazadores químicos y radiactivos y sísmología de refracción.

#### SUGERENCIA .

En nuestro país, se recomienda la aplicación del FEQ en la formación Chicontepec ( Eoceno ), productora en el paleocanal del mismo nombre, efectuando previamente las pruebas necesarias.

## B I B L I O G R A F I A

1. Boarman, Ch. R., Knutson, C. F., "Explosive Fracturing Method". United States Patent 3777815 8 pp., 1973.
2. Brewer, B., "Stimulation of oil Production by the Use of Explosives After Hydraulic Fracturing", Producers Monthly, V. 21, No. 4, pp 22-23 1957.
3. Dobrin, M.B., "Introducción a la prospección Geofísica", Ed. Omega, 282 pp., 1975.
4. Eckard, W.E., Eakin, J.L., "Experiments to Increase Petroleum Recovery from Low-Permeability Reservoirs", Petroleum Exploitation Methods and Techniques, pp 168-178, 1970.
5. Higgins, G.H., Butkovich, T.R., Montan, D., "Cost and Feasibility of Stimulation Tight Gas Reservoirs", Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 94550, enero 1973.
6. Holditch, S.A., Morse, R.A., "Large Fracture Treatments may Unlock Tight Reservoirs", The Oil and Gas Journal, pp 57-60, marzo 1971.
7. Hurst, R.E., Zingg, W.M., Cruwe C.W., "New Explosive Fracturing Method, is Safe, Effective", World Oil, pp 131-135, febrero 1970.

8. McLamore, R.T., "Chemical Explosive Fracturing, Field Demonstration", Petroleum Technology Corporation, 6 pp, junio 1974.
9. Miller, J.S., Walker, C.J., Eakin, J.L., "Fracturing Oil Shale With Explosives for In Situ Oil Recovery", Bureau of Mines RI-7874, 100 pp., Energy Research Center, Bartlesville, Ok., 1974.
10. Moore, T.R., "Method of Oil Recovery", Petroleum Abstracts 184-352, Canadian Patent 938548, diciembre 1973.
11. Nicklen, C.O., "History-Making Blast Set Off", Oil Bull. 432, Calgary, Canada, pp. 2-3, 1956.
12. Rodríguez, P.J. "Nuclear Energy Uses", Petróleo y petroquímica Internacional, pp. 49-51, noviembre 1972.
13. Schmidt, R.A., Warpinski, N.R., Cooper, P.W., "In Situ Evaluation of Several Tailored-Pulse Well-Shooting Concepts", Symposium on Unconventional Gas Recovery, Pittsburgh, Penn., SPE/DOE 8934, mayo 1980.
14. Space-Age Explosives May Revive Well-Shooting, The Oil and Gas Journal, pp. 42, septiembre 1968.
15. Tonnessen, K.A., "Environmental Impact Assessment, Chemical Explosive Fracturing Project", Lawrence Livermore Laboratory, 32 pp., 1977.

16. Walker, C.J., Howell, W.D. Eakin, J.L., "Nitroglycerin -- tests Prove New Application", World Oil, pp. 96-98, noviembre 1970.

17. Cook, M.A., "The Science of High Explosives", Reinhold Publishing Corporation, New York, 440 pp., 1958.

18. Martínez Angeles Raymundo.  
"Estimulación de Pozos con Explosivos Químicos".  
Revista del I.M.P., Enero 1984.