

201-26



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“ ANALISIS DE LAS PISTOLAS A CHORRO,  
CONDICIONES DE LA TERMINACION DEL POZO Y SU  
EFECTO SOBRE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA  
DEL POZO ”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A:  
*Severiano Moreno Olvera*



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.

# C O N T E N I D O

	<u>PAGINA</u>
INTRODUCCION. . . . .	1
RESUMEN. . . . .	2
CONCLUSIONES . . . . .	4
RECOMENDACIONES. . . . .	7
ASPECTO FUNDAMENTAL DE LA PISTOLA A CHORRO. . . . .	9
FUNCIONAMIENTO DE LA PISTOLA A CHORRO. . . . .	11
MECANISMO DE LA PENETRACION DEL "JET". . . . .	13
FACTORES QUE AFECTAN LA PENETRACION Y LA MEDIDA DEL AGUJERO . . . . .	15
EFFECTO DEL CLARO . . . . .	17
EFFECTO DE LA COMPRESIBILIDAD Y EL GRADO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO EN LA PENETRACION DEL AGUJERO . . . . .	19
PRUEBA RP-43-API. . . . .	20
CLASIFICACION DE LAS PISTOLAS A CHORRO . . . . .	23
PRINCIPALES CARACTERISTICAS OPERATIVAS . . . . .	26
DAÑO Y DEFORMACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO . . . . .	29
EFFECTO DE LA PRESION HIDROSTATICA Y DE LA RESISTENCIA DEL CEMENTO EN RELACION CON EL DAÑO O DEFORMACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO . . . . .	32
COMPORTAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE FLUJO A TRAVES DEL NUCLEO, CFE. . . . .	34

PAGINA

EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE DISPARO. . . . .	37
EFFECTO DEL DAÑO SOBRE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DEL POZO. . . . .	40
R E F E R E N C I A S . . . . .	42

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

La técnica de disparar con pistolas a chorro sobre la tubería de revestimiento, es la operación más importante del proceso de la terminación de un pozo. Asimismo, tiene una gran trascendencia en la vida productiva tanto del pozo como del yacimiento.

El propósito de los disparos es establecer la comunicación efectiva para el flujo de fluidos entre el pozo y la formación productora, es decir, se genera un agujero a través de la tubería de revestimiento, del cemento, así como de la formación productora.

Es un hecho que la técnica de disparar sobre la tubería de revestimiento presenta un carácter irreversible. Una buena planeación requiere el conocimiento básico de la técnica de disparo, de la capacidad máxima de la penetración del agujero, así como de la productividad del pozo en función de factores que puedan restringir el flujo de fluidos.

Trataremos el desempeño de las pistolas a chorro junto con los factores que afectan la penetración y como éstos, son evaluados por la industria; tipos comunes de pistolas con sus principales características y aplicaciones, aspectos y factores que involucran el daño a la tubería de revestimiento y el efecto de las condiciones del disparo sobre la capacidad productiva del pozo.

## R E S U M E N.

En este trabajo se analizan los diferentes tipos de pistolas a chorro, características de las mismas y las pruebas a las cuales son sometidas. Entre los puntos más importantes al respecto se encontró que: (1) el empleo de las pistolas recuperables no ocasionan en ningún caso daño o deformación a la tubería de revestimiento, además, no dejan basura en el fondo del pozo; (2) las pistolas semi-desintegrables con cápsula de porcelana al fragmentar se generan partículas parecidas a la arena o grava, evitándose problemas de taponamiento u obturación; (3) la prueba RP-43-API está enfocada a determinar las diferencias de las pistolas existentes en el mercado.

Asimismo, se examinaron los efectos inherentes al accionar la pistola a chorro frente a la tubería de revestimiento sobre la capacidad productiva del pozo. Los resultados más importantes son los siguientes: (1) la productividad del pozo aumenta si se incrementa la penetración; (2) el efecto del claro reduce sustancialmente la penetración del agujero cuando se utilizan pistolas que deben ser corridas a través de la tubería de producción, no obstante, el empleo de la pistola con claro controlado contrarresta este efecto; (3) la compresibilidad de la formación no tiene correlación con la penetración del agujero; (4) si la calidad del disparo disminuye, la capacidad productiva del pozo decrece, es decir, el mayor grado de compactación del material ubicado alrededor de la penetración ocasiona que la capacidad productiva del pozo disminuya; (5) el diámetro de la perforación no influye substancialmente en la capacidad productiva del pozo si la penetración del

agujero es de buena calidad; (6) la calidad del disparo se ve reducida sustancialmente con el empleo de fluidos que contienen sólidos en suspensión, ya que éstos obturan parte de los intersticios de la zona compacta. El daño generado por este tipo de fluidos no es restaurado posteriormente con el empleo de productos químicos (ácidos), sin embargo, este daño puede evitarse con el uso de salmueras con inhibidores y con el empleo de la diferencial de presión hacia el pozo en el momento de llevarse a cabo el disparo.

También se incluye lo referente al daño o a la deformación de la tubería de revestimiento causado por los disparos, ésto es: (a) daño por fisuramiento y, (b) daño por aglobamiento. Entre los resultados más importantes se anotan: (1) el daño generado a la tubería de revestimiento es producido solamente por el empleo de las pistolas del tipo desintegrable; (2) a mayor cantidad de carga explosiva contenida por la pistola aumenta el daño por fisuramiento, o bién, se incrementa la deformación o aglobamiento de la tubería de revestimiento; (3) conforme la presión hidrostática aumenta el daño o deformación de la tubería de revestimiento disminuye aunque este efecto no es substancial; (4) si la tubería de revestimiento no está bien cementada el daño o deformación de la misma se incrementa.

Otro punto importante señalado por este trabajo es el empleo de las pistolas de bala, las cuales penetran más profundamente que las pistolas a chorro en formaciones de baja compresibilidad, además de que el daño generado presenta uniformidad y no les afecta el claro.

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

1. El uso del forro a base de productos pulverizados es determinante para la penetración del agujero, asimismo, reduce sustancialmente el efecto negativo de la posta.
2. Cuando el pozo tiene instalada solamente la tubería de revestimiento, el uso de pistolas de gran diámetro proporcionan agujeros de mayor penetración y diámetro. Sin embargo, en caso de que el aparejo de producción se tenga instalado, el empleo de la pistola con efecto del claro controlado da lugar a disparos mucho más profundos, que si se dispara con pistola que no presente el efecto del claro controlado.
3. El diámetro de la perforación no influye demasiado si la penetración del agujero es de buena calidad.
4. La calidad del agujero es mucho más importante que la profundidad del mismo o que la densidad de disparo.
5. El disparo debe horadar más allá de la zona de daño de la formación.
6. El efecto de la compresibilidad de la formación no tiene correlación con la penetración del agujero.
7. Las pistolas de bala penetran mucho más profundamente que las pistolas a chorro solamente en formaciones de baja compresibilidad. El daño que



genera la pistola de bala alrededor de la penetración es uniforme, además, de que no le afecta el claro.

8. La prueba presentada en la Práctica Recomendada No. 43 del A.P.I., está enfocada a determinar las diferencias de las pistolas existentes en el mercado. Cualquier compañía que se dedique a la fabricación de las pistolas a chorro, puede reportar los mejores resultados obtenidos de una serie grande de pruebas RP-43-API, de tal manera, que éstos no sean representativos del promedio.
9. El empleo de pistolas semi-desintegrables con cápsula de porcelana, se recomienda en vez del uso de las pistolas desintegrables.
10. El daño o la deformación causada a la tubería de revestimiento es a consecuencia del empleo de las pistolas del tipo desintegrable, éste aumenta cuando la tubería no está bien apoyada (cementada). La cantidad de carga explosiva contenida por la pistola es el responsable directo del grado de fisuramiento o aglobamiento que pueda sufrir la tubería de revestimiento.
11. Las pistolas recuperables no ocasionan en ningún caso daño o deformación a la tubería de revestimiento.
12. El uso de los fluidos de control limpios (sin sólidos en suspensión), así como el empleo de la diferencial de presión hacia el pozo ayudan a la limpieza de la zona compacta, es por ello que la productividad del pozo no se ve afectada.

13. El daño generado por el fluido de control que contiene sólidos en suspensión durante la operación de los disparos, no es restaurado posteriormente con la aplicación de operaciones de estimulación. En consecuencia se reduce la productividad del pozo.
14. Si inmediatamente después de efectuarse el disparo se inyecta fluido a la formación, se reduce notablemente la eficiencia de flujo a través del disparo.
15. No todas las perforaciones realizadas durante las operaciones de terminación o reparación están abiertas al flujo de fluidos, solamente algunas de ellas están trabajando.

## R E C O M E N D A C I O N E S .

1. Use preferentemente pistolas con efecto del claro controlado cuando la tubería de producción se encuentra instalada en el pozo. Con lo cual se obtendrán disparos con una penetración considerable. Es lógico que todos los disparos en este caso están alineados en una sola dirección, esto último, es preferible a tener disparos colocados cada 90°, pero con poca penetración.
2. Aún cuando las pistolas de bala están en desuso por el empleo generalizado de las pistolas a chorro, las pistolas de bala deben ser empleadas en pozos someros, ya que la aplicación de éstas en formaciones de baja compresibilidad dan mejores resultados, tanto en la penetración del disparo, como en el daño que generan alrededor de la penetración, además, de que no les afecta el claro.
3. El catálogo que muestra los resultados de la prueba RP-43-API, para las diferentes pistolas a chorro, que es ofrecido por la compañía manufacturera, debe ser tomado con precaución, debido a que los resultados pueden no ser representativos de ellas.
4. En todos los casos que sea posible, utilice pistolas recuperables, principalmente cuando se tenga conocimiento de que la tubería de revestimiento sufre corrosión. Si esto no es posible, emplear pistolas semi-desintegrables con cápsula de porcelana.

5. Use fluidos de control limpios (sin sólidos en suspensión) en operaciones de terminación o reparación, con lo cual se evita que los intersticios de la zona compacta se vean obstruidos por la presencia de sólidos en suspensión, ya que el daño causado por éstos no puede ser restaurado posteriormente con la aplicación de productos químicos (ácidos). Por consiguiente, el empleo de fluidos de control limpios no reduce la capacidad productiva del pozo.

### ASPECTO FUNDAMENTAL DE LA PISTOLA A CHORRO.

El diseño fundamental de la pistola a chorro se muestra esquemáticamente en la figura 1, <sup>1,2</sup>. Generalmente consiste de cinco componentes básicos, éstos son: (a) un forro metálico cónico; (b) un fulminante; (c) una carga explosiva; (d) un contenedor y (e) un cordón explosivo. Sin embargo, aunque la construcción es sencilla, la pistola a chorro en su funcionamiento es altamente complicada por la alta velocidad de reacción. Esto es originado por la característica propia del explosivo.

Por lo general el explosivo comunmente utilizado es la ciclonita (RDX), el cual tiene alto grado de detonación. La ciclonita en sus características explosivas es similar a la glicerina, de la cual difiere únicamente en la velocidad de reacción, cabe mencionar que si se rebasa el límite por temperatura de  $149^{\circ}\text{C}$  la ciclonita se sublima dando lugar a disparos errados o fallados, es decir, no detona la carga explosiva.

Realmente, la velocidad de la reacción del explosivo es tan rápida, que el lapso de tiempo de la iniciación a la terminación de la penetración varía solamente de 100 a 300 micro segundos, dependiendo del tipo de pistola empleada.

Para tener una perspectiva sobre la importancia de los elementos que componen la pistola a chorro en su funcionamiento, nos referiremos a la figura 2. Aquí se muestran tres diferentes modelos de pistolas; la primera está completamente obturada de explosivo como se muestra esquemáticamente en la figura 2.A., cuando ésta detona se daña solamente una pequeña porción de la tubería

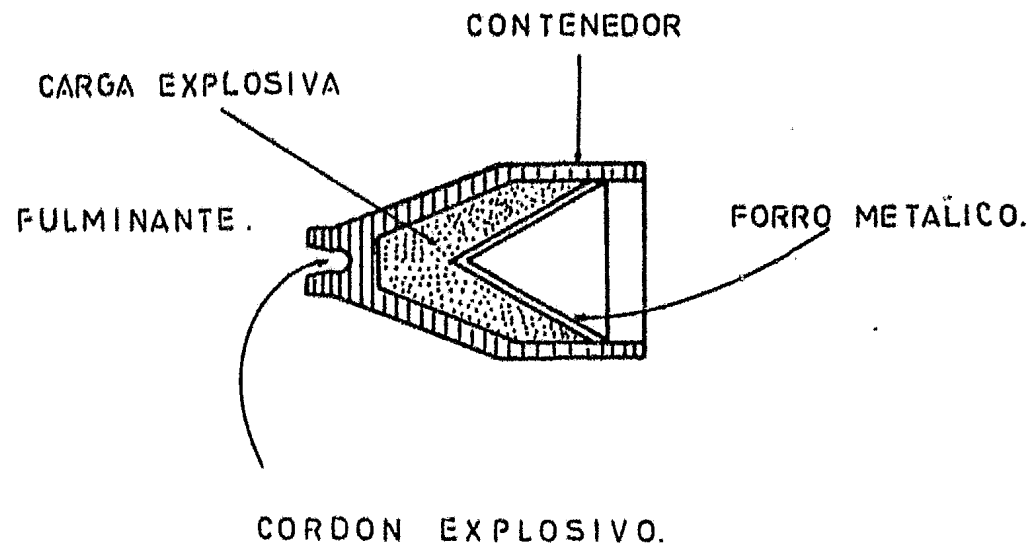


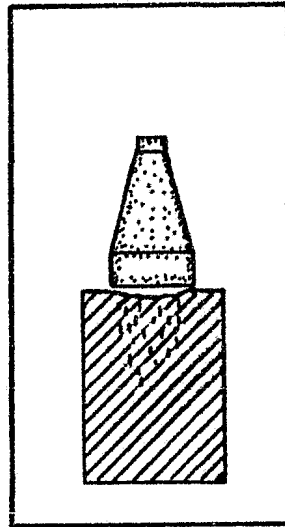
Fig. 1. PISTOLA A CHORRO.

de acero debido a la presión generada por el explosivo. Tomando la misma configuración externa de la pistola anterior, pero configurando una sección cónica (figura 2.B.), la penetración se incrementa en un área aproximadamente igual al área de la base cónica. Ahora, tomando la configuración de la figura 2.B y colocando un forro metálico dentro de la sección cónica, la penetración se incrementa notablemente de cuatro a cinco veces el diámetro de la sección cónica, ver figura 2.C.

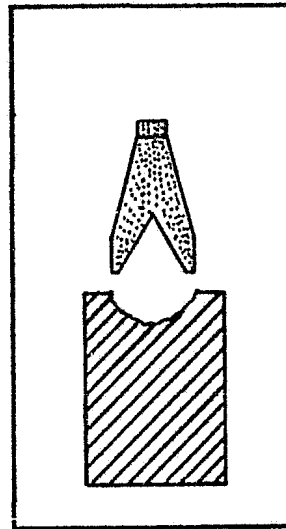
Esto indica que el uso del forro metálico, como parte integrante de la pistola a chorro, es determinante para la penetración del agujero.

Fig. 2. IMPORTANCIA DEL USO DEL FORRO METALICO CONICO COMO PARTE INTEGRANTE LA PISTOLA A CHORRO.

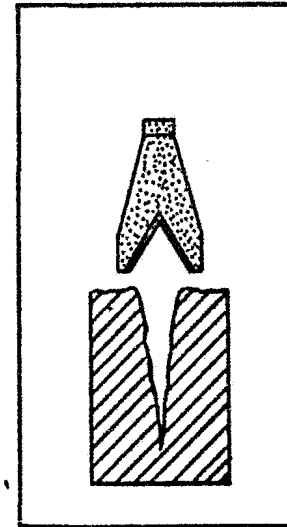
(A)



(B)



(C)





### FUNCIONAMIENTO DE LA PISTOLA A CHORRO.

Una vez que principia la detonación del fulminante, se provoca la explosión de la carga explosiva. La velocidad de la onda creada por la detonación es aproximadamente de 6,096 mt/seg, asimismo, se estima una presión cercana a los 350,000 kg/cm<sup>2</sup>, en la punta del "jet" (\*).

Como se muestra en la figura 3 (b), tales presiones propician que el forro metálico vaya en dirección del eje, éste se funde y da lugar a la reacción "jet" (propulsión a chorro) que sale a lo largo del eje a alta velocidad.

No todo el forro metálico fundido penetra en el agujero, solamente una tercera parte o la mitad de éste; el resto con movimiento más retardado da lugar a lo que llamaremos posta o lingote, el cual no contribuye a mejorar la penetración. La figura 4 muestra mejor el proceso de la formación del "jet", usando para esto un forro metálico de cobre; la porción interior del forro da lugar a la formación del "jet", y la porción exterior del mismo, que está en contacto con la carga explosiva, genera la posta.

Ya que la posta puede seguir al "jet" y ocasionar el taponamiento del agujero, las compañías que ofrecen estos productos han puesto mucha atención en la eliminación de este factor. Como se muestra en la figura 5, recientemente se ha usado un forro bimetálico, el cual tiene un punto de fusión bajo. Este material se volatiliza al iniciarse la detonación por efecto de la temperatura, lo que origina que el efecto de la posta disminuya considerablemente.

---

(\*) "Jet"; chorro que sale a presión del contenedor:

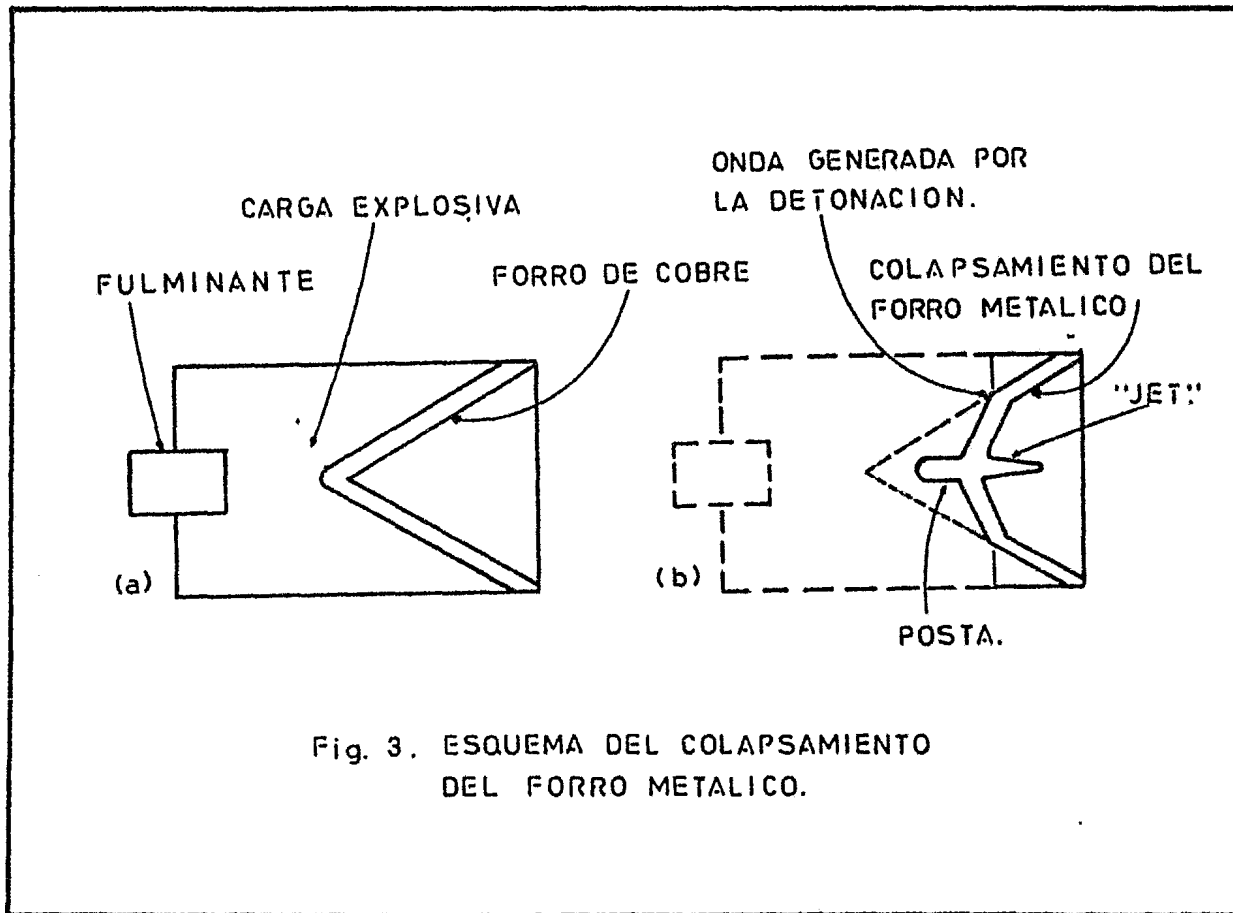


Fig. 3. ESQUEMA DEL COLAPSAMIENTO DEL FORRO METALICO.

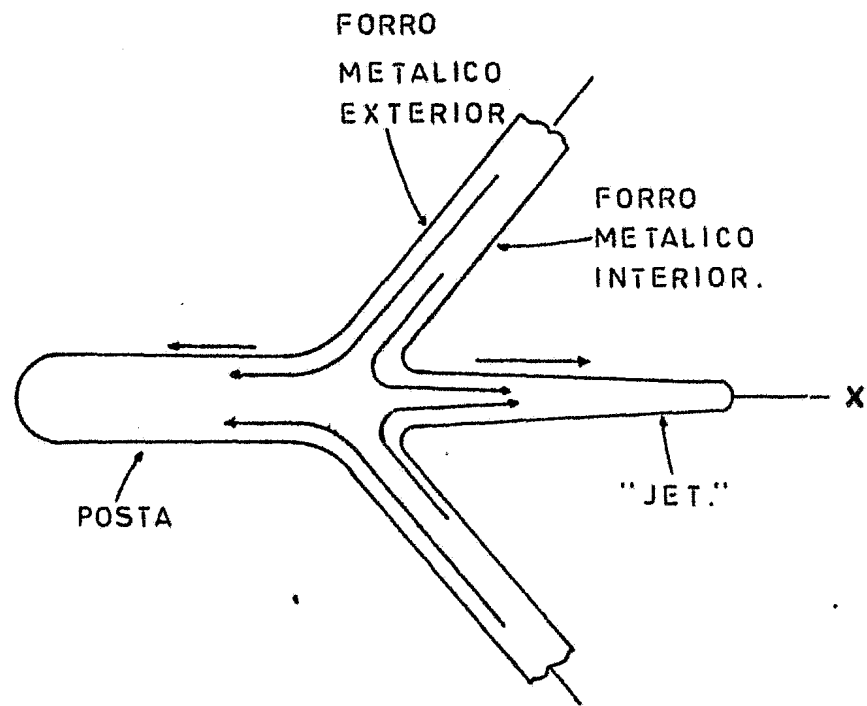


Fig. 4. FORMACION DEL MECANISMO  
DE LA POSTA.

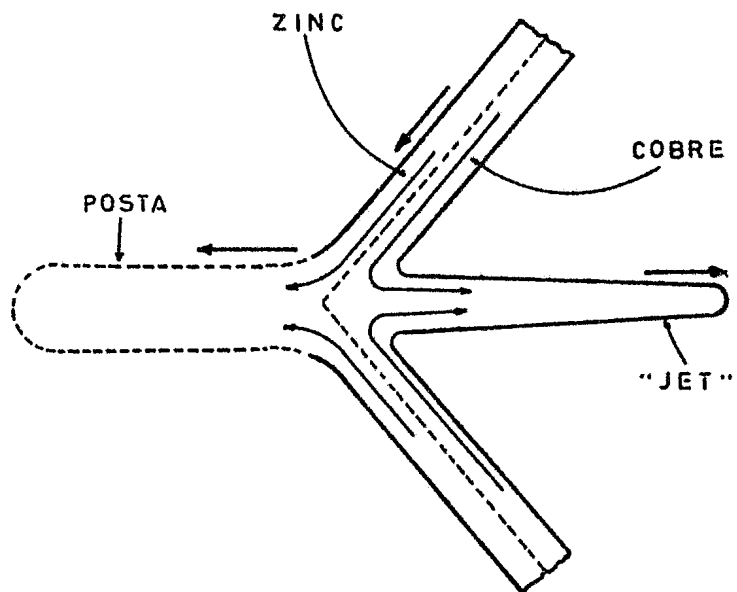


Fig. 5. ELIMINACION DEL PROCESO DE LA POSTA  
EN BASE A TENER UN FORRO EXTERIOR  
VOLATIL.

El forro más reciente está hecho a base de productos pulverizados, los cuales han reducido sustancialmente la posta.

### MECANISMO DE LA PENETRACION DEL "JET".

La penetración causada por el "jet" es debida a la presión que éste ejerce - sobre el material que sirve de blanco. Tal presión ha sido estimada en 350,000 kg/cm<sup>2</sup>. Bajo tal presión la T. R., el cemento y el material de la formación simplemente fluyen plástica y radialmente alejándose del punto afectado por el "jet".

La porción delantera del "jet" es la que produce la entrada del agujero en la T. R., la cual proviene de la parte central del forro, por lo que la parte final de la terminación del agujero procede de la parte del forro que está en contacto con la carga explosiva, véase figura 4.

En otras palabras, una vez que la parte delantera del "jet" golpea en el blanco y genera la penetración correspondiente, la pequeña porción que le sigue a la anterior golpea el agujero e incrementa la penetración de éste y así sucesivamente hasta que se termina la carga explosiva.

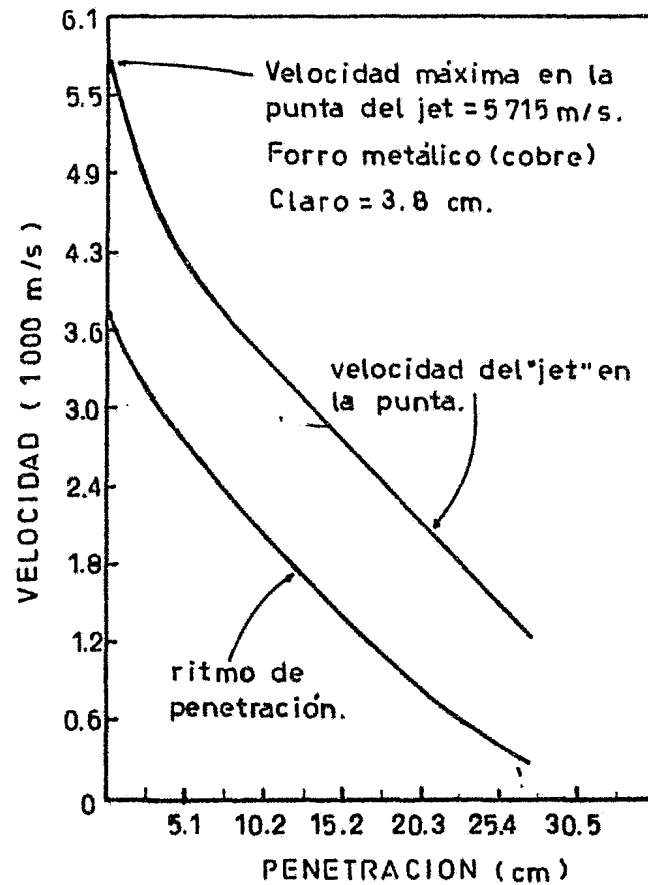
Como la velocidad a lo largo del "jet" varía, el ritmo de la penetración debe ser estimado en correspondencia con la velocidad del "jet". La figura 6, indica el ritmo de penetración vs. penetración, usando como blanco una arenisca berea y pistola "jet" de 3 3/8". Nótese, que el ritmo de penetración decrece al momento de horadar el agujero. Asimismo, se muestra la velocidad en la punta del "jet" vs. penetración.

La temperatura generada por la carga explosiva juega un papel insignificante en el proceso de la penetración. Se ha demostrado que se puede perforar un -

Fig. 6. RELACION DE VELOCIDADES.

BLANCO:  
ARENISCA BEREA.

PISTOLA:  
3 - 3/8" D.N.



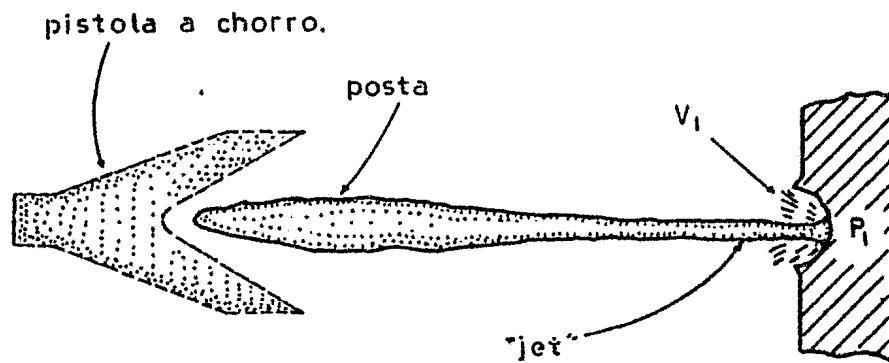
apilamiento de directorios telefónicos sin que se quemara una sola de sus hojas<sup>3</sup>. De aquí se infiere que el material de la formación no se funde al momento de la horadación. Sin embargo, debe tomarse en cuenta la resistencia de la roca.

En consecuencia, como se mencionó anteriormente, la velocidad del "jet" es aproximadamente de 6,096 m/seg. Sin embargo, este dato se aplica solamente para el extremo de la primera porción del "jet", como se indica en la figura 7. Cada porción del "jet" viaja a menor velocidad. Este gradiente de velocidad resulta por el alargamiento del "jet" y, es el responsable de la penetración que se obtiene.

Observe que la posta viaja a lo largo y por detrás del "jet" y que incrementa la penetración, sin embargo, puede llegar a taponarla<sup>4,5</sup>.



Fig. 7. REPRESENTACION DEL "JET".



- PRESION SOBRE EL BLANCO -  $P_1 \doteq 0,35 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$
- VELOCIDAD EN LA PARTE FRONTAL DEL "JET" :  $V_1 \doteq 6,096 \text{ m/s}$ .

### FACTORES QUE AFECTAN LA PENETRACION Y LA MEDIDA DEL AGUJERO.

Muchos parámetros de diseño gobiernan el buen funcionamiento de la pistola a chorro. En la figura 8 se muestran los parámetros de diseño que afectan el desempeño de la pistola, éstos son: (a) ángulo; (b) distribución de la carga explosiva; (c) espesores y (d) distancias. En sí nos referimos a la geometría de diseño de la pistola a chorro.

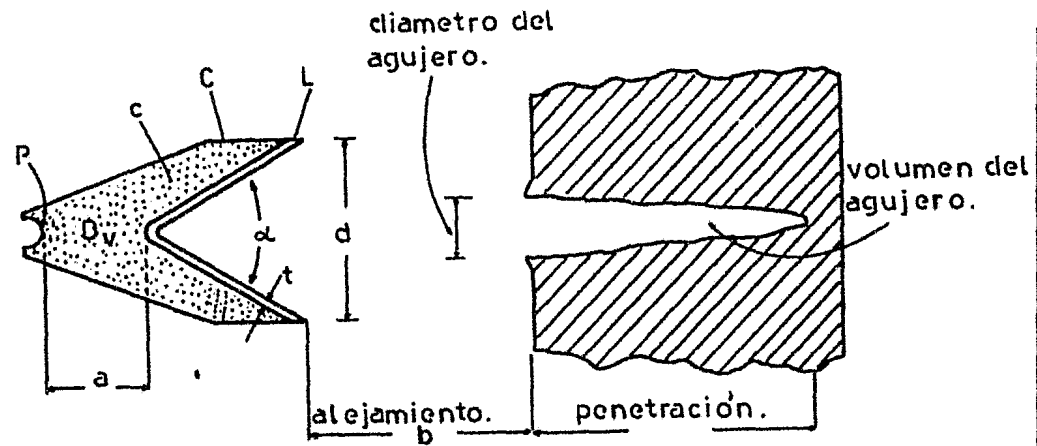
La geometría de diseño de la pistola a chorro es más importante que una gran cantidad de carga explosiva contenida en la misma.

Es interesante notar que sólo se aprovecha un 20% de la energía disipada, aunque se ha procurado tener una eficiencia más alta al respecto, así como mantener una eficiencia promedio de todas las pistolas que existen en el mercado.

La figura 9 muestra los datos de la penetración así como el diámetro del agujero vs. cantidad de carga explosiva, los datos fueron obtenidos a partir de un análisis de un grupo de pistolas comerciales. El blanco fué una combinación de acero/arenisca-berea, que es identificado como blanco RP-43-API, sección II. Nótese que la profundidad del agujero así como el diámetro del mismo se incrementan al aumentar la carga explosiva. Contrariamente a esto, se señaló que la distribución de la carga explosiva es más importante que una gran cantidad de explosivo alojado en el interior de la pistola. Sin embargo, los datos son sólo representativos para comprender tal efecto.

Si los datos anteriores se combinan tomando en consideración el diámetro de

Fig. 8. PARAMETROS QUE AFECTAN EL DESARROLLO DE LAS PISTOLAS JET.



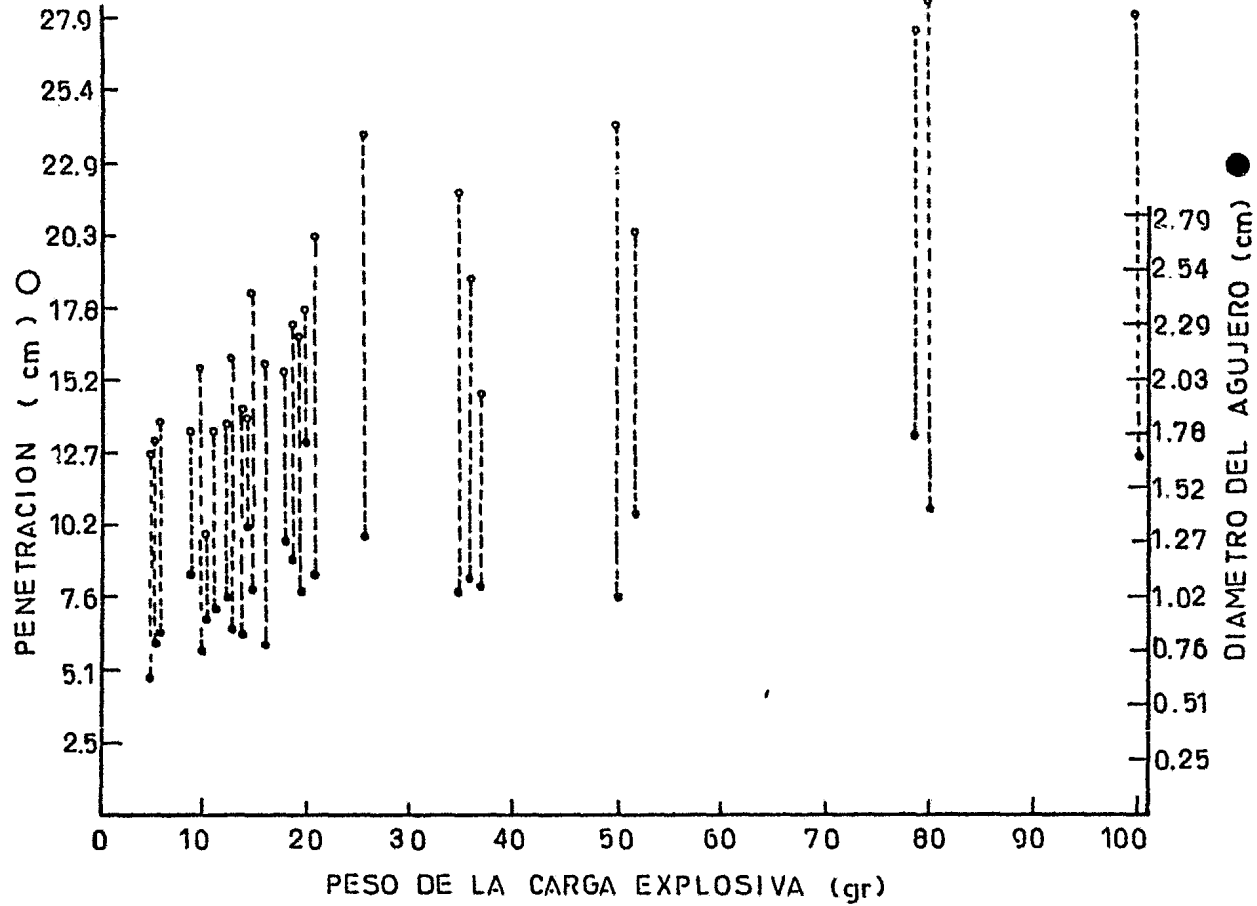
- para incrementar:

penetración -se reduce  $\alpha$ , -incrementese b, a, d, t, C, D<sub>v</sub>.

diametro del agujero - se incrementa  $\alpha, d$ , -reducace b, t, D<sub>v</sub>.

volumen del agujero - se incrementa d, t, -reduzca b.

Fig. 9. Efecto del peso de la carga explosiva en relación con la penetración y diámetro del agujero.



La pistola (ver figura 10) se observa que los parámetros de interés se incrementan debido a que el contenedor es más grande y que puede alojar una cantidad más grande de carga explosiva. Es importante notar que algunas pistolas con menos carga explosiva perforan más que otras que contienen mayor carga explosiva. Por lo que es evidente que una pistola no necesariamente requiere una gran cantidad de carga explosiva.

Uno puede concluir por lo tanto, que en la medida en la cual actúen los componentes de diseño, la pistola presentará características diferentes, aún cuando el aspecto externo y la calidad de producción sean las mismas.

Posteriormente se discutirá la importancia que tiene la carga explosiva en consideración con el daño que se le puede ocasionar a la tubería de revestimiento cuando se utilizan pistolas desintegrables.

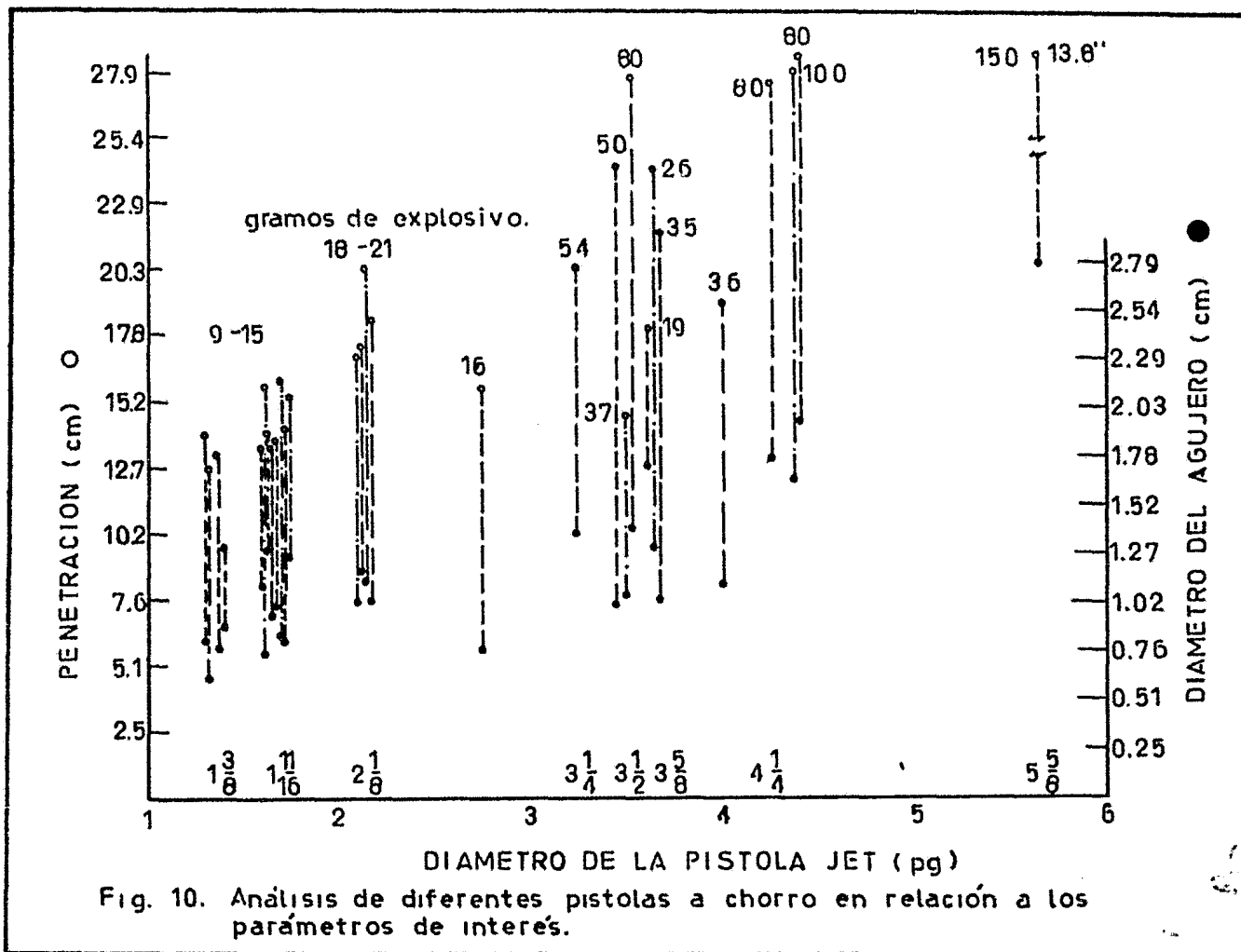


Fig. 10. Análisis de diferentes pistolas a chorro en relación a los parámetros de interés.

### EFFECTO DEL CLARO.

A parte de las consideraciones anteriores se encontró que el efecto del claro reduce la penetración del disparo, así como el diámetro del agujero (ver figura 11), con lo cual se ve afectada la capacidad productiva del pozo. El claro se define como la distancia que existe entre la tubería de revestimiento y la pistola a lo largo del eje del "jet".

La mayoría de las pistolas muestran una variación con respecto al claro, causada por la desviación del pozo, ya que éstas tienden a colocarse en posición excéntrica dentro del mismo. Aunado a esto la mayoría de las pistolas están diseñadas para disparar las cargas explosivas cada 90° (ver figura 12), esto último, debe su razón a que la capacidad productiva del pozo se ve incrementada en un 15% en comparación con la productividad que se obtendría si los disparos estuvieran orientados en una sola dirección, este estudio fué realizado por Harris<sup>7</sup>, quién no consideró el efecto de la zona dañada de la formación.

Para disminuir el efecto del claro se sugiere la centralización de la pistola dentro de la tubería de revestimiento, esto es, emplear pistolas de gran diámetro cuando se tiene instalada solamente la tubería de revestimiento dentro del pozo.

Sin embargo, el problema del claro se agudiza cuando se emplean pistolas de diámetro pequeño que tienen que ser corridas a través de la tubería de producción para perforar posteriormente en tubería de revestimiento, es en éste

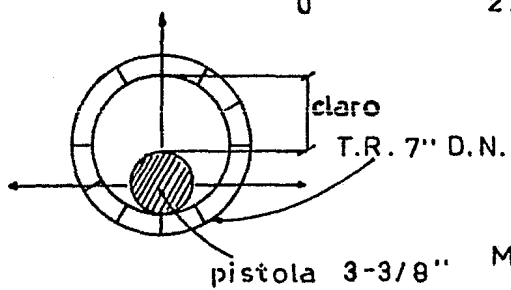
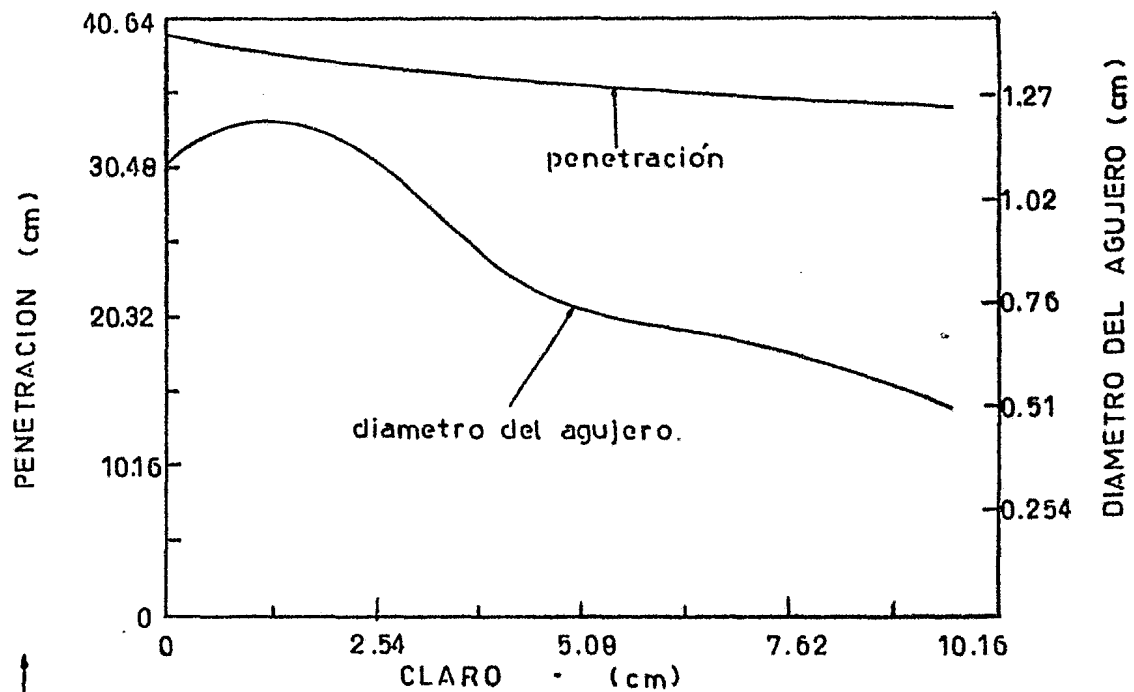


Fig. 11. EFECTO DEL CLARO EN RELACION CON EL DIAMETRO Y LA PENETRACION DEL AGUJERO.



Fig. 12. CONFIGURACION DE LA PISTOLA JET  
MULTILATERAL 90°. 1 $\frac{11}{16}$ " D.N.

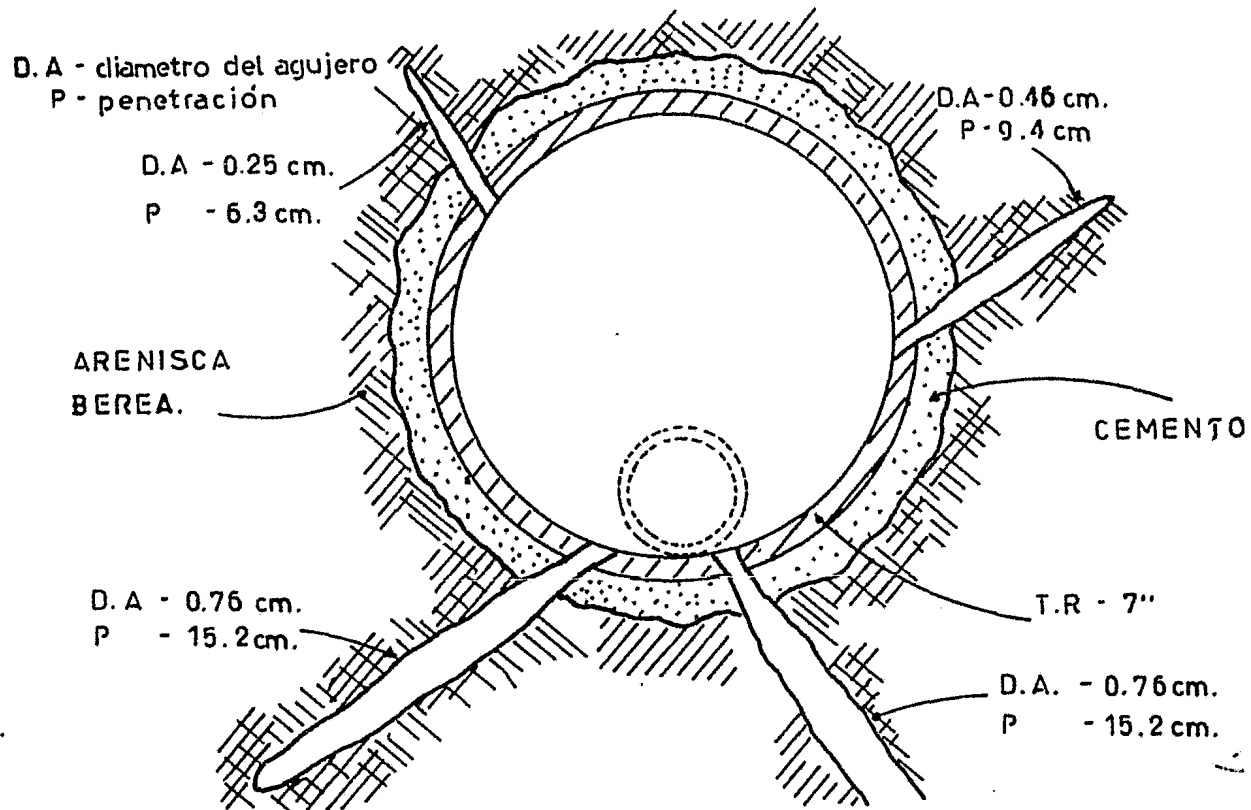
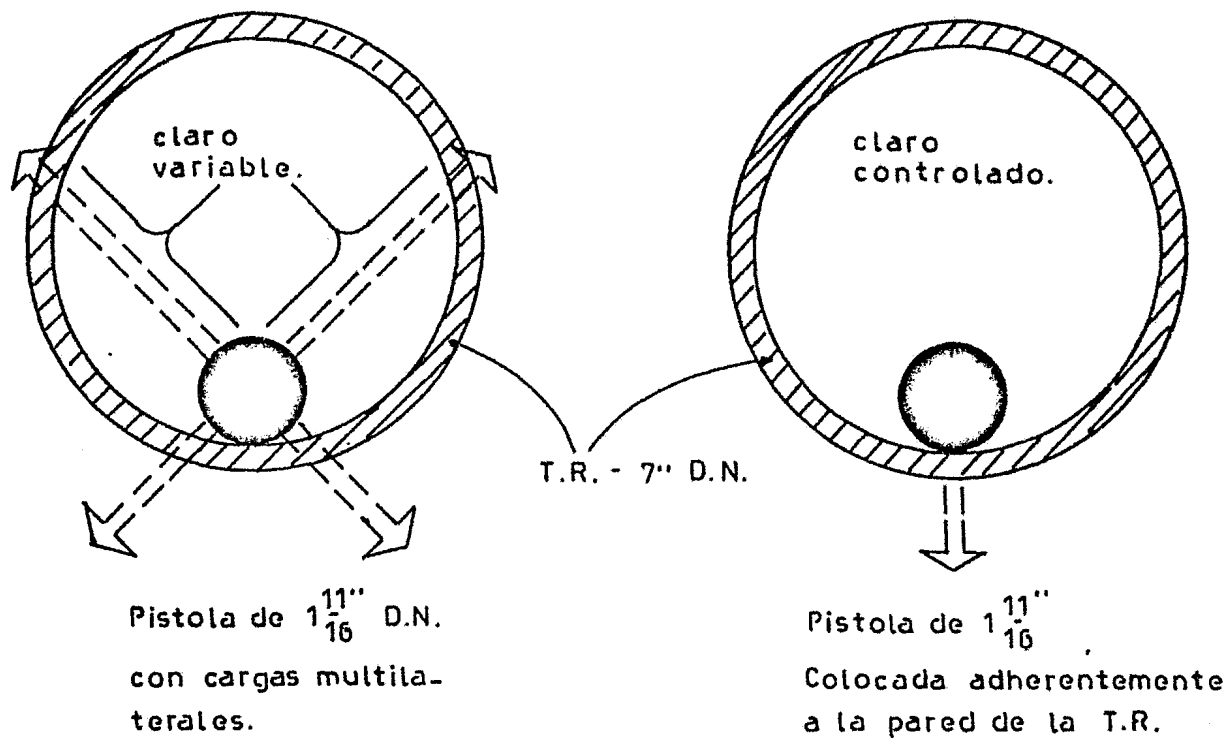


Fig. 13. REPRESENTACION DEL CLARO.



caso cuando la penetración y el diámetro del agujero se ven reducidos sustancialmente, para contrarrestar este problema se recomienda el empleo de la pistola con efecto del claro controlado (ver figura 13).

Refiriéndonos a la figura 13, se observa que todos los disparos están alineados en una sola dirección con lo cual se ve reducida la capacidad productiva del pozo, no obstante, la penetración que se logra con el empleo de la pistola con efecto del claro controlado es la mejor, ésto es preferible a tener disparos colocados cada  $90^\circ$  que presenten una penetración somera. El objetivo de obtener la máxima penetración es debido a que la productividad del pozo se ve incrementada siempre y cuando la penetración sobrepase la zona de daño de la formación.

Se mencionó anteriormente que tanto la penetración así como el diámetro del agujero influyen en la capacidad productiva del pozo. No obstante, Harris<sup>7</sup> determinó que la profundidad del disparo es sustancialmente más importante que el diámetro del agujero. Asimismo, el estudio realizado por Klots, Krueger y Pye<sup>8</sup> demostró que no solo la penetración del agujero afecta la capacidad productiva del pozo, sino también la calidad del disparo, es decir, el daño generado por el disparo reduce la capacidad productiva del pozo.

EFFECTO DE LA COMPRESIBILIDAD Y EL GRADO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO, EN LA PENETRACION DEL AGUJERO.

Se ha supuesto que la compresibilidad de la formación es otro factor que - afecta el desempeño de la pistola a chorro. No obstante, en el estudio realizado por Saucier y Lands<sup>9</sup> se concluyó que el efecto de la compresibilidad de la formación no tiene correlación con la penetración del agujero.

Sin embargo, las pistolas a chorro penetran más profundamente que las pistolas de bala en formaciones que presentan alta compactación o resistencia. Pero en caso que la resistencia de la formación sea baja, la pistola de bala - penetrará más, ver figura 14; por lo que se concluye que las pistolas de bala son eficientes solamente en formaciones muy someras, es decir, que presenten una resistencia a la compresión menor a  $140.65 \text{ kg/cm}^2$ , aproximadamente el 30% de todos los pozos del mundo deberían ser disparados utilizando pistolas de bala<sup>10</sup>. Debemos señalar que el agujero que se provoca con este tipo - de pistola presenta uniformidad, además de que no le afecta el claro. La limitación en uso debería ser por su tamaño.

Finalmente, el grado de la tubería de revestimiento también debe ser considerado. El diámetro de la entrada del agujero en la tubería de revestimiento, se reduce cuando ésta es de mayor grado. Generalmente, se espera tener una - reducción en el diámetro del agujero del 10% en tuberías de revestimiento - que van de la N-80 a la P-110<sup>11</sup>, como se muestra en la figura 15.

Fig. 14. INDICE DEL DESEMPEÑO DE LOS PERFORADORES.

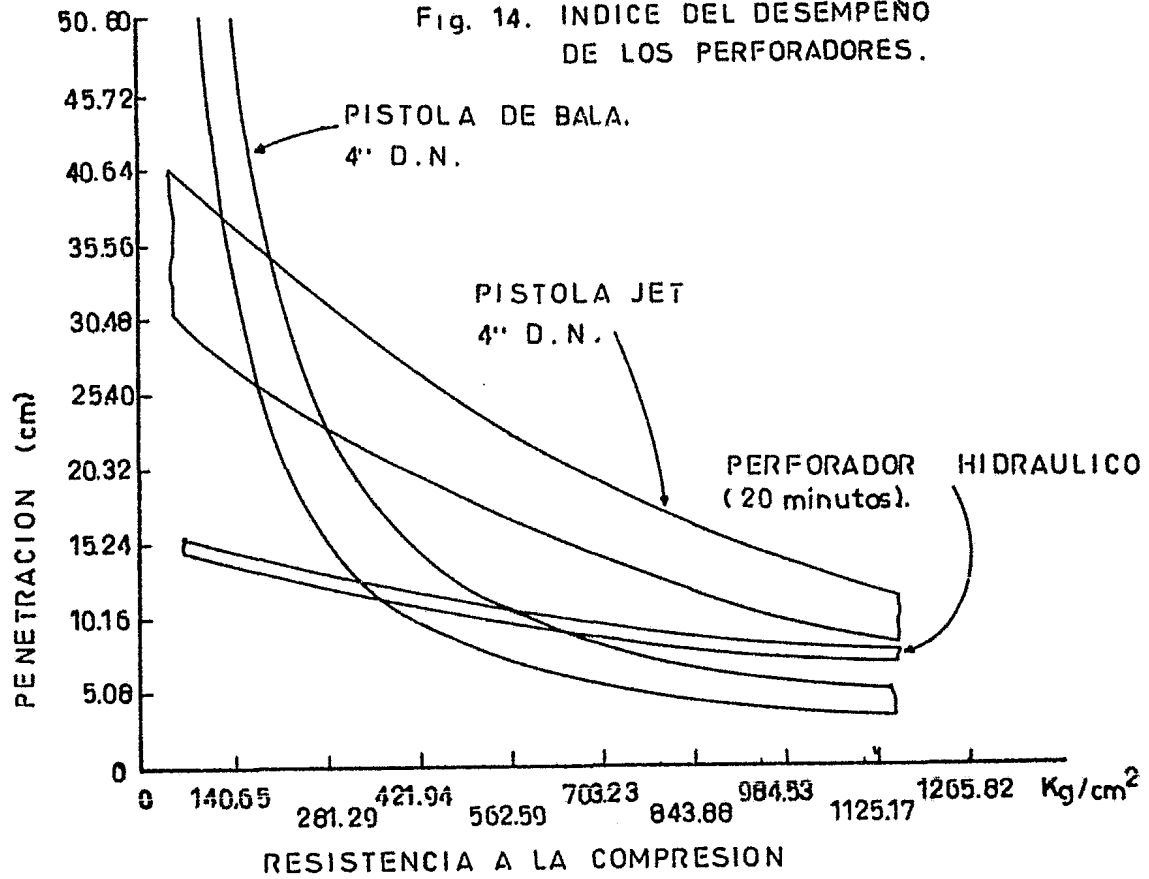
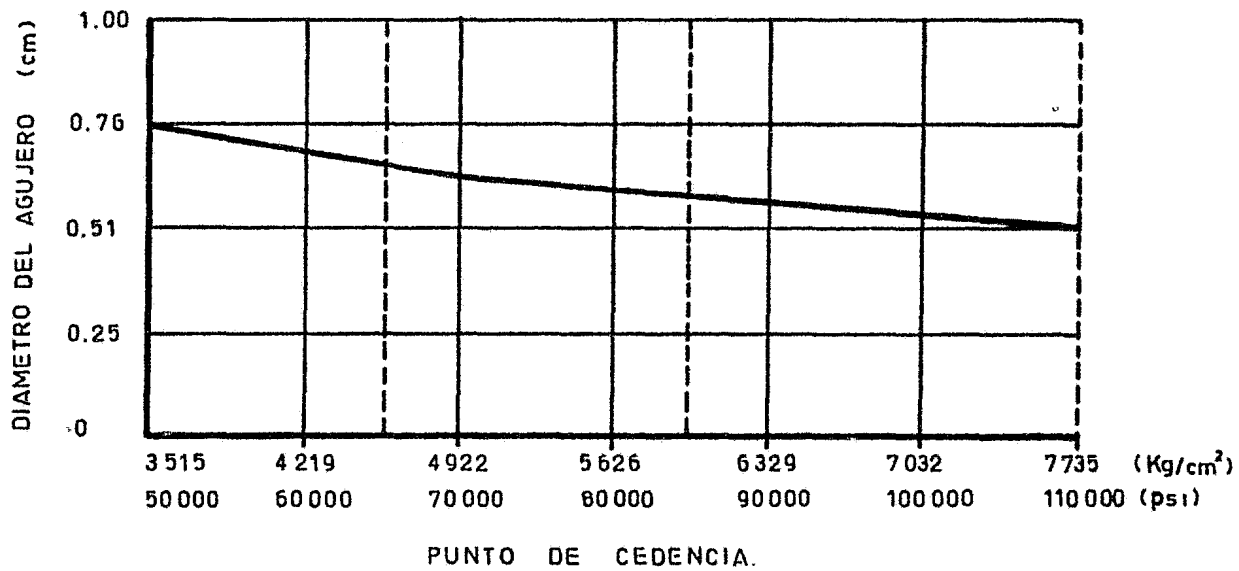


Fig. 15. EFECTO DEL GRADO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO SOBRE EL DIAMETRO DEL AGUJERO.



### PRUEBA RP-43-API.

El procedimiento de dicha prueba es estipulado por el API y es presentado en la Práctica Recomendada, número 43. Esta involucra dos diferentes tipos de pruebas, las que determinan parámetros con respecto a: (a) las propiedades físicas del agujero y, (b) a las propiedades de flujo a través del agujero, las cuales son explicadas a continuación en la sección I y II, respectivamente.

#### Sección I.

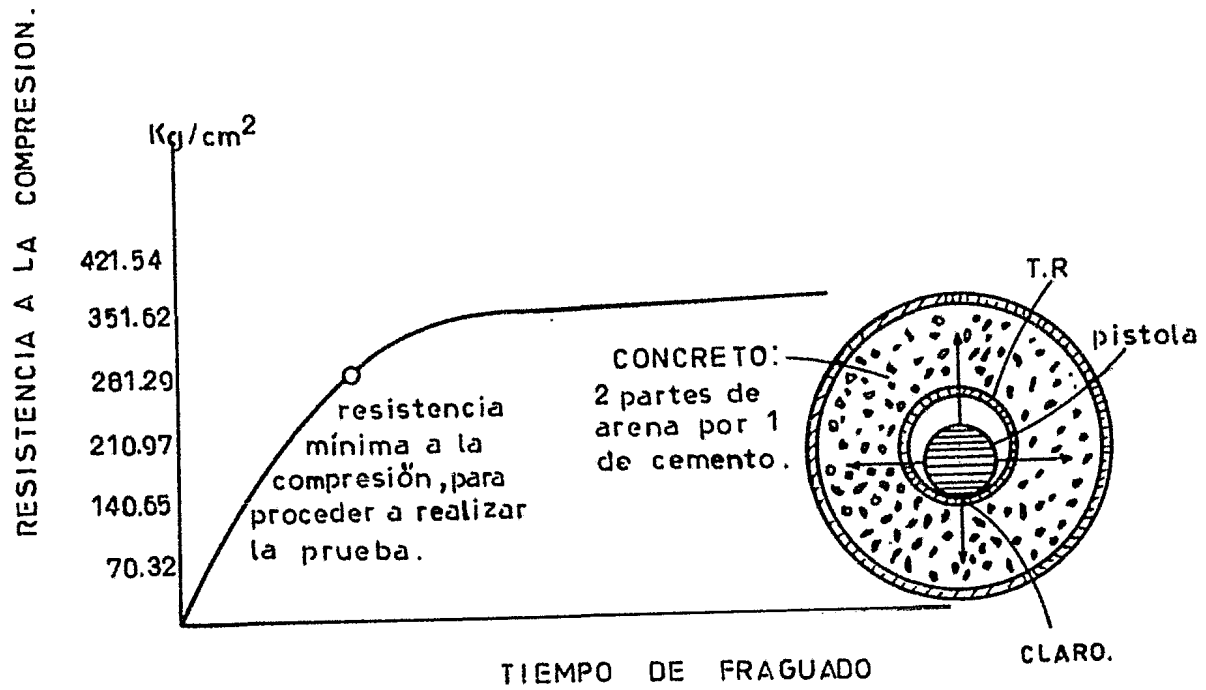
La prueba se desarrolla sobre un blanco de concreto, que recibe el nombre de blanco RP-43-API, sección I. El cual está compuesto por los siguientes elementos: (a) un cilindro de acero; (b) una tubería de revestimiento J-55 y (c) la roca que simula la formación. Esta última está compuesta por: (a) 42.60 kg de cemento clase A-API; (b) 85.30 kg de arenisca berea y (c) 19.30 lts de agua potable, además debe fraguar durante un mínimo de 28 días a una temperatura de 4.4°C, presentar cuando menos 7.62 centímetros de agua arriba de la superficie de éste durante los primeros siete días del fraguado, así como tener una resistencia mínima a la tensión de 281.29 kg/cm<sup>2</sup>, (ver figura 16).

La prueba consiste en disparar seis o más cargas sobre el blanco RP-43-API, sección I. La pistola se coloca en posición excéntrica para tomar en cuenta el efecto del claro. Y los datos obtenidos a partir de esta prueba son los siguientes:

1. Diámetro del agujero.
2. Penetración del agujero.
3. Altura del borde<sup>(+)</sup>

(+) La altura del borde es la máxima protuberancia sobre la superficie original de la tubería de revestimiento.

Fig. 16. BLANCO: RP-43-API. SECCION I.





La prueba RP-43-API siempre se realiza por parte de la compañía manufacturera y, los datos certificados deben ser representativos de los que se espera tener en el campo. Aún así, es importante recordar que la prueba RP-43-API - está enfocada a determinar las diferencias de las pistolas existentes en el mercado<sup>9</sup>. Asimismo, que las condiciones bajo las cuales se realizan las pruebas son muy diferentes a las que se obtienen en el fondo del pozo.

También es importante, notar que la compañía puede reportar los mejores resultados obtenidos en una serie grande de pruebas, de tal manera que éstos - no sean representativos del promedio.

## Sección II.

La segunda parte de la prueba se refiere a la determinación del flujo de fluidos que pasan a través del blanco RP-43-API, sección II, después de que éste ha sido expuesto al disparo. Las especificaciones del núcleo de concreto RP-43-API, sección II, para poder llevar a cabo la prueba son las siguientes:

- (a) presentar una porosidad entre el 17% y el 22%;
- (b) tener una permeabilidad efectiva en el rango de 150 mD a 300 mD;
- (c) debe ser lo suficientemente largo para que el disparo deje al menos una sección de 12.70 centímetros - sin penetrar;
- (d) la fuerza de compresión sobre el núcleo es de 421.54 kg/cm<sup>2</sup>.

La prueba consiste en disparar la pistola sobre el blanco RP-43-API, sección II, los datos del tamaño del núcleo así como de la camisa de acero y de la placa de acero son mostrados en la figura 17. Los datos obtenidos a partir - de esta prueba son los siguientes:

Fig. 17 PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE FLUJO.

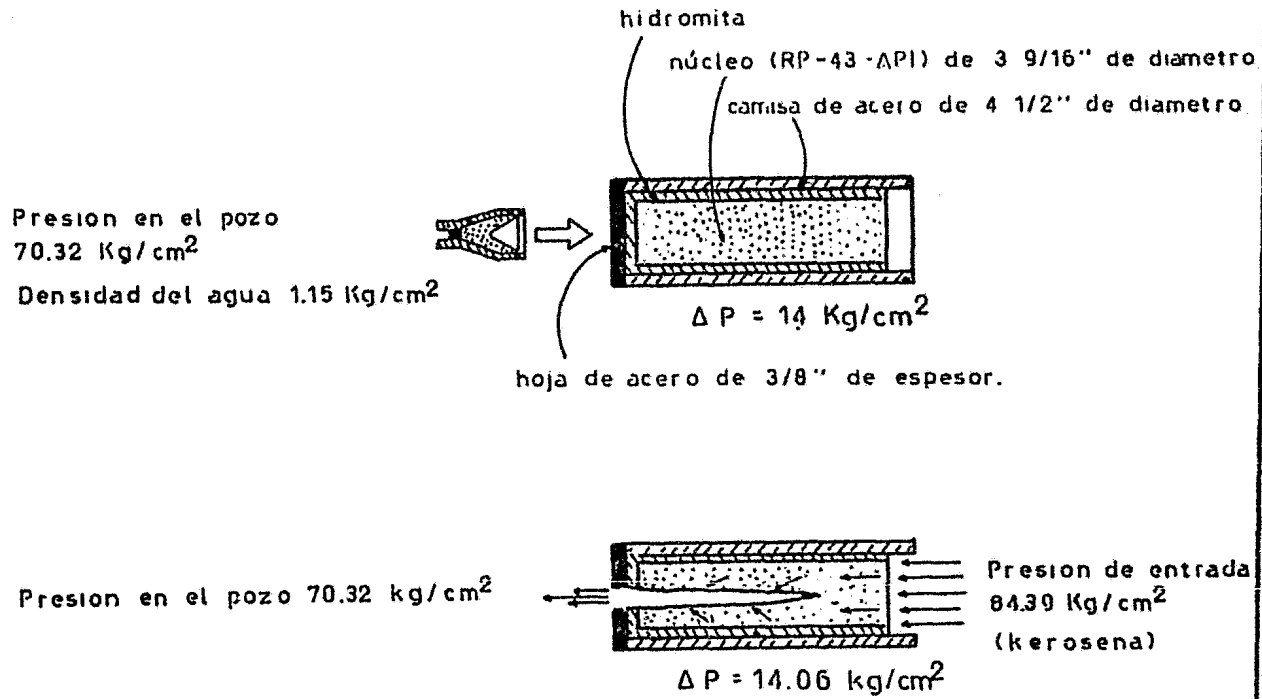


Fig. 16. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DE FLUJO A TRAVES DEL NUCLEO.

a) determinación de la permeabilidad original ( $K_o$ )

$$K_o = (Q_o \mu_o L_o) / (A_o \Delta P_o)$$

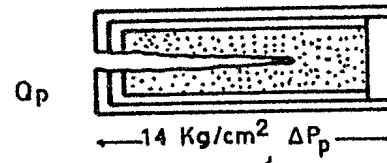
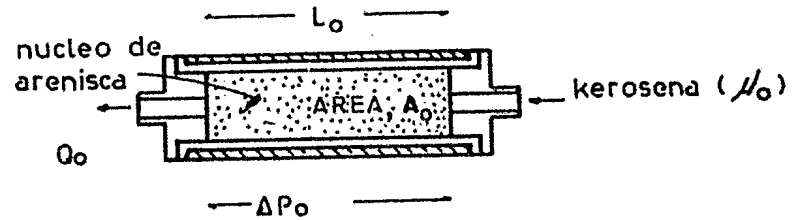
b) cálculo de la permeabilidad efectiva a través de la perforación.

$$K_p = (Q_p \mu_p L_o) / (A_o \Delta P_p)$$

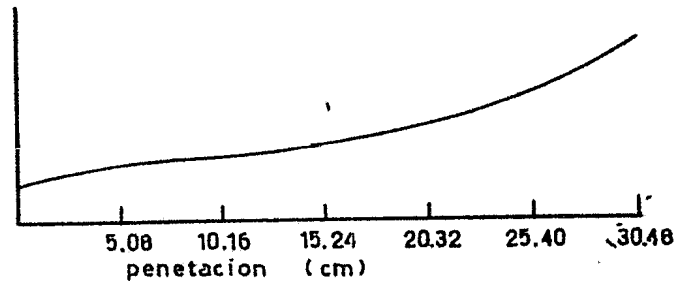
c)  $\zeta_{FE} = (K_p/K_o) / (K_i/K_o)$

$$= K_p / K_i$$

DONDE:  $K_i$  REPRESENTA LA PERMEABILIDAD EFECTIVA QUE EXISTE EN UN BLANCO QUE PRESENTA UN AGUJERO IDEAL DE DIAMETRO Y PENETRACION IGUAL AL DEL DISPARO PERO SIN POSER DAÑO ALGUNO.



$K_i / K_o$



1. Eficiencia de flujo a través del núcleo, (CFE).
2. Diámetro del agujero.
3. Penetración total en el blanco.
4. Penetración total en el núcleo.
5. Penetración efectiva en el núcleo.

La eficiencia de flujo a través del núcleo (CFE) es la relación  $(k_p/k_o)/(k_i/k_o) = k_p/k_i$  (ver figura 18), es decir, es la relación de la permeabilidad efectiva que se tendría en un núcleo ( $k_i$ ) con una perforación ideal de la misma longitud y sin daño.

Nótese, que el valor (CFE) que se determina es para flujo lineal y no tiene relación cuantitativa con las condiciones del fondo del pozo. Por lo que el valor de la eficiencia de flujo a través del núcleo (CFE) es solamente un parámetro de laboratorio.

La penetración total en el blanco; es la distancia desde el exterior de la cara de acero hasta la profundidad máxima de la penetración.

La penetración efectiva en el núcleo, es el producto del valor de la penetración total en el núcleo y la eficiencia de flujo a través del núcleo, la cual nos representa la efectividad de los disparos bajo condiciones de prueba.

### CLASIFICACION DE LAS PISTOLAS A CHORRO.

En general las pistolas a chorro se clasifican en tres grupos:

1. Pistolas recuperables.
2. Pistolas desintegrables.
3. Pistolas semi-desintegrables.

#### Pistolas recuperables.

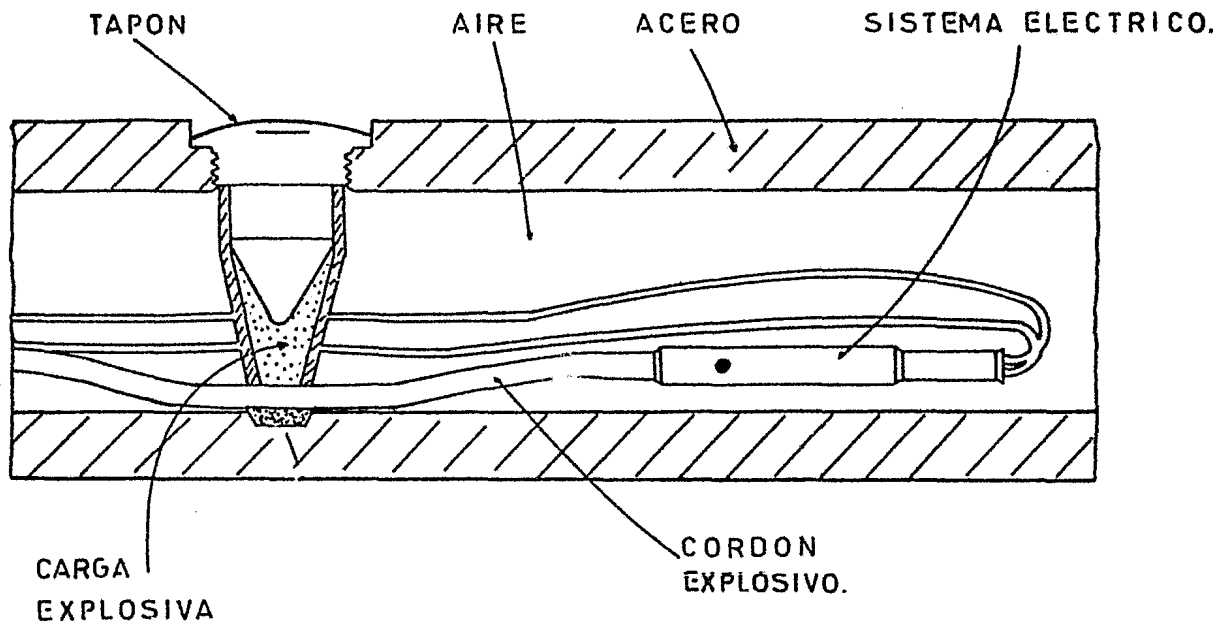
Las pistolas recuperables constan de un tubo de acero hueco (ver figura 19), dentro del cual van colocadas las cargas explosivas. El tubo está sellado - contra la presión hidrostática y, la carga explosiva está circundada de aire a la presión atmosférica.

Cuando la pistola es disparada, la presión causada por la explosión de la - carga explosiva expande ligeramente la pared del tubo y, las partículas que se generan se acumulan dentro del tubo, evitándose que se vayan al fondo del pozo. Estas pistolas generalmente están diseñadas para disparar 13 cargas/me tro; sin embargo, se puede disparar con una menor densidad si así se desea. La limitación en el número de cargas explosivas a disparar en una sola opera ción es de 60.

#### Pistolas desintegrables.

Las pistolas desintegrables constan de una cubierta selladora la cual ha si- do denominada "cápsula", hecha generalmente de algún material frágil (alumi- nio, porcelana), dentro de la cual se coloca la carga explosiva. Cuando la - pistola se dispara, la cápsula se fragmenta y las partículas caen al fondo -

Fig. 19. ESQUEMA DE LA PISTOLA RECUPERABLE.



del pozo. Las especificaciones sobre la densidad de disparo son las mismas - que en el caso anterior, aunque, este tipo de pistolas no tienen limitación en el número de cargas a disparar en una sola operación. Cabe mencionar que es el aluminio el material ideal para la construcción integral de la pistola desintegrable.

Pistolas semi-desintegrables.

Aunque las pistolas semi-desintegrables caen dentro de la clasificación de las pistolas desintegrables han resultado ser mejores en comparación con éstas últimas.

La diferencia en comparación con las pistolas desintegrables estriba en el uso tanto del cable de acero, así como el empleo de la cerámica en la construcción de la pistola. Haremos referencia sobre las ventajas que existen al utilizar pistolas semi-desintegrables posteriormente.

Las pistolas a chorro pueden ser corridas a través de: (a) tuberías de revestimiento y (b) tuberías de producción.

Las pistolas más comunes para ser corridas a través de la tubería de revestimiento son las siguientes:

- (i) Pistola recuperable, de 3 1/8" a 5" de D. N.
- (ii) Pistola desintegrable, de 3 1/8" a 4" de D. N.
- (iii) Pistola semi-desintegrable, de 3 1/8" a 5" de D. N.

Las pistolas de diámetro más grande son utilizadas generalmente cuando se requiere tener el máximo de penetración y cuando las condiciones del pozo lo permiten.

Las pistolas desintegrables, así como las pistolas semi-desintegrables de  $1 \frac{3}{8}$ ",  $1 \frac{11}{16}$ " y la de  $2 \frac{1}{8}$ " pasan a través de un niple de asiento de  $1 \frac{1}{2}$ ",  $1 \frac{25}{32}$ " y  $2 \frac{1}{4}$ " respectivamente. Sin embargo, las pistolas recuperables de  $1 \frac{5}{16}$ ",  $1 \frac{9}{16}$ " y  $2$ " pasan a través de un niple de asiento de  $1 \frac{1}{2}$ ",  $1 \frac{25}{32}$ " y  $2 \frac{1}{4}$ " respectivamente, la reducción en el diámetro de la pistola es utilizada para prevenir operaciones de pesca, es decir, se trata de evitar tener un atoramiento en el niple de asiento al recuperar las pistolas, ya que al detonar la carga explosiva; ésta expande ligeramente el tubo de acero.



### PRINCIPALES CARACTERISTICAS OPERATIVAS.

#### Pistolas recuperables.

1. Alta confiabilidad en el funcionamiento de la pistola, es decir han disminuído los disparos errados.
2. No dejan basura en el fondo del pozo.
3. El tiempo del viaje es mínimo.
4. Resistencia a altas presiones y temperaturas,  $1,758 \text{ kg/cm}^2$  y  $243.3^\circ\text{C}$ , - respectivamente.
5. Resistencia a los agentes químicos.

La principal desventaja de las pistolas recuperables es la rigidez y/o peso lo cual limita su uso. Es por esto que cuando se tiene desviado el pozo y, - se tenga instalado el aparejo productor deberá bajarse al pozo una pistola - semi-desintegrable.

#### Pistolas desintegrables.

1. Los componentes de la pistola (cable eléctrico, cápsula), están en contacto con el fluido de control, lo cual reduce la confiabilidad del buen funcionamiento de la pistola.
2. Gran flexibilidad y facilidad de introducir al pozo pistolas de gran extensión.
3. Los rangos de presión y temperatura son menores en comparación con los de

Las pistolas recuperables. Soportan presiones y temperaturas de 1,055 kg/cm<sup>2</sup> y 93°C, respectivamente.

4. Las cápsulas de aluminio tienden a desgastarse debido a la fricción que se ocasiona al ser corrida la pistola a través de la tubería.

El principal problema de este tipo de pistolas es la irrupción de la presión hidrostática al interior de la cápsula, en segundo término están los disparos errados o fallados.

Pistolas semi-desintegrables.

Aunque este tipo de pistolas cae dentro de la clasificación de las pistolas desintegrables, han resultado ser mejores en comparación con éstas últimas, esto es:

1. Se recupera la gran extensión del cable de acero, que sustituye a la gran extensión de juntas o uniones de aluminio, disminuyendo así la basura o residuos.
2. Comparando el listón de acero con el cable de acero, que sirve como transportador de las cargas explosivas; el listón de acero ha resultado ser más confiable en operaciones por dentro de la tubería de revestimiento. Pero el empleo de éste ha resultado impráctico cuando se tiene que correr la pistola a través de la tubería de producción, debido a que la tira se expande y por consiguiente se presentan problemas de pesca. Por esto mismo, la pistola del tipo desintegrable con cable de acero es la más generalizada.

3. Las cápsulas de porcelana al fragmentarse generan partículas parecidas a la arena o grava, evitándose problemas de taponamiento u obturación. Además, de que este tipo de cápsula ofrece gran resistencia al desgaste, a las altas presiones así como a los agentes químicos.

La pistola semi-desintegrable (de aluminio) está generalmente limitada para pozos someros, para mayores profundidades se utilizan cápsulas de porcelana por su mayor resistencia. Asimismo, estas cápsulas no presentan el problema de irrupción del fluido al interior de la cápsula.

Como regla general, pistolas del tipo desintegrable, presentan componentes más grandes (forro metálico, contenedor, etc.). Por lo que algunas veces ofrecerán mayor capacidad de penetración en comparación con las pistolas recuperables de diámetro pequeño (1 5/16", 1 9/16" y 2"), la diferencia varía del 10 al 25%.

### DAÑO Y DEFORMACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.

Como se mencionó anteriormente, la presión que se genera al disparar una pistola a.chofro es aproximadamente de  $350,000 \text{ kg/cm}^2$ . Sin embargo, tal presión es generada solamente durante un período de tiempo muy pequeño. Por lo que la deformación o daño de la tubería de revestimiento depende de las condiciones del pozo, así como del tipo de pistola empleada.

El daño o deformación de la tubería de revestimiento, es producido solamente por pistolas del tipo desintegrable. En ningún caso el daño es producido por pistolas recuperables.

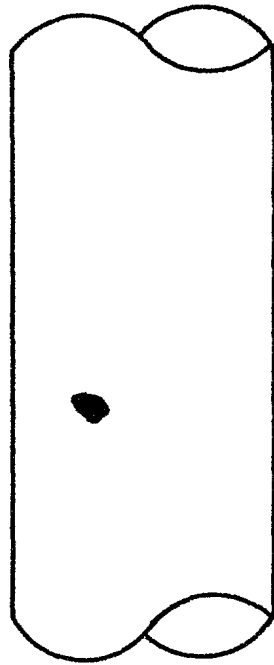
La energía generada por pistolas del tipo desintegrable es dirigida directamente a la tubería de revestimiento, pero en el caso de las pistolas recuperables parte de la energía es absorbida por el tubo de acero, protegiendo de esta manera la tubería de revestimiento.

El tipo de daño que se presenta en la tubería de revestimiento es por fisuramiento y por aglobamiento, el cual se ilustra en la figura 20 y 21 respectivamente.

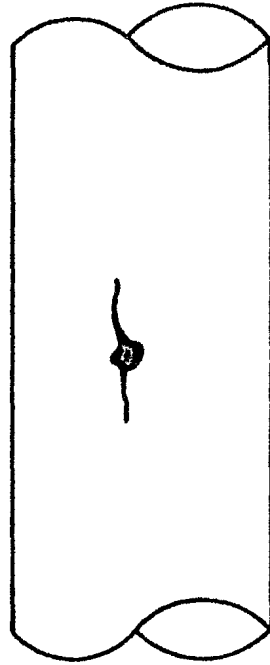
El daño conocido como fisuramiento, se extiende verticalmente arriba y abajo del agujero; presenta efectos adversos cuando se tiene necesidad de hacer operaciones de fracturamiento o estimulación. Sin embargo, la tubería de revestimiento cementada no sufre daño por fisuramiento, solamente está sujeta a la deformación o aglobamiento.

La magnitud de la deformación o aglobamiento depende de:(a) la cantidad de la

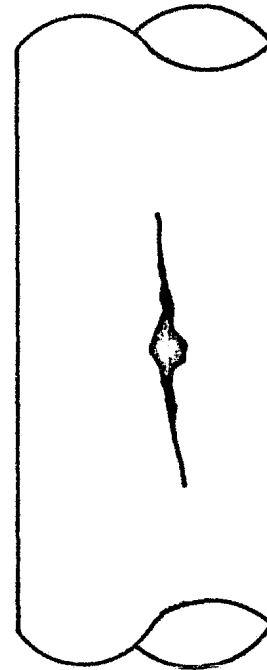
Fig. 20. DAÑO A LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.



la pistola recupera-  
ble no ocasiona da-  
ño a la tuberia de -  
revestimiento.



daño por fisura -  
miento.  
pistola desintegra-  
ble (20.5 gr).



daño por fisuramiento  
(fracturamiento)  
pistola desintegra - -  
ble (32 gr).

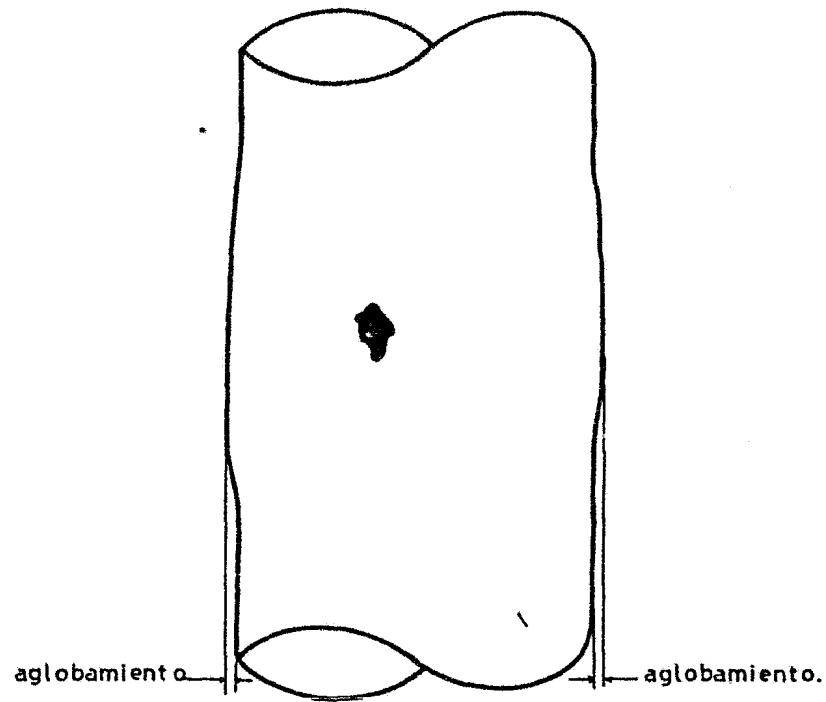


Fig. 21. DEFORMACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.

carga explosiva; (b) el espesor de la tubería de revestimiento; (c) la resistencia de la tubería de revestimiento y, (d) el grado de apoyo de la tubería de revestimiento.

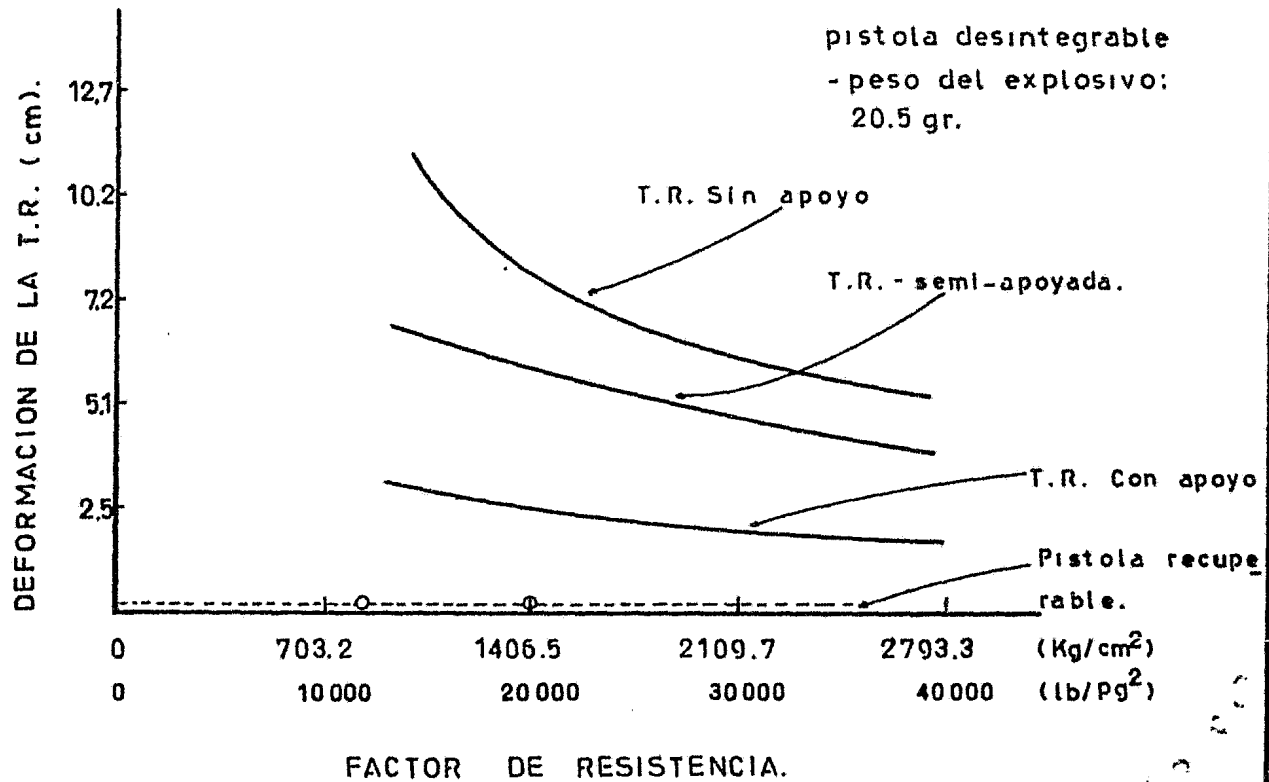
La figura 22 muestra la deformación o aglobamiento de la tubería de revestimiento en función del factor de resistencia, el cual es el producto de la resistencia a la tensión de la tubería de revestimiento y el espesor de la misma.

El grado de apoyo de la tubería de revestimiento se refiere a los siguientes casos;

- (i) Tubería de revestimiento sin apoyo; es decir, la tubería fué introducida simplemente dentro del pozo, teniéndose como fluido de control, agua. La presión hidrostática es la misma dentro y fuera de la tubería.
- (ii) Tubería de revestimiento semi-apoyada; se refiere a colocar un anillo de cemento detrás de la tubería, el cual soporta una presión de  $246 \text{ kg/cm}^2$ , tiene un espesor de 1.9 cms y, a su vez está contenido dentro de un delgado cilindro metálico.
- (iii) Tubería de revestimiento con apoyo; es lo mismo que en el caso anterior, excepto, que el cilindro es más grueso.

Refiriéndonos a la figura 22, note la influencia tan significativa que presenta el apoyo detrás de la tubería de revestimiento. Asimismo que las tuberías de revestimiento de menor grado están sujetas a una deformación o aglobamiento mayor. Observe además de esto, que las pistolas del tipo desintegrable - causan una deformación aproximada de 2.54 cms cuando la tubería está bien - apoyada o sustentada.

Fig. 22. DEFORMACION DE LA T.R. VS. FACTOR DE RESISTENCIA

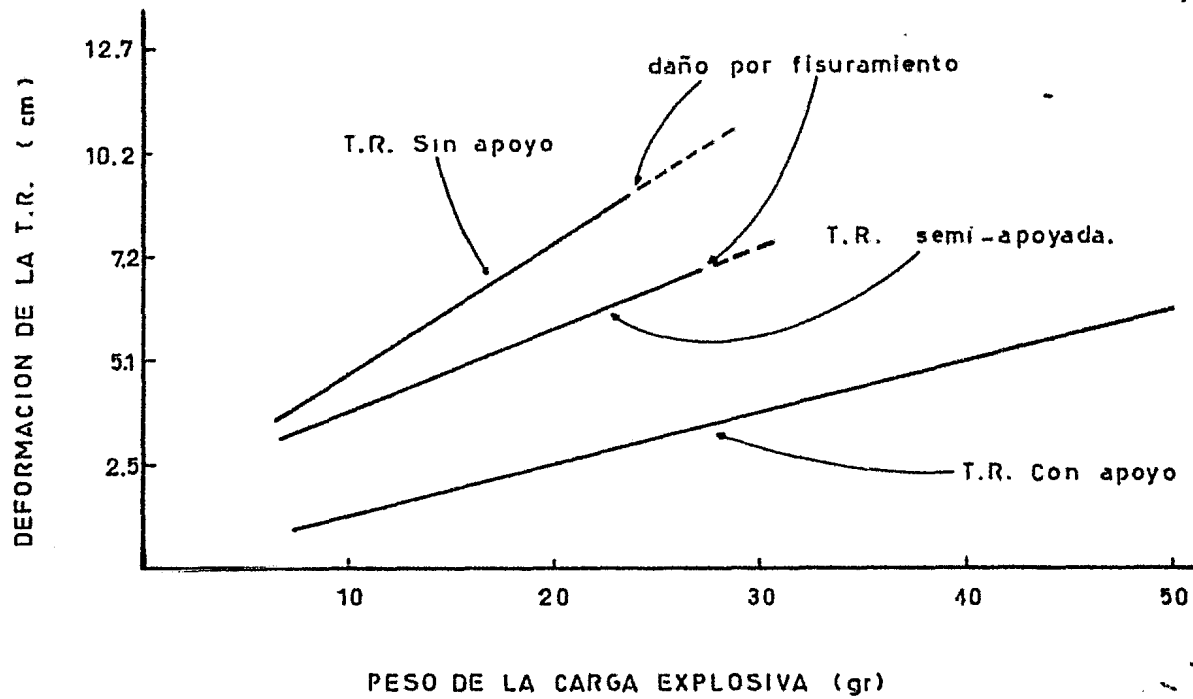




Nótese que una pistola recuperable de 4" de diámetro y que contiene aproximadamente el mismo contenido de carga explosiva, no produce deformación sobre la tubería de revestimiento.

La cantidad de carga explosiva que contienen las pistolas del tipo desintegrable, es un factor que debe tomarse en consideración. Nótese en la figura 23, que el incremento de la carga explosiva dá lugar a que se presente ruptura o fisuramiento, tanto en tuberías de revestimiento sin apoyo como en semiapoyadas. El peso necesario de la carga explosiva para que se genere daño por fisuramiento en una tubería sin apoyo o semi-apoyada es de 25 ó 28 gramos respectivamente. La tubería que se utilizó en este caso, fué de 5 1/2" de D. N., J-55 y 17 lb/pie.

Fig. 23. DEFORMACION DE LA T.R. vs. PESO DE LA CARGA EXPLOSIVA



EFECTO DE LA PRESION HIDROSTATICA Y DE LA RESISTENCIA DEL CEMENTO EN RELACION CON EL DAÑO O DEFORMACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.

La presión hidrostática tiende a minimizar la deformación o daño, como se muestra en la figura 24. Obsérvese que se obtuvo el daño por fisuramiento a la presión atmosférica, lo cual no es representativo de lo que sucede en el fondo del pozo.

La resistencia del cemento es un factor que presenta un efecto insignificante sobre el daño que se pueda generar en la tubería de revestimiento, como se muestra gráficamente en la figura 25. Para obtener los datos anteriores se utilizó tubería de revestimiento semi-apoyada de 5 1/2" de D.N., la cual se perforó con pistola desintegrable de 2 1/8" de D.N. y cuyo peso de carga explosiva fué de 20.5 gramos.

Sin embargo, el espesor del anillo del cemento detrás de la tubería de revestimiento presenta un efecto significativo. Véase la figura 26. Nótese que a medida que el espesor del cemento aumenta la deformación, se asemeja a la causada en tuberías de revestimiento con apoyo.

La experiencia en las operaciones de campo, ha sugerido lo siguiente.

- (i) Para evitar dañar la tubería de revestimiento, use preferentemente pistolas recuperables.
- (ii) Si por las condiciones del pozo se requiere utilizar pistolas del tipo desintegrable, el peso de la carga explosiva tendrá que ser lo más baja posible, convenientemente como lo requiera la operación.

DEFORMACION DE LA T.R. vs. PRESION HIDROSTATICA.

Fig. 24.

pistola desintegrable: 2 1/8" de D.N.  
peso de la carga explosiva: 20.5 gr.

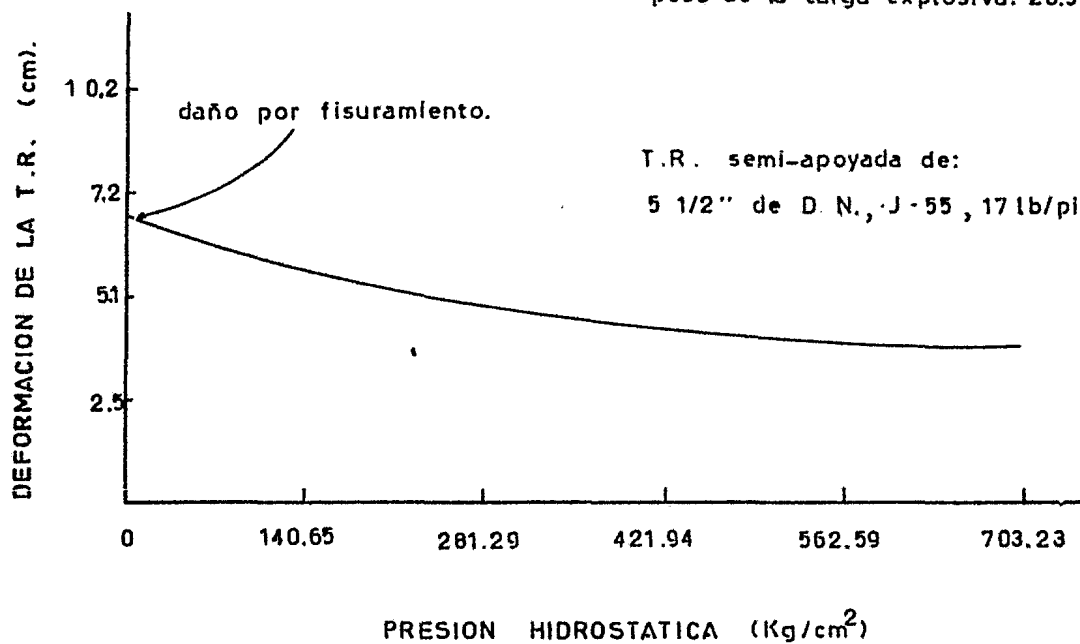


Fig. 25. DEFORMACION DE LA T.R. .vs. RESISTENCIA DEL CEMENTO.

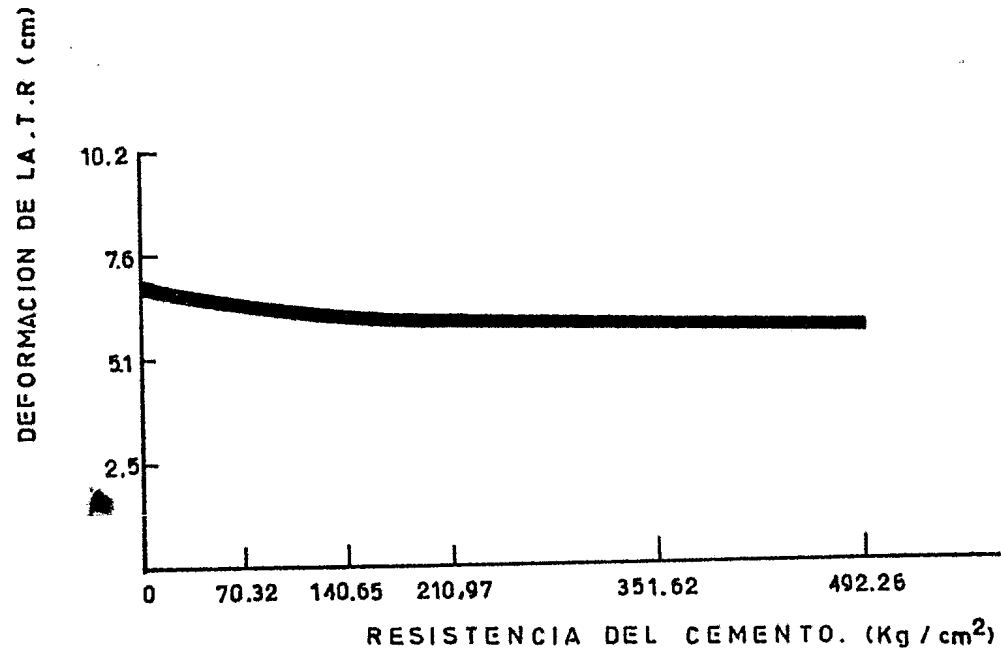
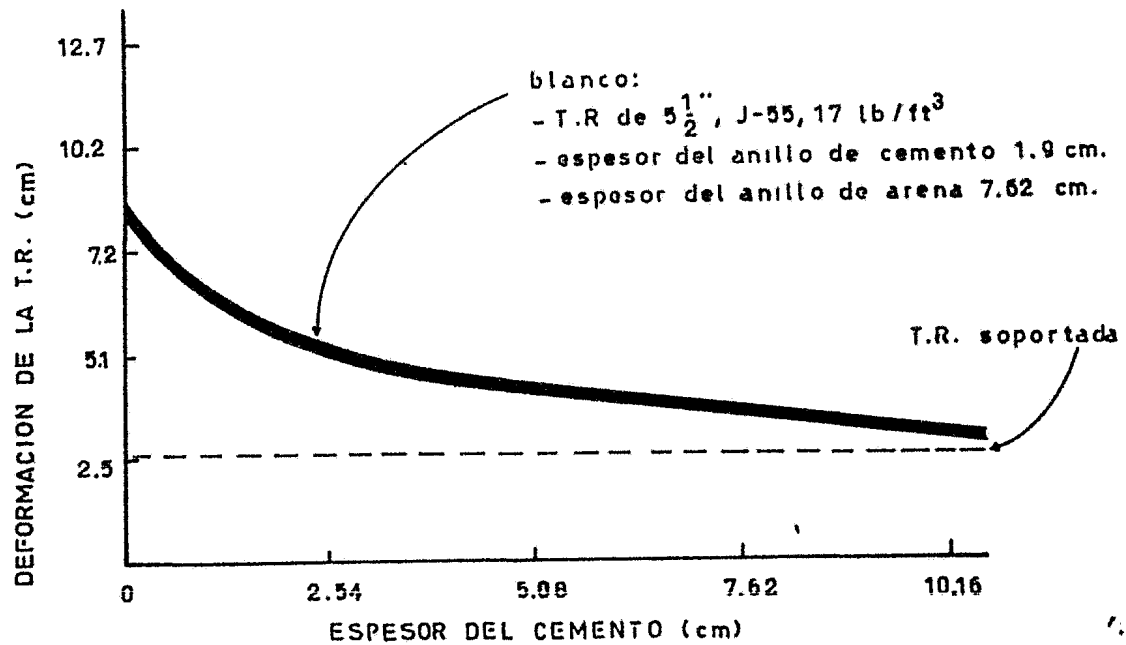


Fig. 26. DEFORMACION DE LA T.R. .vs. ESPESOR DEL CEMENTO.



(iii) Evítese usar pistolas del tipo desintegrable en pozos donde la tubería de revestimiento pueda estar debilitada a causa de la corrosión.

### COMPORTAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE FLUJO A TRAVES DEL NUCLEO, CFE.

La eficiencia de flujo a través del núcleo es tan importante como la misma penetración, diámetro del agujero, efecto del claro y la deformación o daño de la tubería de revestimiento.

Al momento de disparar la pistola a chorro dentro del pozo, el material que actúa como blanco es forzado hacia afuera lateral y radialmente al eje del "jet". Como se mencionó anteriormente, la presión que el "jet" ejerce sobre el blanco es de  $350,000 \text{ kg/cm}^2$  y dura aproximadamente de 100 a 300 microsegundos.

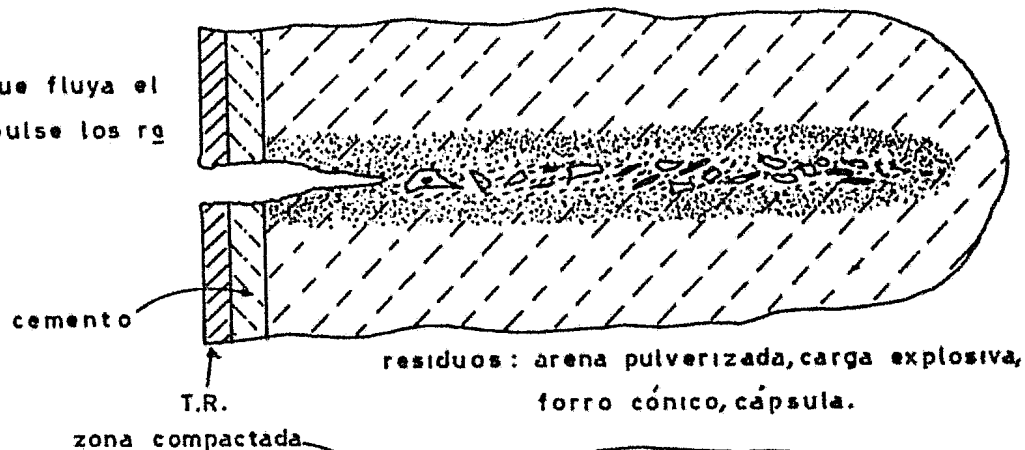
Una vez que la acción del "jet" ha desaparecido, el agujero se encontrará total o parcialmente ocupado por residuos, esto es, las partículas regresan a ocupar su lugar dentro de la penetración, como se muestra en la figura 27 (A). En estas condiciones el agujero es un conductor muy pobre de fluidos. Solamente después de que cierta cantidad de fluido ha estado pasando a través de la penetración y los residuos han sido expulsados, la eficiencia de flujo a través del núcleo se incrementa hasta tomar un valor constante, en estas condiciones se determina que la penetración está completamente "limpia" y se procede a tomar el valor correspondiente a la eficiencia de flujo a través del núcleo (CFE).

Aún así la penetración queda con una zona compacta o dañada, como se muestra en la figura 27 (B), la cual genera una reducción sustancial en la permeabilidad original de la formación. El efecto de la zona compacta es de reducir la eficiencia de flujo a través del núcleo (CFE) en comparación con la - -

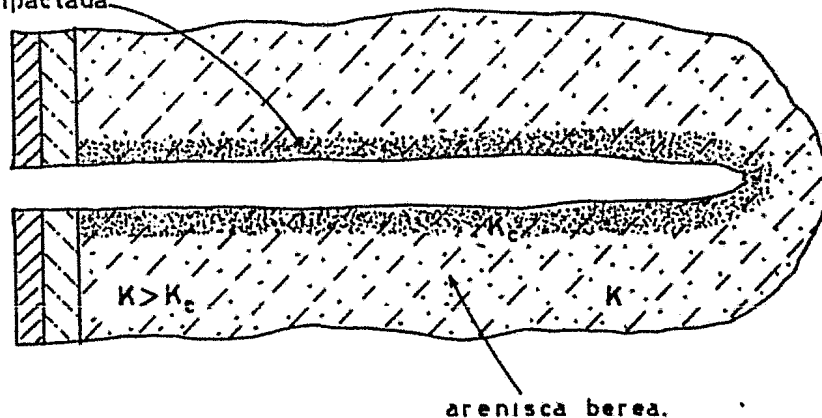


Fig. 27. CARACTERISTICA DE LA PENETRACION.

(A)- antes de que fluya el pozo y expulse los residuos.



(B)- después de que ha fluido el pozo y ha expulsado los residuos.



que aportaría un agujero ideal (sin daño).

Las estimaciones teóricas sugieren que la reducción de la permeabilidad en la zona compacta en relación con la permeabilidad original de la formación es alrededor del 20% <sup>12</sup>.

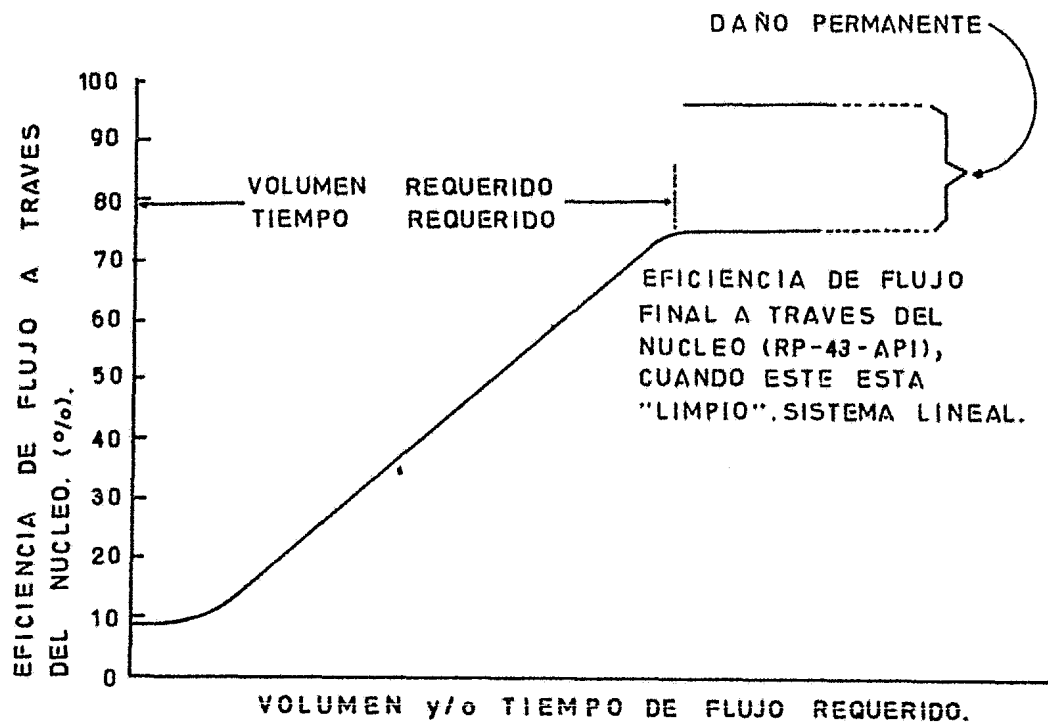
Refiriéndonos a la figura 28, nótese que cuando la penetración del agujero está completamente "limpia" se tiene una eficiencia de flujo a través del núcleo del 75%, en un blanco RP-43-API, bajo una presión diferencial de 14 kg/cm<sup>2</sup>. Obsérvese que la eficiencia de flujo a través del núcleo es muy baja inicialmente. No obstante, la mayoría de los residuos son expulsados casi completamente durante los primeros 500 cc. de flujo, dejando la perforación abierta pero no del todo "limpia". Por lo que el flujo debe continuar el tiempo necesario para alcanzar la estabilización del mismo. Durante este período, la permeabilidad está siendo restaurada en la zona compacta. Es por esto que es necesario el flujo de cierta cantidad de fluido para lograr la restauración máxima de la eficiencia de flujo a través del núcleo (CFE).

Cabe mencionar que la eficiencia de flujo a través del núcleo es mayor en pozos productores de aceite que en pozos productores de gas. Lo cual se debe principalmente a la compresibilidad del fluido, los líquidos debido a su baja compresibilidad expulsan efectivamente los residuos del disparo, una vez que se libera la presión ejercida por el "jet".

Allen y Worzel<sup>5</sup> determinaron que una perforación con un índice de flujo determinado, puede reducirlo si se invierte la dirección del flujo (para éste caso, se simuló inyectar fluido a la formación) y posteriormente, se dirige

# RESTAURACION DE LA ZONA COMPACTA.

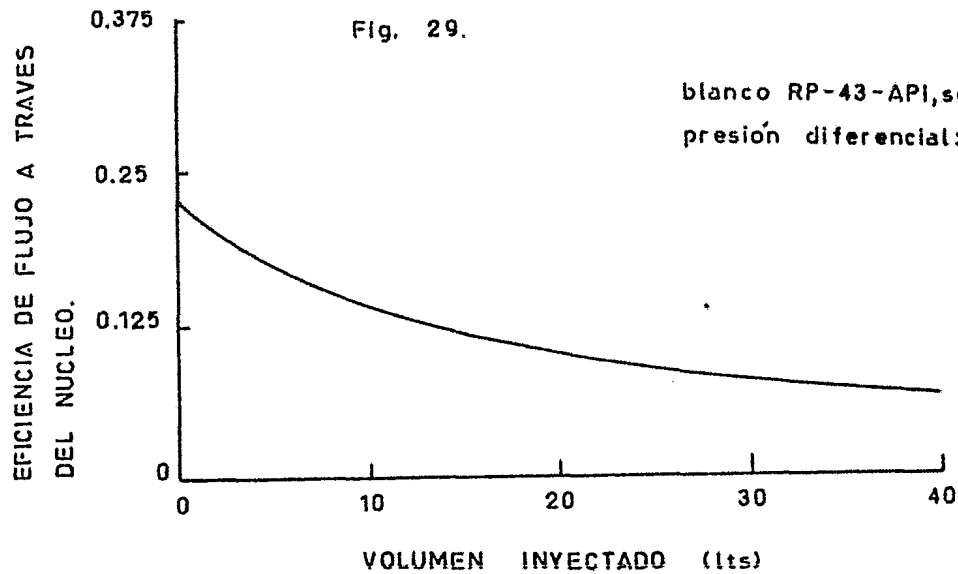
Fig. 28.



el flujo en la dirección inicial. Esto ocasiona una reducción en la permeabilidad efectiva aproximadamente del 40%. La simulación de inyectar fluido a la formación debe durar aproximadamente de tres a diez horas. La causa de ésto es que se remueven las partículas pulverizadas y obturan parte de los intersticios de la zona compacta.

Considerando el caso contrario, ésto es, la inyección de fluidos a la formación inmediatamente después de haberse efectuado los disparos (ver figura - 29). Nótese que la eficiencia de flujo a través del núcleo (CFE) se reduce - sustancialmente al incrementarse el gasto de inyección. La causa de ello, se debe a que las partículas pulverizadas taponan parte de los intersticios de la zona compacta.

COMPORTAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE FLUJO A TRAVES DEL NUCLEO AL INYECTAR FLUIDO INMEDIATAMENTE DESPUES DEL DISPARO.



### EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE DISPARO.

Las condiciones bajo las cuales se efectúan los disparos son de importancia primordial, ya que de éstas depende la calidad de los disparos que se obtengan. El daño causado durante el disparo no puede eliminarse posteriormente mediante tratamientos de ácidos, y tampoco puede contrarrestarse mediante el aumento de la densidad o en la penetración de los disparos. Sin embargo, este daño puede evitarse fácilmente, estableciendo las condiciones adecuadas durante la operación del disparo; éstas son, fluidos sin sólidos en suspensión y diferencial de presión hacia el pozo.

Supongamos que el pozo tiene instalada la tubería de revestimiento y se desea poner en producción. En algunos casos el empleo de agua salada con inhibidores es utilizada como fluido de control, pero en otros el mismo fluido de perforación es empleado como fluido de control o terminación. En este último caso es cuando los sólidos en suspensión pueden taponar los intersticios de la zona compacta o zona dañada por el disparo.

James L. Rike<sup>13</sup> determinó que pequeñas cantidades de sólidos en suspensión (500 ppm) contenidos en el fluido de control, pueden ser suficientes para taponar los canales o intersticios de la zona compacta. Se concluyó que este tipo de taponamiento es el responsable de que muchos pozos produzcan del 10% al 85% de su capacidad productiva.

No obstante, gran parte del personal que labora dentro de la industria petrolera tiene la creencia de que los materiales obturantes son fácilmente remo-

vidos con el uso de agentes químicos, tal como lo es el ácido fluorhídrico - si las partículas taponantes son arcillosas o ácido clorhídrico en caso de - que los sólidos sean de constitución carbonatada. Sin embargo, James L. Rike concluyó lo siguiente.

"Si el fluido que reacciona con los sólidos taponantes, se coloca en frente de la entrada del agujero, éste reaccionará con los sólidos que se encuen- - tren inmediatamente en frente de él, desprendiendo productos químicos de tal reacción, los cuales impedirán que prosiga la reacción del ácido con los sólidos para limpiar la penetración totalmente".

De lo mencionado anteriormente se infiere que la productividad del pozo está directamente relacionada con el tipo de fluido empleado.

Las pruebas de campo y análisis de laboratorio han demostrado que se obtiene un incremento significativo en la producción del pozo no solamente con el - uso de fluidos de control limpios, sino también cuando la presión diferencial es negativa<sup>(+)</sup> al momento de efectuarse el disparo. Es lógico que en este caso, tanto el aparejo de producción así como las conexiones superficiales se - tengan instaladas para poder controlar el pozo.

Generalmente se cree que todas las perforaciones existentes en un pozo pro-- ductor están abiertas al flujo de fluidos. La evidencia de campo indica que sólo unos cuantos disparos están trabajando. Cuando un pozo es inducido reduciendo gradualmente la cantidad de fluido del pozo. El flujo empieza cuando

---

(+) La dirección de la presión diferencial ha sido considerada negativa si - la presión de la formación es mayor a la del pozo, y positiva en sentido con-- trario.

la presión del pozo es menor que la existente en la formación. El valor de la diferencial de presión para que la penetración quede abierta al flujo, depende del grado de taponamiento de los intersticios de la zona compacta. El problema que se presenta en el campo para que todas las perforaciones queden abiertas al flujo de fluidos estriba en que cada una de ellas requieren diferentes presiones diferenciales, para poder desalojar sólidos. En otras palabras, una sola penetración abierta al flujo de fluidos tiende a igualar la presión en el fondo del pozo y la formación, haciendo que cada vez se disponga de menor diferencial de presión para limpiar el resto de las perforaciones.

La re-perforación no es un procedimiento ideal para incrementar la productividad del pozo, aunque en algunos casos se haya obtenido un incremento en la productividad del pozo, esto puede ser ocasionado simplemente por el uso inadvertido de la presión diferencial negativa junto con algún fluido de control limpio (agua salada con inhibidores), fluido de perforación con menor cantidad de sólidos en suspensión o simplemente por el proceso de inyectar diesel; el efecto que dichos fluidos de control producen, se reduce a limpiar los canales o intersticios obstruidos de la zona compacta.



### EFFECTO DEL DAÑO SOBRE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DEL POZO,

El estudio realizado por Klots, Krueger y Pye<sup>8</sup>, determinó la importancia del daño generado por los disparos sobre la capacidad productiva del pozo, involucrando factores como son: (a) espesor de la zona dañada de la formación; - (b) penetración del agujero; (c) eficiencia de flujo del pozo y (d) el valor de la permeabilidad tanto para el daño generado por el disparo, así como para el daño causado por el fluido de control.

Los resultados de este trabajo se muestran en las figuras de la 30 a la 33. En éstas,  $K_1$  presenta la permeabilidad de una formación supuestamente sin daño, para los propósitos de su análisis Klots le asignó a  $K_1$  un valor de 1.0.  $K_2$  representa la permeabilidad de la región alrededor del pozo, dañada por el fluido de perforación, cuyo valor asignado oscila entre 0.0 y 1.0.  $K_3$  representa la permeabilidad de la zona dañada por el disparo y su valor varía entre 0.0 y 1.0.

La eficiencia de flujo del pozo (WFE) se define como la relación del gasto que pasa a través de una perforación con daño y el gasto que fluye a través de una perforación ideal, en un sistema de flujo radial.

La figura 30 muestra el efecto de la penetración a través de una zona dañada de 10.16 centímetros sobre la eficiencia de flujo del pozo, tomando en cuenta la permeabilidad de la formación y suponiendo que la penetración del agujero está sin daño.

La figura 31 muestra los resultados de la eficiencia de flujo del pozo en -

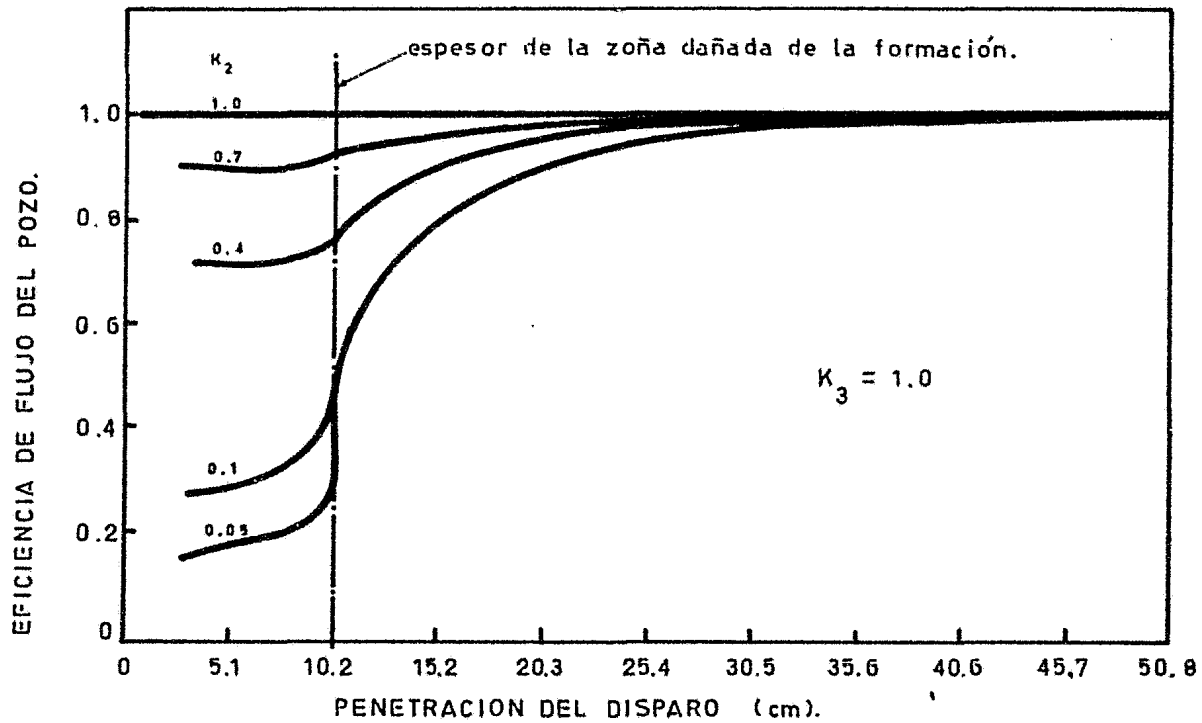


Fig. 30. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DEL DISPARO SOBRE LA EFICIENCIA DE FLUJO DEL POZO.

función de la permeabilidad de la formación, profundidad de la zona dañada y teniendo en cuenta que la penetración del disparo es de 20.32 cms, además, - no existe daño en la penetración del agujero.

Las figuras 32 y 33 son semejantes a la 31, pero incluyen el efecto del daño de la penetración del agujero. Nótese que cuando  $K_3 = 0.2$  el valor máximo de la eficiencia de flujo del pozo que se puede obtener es del 80%. Y, si  $k_3 = 0.05$  el valor máximo de la eficiencia de flujo del pozo es sólo del 50%.

Klots, Krueger y Pye concluyeron que si no existe daño en la penetración del agujero, es posible vencer el efecto del daño de la formación con una penetración sustancial que sobrepase la zona dañada. Sin embargo, cuando la penetración está severamente dañada por el proceso de la perforación, el valor máximo de la eficiencia de flujo del pozo está limitada al 50%. No obstante, si la reducción en la permeabilidad de la zona compacta es del 20% en comparación con el valor de la permeabilidad de la formación, se puede obtener una eficiencia de flujo del pozo del 80%.

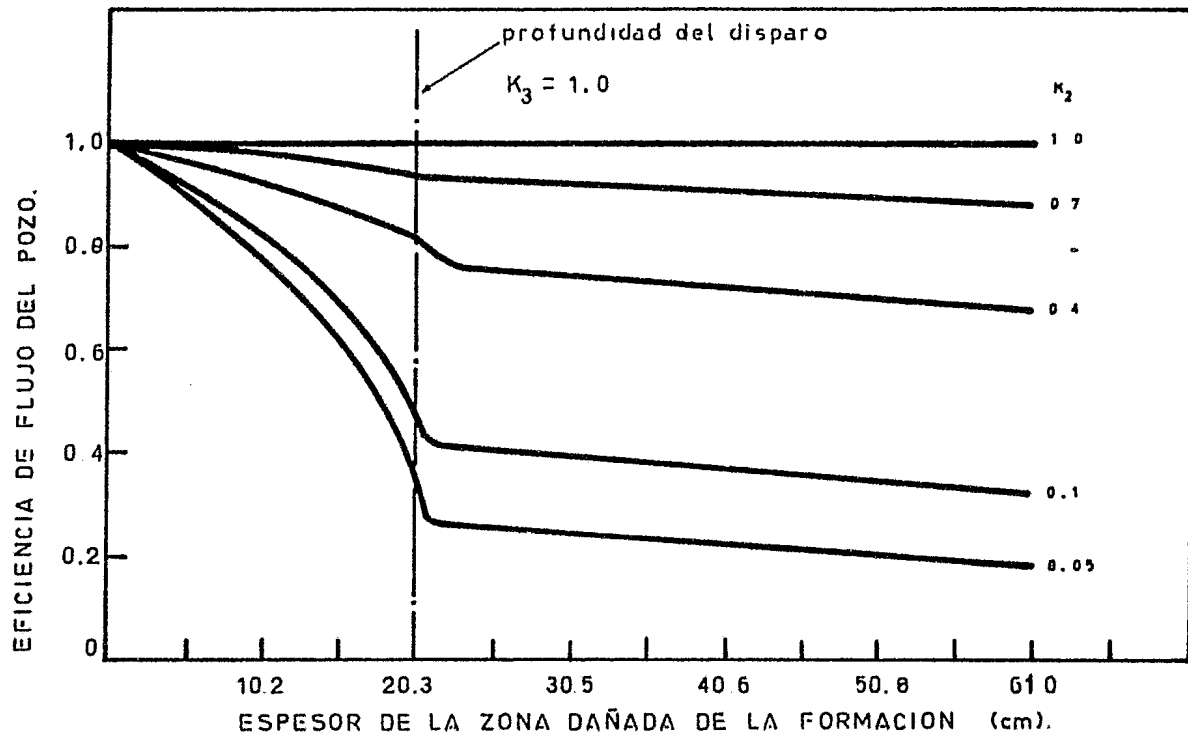


Fig. 31. EFECTO DEL ESPESOR DE LA ZONA DAÑADA DE LA FORMACION SOBRE LA EFICIENCIA DE FLUJO DEL POZO.

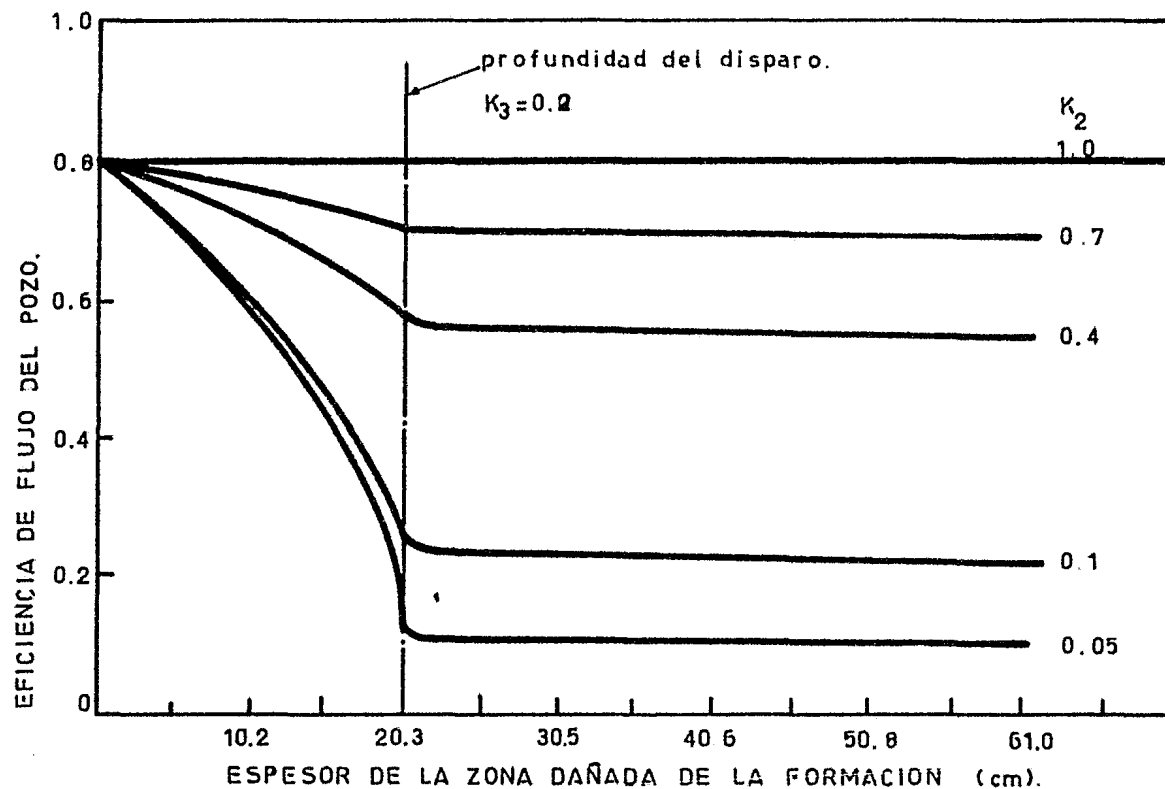


Fig. 32. EFECTO DEL ESPESOR DE LA ZONA DAÑADA DE LA FORMACION SOBRE LA EFICIENCIA DE FLUJO DEL POZO.

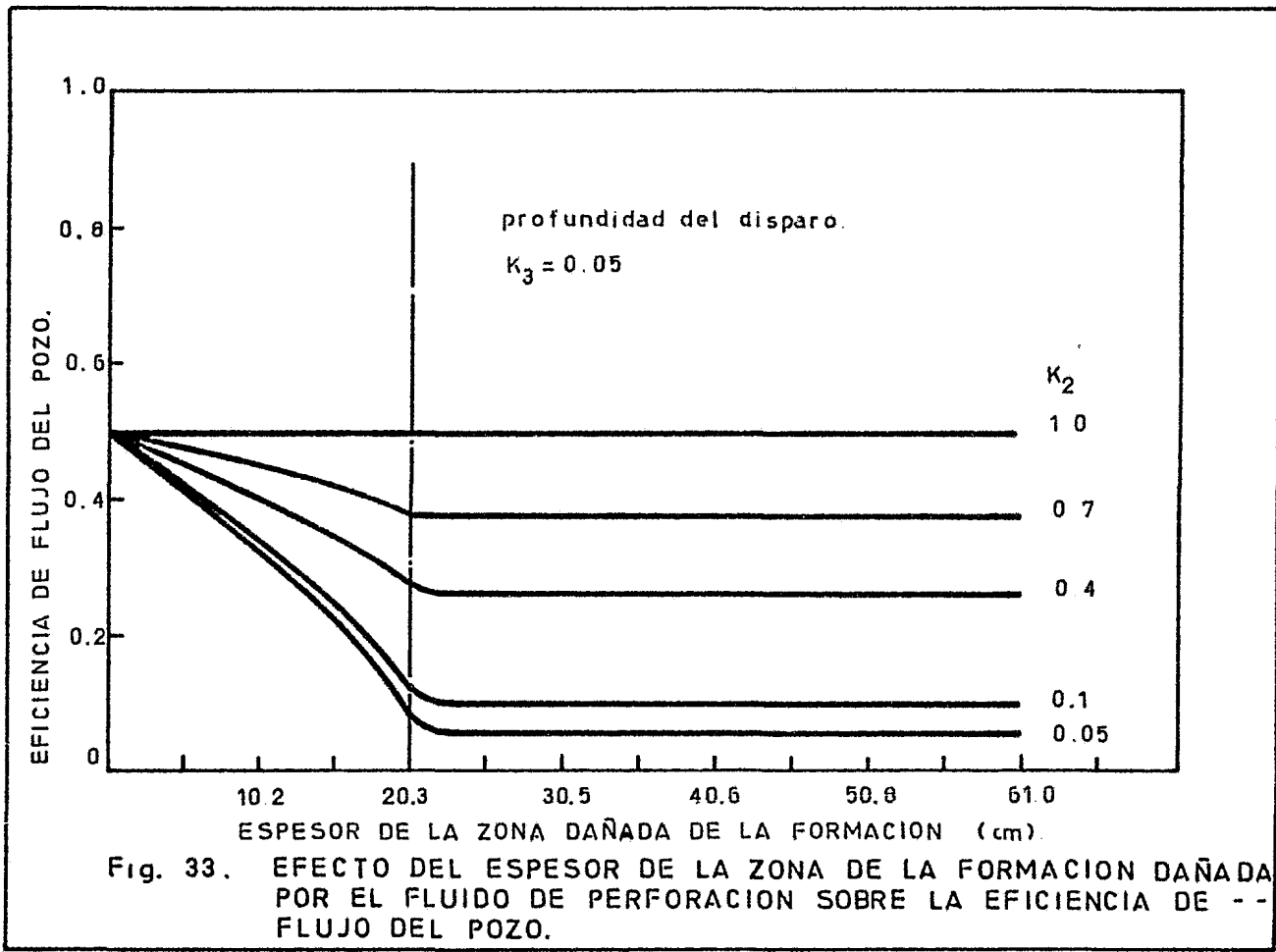


Fig. 33. EFECTO DEL ESPESOR DE LA ZONA DE LA FORMACION DAÑADA POR EL FLUIDO DE PERFORACION SOBRE LA EFICIENCIA DE -- FLUJO DEL POZO.

R E F E R E N C I A S . .

1. Birkhoff, G., Mac Dougal, D. P., Pugh, E. M., and Taylor, G.,: "Explosives with Lined Cavities", J. Appl. Phys. (1948).
2. Pugh, E. M., Eichelberg, R. J., and Rostaker, N.: "Theory of Jet Formation by Charges with Lined Conical Cavities", J. Appl. Phys.
3. Robinson, R. L.,: "Temperature Affect on Formations During Jet Perforating", SPE (Oct., 1956).
4. Delacour, J., Lebourg, M. P., and Bell, W. T.: "A New Approach Toward Elimination of Slug in Shaped Charge Perforating", J. Pet. Tech., (March 1958).
5. Allen, T. O., and Worzel, H. C.: "Productivity Method of Evaluating Gun Perforating", Drilling and Production Practice (1956).
6. Bell, W. T., Lebourg, M. P. and Bricaud, H.: "Perforating Today". A Science, Drilling and Production Practice (1959).
7. Harris, M. N.: "The Effect of Perforating on Well Productivity", Trans. AIME, 1966.
8. Klots, J. A.: "Effect on Perforating Damage on Well Productivity", J. Pet. Tech. (Nov., 1974).
9. Saucier, and Lands,: "A Laboratory Study of Perforations in Stressed Formations Rocks", J. Pet. Tech. (Sept., 1978).

10. Source: Gearhart-Owen Industries, Inc.: "Aids or Obstacles to Production"  
Drilling-KCW, May, 1980.
11. Porter, W. L., and Satterwhite, B.: "Evaluation of Well Perforator Performance", J. Pet. Tech. (Dec., 1976).
12. Klots, J. A., Krueger, R. F., and Pye, D. S.: "Effect of Perforating Damage on Well Productivity", J. Pet. Tech., (Nov., 1974).
13. James L. Rike.: "The Relationship Between Clean Fluids and Effective Completions", SPE, November 1980.