

01174
18



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**Dirección de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería**

*“Estudio Experimental del Daño por los
Disparos en Rocas Carbonatadas bajo
Condiciones Simuladas de Esfuerzo”*

T E S I S

Que para obtener el grado académico de:

Maestro en Ingeniería Petrolera

Presenta:

SERVIO TULIO / SUBIAUR ARTIACHI

Director de tesis: Dr. Daniel García Gavito



México D.F., 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

**"Estudio Experimental del Daño
por los Disparos en Rocas
Carbonatadas bajo Condiciones
Simuladas de Esfuerzo"**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

AGRADECIMIENTOS

A mi Esposa Laura María, mis Hijos Servio Jr., Juan y Maggie, mi Nuera Laura Elena y mi nietecita Laurita Isabel

Que me acompañaron y apoyaron durante estos dos años de arduo estudio, haciendo de esta etapa una de las mas felices de mi vida

A mi Tutor y amigo, Dr. Daniel García Gavito

Por sus enseñanzas, consejos y el tiempo dedicado a apoyar y guiar a nuestro grupo de Ingenieros de Perforación.

Al Dr. Fernando Samaniego Verduzco

Por sus importantes consejos para la elaboración de este trabajo de tesis

Al M. en I. J. Alfredo Ríos Jiménez, Dr. Sergio Berumen Campos y M. en I. Joaquín Mendiola Sánchez

Quiénes hicieron importantes observaciones para mejorar el contenido de este trabajo.

A mis Jefes: M. en I. Carlos Rasso Zamora e Ing. Rafael Viñas Rodríguez

Por haberme dado la oportunidad de superarme profesionalmente a través de los estudios de Maestría. Espero recompensar este apoyo con un mejor desempeño en las labores de nuestra Subdirección de Perforación.

Muy en especial al Ing. Rafael Viñas Rodríguez

Por su apoyo durante toda esta importante etapa de mi vida profesional y por su incondicional soporte al proyecto de pruebas que sirvió de base a este trabajo de tesis

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
1 MÉTODOS PARA ESTABLECER LA COMUNICACIÓN YACIMIENTO-POZO	5
1.1.- SISTEMAS DE DISPAROS	5
1.1.1. <i>Sistemas de disparo entubados</i>	
1.1.2. <i>Sistemas de disparo expuestos</i>	
1.1.3. <i>Sistemas de disparo bajados con tubería</i>	
1.1.4. <i>Los factores geométricos de un sistema de disparo</i>	
1.2.- LA CARGA EXPLOSIVA	9
1.2.1. <i>Etapas de formación del jet</i>	
1.2.2. <i>Física de la detonación</i>	
1.3.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS EXPLOSIVOS	16
1.4.- PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DE DISPARO	18
1.4.1. <i>Sección 1 API RP 19B 1ª. Edición</i>	
1.4.2. <i>Sección 4 API RP 19B 1ª. Edición</i>	
2 FACTORES DEL DISPARO QUE AFECTAN LA PRODUCTIVIDAD DEL POZO	27
2.1.- LA RELACIÓN DE PRODUCTIVIDAD	27
2.1.1. <i>Efecto de la penetración y la densidad de cargas</i>	
2.1.2. <i>Efecto de la fase</i>	
2.2.- TÉCNICAS DE DISPARO	29
2.2.1. <i>Factores Previos al Disparo</i>	
2.2.2. <i>Daño por el disparo</i>	
2.3.- TIPO DE TERMINACIÓN DEL POZO	41
2.3.1. <i>Importancia relativa de los factores de la geometría del disparo</i>	
2.3.2. <i>Heterogeneidades de la formación</i>	
2.4.- CARACTERÍSTICAS DE LA FORMACIÓN	46
2.4.1. <i>Presiones y esfuerzos en la formación</i>	
3 EL DAÑO DEL DISPARO Y TÉCNICAS PARA MINIMIZARLO	49
3.1 CONCEPTO DE DAÑO (SKIN)	49
3.1.1 <i>Daño por terminación parcial e inclinación</i>	
3.1.2 <i>Daño por la perforación de la formación</i>	
3.1.3 <i>Pseudo daño (Skin)</i>	

3.2	EL DAÑO (SKIN) DEBIDO AL DISPARO	53
3.3	TÉCNICAS DE DISPARO PARA MINIMIZAR EL DAÑO (SKIN)	54
3.3.1	<i>Disparo sobre balance</i>	
3.3.2	<i>Teorías sobre la eliminación del daño por el disparo</i>	
3.3.3	<i>Bajo balance en función de la permeabilidad</i>	
3.3.4	<i>Daño en función de las propiedades mecánicas de la roca</i>	
3.3.5	<i>Influencia de los transitorios de presión en el daño por disparo</i>	
3.4	CONCLUSIONES	79
4	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	81
4.1	OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	81
4.2	PRUEBAS ANTERIORES EN ARENAS	82
4.3	DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS	83
4.3.1	<i>Roca o Núcleos</i>	
4.3.2	<i>Volúmenes esperados de flujo</i>	
4.3.3	<i>Cargas explosivas</i>	
4.3.4	<i>Equipo de prueba</i>	
4.3.5	<i>Resultados de las pruebas</i>	
5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	111
5.1	TRANSITORIOS DE PRESIÓN	113
5.2	COMPARACIÓN CON EL CRITERIO DE BAJO BALANCE DE KING PARA ARENAS	117
5.3	COMPARACIÓN CON EL CRITERIO DE BAJO BALANCE DE BERHMANN PARA ARENAS	119
5.4	COMPARACIÓN CON EL CRITERIO DE WALTON	121
5.3.1	<i>Solución propuesta</i>	
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
APÉNDICE		129
A.1	GRÁFICOS DE TRANSITORIOS DE PRESIÓN	131
A.2	GALERÍA DE FOTOGRAFÍAS	137
	<i>Núcleos disparados</i>	
	<i>Equipo del Laboratorio</i>	
A.3	LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	143
BIBLIOGRAFÍA		147

RESUMEN

Se presentan resultados de un estudio experimental sobre la magnitud del daño producido por el disparo en rocas carbonatadas.

Este estudio experimental consistió en realizar un total de trece pruebas de flujo/daño tipo sección 4, API RP19B. Se usaron blancos de caliza y dolomía, así como dos tipos diferentes de cargas explosivas.

Mediante la simulación de condiciones de esfuerzo de la formación, manteniendo constante el esfuerzo efectivo y variando la magnitud de la presión de bajo balance, analizamos la magnitud del daño inducido por el proceso de perforación de la roca mediante una carga explosiva.

Una vez definida la magnitud del daño del disparo para diferentes presiones bajo balance se comparan estos resultados obtenidos con trabajos anteriores similares en arenas, con el fin de determinar la factibilidad de aplicar los mismos criterios conocidos a los carbonatos.

Los resultados de este trabajo experimental difieren, de los obtenidos en arenas, confirmando la necesidad de profundizar en el estudio del efecto de las presiones bajo balance en la magnitud del daño del disparo en rocas carbonatadas.

Se reafirma la teoría de que el daño depende en gran medida de las presiones instantáneas generadas durante el disparo. A su vez, estas presiones dinámicas dependen, no solo de la magnitud de presión bajo balance estática sino de otros factores relacionados con la configuración del pozo y pistola.

Del análisis de resultados se propone una solución gráfica que relaciona la magnitud del daño del disparo con la razón presión bajo balance pico/resistencia compresiva de la roca.

INTRODUCCIÓN

El disparo de producción es la etapa culminante en la vida de un pozo petrolero. Es durante el disparo cuando finalmente se despeja la incógnita y se tendrá la certeza si la gran inversión realizada para la construcción del pozo generará utilidades. Sin embargo, el disparo en si mismo, es también un factor determinante en la productividad del pozo. Una buena preparación previa del pozo, la selección correcta de la pistola, influyen de manera apreciable en la producción.

Aunque la selección de la pistola es de gran importancia, quizá las condiciones previas al disparo sean tan ó en algunos casos, más importantes. Es importante colocar un fluido limpio frente al intervalo a disparar. Un pozo con valor alto de daño producido durante la perforación por el lodo de perforación puede no producir los volúmenes esperados si no se logra sobrepasar la zona de daño con el disparo.

Aun si el disparo lograr sobrepasar la zona de daño, se presenta otra fuente de daño: el disparo mismo. El proceso de perforación de la roca por medio del jet de alta velocidad y presión de la carga explosiva genera una zona triturada alrededor del túnel de la perforación que dificulta el paso de los fluidos del pozo generando una caída de presión y una disminución de la producción.

La técnica más aceptada en los últimos 40 años para disminuir o eliminar este daño es el disparo bajo balance. Cuando la presión del yacimiento es mayor que la presión en el pozo generada por la columna hidrostática de la columna de fluido de control tenemos una condición de presión bajo balance.

Muchos investigadores han estudiado el proceso de limpiado mediante la técnica del bajo balance. Todos estos estudios se han basado en Arenas y han definido diversas gráficas o correlaciones que permiten determinar el nivel óptimo de presión bajo balance para obtener una perforación limpia con cero o mínimo daño.

Lo nuevo y relevante de este trabajo de tesis es que se ha basado en un estudio experimental del daño producido por el disparo en rocas carbonatadas sometidas a condiciones simuladas de esfuerzo. Ningún trabajo se ha reportado antes en el que se usen carbonatos como blancos de prueba.

La organización de este trabajo de tesis es como sigue:

En el Capítulo 1 hacemos una breve descripción de las diferentes pistolas disponibles en el mercado, describimos la carga explosiva y una explicación del proceso de formación del jet y la penetración de la carga. Se incluye también una descripción del nuevo procedimiento de prueba de cargas perforadoras de pozo API RP 19B.

El análisis de los factores que afectan la productividad del pozo se plantea en el Capítulo 2. Conceptos como Relación de Productividad, diferentes zonas de permeabilidad en la vecindad del pozo, el daño por el disparo se discuten en este capítulo. También se resume una teoría de formación de la zona de daño por el disparo o zona triturada. Se incluye una guía para selección de una pistola en función de las características de la formación y/o el tipo de terminación. También se trata como afectan las características mecánicas de la formación al desempeño del disparo.

Ya que este trabajo de tesis se enfoca al estudio del daño por el disparo, en el Capítulo 3 se describen las fuentes de daño por disparo y las técnicas para minimizarlo. Se revisa el concepto de daño o skin poniendo especial atención en el daño generado por la carga explosiva. Siendo la

técnica de disparo bajo balance la más aceptada para minimizar el daño, se resumen los trabajos clásicos realizados a la fecha que intentan determinar los niveles de presión bajo balance necesarios para obtener perforaciones limpias sin daño. Estos trabajos nos servirán de referencia cuando analicemos los resultados de nuestros experimentos.

El Capítulo 4 describe en detalle el desarrollo de la investigación. Trece pruebas se hicieron en total con rocas de carbonatos. La descripción de los blancos de prueba, equipo de laboratorio, cargas explosivas utilizadas, de las medidas previas de las características de las rocas, de la prueba misma y de la obtención de los resultados se podrá consultar en este capítulo.

Una gran cantidad de datos se obtuvieron de las treces pruebas realizadas, el análisis de estos datos se incluye en el Capítulo 5. Con los datos obtenidos se obtienen gráficos y se comparan con los trabajos clásicos para determinar la aplicabilidad de las correlaciones anteriores. Se plantea el modelo que mejor reproduce los resultados de estas pruebas y se propone una solución aplicable a rocas carbonatadas.

Finalmente se hacen las Conclusiones y agregamos un Apéndice en donde se incluyen los gráficos de los transitorios de presión obtenidos en cada una de las pruebas, fotografías de los blancos disparados, del laboratorio y equipo de prueba y una lista de Tablas y Figuras.

La Bibliografía se encuentra al final de este documento.

1. Métodos para establecer la comunicación yacimiento-pozo

La perforación de la tubería de revestimiento, el cemento y la roca del yacimiento se ha hecho con diferentes técnicas en el pasado. Los orificios eran realizados con cortadores mecánicos (antes de 1932), mediante el disparo de balas (a partir de 1932), mediante el bombeo de abrasivos (desde 1958), pero el sistema de mayor éxito es el disparo mediante el uso de explosivos. El disparo de producción ha sido el método preferido de terminación de un pozo durante los últimos 60 años. Durante este período, muchas mejoras se han logrado y actualmente podríamos plantear la siguiente definición:

“El disparo de producción es el proceso que permite facilitar la creación de un canal limpio de flujo entre la formación productora y el pozo con un mínimo daño a la formación”.

Tanto la productividad como la inyectividad del pozo dependen en gran medida de la caída de presión alrededor de la perforación y esta depende del factor de daño o *skin*.

La prueba mas contundente de la efectividad de un sistema de disparo es, sin duda, la productividad del pozo. El tema de la productividad de una terminación disparada ha sido estudiado por varios investigadores

1.1.- Sistemas de disparos

Un sistema de disparo ⁽¹⁾ consiste de una colección de cargas explosivas, cordón detonante, estopín y portacargas. Esta es una cadena explosiva que contiene una serie de componentes explosivos de tamaño y sensibilidad diferente.

El sistema de disparo se denomina “pistola” ó “cañón” y está definido principalmente por las cargas moldeadas explosivas, el portacargas, el sistema portador y la geometría de los agujeros que produce.

Hay varias maneras (medios de transporte) de bajar un sistema de disparo para colocarlo enfrente del intervalo que se pretende perforar: (1) Cable electromecánico, (2) Tubería de producción, (3) Línea de acero, (4) Tubería flexible.

El sistema portador puede ser: Recuperable entubado, expuesto desechable o semidesechable.

Ejemplos de descripción de un sistema de disparo:

“Sistema de disparo entubado de 2-1/8” con cargas HMX de alta penetración, densidad 6 cargas/pie y fase 60°”

“Pistola expuesta semidesechable de 2-1/8” con cargas HMX, fase 45°, 19 cargas/m y con una penetración mínima de 25” según norma API RP 19B, 1ª edición”

“Pistola TCP de 3-3/8” con cargas HMX, 5 cargas/pie, fase 60° y con una penetración mínima de 33” según norma API RP 19B, 1ª edición”

“Pistola entubada de 2-1/8” con cargas RDX, combinado alta penetración (DP) y agujero grande (BH), 4 cargas/pie, fase 60° y con una penetración mínima de 14”, diámetro de agujero de 0.26”(DP) y con una penetración mínima de 5”, diámetro de agujero de 0.49”(BH), según norma API RP 19B, 1ª edición”

En la Tabla siguiente resumimos algunas características de los diferentes sistemas de disparo:

Tipo	Ejemplos	Aplicación	Ventajas y desventajas
Entubada	<p><i>"Sistema de disparo entubado de 2-1/8" con cargas HMX de alta penetración, densidad 6 cargas/pie y fase 60°"</i></p> <p><i>"Pistola TCP de 3-3/8" con cargas HMX, 5 cargas/pie, fase 60° y con una penetración mínima de 33" según norma API RP 19B, 1ª edición"</i></p>	<p>Los diámetro nominales usuales de las pistolas entubadas bajadas con cable son: 1-11/16", 2-1/8", 2-1/2" para pasar a través de diferentes diámetros externos mínimos de aparejos de producción: 2-3/8", 2-7/8", 3-1/2" respectivamente</p> <p>En pistolas bajadas con tubería se tienen diferentes diámetros, los más usuales: 3-3/8", 4-5/8", 7", para IR's de 5", 7" y 9-5/8" respectivamente</p>	<p>Resistente a ambientes hostiles</p> <p>Buena resistencia mecánica</p> <p>Menor desempeño comparado con una pistola expuesta del mismo diámetro</p> <p>Poco flexible</p>
Expuesta semidesechable	<p><i>Pistola expuesta semidesechable de 2-1/8" con cargas HMX, fase 45°, 19 cargas/m y con una penetración mínima de 25" según norma API RP 19B, 1ª edición"</i></p>	<p>Los diámetro nominales usuales de las pistolas expuestas son: 1-11/16", 2-1/8", 2-1/2" para pasar a través de diferentes diámetros externos mínimos de aparejos de producción: 2-3/8", 2-7/8", 3-1/2" respectivamente</p>	<p>Mayor desempeño (penetración) comparada con una entubada del mismo diámetro</p> <p>Flexible</p> <p>Frágil</p> <p>Residuos</p> <p>Mediana resistencia a ambientes hostiles</p>
Expuesta desechable	<p><i>Pistola expuesta desechable de 2-1/8" con cargas HMX, fase 45°, 19 cargas/m y con una penetración mínima de 25" según norma API RP 19B, 1ª edición"</i></p>	<p>Los diámetro nominales usuales de las pistolas expuestas son: 1-11/16", 2-1/8", 2-1/2" para pasar a través de diferentes diámetros externos mínimos de aparejos de producción: 2-3/8", 2-7/8", 3-1/2" respectivamente</p>	<p>Mayor desempeño (penetración) comparada con una entubada del mismo diámetro</p> <p>Flexible</p> <p>Frágil</p> <p>Mayor cantidad de residuos</p> <p>Mediana resistencia a ambientes hostiles</p>

Tabla 1 Tipos de pistolas, aplicación, ventajas y desventajas

1.1.1. Sistemas de disparo entubados

En el sistema recuperable entubado, los explosivos (cargas, cordón detonante y detonador) están contenidos en un tubo portador resistente a la presión.

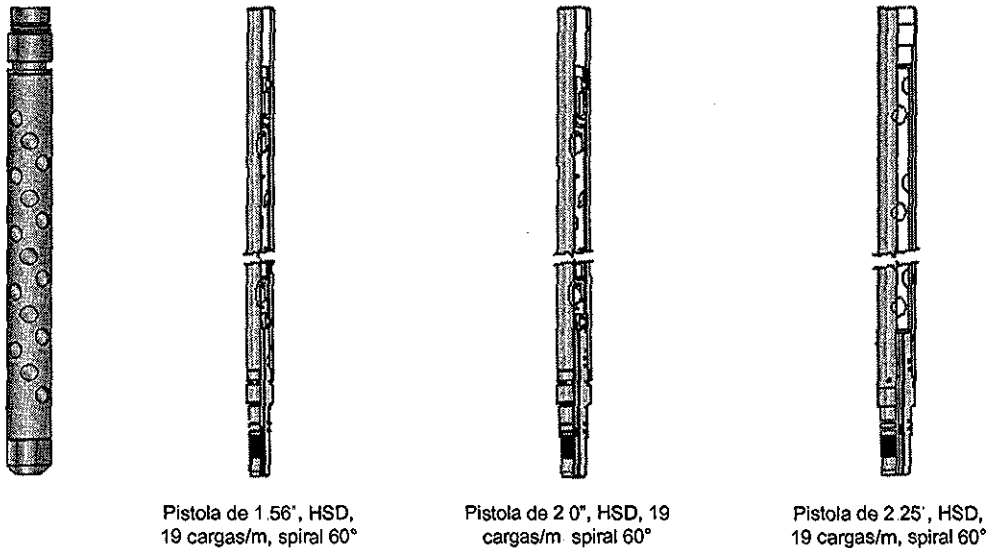


Figura 1 Sistema de disparo entubado

1.1.2. Sistemas de disparo expuestos

En las pistolas expuestas, los componentes explosivos están expuestos a la presión y fluido del pozo, por lo que, normalmente, este sistema está limitado por estas condiciones.

Un sistema expuesto es desechable o desintegrable cuando todas sus partes se desintegran al momento de la explosión y es semidesechable cuando el portacargas (lámina, alambres) se recuperan.

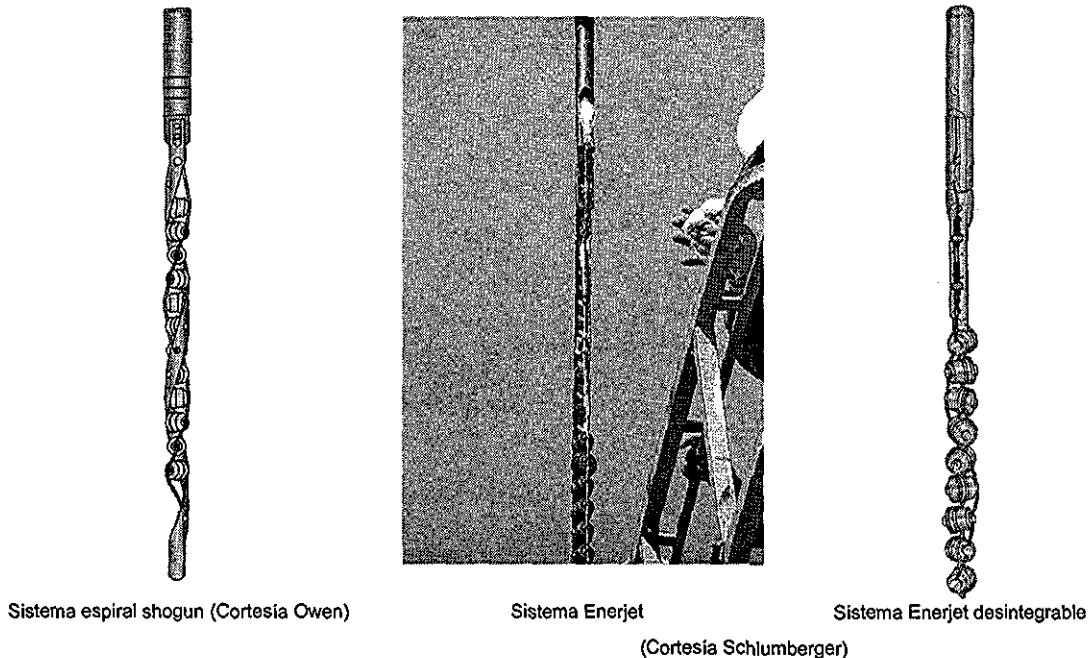
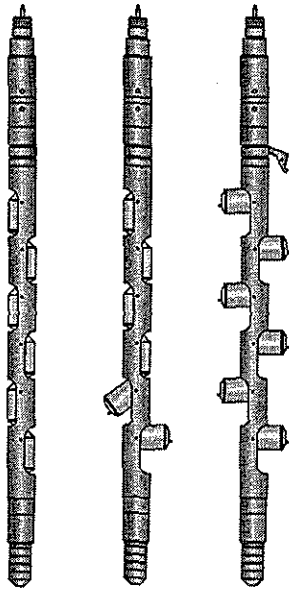
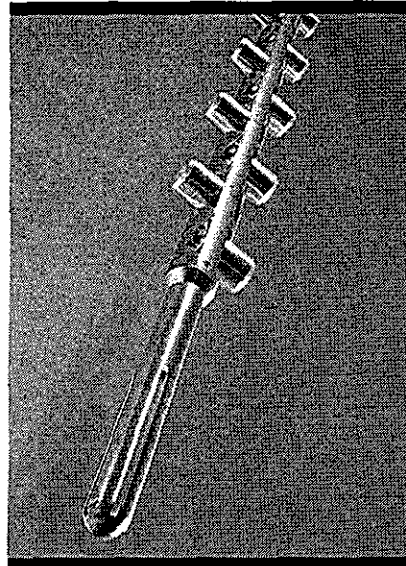


Figura 2 Sistemas de disparo expuestos tipo semirecuperable



Sistema Swing jet (Cortesía Owen)



Sistema Pivot gun (Cortesía Schlumberger)

Figura 3 Sistemas de disparo expuestos tipo desintegrable desplegable

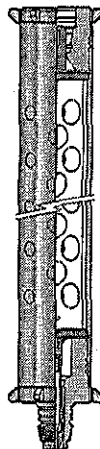
1.1.3. Sistemas de disparo bajados con tubería

El sistema de disparo bajado con tubería (TCP) permite limpiar los túneles hechos por las cargas por medio del flujo inmediato después de que la pistola detona. A pesar de que el sistema TCP tiene diferentes usos, su objetivo primario es obtener agujeros profundos y limpios removiendo la zona comprimida por el disparo y los residuos completamente.

Debido a que los factores geométricos están optimizados, es decir, fases múltiples, alta densidad y penetración, y que es posible establecer la mayor presión diferencial bajo-balanceada previa al disparo, el sistema TCP ofrece grandes ventajas para obtener la mayor productividad del pozo



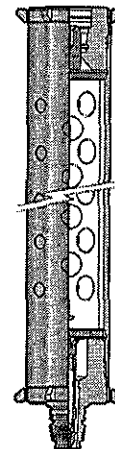
Pistola de 4", HSD, 19 cargas/m, fase 60°



Pistola de 5.85", Bigshot, 59 cargas/m, fase 120°/ 60°



Patented Charge Packing



Pistola de 6-5/8", Bigshot, 59 cargas/m, fase 120°/ 60°



Patented Charge Packing

Figura 4 Sistemas de disparo de diámetro grande (TCP). (Cortesía Schlumberger)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1.1.4. Los factores geométricos de un sistema de disparo

La geometría de un sistema de disparo está definida por cuatro factores:

1. Penetración
2. Densidad
3. Fase
4. Diámetro de agujero

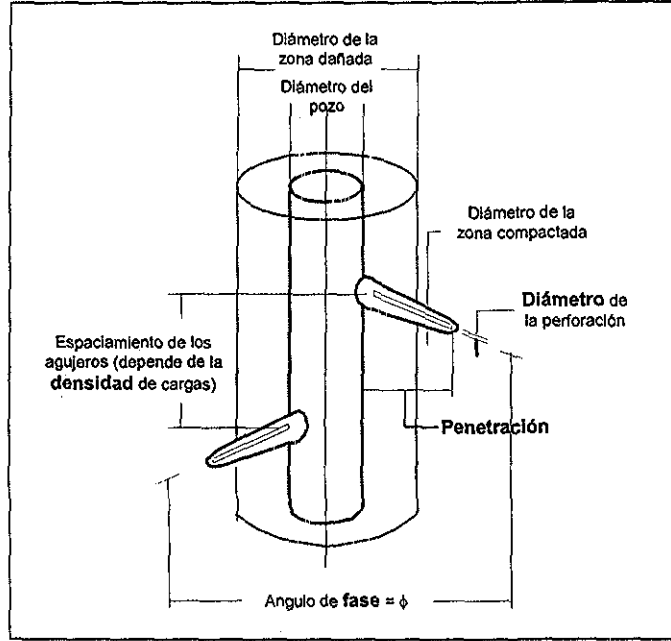


Figura 5 Factores geométricos de un sistema de disparo

El disparo produce un patrón de agujero en la TR-formación como se muestra en la siguiente figura:

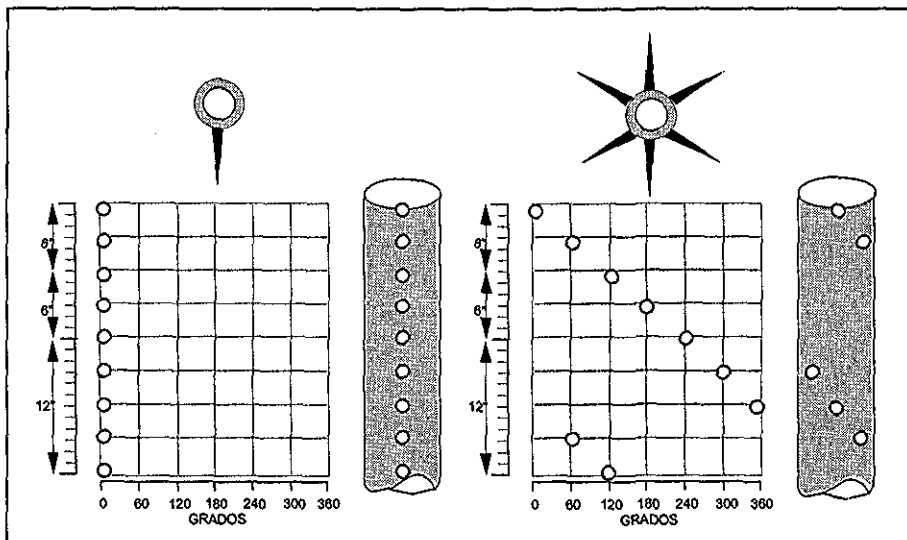


Figura 6 Patrón de agujeros producidos por sistemas de disparo de fase 0° y 60°

1.2.- La carga explosiva

Indudablemente que la parte más importante de un sistema de disparo es la carga explosiva. A primera vista, las cargas moldeadas revestidas son dispositivos relativamente simples compuestos por cuatro componentes principales, la carcasa, el liner, el explosivo principal y el explosivo iniciador.

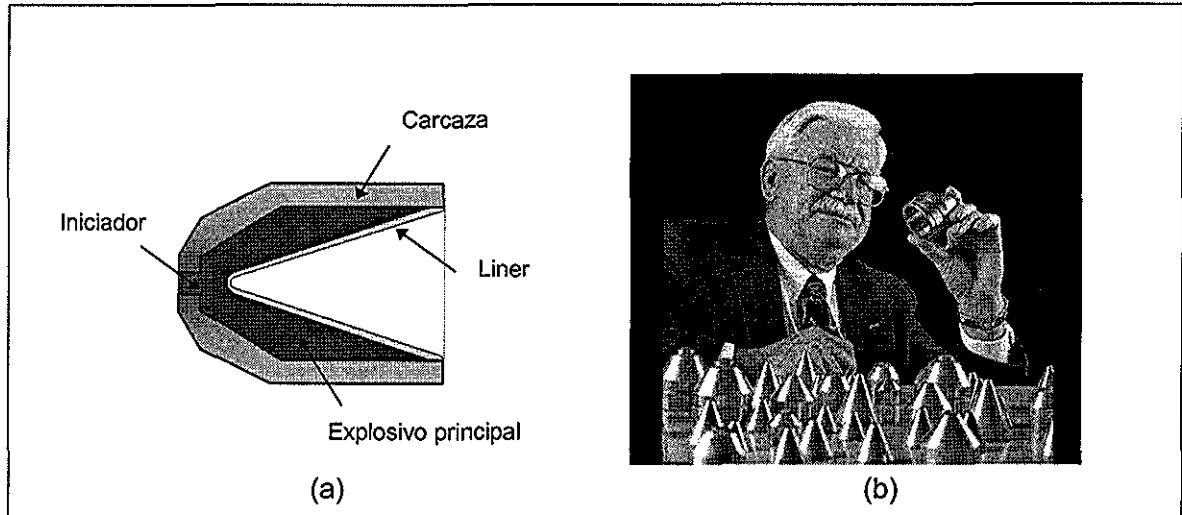


Figura 7 a) Partes de una carga explosiva, b) Cargas explosivas y liners (cortesía de SRC, Schlumberger)

La física de colapso del liner, formación del jet y penetración en el blanco es, sin embargo, extremadamente compleja. El diseño de una carga considera elasticidad, plasticidad, hidrodinámica, mecánica de fracturas y caracterización del material.

El proceso de crear la perforación comienza al iniciar el explosivo en la base (iniciador). Una onda explosiva se expande a través del explosivo principal, creando gases con presiones extremadamente altas, de 3,000,000 a 5,000,000 de lbs/plg². Los gases colapsan al liner sobre si mismo a lo largo del eje de simetría y forman un jet o chorro enfocado. En vez de remover el material para crear el túnel, el jet empuja el material hacia los lados. La profundidad del túnel o perforación está determinada por el diseño de la carga, la resistencia compresiva de la formación y el esfuerzo efectivo de la roca.

Las características de penetración de la carga dependen de la geometría y el material del liner. Las cargas de alta penetración (DP) usadas en formaciones duras tienen liners de forma cónica alargada mientras que las cargas de agujero grande (BH) usadas en formaciones suaves y no consolidadas tienen liners de forma parabólica o cilíndrica. En la Figura 7b podemos apreciar en la fotografía distintos tipos de liners.

El jet de una carga de alta penetración (DP) crea un agujero relativamente profundo de diámetro pequeño. Una carga usual tipo expuesta de 2-1/8" como la Predator (Baker Atlas), Deep Star (Halliburton), Piranha (ETASA), Shogun (Owen) ó Powerjet (Schlumberger) produce en concreto API de 5,000 lbs/plg², un agujero de alrededor de 25-30 pulgadas con un diámetro de 0.25 pulgadas. Las presiones pico a lo largo de la línea central del jet alcanzan magnitudes de 29, 000,000 de lbs/plg². El material del liner es una mezcla de metales para darle masa y fluidez al jet. Con liners de cobre la velocidad en la punta del jet alcanza los 7,900 metros/seg.

El jet de una carga de agujero grande (BH) crea un túnel relativamente somero pero de diámetro grande. Una carga típica de 2-1/8" entubada crea un agujero del orden de 3-5 pulgadas y un diámetro de 0.4-0.5 pulgadas. Sin embargo hay cargas de mayor diámetro que producen agujeros de más de una pulgada de diámetro.

La carga explosiva y en especial el liner deben ser perfectamente simétricos. Una desviación de esta simetría conduce a un bajo rendimiento de la carga.

1.2.1. Etapas de formación del jet

En la Figura 8 se muestran las diferentes etapas de formación del jet. En la etapa (1), el frente de onda ha progresado a través del cuerpo sólido del explosivo, lo suficiente para obtener la máxima velocidad. En este punto, por ejemplo, la velocidad en una carga con ciclonita será de cerca de 6,000 m/s

Cuando el frente de onda golpea el ápice del revestimiento, las enormes presiones empiezan a colapsar el revestimiento sobre su propio eje. Debido a que las presiones están muy por arriba del punto de cedencia de cualquier metal usado como revestimiento, este se comporta como un fluido perfecto. Conforme el material del revestimiento converge en el eje, es comprimido por la presión periférica en el plano del frente de onda. Una porción se moverá hacia adelante y otra hacia atrás. (etapa 2).

Los movimientos relativos del metal fluido pueden ser delineados desde la línea central de la pared del revestimiento. El material en el exterior o del lado del explosivo de esta línea se moverá hacia atrás y forma un "proyectil". El material en el lado interno entrara al chorro y se moverá hacia adelante. En este punto el chorro se está formando y puede ser interrumpido

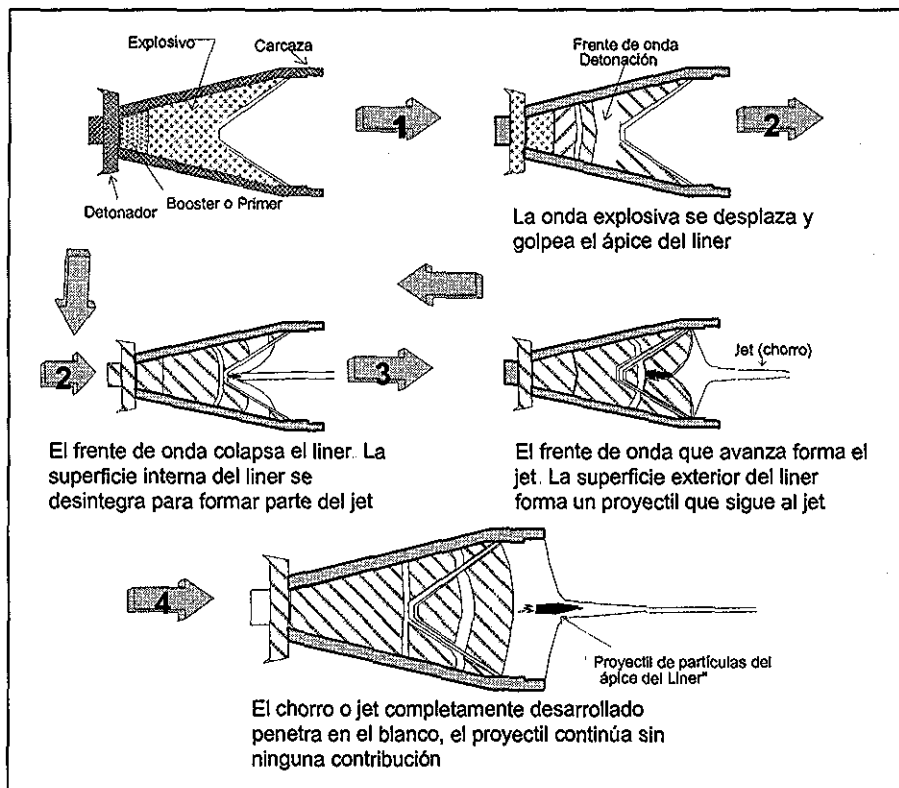


Figura 8 Etapas de la formación del jet de una carga moldeada revestida

En la etapa (3) muestra el frente de onda cerca de la mitad del camino en el cono. El proyectil ha sido lanzado aun mas atrás con respecto al frente de onda y el chorro se ha alargado. En este momento el chorro alcanza su máxima velocidad. Puede alcanzar el doble de velocidad de la detonación de la carga explosiva. Un chorro con esta velocidad produce fuerzas de impacto muy por arriba del punto de cedencia de cualquier metal o roca. La presión se estima alrededor de 6, 000,000 lbs/plg². La porción delantera del jet alcanza una velocidad de 7,600 m/s mientras que el proyectil de la parte trasera del jet tendrá una velocidad de cerca de 900 m/s. La diferencia de velocidad de la parte delantera y trasera del jet provoca el alargamiento del mismo.

En la etapa (4) el frente de onda ha pasado la base del cono. El chorro se ha extendido a su longitud total. Todo el material en el cono ha sido inyectado ya sea en el chorro o en el proyectil.

1.2.2. Física de la detonación

De manera breve explicaremos los dos procesos más importantes de la perforación, (1) La formación del jet ⁽²⁾ y (2) La penetración de la carga ⁽³⁾.

Formación del jet

La distribución de energía en el jet está determinada por el diseño de la carga. Para entender mejor este fenómeno veamos la siguiente figura:

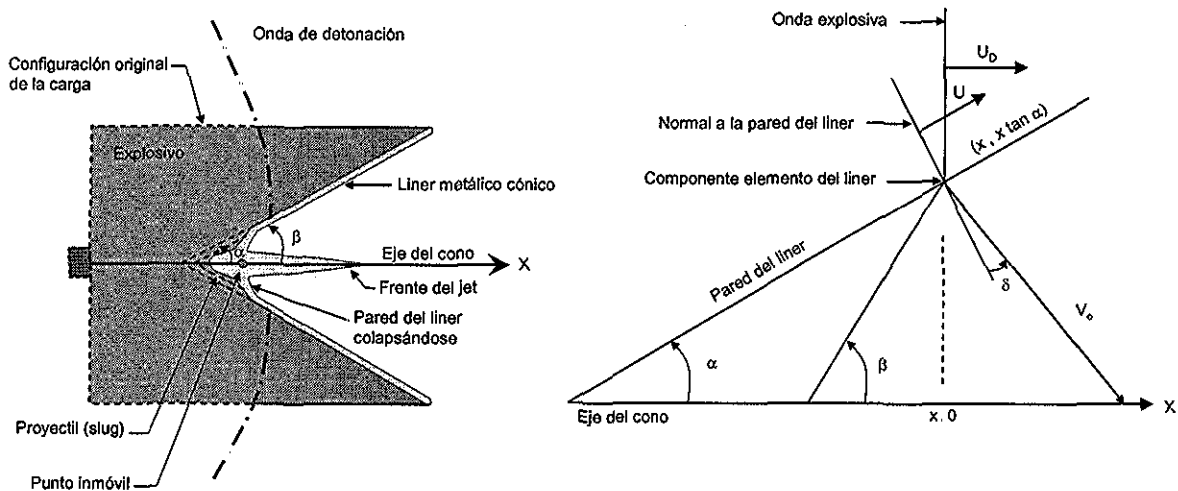


Figura 9 (a) Proceso de colapso del liner y formación del jet, (b) Dirección de proyección de la pared del liner

El ángulo del cono es 2α y la velocidad de detonación del explosivo principal de la carga es U_D . Con respecto a un sistema coordenado rectangular que tiene su origen en el ápice del cono y el eje X positivo a lo largo del eje del cono, imaginemos un elemento circular del liner perpendicular al eje del cono y con centro en $(x, 0)$ y con un radio de $x \tan \alpha$. El punto $(x, x \tan \alpha)$ mostrado en la Figura 9 está sobre este elemento.

La onda explosiva viaja a través de la carga paralela al eje del cono y con una velocidad constante U_D . Conforme la onda avanza a lo largo del liner, le da un impulso a cada pequeño elemento circular del liner. Esto provoca que el elemento se colapse hacia adentro en dirección del eje del cono a una velocidad V_0 y con un ángulo pequeño δ con respecto a la normal del liner, donde la onda y el elemento del liner se interceptan. V_0 se denomina la velocidad de colapso y δ el ángulo de proyección del elemento del liner. Debido a que las fuerzas generadas por la explosión son muy grandes

comparadas con la resistencia de corte del liner, cada elemento del liner actúa esencialmente de manera independiente de sus elementos adyacentes y dinámicamente se comportan como un fluido no viscoso.

El punto del eje del cono en el cual un elemento particular de liner se colapsa se llama *punto inmóvil*. Cuando el elemento colapsándose alcanza el eje del cono, todos los componentes radiales del momentum se cancelan (suponiendo que el elemento tiene simetría radial y que el explosivo está distribuido uniformemente cerca del elemento), y el material del liner se dirige hacia delante. La parte interna del elemento del liner fluye primero hacia fuera a lo largo del eje para formar el jet, y tiene una velocidad axial V_j y una masa relativa dm_j/dm (es decir, dm_j/dm es el porcentaje de masa de elemento de liner que entra al jet). A esto le sigue la parte externa del elemento de liner la cual forma el proyectil que se mueve a menor velocidad y que tiene una velocidad axial V_s y una masa relativa dm_s/dm . (Ver la Figura 10 a).

Típicamente, V_j puede ser tan alta como 8,000 m/s, mientras que V_s es menor de 2,000 m/s. Para un elemento particular de liner, dm_j/dm puede estar en el rango de 10 a 30% de la masa total del elemento, mientras que dm_s/dm puede variar entre 70 a 90%.

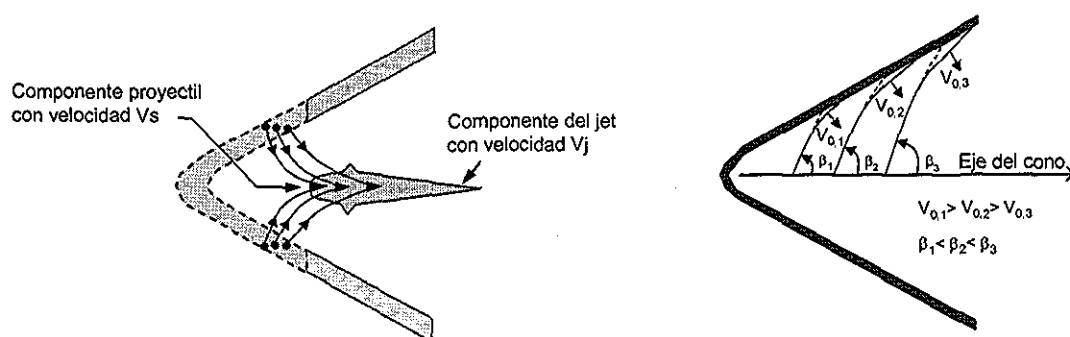


Figura 10 (a) Distribución del material en el jet y el proyectil, (b) Curvatura del liner colapsándose

Impulso decreciente. Con el incremento en la distancia desde el ápice del liner, el radio del elemento de liner se incrementa y la distancia entre un elemento de liner y la carcasa de la carga decrece. Por esto, con la distancia incrementándose desde el ápice del liner, la masa del elemento de liner aumenta conforme disminuye la masa de explosivo. Por consiguiente, el impulso dado a los elementos de liner cerca de la base del cono es menor que el dado a los elementos cerca del ápice. Esto tiene un fuerte efecto sobre la manera en que se colapsa el liner y se forma el jet.

Debido al impulso decreciente, la velocidad de colapso V_0 y el ángulo de proyección δ disminuyen al incrementarse la distancia desde el ápice del liner. Esto da como resultado una disminución tanto en la velocidad del jet V_j como en la velocidad del proyectil V_s . Por lo tanto, conforme el liner colapsa, se produce un gradiente de velocidad al decrecer la velocidad de los elementos nuevos del jet que entran al jet. Esto provoca un estiramiento o elongación del jet al viajar hacia el blanco. Aún más, conforme se incrementa la distancia del elemento de liner al ápice, dm_j/dm aumenta mientras que dm_s/dm disminuye. Estos dos factores, el jet elongado y la masa aumentada del jet, dan mayor poder de penetración al jet.

Otra consecuencia de la disminución en la velocidad de colapso es que el colapso del liner comienza a seguir un contorno curvo en lugar de cónico como sería el caso si la velocidad de colapso fuera constante. Esto se ilustra en la Figura 10b y ocurre debido a que los primeros elementos de liner se están colapsando hacia el eje más rápido que los últimos elementos. El ángulo efectivo que hace el

cono colapsándose y el eje es β . Conforme la distancia desde el ápice se incrementa, β también aumenta.

Algunas ecuaciones fundamentales que describan el colapso del liner y la subsiguiente formación del jet pueden derivarse usando algunas consideraciones geométricas y leyes básicas de la física.

$$U = U_D \sec \alpha \quad (1.1)$$

Donde U es la componente a lo largo del liner, de la velocidad de detonación U_D .

$$\delta = \arcsen(V_0 / (2U)) \quad (1.2)$$

$$\beta = \arctan(S / T) \quad (1.3)$$

Donde:

$$S = \sen \alpha + 2 \sen \delta \cos A - x(\sen \alpha)(\tan A + \tan \delta)(V_0' / V_0) \quad (1.3a)$$

$$T = \cos \alpha + 2 \sen \delta \sen A - x(\sen \alpha)(\tan A + \tan \delta)(V_0' / V_0) \quad (1.3b)$$

$$A = \alpha + \delta \quad (1.3c)$$

Con:

$$V_0' = dV_0 / dx$$

$$V_j = V_0 \csc(\beta / 2) \cos(\alpha + \delta - \beta / 2) \quad (1.4)$$

$$V_s = V_0 \sec(\beta / 2) \sen(\alpha + \delta - \beta / 2) \quad (1.5)$$

$$dm_j / dm = \sen^2(\beta / 2) \quad (1.6)$$

$$dm_s / dm = \cos^2(\beta / 2) \quad (1.7)$$

Usando estas ecuaciones obtenemos la Tabla 2 con los resultados para valores típicos. Nótese que conforme se originan los elementos del liner cada vez más lejos del ápice del cono, las velocidades del jet decrecen y las proporciones de masa de elemento de liner entrante se incrementan.

Angulo del cono = 45 grados Altura del cono = 2.5 cms. Velocidad de detonación del explosivo = 7000 m/s Velocidad inicial de colapso del liner = 3500 m/s Velocidad de la onda de choque a lo largo del liner = 7576.745 m/s							
DATOS DE COLAPSO DE ELEMENTO							
Distancia X (cm)	Angulo delta (grad)	Angulo beta (grad)	Velocidad jet (m/s)	Vel. Proyectoil (m/s)	Masa hacia el jet (%)	Masa hacia proyectil (%)	
0.25	12.17	49.33	7536	610	17.41	82.59	
0.50	11.09	49.58	6868	491	17.58	82.42	
0.75	10.11	49.94	6243	390	17.82	82.18	
1.00	9.21	50.41	5660	304	18.13	81.87	
1.25	8.40	50.97	5122	231	18.51	81.49	
1.50	7.66	51.61	4626	170	18.95	81.05	
1.75	6.99	52.33	4172	119	19.44	80.56	
2.00	6.37	53.11	3758	76	19.98	80.02	
2.25	5.81	53.94	3382	40	20.57	79.43	
2.50	5.30	54.81	3042	11	21.19	78.81	

Tabla 2 Muestra de resultados de cálculos de formación del jet y el proyectil

Penetración de la carga

La longitud y el área de sección transversal del jet fluido dependen del diseño de la carga moldeada. Debido a que la velocidad del jet es muy alta, la resistencia compresiva de la roca puede ignorarse al compararla con la presión dinámica producida por el impacto. La profundidad del túnel producido por la perforación se puede calcular aplicando los principios de la hidrodinámica.

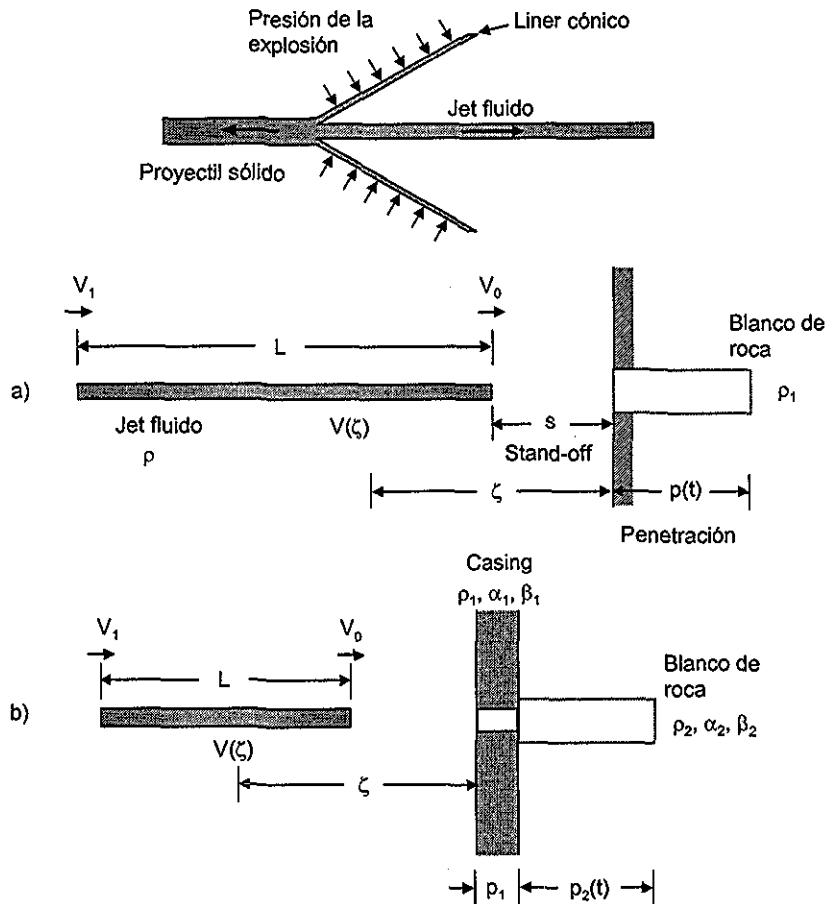


Figura 11 Penetración del jet fluido

De la Figura 11a, sea “L” la longitud del jet y “s” la distancia inicial stand off desde el blanco. Supongamos que el jet fluido tiene una velocidad inicial v_0 y una velocidad en la parte trasera de v_1 . La siguiente relación del desplazamiento se obtiene de consideraciones geométricas:

$$tv(\zeta) = \zeta(t) + p(t) \tag{1.8}$$

Donde, $p(t)$ es la profundidad de penetración

Para un jet continuo, el principio de Bernoulli relaciona la velocidad de penetración “ u ” y la velocidad del jet “ v ” para dar:

$$\frac{1}{2}\rho(v-u)^2 = \frac{1}{2}\rho_1 u^2 \tag{1.9}$$

$$u = \frac{dp(t)}{dt} = \frac{\alpha - 1}{\alpha} v \quad (1.10)$$

Donde,
$$\alpha = 1 + \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{1/2} \quad (1.11)$$

y, ρ y ρ_1 son las densidades del jet y el material sólido del blanco, respectivamente.

Usando la Ecuación 10, la diferenciación de la Ecuación 8 con respecto a t nos da:

$$\frac{d(v^\alpha t)}{d\zeta} = \alpha v^{\alpha-1}(\zeta) \quad (1.12)$$

Las condiciones de frontera para la ecuación anterior son:

$$\begin{aligned} v|_{\zeta=s} &= v_0 & v|_{\zeta=s+L} &= v_1 \\ t|_{\zeta=s} &= \frac{s}{v_0} & t|_{\zeta=s+L} &= \frac{(s+L+p)}{v_1} \end{aligned} \quad (1.13)$$

La solución de la Ecuación 12 con las condiciones de frontera 13, dan la expresión para la profundidad de penetración:

$$p = L \left[(\beta + 1) \int \left(\frac{v}{v_1} \right)^\beta d\eta - 1 \right] + s \left[\left(\frac{v_0}{v_1} \right)^\beta - 1 \right] \quad (1.14)$$

Donde:
$$\beta = \alpha - 1 = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{1/2} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\zeta - s}{L} \\ (s \leq \zeta \leq s+L, \dots, 0 \leq \eta \leq 1) \end{aligned} \quad (1.16)$$

Donde puede ver que la penetración depende de la velocidad y longitud del jet así como también de la distancia stand-off desde el pozo.

Si el jet tiene una distribución uniforme de velocidad, la Ecuación 14 se reduce a la fórmula clásica de la penetración:

$$p = L \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{1/2} \quad (1.17)$$

El procedimiento anterior puede extenderse para calcular la penetración ante la presencia de un casing de acero (Figura 11b):

$$p = p_1 + p_2 = p_1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{v_2}} \left(L \sqrt{\frac{\rho}{\rho_1} - p_1} \right) \quad (1.18)$$

1.3.- Características físicas de los explosivos

Hay diferentes tipos de explosivos utilizados en los disparos de producción. Dada las condiciones, en ocasiones extremas de temperatura, en que se tienen que realizar las operaciones, se requiere de una variedad de explosivos que conserven sus características cuando se someten a ciertas temperaturas durante un tiempo determinado. La característica que define el rango de temperatura que un explosivo soporta sin alterar las características que influyen en su desempeño por un cierto periodo de tiempo se denomina *estabilidad*.

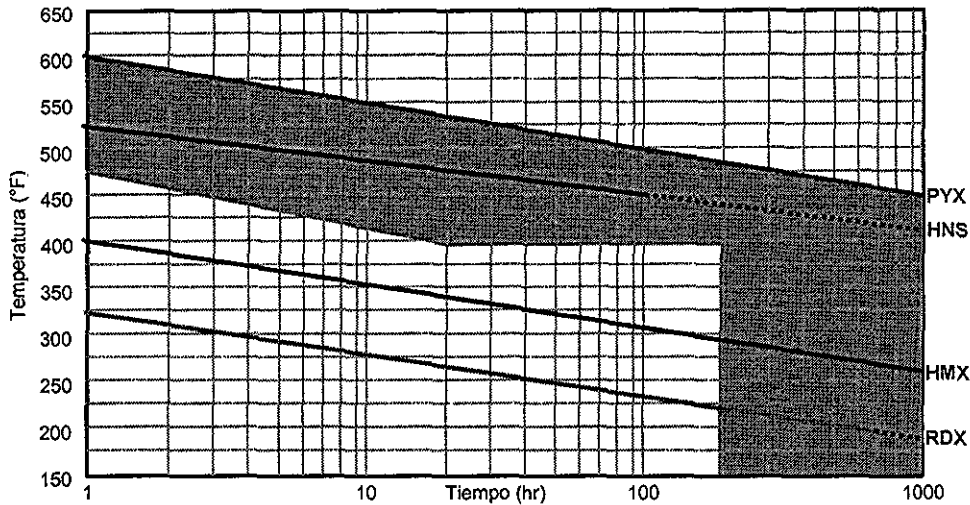


Figura 12 Estabilidad de los diferentes explosivos. Límites operacionales para sistemas entubados

Factores que influyen en el desempeño del explosivo:

- Presiones de detonación y las ecuaciones químicas asociadas con la explosión.
- La temperatura, densidad volumétrica, diámetro, tamaño de la partícula y grado de confinamiento del explosivo.
- La estructura molecular, peso molecular y forma cristalina del explosivo.

Presión de Detonación. Es un factor muy importante en el diseño de las cargas, ya que provee de la fuerza necesaria para que la carga penetre en el blanco.

Una ecuación que da aproximadamente la presión de detonación conociendo la densidad inicial (D_0) y velocidad de detonación (U) del explosivo es:

$$P = D_0 U^2 / 4 \quad (1.8)$$

Densidad volumétrica. La ecuación anterior indica que la presión de la detonación es directamente proporcional a la densidad inicial del explosivo. Esto se cumple dentro de ciertos límites. La densidad volumétrica del explosivo afecta también la sensibilidad del explosivo.

Al comprimir un explosivo para aumentar su densidad volumétrica la sensibilidad decrece y se hace extremadamente difícil de detonar. Por otro lado, hay un punto en el cual disminuir la densidad volumétrica, también resulta en una disminución en la sensibilidad. En este los cristales del explosivo se separan tanto que se dificulta la propagación de la detonación.

Diámetro. El diámetro de un explosivo influye también en su comportamiento. Para un explosivo dado, incrementando el diámetro resultara en un aumento en la velocidad de detonación hasta que un valor máximo, la velocidad hidrodinámica del explosivo, se alcance.

En el extremo opuesto de la escala, hay 2 valores mínimos de diámetro que afectan el desempeño del explosivo: El crítico y el ideal.

El diámetro crítico es el mínimo de la columna del explosivo en el cual se propagara una detonación después de iniciarse. Para un cierto explosivo, el diámetro crítico tiende a disminuir si el tamaño de las partículas disminuye.

El diámetro ideal o diámetro límite, es el mínimo de la columna explosiva al cual puede ocurrir una detonación ideal (detonación a máxima velocidad).

Estos parámetros (diámetros) son importantes en el diseño y construcción de cargas perforadoras. Las cargas contienen una pequeña cantidad de booster o carga primaria para detonar el explosivo principal.

Para que esta sección booster funcione apropiadamente, deberá ser lo suficientemente grande para permitir la iniciación y propagación de una onda detonante.

En la tabla siguiente se resumen varias de las propiedades de los explosivos ⁽²⁾:

Nombre común	TNT	Azida de Plomo	PETN	RDX	HMX	HNS	PYX
Fórmula Química	$C_7H_5(NO_2)_3$	PbN_6	$C_5H_8(NO_2)_4$	$C_3H_6N_3(NO_2)_3$	$C_4H_8N_4(NO_2)_4$	$C_{14}H_6(NO_2)_6$	$C_{17}H_{17}N_5(NO_2)_8$
Peso Molecular	227	291.3	316.2	221.1	296.2	450	621.3
Punto de Fusión °C	81	explota	141	204	273	319	360
Densidad (Gr/cm ³)	1.65	4.7	1.77	1.82	1.90	1.74	1.77
Presión de Detonación (Kbar)	185	95	300	347	393	190	242
Velocidad de detonación (m/s)	6,950	5,600	7,980	8,750	9,100	7,000	7,448
Calor de la Explosión (cal/g)	1,000	367	1,385	1,280	1,365	1,000	n/a
Volumen de gas (cm ³ /g)	690	308	790	908	908	n/a	n/a

Tabla 3 Características físicas de los explosivos usados en los disparos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.4.- Pruebas de desempeño de los sistemas de disparo

La estandarización del procedimiento de prueba de los sistemas de disparo empleado por las compañías fabricantes es realizada por el Instituto Americano del Petróleo, API ⁽⁴⁾.

El procedimiento actual se denomina "*Recommended Practices for Evaluation of Well Perforators*" y se designa como "*API Recommended Practice 19B, First Edition, November 2000*", o en forma abreviada: *API RP 19B 1^a ed.*

El procedimiento consta de 4 secciones que permiten evaluar los sistemas de disparo en cuatro formas:

1. Desempeño de un sistema de disparo bajo condiciones de presión y temperatura ambientales usando una mezcla de concreto como blanco de prueba
2. Desempeño de una carga explosiva en un blanco de arenisca Berea sometido a esfuerzo.
3. Prueba de un sistema de disparo después de exponerse a condiciones de temperatura elevada.
4. Desempeño de flujo de una carga explosiva disparada en un blanco de roca real bajo condiciones de esfuerzo simuladas.

Haremos una breve descripción de las secciones 1 y 4:

1.4.1. Sección 1 API RP 19B 1^a. Edición

El propósito de esta prueba es evaluar los sistemas de disparo usando blancos de concreto bajo disparos múltiples y en condiciones de temperatura y presión ambientales.

1.4.1.1 Blanco de concreto

El blanco se prepara con una mezcla consistente de: (a) 1 parte ó 94 lbs \pm 1% de cemento API clase A, (b) 2 partes ó 188 lbs de arena seca (frac sand 16-20, API RP 56) y (3) 0.52 partes ó 49 lbs de agua potable. La mezcla se coloca en un recipiente metálico circular (cilíndrico) y se deja curar por un mínimo de 28 días. Al mismo tiempo y usando la misma mezcla se preparan pequeños cubos de 2" denominados "briquetts" que se dejan curar dentro de agua potable por un período igual al del blanco. 24 horas antes de la prueba estos briquetts se usan para determinar la resistencia compresiva del blanco, la cual no deberá ser menor a 5,000 lbs/plg².

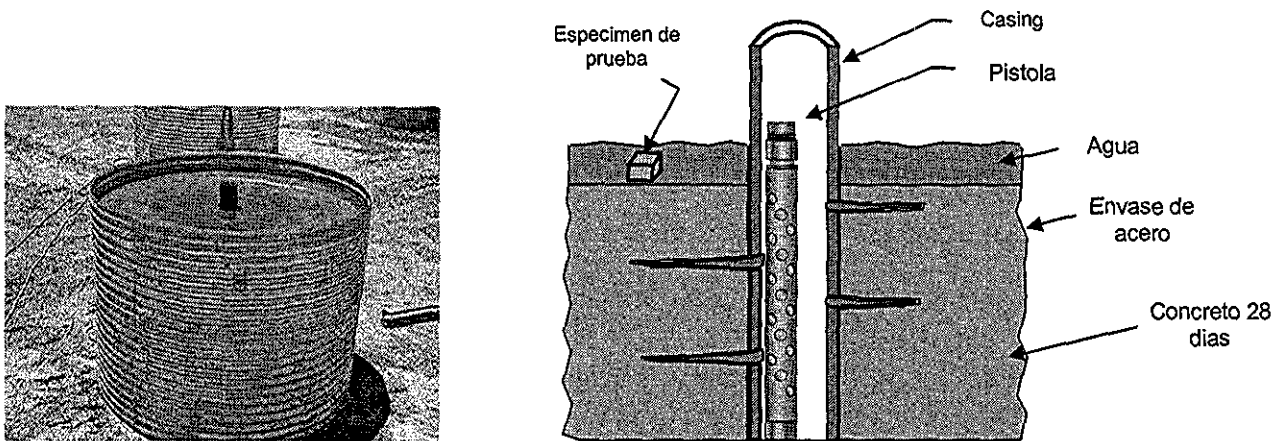


Figura 13 Fotografía y dibujo de un blanco de concreto sección 1, API RP 19B

1.4.1.2. Recolección de datos

Para cada perforación se miden los siguientes datos:

1. Penetración total en el blanco
2. Diámetro del agujero en la TR
3. Altura del reborde

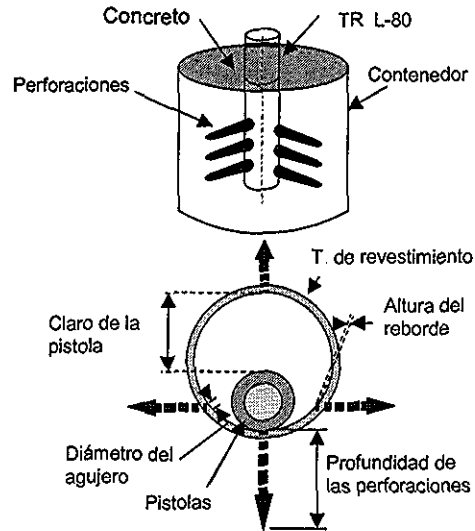
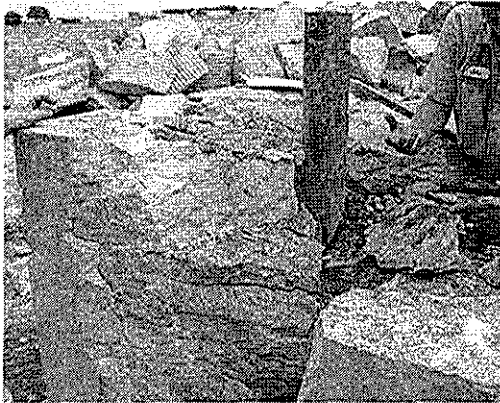


Figura 14 Fotografía y dibujo de un blanco de concreto sección 1, API RP 19B, disparado

1.4.2. **Sección 4 API RP 19B 1ª. Edición**

Debido a que esta prueba (con ligeras modificaciones) se usó en la investigación se hará una descripción mas completa de la misma.

El propósito de este procedimiento de prueba es proveer de una medida de desempeño del flujo en una perforación. El procedimiento general se usará con una muestra de roca caliza bajo condiciones de presión que simulen las condiciones de fondo de pozo.

1.4.2.1. Introducción

El propósito de este procedimiento de prueba es proveer de una medida de desempeño del flujo en una perforación. El procedimiento general se usará con una muestra de roca caliza bajo condiciones de presión que simulen las condiciones de fondo de pozo.

1.4.2.2. Blanco de prueba

Las pruebas se harán en núcleos cilíndricos provistos con una placa frontal que simula la tubería de revestimiento del pozo, una camisa flexible que transmita el esfuerzo simulado de sobrecarga a la muestra y el equipo necesario para aplicar una presión de poro a los límites de la muestra. La presión de poro se aplicará en los extremos de la muestra cilíndrica (flujo radial), al extremos sin perforar de la muestra (flujo axial), o ambos, de manera que simule las presiones de poro in situ. El arreglo típico se muestra en las Figuras 13 y 14. La geometría específica del blanco queda a opción de la compañía que realiza la prueba excepto lo siguiente:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- a. El diámetro del blanco no deberá ser menor a 4 pulgadas
- b. El agujero de entrada deberá ser posicionado en el centro de la placa frontal y, después del disparo, el extremo final de la perforación no deberá quedar a menos de una cuarta parte del diámetro del blanco desde el eje del blanco.
- c. Después del disparo, deberá haber una distancia mínima igual a un diámetro de blanco entre el extremo más lejano del agujero y la parte trasera del blanco.
- d. Solo muestras orientadas con los ejes paralelos a los planos sedimentarios deberán usarse en geometría de flujo axial.
- e. Los esfuerzos de sobrecarga simulados deberán ser aplicados uniformemente a todas las porciones de la muestra, aunque los esfuerzos radiales y axiales pueden ser diferentes, si se desea.
- f. La geometría del blanco usado deberá ser probada para asegurar que ningún flujo se desvíe de la perforación.

1.4.2.3 Equipo de prueba

El equipo consistirá de un envase presurizado (el contenedor de presión confinante) para aplicar una presión de confinación a la muestra, un segundo envase presurizado (el pozo simulado) para contener y aplicar la presión de pozo a la pistola y un sistema de flujo para aplicar una presión de poro a la muestra. Un dibujo esquemático se muestra en la Figura 15. El arreglo específico queda a discreción de la compañía que hace la prueba con excepción de lo siguiente:

- a. El diámetro interno del envase de presión confinante deberá ser de cuando menos 12 pulgadas, o deberá demostrarse que la penetración y el flujo serían los mismos que en el contenedor que se use.
- b. El envase que simula el pozo deberá estar equipado con un acumulador u otro recipiente de presión con una capacidad mínima de un galón precargado a la mitad de la presión de pozo requerida y conectado al pozo a través de un tubo con un diámetro interno mínimo de $\frac{1}{4}$ de pulgada.
- c. El sistema de presión de poro deberá ser capaz de proveer la presión necesaria para la presurización inicial y el flujo posterior al disparo, deberá estar libre de pulsaciones de presión en la muestra y deberá estar equipada con un filtro en la entrada de la muestra que eliminará todas las partículas con un diámetro de 3 micrones o mayores.
- d. Se deberá disponer de transductores, sensores u otros medios de una exactitud adecuada para medir la presión de confinamiento, la presión de pozo, la presión de poro, la temperatura del fluido entrante y el volumen de flujo a través de la muestra.
- e. La temperatura del fluido usado deberá medirse conforme entra a la muestra.

1.4.2.4 Configuración de la pistola

Si es necesario, deberán fabricarse portadores para una sola carga, de tal manera que el standoff interno, el espesor de la pared de la pistola y el material sean los mismos que el de la pistola en producción.

1.4.2.5. Calibración de los sistemas

Transductores y Sensores. Todos los transductores y sensores serán calibrados contra un estándar de referencia adecuado en intervalos que no excedan los seis meses. La calibración mas reciente deberá ser guardada en archivo.

Medida de la caída de presión. La caída de presión debida a la impedancia del sistema y la turbulencia deberá ser medida como una función del volumen de flujo usando una muestra simulada de permeabilidad tal como una arena 20/40 pegada con resina. Esta prueba deberá ser ejecutada al menos una vez por año tanto para el arreglo de prueba de perforación y permeabilidad. Los datos mas recientes deberán ser archivados.

1.4.2.6 Medida de la permeabilidad

Se deberán hacer medidas adecuadas de la permeabilidad de las muestras antes del disparo. La permeabilidad deberá medirse en toda la muestra tanto paralela ($K_{||}$) como perpendicular (K_{\perp}) a los planos sedimentarios usando los métodos que se describen mas adelante. Los valores de $K_{||}$ y K_{\perp} serán usados para calcular el flujo esperado hacia dentro de la perforación usando el procedimiento que se verá mas adelante.

Para las muestras con los ejes perpendiculares a las capas sedimentarias, se usará el flujo axial para medir la permeabilidad perpendicular a las capas y el flujo a través del diámetro se usa para medir la permeabilidad paralela. Para las muestras orientadas paralelas a las capas, será lo contrario. En el último caso, los segmentos de flujo del método de sección transversal están orientados para obtener flujo perpendicular a las capas. Las técnicas detalladas a usar quedan a discreción de la compañía con excepción de:

- a. La medida deberá hacerse bajo el mismo esfuerzo efectivo usado durante el disparo de prueba.
- b. El núcleo deberá estar en la misma condición de saturación de fluido que el usado durante el disparo de prueba y se deberán usar el mismo fluido y rango de volúmenes de flujo en ambas pruebas durante las medidas de flujo.
- c. Las mismas restricciones al sistema de flujo que se mencionaron anteriormente se aplicarán aquí.

1.4.2.7 Procedimiento de prueba

La muestra preparada deberá ser ensamblada con una placa frontal, una camisa flexible, un distribuidor de flujo y montada en el envase presurizado. La carga explosiva armada que se probará deberá conectarse a los cables de disparo y colocarse en el envase de pozo siguiendo los procedimientos de seguridad estándares. Las presiones de confinamiento, poro y pozo deberán ser incrementadas simultáneamente al nivel deseado y la carga debe ser disparada. Si se desea, las presiones ecualizadas de pozo/poro pueden reducirse lentamente hasta la presión ambiental mientras que simultáneamente se disminuye la presión de confinamiento para mantener constante el esfuerzo efectivo (es decir, la presión de confinamiento menos la presión de poro).

El flujo a través de la muestra deberá iniciarse aplicando una presión de poro para simular la caída de presión deseada (Nota: Este valor dependerá de la geometría escogida de flujo y de la permeabilidad efectiva de la muestra perforada). Se deberán fluir al menos 10 litros con esta presión o hasta que no ocurra ningún cambio en el volumen de flujo, lo que requiera más tiempo. Se harán pruebas adicionales de flujo con otras presiones.

1.4.2.8 Registro de los datos

Para cada muestra probada, se deberán registrar al menos los siguientes datos:

- a. Un dibujo esquemático de la geometría específica de la prueba adjuntando las condiciones límites de flujo.
- b. La fuente (origen) de la muestra, diámetro, longitud, orientación y condición de saturación de fluido.
- c. Las permeabilidades de la muestra y el método de medida.
- d. Las condiciones de la prueba durante el disparo y el flujo.
- e. La geometría del agujero hecho por la perforación incluyendo lo siguiente:
 1. Profundidad libre de residuos. La distancia medida desde la cara de la roca a los primeros residuos en el agujero, medidas con una sonda.
 2. Penetración total en el núcleo. La distancia desde la cara de la roca a lo más profundo de la perforación. Determinar probando la roca debilitada detrás del extremo de la perforación.
 3. Perfil del diámetro del agujero. El diámetro del agujero deberá obtenerse a intervalos de 1 pulgada a lo largo de la longitud de la perforación. Esto puede ser hecho registrando el diámetro en forma tabular, dibujando la perforación en una rejilla apropiada o adjuntando una fotografía de la perforación contra una rejilla de escala apropiada. El diámetro promedio de la perforación será registrado con una tolerancia de 0.1 pulgadas.
- f. La presión diferencial y el volumen de flujo a intervalos de 1 litro; presión diferencial y volumen de flujo usados en los cálculos, el volumen máximo de flujo, la presión diferencial y el flujo acumulado antes de tomar los datos usados en los cálculos.
- g. La temperatura en la entrada del fluido usado y la viscosidad correspondiente.

Nota: El flujo que pudiera entrar a la porción libre de residuos de la perforación a través de los residuos deberá ser eliminado o restado del flujo total haciendo y registrando medidas complementarias.

1.4.2.9 Reducción de datos

Los datos de flujo serán presentados comparando el máximo flujo observado con el flujo esperado de las medidas de permeabilidad pre-disparo. La eficiencia de flujo en el núcleo (CFE) deberá definirse como la relación entre el flujo observado/ flujo calculado, normalizado a un blanco de 3.5 pulgadas de radio. Se deberán usar los medios adecuados para calcular el flujo esperado basado en la profundidad o penetración del disparo libre de residuos, el diámetro promedio del agujero, la permeabilidad inicial y las condiciones de frontera de presión aplicada.

Más adelante se especifican las ecuaciones que se usarán en estos cálculos para condiciones de frontera de flujo radial. En este caso se define *CFE* como:

$$CFE = \frac{1.25 - \ln(r)}{1.25 - \ln(r) + \ln\left(\frac{R}{r}\right)\left(\frac{Q_c}{Q_m} - 1\right)} \quad (1.19)$$

Donde:

r = radio promedio de la perforación, pulgadas.

R = radio de la muestra, pulgadas.

Q_c = flujo calculado, cm^2/s

Q_m = flujo medido, cm^2/s

Para uso en modelos de productividad de pozo, la permeabilidad de una zona reducida hipotética que rodea la perforación puede ser estimada multiplicando la permeabilidad de la matriz usada en el modelo por el Factor de Reducción de Permeabilidad (PRF):

$$PRF = \frac{CFE \times \ln\left(\frac{r_c}{r}\right)}{1.25 \times (1 - CFE) - \ln(r) + (CFE) \times \ln(r_c)} \quad (1.20)$$

El valor del radio de la zona dañada, r_c , debe ser escogido, por ejemplo, seleccionando el espesor de la zona.

1.4.2.10. Condiciones estándares de prueba

Se proporcionan las siguientes especificaciones adicionales de tal manera que los datos puedan ser recopilados y comparados bajo condiciones comunes. Todas las especificaciones anteriores aplican. Los datos obtenidos bajo estas condiciones pueden no representar o pueden no ser trasladables a condiciones de fondo de pozo. El daño de permeabilidad causado por la carga puede ser diferente en la roca del yacimiento bajo condiciones de presiones reales. La limpieza posterior al disparo puede diferir de los resultados de la prueba estándar dependiendo de las propiedades reales de la roca del yacimiento, la presión bajo balance usada, los efectos de almacenamiento dinámico del pozo, la caída por producción, la composición del fluido y su viscosidad, fase y densidad de la pistola y otros factores.

Límites de la presión de poro. La presión de poro deberá ser aplicada solamente a los lados de la muestra cilíndrica, como se muestra en la figura.

Fluido de poro. Una solución salina de cloruro de sodio al 3%

Condiciones de presión. Las presiones aplicadas cuando la pistola se dispara deberán ser como sigue:

Presión de confinamiento	4,500 lbs/plg ²
Presión de poro	1,500 lbs/plg ²
Presión de pozo	1,000 lbs/plg ²

Esto proveerá de un esfuerzo efectivo en la roca de 3,000 lbs/plg² y un bajo balance de 500 lbs/plg². La prueba de flujo puede ser hecha con presión ambiente de poro y pozo, pero el esfuerzo efectivo deberá mantenerse en 3,000 lbs/plg² al bajar simultáneamente la presión de confinamiento.

Presión diferencial. Esta presión durante el flujo deberá ser de 50 lbs/plg².

Penetración. La placa frontal deberá diseñarse de tal manera que la carga debe penetrar 3/8 de pulgada de acero A-36 ASTM o su equivalente y 3/4 de pulgada de cemento hydrostone o equivalente antes de penetrar en el blanco.

Claro. Con excepción de las pistolas (cargas) de fase 0 que utilizan un dispositivo excéntrico, las cargas deberán probarse con un claro de ½ pulgada. Las cargas de pistolas de fase 0 que usan dispositivos excéntricos deberán ser disparadas con el claro que se tendrá en el pozo.

1.4.2.11. Equipo y blanco de prueba

Introducción. Dentro de las especificaciones del blanco de prueba, la presión puede ser aplicada a los lados cilíndricos de la muestra, a sus extremos, o ambos, dependiendo de la presión de poro anticipada en el campo. A continuación se ilustran algunos métodos para lograr estas condiciones de frontera.

Flujo Radial. La presión de poro se aplica a los lados cilíndricos del blanco. El espacio entre la camisa y la muestra (ver Figura 15) se llena con un material flexible con al menos 2 darcies de permeabilidad. El apuntalante de bauxita (malla 20/40) o varilla metálicas de ½ pulgada de diámetro pueden ser usadas. Un aro-sello con un orificio central entre la placa frontal y la muestra previene la fuga de fluido. Un anillo opcional y una placa en la parte trasera de la muestra previenen el flujo hacia dentro de los extremos de la muestra. El flujo puede también ser bloqueado desde la porción del blanco más cercana al agujero de entrada para burdamente simular el daño por la barrena. El ensamble completo se coloca en el envase presurizado de confinamiento y se presuriza.

Flujo Axial. La presión de poro se aplica solamente al extremo sin perforar de la muestra. La tapa de fondo del extremo (ver Figura 16) distribuye el fluido a través del extremo de la muestra por medio de un sistema de ranuras y pantallas de acero. El ensamble completo se coloca en el envase presurizado de confinamiento y se presuriza.

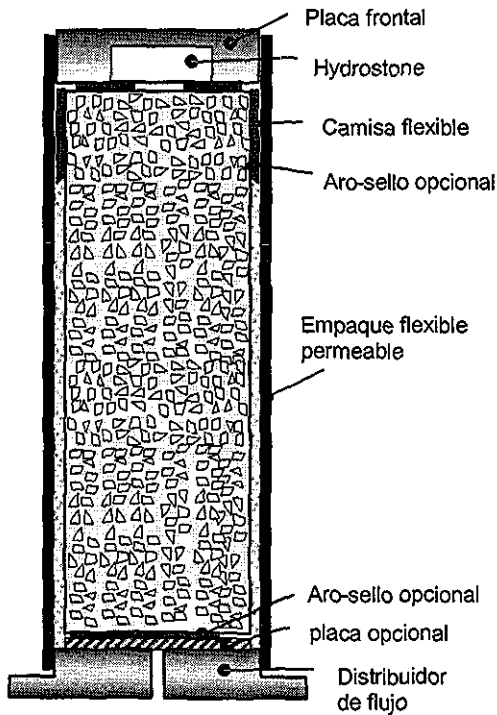


Figura 15 Geometría típica de flujo radial

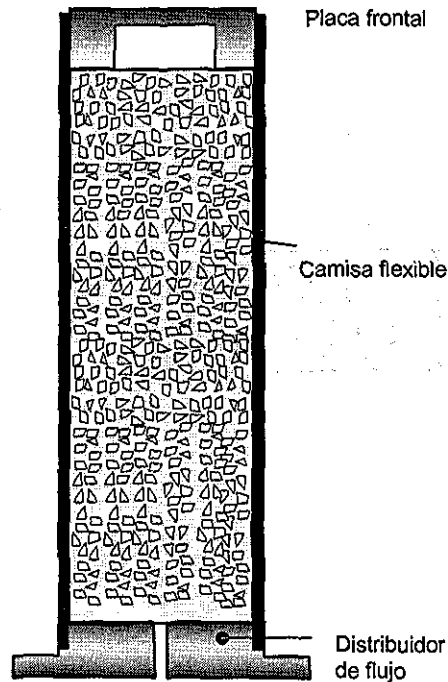


Figura 16 Geometría típica de flujo Axial

Equipo. La Figura 17 muestra un esquema del equipo típico de prueba.

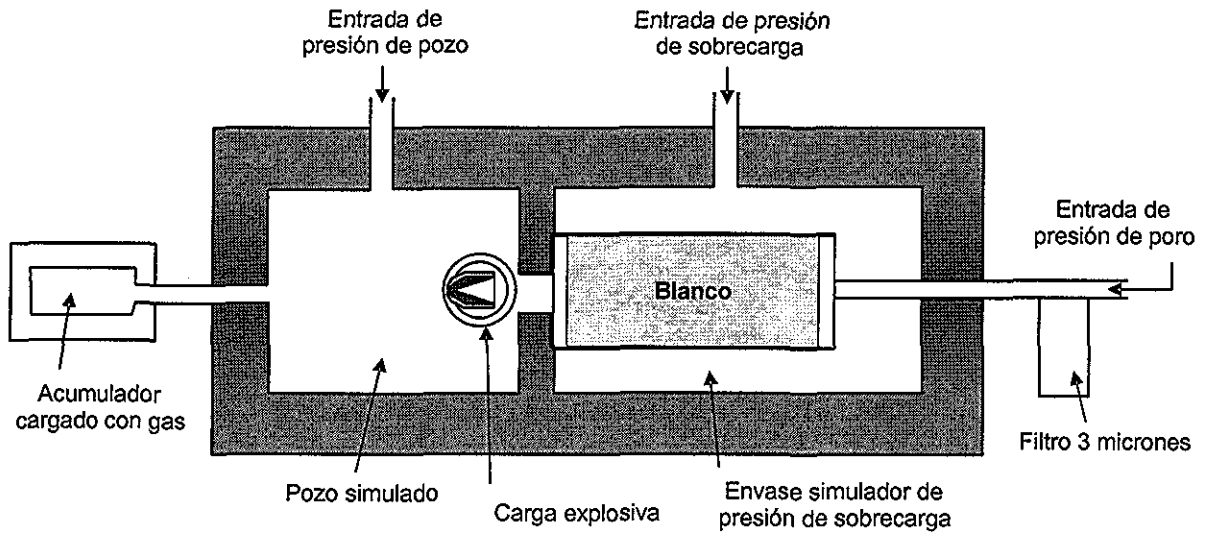


Figura 17 Esquema de un equipo típico de prueba sección 4, API RP 19B, 1ª Edición

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2. Factores del disparo que afectan la productividad del pozo

Los factores que afectan la productividad del pozo son:

- Geometría del sistema de disparo (Penetración, Fase, Densidad, Diámetro del agujero).
- La zona de daño debida al lodo de perforación.
- El establecimiento de la presión diferencial necesaria para la limpieza de las perforaciones.
- El fluido de terminación usado durante el disparo.

Mediante el análisis de las condiciones del pozo y la selección del sistema de disparo adecuado, se obtendrá la máxima producción del pozo.

2.1.- La Relación de Productividad

Para evaluar la potencialidad de un pozo, el estándar usual es el *Índice de Productividad* de una formación en agujero abierto sin alteración de permeabilidad por el lodo de perforación. El índice de productividad J , es el promedio de flujo Q , dividido por la diferencia de presión D_p entre la formación y el pozo:

$$J = Q / D_p \quad \text{B/D/lb/plg}^2 \quad (2.1)$$

Ya que el índice de productividad de una zona puede ser difícil de determinar, el efecto relativo de ciertos cambios en el sistema de disparo como son la penetración, fase, densidad, diámetro del agujero, daño del lodo, etcétera, pueden ser evaluados usando la *Relación de productividad*.

La Relación de Productividad se define como la producción de una zona entubada y disparada dividida por la producción que se obtendría de esa misma zona en agujero abierto, sin daño y con la misma caída de presión.

$$PR = \text{Pr od}_{disp} / \text{Pr od}_{agabto} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S_t} \quad (2.2)$$

En donde:

PR = Relación de productividad

$Prod_{disp}$ = Producción de una zona entubada y disparada

$Prod_{agabto}$ = Producción en la misma zona en agujero abierto

r_e = Radio externo del límite

r_w = Radio del pozo

S_t = daño total

El diseño ideal lograría una relación de productividad (PR) de 1.0 – un flujo de producción a través de las perforaciones igual al potencial de la formación en agujero abierto – aun después de que el 50 a 75% de las perforaciones se taponen.

Este objetivo es válido en terminaciones naturales, cuando no se requieran de procedimientos de estimulación posteriores y donde la producción de arena no sea un problema.

2.1.1. Efecto de la penetración y la densidad de cargas

El efecto de la penetración y la densidad de cargas son muy pronunciados en las primeras pulgadas de penetración. Arriba de 6 pulgadas la tendencia es menor pero es evidente la importancia de la penetración para mejorar la relación de productividad.

La densidad de cargas influye también en la relación de Productividad (RP) observando que para una densidad de 3 cargas/m es necesaria una penetración de 16 pulgadas para obtener una PR de 1.0 mientras que para una densidad de 13 c/m se necesitan solo 6 pulgadas.

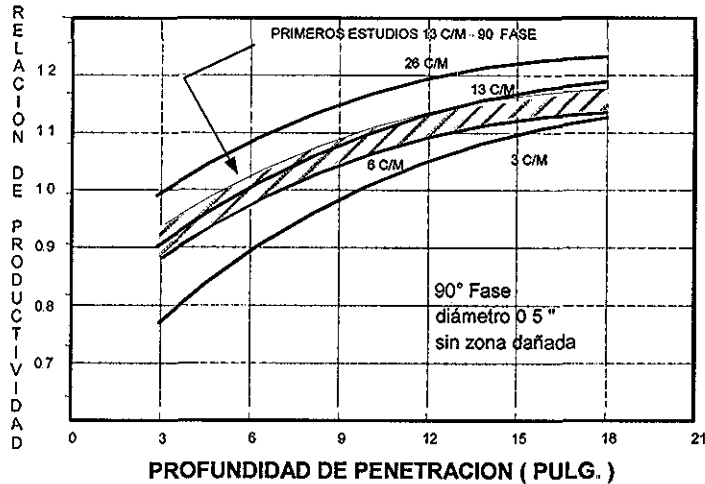


Figura 18 Efecto de la penetración y la densidad en la Relación de productividad

La gráfica supone un pozo sin daño, para el caso más real de un pozo con una zona de daño debida al fluido de perforación, la penetración mas allá de la zona de daño es relevante para mejorar la RP.

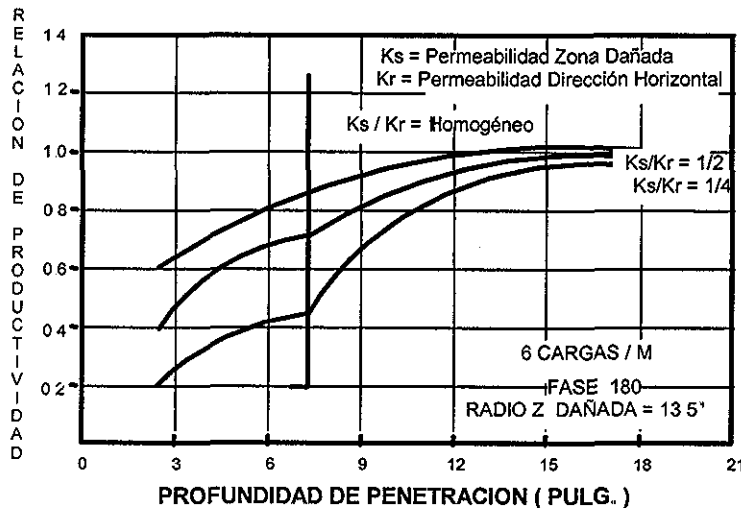


Figura 19 Efecto de la penetración y zona de daño en la Relación de productividad

Para el caso de tener una zona dañada se hace más evidente la importancia de la penetración del disparo.

Una densidad de 6 cargas/metro y 18 pulgadas de penetración es mas efectiva que 26 cargas/metro y 4 pulgadas de penetración.

En general, dentro de límites prácticos incrementar solo la densidad de las cargas no basta para contrarrestar los efectos combinados del daño a la permeabilidad debido al disparo y al fluido de perforación. Es por esto, que es necesario obtener una penetración más allá de la zona de daño.

2.1.2. Efecto de la fase

La fase angular entre perforaciones sucesivas es un factor importante. La Figura 20 muestra una reducción de un 10 - 12 % en la RP para sistemas de 0° y 90° con una misma penetración.

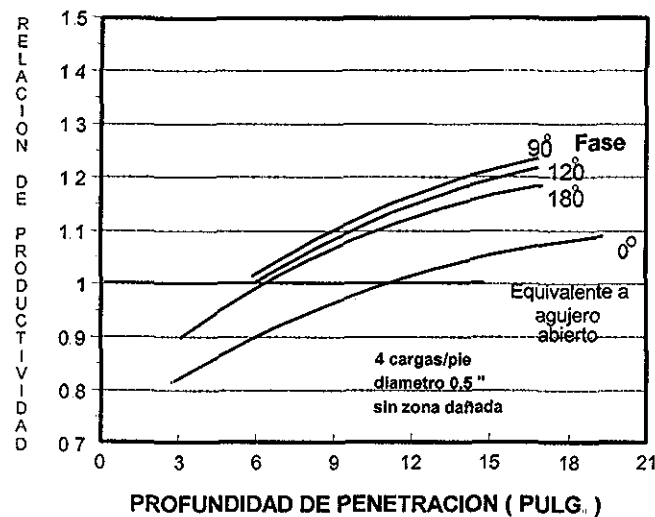


Figura 20 Efecto de la fase en la Relación de productividad

2.2.- Técnicas de disparo

La técnica de disparo óptima para lograr la mayor productividad del pozo depende principalmente de:

- 1.- Tipo de terminación del pozo
- 2.- Configuración del pozo
- 3.- Características de la formación
- 4.- Presiones o esfuerzos de la formación
- 5.- Extensión del daño de la formación.
- 6.- Fluido del pozo

En general podemos decir que la técnica de disparo tiene por objetivo obtener agujeros que presenten la menor resistencia al flujo en la interfase yacimiento-sistema perforado. Esto puede hacerse si:

- Se establecen las condiciones de pozo que refuercen el limpiado de los agujeros y,
- Se seleccionan cargas explosivas y técnicas para un mejor comportamiento del flujo

2.2.1. Factores Previos al Disparo

Existen otros factores que no dependen del sistema de disparo y que pueden tener tanta o mayor influencia en la producción del pozo, entre estos factores se encuentran:

- Daño en el Pozo
- Fluido de terminación
- Presión diferencial inicial

2.2.1.1. Zona de Permeabilidad alterada del pozo

Durante el proceso de perforación del pozo se causa un daño a la formación debido al lodo de perforación. Este daño se asocia al taponamiento de los poros alrededor del pozo.

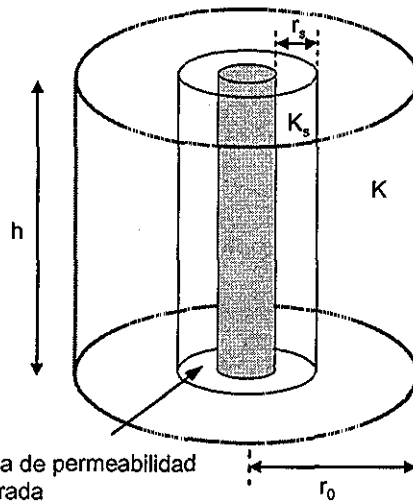


Figura 21 Zona de permeabilidad alterada del pozo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

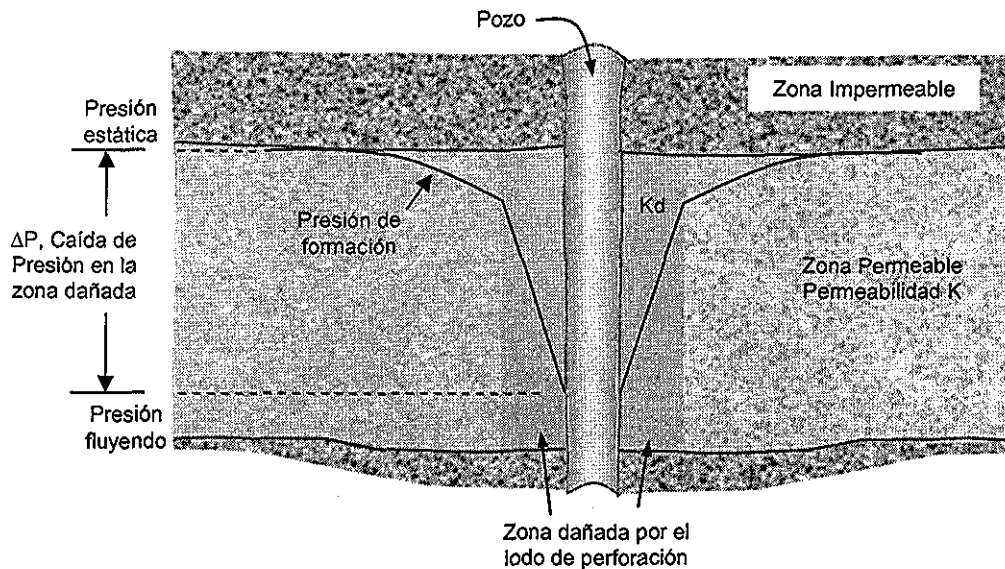


Figura 22 Caída de presión debida al daño por la perforación

La zona de daño se define en la figura, donde:

K_s = Permeabilidad de la zona de daño

r_c = Radio externo del limite

r_w = Radio del pozo

h = Intervalo de disparo

p = Presión

El daño del pozo, las perforaciones de las cargas, penetración parcial y la desviación provocan un cambio en la geometría radial del flujo que afecta la productividad del pozo.

Existe la tendencia de usar lodos que cumplan con el propósito inmediato de perforar segura y económicamente un pozo. Algunas veces no se piensa lo suficiente en los efectos del fluido sobre la productividad final del pozo.

El enjarre puede resolver el problema de la invasión del filtrado pero si no es removido completamente antes de depositar el cemento en el espacio anular, las partículas sólidas pueden ser arrastradas dentro del agujero por el jet. Si el fluido de perforación que depositó el enjarre no es completamente removido de las líneas superficiales, tubería de perforación, tubería de producción o el casing, se tiene un material disponible para taponar los agujeros y la formación aunque se use supuestamente un fluido limpio en la terminación.

Los enjarres son filtros que son selectivos en lo que pueden retener. Cualquier filtro permitirá el paso de partículas finas debajo de su punto de retención. Estas partículas son dañinas a la formación, especialmente a las de baja permeabilidad. Bajo algunas condiciones, estas partículas finas del fluido de perforación pueden afectar a las que existen en la formación.

El filtrado puede causar una serie de problemas que reducen la productividad inicial o a largo plazo de la formación. El bloque del agua o una producción excesiva del agua es uno de ellos, pero es quizás el mas fácil de rectificar. Los problemas reales ocurren cuando el filtrado es incompatible con los fluidos de formación. Se pueden formar precipitados en la formación que pueden ser muy grandes para fluir y por lo tanto reducen la permeabilidad. El filtrado puede reaccionar con los fluidos de formación para formar emulsiones que reducirían la permeabilidad. Otras reacciones pueden cambiar la mezcla de agua y consecuentemente cambiar una formación "mojada" con agua a una "mojada" con aceite. Esto alteraría tanto la permeabilidad como la porosidad. Los filtrados pueden también combinarse con los fluidos de formación cambiando su viscosidad.

2.2.1.2. El fluido de terminación

El fluido de terminación es de primordial importancia para obtener óptimos resultados. Durante la perforación del pozo y la cementación del Casing se produce un daño que reduce la productividad, pero supongamos que se ignora éste. ¿Qué podría causar aún más daño en una terminación con un fluido compatible y una presión negativa?

Ya se ha mencionado que es deseable tener un fluido limpio en la zona del disparo. Si existe algún material extraño en el fluido, puede ser empujado dentro de la perforación por el Jet ó un pequeño taponamiento sería el resultado

La condición de presión bajo-balanceada se cumple antes de la operación. El Jet de la carga genera gases de alta presión asociadas con la explosión. Hay indicios reales de que el fluido alrededor de la

carga es separado, ya sea por elevación en pozos someros ó por compresión en pozos con columnas altas de fluido. Cuando la burbuja de gas se contrae al enfriarse, el frente del fluido es lanzado dentro de la perforación. Momentáneamente se crea una condición de sobre-balance con fuerzas de impacto. Si el fluido no es completamente limpio, las partículas serán adheridas a las paredes del agujero y podría haber invasión de extensión limitada. SUMAN demostró que un limpiado por brote de presión incrementa la productividad aún cuando la terminación sea un fluido supuestamente limpio. El consideró la mayor parte del daño debido a la carga aunque pudiera ser un resultado de la contaminación durante la perforación del pozo.

Hay dos clases de materiales para dar peso a los fluidos de terminación. Solubles en agua y solubles en ácidos. Los primeros son partículas que están suspendidas en una solución súper saturada. Los últimos son usualmente carbonatos que son solubles en ácido. En cualquier caso, las partículas son elementos que pueden taponar hasta que son removidos por el flujo de limpieza con la solución apropiada. Las partículas solubles en agua serán removidas durante la producción si hay agua en la formación. Si no, sería necesario inyectar una mezcla bajo-saturada. La remoción efectiva de las partículas solubles en ácido necesitaría inyección, En cualquiera de los casos, si hay incompatibilidad del fluido inyectado se provocaría daño a la formación.

Las pistolas bajadas a través de tubería tienen una penetración limitada debido a su tamaño. El diámetro del agujero se sacrifica para obtener máxima penetración. La perforación resultante, especialmente en formaciones duras, es fácilmente taponada y posiblemente no alcance a librar la zona dañada durante la perforación del pozo.

2.2.1.3. Presión diferencial previa al disparo

En una terminación con presión de formación menor que la presión hidrostática se crea una presión diferencial sobre-balanceada. Después del disparo y antes de que fluya el pozo, se forman tapones con los residuos de las cargas.

Después de dejar fluir el pozo, es posible que aun se tenga una perforación parcialmente taponada y una zona compactada de baja permeabilidad.

Cuando se tiene una presión de formación mayor que la hidrostática se crea una presión diferencial bajo-balanceada. En este caso, los residuos de las cargas y la zona comprimida podrían ser expulsados por la acción del brote de fluido de terminación.

Las técnicas para disparar con presión diferencial negativa, en la cual las pistolas son disparadas bajo condiciones de presión menor en el pozo que la del yacimiento es un factor crítico. El brote de presión limpia las perforaciones. Si a esto agregamos el uso de cargas perforadoras de alto desempeño, se obtiene el resultado óptimo.

En una formación productiva puede haber variaciones en la permeabilidad y otras propiedades físicas dentro de la zona. Esto puede originar diferentes grados de efecto pelicular y daño al pozo. Cuando la zona es disparada, los agujeros no necesariamente responden igual al flujo, algunos que están localizados en regiones de mas alta permeabilidad pueden limpiarse mejor; es decir, responderán a mas bajas presiones que aquellas que están en los estratos de menor permeabilidad donde el daño efectivo es mayor.

El disparo con presión bajo balanceada es por lo tanto esencialmente una técnica para un "brote de flujo" del sistema perforado, que ayuda a asegurar que la mayoría de las perforaciones en el sistema se limpien apropiadamente manteniéndose la densidad de perforaciones apropiada.

Disparar el pozo con una presión diferencial a favor de la formación es recomendable para obtener la limpieza de los agujeros. Sin embargo, usar presiones diferenciales muy altas es inadecuado ya que arriba de cierto valor no se obtiene ninguna mejora en el proceso de limpieza. *Una presión diferencial excesiva puede provocar arenamiento o aporte de finos de formación que impedirán el flujo a través de la perforación.*

2.2.2. Daño por el disparo

El proceso de perforación de formaciones permeables y porosas con las cargas moldeadas crea una "película" que se opone al flujo en el agujero. El jet penetra la formación a alta velocidad, desplazando radialmente el material de formación, creándose una zona triturada alrededor del agujero y reduciendo la permeabilidad original.

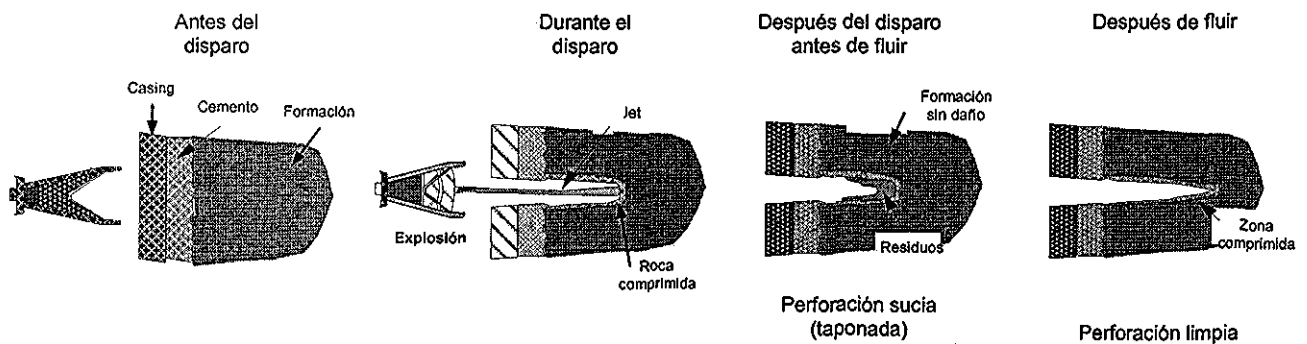


Figura 23 Daño a la formación debido al proceso de disparo

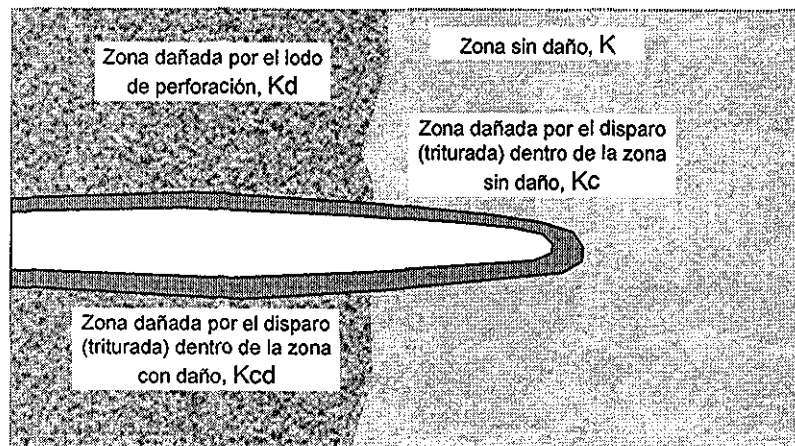


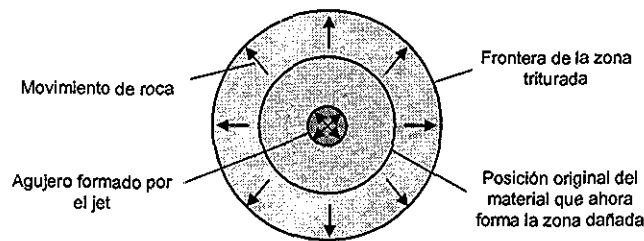
Figura 24 Zonas con diferentes permeabilidades

2.2.2.1. Formación de la zona triturada

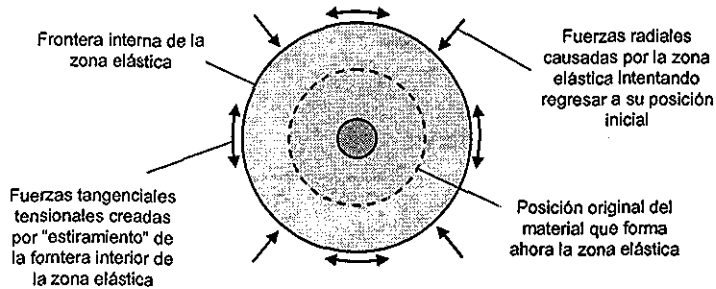
Según Halleck ⁽⁶⁾, el daño mecánico observado es causado por la combinación de tres mecanismos: (1) Ondas de esfuerzo en la matriz y el fluido en los poros debido al impacto del jet, (2) Fuerzas de arrastre y efectos poro elásticos asociados con el brote de flujo y (3) Concentración de esfuerzos de sobrecarga alrededor del túnel.

Una investigación conducida por Pucknell y Behrmann ⁽⁷⁾, concluye que la densidad y porosidad de la zona dañada por el disparo (al menos en rocas saturadas) es esencialmente la misma que para las rocas sin daño. La zona dañada, contrariamente a lo sugerido en trabajos anteriores, no está compactada. El daño es debido a la destrucción de los poros grandes. El volumen perdido de estos poros es reemplazado por micro fracturas creadas cuando los granos de la roca se fracturan por la penetración del jet. Esta reducción en el tamaño promedio de los poros causa una reducción de la permeabilidad dentro de la zona dañada. La figura siguiente resume el proceso:

La perforación se forma "empujando" la roca circundante hacia afuera:



Después de la perforación, los esfuerzos tratan de colapsar la perforación:



Estos esfuerzos pueden causar fracturamientos:

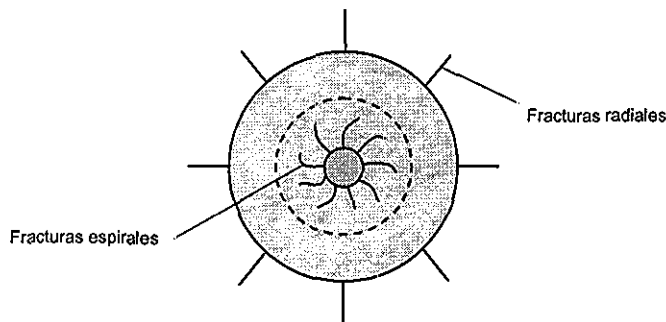


Figura 25 Mecanismo de creación de la zona dañada por el disparo ⁽⁷⁾

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

2.2.2.2. Teoría de la formación de la zona triturada

Ecuaciones de poro elasticidad

Yew y Liu ⁽⁸⁾, determinaron un método para estimar la presión del agujero o densidad de lodo que se requiere para mantener estable un pozo desviado. Para lo anterior establecieron las ecuaciones poro elásticas aplicables.

El campo de desplazamiento de un medio poro elástico lleno con fluido puede describirse por, u_i , el desplazamiento de la estructura sólida y U_i , el desplazamiento del fluido:

$$d_i = U_i - u_i \quad (2.3)$$

La componente de la deformación de la estructura sólida es:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2.4)$$

Por consiguiente, la deformación volumétrica del fluido es:

$$\Delta = d_{i,j} \quad (2.5)$$

La ecuación general esfuerzo-deformación de Biot de un medio poroso lleno con fluido es:

$$\sigma_{i,j} = C_{ijkl} + M\Delta\delta_{ij} \quad (2.6)$$

$$-p = M_{ij}\varepsilon_{ij} + M\Delta \quad (2.7)$$

Donde:

σ_{ij} componente del esfuerzo de la estructura sólida

p presión del fluido en los poros

C_{ijkl} Constantes del material de la estructura sólida

M_{ij} Constante de Biot que relaciona la compresibilidad del fluido

M Constante de Biot que relaciona la compresibilidad de la estructura sólida

Si el material es isotrópico, las ecuaciones 6 y 7 se reducen a:

$$\sigma_{i,j} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - \alpha_v p\delta_{ij} \quad (2.8)$$

$$\Delta = -\left(1 + \frac{\alpha_v}{\phi_v}\right)e - \frac{p}{M} \quad (2.9)$$

En donde: $e = \varepsilon_{kk} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ es la dilatación del sólido

G Módulo de corte del sólido

λ Constante de Lamé del sólido

α_v y M Constantes de Biot

ϕ_v porosidad

δ_{ij} Delta Kronecker

Debido a que las constantes de Biot involucradas en las ecuaciones 8 y 9 son difíciles de medir en laboratorio, se pueden obtener estas ecuaciones de forma que estas constantes estén de manera más conveniente para aplicaciones de ingeniería:

$$\sigma_{i,j} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda e\delta_{ij} - (1 - \phi_v - \beta_v)p\delta_{ij} \quad (2.10)$$

$$\Delta = -\frac{1 - \beta_v}{\phi_v} e - \frac{1}{K_f} p \quad (2.11)$$

En donde
$$\beta_v = \frac{K(\text{módulo volumétrico estructura sólida})}{K_s(\text{módulo volumétrico material entre poros})}$$

$K_f = M$ Módulo volumétrico del fluido en los poros

Las ecuaciones 10 y 11, que incluyen tanto a la compresibilidad de la estructura sólida como a la del fluido, son las *ecuaciones constitutivas modificadas para el medio poroso lleno de fluido*.

La ecuación de la ley de Darcy para el movimiento de un fluido en un medio poroso, considerando un medio isotrópico es:

$$\phi_v \frac{\partial d_i}{\partial t} = -\frac{k}{\mu} p_i \quad (2.12)$$

En donde $k =$ Permeabilidad del medio poroso

$\mu =$ viscosidad del fluido en los poros

Solución del frente de onda cilíndrico aplicando el método característico

Yew y Zhang ⁽³⁾, obtuvieron una explicación teórica del fenómeno de formación de la zona triturada, analizando la onda de choque producida por las cargas y usando las ecuaciones poro elásticas dinámicas de Biot para modelar la roca saturada con fluido.

El comportamiento del frente de la onda de choque producido por la perforación con la carga moldeada se analiza usando el método característico.

El jet fluido producido por la carga explosiva ejerce un pulso uniforme de esfuerzo $\sigma_r(r_w, t) = -p_a$ alrededor del agujero perforado generando una onda cilíndrica de choque. Las propiedades de las ondas de choque pueden extraerse de las ecuaciones 10 y 11 aplicando el método característico. El método da las siguientes líneas características en el plano r-t:

$$dr = 0 \quad (2.13)$$

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_{1,2} = v_{1,2} \quad (2.14)$$

Las líneas rectas relacionadas a v_1 y v_2 se denominan como las líneas características primera y segunda.

Las velocidades de la onda de choque v_1 y v_2 pueden ser expresadas como:

$$v_{1,2} = \left(\frac{2A}{B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}\right)^{1/2} \quad (2.15)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\phi(3K + 4G)}{3(\phi\rho_f + \rho_a)} \\
 B &= \frac{3K + 4G}{3K_f} + \frac{\phi^2\rho_f\rho_a}{(\phi\rho_f + \rho_a)^2} + \frac{(1-\phi)\phi\rho_s}{\phi\rho_f + \rho_a} + \frac{1}{\phi}\left(1-\phi-\beta+\frac{\phi\rho_a}{\phi\rho_f + \rho_a}\right)^2 \quad (2.16) \\
 C &= \frac{1}{K_f} \left[\frac{\phi\rho_f\rho_a}{\phi\rho_f + \rho_a} + (1-\phi)\rho_s \right]
 \end{aligned}$$

Las velocidades v_1 y v_2 se denominan velocidad de la primera y segunda onda dilatante, respectivamente.

Sea v_s la velocidad de la partícula sólida y v_f la velocidad de la partícula fluida, las condiciones para el primer frente de choque son:

1. Condición cinemática:

$$\begin{aligned}
 v_s &= -v_1 e_r \\
 v_f &= -v_1 e_r
 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Donde: $e_r = dU_r / dr$ es la deformación radial del fluido.

2. Conservación del momentum lineal:

$$\sigma_r - \phi p = -v_1 \left[(1-\phi)\rho_s v_s + \phi\rho_f v_f \right] \quad (2.18)$$

3. Continuidad del desplazamiento a través del frente de choque:

$$\begin{aligned}
 u_r \text{ (antes del frente de choque)} &= u_r \text{ (después del frente de choque)} = 0 \\
 U_r \text{ (antes del frente de choque)} &= U_r \text{ (después del frente de choque)} = 0
 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Usando las ecuaciones anteriores, la ecuación diferencial a lo largo de las líneas características. Después de manipulaciones algebraicas muy extensas, queda como:

1. A lo largo de la primera línea característica:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + M_1 \frac{\sigma_r}{r} + M_2 \sigma_r = 0 \quad (2.20)$$

2. A lo largo de la segunda línea característica:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + N_1 \frac{\sigma_r}{r} + N_2 \sigma_r = 0 \quad (2.21)$$

La derivación de las ecuaciones anteriores y de las expresiones para las constantes M_1 , M_2 , N_1 , N_2 puede consultarse en el artículo de referencia.

Las soluciones para las ecuaciones (20) y (21) son::

2. Para la primera onda:

$$\sigma_r = C_1 r^{-M_1} e^{-M_2 r} \quad (2.22)$$

3. Para la segunda onda:

$$\sigma_r = C_2 r^{-N_1} e^{-N_2 r} \quad (2.23)$$

Las constantes C_1 y C_2 se determinan de las condiciones de frontera en el agujero, es decir:

$$\sigma_r(r_w, t) = -(1 - \phi) p_a \delta(t) \quad (2.24)$$

$$p(r_w, t) = p_a \delta(t) \quad (2.25)$$

Donde $\delta(t)$ es la función delta.

Ya que el primer y segundo frente de onda coinciden en $r = r_w$, las constantes C_1 y C_2 de las ecuaciones (22) y (23) pueden ser determinadas (ver detalle en referencia):

1. Para la primera onda:

$$\frac{\sigma_r}{p_s} = -\frac{1 + (1 - \phi)n_3}{n_3 - m_3} \left(\frac{r_w}{r}\right)^{M_1} e^{-M_2(r-r_w)} \quad (2.26)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{p_s} = -\frac{[1 + (1 - \phi)n_3](1 - 2Gm_4)}{n_3 - m_3} \left(\frac{r_w}{r}\right)^{M_1} e^{-M_2(r-r_w)} \quad (2.27)$$

$$\frac{p}{p_s} = -\frac{m_3[1 + (1 - \phi)n_3]}{n_3 - m_3} \left(\frac{r_w}{r}\right)^{M_1} e^{-M_2(r-r_w)} \quad (2.28)$$

2. Para la segunda onda:

$$\frac{\sigma_r}{p_s} = \frac{1 + (1 - \phi)m_3}{n_3 - m_3} \left(\frac{r_w}{r}\right)^{N_1} e^{-N_2(r-r_w)} \quad (2.29)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{p_s} = \frac{[1 + (1 - \phi)m_3](1 - 2Gn_4)}{n_3 - m_3} \left(\frac{r_w}{r}\right)^{N_1} e^{-N_2(r-r_w)} \quad (2.30)$$

$$\frac{p}{p_s} = \frac{n_3[1 + (1 - \phi)m_3]}{n_3 - m_3} \left(\frac{r_w}{r}\right)^{N_1} e^{-N_2(r-r_w)} \quad (2.31)$$

En la primera onda, la amplitud de los esfuerzos en el sólido es más alta que la presión en el fluido en los poros. En la segunda onda, la amplitud de los esfuerzos en el sólido es baja mientras que la presión en el fluido en los poros es mucho más alta. Físicamente, en la primera onda los movimientos del sólido y el fluido están en fase, mientras que en la segunda onda están fuera de fase. El movimiento fuera de fase genera un esfuerzo radial tensional débil en la segunda onda. Cuando no hay fluido en los poros, se puede demostrar que la segunda onda se desvanece y la primera onda se reduce a la onda elástica equivalente.

Las constantes de las ecuaciones (20) a la (31) se deducen en el apéndice del artículo referencia:

$$m_1 = \frac{v_1}{\frac{\rho_s}{\phi\rho_f + \rho_s} + \frac{1-\phi-\beta}{\phi}} \left[\frac{3K+4G}{3v_1^2} - \frac{\phi\rho_f\rho_s}{\phi\rho_f + \rho_s} - (1-\phi)\rho_s \right] \quad (2.32)$$

$$m_2 = \frac{1}{\phi\rho_f + \rho_s} \left(\frac{m_1}{v_1} + \phi\rho_f \right) \quad (2.33)$$

$$m_3 = \frac{1-v_1^2[(1-\phi)\rho_s - (1-\phi-\beta)\rho_f] \frac{3}{3K+4G}}{\phi + v_1^2[(1-\phi)\rho_s - (1-\phi-\beta)\rho_f] \frac{3(1-\phi-\beta)}{3K+4G}} - v_1^2 \frac{\phi\rho_f}{K_f} \quad (2.34)$$

$$m_4 = \frac{3}{3K+4G} [1 + (1-\phi-\beta)m_3] \quad (2.35)$$

$$m_5 = \frac{(1-\phi-\beta)}{\phi} m_4 + \frac{m_3}{K_f} \quad (2.36)$$

$$M_1 = \frac{\left(k + \frac{4}{3}G \right) m_4 + v_1 m_1 m_5 - \frac{1-\phi-\beta}{\phi} v_1 m_1 m_4}{1 + \left(\frac{3K+4G}{3v_1} - \frac{1-\phi-\beta}{\phi} m_1 \right) v_1 m_4 + v_1 m_1 m_5 + \phi(m_2 - 1)m_3} \quad (2.37)$$

$$M_2 = \frac{v_1 m_2 (m_4 + m_5) \left(\frac{\phi^2}{k/\mu} \right)}{1 + \left(\frac{3K+4G}{3v_1} - \frac{1-\phi-\beta}{\phi} m_1 \right) v_1 m_4 + v_1 m_1 m_5 + \phi(m_2 - 1)m_3} \quad (2.38)$$

Un ejemplo numérico con datos simulados se hizo en el artículo de referencia. Se observó lo siguiente en los resultados:

Datos:

Módulo de corte del sólido	$G = 7.6925 \times 10^9$ Pa (1.1157×10^6 lbs/plg ²)
Módulo volumétrico del sólido	$K = 1.0700 \times 10^{10}$ Pa (1.5517×10^6 lbs/plg ²)
Módulo volumétrico del fluido en poros	$K_f = 3.0000 \times 10^9$ Pa (4.3511×10^6 lbs/plg ²)
Porosidad	$\phi = 0.1$
Constante de Biot	$\beta = 0.8$
Movilidad del fluido	$\kappa/\mu = 2 \times 10^{-5}$ m ² /MPa-s (2.1374×10^{-4} plg ² /lbs/plg ² -s)
Densidad del sólido	$\rho_s = 2.3560 \times 10^4$ N/m ³
Densidad del fluido en los poros	$\rho_f = 9.8020 \times 10^3$ N/m ³
Densidad de masa agregada	$\rho_{sa} = 0$ N/m ³

1. La amplitud de las ondas de esfuerzo y la onda de presión de poro se atenúan muy rápidamente conforme la onda se propaga radialmente hacia fuera. Además la rapidez de atenuación de la segunda onda es mucho mayor que para la primera onda.

2. Tanto el esfuerzo radial (σ_r) y circunferencial (σ_θ) de la primera onda son compresivos. La alta amplitud de los esfuerzos junto con la alta presión de poro causa fracturas transversales del material cercano al agujero perforado.
3. Conforme el frente compresivo de choque de la primera onda alcanza las fronteras del espécimen, se refleja como una onda tensional causando fracturas radiales a lo largo de la circunferencia del espécimen.
4. La Figura 26 muestra también tres fracturas grandes que corren radialmente a través del espécimen. Estas fracturas no pueden ser causadas por la onda reflejada como se describió en el párrafo anterior. Es posible que estas fracturas puedan haber sido causadas por los gases a alta presión producidos por la carga explosiva, ya que el gas es contenido por la cámara que simula el agujero del pozo.
5. La amplitud de los esfuerzos radial (σ_r) y circunferencial (σ_θ), para el segundo frente de onda es baja. En esta onda, el esfuerzo radial es tensional mientras que el esfuerzo circunferencial es compresivo. La amplitud del pulso de presión en la segunda onda es casi cuatro veces más alto que el pulso de presión de la primera onda. Debido a su alta presión y bajos esfuerzos, el paso del frente de la segunda onda pudo haber causado el colapso de la estructura de poros en el medio rocoso.
6. La distribución de densidades muestra pequeños cambios. Esto puede deberse al hecho de que el medio poroso estaba saturado con fluido lo cual mantuvo un pequeño cambio dilatacional.

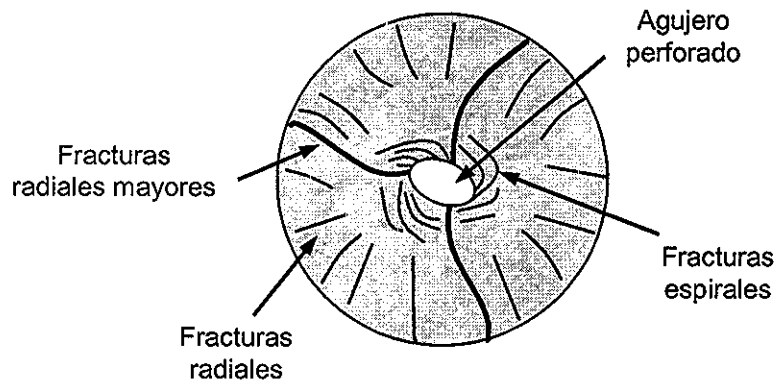


Figura 26 Núcleo de 0.1016 m (4 plgs.) disparado con una carga de 22-g

2.3.- Tipo de terminación del pozo

Dependiendo de las características de la formación o roca productora se puede escoger un método de terminación:

- a. Terminación Natural
- b. Control de Arena
- c. Fracturamiento hidráulico

Cuando la roca productora es consistente y tiene una permeabilidad que permite el flujo natural de los fluidos contenidos en ella se termina de manera natural el pozo. En las terminaciones naturales no se necesita estimulación o control de arena. El objetivo es incrementar la *relación de productividad*

Se debe establecer un programa de disparo para remover o reducir cualquier impedancia al movimiento del fluido deseado. Estas restricciones pueden existir en la zona comprimida por el disparo o en la zona dañada durante la perforación. La zona dañada es una región que rodea la pared del pozo en la cual la formación pudo haber sido alterada durante la perforación (ver apéndice). Por ejemplo, cuando el fluido de perforación y el agua del cemento entran en la formación pueden depositar materia sólida, causar dilatación de la arcilla e inducir precipitación química. Esto reduce el tamaño efectivo de los poros disponibles para flujo del fluido.

Si la formación productora no es consistente y existe la probabilidad de que aporte finos de formación (arenas no consolidadas) se deberá optar por una técnica que permita evitar o controlar la producción de arena.

El objetivo en las operaciones para *control de arena* es prevenir que la formación alrededor de la perforación se deteriore. Si esto ocurre, los materiales resultantes bloquean el agujero y pueden tapan la tubería de revestimiento y tubería de producción.

En formaciones no-consolidadas, puede ocurrir el arenamiento si hay una caída sustancial entre la formación y el pozo. Ya que esta caída de presión es inversamente proporcional a la sección transversal del agujero hecho por la carga, la probabilidad de arenamiento puede reducirse aumentando el área perforada total. Entre mas grande sean la densidad de cargas y el diámetro del hoyo, mayor será el área perforada.

Algunas formaciones requieren de ser fracturadas para mejorar el flujo de fluidos a través de ella. El *fracturamiento hidráulico* es un medio de incrementar la producción y aunque inicialmente se usó casi exclusivamente en yacimientos de baja permeabilidad recientemente este método de terminación se ha usado en yacimientos con alta permeabilidad para mejorar la productividad y/o control de arena.

Las operaciones de estimulación incluyen acidificación y fracturamiento hidráulico. El objetivo es incrementar el tamaño y número de caminos por los que el fluido puede moverse de la formación al pozo. Ambas operaciones requieren de la inyección a la formación de grandes volúmenes a altas presiones.

En las formaciones que requieren estimulación, el diámetro y distribución de los agujeros son importantes. Se debe seleccionar diámetros y densidades para controlar la caída de presión a través de las perforaciones para reducir la demanda del equipo de bombeo.

2.3.1. Importancia relativa de los factores de la geometría del disparo

Las características de la formación y los objetivos de la terminación determinan la jerarquía de los factores geométricos del sistema de disparo. Las condiciones del pozo, por otro lado, determinan usualmente el tamaño y tipo de pistola que puede usarse y pueden afectar también el éxito de la operación de disparo.

2.3.2. Heterogeneidades de la formación

El diseño efectivo de disparo considera las heterogeneidades comunes de la formación. La Tabla 3 muestra la jerarquía de los factores geométricos del sistema de disparo en función de las heterogeneidades de la formación:

Anisotropía. La mayoría de las rocas tienen una permeabilidad vertical menor que la permeabilidad horizontal por lo que son anisotrópicas. Esta condición afecta la relación de productividad, siendo la reducción de la RP mucho menor para altas densidades. *Una manera efectiva de contrarrestar los efectos adversos de la anisotropía es incrementando la densidad de los disparos.*

Laminaciones de arcilla. *Si se tienen laminaciones de arcilla, es importante obtener la mayor densidad de cargas por metro para aumentar la probabilidad de perforar las formaciones productoras intercaladas*

Fracturas naturales. Muchos yacimientos tienen uno o más conjuntos de fracturas naturales que proveen de una alta permeabilidad aunque la permeabilidad de la matriz sea baja. La productividad del intervalo disparado depende de la comunicación hidráulica entre las perforaciones y la red de fracturas y varía con el tipo, orientación e intervalo de las fracturas. Los parámetros del disparo tienen importancias variables en diferentes sistemas de fracturas. Para el caso de yacimientos fracturados:

1. La productividad depende del número de intersecciones disparos - fractura
2. El número de intersecciones disparos - fractura depende principalmente de la geometría de las fracturas, características de las pistolas y del ángulo de disparo. Si fuera posible conocer la geometría de la red de fracturas y orientar la pistola, sería recomendable usar una pistola con el mínimo de fases apuntada perpendicularmente a las direcciones de las fracturas.
3. En el caso más probable de que se desconozca la orientación de la red de fracturas o no poder orientar la pistola, *la probabilidad de interceptar fracturas se incrementa con la penetración, densidad de disparos y número de fases (En ese orden).*

Factor Geométrico	Permeabilidad isotrópica	Permeabilidad anisotrópica	Laminaciones de arcilla	Fractura natural	Daño al pozo
Penetración	1	2	2	1	1
Densidad efectiva	2	1	1	3	2
Fase	3	4	3	2	3
Diámetro de agujero	4	3	4	4	4

Tabla 4 Importancia relativa de los 4 factores geométricos

La Tabla 5 muestra el orden de importancia de los factores geométricos de acuerdo al tipo de terminación.

Factor Geométrico	Natural consolidada	Estimulada consolidada	Control de arena no consolidada	Remedio al daño
Penetración	1 ó 2	4	4	1
Densidad efectiva	1 ó 2	2	2	2
Fase	3 ó 4	1	3	3
Diámetro de agujero	3 ó 4	3	1	4

Tabla 5 Importancia relativa de los 4 factores geométricos de acuerdo al tipo de terminación

En conclusión, se deberá seleccionar un sistema de disparo en función del tipo de terminación y las heterogeneidades de la formación. De los factores geométricos el de mas jerarquía en la mayoría de los casos es la penetración (Excepto en Control de arena y cuando se pretende hacer una estimulación), además de que contribuye mas al remedio al daño del pozo.

2.3.2.1. El Control de Arena

De la Tabla 5 podemos ver que el factor geométrico de mayor relevancia es el diámetro de agujero y en segundo nivel de prioridad, la densidad efectiva de agujeros. Este criterio deberá usarse con cuidado ya que investigaciones recientes sugieren, en algunos casos, emplear pistolas de alta penetración para evitar el arenamiento:

López de Cárdenas, Carbonell y Sulbaran⁽⁹⁾, realizaron en 1999 un interesante estudio en Venezuela en donde proponen una novedosa técnica para evitar el arenamiento. Esta técnica se usó con éxito en las arenas del Eoceno de Lago Maracaibo. Estas arenas son competentes y consolidadas pero están sujetas a esfuerzos altos debido a un ambiente tectónico complejo. Un estudio del campo mostró un alto contraste entre el esfuerzo horizontal mínimo y máximo y de igual forma, entre el esfuerzo horizontal mínimo y el esfuerzo vertical. En consecuencia, el campo tenía una alta producción de arena. Para minimizar el arenamiento, se han usado diferentes técnicas como el fracturamiento hidráulico, la perforación de alto ángulo y recientemente, la técnica de "Disparo orientado y de óptima fase", OPOP.

Las propiedades geomecánicas se determinaron a partir de medidas en laboratorio y de los registros de velocidades de onda compresional y de cizallamiento o transversal. Las propiedades mecánicas críticas necesarias para estimar el esfuerzo horizontal máximo (σ_H) fueron el módulo de Young (E), la relación de Poisson (ν), el coeficiente de Biot (α) y el factor de intensidad de esfuerzo crítico (K_{IC}). La Tabla 6, muestra los valores:

E (psi)	ν	α	K_{IC} (psi*plg ^{1/2})	UCS (psi)
3 x 10 ⁶	0.3	0.9	1250	8000

Tabla 6 Propiedades mecánicas promedio del yacimiento

La magnitud de los esfuerzos in-situ se obtuvieron de la manera siguiente: el esfuerzo vertical (σ_v) se obtuvo integrando la densidad de los registros de densidad; el esfuerzo horizontal mínimo (σ_h) se obtuvo de pruebas de microfractura, minifractura y goteo; el esfuerzo horizontal máximo (σ_H) se estimó por medio de la teoría de poro elasticidad y mecánica de fracturas. Los resultados se muestran en la Tabla 7:

σ_v/Z (psi/pie)	σ_H/Z (psi/pie)	σ_h/Z (psi/pie)
1.10	1.35-1.40	1.05-1.10

Tabla 7 Gradientes de esfuerzo in-situ

Una observación es que el esfuerzo horizontal máximo σ_H es el mayor de los tres, $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ como resultado de la tectónica del campo.

Mediante técnicas de modelaje e información de núcleos, se estimó la dirección de σ_H con el fin de disparar evitando las direcciones de alto contraste entre los esfuerzos horizontales y verticales.

Se evaluó la estabilidad del túnel de la perforación usando un modelo elástico-plástico, análisis mediante elementos finitos y el criterio de falla de Mohr-Coulomb de pruebas de laboratorio. Conforme se rota el túnel del disparo hay un ángulo crítico y medido desde la dirección de máximo esfuerzo, donde el túnel es aún estable. Este ángulo se usa para seleccionar la fase y orientación de la pistola.

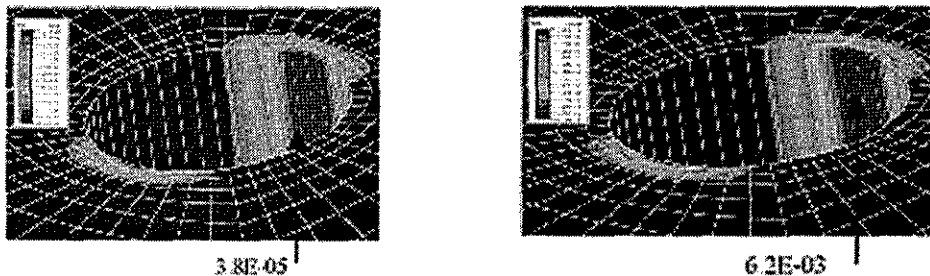


Figura 27 Gráficos de contorno de deformación plástica equivalente de una cavidad disparada (a) en la dirección de máximo esfuerzo in situ (σ_H) y (b) con un ángulo de $\pm 25^\circ$ con respecto a σ_H

Las recomendaciones para prevenir el arenamiento dadas en este artículo son:

1. Determinar la dirección y magnitud de los esfuerzos in-situ
2. Definir la zona de estabilidad de la perforación del disparo
3. Seleccionar apropiadamente cargas de alta penetración
4. Usar una densidad para una productividad suficiente
5. Seleccionar una fase que ofrezca suficiente distancia entre agujeros del disparo para evitar falla de la roca
6. Orientar las pistolas para evitar disparar en la dirección donde los túneles de la perforación serían menos estables.
7. Disparar con suficiente bajo balance

La Figura 28a, muestra el patrón de agujeros de una pistola TCP estándar y una especialmente cargada.

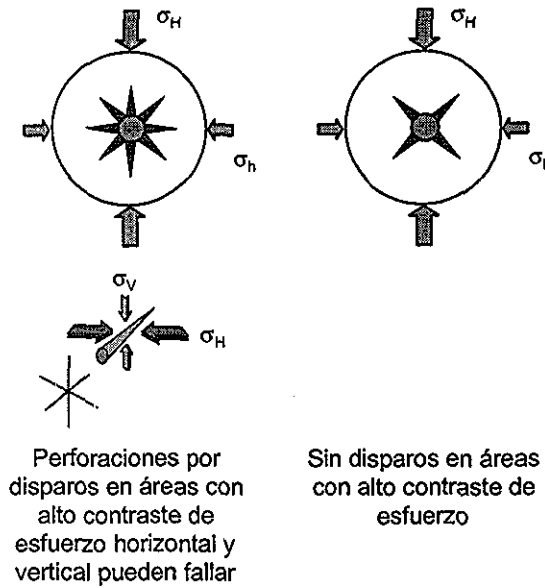


Figura 28 (a) Pistola TCP estándar y con fase especial

Una distancia mínima, δ_{min} entre agujeros se calculó para evitar una posible falla de la roca debido a la interacción entre perforaciones, esta resultó ser de aproximadamente tres veces el diámetro estimado de la zona triturada.

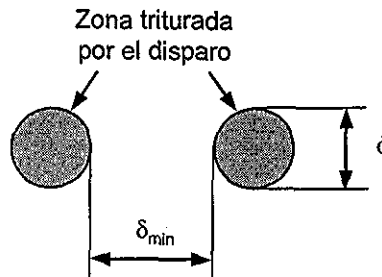


Figura 28 (b) Distancia mínima entre perforaciones del disparo

Procedimiento para evitar arenamiento

En la referencia (1) páginas 6.19 a 6.21 se explica un procedimiento para disparar en arenas no consolidadas y evitar el arenamiento.

2.4.- Características de la formación

Las características de la formación a considerar son:

1. Profundidad
2. Litología (Arenisca, caliza, dolomía)
3. Fluido en los poros (Gas, aceite, agua)
4. Presión
5. Parámetros de formación (Densidad, resistencia compresiva, esfuerzo efectivo, permeabilidad, etc.)

Otras preguntas importantes son: (1) ¿Está fracturada la formación?, (2) ¿Contiene laminaciones de arcilla?, (3) ¿Ya había sido ademada la formación?, (4) ¿Hay algún pozo cercano que haya sido terminado en la misma zona?, En caso de ser así, (5) ¿cuáles fueron las características de la formación allí?, (6) ¿Cuál fue el objetivo de la terminación?, (7) ¿Cuáles fueron las condiciones del pozo? , (8) ¿Qué equipo de disparo y técnica se usó?, (9) ¿Cuáles fueron los resultados?

2.4.1. Presiones y esfuerzos en la formación

Se ha demostrado que los factores geométricos, particularmente la penetración, son influenciados por el esfuerzo de sobrecarga y el tipo de formación, La penetración generalmente decrece al aumentar el esfuerzo de sobrecarga y la resistencia de la formación. Es razonable asumir que el espesor de la zona comprimida, su permeabilidad reducida y condiciones de limpieza también varían. Por esto, es necesario corregir estos factores por los efectos mencionados.

Se tienen dos métodos para corregir la penetración:

- El método de Thompson (1962) correlaciona la penetración en formación con la resistencia compresiva de la roca de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$P = P_r e^{0.076(C_r - C)} \quad (2.39)$$

En donde:

P = Penetración en la formación

P_r = Penetración en una formación de referencia

C_r = Resistencia compresiva de la formación de referencia (en Klbs/plg²)

C = Resistencia compresiva de la formación productora (en Klbs/plg²).

- El método de Saucier y Lands (1977) permite inferir la penetración en una formación sometida a un esfuerzo efectivo e involucra el uso de factores de multiplicación (ver Figura 29) derivados de pruebas experimentales, para tres clases de rocas: Rocas suaves representadas por la Caliza Austin, rocas de dureza media representadas por la Arenisca Berea y rocas duras representadas por la Dolomía Wasson. Estos factores multiplicadores se aplicarían a las penetraciones obtenidas en una prueba tipo sección 2, API RP 43, que se hace en arenisca Berea.

Algo interesante de considerar es que el esfuerzo efectivo tiene influencia en la resistencia compresiva de la roca, es decir, *la resistencia compresiva de la roca cambia cuando se somete a un esfuerzo efectivo*.

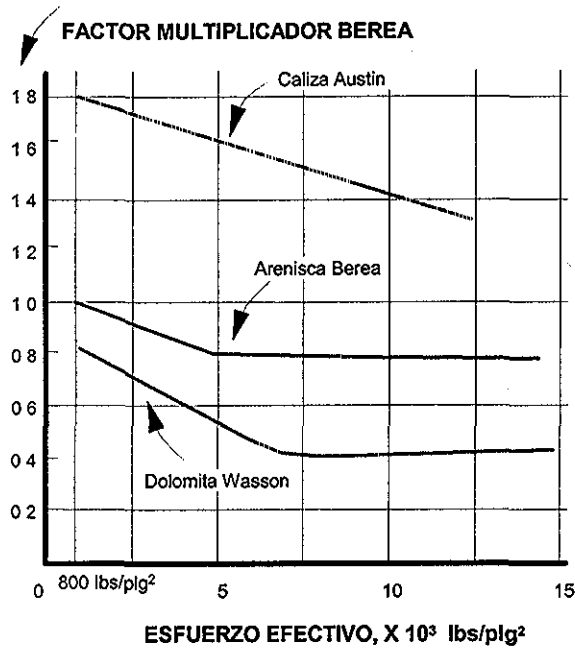


Figura 29 Efecto del esfuerzo efectivo y de la formación en la penetración

Halleck, Saucier y Behrman⁽¹⁰⁾ realizaron una investigación de la reducción de la penetración del jet en rocas bajo esfuerzo en 1988. Se hicieron pruebas con pistolas de múltiples disparos en bloques grandes de roca de 0.75 x 0.75 x 0.90 metros sometida a esfuerzo (Figura 31). Las rocas utilizadas fueron la arenisca Berea y caliza Bedford. La reducción fraccional de la penetración depende del diseño de la carga, el tipo y tamaño de la roca. En pruebas con una presión de poro elevada, los datos se ajustan mejor a la ley de esfuerzo efectivo (figura 29).

La gráfica de la Figura 30, muestra la dependencia de la penetración con respecto al esfuerzo efectivo y el tamaño de la carga para arenisca Berea.

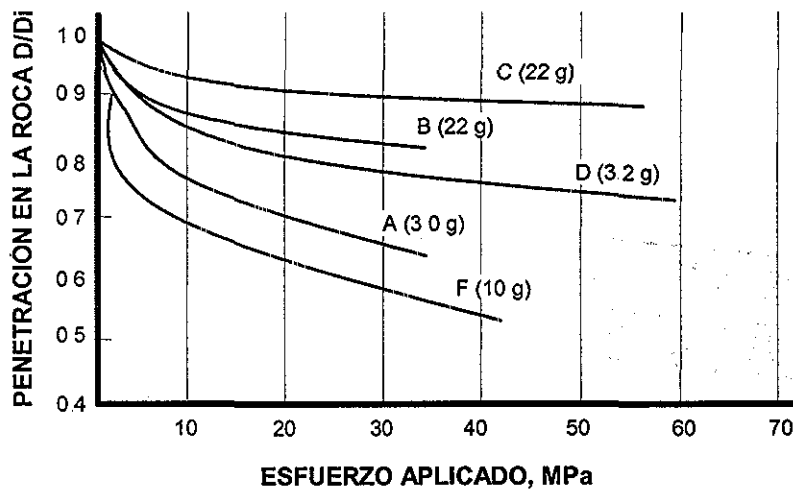


Figura 30 Reducción de la penetración inducida por el esfuerzo para 5 cargas en arenisca Berea

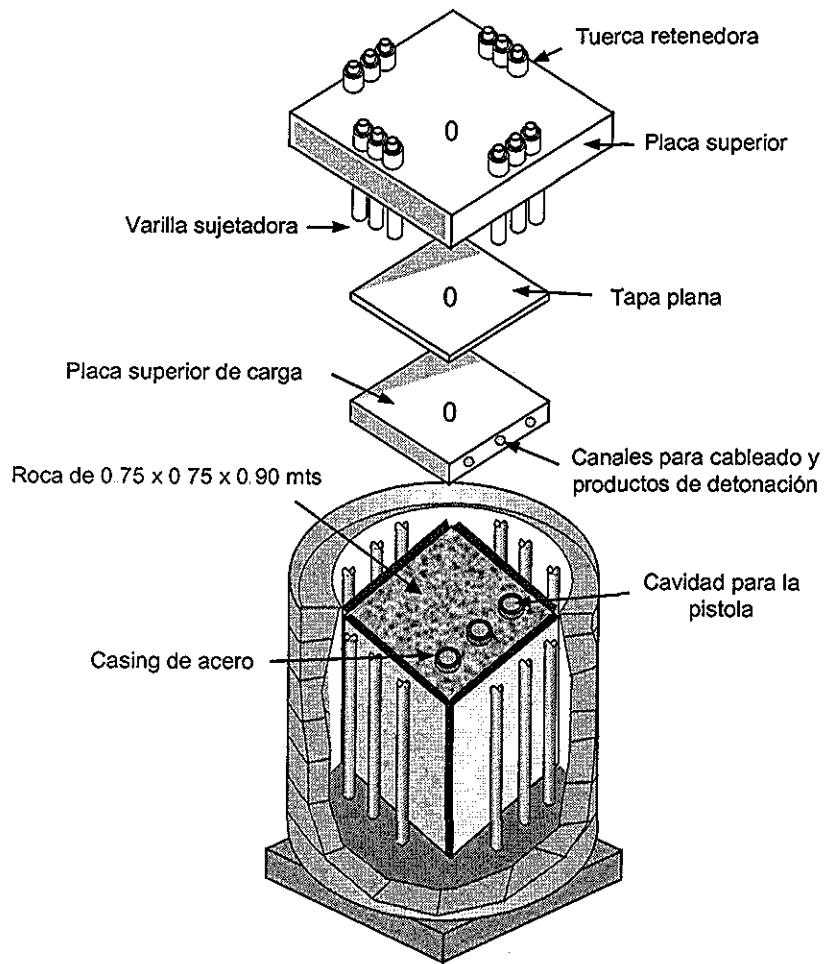


Figura 31 Dispositivo para prueba de múltiples disparos en roca sometida a esfuerzo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3 El daño del disparo y técnicas para minimizarlo

En general, cualquier restricción al flujo que cause una distorsión de las líneas de flujo y que eviten que estas líneas sean perfectamente normales a la dirección del agujero resultaría en un daño positivo.

El daño (skin) se obtiene mediante pruebas de pozo y tiene varios componentes que deberán ser identificados de manera individual. Además del daño cercano al agujero, hay otros factores o componentes del skin total como son: la geometría del disparo, la desviación del pozo, la terminación parcial y otros efectos dependientes de la fase y rapidez de cambio (flujo).

3.1 Concepto de Daño (Skin)

El daño de la formación puede ser definido como cualquier barrera dentro de los límites cercanos al agujero del intervalo terminado que restringe la producción natural de los fluidos de formación. La productividad o eficiencia de una terminación puede definirse en términos de los siguientes parámetros:

- *La Relación de Productividad*, PR (definida en el capítulo anterior)
- *El factor daño (Skin)*, como una medida de la caída de presión real a través de un intervalo comparado con la caída de presión ideal calculada con la Ley de Darcy.

La siguiente expresión relaciona ambos parámetros:

$$PR = \frac{q_p}{q_{OH}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S_t} \quad (3.1)$$

En donde:

PR = Relación de productividad

q_p = Producción de una zona entubada y disparada

q_{OH} = Producción en la misma zona en agujero abierto

r_e = Radio externo del límite

r_w = Radio del pozo

S_t = daño total

El efecto skin total puede expresarse matemáticamente de la manera siguiente:

$$S = S_D + S_{c+\theta} + S_p + \sum S_{pseudo} \quad (3.2)$$

En donde:

S_D = Daño (Skin) de la formación

$S_{C+\theta}$ = Daño debido a terminación parcial

S_p = Daño por el disparo

$\sum S_{pseudo}$ = pseudo daño dependiente de la fase y rapidez

Es importante notar que los efectos de los elementos discretos del daño frecuentemente se combinan y no son simplemente aditivos. En particular, el daño de la zona dañada por la perforación S_D y el daño por el disparo, S_p , se combinan de manera no lineal para dar un daño de zona dañada/disparo que es muy dependiente de si el disparo pasa o no la zona de daño.

Los factores que afectan el flujo en un sistema de pozo abierto son:

- El daño (skin) gobierna principalmente la productividad del pozo
- El diámetro del pozo de importancia secundaria (ec. 3.1, término $\ln r_e/r_w$)

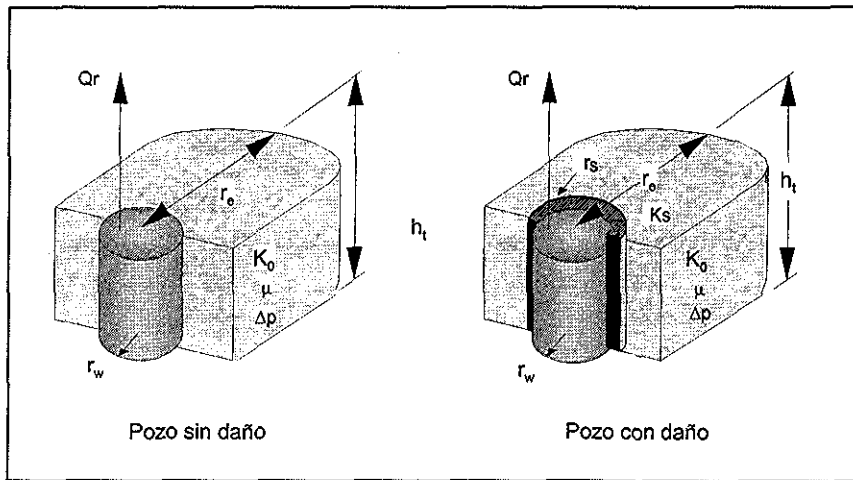


Figura 32 Factores que afectan el flujo en pozo abierto

Los factores que afectan el flujo en un sistema disparado son:

- La densidad de tiros
 - Profundidad de penetración
 - Fase de la pistola
 - Diámetro de la perforación (en la formación)
 - Daño del agujero del pozo
 - Zona triturada por la perforación
 - Flujo convergente (fluyendo de los factores geométricos mencionados arriba)
 - Penetración parcial
 - Flujo turbulento
- } Geométricos
- } Ambiente físico

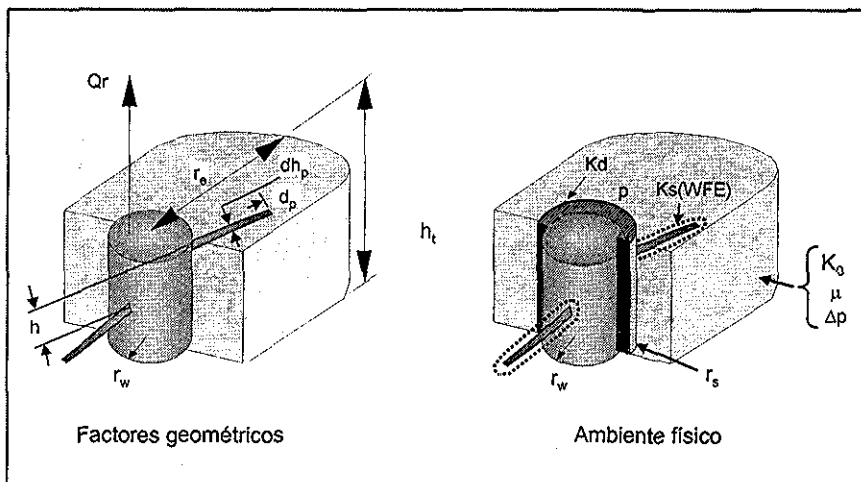


Figura 33 Factores que afectan el flujo en pozo disparado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Podemos resumir las fuentes del daño que reducen la relación de productividad PR o incrementan S:

- Flujo convergente
- Daño del agujero del pozo
- La zona triturada por el disparo
- Penetración parcial
- Flujo turbulento

3.1.1 Daño por terminación parcial e inclinación

Un pozo es parcialmente terminado cuando el intervalo abierto al flujo es menor que el espesor del yacimiento. A esto le llamamos penetración parcial y puede ser causado por un mal disparo o por una terminación deliberadamente menor para evitar conificación en pozos de entrada limitada. En todo caso, la penetración parcial reduce la productividad del pozo.

La mayoría de los pozos no penetran perpendicularmente la formación productora. En este caso, existe un ángulo entre el plano normal a la formación y el eje del pozo, tal como cuando un pozo vertical atraviesa una formación con buzamiento o un pozo inclinado atraviesa una formación horizontal. El efecto es, en general, un incremento en la productividad del pozo o skin negativo ya que se expone un área mayor al flujo.

3.1.2 Daño por la perforación de la formación

El skin por daño en la formación puede ser causado por taponamiento con partículas sólidas de los espacios porales, por desagregación mecánica del medio poroso o por efectos del fluido tales como la creación de emulsiones o cambios en la permeabilidad relativa.

Las fuentes potenciales del daño a la formación son:

3.1.2.1 Daño por invasión durante la perforación ⁽¹²⁾

El daño en la formación por la perforación se debe a la invasión de la formación de partículas del lodo o por el filtrado del lodo de perforación. La profundidad de invasión de partículas es usualmente pequeña, variando desde 1 hasta 12 pulgadas. Los tamaños relativos de los finos y las gargantas de los poros son el factor primario para determinar cuanto daño a la formación ocurrirá. Las partículas con tamaños en el rango desde 1/3 hasta 1/7 del diámetro promedio de la garganta de los poros ocasionarán una invasión somera pero es el tipo más dañino de invasión de partículas. Finalmente, los tamaños de partículas menores de 1/7 del diámetro promedio de la garganta de poros son usualmente suficientemente pequeños para fluir con facilidad a través de las gargantas de los poros sin causar un taponamiento significativo.

El filtrado del lodo de perforación invadirá la formación a una profundidad mayor que las partículas del lodo, con profundidades comunes de invasión de 1 a 6 pies. Algunos mecanismos de daño de la formación debido a la invasión son: Aumento de la saturación de agua alrededor del agujero, formación de emulsión y dispersión de arcillas.

Es mucho mejor confinar el daño a menos de 1/2 pulgada de la pared del pozo, aun con una permeabilidad de zona dañada reducida a 1/10 de la permeabilidad original, que permitir que el daño se extienda hasta 1 pie con una reducción de permeabilidad del 50%.

3.1.2.2 Daño por la terminación

Daño durante las operaciones de terminación causado por la invasión del fluido de terminación durante las cementaciones, disparos o estimulaciones. Si los fluidos de terminación contienen sólidos o son químicamente incompatibles con la formación, el daño resultante puede ser similar al causado por el lodo de perforación. En el daño por la cementación, normalmente, las partículas de cemento, de 20 a 100 micrones, son demasiado grandes para pasar por los poros de formación o las fracturas naturales, pero el filtrado del cemento perdido durante la cementación es potencialmente dañino. En general, la cantidad de fluido perdido durante la colocación y curado del cemento es insignificante, pero el filtrado del cemento normalmente es agua dulce por lo que puede ocasionar hidratación de las arcillas.

Otras fuentes de daño a la formación son:

- Daño durante la estimulación. Mal uso de ácidos
- Daño por producción. Migración de finos de formación o precipitación
- Daño de Inyección. Inyección de partículas sólidas por precipitación por incompatibilidad de fluidos

3.1.3 Pseudo daño (Skin)

Los pseudo skins incluyen todos los efectos dependientes de la fase y de la rapidez de cambio (flujo).

El skin dependiente de la rapidez de cambio, es igual a Dq , donde D es el coeficiente no-Darcy. El efecto skin obtenido de una prueba de pozo en un pozo con alta producción de gas tenderá a ser mayor y en ciertos casos mucho mayor, que el efecto skin independiente del alto flujo.

En una prueba de pozo, se puede obtener un skin aparente S' , que es:

$$S' = S + Dq \quad (3.2)$$

En pruebas con diferentes flujos se puede aislar el skin dependiente de la rapidez de cambio.

El skin independiente de la rapidez de cambio es función, principalmente, del skin por daño de la formación, desviación del pozo, terminación y el disparo.

Para determinar la dependencia del skin de la rapidez de cambio ⁽¹²⁾, se requiere de un mínimo de tres diferentes pruebas de flujo. Los diferentes flujos se logran mejor con pruebas isocronales o isocronales modificadas.

3.2 El Daño (Skin) debido al disparo

Los parámetros geométricos que influyen en el skin por el disparo son la densidad efectiva de tiros (numero real de perforaciones productoras por pie), la penetración, fase y el diámetro de agujero.

El daño (skin) por disparo puede cambiar con el flujo total y la presión diferencial fluyente, por lo que definiremos un daño inicial ⁽¹³⁾ por el disparo, como el daño que se tiene inmediatamente después del brote de presión dinámico pero antes de que se tenga cualquier flujo significativo posterior al disparo.

En términos del espesor de la zona dañada (zona triturada) y la reducción de permeabilidad, el skin por el disparo se define como:

$$S = \left(\frac{K}{K_c} - 1 \right) \ln \left(\frac{R_c}{R_p} \right) \quad (3.3)$$

En donde:

K = Permeabilidad zona sin daño

K_c = Permeabilidad zona triturada por el disparo

K_c / K = Factor de reducción de permeabilidad

R_c = Radio zona triturada

R_p = Radio túnel de la perforación

El skin total por el disparo en un pozo con una longitud promedio de la perforación, L , en pies y una densidad de disparos de N tiros por pie es:

$$S_T = S / LN \quad (3.4)$$

De manera análoga al daño del pozo, la ecuación de flujo radial puede usarse para definir el daño por el disparo en términos de CFE (Core Flow Efficiency):

$$Q = \frac{0.00108PKL}{\left[\ln \left(\frac{R_o}{R_p} \right) + S \right] \mu} \quad (3.5)$$

En donde:

Q = Gasto en cm^3/seg .

P = Presión diferencial fluyente

R_o = Radio núcleo

μ = viscosidad fluido, cp

El gasto Q de la ecuación (3.5) es análogo a un gasto experimental con daño S . Para un daño cero, el gasto de la ecuación (3.5) sería análogo al gasto teórico de una perforación perfecta, por lo tanto:

$$S = \left(\frac{1}{CFE} - 1 \right) \ln \left(\frac{R_o}{R_p} \right) \quad (3.6)$$

$$CFE = \frac{Q_{ex}}{Q_{th}} \quad (3.7)$$

Q_{ex} = Flujo experimental, en cm^3/seg , Q_{th} = Flujo teórico de una perforación sin daño, en cm^3/seg .

3.3 Técnicas de disparo para minimizar el daño (skin)

Una vez definido el daño por el disparo, describiremos la técnica más usual para disminuir o eliminar el daño por el disparo: El disparo bajo balance.

El modo en que el pozo es terminado ejerce una gran influencia en su productividad. En una terminación con presión de formación menor que la presión hidrostática se crea una presión diferencial sobre-balanceada. Después del disparo y antes de que fluya el pozo, se forman tapones con los residuos de las cargas.

Después de dejar fluir el pozo, es posible que aun se tenga una perforación parcialmente taponada y una zona compactada de baja permeabilidad.

Cuando se tiene una presión de formación mayor que la hidrostática se crea una presión diferencial bajo-balanceada. En este caso, los residuos de las cargas y la zona comprimida podrían ser expulsados por la acción del brote de fluido de terminación.

$$P_{\text{pozo}} > P_{\text{formación}} \quad \text{Sobre balance}$$

$$P_{\text{pozo}} < P_{\text{formación}} \quad \text{Bajo balance}$$

Las técnicas para disparar con presión diferencial negativa, en la cual las pistolas son disparadas bajo condiciones de presión menor en el pozo que la del yacimiento es un factor crítico. El brote de presión limpia las perforaciones. Si a esto agregamos el uso de cargas perforadoras de alto desempeño, se obtiene el resultado óptimo.

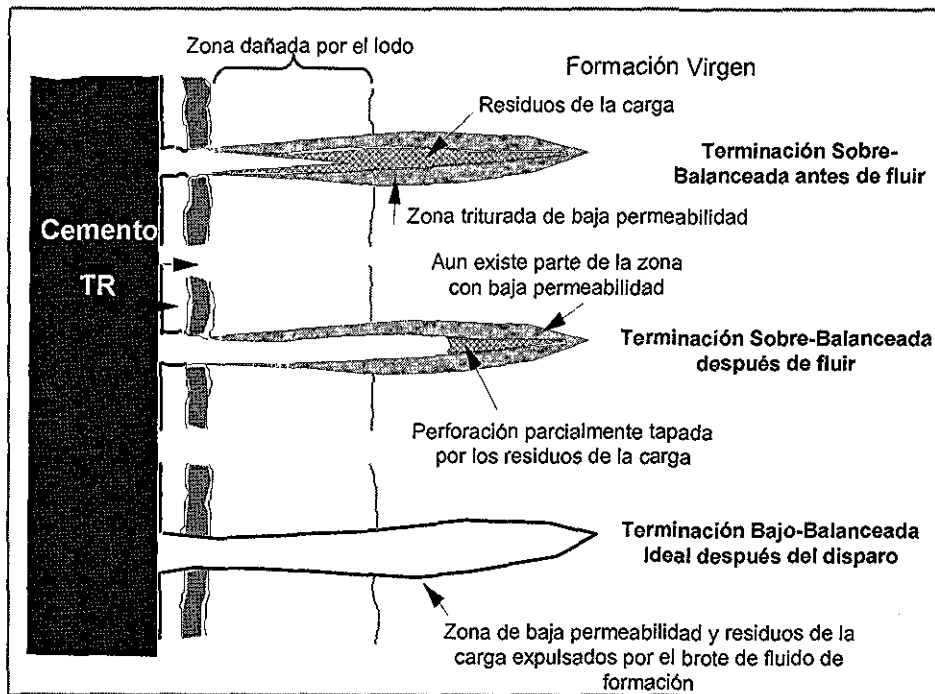


Figura 34 Disparo bajo balance y sobre balance

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En una formación productiva puede haber variaciones en la permeabilidad y otras propiedades físicas dentro de la zona. Esto puede originar diferentes grados de efecto skin y daño al pozo. Cuando la zona es disparada, los agujeros no necesariamente responden igual al flujo, algunos que están localizados en regiones de mas alta permeabilidad pueden limpiarse mejor; es decir, responderán a mas bajas presiones que aquellas que están en los estratos de menor permeabilidad donde el daño efectivo es mayor.

El disparo con presión bajo balanceada es por lo tanto esencialmente una técnica para un "brote de flujo" del sistema perforado, que ayuda a asegurar que la mayoría de las perforaciones en el sistema se limpien apropiadamente manteniéndose la densidad de perforaciones apropiada.

La limpieza de los agujeros por medio de una presión diferencial bajo balance se puede visualizar como un proceso de dos etapas:

1ª etapa. Brote de presión. Esta etapa se lleva a cabo en un periodo de tiempo muy corto, del orden de milisegundos y es determinante en la eliminación del daño

2ª etapa. Flujo posterior al disparo. Esta etapa ocurre cuando se fluye el pozo y aunque puede ayudar a remover algunos residuos de los disparos no influye mayormente en la eliminación del daño.

Disparar el pozo con una presión diferencial a favor de la formación es recomendable para obtener la limpieza de los agujeros. Sin embargo, usar presiones diferenciales muy altas es inadecuado ya que arriba de cierto valor no se obtiene ninguna mejora en el proceso de limpiado. *Una presión diferencial excesiva puede provocar arenamiento o aporte de finos de formación que impedirán el flujo a través de la perforación.*

Una fórmula empírica que calcula la condición en que puede ocurrir el arenamiento ⁽¹⁴⁾ es:

$$\text{La perforación puede colapsar si: } \sigma_t > N_f C \quad (3.8)$$

Donde:

$$\sigma_t = 2.5(d - P_f) + 1.25\Delta P \quad (3.9)$$

d	Profundidad vertical (pies)
P _f	Presión del yacimiento (psi)
ΔP	Caída de presión fluyente (psi)
σ	Esfuerzo (lb/plg ²)
N _f	Factor empírico (asumir 4.0)
C	Resistencia compresiva uniaxial de la roca (lb/plg ²)

3.3.1 Disparo sobre balance

Mencionaremos a continuación la técnica relativamente reciente de disparo sobre balance. Un repaso de los pozos de una compañía de EUA ⁽¹⁵⁾ reveló que se estaban obteniendo resultados muy inconsistentes con los disparos bajo-balanceados. La primera meta del equipo era mejorar la eficiencia inicial de terminación de los pozos. Los resultados en 50 pozos afirmaron el hecho de que los nuevos disparos sobre-balanceados y el método de estimulación podrían ocasionar un giro completo en las técnicas de disparos. La solución al desempeño impredecible de los disparos bajo-balanceados es disparar con un condición extrema de sobre balance junto con una estimulación.

El concepto. Al revisar los datos API RP-43 se hizo una observación. Para varias cargas los datos de la sección 2 (blanco Berea) reportaban una longitud mayor de túnel para disparos con un sobre balance de

500 lbs/plg². La profundidad de los residuos en todos estos casos fue más somera que los experimentados en las pruebas de disparos bajo-balanceados. Consecuentemente, los datos con sobre-balance fueron considerados típicamente como el peor caso. En lugar de considerar todos estos resultados, el equipo de investigación se cuestionó si una sobre presión mas grande podía ser aplicada y podría empujar los residuos mas adentro de la formación.

Mecánica Un jet (chorro) perforador ejerce una presión de 4 a 5 millones de lbs/plg² en el blanco. Esta fuerza excede por mucho la resistencia y esfuerzos de la roca y consecuentemente se forma un agujero o túnel. Una estimación razonable de la longitud del túnel se puede hacer considerando factores tales como las especificaciones de las cargas, propiedades de la roca en el sitio, y condiciones de agujero. La acción penetrante del jet en la roca crea un esfuerzo altamente concentrado en las paredes del túnel de la perforación. El mecanismo más probable de descarga de este esfuerzo es la fractura de la pared del túnel. Esto fue observado por Pucknell y Behrman. Si se aplicaba una presión inmediatamente después de que se formaran las fracturas, estas podían extenderse. Esto proveería de una trayectoria de flujo más efectiva a las perforaciones y finalmente al pozo.

En teoría, se cree que esta perforación fracturada podría ser inestable. La práctica común de disparar bajo-balanceado causará que las fracturas se cierren rápidamente. Los resultados serían un colapso parcial o aún total del túnel de la perforación.

Si se aplicaba una presión sobre balanceada de magnitud suficiente a las fracturas después de ser formadas, dos beneficios potenciales podían ganarse. Primero, la aplicación prolongada de alta presión permitiría alguna estabilización de las paredes del túnel. Segundo, la acción del fluido usado para aplicar la presión podría extender las fracturas inducidas, y podría ocurrir algo de erosión de las caras de la fractura si la velocidad es lo suficientemente alta. Esto resultaría en una conductividad mayor de la fractura. Estos beneficios potenciales podrían ser ventajosos en un amplio rango de yacimientos.

La velocidad del fluido por si sola puede ser insuficiente para grabar las caras de la fractura inducida apropiadamente. La adición de un fluido reactivo, tal como ácido en un yacimiento de carbonato, o un material abrasivo, podría mejorar significativamente los patrones de grabado en las caras de la fractura. La adición de un material abrasivo puede ser beneficiosa al erosionar y alargar el diámetro del agujero de entrada a través del casing y la capa de cemento del pozo.

3.3.2 Teorías sobre la eliminación del daño por el disparo

Podemos resumir los trabajos realizados para determinar la técnica óptima que permita minimizar o eliminar el daño por el disparo en:

1. Nivel de bajo balance en función de la permeabilidad de la roca
2. Nivel de bajo balance dependiente de las propiedades mecánicas de la roca.

La primera teoría ha sido la más ampliamente usada y define la magnitud del bajo balance en función, principalmente, de la permeabilidad de la formación.

La segunda teoría ha sido introducida recientemente, en el 2000 y establece una relación entre las propiedades mecánicas de la roca y el proceso de limpiado de la perforación.

3.3.3 Bajo balance en función de la permeabilidad

La teoría mas usada hasta la fecha establece que el nivel de bajo balance requerido para obtener una perforación limpia sin daño depende o es función principalmente de la permeabilidad de la roca.

Los trabajos de investigación iniciales especificaban un nivel de bajo balance que difería entre pozos productores de aceite y pozo de gas. Una investigación posterior conducida por King, concluyó que no existía diferencia apreciable en el nivel de bajo balance requerido para obtener perforaciones limpias en pozos de aceite o de gas. Sin embargo King, solo estableció el nivel de bajo balance requerido para que una acidificación posterior no incrementara la productividad del pozo, pero no el bajo balance requerido para obtener un skin cero. Tariq, en 1990, realizó un trabajo que intentó determinar las condiciones de flujo (no Darcy) necesarias para eliminar el daño por el disparo. Investigaciones posteriores de Behrmann y otros, concluyeron que no es necesario establecer un flujo turbulento para limpiar la perforación como Tariq propuso. El nivel de bajo balance lo establece en función de las propiedades de la roca, del fluido del yacimiento. En 1995, Behrmann propone una serie de ecuaciones independientes de la compresibilidad y viscosidad del aceite. Las ecuaciones son, según Behrmann, aplicables en pozos de aceite, en formaciones sin arenamiento y dependen de la porosidad del yacimiento, la permeabilidad y el diámetro del túnel del disparo.

3.3.3.1 *Estudio de campo para determinar el bajo balance para igualar la condición de acidificación.*

King y otros ⁽¹⁶⁾, realizaron en 1985 un estudio de campo en 90 pozos (en 5 diferentes regiones) disparados con pistolas TCP y niveles variables de bajo balance, probados, acidificados y probados de nuevo en formaciones de arenas. El bajo balance era considerado suficiente siempre que una acidificación subsiguiente no mejorara la productividad del pozo. La gráfica de la Figura 35 muestra los datos obtenidos por King.

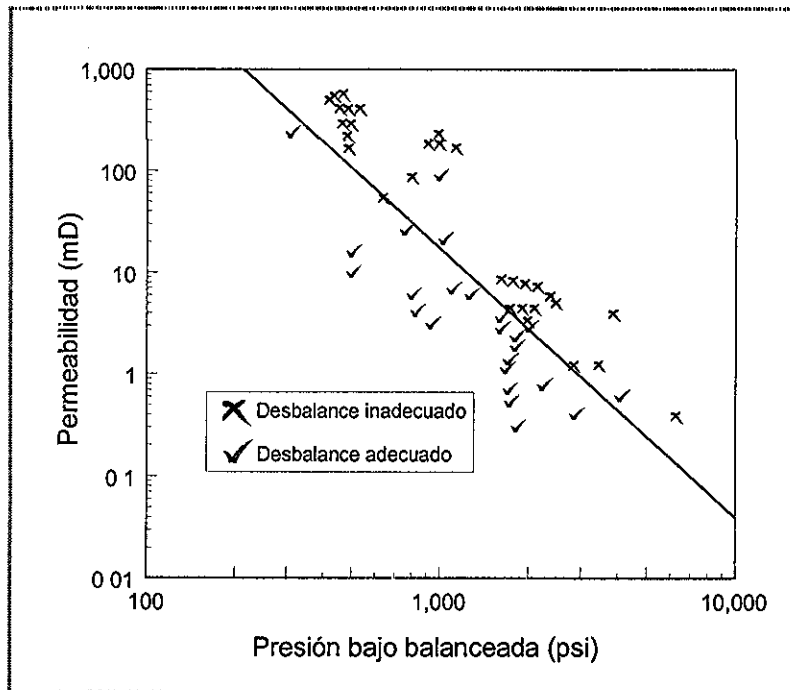


Figura 35 Bajo balance vs. Permeabilidad. Gráfico de King

Del análisis estadístico de los datos, King propuso las siguientes ecuaciones para tres casos:

a. General:

$$\Delta p = \frac{2900}{K^{0.36}} \quad (3.10)$$

b. Aceite:

$$\Delta p = \frac{3100}{K^{0.37}} \quad (3.11)$$

c. Gas:

$$\Delta p = \frac{3000}{K^{0.40}} \quad (3.12)$$

Los datos estadísticos sugieren que los casos de aceite y gas son similares y no hay evidencia estadística en los datos que sugiera diferentes requerimientos de bajo balance para pozos de aceite y pozos de gas.

Es importante recalcar que el trabajo de King se enfocó a determinar el nivel de bajo balance que dejaba el pozo en condiciones tales que una acidificación no mejorara su productividad, es decir, King no determinó el nivel de bajo balance que permitiera obtener el mínimo skin o daño por el disparo.

En 1987, Halleck y otros ⁽¹⁷⁾, presentaron un estudio de flujo en perforaciones que separaba la limpieza debida a los gradientes de presión transitorios de la limpieza debida al flujo estacionario posterior al disparo. En ausencia de daño debido a los fluidos de terminación, la limpieza de las perforaciones ocurre a través del empuje de los residuos sueltos y la remoción de la zona triturada de permeabilidad reducida. Los datos obtenidos coinciden con el estudio de King. Algunas de las conclusiones obtenidas en este trabajo son:

1. Se requieren presiones de bajo balance del orden de 500 y 1000 lbs/plg² para obtener los flujos mayores en núcleos de arena saturados con salmuera.
2. Las perforaciones inicialmente restringidas pueden ser limpiadas por el flujo posterior al disparo, pero no se obtiene la eficiencia teórica máxima.
3. El limpiado ocurre de la combinación de flujo transitorio y estacionario.

3.3.3.2 Criterio para determinar el nivel de Bajo balance mediante flujo turbulento

En 1990, S. M. Tariq⁽¹³⁾ publicó un trabajo en el que establecía un criterio para estimar el nivel de bajo balance requerido para obtener perforaciones limpias. Este criterio se basó en el análisis de las velocidades de flujo y los gradientes de presión en la región cercana al pozo en tiempos inmediatamente posteriores al disparo, en este análisis usó el método de elementos finitos, datos de campo existentes y un modelo físico de limpieza de la perforación.

El nivel de bajo balance, según Tariq, permitía introducir efectos de flujo no-Darcy en la perforación en tiempos iniciales. El nivel de bajo balance se debe situar entre:

- Bajo balance mínimo. Requerido para maximizar la productividad
- Bajo balance máximo. Para evitar falla mecánica de la formación, colapso de la TR, desanclaje del empacador, etcétera.

El limpieza del daño circundante a la perforación depende de:

- a. Características de la roca
- b. Propiedades de los fluidos en los poros
- c. Forma en que es iniciado el flujo después del disparo

Tariq, estableció el problema, clasificando el daño total después del disparo en dos categorías:

- a. Daño que desaparece cuando se fluye la formación después del disparo. Este debe principalmente a: (1) Residuos sueltos, (2) Pequeñas partículas con diámetros menores que el diámetro promedio de la garganta de los poros, (3) Invasión de filtrado
- b. Daño de tipo “permanente” por partículas firmemente incrustadas, requiere gradientes de presión y velocidades de flujo grandes para su remoción. Es causado por: (1) Partículas tapón con diámetro comparable al diámetro promedio de la garganta de los poros, (2) proyectil (slug) metálico, (3) partículas atrapadas en los poros por capilaridad y fuerzas electrostáticas.

La incógnita era: *¿Qué nivel de bajo balance se requiere para remediar el daño de tipo permanente?*

Para responder a esa pregunta se necesita saber:

1. ¿Qué gradiente de presión o velocidades de flujo se necesitan para remover el daño de la zona triturada?
2. ¿Qué bajo balance se necesita para establecer este gradiente de presión o velocidades de flujo en la vecindad de una perforación?

La velocidad del flujo es el parámetro principal que gobierna el movimiento de partículas en un medio poroso.

Si la velocidad del flujo se incrementa constantemente, se alcanza un punto en el cual las partículas no siguen estacionarias sino que se “fluyen”.

Si se tiene un movimiento relativo entre una partícula y un fluido circundante, el fluido ejercerá una fuerza sobre la partícula. Esta fuerza es causada por dos factores:

1. Esfuerzos de corte debidos a la viscosidad y los gradientes de velocidad. Estas fuerzas son tangenciales a la superficie, \bar{f}_1

2. Variaciones de presión a lo largo de la superficie de la partícula sólida, \bar{f}_2

La fuerza resultante es:

$$\bar{f}_1 + \bar{f}_2 = \bar{f}_R \quad (3.13)$$

La componente de esta fuerza en dirección de la velocidad se denomina “arrastre” (drag) :

$$F_D = \frac{C_{A_p} \rho v^2}{2g_c} \quad (3.14)$$

Donde:

F_D	Fuerza de arrastre
C	Coefficiente de arrastre
A_p	Área proyectada de la partícula en la dirección del movimiento
ρ	Densidad del fluido
v	velocidad
g_c	Constante adimensional

Una simplificación supone el arrastre de esferas de diámetro d , como analogía del arrastre de partículas en un medio poroso:

$$F_D = \frac{C_D A \rho v^2}{2} \quad (3.16)$$

Donde: $C_D = \frac{24}{Re} \quad (3.17)$

Para $Re \leq 1$: $Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (3.18)$

Entonces: $F_D = 3\pi d \mu v \quad (3.19)$

La ecuación 3.19 es la ecuación de Stokes para el arrastre.

Sustituyendo q por v y el esfuerzo de corte por F_D/A obtenemos:

$$q = -\frac{k}{\mu} \Delta p_1 \quad (3.20)$$

Las ecuaciones (19) y (20) indican que mientras la Ley de Darcy sea válida, las fuerzas de arrastre experimentadas por las partículas en el medio poroso son proporcionales a la velocidad del fluido, v .

A altas velocidades de flujo el término inercial de la ecuación de Navier Stokes no puede ser despreciado. Rumor & Drinker demostraron que el arrastre sobre una partícula es:

$$F_D = C_D \alpha d^2 \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.21)$$

En donde αd^2 es el área transversal de la partícula sólida y C_D , el coeficiente de arrastre,

$$C_D = \frac{24}{Re} + 4.5 \quad \text{para } Re \leq 2 \quad (3.22)$$

$$C_D = 0.4 \quad \text{para } Re \geq 1000 \text{ (flujo turbulento)}$$

Sustituyendo estos valores de C_D , en la ecuación (21) se puede llegar a la ecuación de Forchheimer:

$$\Delta p = \frac{\mu v}{K} + \beta \rho v^2 \quad (3.23)$$

Y de la ecuación (21) vemos que: $F_D \propto v^2$

Por consiguiente, conforme los efectos no Darcy se hacen mas importantes con el incremento de la velocidad de flujo, las fuerzas de arrastre cambian de ser directamente proporcionales a la viscosidad del fluido a ser directamente proporcionales a v^2 .

Ya que el limpiado de la zona triturada después del disparo es función de las fuerzas de arrastre que experimentan las partículas en el medio poroso, es lógico concluir, dice Tariq, que el limpiado del daño se facilita por los efectos no Darcy durante el flujo en el medio poroso.

En este trabajo, el mínimo bajo balance necesario para el limpiado es hipotéticamente aquella que introduce efectos no Darcy (flujo turbulento) en la zona triturada de acuerdo con la ecuación de Forchheimer:

$$\Delta p = \frac{\mu v}{K} + \beta \rho v^2$$

La ecuación de Forchheimer puede expresarse:

$$\Delta p = \alpha \mu v + \beta \rho v^2 \quad (3.24)$$

Donde α es el coeficiente de resistencia al flujo viscoso ($=1/k$), β se conoce como el coeficiente de resistencia inercial.

Esta ecuación representa el modelo físico básico usado por Tariq para describir el proceso de limpiado. Posteriormente, mediante un modelo de elementos finitos estableció la relación entre la velocidad mínima de flujo requerida y el bajo balance necesario para lograr esa velocidad para diferentes propiedades de fluidos de formación.

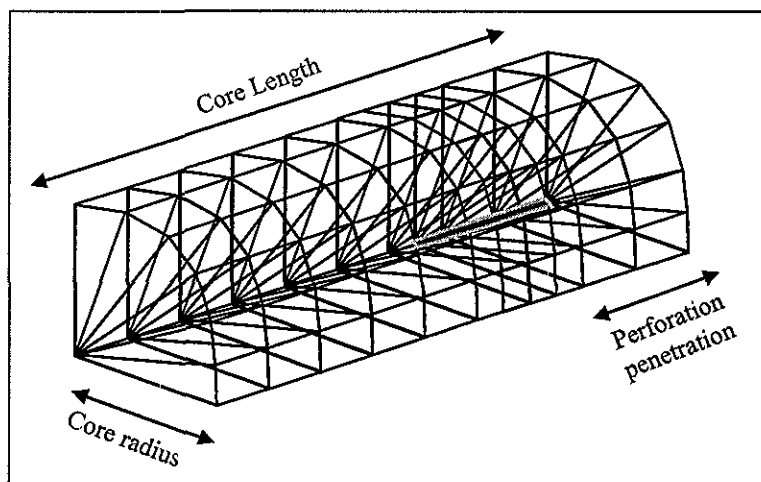


Figura 36 Representación del disparo y su vecindad en el modelo de elementos finitos de Tariq

Los resultados obtenidos en este trabajo coinciden en gran parte con los resultados del trabajo de campo de King.

Finalmente, Tariq propuso una serie de ecuaciones analíticas simplificadas:

1).- Ecuación de flujo turbulento radial para pozos de aceite:

$$\Delta p = \frac{3.089 \times 10^6 \mu^2 R_e r_2}{k_c^{0.4} \rho} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + R_e r_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right) \quad (3.25)$$

Donde:

μ	Viscosidad, cp
K_c	Permeabilidad de la zona triturada, md
r_2	Radio de la zona triturada, pulgadas
r_1	Radio del túnel del disparo, pulgadas
ρ	Densidad del fluido, lb/pie ³
v	velocidad del fluido, pulgadas/seg.

2).- Ecuación de flujo turbulento radial para pozos de gas:

$$\Delta p^2 = \frac{22.8 \times 10^6 \mu^2 z T_r R_e r_2}{k_c^{0.8} G} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + R_e r_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right) \quad (3.26)$$

Donde:

z	Factor de compresibilidad del gas, adimensional
T_r	Temperatura del yacimiento, grados R
G	Gravedad del gas, (aire = 1)

3.3.3.3 *El daño por disparo en función de las propiedades de la roca y el bajo balance*

En 1991, Berhmann y otros ⁽¹⁹⁾ realizaron una investigación para estudiar el limpiado resultante del brote dinámico de presión del fluido a través de la perforación inmediatamente después del disparo y antes de cualquier flujo posterior.

En esta investigación se usaron dos tipos de roca, Arena Berea de 200 md y Arena Gold de 100 md.

Los objetivos eran obtener:

1. El mínimo bajo balance requerido para obtener un skin cero por disparo sin flujo posterior
2. Una relación entre el skin y el bajo balance

Los resultados experimentales permitieron establecer un criterio de Número de Reynolds para un skin cero.

Los factores clave en un disparo bajo balance son:

1. Nivel de bajo balance
2. Permeabilidad de la formación
3. Propiedades del fluido

Tariq propuso en un trabajo anterior un modelo de flujo radial turbulento pseudo permanente de la zona dañada por el disparo para establecer un requerimiento de Número de Reynolds que permitiera obtener un skin mínimo por disparo.

En este trabajo, se establece un nuevo criterio de Número de Reynolds para predecir el mínimo bajo balance requerido para lograr una densidad 100% efectiva de tiros como función de las propiedades de la formación.

Algunos resultados experimentales se resumen en la tabla siguiente:

	Permeabilidad diametral, md	Permeabilidad axial, md	Bajo balance, lb/plg ²	Presión dif., lb/plg ²	Q _{ex} , cm ³ /seg	Skin analítico	Skin modelo (FEM)
GS-14	102	31	0	29.5	2.89	2.91	3
GS-8	104	14	1500	19.31	1.89	1.06	1.03
GS-10	105	20	2000	19.05	2.40	0.47	0.45
GS-1	100	20	2500	19.87	3.25	-0.19	-0.22
GS-6	96	19	3000	18.74	2.96	-0.03	-0.08
BP-41	175	101	0	19.55	1.33	2.73	3
BP-36	215	72	500	11.52	1.16	1.72	1.8
BP-49	193	70	1000	17.16	2.75	0.82	0.83
BP-51	192	81	1500	17.75	3.59	0.13	0.05

Tabla 8 Resultados experimentales en Arena Gold (GS) y Arena Berea (BP) ⁽¹⁹⁾

Resultado de skin del disparo

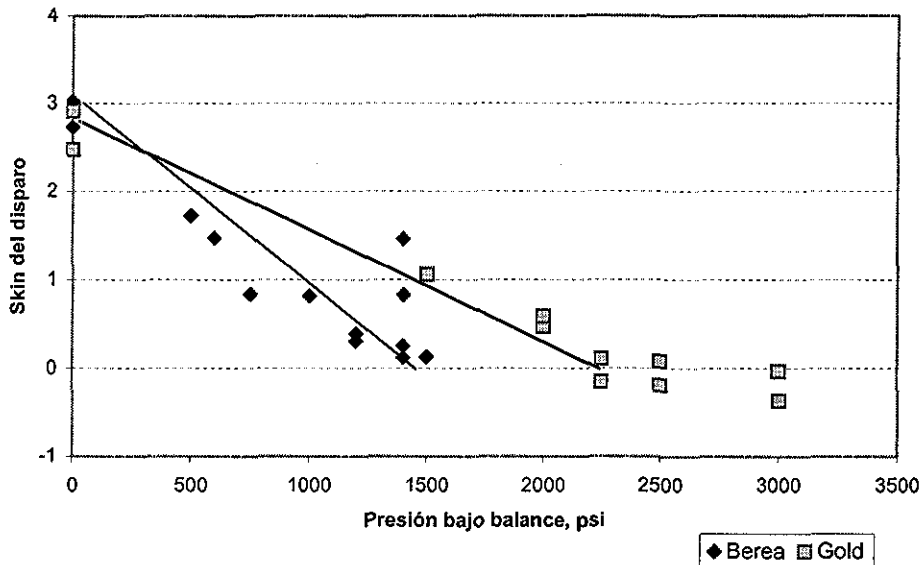


Figura 37 Gráfico Presión bajo balance vs. Skin para Arena Berea y Arena Gold ⁽¹⁹⁾

De estos resultados se propone una Guía de bajo balance estimado:

Mínimo bajo balance para obtener un daño de disparo cero versus permeabilidad:

$$\Delta p = \frac{1.726 \times 10^5}{K^{0.913}} \quad (3.27)$$

Debido a la pequeña diferencia en permeabilidad entre la arena Berea y la arena Gold, la ecuación 3.27 debe usarse con cuidado.

Para obtener un límite inferior para el requerimiento de bajo balance, los coeficientes de la ecuación 3.27 se recalcularon suponiendo una permeabilidad de arena Gold 10% menor y una permeabilidad de arena Berea 10% mayor:

$$\Delta p_{\text{inferior}} = \frac{5.81 \times 10^4}{K^{0.7}} \quad (3.28)$$

Las ecuaciones 27 y 28 son válidas solamente para fluidos caracterizados por:

$$\mu^2 / \rho = 0.0512 \text{ cp}^2 \text{ pie}^3 / \text{lb}$$

Si usamos los datos de Tariq, (similares a los usados por King), $\mu^2 / \rho = 0.015 \text{ cp}^2 \text{ pie}^3 / \text{lb}$, nos da:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{superior}} &= \frac{5.06 \times 10^4}{K^{0.913}} \\ \Delta p_{\text{inferior}} &= \frac{1.07 \times 10^4}{K^{0.7}} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Uno de los objetivos principales de este estudio era establecer un nuevo Número de Reynolds para obtener cero skin en base a los resultados de las pruebas experimentales.

Tariq, propuso en un trabajo anterior un criterio basado en un modelo de flujo turbulento en la zona dañada, (ec. 3.25) que puede escribirse:

$$\Delta p = \frac{3.089 \times 10^6 \mu^2 R_e r_2}{(k.PRF)^e \rho} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + R_e r_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right) \quad (3.30)$$

El exponente e se escogería típicamente para ajustar los datos experimentales; 0.913 nominal, 0.7 para la pendiente de límite inferior. $Kc = K*PRF$ y PRF es el factor de reducción de permeabilidad Kc/K .

La ecuación (30) puede simplificarse aún más si se considera: $r_1 = 0.218$ pulgadas, $r_2 = 0.818$ pulgadas, $PRF = 0.306$ y $Re = 0.23$:

$$\Delta p = \frac{1.136 \times 10^6 \mu^2}{(0.306K)^e \rho} \quad (3.31)$$

Donde e es 0.913 nominal, 0.7 para el límite inferior y K es la permeabilidad del yacimiento.

La ecuación (31) está basada en las características de la zona dañada con una carga de 3.2 gramos. Estas características diferirán para cargas mayores, por ejemplo, r_1 y r_2 serán mayores y PRF puede ser diferente. También las propiedades de la roca afectarían a r_1 , r_2 y PRF .

Finalmente, Berhmann concluye en este trabajo:

1. Puede alcanzarse una condición de cero skin por disparo sin ningún flujo posterior al disparo
2. Se determinó un Número crítico de Reynolds y los parámetros iniciales del disparo en dos arenas para una carga de 3.2 gramos. Estos parámetros pueden usarse en una ecuación empírica para predecir el nivel de bajo balance mínimo necesario para obtener un skin cero como una función de la permeabilidad de la roca y de las propiedades del fluido.

3.3.3.4 Presión de bajo balance en función de propiedades de la roca y el diámetro del túnel del disparo.

Berhmann en 1995 realiza un trabajo ⁽²⁰⁾ para definir un criterio de presión bajo balance que conduzca al mínimo daño por disparo. Siendo este trabajo uno de los clásicos en su tipo, a continuación se resume los puntos más importantes.

Es conveniente poder estimar el skin del disparo antes de disparar un pozo. Esto permitirá diseñar futuras operaciones como re-disparos o estimulaciones. La remoción del daño se logra por medio del disparo bajo balance o la estimulación ácida. La mejor opción, obviamente, sería diseñar la operación de disparo de tal manera que se obtenga cero daño. Esto se logra estableciendo una presión de bajo balance adecuada

Los experimentos disparando cargas (una a la vez) en núcleos de areniscas sugieren que se requieren presiones de bajo balance mayores a las comúnmente usadas en el campo para obtener perforaciones limpias. Además, el análisis de los datos no soportan la teoría inicial de Tariq ⁽¹⁸⁾, que requiere de flujo turbulento para limpiar las perforaciones.

La magnitud del skin y el bajo balance dependen de la porosidad de la roca, su permeabilidad y del diámetro del túnel producido por el disparo.

$$S, UB = f(\phi, k, d_h) \quad (3.32)$$

- S Skin por el disparo
- UB Presión de bajo balance
- ϕ Porosidad de la formación
- k Permeabilidad de la formación
- d_h Diámetro de la perforación en la roca

Las fuerzas dinámicas (presión diferencial y arrastre) que actúan durante el proceso de limpiado son:

1. Δp a través de la partícula del flujo inicial de descompresión del gradiente de presión radial
2. Flujo radial débilmente compresible

La extensión del daño depende de la Resistencia compresiva de la roca (relacionada con ϕ), la litología, la compresibilidad del fluido en los poros, del diseño y tamaño de la carga, contenido de arcilla y quizá del tamaño del grano.

El limpiado por medio del bajo balance es resultado de la descompresión transitoria del fluido en el yacimiento alrededor de la perforación.

Algunos resultados de pruebas en arenisca Berea se resumen en la tabla siguiente:

Prueba	Permeabilidad diametral, md	Fluido pozo	Bajo balance, lb/plg ²	Viscosidad, cp	Skin
104	211	Keroseno	1500	422	-0.69
105	214	Aceite pesado	0	422	2.31
106	202	A.P.	1000	422	2.33
107	168	A.P.	1500	422	2.21
108	447	Salmuera	1500	606	0.72

Tabla 9 Resultados experimentales en Arenisca Berea usando aceite pesado ⁽²⁰⁾

Algunas observaciones de los datos obtenidos son:

- Efecto despreciable de la viscosidad μ en el bajo balance
- No se requiere flujo turbulento
- Hay un efecto aparente del fluido del pozo en el daño

King (ver sección en este mismo capítulo) había establecido que el bajo balance dependía de la permeabilidad de la roca

Tariq desarrolló una serie de ecuaciones analíticas para un bajo balance mínimo basado en la creación de flujo turbulento para lo cual definió un Número de Reynolds crítico.

La ecuación de bajo balance de Tariq, ecuaciones 3.25 y 3.26, establecen una relación de la presión de bajo balance aumentando con el cuadrado de la viscosidad, es decir, $\Delta p \propto \mu^2$; sin embargo, los datos obtenidos de investigaciones recientes no soportan esta teoría. Por consiguiente, Número de Reynolds crítico de Tariq tendría que disminuir conforme se incrementa la viscosidad, lo cual nos llevaría rápidamente a flujo Darcy laminar, lo cual contradice la suposición de Tariq de que se requiere flujo turbulento para limpiar la perforación.

Presión diferencial Asumiendo que después de la creación del túnel por el disparo se tiene solo arena fracturada floja en el túnel, entonces se tiene una condición de frontera donde la presión diferencial en las paredes del túnel iguala a la presión del yacimiento. Una onda de descompresión se mueve radialmente desde la pared del túnel reduciendo la presión de yacimiento. Esta reducción de presión es función de las propiedades del fluido y de la roca. Si la reducción de presión en cualquier radio dado es lo suficientemente rápida, entonces se desarrollará una presión diferencial sustancial a través de los granos fracturados de arena. Las simulaciones en computadora sugieren que esta fuerza debida a la presión diferencial solo será importante para fluidos de muy baja viscosidad o muy altas permeabilidades de roca. Los datos experimentales usados en este trabajo no incluyen estos extremos por lo que las ecuaciones que se plantearán consideran esta fuerza despreciable.

Fuerza de arrastre A pesar de que puede existir flujo turbulento en los primeros instantes cerca del radio inicial de la perforación, la fuerza de arrastre mínima para limpiar el daño del disparo ocurrirá, por tanto, a cierta distancia del radio inicial de la perforación y será originada, en general, por flujo laminar. Por lo que el modelo analítico de Behrmann, en este trabajo, se limita a la determinación del bajo balance óptimo para obtener un skin por disparo cercano a cero suponiendo solamente arrastre viscoso laminar.

La fuerza de arrastre es:

$$F_D = C_D \rho v^2 A / 2 \quad (3.33)$$

$$C_D = 1 / N_{Re}^2 \quad (3.34)$$

$$N_{Re} = \rho v \delta / \mu \quad (3.35)$$

C_D	Coefficiente de arrastre
ρ	Densidad del fluido
v	Velocidad del fluido
A	Área sección transversal de la partícula
N_{Re}	Número de Reynolds

- γ Coeficiente de forma, igual a 1 para una esfera
- δ Tamaño de poro característico
- μ Viscosidad del fluido

Asumiendo granos esféricos con un área promedio constante:

$$F_D \propto v\mu/\delta \quad (3.36)$$

El flujo total por unidad de longitud del túnel de la perforación es:

$$Q_T \text{ (ml/cm de longitud)} = 2\pi\phi Cr^2 \Delta P Q_i \quad (3.37)$$

Donde:

- ϕ Porosidad interconectada (fracción)
- C Compresibilidad del fluido (1/bar)
- r Radio del túnel (cm)
- ΔP Presión diferencial (bar)

El tiempo total es:

$$T \text{ (seg)} = \phi\mu Cr^2 t/k \quad (3.38)$$

La velocidad de flujo en los poros en el radio de la perforación, r , es:

$$v_i = (dQ_i/dt)/\text{Area} \quad (3.39)$$

Donde: $\text{Area} = 2\pi r \phi$

Por lo tanto:

$$v_i = (k\Delta P/\phi\mu r) (dQ_i/dt) \quad (3.40)$$

Donde: dQ_i/dt es la rapidez de flujo adimensional

Por lo que la fuerza de arrastre es:

$$F_D \propto (k\Delta P/\delta\phi r) (dQ_i/dt) \quad (3.41)$$

La rapidez de flujo adimensional $dQ_i/dt = f(t, r_0/r)$, donde t = tiempo adimensional, r_0 = radio del núcleo de prueba y r = radio de la perforación.

Si $r_0/r > 10$ y $t = 30$, entonces: $dQ_i/dt = f(t)$

Para evaluar el gasto adimensional se usó un ejemplo con datos reales: Arenisca Berea, $\phi = 20\%$; $k = 200$ md; $\mu_{oil} = 1.52$ cp; Compresibilidad del aceite, $C = 0.00005$ /bar; radio del túnel de la perforación, $r = 0.5$ cms; presión diferencial $\Delta p = 100$ bars.

La Figura 38, muestra el gasto y el fluido total por centímetro de túnel contra el tiempo. El tiempo adimensional de 30, requerido para que $dQ_i/dt = f(t)$ equivale en este ejemplo a 0.82 milisegundos, en este tiempo, la velocidad de flujo ha disminuido a 1/3 de su valor original y 1/3 del flujo total ha ocurrido. Se sugiere que el "limpiado" ocurrirá durante este lapso y que una fuerza crítica (mínima) de arrastre se habrá alcanzado.

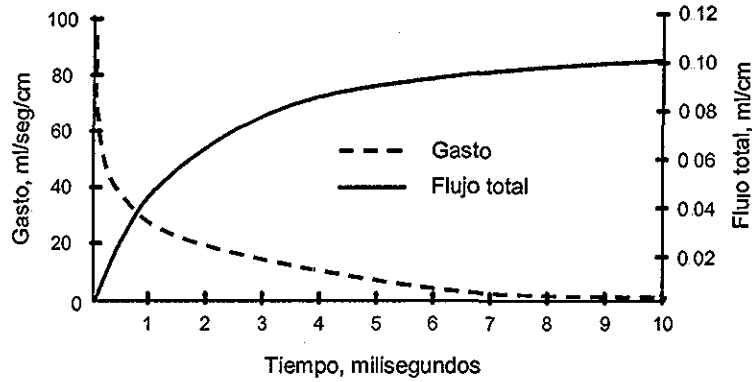


Figura 38 Flujo total y Gasto vs Tiempo (de Van Everdingen, $r_0/r = 10$) ⁽²⁰⁾

En la mayoría de los datos de prueba (API RP 43, 5ª. Edición, sección 4), no hubo flujo transitorio posterior al disparo, por consiguiente, el limpiado de la perforación solo podía deberse a la descompresión del fluido. Las pruebas indican que: *El flujo de fluido durante el brote de descompresión provee de la fuerza de arrastre para dislocar los granos fracturados y empezar el proceso de removerlos del túnel de la perforación.*

La fuerza crítica de arrastre es:

$$F_D \propto k\Delta P/\delta\phi r \quad (3.42)$$

Para el tamaño característico de poro hay diferentes correlaciones, una de ellas es la correlación simple de Ward:

$$\delta \propto k^{1/2} \quad (3.43)$$

Por lo que la fuerza crítica de arrastre es:

$$F_D \propto k^{1/2} \Delta P/\phi D \quad (3.44)$$

Donde D = diámetro del túnel.

Usando datos de 3 diferentes conjuntos de pruebas con arenisca Berea y Arenisca Gold y cargas explosivas de 3.2 gramos y 15 gramos, Behrmann graficó el skin (medido experimentalmente) vs. La fuerza de arrastre propuesta (ecuación 3.44). Los 3 gráficos dieron diferentes puntos de intersección por lo que realizó un ajuste reduciendo la dependencia del diámetro del túnel a $D^{0.3}$, (ver gráficos ajustados en fig. # 39) la explicación para hacer esto, admite Behrmann, requerirá de estudios posteriores.

El bajo balance crítico para obtener un daño o skin debido al disparo cercano a cero es:

$$\Delta P = \frac{1480\phi D^{0.3}}{k^{1/2}} \quad k > 100 \text{ md}, \quad (3.45)$$

Donde: ΔP (psi), ϕ en %, K en milidarcies, D en pulgadas

La ecuación (3.45) da valores muy altos para k pequeños que no concuerdan con los datos. Se redujo $K^{0.5}$ a $K^{0.33}$ arbitrariamente para ajustar más a rocas de baja permeabilidad:

$$\Delta P = \frac{630\phi D^{0.3}}{k^{1/3}} \quad k < 100 \text{ md}, \quad (3.46)$$

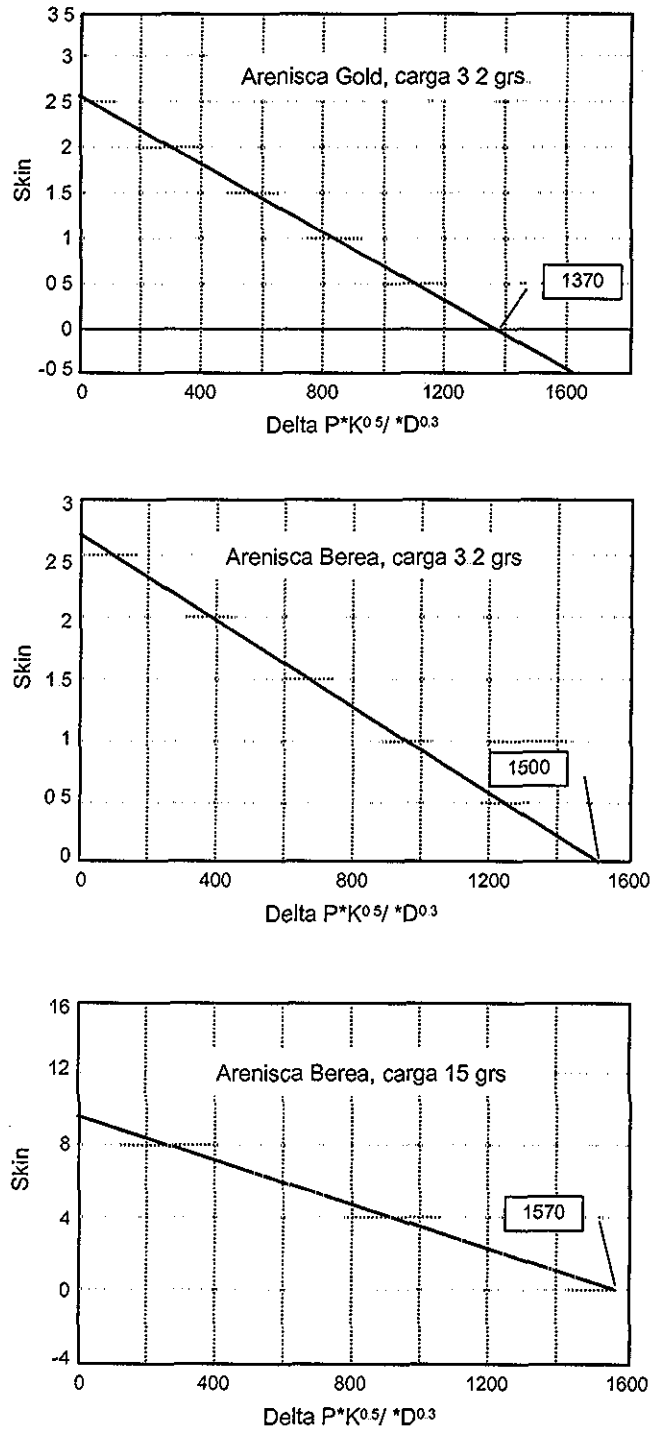


Figura 39 Skin por disparo vs. Fuerza de arrastre ⁽²⁰⁾

Para calcular el daño o skin por el disparo para presiones de bajo balance menores a las calculadas con las ecuaciones (3.45) y (3.46), Berhmann propone:

$$Skin_s = \left(\frac{CD}{20}\right)^2 * \left(\frac{2.63 - 0.00417 * \Delta PK^{1/3}}{\phi D^{0.3}}\right) \quad K < 100 \text{ md} \quad (3.47)$$

$$Skin_s = \left(\frac{CD}{20}\right)^2 * \left(\frac{2.64 - 0.00183 * \Delta PK^{1/2}}{\phi D^{0.3}}\right) \quad K > 100 \text{ md} \quad (3.48)$$

$$D = EH_{N80} * [3.27 - 0.61 \ln(UCS)], \text{ para cargas de alta penetración} \quad (3.49)$$

Donde:

CD Diámetro del liner de la carga en mm

EH_{N80} agujero de entrada en la TR N80

UCS Resistencia compresiva de la roca en Kpsi

Estos valores de skin son normalmente alimentados a un simulador que calcula el daño total del pozo, un dato adicional requerido en estos simuladores es la reducción de permeabilidad en la zona triturada y el espesor de la zona triturada, para lo anterior, si se asume un espesor de daño de $t_{pd} = 0.6$ pulgadas:

$$\frac{k_{pd}}{k} = \frac{\ln\left(\frac{r_{pd}}{r_p}\right)}{\left[\ln\left(\frac{r_{pd}}{r_p}\right) + Skin_s\right]} \quad (3.50)$$

donde: $r_p = D/2$, y $r_{pd} = r_p + t_{pd}$

Es importante recalcar que en este trabajo, Behrman plantea la respuesta a dos de las preguntas mas frecuentes en la planeación de una operación de disparo de producción:

1. ¿Cuál es la presión de bajo balance requerida para obtener perforaciones limpias con cero skin?
2. Si ese nivel de bajo balance no es usado, ¿Cuál es el daño por disparo?

Una observación pertinente es que este trabajo se basó en experimentos anteriores realizados en núcleos de areniscas Berea y Gold. Adicionalmente, en este estudio, como en la gran mayoría de trabajos similares, se requiere hacer una serie de suposiciones y simplificaciones con el fin de obtener respuestas y plantear soluciones analíticas que coincidan con los resultados experimentales.

3.3.4 Daño en función de las propiedades mecánicas de la roca

Las teorías hasta ahora presentadas relacionan el nivel de bajo balance con la permeabilidad y algunas otras propiedades como la porosidad de la roca, las propiedades del fluido y el diámetro del túnel de la perforación, sin embargo, podemos observar que aunque todos *estos trabajos concuerdan en que el nivel de bajo balance disminuye con el incremento en permeabilidad, hay una gran discrepancia en la relación específica propuesta.*

Ian Walton ⁽²¹⁾ plantea una nueva teoría que difiere de los modelos publicados, el propone que *el disparo bajo balance genera perforaciones productivas debido a que inicia falla mecánica de la zona dañada (triturada).*

La perforación de la formación por medio del jet generado por la carga explosiva provoca la creación de una zona triturada con un diámetro no mayor a un centímetro. La onda intensa de presión viaja en el túnel dañando la estructura de la roca en una región localizada alrededor del túnel comprimiendo los granos de arena y reduciendo el tamaño de los poros. Este daño resulta en una menor permeabilidad pero un cambio pequeño en la porosidad. La resistencia de la roca también es reducida debido a la disrupción del cementado intergranular. Ya que la presión del jet y su velocidad decaen conforme el jet penetra la roca, es de esperarse que la zona dañada creada por la onda de choque es más extensa cerca de la entrada y disminuye hacia el fondo de la perforación. *La extensión y magnitud de la zona dañada dependen de las propiedades de la roca, el esfuerzo efectivo impuesto, el tipo de fluido en los poros y del tipo y tamaño de la carga.*

El limpiado del daño por el disparo se puede visualizar como un proceso de dos etapas:

- I. Parte o todo el material en la zona triturada falla y es desprendido de la matriz
- II. El flujo de fluido en el túnel transporta parte o todo este material hacia el pozo y potencialmente a la superficie

Se cree que la 1ª. etapa es la que contribuye de mayor manera al incremento en productividad.

Walton propone que la generación de la falla mecánica (corte y/o tensional) en la zona dañada debida al proceso de disparo bajo balance, promueve la creación de perforaciones limpias y productivas.

Para modelar la falla mecánica se examinó la mecánica de fallas de cavidades cilíndricas. Tres mecanismos posibles se han propuesto para esta falla:

- Posibles mecanismos de falla
- 1. Falla Compresiva (corte)
 - 2. Falla tensional
 - 3. Erosión

La falla compresiva o de corte ocurre cuando el esfuerzo efectivo tangencial en la pared de la perforación excede la resistencia del material. Este modo de falla es inducido por una combinación de esfuerzos in situ y caídas de presión, lo cual lleva a una reducción de la presión de poro.

La falla tensional ocurre cuando el gradiente radial de presión cercano a la cavidad se vuelve negativo y excede en magnitud a la resistencia tensional del material. Esta falla es inducida por una caída excesiva de presión, lo cual provoca un alto gradiente radial de presión de poro.

La erosión también es inducida por un alto gradiente radial de presión de poro, pero esto induce una fuerza de arrastre en la escala de los granos individuales, más que en la escala de la zona dañada.

3.3.4.1 Brote de flujo bajo balance.

En alguna posición radial, el gasto alcanza un valor máximo antes de caer a un valor de estado estacionario. Este valor máximo gobierna el proceso de limpiado.

Una solución propuesta ⁽²²⁾ del gradiente radial de presión debido a la caída instantánea de presión es:

$$\left[\frac{dp}{dr} \right] = \frac{\Delta p}{a} \frac{dp_D}{dr_D} \quad (3.51)$$

$$\frac{dp_D}{dr_D} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-u^2 t_D} (J_1(ur_D)Y_0(u) - Y_1(ur_D)J_0(u))}{(J_0^2(u) + Y_0^2(u))} du \quad (3.52)$$

Donde:

- Δp Caída de presión (drawdown)
- r_D radio adimensional, $r_D = r/a$
- t_D tiempo adimensional, $t_D = kt/a^2$ $k = \text{difusividad}$

El interés en la solución se centrará en el gradiente de presión generado cerca de la formación, en el orden de cuatro veces el radio del túnel de la perforación por lo que las soluciones se darán para tiempos pequeños.

Una solución asintótica de un solo término válida solamente para valores pequeños de tiempo adimensional es:

$$\frac{dp_D}{dr_D} = f_1(\alpha) = \frac{2}{(r_D - 1)\sqrt{\pi\alpha r_D}} \exp(-1/\alpha) \quad (3.53)$$

Donde:
$$\alpha = \frac{4t_D}{(r_D - 1)^2}$$

Pearson and Zazovsky ⁽²³⁾ dan una solución asintótica aplicable solo a r_D cercano a 1:

$$\frac{dp_D}{dr_D} = f_0(\alpha) = \frac{2}{(r_D - 1)\sqrt{\pi\alpha}} \exp(-1/\alpha) \quad (3.54)$$

Comparando los resultados de la ecuación (3.53) y (3.54) con la solución numérica muestra que ambas soluciones coinciden pero en valores de r_D cercanos a 1. Para valores mayores las diferencias respecto de la solución numérica aumentan.

Sin embargo, lo que se busca es el valor pico del gradiente de presión radial, que está razonablemente bien representado por el valor pico de $f_1(\alpha)$, el cual se puede demostrar que es:

$$[f_1(\alpha)]_{\max} = \frac{0.48}{(r_D - 1)r_D^{1/2}} \quad (3.55)$$

y ocurre cuando $\alpha = 2$

Se puede ahora aproximar un valor máximo del gradiente de presión a una distancia radial r , como:

$$\left[\frac{dp}{dr} \right]_{\max} = \frac{0.48\Delta p}{(r-a)\sqrt{r/a}} \quad (3.56)$$

Este resultado se muestra en la siguiente figura:

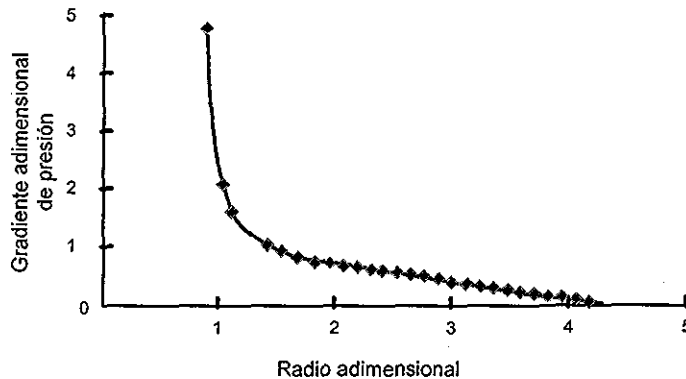


Figura 40 Gradiente máximo de presión durante el brote de flujo ⁽²²⁾

Uno de los puntos a resaltar de este resultado es que *el valor máximo del gradiente de presión radial es independiente de la permeabilidad de la formación y de la viscosidad del fluido.*

Estos parámetros influyen en la rapidez a la cual la presión cambia en la formación y por consiguiente el tiempo en el que ocurrirá el pico del gradiente de presión a un radio específico, pero claramente no impactan en su valor máximo.

El tiempo en el cual ocurre el limpiado puede ser estimado como el tiempo en el que el gradiente de presión alcanza un valor máximo, esto corresponde a aproximadamente 0.2 milisegundos (para $\alpha = 2$, $r_D = 3$, $t_D = 2$ y $k = 2\text{m}^2/\text{s}$), lo cual concuerda con resultados experimentales. Parece improbable que algún movimiento apreciable de partículas tome lugar en tan corto período de tiempo.

3.3.4.2 Erosión

Un gradiente de presión de suficiente magnitud ocurrirá solo dentro de la primera décima de milímetros dentro la matriz por lo que la erosión podrá remover solo las primeras capas de partículas.

Es improbable que la erosión sea un mecanismo significativo en la falla del túnel de la perforación durante el disparo bajo balance.

3.3.4.3 Falla Compresiva (Corte)

La aplicación de las teorías de elasticidad y plasticidad a roca rodeando un agujero cilíndrico sugieren que existe una zona plástica en la vecindad inmediata del agujero, mientras que a distancias grandes la roca puede ser considerada elástica.

Se define la resistencia de un cilindro hueco (HCS) como el valor de esfuerzo confinante al cual la muestra falla. Diversos experimentos han demostrado que HCS depende del diámetro del agujero del cilindro.

Los experimentos indican que:

- HCS \cong 1.5*UCS para agujeros grandes como el del pozo
- HCS \cong 4* UCS para agujeros pequeños como el del extremo final del túnel de la perforación
- HCS \cong 5* UCS para túneles muy angostos como los generados por el jet de la perforación

Como ejemplo, el valor de UCS para una roca Castlegate es de cerca de 10 MPa (1,450 lb/plg²) por lo que el valor de HCS para una cavidad cilíndrica como el túnel del disparo sería de 50 MPa (7,250 lb/plg²), este valor es excesivo por lo que para un túnel con un diámetro inicial de 0.5 cm no se colapsaría debido a falla por corte.

Parecería que *la falla compresiva o de corte no puede ser el mecanismo principal de falla del túnel de la perforación.*

No obstante, el túnel de la perforación inmediatamente después del disparo bajo balance en rocas Castlegate, se asemeja mucho a una prueba de cilindro de pared gruesa (TWC) después de la falla por corte por medio de la cual se evalúa la estabilidad de agujeros cilíndricos en rocas. La implicación es que la resistencia disminuida de la zona triturada puede jugar un papel importante. Es decir, la zona que rodea al túnel de la perforación (zona triturada) es más débil que la roca virgen.

HCS depende de UCS y del radio del agujero:

$$HCS = UCSf(r) \quad (3.57)$$

Walton asume por simplicidad que la resistencia del material se incrementa con la distancia radial:

$$UCS = UCS_0g(r) \quad (3.58)$$

Donde UCS_0 es la resistencia compresiva de la roca no alterada (virgen)

De los experimentos y cálculos con rocas Castlegate, surgen dos efectos sobre la resistencia del túnel que se contraponen. La resistencia aumentada de túneles mas pequeños es mas que compensada por la disminución en la resistencia del material a diámetros pequeños.

Este modelo sugiere que esfuerzos efectivos mas altos producen túneles más grandes, lo cual se asocia con el desprendimiento de más material de la zona dañada y resultaría en una productividad más alta. Un esfuerzo confinante efectivo de solo 2 veces UCS se necesita para colapsar la mayor parte de la zona dañada por el disparo. *Una forma de generar un esfuerzo efectivo mas alto es disminuyendo la presión de poro en la vecindad del túnel y esto se puede lograr incrementando el bajo balance. Por consiguiente, la productividad de una zona disparada está directamente asociada con el bajo balance.*

3.3.4.4 Falla tensional

La falla tensional ocurre cuando el esfuerzo radial efectivo cae por debajo de la resistencia (negativa) tensional.

$$\sigma'_r = \sigma_r - p < -\sigma_T \quad \text{ó} \quad p - \sigma_r > \sigma_T \quad (3.59)$$

Donde:

- σ'_r esfuerzo radial efectivo
- σ_r esfuerzo radial
- σ_T resistencia tensional
- p presión de poro

La condición usada comúnmente para falla tensional es:

$$\left[\frac{dp}{dr} \right]_{r=a} > \frac{UCS}{a} \quad (3.60)$$

3.3.4.5 Comparación de los modos de falla

Cual es el modo de falla crítico del túnel del disparo, compresiva, tensional o erosión; depende de los valores precisos de la presión de pozo y la caída de presión en relación con la resistencia de la roca.

A pesar de que la falla compresiva es casi seguramente el mecanismo de colapso de los pozos, la evidencia teórica soporta fuertemente a la falla tensional como un mecanismo importante para la falla de túneles de disparo.

3.3.4.6 Brote de flujo bajo balance y su efecto en la falla tensional y la erosión

El bajo balance crítico para remover el daño hasta un radio r está dado por:

$$\Delta p = 2UCS(r)\left(1 - \frac{r_0}{r}\right)\sqrt{r/r_0} \quad (3.61)$$

Sustituyendo la ecuación (3.58):

$$\Delta p = 2UCS_0 g(r)\left(1 - \frac{r_0}{r}\right)\sqrt{r/r_0} \quad (3.62)$$

3.3.4.7 Falla de la zona dañada

Hipóticamente la falla de la perforación es un proceso de uno o dos etapas dependiendo de las condiciones. Inicialmente la zona dañada falla bajo tensión en la superficie del túnel sin importar el bajo balance. Entonces, un túnel estable se alcanzará conforme la ecuación (3.62). El túnel resultante puede ser o no estable a falla por corte de acuerdo a las condiciones para falla compresiva, en las cuales se planteó que el túnel falla si el esfuerzo efectivo confinante excede el HCS.

El túnel fallará bajo corte a un diámetro, d , si el bajo balance está dado por:

$$\Delta p = UCS_0 f(r)g(r) - \tau_{eff}^0 \quad (3.63)$$

donde τ_{eff}^0 = esfuerzo confinante efectivo.

3.3.4.8 Conclusiones

Walton propone los siguientes pasos críticos para determinar el bajo balance óptimo:

1. Medir el HCS de la roca para agujeros con diferentes diámetros, ecuación (3.57): $HCS = UCSf(r)$
2. Medir la distribución de la resistencia de la zona dañada, ecuación (3.58): $UCS = UCS_0 g(r)$
3. El bajo balance óptimo requerido para fallar el túnel del disparo hasta un radio r en falla de corte está dado por la ecuación (3.63): $\Delta p = UCS_0 f(r)g(r) - \tau_{eff}^0$

Para falla tensional el óptimo bajo balance está dado por la ecuación (3.62):

$$\Delta p = 2UCS_0 g(r)\left(1 - \frac{r_0}{r}\right)\sqrt{r/r_0}$$

El bajo balance óptimo que hace fallar el túnel por falla de corte en toda la extensión de la zona dañada puede ser computado considerando $g(r) = 1$:

$$\Delta p + \tau_{eff}^0 = BUCS_0 \quad (3.64)$$

Donde B depende del diámetro de la zona dañada y tiene valores entre 2.5 a 4.5.

3.3.5 Influencia de los transitorios de presión en el daño por disparo

El método más aceptado para minimizar el daño por disparos en terminaciones de pozos de aceite y gas es el disparo bajo balance.

Walton y otros ⁽²⁴⁾, presentan en el 2001 una investigación innovadora de los transitorios de presión generados durante el disparo en el pozo y por lo tanto, cuanto bajo balance experimenta realmente el túnel del disparo.

No hay duda de que la presión del pozo varía ampliamente durante e inmediatamente después de la creación del túnel de la perforación. La presión de pozo oscila por un período muy corto de tiempo como resultado de las ondas de choque generadas por la detonación de la carga explosiva y la penetración del jet en el fluido del pozo. Enseguida, la presión del pozo aumenta como resultado de la extrusión del gas de la detonación dentro del pozo. La presión decrece entonces conforme la pistola se llena con fluido del pozo y se incrementa de nuevo en respuesta al flujo entrante de fluido del yacimiento. La presión diferencial puede cambiar de una condición de bajo balance a sobre balance y luego a un aumento en el bajo balance (como resultado del llenado de la pistola).

En este trabajo experimental, la presión dinámica se varió de manera controlada cambiando la configuración de disparo.

Además del esfuerzo de sobre carga y las presiones iniciales de poro y de pozo, los factores siguientes tienen un rol importante en la dinámica del pozo y la interacción pozo-yacimiento:

- Propiedades del yacimiento (permeabilidad, porosidad, resistencia)
- Fluidos del yacimiento y del pozo
- Penetración y diámetro del disparo
- Espesor de la TR y el cemento
- Geometría del pozo (diámetro de la TR y longitud de la zona disparada)
- Parámetros de la terminación tales como estranguladores y empacadores
- Desviación del pozo
- Tamaño de la pistola
- Standoff y excentricidad de la pistola
- Número, tipo y distribución de las cargas explosivas
- Fase y orientación de las cargas

Normalmente, al investigar los efectos del bajo balance se varía solo las presiones estáticas de pozo y/o presión de poro. En este trabajo, sin embargo, se encontraron diferencias considerables en productividad al variar alguno de los otros parámetros mientras se mantenía el bajo balance fijo.

La Figura 41 muestra una gráfica típica de transitorios de presión. Las etapas de variación de presión son: Después de los transitorios muy rápidos asociados con la propagación de la onda de choque, la presión del pozo aumenta desde el bajo balance inicial de 1,000 lb/plg² conforme los gases de la detonación entran al pozo. Luego, la presión del pozo cae conforme el líquido del pozo entra en la pistola y finalmente la presión de pozo aumenta y se equilibra con la presión de poro como resultado de la producción de fluido de la formación.

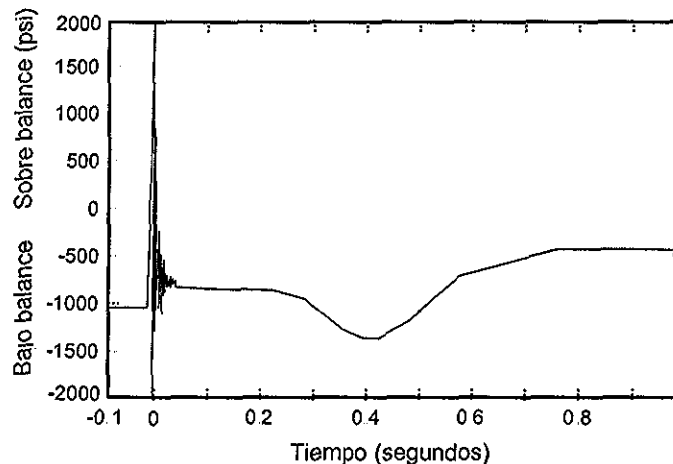


Figura 41 Transitorios de presión durante el disparo con un bajo balance inicial de 1,000 psi ⁽²⁴⁾

Una segunda serie de pruebas se hicieron en condición de sobre balance de 500 lb/plg². La Figura 42 muestra la gráfica de presiones transitorias obtenida:

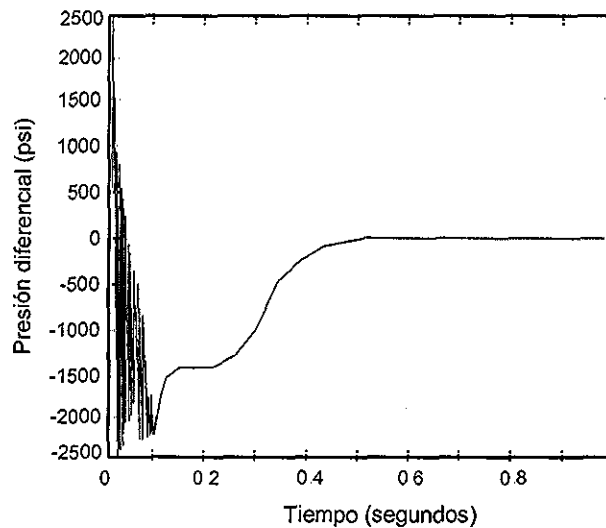


Figura 42 Transitorios de presión durante el disparo con un sobre balance inicial de 500 psi ⁽²⁴⁾

Las conclusiones de este trabajo son:

1. La productividad de los núcleos perforados depende más del bajo ó sobre balance inicial.
2. El paradigma prevalente del “bajo balance estático” necesita ser reemplazado con un nuevo paradigma de “bajo balance dinámico”
3. Para cada trabajo, debe diseñarse un sistema de disparo que cree y controle el bajo balance dinámico.
4. Es necesario hacer mas pruebas para confirmar estos resultados

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4 Conclusiones

El daño (skin) por el disparo se origina por la formación de la zona triturada por el jet de la carga explosiva

Esta zona dañada tiene aproximadamente la misma porosidad que la roca virgen pero menor permeabilidad

La resistencia mecánica de la zona dañada es menor que la original de la roca virgen

La extensión de la zona dañada depende principalmente del tamaño de la carga pero es del orden de 0.5 centímetros

La técnica mas aceptada para disminuir la magnitud del daño es el disparo bajo balance

Cuando la presión de formación es mayor que la presión del pozo tenemos una condición de bajo balance

Podemos dividir las teorías de eliminación del daño por disparo mediante el disparo bajo balance en dos: (1) Bajo balance versus permeabilidad y otras y (2) Bajo balance versus propiedades mecánicas

Existen numerosos trabajos encaminados a explicar el mecanismo de reducción o eliminación del daño a través del disparo bajo balance

Uno de los trabajos clásicos fue desarrollado por King (1986). Este fue un estudio de campo en el cuál se analizó el impacto de la magnitud del bajo balance comparado con pozos que no mejoraban su productividad después de ser acidificados

Tariq, en 1990, presenta un trabajo donde plantea que el limpiado o remoción de la zona dañada (triturada) por el disparo se debe al efecto del flujo turbulento creado por el bajo balance. Propone un Número de Reynolds que permite alcanzar esta condición

En 1991, Berhmann y Hsia, basados en trabajos experimentales en arenas, proponen una guía para determinar el nivel de bajo balance requerido para obtener una perforación limpia sin daño. Este depende de la permeabilidad de la roca y propiedades de los fluidos. Proponen un nuevo Número de Reynolds

Berhmann, en 1995, plantea que el nivel de bajo balance es función de la porosidad y permeabilidad de la roca, así como el diámetro del túnel hecho por el jet de la carga. Demuestra que no es necesario un flujo posterior al disparo ni la formación de flujo turbulento para alcanzar un daño cero. Establece una serie de ecuaciones para calcular el bajo balance óptimo y otras ecuaciones que permiten evaluar el daño cuando no se usa el bajo balance óptimo.

Ian Walton, presenta un trabajo en el 2000 donde plantea una nueva teoría sobre la remoción del daño por medio del bajo balance en función de las propiedades mecánicas de la roca. Walton dice que existen muchas discrepancias en las ecuaciones planteadas que pretenden explicar el proceso de remoción del daño en función de la permeabilidad y otras propiedades. Establece tres mecanismos posibles de falla o remoción de la zona dañada: (1) falla compresiva (corte), (2) Falla tensional y (3) erosión. Jerarquiza estos mecanismos en función de la resistencia compresiva de la roca, el diámetro del túnel de la perforación.

Los trabajos o estudios anteriores se enfocaban al análisis del bajo balance estático. En el 2001, Berhmann y Walton proponen que el proceso de limpiado depende mayormente de las condiciones dinámicas (transitorios) de presión creadas durante el disparo. Analizan las gráficas de los transitorios

de presión en períodos de tiempo del orden de milisegundos y concluyen que el limpiado depende más del bajo o sobre balance inicial. Sugieren usar sistemas de disparo particulares para cada pozo ya que en la dinámica de presiones influyen también el tamaño de pistola, el diámetro de la TR y otros.

Los trabajos anteriores, clásicos en su género, se realizaron principalmente en arenas tales como: Arenisca Berea, Arenisca Gold, Arena Castlegate. La formación del túnel del disparo y sus dimensiones dependen en buena parte del tipo de roca, así como de sus propiedades mecánicas (resistencia compresiva) y condiciones de esfuerzo (esfuerzo efectivo). Sin embargo, no se reportan trabajos basados en rocas de carbonato.

4. Desarrollo de la Investigación

En el Capítulo 3 hemos resumido los trabajos mas importantes que se han realizado en los últimos 15 años en relación con el estudio del daño provocado por el disparo así como la técnica preferida para minimizar o eliminar este daño: el disparo bajo balance.

El nivel de bajo balance estático se ha estudiado teórica y experimentalmente por medio de pruebas con núcleos obtenidos de afloramientos e incluso núcleos de yacimientos. Estas pruebas reproducen algunas condiciones de esfuerzo a las que normalmente se encuentra la roca en el subsuelo como son: presión de sobrecarga, presión de poro y la presión en el agujero del pozo.

Las rocas usuales en este tipo de prueba han sido arenisca Berea, arenisca Gold y Castlegate. Normalmente en este tipo de roca, el nivel de bajo balance necesario para limpiar la perforación no llega a ser tan grande, como se puede observar en la Tabla 7, del Capítulo 3 y en las Figuras 37 y 39.

Como podemos observar, todos los trabajos se han basado en estudios experimentales en rocas de areniscas y ningún trabajo se ha hecho en carbonatos. Si la estructura de la roca, así como sus propiedades mecánicas y petrofísicas influyen en el proceso de limpiado, es de esperarse que en el caso de los carbonatos, los niveles de bajo balance difieran de los de las arenas.

Dado lo anterior, se diseñó una investigación para determinar el daño del disparo en rocas carbonatadas y tratar de establecer el nivel de bajo balance óptimo para carbonatos.

En este capítulo se describe la investigación realizada en la cual usamos rocas de carbonatos sometidas a condiciones simuladas de esfuerzo

4.1 Objetivo de la Investigación

El objetivo principal del estudio experimental es:

I. Definir el daño provocado por el disparo en rocas de carbonatos sometidas a condiciones simuladas de esfuerzo

Como objetivos secundarios podemos enumerar:

II. Correlacionar los datos obtenidos en carbonatos con los datos experimentales de otros trabajos en arenas

III. Establecer el nivel óptimo de bajo balance para obtener un daño por disparo nulo en rocas carbonatadas

IV. Plantear las bases para establecer una guía operativa que permita disparar los pozos en formaciones de carbonatos obteniendo el mínimo daño por el disparo

Como en toda investigación de este tipo, no todas las preguntas tendrán una respuesta completa y probablemente se requiera de mayor investigación para definir alguno de los objetivos.

4.2 Pruebas anteriores en arenas

Como referencia resumiremos los resultados de trabajos anteriores al presente:

King, 1987

- a. General: $\Delta p = \frac{2900}{K^{0.36}}$
- b. Aceite: $\Delta p = \frac{3100}{K^{0.37}}$
- c. Gas: $\Delta p = \frac{3000}{K^{0.40}}$

Tariq, 1990

Ecuación de flujo turbulento radial para pozos de aceite:

$$\Delta p = \frac{3.089 \times 10^6 \mu^2 R_e r_2}{k_c^{0.4} \rho} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + R_e r_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right)$$

Ecuación de flujo turbulento radial para pozos de gas:

$$\Delta p^2 = \frac{22.8 \times 10^6 \mu^2 z T_r R_e r_2}{k_c^{0.8} G} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + R_e r_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right)$$

Berhmann, 1991

Mínimo bajo balance para obtener un daño de disparo cero versus permeabilidad:

$$\Delta p = \frac{1.726 \times 10^5}{K^{0.913}}$$

Berhmann y Hsia, 1995

El bajo balance crítico para obtener un daño o skin debido al disparo cercano a cero es:

$$\Delta P = \frac{1480 \phi D^{0.3}}{k^{1/2}} \quad k > 100 \text{ md,}$$

$$\Delta P = \frac{630 \phi D^{0.3}}{k^{1/3}} \quad k < 100 \text{ md,}$$

Walton, 2000

Para falla tensional el óptimo bajo balance está dado por la ecuación: $\Delta p = 2UCS_0 g(r) \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) \sqrt{r/r_0}$

El bajo balance óptimo que hace fallar el túnel por falla de corte en toda la extensión de la zona dañada puede ser computado considerando $g(r) = 1$: $\Delta p + \tau_{eff}^0 = BUCS_0$

Para detalles de nomenclatura y otros, favor de ir al Capítulo 3.

4.3 Descripción de las pruebas

Las pruebas de flujo /daño en rocas de carbonatos se basaron en el procedimiento de prueba de cargas perforadoras de pozo, API RP 19B, 1ª Edición, sección 4 ⁽⁴⁾. El autor de este trabajo de tesis es miembro del subcomité API que elaboró este procedimiento de prueba y participó de manera activa en las reuniones de discusión técnica llevadas a cabo en los E.U.A.

La sección 4, de este procedimiento de prueba se incluyó en el primer capítulo de esta tesis, por lo que en este capítulo haremos referencia al capítulo 1 y detallaremos solo aquellos puntos no incluidos.

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de flujo del Centro de Terminación de Yacimientos de la compañía Schlumberger (SRC, Schlumberger Reservoir Completions Center) en Rosharon Texas, ubicado a unos 20 kilómetros al sur de la Ciudad de Houston, Texas.

Originalmente se contemplaron un total de 10 pruebas, 6 con rocas de caliza y 4 en dolomía. Posteriormente agregamos tres pruebas más con el objeto de obtener información más consistente, lo que hace un total de 13 pruebas.

A continuación se describen estas pruebas y los resultados primarios.

4.3.1. Roca o Núcleos

Como hemos mencionado anteriormente, las rocas usadas para este estudio experimental fueron carbonatos, a diferencia de trabajos anteriores basados en arenas. Los núcleos se obtuvieron de bloques cortados de afloramientos en los E.U.A.

Algo importante de resaltar es que, una característica necesaria de la roca seleccionada como blanco de prueba es la *consistencia*. Esta característica está relacionada con la repetibilidad en sus características mecánicas y petrofísicas. Idealmente, los diferentes blancos usados para prueba debieran tener exactamente las mismas características con el fin de eliminar la influencia de factores como la porosidad, la resistencia compresiva, etcétera de manera que los resultados fueran función solo de los parámetros deseados como son la permeabilidad, el esfuerzo efectivo y sobre todo del nivel de bajo balance. Esto hace particularmente complicado la selección de un carbonato como blanco de prueba.

Subiaur ⁽²⁶⁾ en 1999 realizó una serie de pruebas de penetración de sistemas de disparo con la participación de 5 compañías líderes, en el Centro de pruebas de disparos de Schlumberger. Previo a la realización de estas pruebas, se investigó que rocas pudieran servir como blancos de prueba, la Tabla 10 resume algunas de las rocas encontradas.

En esta tabla podemos ver que se tienen dos opciones de carbonatos: (1) Caliza Burlington y (2) Caliza Bedford. En el trabajo referido se seleccionó la caliza Burlington dado que eran pruebas de penetración, tipo sección 1, API RP 43, 5ª Edición ⁽⁵⁾ (norma vigente en aquel entonces) y se deseaba tener una roca de alta resistencia compresiva semejante a las formaciones productoras de la Región Sur y Marina.

En este trabajo experimental el enfoque es diferente y en lugar de estudiar la penetración en rocas de alta dureza queremos estudiar el daño producido por el disparo en rocas carbonato por lo que la roca seleccionada deberá ser capaz de permitir el flujo de fluidos a través de su medio poroso, es decir, debe ser una roca con una porosidad y una permeabilidad medible.

Roca	UCS (ksi)	Porosidad (%)	Permeabilidad (mD)	Consistencia
Arenisca Nugget	<i>No disponible en tamaño requerido. Bloques de 3'x 3'x4' sin pegar secciones antes de cortar al tamaño requerido. Las secciones son de ~24" grueso</i>			
Arenisca Berea	7 to 9	21	200 to 400	Media
Arenisca White	6 to 8	15	10 to 80	Media
Arenisca Crab Orchard	17 to 20	8.5	0.1	Alta
Caliza Bedford	10	16	13	Alta
Caliza Burlington	15 to 18	1.4	nil	Media

Tabla 10 Rocas obtenidas de afloramientos y sus características ⁽²⁶⁾

4.3.1.1. Descripción de los blancos de prueba de Caliza Bedford

La roca caliza seleccionada para las pruebas se obtuvo de un afloramiento en el estado de Indiana, E.U.A. y su nombre es "Caliza Bedford".

La roca tiene una Resistencia compresiva uniaxial, UCS, entre 6,000 y 7,000 lb/plg², una porosidad entre 10% y 15%, una permeabilidad a líquido (keroseno) de 10 a 14 milidarcies.

Geológicamente se describe como "caliza ligeramente porosa oolítica, bioclástica con planos sedimentarios casi indeterminados".

Es una roca bastante consistente.

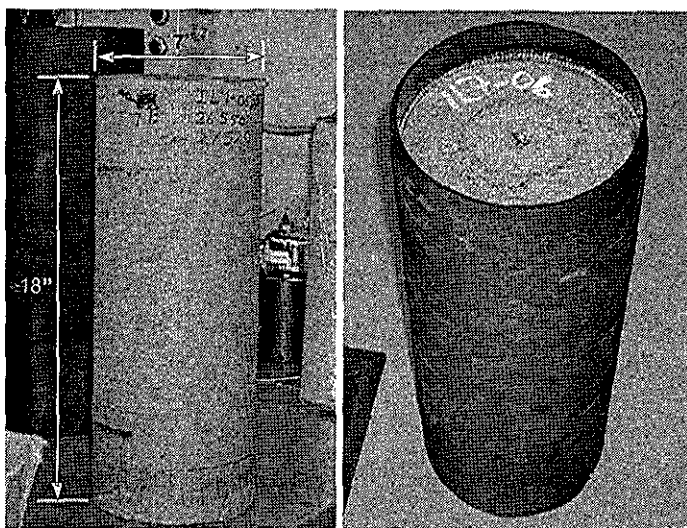


Figura 43 Blancos de caliza Bedford

Las dimensiones de los blancos fueron: Diámetro 7 pulgadas x Largo 17 ó 18 pulgadas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Es importante hacer notar que el procedimiento API RP 19B, sección 4, 1ª. Edición ⁽⁴⁾ requiere que los blancos tengan un diámetro mínimo de 4 pulgadas para cargas de menos de 15 gramos y de 7 pulgadas para cargas de mas de 15 gramos, sin embargo, en estas pruebas se usaron solo blancos de 7 pulgadas excediendo con esto las especificaciones mínimas API.

4.3.1.2. *Descripción de los blancos de prueba de Dolomia Silurian*

La roca dolomía seleccionada para las pruebas se denomina “Dolomía Silurian”.

Esta roca tiene una Resistencia compresiva uniaxial, UCS, de 8,100 lbs/plg², densidad de grano de 2.86 gr/cm³, porosidad cercana a un 20%, una permeabilidad a líquido (keroseno) entre 80 y 150 milidarcies.

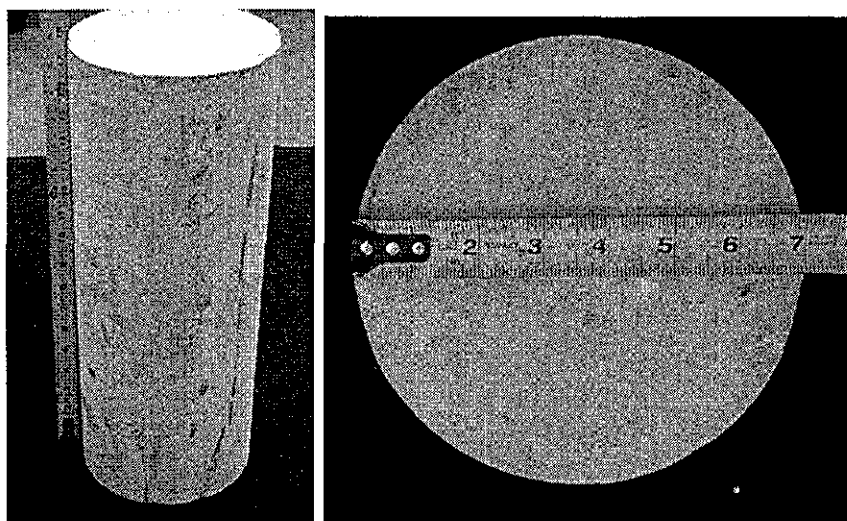


Figura 44 Blancos de dolomía Silurian

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.1.3. Preparación del banco de prueba

Los blancos de prueba cilíndricos son cortados del bloque con las dimensiones especificadas de 7" x 18".

Posteriormente se llevan a un horno ventilado de secado en donde se colocan a una temperatura de 200°F (no mayor a 210 °F) por al menos 24 horas.

Después del secado en el horno, los blancos son pesados en una balanza, este peso se considera el peso del blanco completamente seco.

La Figura 45 muestra un diagrama del centro de preparación (saturación) de los núcleos.

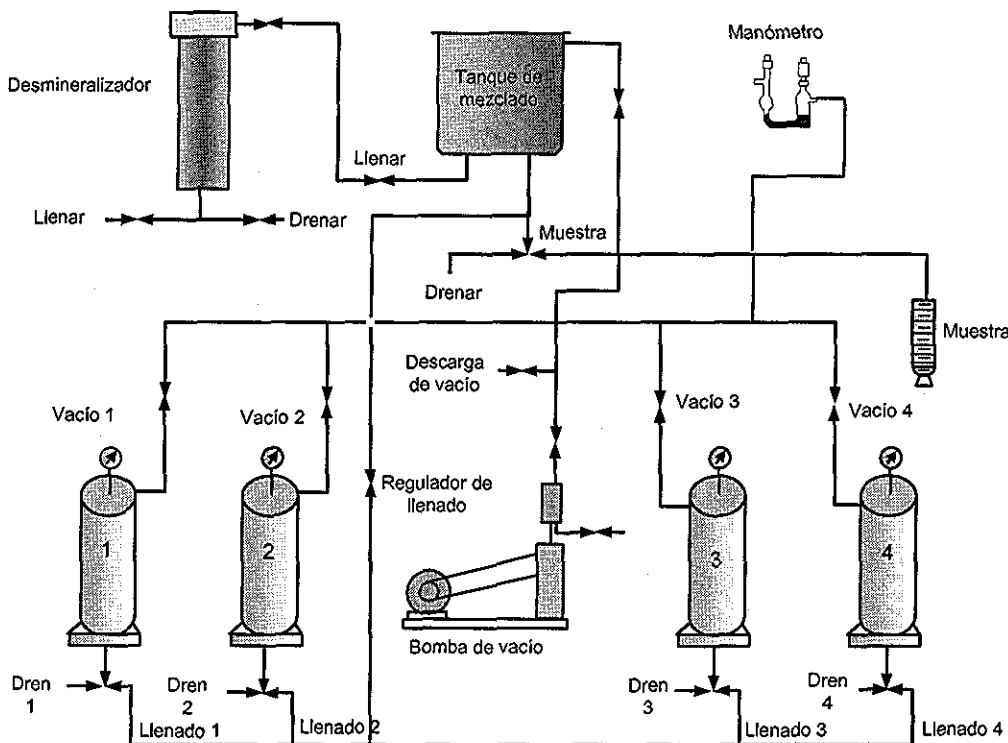


Figura 45 Centro de preparación de los blancos (núcleos)

Los núcleos son evacuados en una cámara a prueba de aire que tiene un puerto de evacuación y una bomba. Los blancos son evacuados hasta una presión de 1 mm de mercurio o menos por un mínimo de 6 horas antes de admitir el fluido de saturación. La saturación se hace en los recipientes al vacío permitiendo que el fluido de saturación entre por la parte inferior y avanza saturando el blanco por capilaridad. Es decir, el fluido de saturación no es admitido a una velocidad mayor que el aumento de nivel debido a capilaridad.

Después de ser saturados, los blancos se vuelven a pesar y de la diferencia de pesos del blanco seco y saturado se deduce la porosidad con la fórmula:

$$\phi = 100 \left(\frac{W_{TS} - W_{TD}}{\rho_M} \right) V_b \quad (4.1)$$

Donde: W_{TS} = peso del blanco saturado, W_{TD} = peso del blanco seco, ρ_M = densidad del fluido de saturación y V_b = volumen del blanco.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

La Figura 46 muestra una fotografía de dos recipientes al vacío donde se colocan los núcleos que se van a saturar.

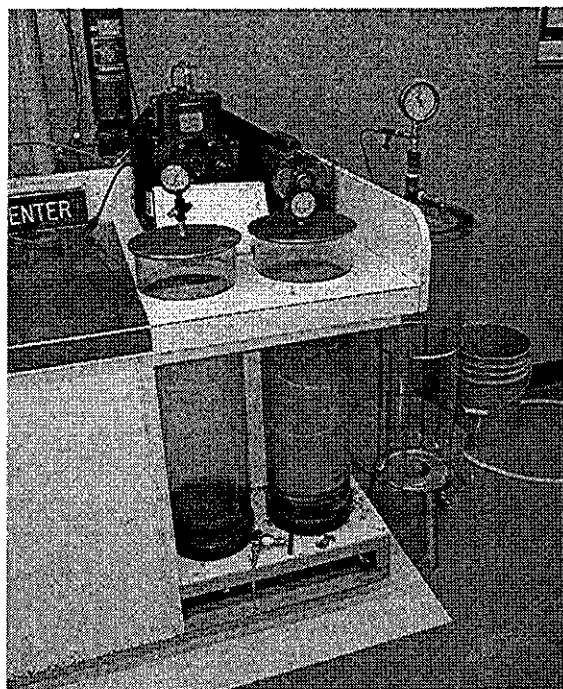


Figura 46 Recipiente al vacío para saturación de núcleos. (Cortesía SRC, Schlumberger)

Medición de la permeabilidad

Aunque ya se describió en el Capítulo 1, transcribiremos aquí el procedimiento para la medición de la permeabilidad:

Se deberán hacer medidas adecuadas de la permeabilidad de las muestras antes del disparo. La permeabilidad deberá medirse en toda la muestra tanto paralela ($K_{||}$) como perpendicular (K_{\perp}) a los planos sedimentarios usando los métodos que se describen mas adelante. Los valores de $K_{||}$ y K_{\perp} serán usados para calcular el flujo esperado hacia dentro de la perforación usando el procedimiento que se verá mas adelante.

Para las muestras con los ejes perpendiculares a las capas sedimentarias, se usará el flujo axial para medir la permeabilidad perpendicular a las capas y el flujo a través del diámetro se usa para medir la permeabilidad paralela. Para las muestras orientadas paralelas a las capas, será lo contrario. En el último caso, los segmentos de flujo del método de sección transversal están orientados para obtener flujo perpendicular a las capas. Las técnicas detalladas a usar quedan a discreción de la compañía con excepción de:

- a. La medida deberá hacerse bajo el mismo esfuerzo efectivo usado durante el disparo de prueba.
- b. El núcleo deberá estar en la misma condición de saturación de fluido que el usado durante el disparo de prueba y se deberán usar el mismo fluido y rango de volúmenes de flujo en ambas pruebas durante las medidas de flujo.
- c. Las mismas restricciones al sistema de flujo que se mencionaron anteriormente se aplicarán aquí.

En cuanto al blanco de prueba y equipo:

Introducción. Dentro de las especificaciones del blanco de prueba, la presión puede ser aplicada a los lados cilíndricos de la muestra, a sus extremos, o ambos, dependiendo de la presión de poro anticipada en el campo. A continuación se ilustran algunos métodos para lograr estas condiciones de frontera.

Flujo Radial. La presión de poro se aplica a los lados cilíndricos del blanco. El espacio entre la camisa y la muestra (ver Figura 15, Capítulo 1) se llena con un material flexible con al menos 2 darcies de permeabilidad. El apuntalante de bauxita (malla 20/40) o varilla metálicas de ½ pulgada de diámetro pueden ser usadas. Un aro-sello con un orificio central entre la placa frontal y la muestra previene la fuga de fluido. Un arillo opcional y una placa en la parte trasera de la muestra previenen el flujo hacia dentro de los extremos de la muestra. El flujo puede también ser bloqueado desde la porción del blanco mas cercana al agujero de entrada para burdamente simular el daño por la barrena. El ensamble completo se coloca en el envase presurizado de confinamiento y se presuriza. La medición de permeabilidad radial se hace haciendo pasar un fluido por una sección de longitud L' del núcleo.

Usando la ecuación (4.2), los datos son convertidos a permeabilidad:

$$K = 5.79 \times 10^3 \frac{Q\mu}{L'\Delta P} \quad (4.2)$$

Donde:

K = permeabilidad, milidarcies; Q = volumen de flujo medido, cm^3/seg ; μ = viscosidad del fluido, centipoises; L = longitud de la zona de prueba a lo largo del núcleo, pulgadas; ΔP = presión diferencial corregida para la caída de presión del sistema de flujo, libras/pulg²

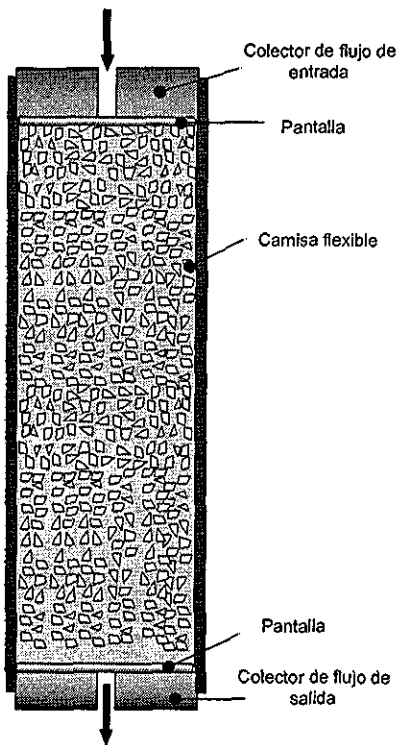


Figura 47 Geometría típica para Flujo Radial

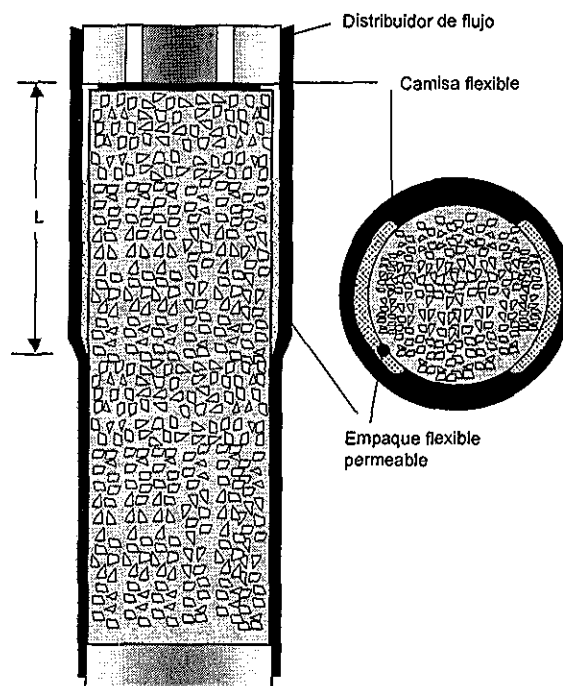


Figura 48 Geometría típica para Flujo Axial⁽⁴⁾

Flujo Axial. La presión de poro se aplica solamente al extremo sin perforar de la muestra. La tapa de fondo del extremo (ver Figura 16, Capítulo 1) distribuye el fluido a través del extremo de la muestra por medio de un sistema de ranuras y pantallas de acero. El ensamble completo se coloca en el envase presurizado de confinamiento y se presuriza.

La expresión que se utiliza para calcular la permeabilidad axial es:

$$k = 1.84 \times 10^3 \frac{Q \mu L}{R^2 \Delta P} \quad (4.3)$$

Donde:

- K permeabilidad en milidarcies
- Q Gasto en cm^3/seg
- μ viscosidad, cp
- L Longitud del blanco, pulgadas
- R Radio del blanco, pulgadas
- ΔP Presión diferencial corregida por la caída de presión en el sistema, lb/plg^2

Las siguientes fotografías muestran algunos aspectos de la medición de la permeabilidad.

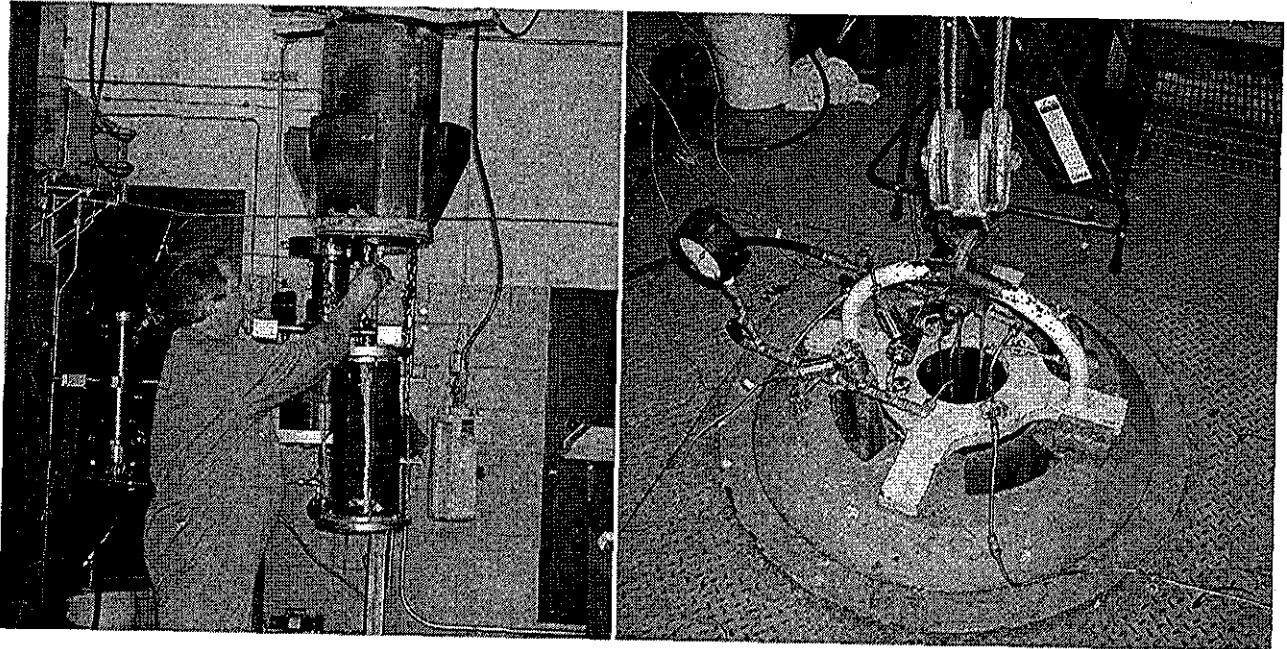


Figura 49 Preparación e introducción del blanco en la fosa para medir permeabilidad

4.3.2. Volúmenes esperados de flujo

A continuación se da una guía para calcular los volúmenes esperados de flujo para las diferentes geometrías descritas anteriormente. Si se desea, se pueden usar cálculos más refinados que usen modelado de elementos finitos del agujero perforado.

Blanco en flujo radial. La ecuación siguiente se aplica cuando la permeabilidad es uniforme y cilíndricamente simétrica. El volumen de flujo puede ser calculado con la ecuación siguiente:

$$Q_c = 1.08 \times 10^{-3} \frac{\Delta P}{\mu} \left[\frac{K_1 D}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} + \frac{K_2 r R}{R - r} \right] \quad (4.4)$$

Donde:

- Q_c = volumen de flujo, cm³/seg.
- ΔP = presión diferencial, libras/pulg²
- μ = viscosidad del fluido, centipoises
- D = Profundidad de la perforación, pulgadas
- r = Radio de la perforación, pulgadas
- r = Radio de la muestra, pulgadas

Los valores de permeabilidad, K₁ y K₂ (en milidarcies) se derivan de las permeabilidades medidas paralela y perpendicular a las capas.

Para los núcleos orientados con los ejes paralelos a las capas:

$$K_1 = K_2 = (K_{\perp} K_{\parallel})^{1/2} \quad (4.5)$$

Para los núcleos orientados con los ejes perpendiculares a las capas:

$$\begin{aligned} K_1 &= K_{\parallel} \\ K_2 &= (K_{\perp} K_{\parallel}^2)^{1/3} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Los valores de K₁ y K₂ usados deberán ser reportados junto con los valores medidos paralela y perpendicularmente.

Blanco en flujo axial. Esta geometría requiere de un análisis de elementos finitos para calcular el flujo ideal y determinar CFE.

4.3.3. Cargas explosivas

Hemos mencionado en el Capítulo 3 que el tamaño de las cargas influye en la magnitud del daño provocado por el disparo. Berhmann propone en 1995 una ecuación (3.47, 3.48 y 3.49 del Capítulo 3) en la que el daño es función del diámetro del liner de la carga, entre otros.

En México, especialmente en las regiones Marina y Sur, donde los yacimientos son principalmente formaciones de carbonatos, los sistemas de disparos más usuales son:

- Sistema de disparo expuesto semirecuperable de 2-1/8", alta penetración, fase 40°, 45° o 60°, densidad de 20 cargas por metro. Este sistema utiliza una carga explosiva con 14-15 gramos de explosivo.
- Sistema de disparo TCP de 3-3/8", alta penetración, fase 60°, 20 cargas por metro. Las cargas utilizadas en esta pistola contienen cerca de 22 gramos de explosivo.

Por lo anterior, se seleccionaron cargas de 15 y 22 gramos de explosivo para este estudio experimental.

La descripción de las cargas y su desempeño se pueden consultar en las hojas API de las siguientes páginas.

Es importante mencionar que la selección de las cargas para la prueba se hizo de acuerdo a lo estipulado en el procedimiento de prueba de cargas perforadoras de pozo, API RP 19B, 1ª Edición, sección 4⁽⁴⁾ que especifica:

Las cargas explosivas que se usarán en la prueba deberán ser tomadas de una corrida de producción de 1,000 cargas si se usa RDX y de una línea de producción de cuando menos 300 cargas si se usan cargas de HMX. Una vez seleccionadas deberán ser empacadas en el envase normal de transporte de la compañía. Las cargas deberán ser almacenadas por un periodo mínimo de cuatro semanas antes de las pruebas.

Las cargas explosivas usadas son:

Carga Ultrajet 2906, 15.0 gramos HMX

Carga Powerjet 4512, 22.5 gramos HTX

Del lote de producción se tomaron 6 cargas de cada una para pruebas de control de calidad previas a la selección de las cargas para nuestras pruebas.

La siguiente figura muestra una hoja API RP 19B, sección 1, 1ª edición que muestra el desempeño de la carga de 15 gramos utilizada en nuestras pruebas. El desempeño corresponde a un sistema de disparo (pistola) de 2-7/8" de diámetro, fase 60° y densidad de 20 cargas por metro disparado en un blanco de concreto API con una resistencia compresiva de la muestra (briquet) de 6,352 lb/plg².



REGISTERED DATA SHEET PERFORATING SYSTEM EVALUATION, API RP 19B SECTION 1

Page 1 of 1

Service Company	Schlumberger	Explosive Weight	15.0 gm	HMX powder	Case Material	Steel
Gun OD & Trade Name	2.88-in High Shot Density	Max. Temp. °F	400	1 hr	3 hr	24 hr
Charge Name	Unislot 2508 HMX	Maximum Pressure Rating	25,000	psi	Carrier Material	Steel
Manufacturer Charge Part No.	H543150	Date of Manufacture	12/27/01	Shot Density Tested	8	Shots/ft
Gun Type	TGP & Wireline Hollow Carrier, Non-Reusable	Recommended Minimum ID for Running	See Remarks			
Phasing Tested	60 degrees	Firing Order	X	Top Down		Bottom Up
Debris Description	Steel Chips	Available Firing Mode	X	Selective	X	Simultaneous
Remarks	Maximum gun diameter after shooting in liquid is 2.66 in. In air it is 3.68 in.					
Debris Weight	n/a	gm/charge		Debris	n/a	in/charge

SECTION 1 - CONCRETE TARGET

Casing Data	4.12 in	OD	Weight	11.6	lb/ft	L-80	API Grade	Date of Section 1 Test	01/22/02			
Target Data	60 in	OD	Amount of Cement	0.500	lb	Amount of Sand	7.800	lb	Amount of Water	2.047	lb	
Date of Compressive Strength Test	01/22/02	Siquitto Compressive Strength	6,352	psi	Age of Target	31	days					
Shot No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	
Clearance, in	0.00	0.22	0.78	1.12	0.76	0.22	0.00	0.22	0.78	1.12	0.78	
Casing Hole Diameter, Short Axis, in	0.31	0.32	0.32	0.31	0.30	0.32	0.37	0.35	0.40	0.31	0.32	
Casing Hole Diameter, Long Axis, in	0.31	0.34	0.41	0.32	0.40	0.38	0.35	0.37	0.41	0.32	0.35	
Average Casing Hole Diameter, in	0.31	0.33	0.40	0.33	0.40	0.37	0.38	0.36	0.41	0.32	0.35	
Total Depth, in	23.7	22.3	22.3	21.2	17.1	21.1	22.1	22.2	25.0	25.1	23.8	
Burr Height, in	0.05	0.05	0.07	0.05	0.02	0.05	0.07	0.02	0.04	0.05	0.05	
Shot No.	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 17	No. 18	No. 19	No. 20	No. 21	No. 22	Average
Clearance, in	0.22	0.00	0.22	0.78								0.35
Casing Hole Diameter, Short Axis, in	0.37	0.34	0.33	0.32								0.37
Casing Hole Diameter, Long Axis, in	0.40	0.35	0.34	0.39								0.38
Average Casing Hole Diameter, in	0.39	0.35	0.34	0.39								0.38
Total Depth, in	23.8	22.7	18.8	18.2								22.1
Burr Height, in	0.09	0.05	0.05	0.09								0.07

WITNESSING INFORMATION

Date of Notice of Intent to Test: 01/15/02 Witnessed by: Bill Maden - API

Other Activities Witnessed: Target Pointing Briquet Preparation Testing Burr Height Measurements Samples Taken: Concrete Casing

CERTIFICATION

I certify that these tests were made according to the procedures as outlined in API RP 19B: Recommended Practices for Evaluation of Well Perforators, First Edition, November 2000. All of the equipment used in these tests, such as the guns, jet charges detonator cord, etc., was standard equipment with our company for the use in the gun being tested and was not changed in any manner for the test. Furthermore, the equipment was chosen at random from stock and therefore will be substantially the same as the equipment, which would be furnished to perforate a well for any operator. The American Petroleum Institute neither endorses these test results nor recommends the use of the perforator system described.

X CERTIFIED BY: [Signature] Perforating Systems Manager 02/01/02 Schlumberger Services Corporation, P.O. Box 1590, Houston, TX 77250
 RECERTIFIED (Company Official) (Title) (Date) (Company) (Address)

API Form 19B-A

K549109, 1/98, Rev.

Figura 50 Hoja API RP 19B, 1ª Edición, sección 1 de la carga de 15 gramos

Este desempeño API se obtuvo bajo el nuevo procedimiento de prueba de cargas perforadoras de pozo, API RP 19B, 1ª Edición, sección 1⁽⁴⁾. Los datos obtenidos son:

Penetración promedio: 22.1 pulgadas

Diámetro del agujero de entrada en la TR: 0.36 pulgadas

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

La siguiente figura muestra una hoja API RP 19B, sección 1, 1ª edición que muestra el desempeño de la carga de 22.5 gramos utilizada en nuestras pruebas. El desempeño corresponde a un sistema de disparo (pistola) de 4.72" de diámetro, fase 135°/45° y densidad de 40 cargas por metro disparado en un blanco de concreto API con una resistencia compresiva de la muestra (briquet) de 5,400 lb/plg².

AP American Petroleum Institute REGISTERED DATA SHEET PERFORATING SYSTEM EVALUATION, API RP 19B SECTION 1 Page 1 of 2

Service Company <u>Schlumberger Well Services</u>		Explosive Weight <u>22.5 gm</u> <u>HTX</u> powder, Case Material <u>Steel</u>									
Gun OD & Trade Name <u>4.72-in. High Shot Density</u>		Max. Temp. °F <u>550</u> 1 hr. <u>0</u> hr. <u>0</u> hr. <u>24</u> hr. <u>450</u> 100 hr. <u>440</u> 200 hr.									
Charge Name <u>Powder 4512 HTX</u>		Maximum Pressure Rating <u>20,000</u> psi. Carrier Material <u>Steel</u>									
Manufacturer Charge Part No. <u>1447761</u> Date of Manufacture <u>08/14/01</u>		Shot Density Tested <u>12</u> Shots/ft									
Gun Type <u>TCP & Wireline Hollow Carrier, Non Reusable</u>		Recommended Minimum ID for Running <u>5.02</u> in.									
Phasing Tested <u>135/45</u> degrees, Firing Order <u>x</u> Top Down <u>Bottom Up</u>		Available Firing Mode <u>x</u> <u>Selective</u> <u>x</u> <u>Simultaneous</u>									
Debris Description <u>Steel Chips</u>		Debris Weight <u>n/a</u> gm/charge, Debris <u>n/a</u> in ³ /charge									
Remarks											
SECTION 1 - CONCRETE TARGET											
Casing Data <u>7.0-in.</u> OD, Weight <u>32</u> lb/ft, <u>1.90</u> API Grade, Date of Section 1 Test <u>10/30/01</u>											
Target Data <u>72-in.</u> CO, Amount of Cement <u>5,400</u> lb, Amount of Sand <u>10,800</u> lb, Amount of Water <u>2,625</u> lb											
Date of Compressive Strength Test <u>10/30/01</u> Briquette Compressive Strength <u>7,571</u> psi, Age of Target <u>28</u> days											
Shot No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11
Clearance, in.	0.09	1.13	0.61	0.16	1.37	0.16	0.61	1.13	0.00	1.13	0.61
Casing Hole Diameter, Short Axis, in.	0.37	0.24	0.31	0.38	0.23	0.38	0.31	0.24	0.37	0.25	0.29
Casing Hole Diameter, Long Axis, in.	0.38	0.25	0.32	0.39	0.23	0.41	0.31	0.27	0.38	0.26	0.30
Average Casing Hole Diameter, in.	0.38	0.25	0.32	0.38	0.23	0.40	0.31	0.26	0.38	0.26	0.30
Total Depth, in.	22.8	28.1	25.0	25.7	25.3	22.2	25.2	23.7	33.4	24.8	25.2
Burr Height, in.	0.06	0.04	0.07	0.03	0.05	0.08	0.05	0.08	0.11	0.09	0.09
Shot No.	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 17	No. 18	No. 19	No. 20	No. 21	No. 22
Clearance, in.	0.18	1.37	0.16	0.61	1.13	0.00	1.13	0.61	0.18	1.37	0.16
Casing Hole Diameter, Short Axis, in.	0.36	0.22	0.40	0.32	0.25	0.38	0.25	0.28	0.35	0.22	0.39
Casing Hole Diameter, Long Axis, in.	0.38	0.23	0.49	0.33	0.25	0.39	0.27	0.28	0.41	0.24	0.40
Average Casing Hole Diameter, in.	0.37	0.23	0.49	0.33	0.25	0.39	0.26	0.28	0.40	0.23	0.40
Total Depth, in.	21.7	25.0	22.4	25.2	25.8	19.8	25.3	23.2	24.2	24.7	22.4
Burr Height, in.	0.08	0.05	0.02	0.03	0.05	0.11	0.07	0.04	0.07	0.05	0.08
WITNESSING INFORMATION											
Date of Notice of Intent to Test: <u>10/30/01</u>		Witnessed by: <u>Jerry Baldwin - API</u>									
Other Activities Witnessed: Target Pouring <u> </u> Briquette Preparation <u> </u> Testing <u>X</u> Burr Height Measurements <u> </u> Samples Taken: Concrete <u>X</u> Casing <u>X</u>											
CERTIFICATION											
I certify that these tests were made according to the procedures as outlined in API RP 19B: Recommended Practices for Evaluation of Well Perforators, First Edition, November 2000. All of the equipment used in these tests, such as the guns, jet charges detonator cord, etc., was standard equipment with our company for the use in the gun being tested and was not changed in any manner for the test. Furthermore, the equipment was chosen at random from stock and therefore will be substantially the same as the equipment, which would be furnished to perforate a well for any operator. The American Petroleum Institute neither endorses these test results nor recommends the use of the perforator system described.											
<u>X</u> CERTIFIED BY RECEIVED	<u>[Signature]</u> (Company Official)	Product Development Manager (Title)	11/19/01 (Date)								
		Schlumberger Research Completions Center (Company)	P.O. Box 1820, Houston, TX 77583 (Address)								

Figura 51 Hoja API RP 19B, 1ª Edición, sección 1 de la carga de 22 gramos

Este desempeño API se obtuvo bajo el nuevo procedimiento de prueba de cargas perforadoras de pozo, API RP 19B, 1ª Edición, sección 1 ⁽⁴⁾. Los datos obtenidos son:

Penetración promedio: 23.5 pulgadas

Diámetro del agujero de entrada en la TR: 0.31 pulgadas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.3.1. Arreglo o pistola

El arreglo de la carga simula las condiciones en que normalmente se colocan las cargas dentro del tubo de la pistola y además se mantiene un claro de ½ pulgada desde el tubo portacargas al blanco.

Las figuras siguientes muestran el arreglo usado en las pruebas.

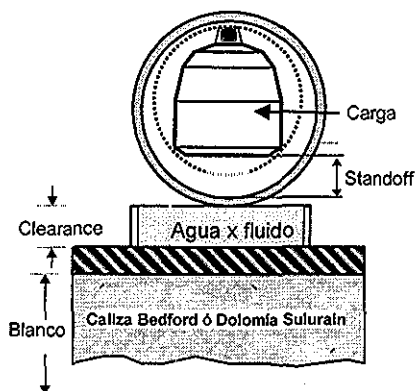


Figura 52 Esquema del arreglo de montaje

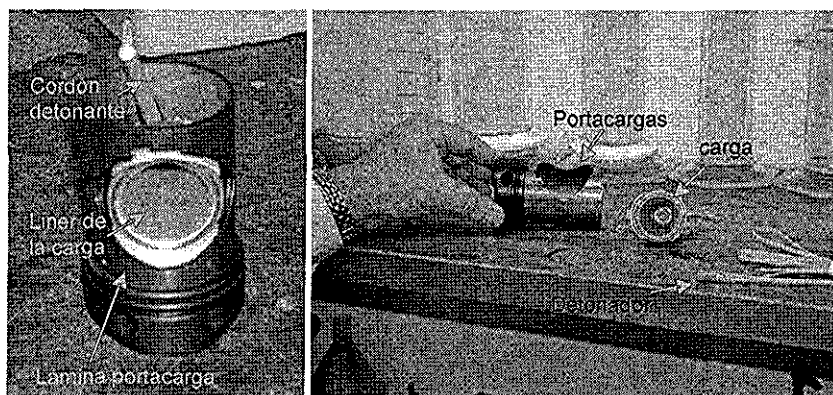


Figura 53 Fotografía del arreglo de montaje en el portacargas

4.3.4. Equipo de prueba

Dado que este estudio experimental requiere de reproducir algunas condiciones de esfuerzo a las que normalmente se encuentra sometida una roca productora, el equipo debe ser capaz de establecer estas condiciones en el núcleo de prueba.

4.3.4.1. Laboratorio

El laboratorio de pruebas en SRC cuenta con dos contenedores presurizados (pressure vessels), denominados PV-93 y PV-20. Ambos contenedores pueden duplicar las tres principales condiciones de esfuerzo encontradas en el pozo (presión de sobrecarga o confinamiento, presión de poro o yacimiento y presión de pozo). Dentro de estos contenedores presurizados se colocan los blancos de roca (afloramiento o núcleo de pozo). Se pueden conducir pruebas con fluidos de una sola fase (aceite, agua o gas) o de fase mixta (aceite/agua, aceite/gas ó aceite/agua/gas).

El laboratorio cuenta con sensores de presión que permiten la medición y adquisición de datos computarizados en experimentos a presión o gasto constante.

Se pueden hacer disparos únicos con diferentes cargas explosivas y realizar las medidas de flujo en los contenedores presurizados.

4.3.4.2. Cámaras simuladoras de presión y/o esfuerzos

En nuestros experimentos, se montaron los núcleos de Caliza Bedford o Dolomía Silurian dentro del contenedor presurizado después de obtener sus medidas de porosidad y permeabilidad (con los métodos descritos anteriormente), la máxima presión dentro del PV-93 es de 10,000 lb/plg².

La figura siguiente muestra un diagrama del contenedor PV-93 utilizado:

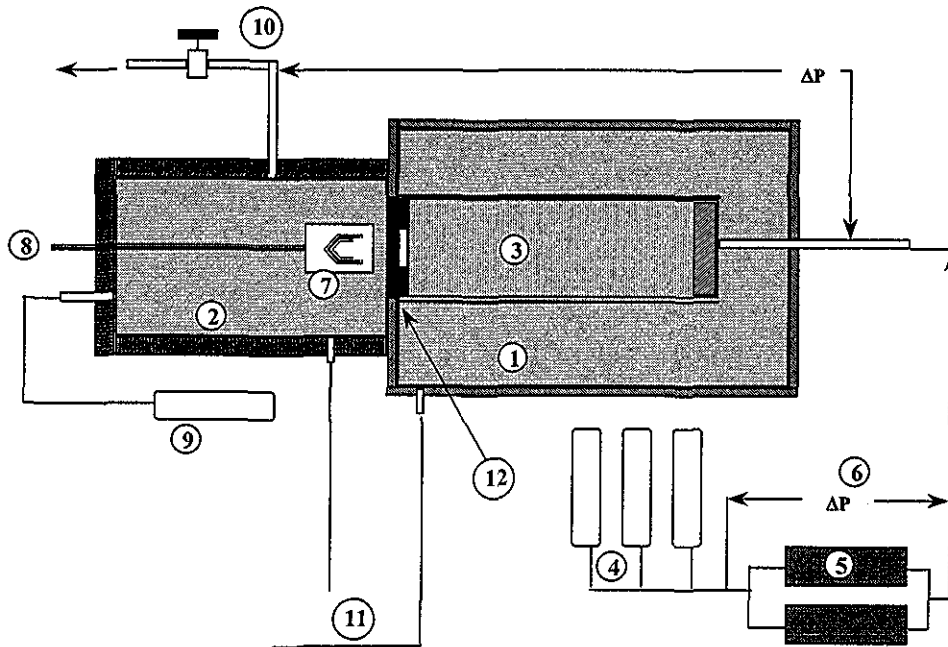


Figura 54 Esquema del Contenedor presurizado PV-93 (Cortesía SRC, Schlumberger)

- (1). Cámara de confinamiento con fluido de confinamiento (Keroseno)
- (2). Pozo simulado con fluido de pozo
- (3). Núcleo muestra con presión de poro y fluido en poro
- (4) 3 Acumuladores 3 de 10 galones con precarga determinada de gas
- (5). Muestras simuladas de rocas de yacimiento
- (6). Sensores de presión diferencial
- (7). Pistola con carga explosiva
- (8) Conductores del disparo
- (9). Acumulador 5 galones
- (10) Válvula micrométrica
- (11). Sensores PCB
- (12). Placa de disparo

El agujero simulado de pozo se llena con fluido de pozo. Los blancos se colocaban dentro de camisas de hule para prevenir la comunicación con el fluido confinante.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Figura 55 Funda o camisa de hule para aislar núcleo y muestra (núcleo) disparado dentro de la camisa de hule

En un extremo de la muestra se coloca un aditamento que permite impartir una presión de poro. El fluido de los poros se almacena en un banco de acumuladores de 30 galones a la presión de yacimiento (precargada con el fluido apropiado, en este caso Keroseno) Los acumuladores proveen al blanco o núcleo del fluido de yacimiento necesario en el momento del brote de bajo balance y simulan mejor la compresibilidad del fluido de formación. Con el fin de simular las condiciones de fondo en el momento del brote de bajo balance, se hace fluir al fluido desde los acumuladores a través de una serie de muestras de roca de baja o alta permeabilidad (con permeabilidad conocida), las cuales proveen de una resistencia al flujo de fluidos. Esto ayuda a asegurar que el flujo dentro del núcleo es similar al flujo dentro del yacimiento en condiciones de fondo.

Se montan sensores de presión diferencial a través de las muestras de roca que simulan el yacimiento y la muestra de roca de prueba, para obtener medidas de presión diferencial de estado estacionario y transitorio. La carga moldeada explosiva dentro del arreglo (ver Figuras 53 y 54) se coloca en la sección de la cámara que simula el agujero del pozo a una distancia standoff de $\frac{1}{2}$ pulgada de la placa de disparo (que simula la TR y cemento). Los conductores para el disparo se unen a conectores fluido-aire y desde afuera se instalan alambres conductores hacia la caja de disparo.

Un acumulador de 5 galones pre-cargado a 750 lbs/plg^2 es acoplado al lado del agujero del pozo para simular las condiciones de fondo de pozo y proveer de fluido para llenar el volumen de la pistola. La válvula micrométrica se usa para fluir la cámara a presiones elevadas inmediatamente después del disparo y remover los gases de la detonación en solución. Se tienen instalados sensores balísticos de presión de alto gasto, PCB en las cámaras del pozo y de confinamiento para grabar las fluctuaciones de presión al momento de la detonación. Una placa de acero de 1.125 pulgadas de espesor se coloca entre el núcleo y la pistola para simular la TR y el cemento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La figura siguiente muestra la colocación de los sensores de presión.

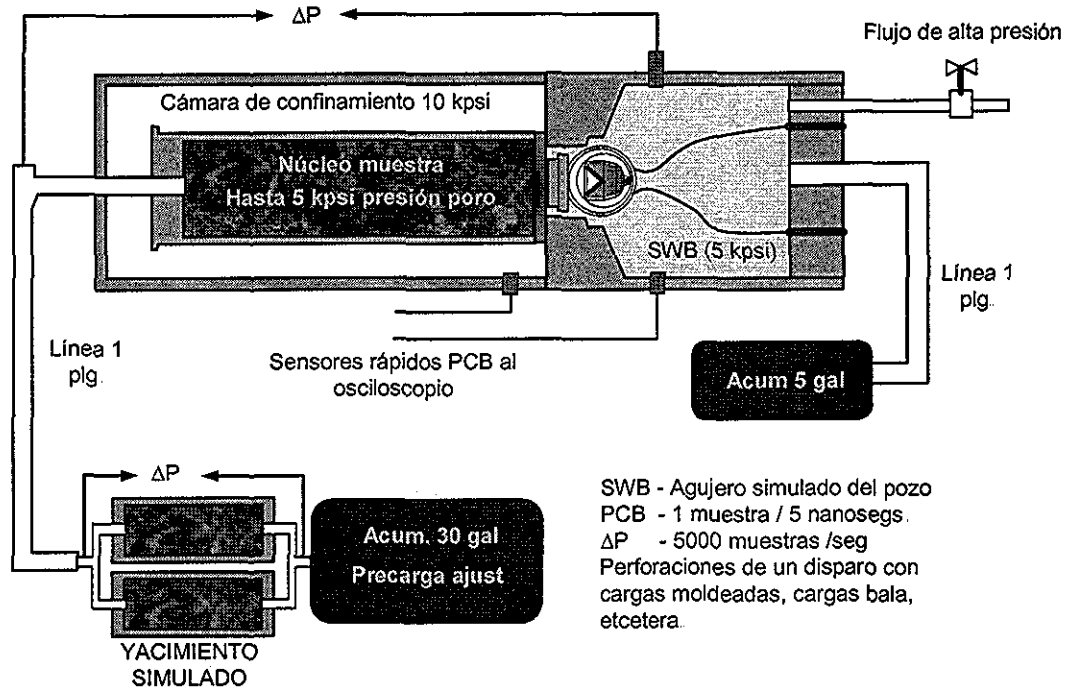


Figura 56 Diagrama del Contenedor presurizado PV-93 y ubicación de sensores de presión

Se usaron dos tipos de sistemas de medida para grabar los datos transitorios de presión durante el proceso de disparo: Medida de datos rápidos con sensores piezoeléctricos de cuarzo acoplados a osciloscopios digitales (resolución de un microsegundo) y medida de datos lentos usando transductores convencionales tipo diafragma acoplados a tarjetas de adquisición de datos de computadora (resolución de 0.5 milisegundos). Dos sensores de cuarzo se usaron para grabar los cambios dinámicos de la presión de confinamiento y de pozo y tres transductores de presión se usaron para grabar la presión de pozo absoluta, la presión diferencial poro-pozo y la presión diferencial a través del yacimiento simulado. La posición de los transductores y sensores de cuarzo se muestra en la Figura 56.

Se conecta un tubo de flujo a la perforación después del disparo para permitir que fluya el fluido hacia fuera del pozo bajo condiciones controladas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La Tabla 11 resume alguna de las características más importantes del contenedor presurizado usado en nuestras pruebas.

	Contenedor presurizado PV-93
Presión de sobrecarga, lb/plg ²	10000
Presión de poro, lb/plg ²	5000
Presión de pozo, lb/plg ²	5000
Tamaños estándar de núcleos:	
Longitud (pulgadas)	11, 18
Diámetro (pulgadas)	4, 5.25, 7
Dimensiones máximas de Núcleo:	
Longitud (pulgadas)	18
Diámetro (pulgadas)	7
Temperatura	Ambiente

Tabla 11 Características del Contenedor presurizado. (Cortesía SRC, Schlumberger)

A continuación veremos fotografías del contenedor y otras partes del laboratorio tomadas durante el desarrollo de las pruebas.

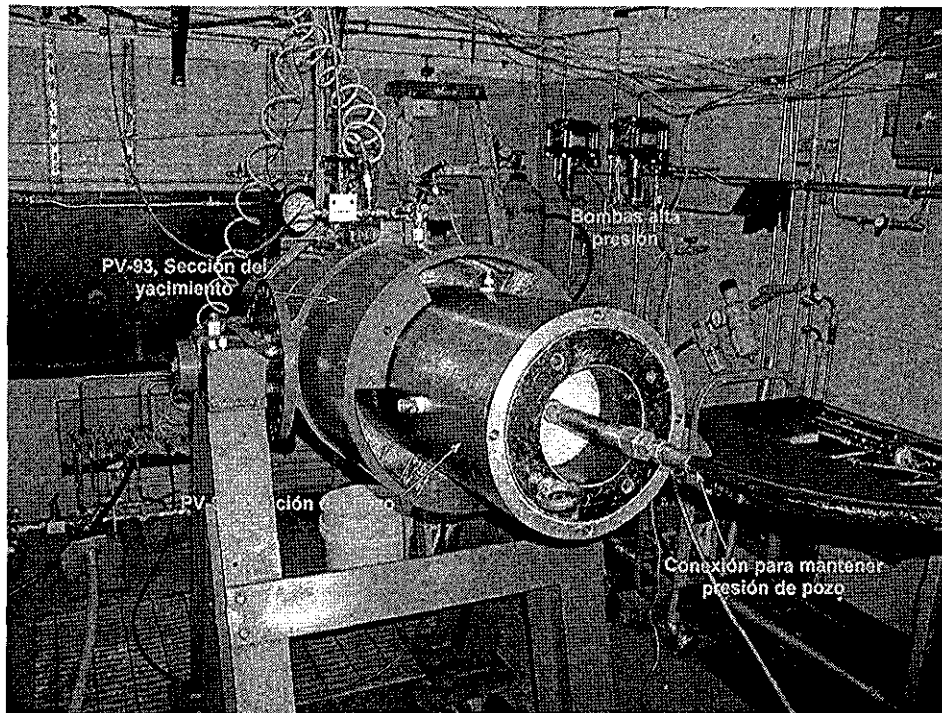


Figura 57 Fotografía del Contenedor presurizado PV-93

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.5. Resultados de las pruebas

El diseño de estas pruebas, toman en cuenta, tanto como es posible, los efectos relevantes del yacimiento y el pozo. Para el disparo, la presión de poro se fijó en 5,000 lb/plg² para cada una de las pruebas y se varió la presión de pozo para obtener la presión de bajo balance deseada. La presión de sobrecarga o confinamiento fue de 8,000 lb/plg² en todas las pruebas de manera que teníamos un esfuerzo efectivo (presión de confinamiento menos presión de poro) de 3,000 lb/plg² en todas las pruebas. La pistola, el pozo simulado y acumuladores de pozo son del tamaño requerido para modelar las condiciones de campo lo mas cercano posible.

Las pruebas se dividen en tres categorías basados en el núcleo y tipo de carga. Las cuatro primeras pruebas de disparo se hicieron para evaluar la productividad del disparo en blancos de Caliza Bedford disparados con presiones bajo balance estático de 500, 1000, 2000, y 3000 lb/plg². Se usó una carga PJ 2906 de 15 gramos para las Pruebas 1 a 4. Las propiedades del yacimiento, pozo y pistola se consideran, tanto como es posible, en el laboratorio. Mediante acumuladores de presión se simulan las condiciones lejanas de yacimiento y pozo. Los acumuladores de pozo y poro son del tamaño adecuado para proporcionar un flujo instantáneo considerado como conmensurable con las condiciones típicas de pozo (0.5 a 1.0 galones). Las Pruebas 5 a 9 se realizaron para evaluar la productividad de los núcleos de Dolomía Silurian disparados con presiones bajo balance estático de 500, tres a 1000 (una repetición), y 3000 lb/plg². Se usó también la carga PJ 2906 de 15 gramos en estas pruebas. Los blancos para las Pruebas 10 a 13 fueron de Caliza Bedford nuevamente. Estas pruebas se hicieron con presiones bajo balance estático de 1000, 1000, 3000 y 4000 lb/plg², pero difieren de las primeras pruebas en Caliza Bedford en que se utiliza una carga mas grande PJ 4512 de 21.7 gramos en lugar de la carga PJ 2906 de 15 gramos. La Prueba 8 fue similar a la Prueba 7 excepto por el diámetro de la línea al acumulador de pozo. Las Pruebas 7 y 11 son réplicas de las Pruebas 6 y 10 respectivamente.

Después del disparo, las presiones de poro y pozo se permite que se igualen antes de alistar el blanco para bombear flujo. La presión de pozo se desfoga lentamente a la presión ambiental. Los gases producidos en la detonación fluyen desde el núcleo durante este período de flujo a presión elevada. La presión de confinamiento se reduce simultáneamente para mantener el esfuerzo efectivo de sobrecarga en el núcleo. Entonces se bombea Keroseno a través del blanco (núcleo) con una bomba precisa de bajo gasto. El Keroseno entra alrededor del perímetro del núcleo, fluye radialmente a través del núcleo dentro de la perforación y sale del núcleo a través del túnel de la perforación. Un tubo de flujo se conecta a la perforación después del disparo para permitir que el fluido salga del pozo a través del túnel de la perforación. Un arreglo para gasto constante se usa para fluir las muestras de roca y la productividad de la muestra de núcleo perforado se mide. Después de completar el flujo el núcleo es abierto para inspeccionarlo y medir el túnel de la perforación.

A continuación se detalla cada una de las pruebas.

4.3.5.1. Prueba 1

Se usó un núcleo de Caliza Bedford y se perforó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo. La Figura 60 muestra una fotografía del blanco perforado. La presión inicial de pozo se fijó en 4,500 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 500 psi relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 3,750 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ½ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 17.7.

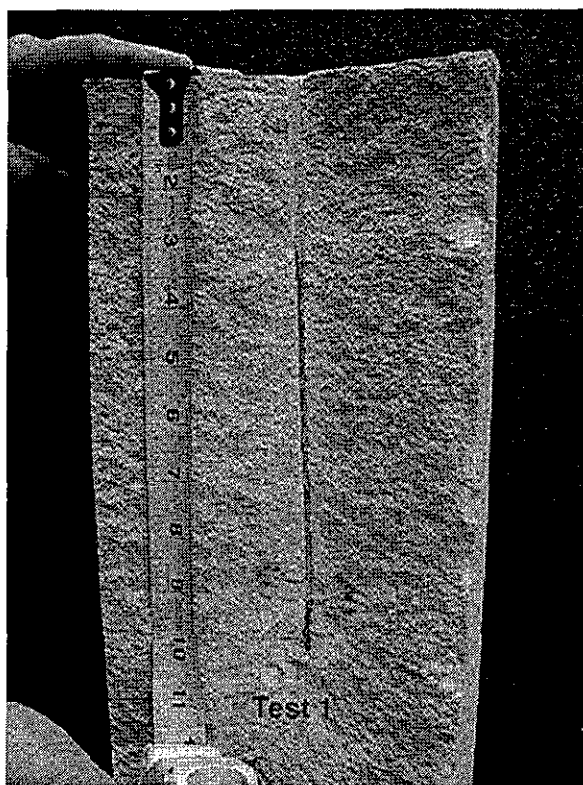


Figura 58 Fotografía del blanco de Caliza Bedford disparado usado en la prueba 1

4.3.5.2. Prueba 2

Se usó un núcleo de caliza Bedford y se perforó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 4,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 1,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 2,374 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ½ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 5.3 (comparado con los 17.7 de la primera prueba).

4.3.5.3. Prueba 3

Se usó un núcleo de caliza Bedford y se perforó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 3,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 2,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 1,000 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ½ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 4.6.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.5.4. Prueba 4

Se usó un núcleo de Caliza Bedford y se perforó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 2,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 3,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 1,650 lb/plg². Sin embargo, debido a un problema técnico, la cámara simuladora de pozo se conectó inadecuadamente al acumulador de 5 galones con una carga de gas residual estimada de 3,000 lb/plg². Como en las pruebas 1-3, el acumulador se conectó a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ½ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 2.9.

4.3.5.5. Prueba 5

Esta fue la primera prueba con Dolomía Silurian y se disparó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo. La Dolomía Silurian es más permeable que la Caliza Bedford. La presión inicial de pozo se fijó en 4,500 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 500 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Acumuladores de pozo de 10 galones fueron pre-cargados a 3,750 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de 1/4 pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 11.2.

4.3.5.6. Prueba 6

Se usó un núcleo de Dolomía Silurian y se perforó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 4,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 1,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 2,374 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de 1/4 pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 3.5. Esta prueba se repitió dado que los resultados de productividad fueron inusualmente buenos y al abrir el blanco se notó un área débil que pudo influir en el resultado.

4.3.5.7. Prueba 7

Esta prueba es la repetición de la Prueba 6. Se usó un núcleo de Dolomía Silurian y se perforó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo.

El daño por el disparo para esta prueba fue de 8.2.

4.3.5.8. Prueba 8

Esta prueba se diseñó para probar el efecto de una columna de gas en el perfil gráfico de las presiones iniciales y la productividad de la perforación. Esencialmente, la Prueba 8 es una repetición de la Prueba 7 pero cambiando el diámetro de la línea a los acumuladores de pozo. Un diámetro grande de la línea da una respuesta de pozo más rápida y se considera el caso de las columnas de pozo con gas en la parte superior. Para esta prueba se usó una línea de ½ pulgada de diámetro en lugar de la de ¼ pulgada usada en la Prueba 6. Se usó un núcleo de Dolomía Silurian y se perforó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo. Como en la prueba 6, la presión inicial de pozo se fijó en 4,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 1,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 2,374 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ½ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 6.5.

4.3.5.9. Prueba 9

Se usó un núcleo de Dolomía Silurian y se perforó con una carga PJ 2906 con 15 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 2,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 3,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 705 lb/plg². El acumulador se conectó a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ¼ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,224 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 5.2.

4.3.5.10. Prueba 10

Se usó un núcleo de Caliza Bedford y se perforó con una carga más grande PJ 4512 con 21.7 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 4,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 1,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 2,374 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ¼ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 1.3.

4.3.5.11. Prueba 11

Esta prueba fue una repetición de la Prueba 10 debido a dudas en los resultados. Se usó un núcleo de Caliza Bedford y se perforó con una carga PJ 4512 con 21.7 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 4,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 1,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 2,374 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ¼ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,000 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 7.3.

4.3.5.12. Prueba 12

Se usó un núcleo de Caliza Bedford y se perforó con una carga más grande PJ 4512 con 21.7 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 2,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 3,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 705 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ¼ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,224 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 1.1.

4.3.5.13. Prueba 13

Se usó un núcleo de Caliza Bedford y se perforó con una carga PJ 4512 con 21.7 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 1,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 4,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²). Dos acumuladores de pozo de cinco galones fueron pre-cargados a 255 lb/plg² y conectados a la cámara simuladora del pozo mediante una manguera de ¼ pulgada de diámetro y 10 pies de longitud. Los acumuladores simuladores de yacimiento de 30 galones se pre-cargaron a 2,025 lb/plg².

El daño por el disparo para esta prueba fue de 0.7.

4.3.5.14. Resumen de resultados

Las condiciones experimentales y los resultados se resumen en las Tablas 12 a 15:

Núcleo	Caliza Bedford (Indiana)	Dolomita Silurian
UCS (lb/plg ²)	5400 to 8000	8155
Porosidad (rango)	12 to 17%	16 to 19%
Permeabilidad Axial (rango)	3 to 15 md	69 to 165 md
Permeabilidad Radial (rango)	3 to 11 md	80 to 207 md
Planos sedimentarios	Perpendicular al eje	Perpendicular al eje
Longitud (pulgadas)	17 to 18	17 to 18
Diámetro (pulgadas)	7	7

Tabla 12: Propiedades de los núcleos

Desarrollo de la Investigación

Núcleo	Prueba 1, IL706	Prueba 2, IL710	Prueba 3, IL709	Prueba 4, IL708
	Bajo balance convencional	Bajo balance convencional	Bajo balance convencional	Bajo balance convencional
Condiciones	Abierto a superficie. Columna sup de salmuera y gas	Abierto a superficie. Columna sup de salmuera y gas	Abierto a superficie. Columna sup de salmuera y gas	Abierto a superficie. Columna sup de salmuera y gas
<i>Presiones arreglo (Setup)</i>				
Presión sobrecarga (psi)	8000	8000	8000	8000
Presión poro (psi)	5000	5000	5000	5000
Presión simulada de pozo (psi)	4500	4000	3000	2000
Esfuerzo efectivo (psi)	3000	3000	3000	3000
Bajo Balance Estático (psi)	500	1000	2000	3000
Bajo Balance Dinámico (psi)	N/A	1960	2640	3350
<i>Propiedades del núcleo</i>				
Tipo de Roca	Caliza Bedford	Caliza Bedford	Caliza Bedford	Caliza Bedford
Longitud del núcleo (plg)	16.875	15.875	15.875	16.75
Diámetro núcleo (plg)	7	7	7	7
Porosidad (%)	11.4	13.3	12.5	12.4
UCS (psi)				
Permeabilidad Axial (md)	14.9	8.59	8.51	7.78
0-180 Perm. diametral (md)	11.6	7.53	6.9	8.04
90-270 Perm. diametral (md)	9.6	6.27	7.2	7.84
Axial PI	0.366	0.224	0.222	0.19
0-180 Diametral PI	1.61	1.04	0.95	1.11
90-270 Diametral PI	1.32	0.85	1.00	1.08
<i>Perforación</i>				
Carga	PJ2906	PJ2906	PJ2906	PJ2906
Standoff Pistola (plg)	0.5	0.5	0.5	0.5
Línea Acumulador (plg)	½	½	½	½
Longitud total en Roca (mm)	260	200	165	117
Longitud limpia en Roca (mm)	101	189	135	112
Diámetro Promedio (mm)	4	3.7	4	4
PI Posterior al Disparo (radial)	0.373	0.445	0.409	0.421
<i>Flujo Post Disparo</i>				
PI(post)/PI(pre)	0.255	0.470	0.470	0.384
CFE	0.177	0.416	0.459	0.569
Daño (Skin)	17.7	5.3	4.6	2.9

Tabla 13: Condiciones del Arreglo Experimental y Resumen de Resultados Experimentales (Caliza Bedford, Carga PJ 2906). Se define PI como el Gasto/Presión diferencial en unidades cc/seg/100 lbs/plg²

Desarrollo de la Investigación

Núcleo	Prueba 5, SD704	Prueba 6, SD703	Prueba 7, SD701	Prueba 8, SD705	Prueba 9, SD702
	Bajo Balance Convencional	Bajo Balance Convencional	Bajo Balance Convencional	Bajo Balance Convencional	Bajo Balance Convencional
Condiciones	Abierto a superficie, Lleno con salmuera	Abierto a superficie, Lleno con salmuera	Abierto a superficie, Lleno con salmuera	Abierto a superficie, Lleno con salmuera	Abierto a superficie, Lleno con salmuera
<i>Presiones arreglo (Setup)</i>					
Presión sobrecarga (psi)	8000	8000	8000	8000	8000
Presión poro (psi)	5000	5000	5000	5000	5000
Presión simulada de pozo (psi)	4500	4000	4000	4000	2000
Esfuerzo efectivo (psi)	3000	3000	3000	3000	3000
Bajo Balance Estático (psi)	500	1000	1000	1000	3000
Bajo Balance Dinámico (psi)	1750	1620	2160	2150	3160
<i>Propiedades del núcleo</i>					
Tipo de Roca	Dolomita Silurian	Dolomita Silurian	Dolomita Silurian	Dolomita Silurian	Dolomita Silurian
Longitud del núcleo (plg)	17 625	18	17 5	17	17 5
Diámetro núcleo (plg)	7	7	7	7	7
Porosidad (%)	17.9	19.0	17.3	16.3	18.6
UCS (psi)					
Permeabilidad Axial (md)	142 2	164.7	68 8	108 6	83 1
0-180 Perm diametral (md)	173 4	206.9	88 9	92 2	86 5
90-270 Perm diametral (md)	174 4	191.4	80 1	106.4	80 9
Axial PI	3.5	4.06	2.03	2.83	2.03
0-180 Diametral PI	24.0	28.6	9.51	12.8	11.5
90-270 Diametral PI	24.1	26.5	12.3	14.7	12.0
<i>Perforación</i>					
Carga	PJ2906	PJ2906	PJ2906	PJ2906	PJ2906
Standoff Pistola (plg)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Línea Acumulador (plg)	¼	¼	¼	½	¼
Longitud total en Roca (mm)	225	190	285	165	185
Longitud limpia en Roca (mm)	115	165	280	152	178
Diámetro Promedio (mm)	7	9	10	12	14
PI Posterior al Disparo (radial)	8.07	17.8	6	5 6	6 3
<i>Flujo Post Disparo</i>					
PI(post)/PI(pre)	0.336	0.646	0.550	0.408	0.536
CFE	0.224	0.463	0.259	0.294	0.327
Daño (Skin)	11.2	3.5	8.2	6.5	5.2

Tabla 14: Condiciones del Arreglo Experimental y Resumen de Resultados Experimentales (Dolomita Silurian, Carga PJ2906)

Núcleo	Prueba 10, IL712	Prueba 11, IL717	Prueba 12, IL711	Prueba 13, IL716
	Bajo Balance Convencional	Bajo Balance Convencional	Bajo Balance Convencional	Bajo Balance Convencional
Condiciones	Abierto a superficie, Lleno con salmuera	Abierto a superficie, Lleno con salmuera	Abierto a superficie, Lleno con salmuera	Abierto a superficie, Lleno con salmuera
<i>Presiones arreglo (Setup)</i>				
Presión sobrecarga (psi)	8000	8000	8000	8000
Presión poro (psi)	5000	5000	5000	5000
Presión simulada de pozo (psi)	4000	4000	2000	1000
Esfuerzo efectivo (psi)	3000	3000	3000	3000
Bajo Balance Estático (psi)	1000	1000	3000	4000
Bajo Balance Dinámico (psi)	1810	2480	3580	4000
<i>Propiedades del núcleo</i>				
Tipo de Roca	Caliza Bedford	Caliza Bedford	Caliza Bedford	Caliza Bedford
Longitud del núcleo (plg)	18	18	18	18
Diámetro núcleo (plg)	7	7	7	7
Porosidad (%)	17.4	16.7	17.1	16.7
UCS (psi)				
Permeabilidad Axial (md)	4.1	3.0	3.4	3.6
0-180 Perm. diametral (md)	4.7	3.4	3.7	4.5
90-270 Perm. diametral (md)	5.0	3.1	4.1	4.7
Axial PI	0.1	0.07	0.08	0.09
0-180 Diametral PI	0.65	0.47	0.51	0.63
90-270 Diametral PI	0.7	0.43	0.56	0.65
<i>Perforación</i>				
Carga	PJ4512	PJ4512	PJ4512	PJ4512
Standoff Pistola (plg)	0.5	0.5	0.5	0.5
Línea Acumulador (plg)	¼	¼	¼	¼
Longitud total en Roca (mm)	195	230	165	260
Longitud limpia en Roca (mm)	190	120	130	200
Diámetro Promedio (mm)	19	6	9	8
PI Posterior al Disparo (radial)	0.85	0.206	0.48	0.935
<i>Flujo Post Disparo</i>				
PI(post)/PI(pre)	1.26	0.459	0.897	1.464
CFE	0.635	0.316	0.731	0.814
Daño (Skin)	1.3	7.3	1.1	0.7

Tabla 15: Condiciones del Arreglo Experimental y Resumen de Resultados Experimentales (Caliza Bedford, Carga PJ4512)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

A continuación se incluyen algunos gráficos con los resultados:

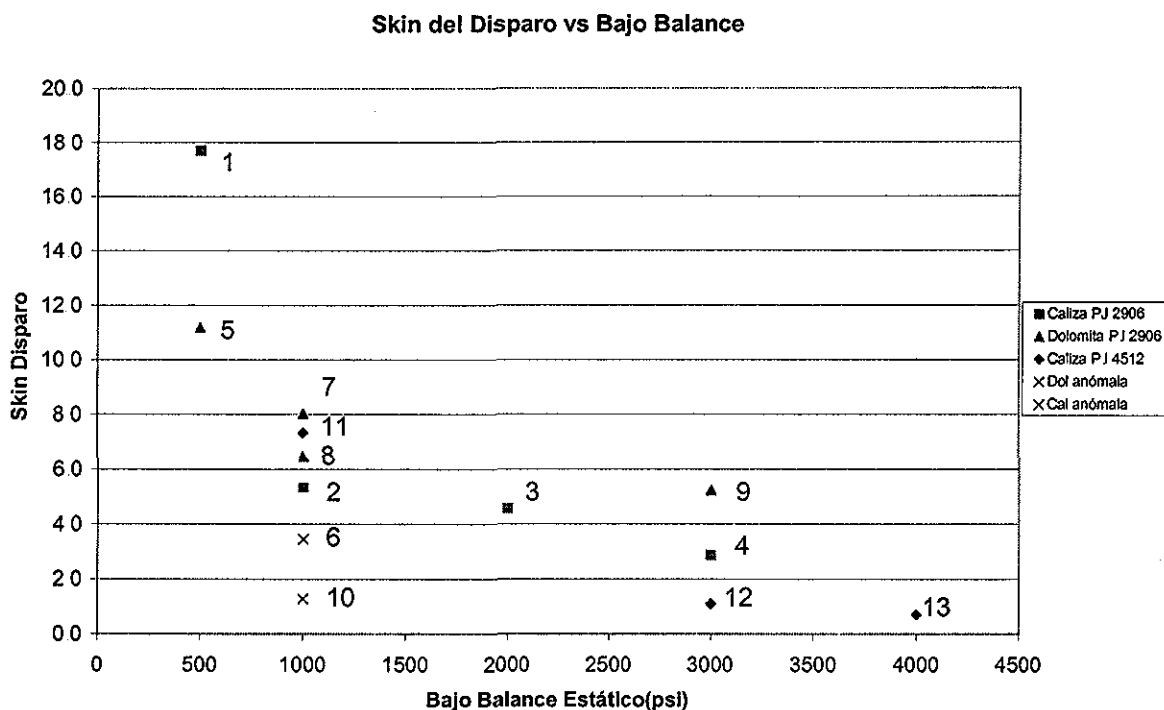


Figura 59 Gráfico Daño por disparo (Skin) vs Bajo balance estático

Los resultados coinciden con trabajos anteriores al mostrar un limpiado progresivo del túnel de la perforación al aumentar el nivel de presión bajo balance estático, el cambio en el limpiado es más pronunciado de 500 a 1,000 lb/plg² de presión de bajo balance.

Algunas inconsistencias son:

- a. La Prueba 1, disparo con 500 lb/plg² de bajo balance en Caliza Bedford usando una carga PJ 2906 (15 gramos) exhibe un valor inusualmente alto de daño (skin). Este alto skin se atribuye a una condición de presión sobre balance después del disparo que puede observarse en las gráficas de transitorios de presión.
- b. Las Pruebas 6 y 9 (dolomía) muestran valores bajos de daño que se atribuyen a heterogeneidades del núcleo y fisuras que pudieron ser detectadas después del disparo al abrir el blanco. Estos resultados no reflejan con exactitud la productividad del disparo por lo que se excluyeron del análisis.

Exceptuando estas pruebas, los carbonatos mostraron un limpiado progresivo con el aumento de la presión de bajo balance. La Figura 61 es una gráfica del daño (skin) por el disparo contra la presión de bajo balance estático. La Caliza Bedford disparada con cargas PJ 2906 se representa con cuadrados verdes. La Dolomía Silurian disparada con cargas PJ 2906 se representa con triángulos rojos. La Caliza Bedford disparada con cargas PJ 4512 se representa con rombos azules.

El daño (Skin) es una variable compuesta. Representa la caída de presión adicional asociada con una terminación dada. Un skin positivo indica que la caída de presión cercana a la pared del pozo es mayor

que la caída esperada por los mecanismos normales de flujo del yacimiento. Por el contrario, un skin negativo denota que la caída de presión cercana a la pared del pozo es menor que la caída esperada por los mecanismos normales de flujo del yacimiento.

$$S = \left(\frac{k_o}{k_c} - 1 \right) \ln \frac{r_p + t_c}{r_p} = \left(\frac{1}{CFE} - 1 \right) \ln \frac{r_e}{r_p}$$

Donde:

- S = skin
- k_o = permeabilidad inicial
- k_c = permeabilidad de la zona dañada por el disparo
- r_e = radio del núcleo
- r_p = radio del disparo
- t_c = espesor de la zona triturada

El cálculo supone flujo Darciano, aplicable para las condiciones de las pruebas.

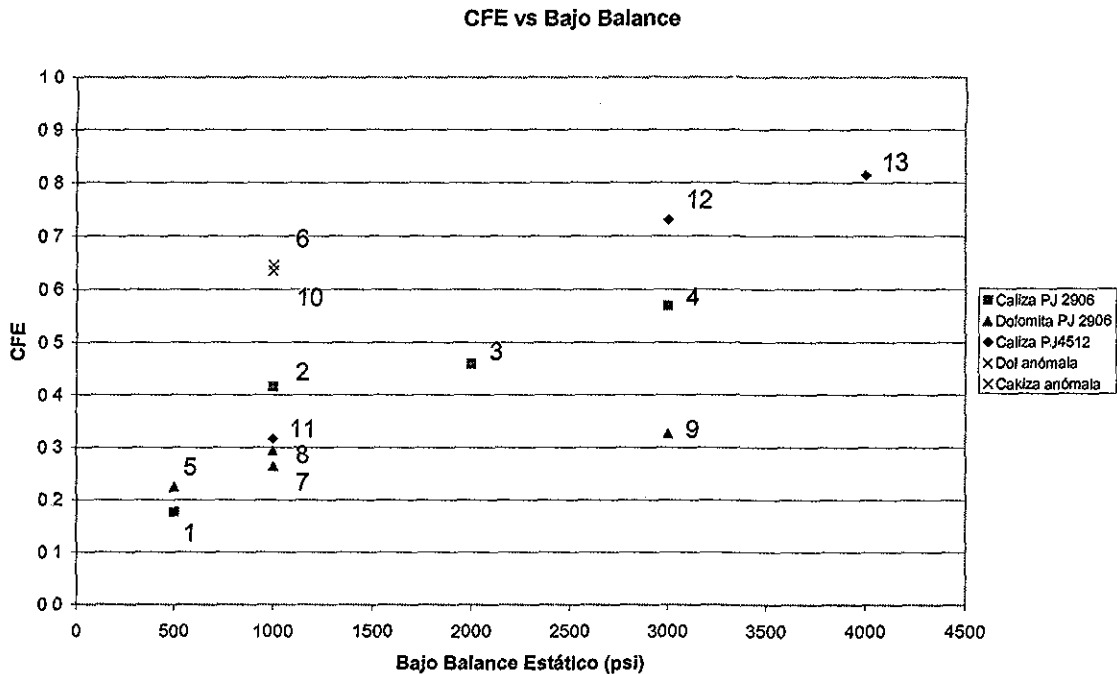


Figura 60 Gráfico Eficiencia Flujo en Núcleo CFE vs Bajo balance estático

Esta gráfica muestra los resultados de flujo graficados como Eficiencia de flujo en el núcleo, CFE. Las mismas conclusiones de la gráfica anterior aplican.

La Eficiencia de Flujo en el Núcleo (CFE) se define como el Flujo radial medido dividido por el flujo radial calculado dentro de la perforación con la misma profundidad de penetración y el mismo diámetro en un núcleo con la misma permeabilidad previa al disparo. El CFE puede visualizarse como la relación de productividad de la perforación real relativa a una perforación ideal sin daño. El valor de

CFE se normaliza a las dimensiones de la perforación y por consiguiente es una mejor medida del daño por la perforación. Aunque ya se mencionó anteriormente, las ecuaciones son:

$$CFE = \frac{Q_{medida}}{Q_{calculada}}$$

donde:

$$Q_{calculada} = \frac{\Delta P}{\mu} \left[\frac{k_1 D}{\ln \frac{R}{r}} + \frac{k_2 r R}{(R-r)} \right]$$

D = Penetración

r = radio del túnel

R = radio del núcleo

k = permeabilidad, donde para planos sedimentarios es perpendicular al eje del núcleo:

$$k_1 = k_h \qquad k_2 = (k_v k_h^2)^{1/3}$$

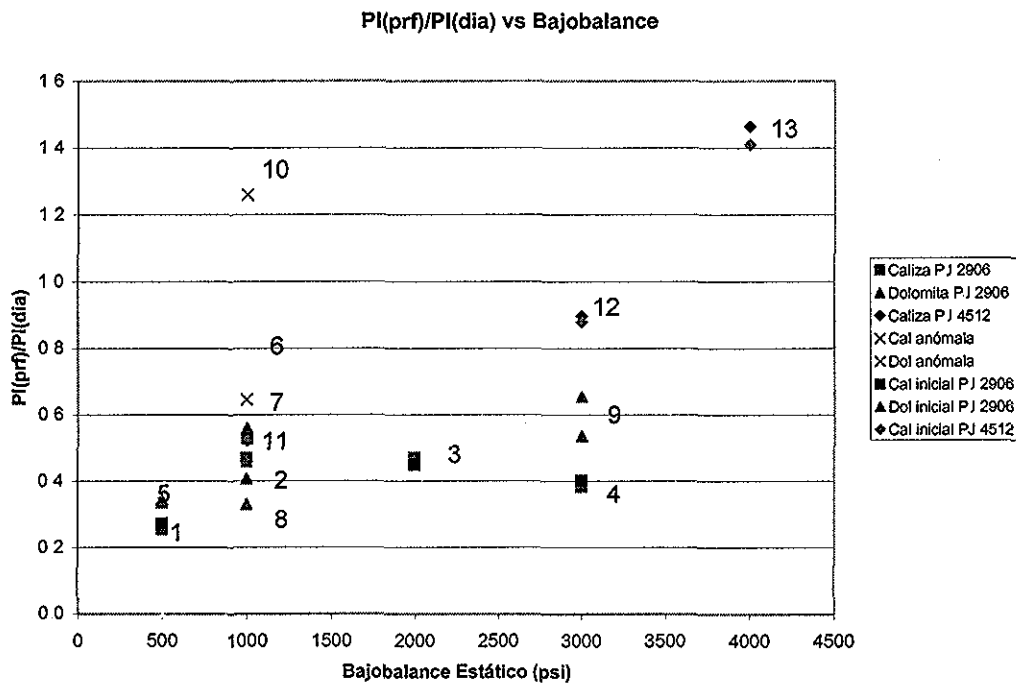


Figura 61 Gráfico Relación de Índice de productividad PI vs Bajo balance estático

El Índice de productividad (PI) se define como el gasto dividido entre la caída total de presión. En este trabajo las unidades usadas son cc/seg/100 lb/plg². La geometría y estado de la perforación afecta el PI, sin embargo, la determinación del PI no considera específicamente la profundidad y diámetro del túnel. Por esta razón, el PI puede ser el indicador mas objetivo de la productividad potencial de una terminación con disparos.

5. Análisis de los Resultados

En este estudio experimental corroboramos las teorías anteriores que sostienen un limpiado progresivamente mayor con el incremento del nivel de presión de bajo balance. La relación entre el limpiado de la perforación y el nivel de presión de bajo balance es intuitiva y ha sido comprobada en los estudios previos en arenas disparadas. A este respecto, las correlaciones desarrolladas para arenas ayudan a definir un parámetro importante para establecer el limpiado de las perforaciones en los carbonatos. Sin embargo, los valores de daño (skin) del disparo de los núcleos de Dolomita de mayor permeabilidad son consistentemente mayores que la magnitud del skin en los núcleos de caliza de menor permeabilidad. Esto contradice las predicciones basadas en estudios anteriores que estipulan que para un nivel de bajo balance dado las rocas de mayor permeabilidad deberían mostrar un mayor, no menor, limpiado que las rocas de menor permeabilidad (Figuras 61 y 62, Capítulo 4). Por esta razón, las correlaciones anteriores desarrolladas para arenas, las cuales se apoyan principalmente en la permeabilidad matricial, no son aplicables a los carbonatos.

Usamos dos tamaños diferentes de cargas en estos experimentos con el objetivo de evaluar el efecto (en caso de existir) del tamaño de la carga en el limpiado del disparo en carbonatos. Berhmann sugiere (ver Sección 3.3.3.4 del Capítulo 3) que la magnitud del daño es función también del tamaño de la carga. Se piensa que una carga más grande producirá una zona triturada más grande. En términos del daño por el disparo, no se nota alguna diferencia sistemática entre las cargas de diferente tamaño disparadas en los blancos de caliza. Es posible que la zona triturada más grande haya sido balanceada por el túnel de mayor diámetro. Será necesario realizar más pruebas para determinar si el peso de la carga tiene un efecto en la magnitud del daño del disparo en carbonatos.

El diámetro de la línea de conexión del agujero simulado del pozo, SWB, a los acumuladores de presión de poro limita el gasto al cual el fluido puede ser transferido. El diámetro de la línea afecta también el nivel de pérdidas de presión por fricción y por consiguiente amortigua las oscilaciones de presión en el sistema. La línea más grande ($\frac{1}{2}$ pulgada) se usa para representar una respuesta más rápida del pozo de una columna de gas mientras que la línea más pequeña ($\frac{1}{4}$ pulgada) se usa para representar un agujero lleno con líquido. La Prueba 8 se diseñó para probar el efecto de la columna de gas en el perfil de presiones transitorias y la productividad del disparo. Esta prueba es esencialmente una repetición de la Prueba 7 excepto por el diámetro de la línea del acumulador de pozo. La Prueba 8 usó una línea de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y la Prueba 7 una de $\frac{1}{4}$ ". Ambas pruebas se hicieron en blancos de Dolomía Silurian con la carga 2906 de 15 gramos. La presión SWB (agujero simulado del pozo) de inicio fue de 4000 lb/plg^2 para obtener una presión de bajo balance de 1000 lb/plg^2 relativa a la presión de poro (fija en 5000 lb/plg^2). La rapidez y magnitud de la caída de presión sigue muy de cerca el perfil de presiones transitorias obtenido para la Prueba 2 (caliza, carga PJ 2906, 1000 lb/plg^2 de bajo balance estático y línea con diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada). Los tres perfiles de presiones transitorias se muestran en las Figuras 64 y 65. Como se esperaba para cada arreglo de prueba, la respuesta de presión de corto tiempo en el disparo se ajustó bastante al perfil de presión deseado. Las Pruebas 8 y 2 que usaron una línea más grande de $\frac{1}{2}$ " tienen respuestas de presiones transitorias en corto tiempo casi idénticas lo cual confirma la importancia de las propiedades del Agujero simulado del pozo (SWB) y las diferencias en las propiedades de la roca no parecen tener influencia en las presiones transitorias de corto tiempo. Este resultado nos ayuda a confirmar el entendimiento de la influencia del pozo en las presiones instantáneas de corto tiempo.

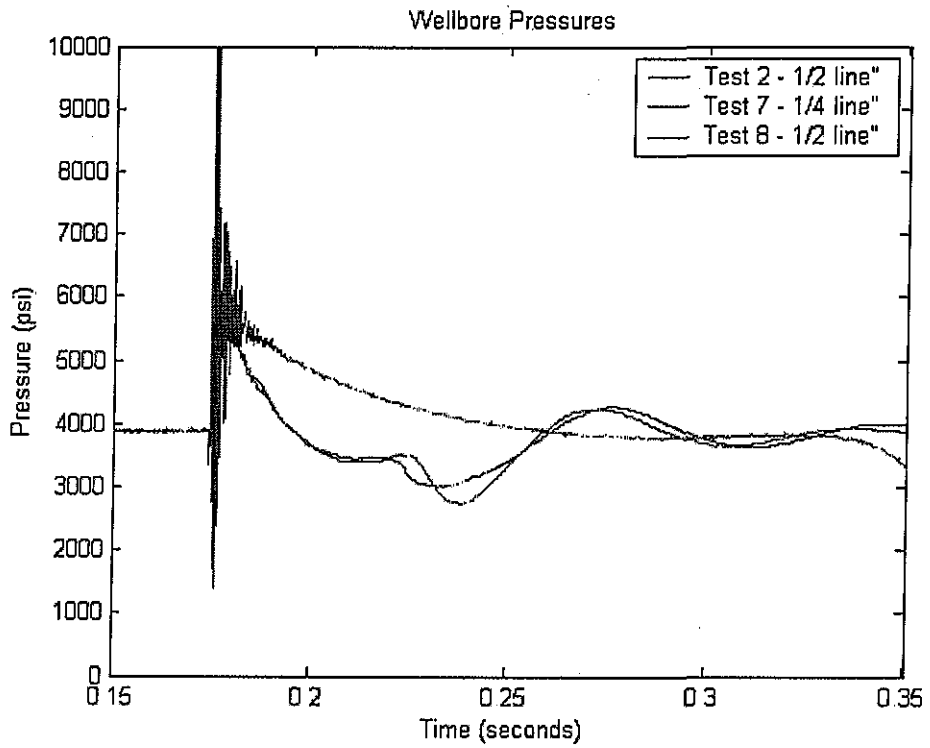


Figura 62 Gráfico de transitorios de Presión Pruebas 2, 7 y 8

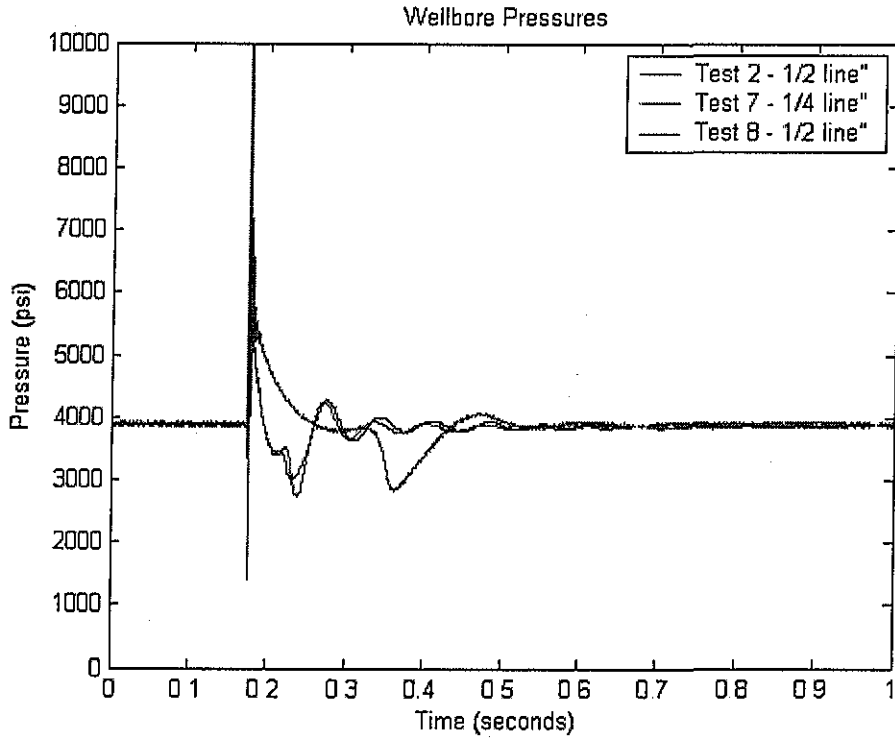


Figura 63 Gráfico de transitorios de Presión Pruebas 2, 7 y 8, Escala ampliada de tiempo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.1 Transitorios de presión

Con el fin de facilitar el entendimiento de los transitorios de presión haremos una breve descripción de algunas de las gráficas obtenidas.

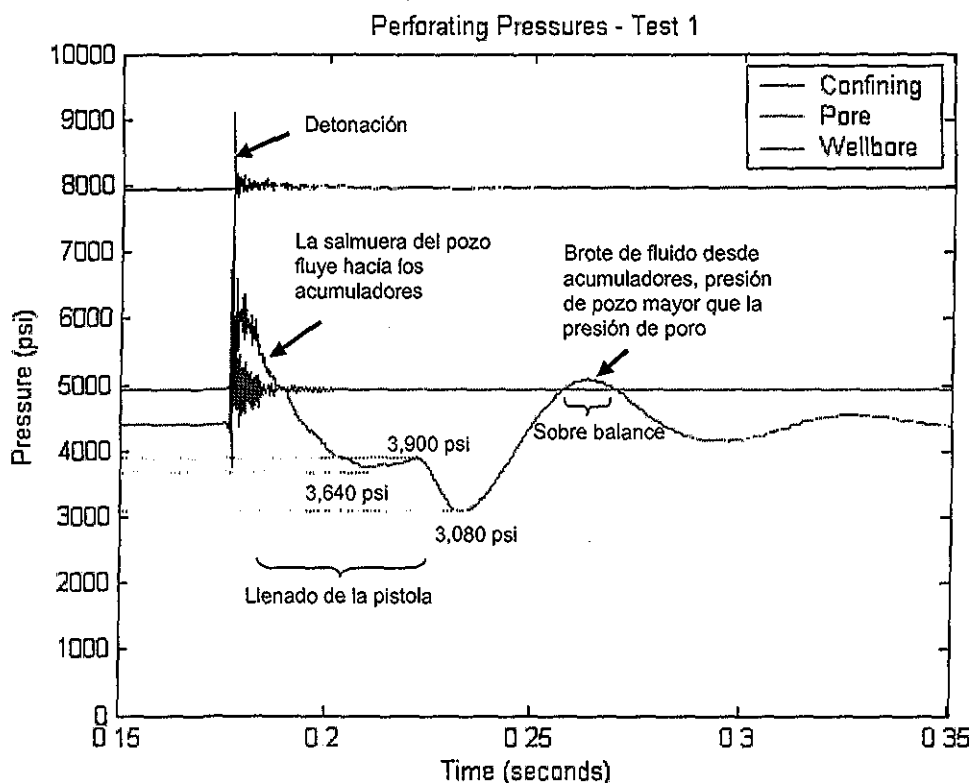


Figura 64 Gráfico de transitorios de Presión Prueba 1

La Prueba 1 se hizo en Caliza Bedford con una carga PJ 2906 de 15 gramos. La presión de pozo de inicio (SWB) fue de 4500 lb/plg² para obtener una presión de Bajo balance 500 lb/plg² (5000 lb/plg² de presión de poro). Se usó una línea de ½" a los acumuladores de pozo.

Después del pico de presión generado por la detonación, la salmuera a alta presión en el agujero de pozo simulado fue forzada hacia dentro de los acumuladores y la presión de pozo (SWB) cayó rápidamente. La presión de pozo SWB alcanzó un valor mínimo de 3640 lb/plg² y se incrementó hasta 3900 lb/plg² antes de que, debido al llenado de la pistola, la presión de pozo SWB cayera hasta un mínimo absoluto de 3080 lb/plg². La presión de pozo SWB en el corto tiempo no alcanza una condición de presión metaestable. Después del llenado de la pistola, un brote de fluido desde los acumuladores SWB forza brevemente a la presión SWB a aumentar sobre la presión de poro. La presión SWB oscila entonces con una amplitud de onda decreciente alrededor de la presión de pozo previa al disparo antes de fijarse a la presión SWB original de 4500 lb/plg². Esta Prueba 1 se caracteriza por las grandes oscilaciones causadas por el brote de fluidos entre el agujero de pozo y los acumuladores. El perfil de presión muestra solo una pequeña presión de sobre balance; sin embargo, la presión local de poro inmediatamente alrededor del túnel de la perforación fue aparentemente mucho menor que la presión leída en la parte trasera del núcleo. La creación e inyección de residuos del disparo dentro del túnel de la perforación parece ser la causa principal del valor alto de daño (skin) del disparo.

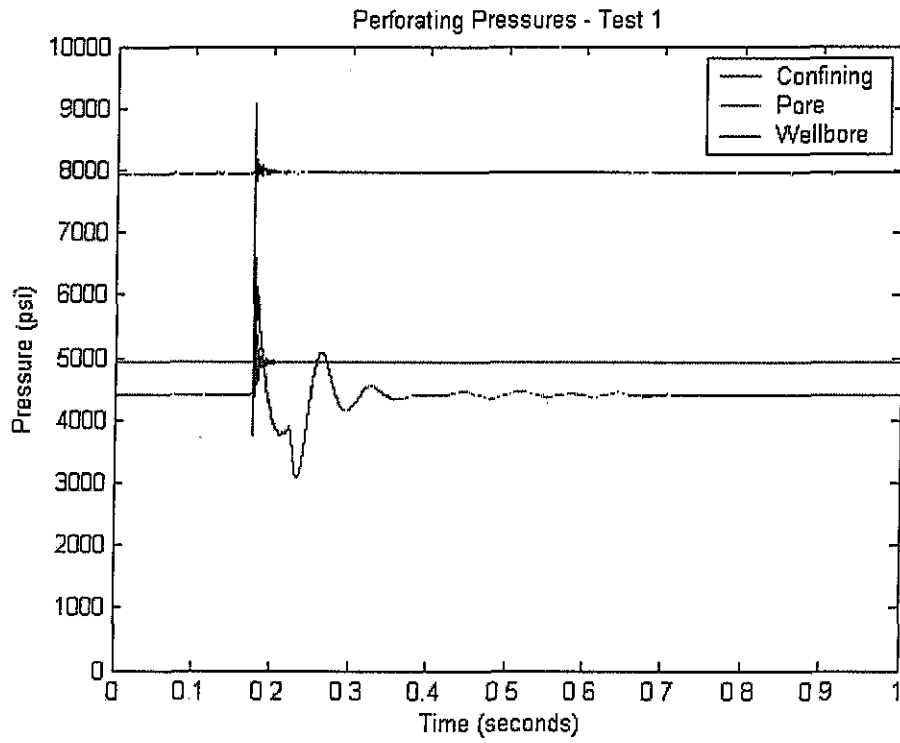


Figura 65 Gráfico de transitorios de Presión Prueba 1, Escala de tiempo ampliada

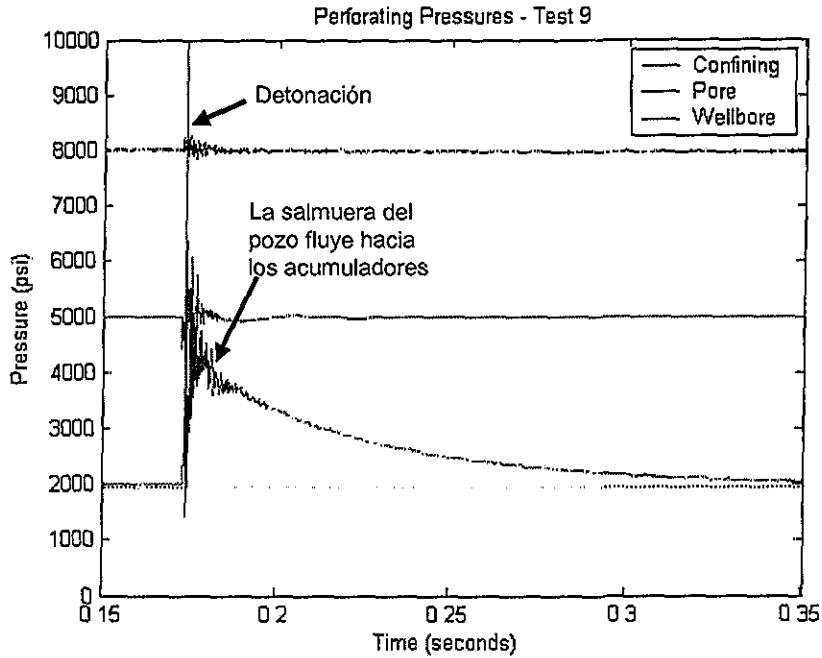


Figura 66 Gráfico de transitorios de Presión Prueba 9, Escala reducida de tiempo

En la Prueba 9 se disparó una carga de 15 gramos PJ 2906 en un blanco de Dolomía Silurian. La presión inicial de pozo SWB fue de 2000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 3000 lb/plg².

Después del pico debido a la detonación, la salmuera a alta presión del pozo es forzada hacia los acumuladores y la presión de pozo cae. La presión de pozo alcanza una presión metaestable de 2020 lb/plg² (la presión inicial SWB).

En general, la magnitud de la declinación de presión desde el llenado de la pistola decrece con una presión inicial SWB menor. Esta prueba no es la excepción; la presión SWB mínima de 1840 lb/plg² es ligeramente menor de 200 lb/plg² por debajo de la presión de pozo inicial. El llenado de la pistola ocurre relativamente tarde, 300 milisegundos después de la detonación. La presión SWB se recupera a la presión original previa al disparo de 2000 lb/plg² y continúa incrementándose hasta la presión de yacimiento como resultado del flujo de keroseno a través del blanco perforado y hacia el pozo.

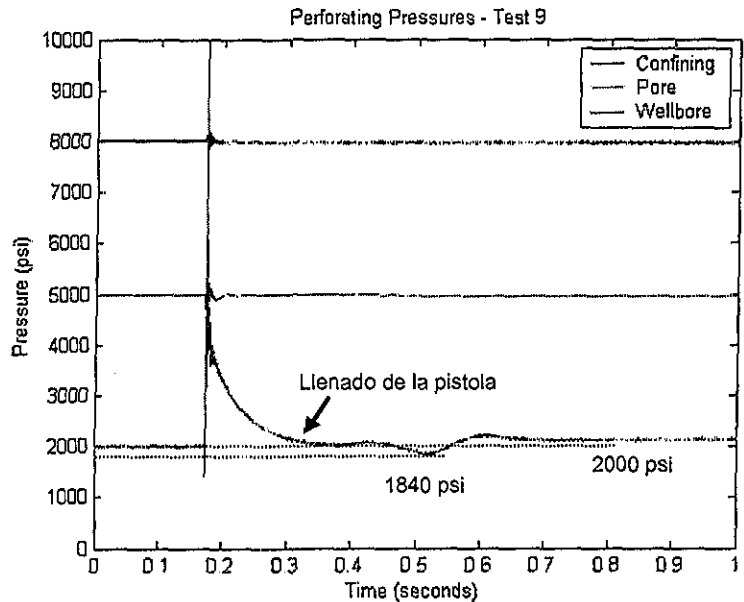


Figura 67 Gráfico de transitorios de Presión Prueba 9

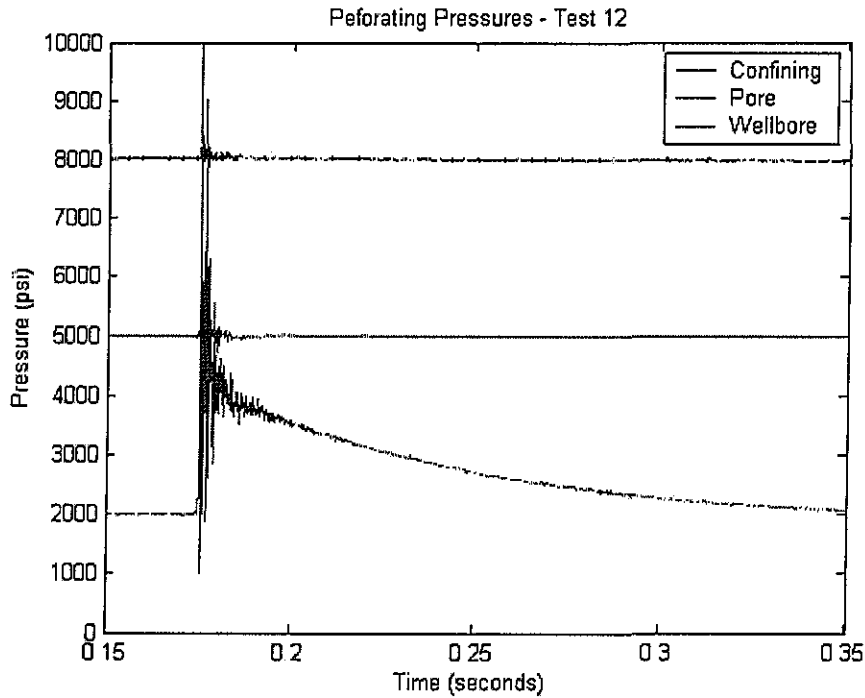
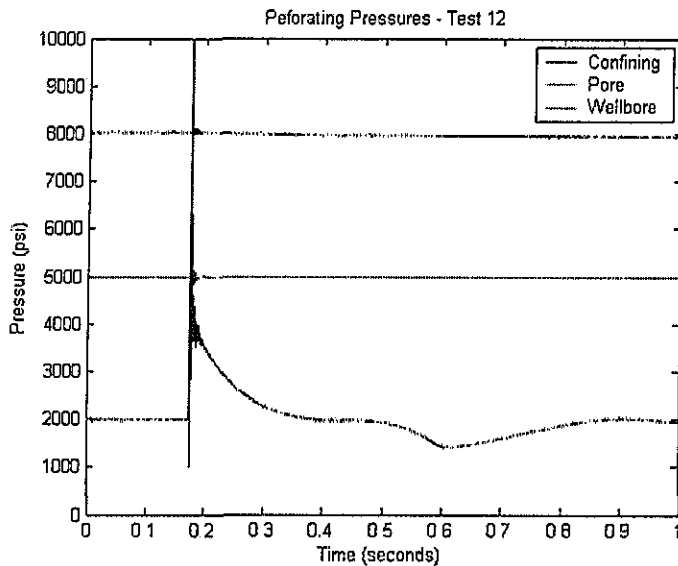


Figura 68 Gráfico de transitorios de Presión Prueba 12, Escala reducida de tiempo

Se usó un núcleo de Caliza Bedford y se perforó con una carga más grande PJ 4512 con 21.7 gramos de explosivo. La presión inicial de pozo se fijó en 2,000 lb/plg² para obtener una presión de bajo balance de 3,000 lb/plg² relativa a la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg²).



Después del pico debido a la detonación, la salmuera a alta presión del pozo es forzada hacia los acumuladores y la presión de pozo cae. La presión de pozo alcanza una presión metaestable de 2000 lb/plg² (la presión inicial SWB). El enfriamiento del gas producido por la detonación disminuyó la presión interna de la pistola y fue inundada por el fluido del pozo. La presión SWB mínima de 1420 lb/plg² ocurre durante el llenado de la pistola. Después del llenado de la pistola el acumulador restaura la presión de pozo SWB a su valor original previo al disparo de 2000 lb/plg². El incremento posterior hasta la presión de yacimiento fue resultado del flujo de keroseno a través del blanco perforado y hacia el pozo.

Figura 69 Gráfico de transitorios de Presión Prueba 12

En el apéndice se incluyen todos los gráficos de transitorios de presión de este estudio experimental

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.2 Comparación con el Criterio de bajo Balance de King para Arenas

King (ver sección 3.3.3.1 del capítulo 3) se enfocó a determinar el nivel de bajo balance que dejaba el pozo en condiciones tales que una acidificación no mejorara su productividad. Si aplicamos la ecuación 3.10 con dos valores de permeabilidad podemos construir una línea recta que divida la zona donde la acidificación no genera una mejora en la productividad y donde si:

$$\Delta p = \frac{3100}{K^{0.37}}$$

En la Figura 42, se grafican los datos de las pruebas en carbonatos junto con el criterio de bajo balance de King necesario para lograr perforaciones limpias en pozos de aceite.

Núcleos Carbonato Disparados y Criterio de Bajo balance de King para Arenas Saturadas con Aceite

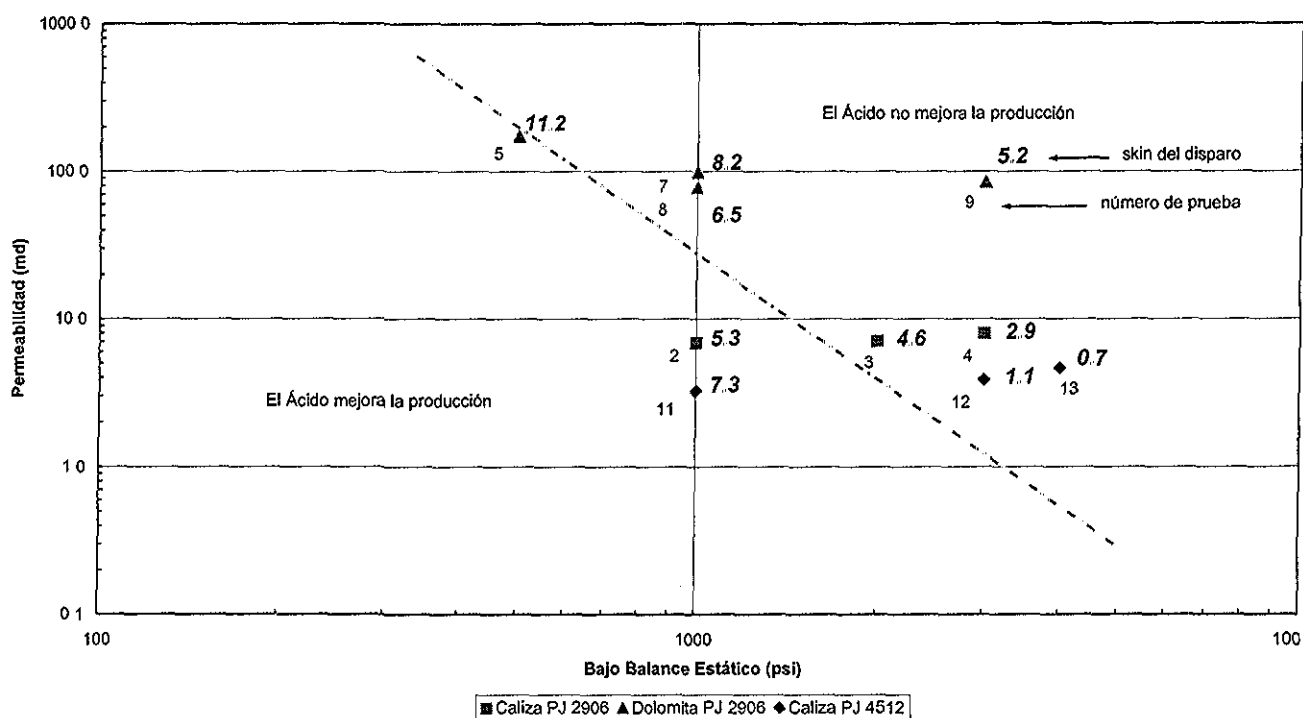


Figura 70 Gráfico con el criterio de King y los resultados de estas pruebas

Es evidente, de la Figura 72, que la comparación no es buena, ya que los datos de King se basaron en arenas y no en carbonatos. No obstante, la conclusión más importante que sacamos de este gráfico es que *la correlación de King para arenas disparadas no se puede aplicar de manera simple a los carbonatos disparados*.

El daño por disparo medido se muestra en letra itálica. Todas las pruebas dan valores positivos de daño. Si ignoramos por ahora el hecho de que la acidificación mejoraría la productividad, parece que la correlación se ajusta al disparo en caliza de baja permeabilidad con las cargas PJ 4512. Los datos obtenidos en la caliza de mayor permeabilidad y en mayor grado en la Dolomita, no se ajustan al criterio de bajo balance de King. Aún si se intentara desplazar la línea de King, los datos en carbonatos no ajustan. De acuerdo al criterio de King parece que las rocas carbonatadas son más susceptibles al daño por el disparo que las arenas.



5.3 Comparación con el Criterio de bajo Balance de Berhmann para Arenas

Ahora veremos si los datos obtenidos de las pruebas se ajustan al criterio de fuerza de arrastre propuesto por Berhmann (ver Sección 3.3.3.4 del Capítulo 3). Para lograr esto, obtendremos una gráfica similar a la de la Figura 39, usando los datos de las pruebas en carbonato (ver Tabla 16 al final de este capítulo):

Núcleos Carbonato Disparados y Criterio de Arrastre de Berhmann Arena Berea y Carga de 15.0 gramos

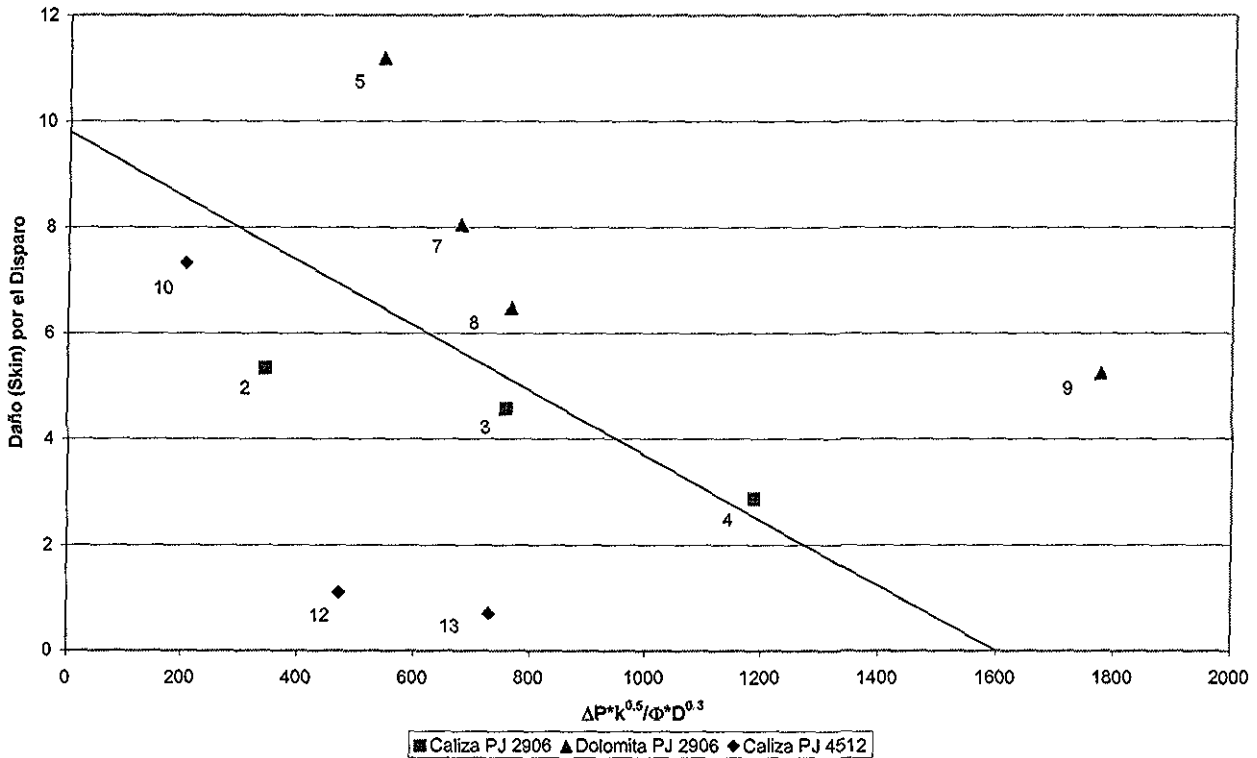


Figura 71 Gráfico con el criterio de Berhmann y los resultados de estas pruebas

En esta Figura se grafican los datos obtenidos de estas pruebas con el fin de buscar coincidencias con el criterio previamente establecido por Berhmann para arenas. Podemos ver que la coincidencia es casi nula y se enfatiza la diferencia entre las correlaciones aplicables en Arenas y los datos obtenidos en Carbonatos. Observamos que los puntos de Dolomita caen por encima de la línea y los puntos de Caliza, con solo una excepción, caen por debajo de la línea. De la gran variación de los datos claramente podemos decir que la correlación para Arenas no aplica a Carbonatos.

Si graficamos los valores de daño (formas sólidas) contra los valores de eficiencia de flujo en núcleo (formas vacías) obtenemos:

Productividad del disparo versus Bajo balance dinámico pico
Mejor-ajuste Skin y CFE calculados

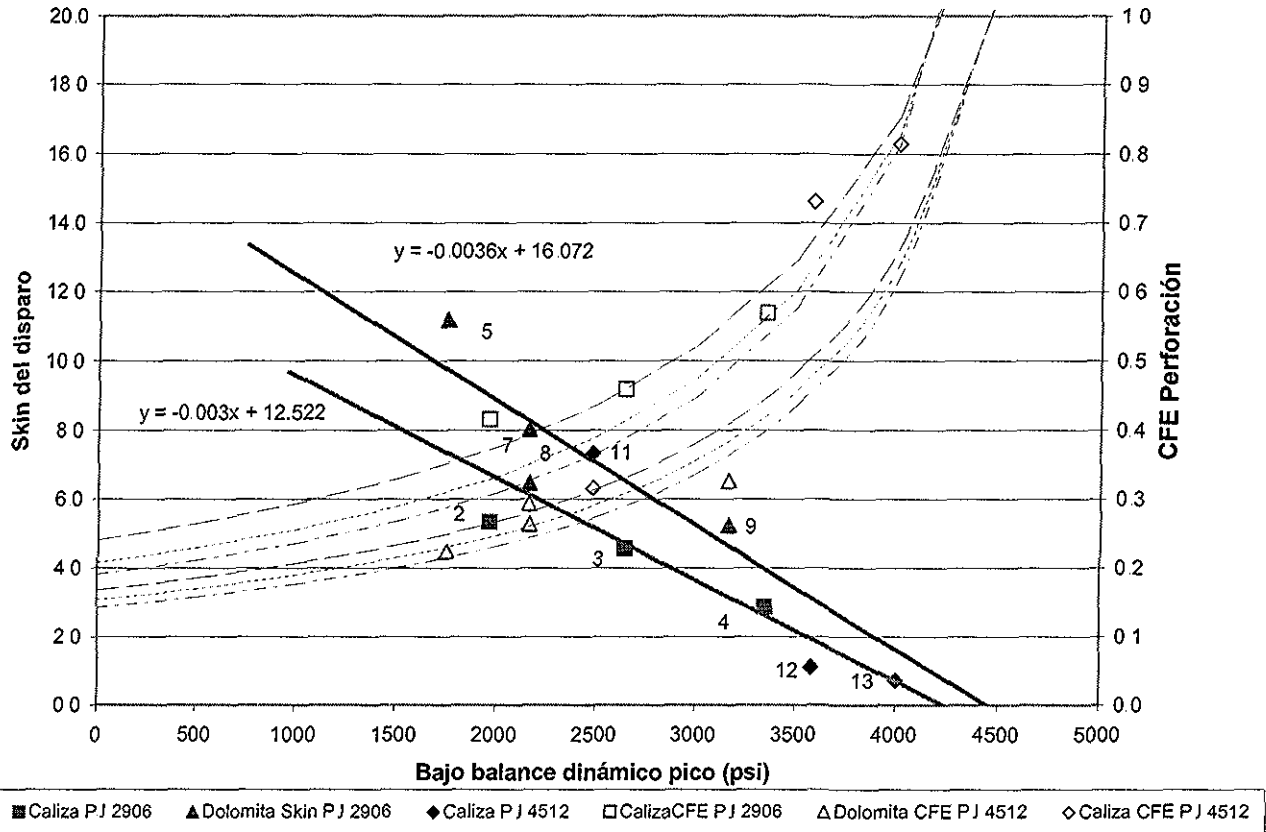


Figura 72 Gráfico de Daño por disparo - CFE vs Bajo balance dinámico pico

A pesar de que pudiera haber una relación casual entre la magnitud de bajo balance estático y dinámico, la presión bajo balance estática no refleja siempre las respuestas transitorias de presión en tiempos cortos (menores de 0.5 segundos) que se cree son responsables en primer grado de la limpieza de la perforación. La cuantificación de la magnitud de presión bajo balance dinámica es problemática.

El valor de presión de *bajo balance dinámico pico* se define como la diferencia entre la presión de poro (fija en 5,000 lb/plg² en todas las pruebas) menos el valor mínimo de presión de pozo que puede obtenerse de los gráficos de presiones transitorias (ver Apéndice).

La presión SWB mínima ocurre durante el llenado de la pistola.

En la Figura 74, graficamos los valores de daño por disparo como formas llenas (sólidas) y los valores de eficiencia de flujo en núcleos como formas huecas. En la gráfica se muestran las líneas de tendencia para los valores de daño por disparo para la Caliza Bedford (Línea verde) y para la Dolomía Silurian (Línea roja). Aunque las dos líneas son casi paralelas podemos deducir que la Dolomía Silurian requiere de un valor de presión bajo balance estático mayor que el de la Caliza Bedford para lograr el mismo valor de daño.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.4 Comparación con el Criterio de Walton

Walton (ver sección 3.3.3.5 del Capítulo 3) propone que el daño por el disparo es función del nivel de falla mecánica de la zona triturada.

La teoría convencional dice que el limpiado de la perforación aumenta en rocas de alta permeabilidad, la teoría de Walton predice un limpiado mejorado del disparo en rocas de menor resistencia mecánica. Este hecho se observa en nuestras pruebas con carbonatos.

Si graficamos el valor del daño por disparo contra el valor de la presión bajo balance dinámica pico entre la resistencia compresiva sin confinar de la roca obtenemos:

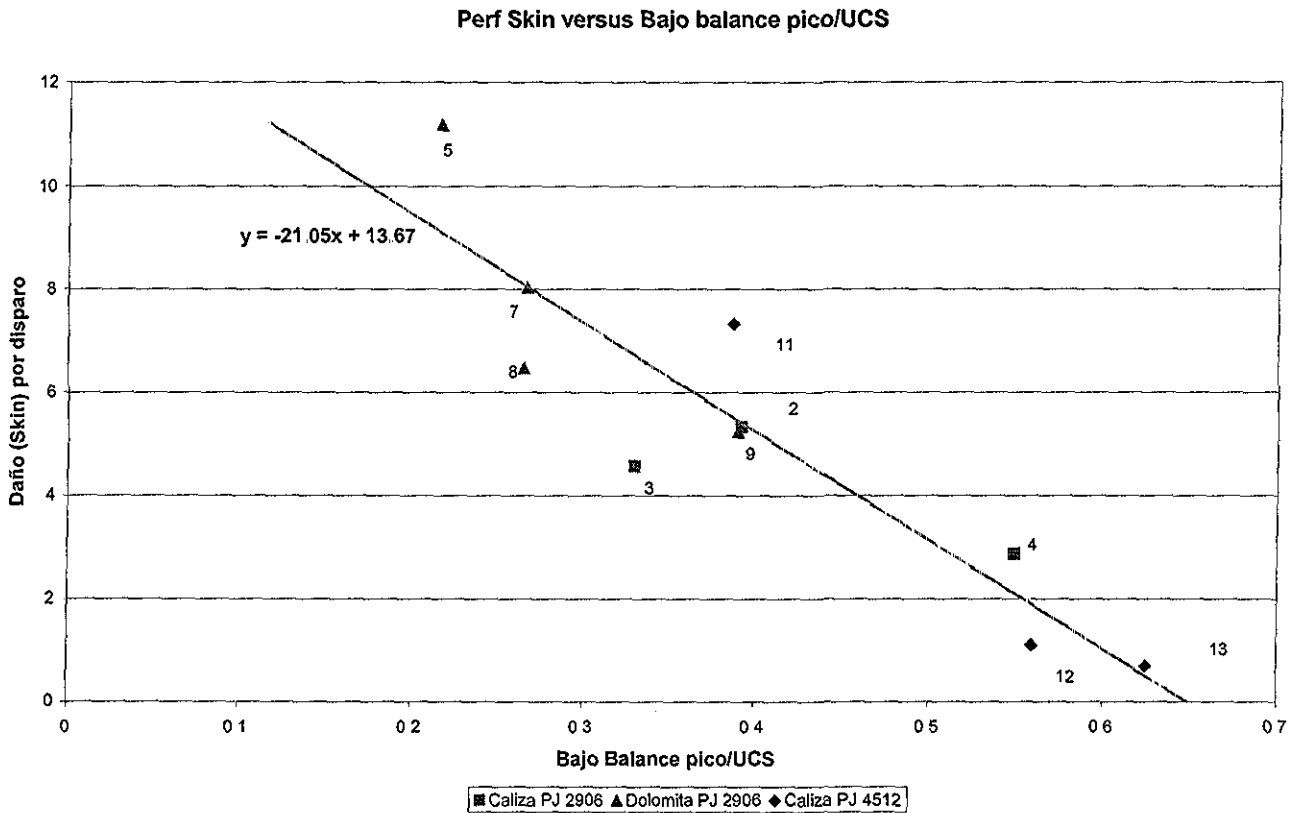


Figura 73 Gráfico de Daño por disparo vs. Bajo balance pico/Resistencia compresiva sin confinar

Al trazar la línea de tendencia observamos como se ajusta de mucha mejor manera que refleja con bastante exactitud los valores de daño por disparo tanto en la Caliza Bedford como en la Dolomía Silurian.

Aunque no se alcanzó en ninguna de las pruebas un valor de daño cero, la extrapolación de la línea de tendencia nos permite predecir el valor de presión de bajo balance dinámica pico necesario para un daño por disparo de cero. *Un valor de presión bajo balance dinámica pico igual o mayor al 64% del valor de la resistencia compresiva sin confinar de la roca se requiere para producir un agujero limpio.*



1. El primer punto a considerar es el nivel de cumplimiento de los objetivos establecidos en el plan estratégico. Se debe evaluar si se han alcanzado los resultados esperados y si existen áreas que requieren mayor atención.

2. Otro aspecto importante es el análisis de los recursos utilizados. Se debe determinar si los recursos han sido asignados de manera eficiente y si existen oportunidades para optimizar su uso.

3. Finalmente, es necesario evaluar el impacto de las acciones realizadas. Se debe medir el grado de satisfacción de los stakeholders y el nivel de compromiso de los colaboradores.

5.3.1. Solución propuesta

En la gráfica de la Figura 75, la ecuación de la línea de tendencia es:

$$y = -21.05x + 13.67 \tag{5.1}$$

En el eje y tenemos el valor del daño (skin) por el disparo, mientras que en el eje x tenemos la relación entre la presión bajo balance dinámica pico y la resistencia compresiva uniaxial, por lo que la ecuación anterior queda:

$$S_p = -21.05 \left(\frac{UB_{pico}}{UCS} \right) + 13.67 \tag{5.2}$$

Si hacemos S_p igual a cero podemos obtener el valor de presión bajo balance pico para obtener una perforación limpia:

$$UB_{pico} = 0.649UCS \tag{5.3}$$

En un intento por determinar una curva que ajustara aún más los valores obtenidos de daño, en la Figura 74, se muestra la misma gráfica anterior pero con una línea de tendencia polinomial. Observamos que en los rangos de daño alto esta curva tiene un ligero mejor ajuste respecto de la línea recta de tendencia.

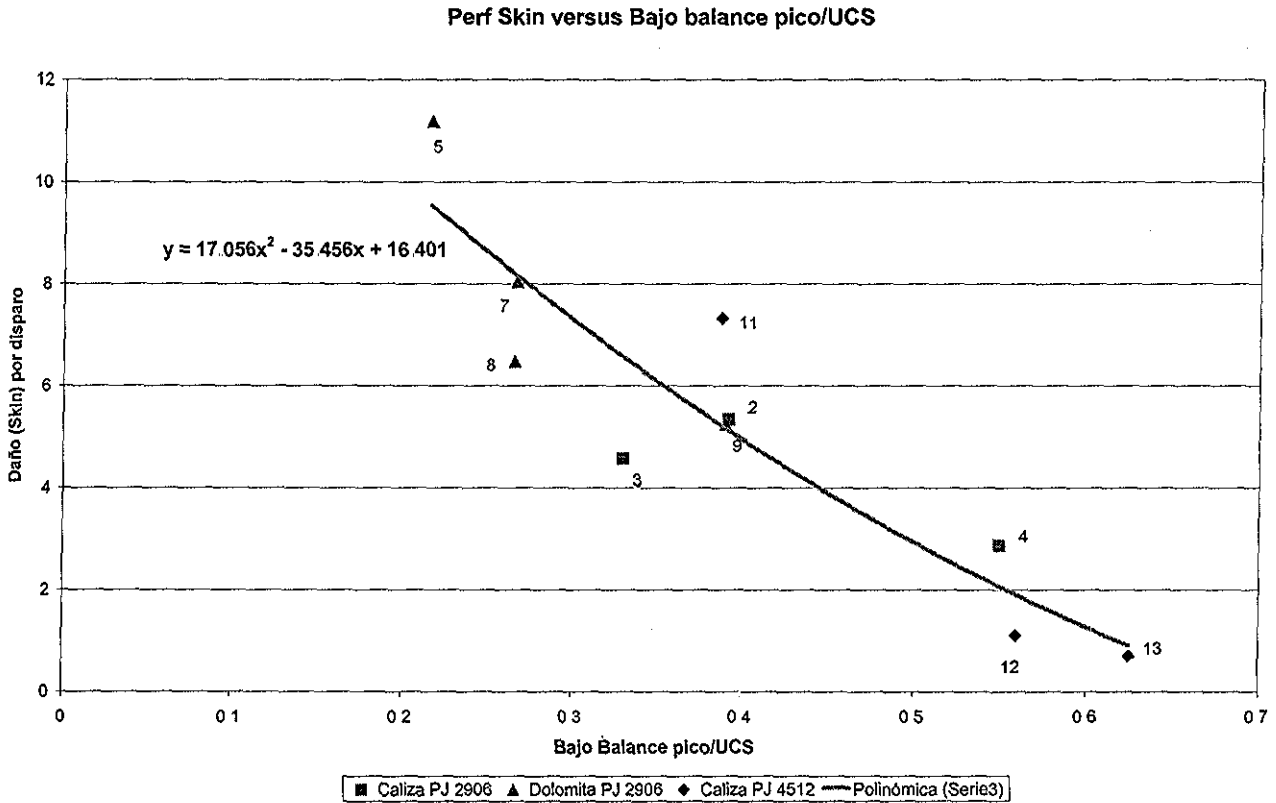


Figura 74 Gráfico de Daño por disparo vs. Bajo balance pico/Resistencia compresiva sin confinar

Para este caso, la ecuación para obtener el valor del daño por el disparo es:

$$S_p = 17.056 \left(\frac{UB_{pico}}{UCS} \right)^2 - 35.456 \left(\frac{UB_{pico}}{UCS} \right) + 16.401 \quad (5.4)$$

Si hacemos S_p igual a cero podemos obtener el valor de presión bajo balance pico para obtener una perforación limpia, tendríamos una ecuación cuadrática perfecta cuya solución es:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

En donde: $a = 17.056$, $b = -35.456$, $c = 16.401$

Por lo que, para un valor de daño cero:

$$\frac{UB_{pico}}{UCS} = 0.694 \quad (5.5)$$

Por lo que, *para obtener un daño nulo por el disparo se deberá cumplir:*

$$UB_{pico} = 0.694UCS \quad (5.6)$$

Considerando que los valores de daño se ajustan mejor con la solución polinomial para valores medios altos de daño por disparo, sugerimos usar la Ecuación 5.4 para determinar el valor del daño por disparo y la Ecuación 5.3 para determinar el valor de presión bajo balance pico para obtener un daño cero:

$$S_p = 17.056 \left(\frac{UB_{pico}}{UCS} \right)^2 - 35.456 \left(\frac{UB_{pico}}{UCS} \right) + 16.401 \quad (5.7)$$

$$UB_{pico} = 0.649UCS \quad (5.6)$$

El problema ahora es como relacionar el bajo balance estático con el bajo balance dinámico pico de las Ecuaciones 5.5, 5.6 y 5.7. Para lograr esto, graficamos los valores de bajo balance estático contra los valores de bajo balance dinámico máximo obtenidos y obtenemos una relación de la siguiente forma:

$$UB_{pico} = 0.6107UB + 1532.1 \quad (5.8)$$

Sustituyendo (5.8) en la ecuación 5.6 obtenemos y resolviendo para UB:

$$UB = 1.063UCS - 2509 \quad (5.9)$$

Es importante notar que la relación obtenida entre el bajo balance estático y el bajo balance dinámico pico se obtuvo de manera empírica con datos limitados, por lo que se requiere un estudio mas profundo para confirmar esta correlación.

El bajo balance dinámico pico depende no solo del bajo balance estático sino de la configuración de la pistola, las presiones generadas por la explosión y la entrada de fluido del pozo al volumen interno de la pistola

Prueba Núcleo	Prueba UB Num	UB (psi)	Min Pres (psi)	Max UB (psi)	Teff	Pi(prf)	Pi(prf)/Pi(dia)	CFE	Prf Skin	Perf Longitud Prom (pulgadas)	Perf Dia (pulgadas)	Perf Vol (pulgadas ³)	Perf Pared (pulgadas ²)	Porosidad (psi)	Respado Nom UCS (psi)	Nom Perm (md)
IL7-06	1	500	500	3040	1960	0.373	0.255	0.177	17.689	10.236	0.157	0.199	5.064	10.525	5700	6400
IL7-10	2	1000	3040	2360	2640	0.4445	0.470	0.416	5.336	7.874	0.157	0.153	3.896	6.871	5000	6400
IL7-08	3	2000	2360	1650	3350	0.409	0.470	0.459	4.569	6.496	0.146	0.108	2.973	7.048	8000	6400
IL7-08	4	3000	1650	3000	3000	0.421	0.384	0.569	2.872	4.606	0.157	0.090	2.279	7.999	6100	6400
SD7-04	5	500	3250	1750	1750	8.07	0.636	0.224	11.182	8.858	0.276	0.528	7.669	173.899	17.9	8100
SD7-03	6	1000	3380	1640	4640	17.8	0.346	0.463	3.459	7.480	0.354	0.738	8.327	198.999	19	8100
SD7-01	7	1000	2840	2160	5160	6.1	0.559	0.264	8.038	11.220	0.394	1.366	13.878	78.207	17.3	8100
SD7-05	8	1000	2850	2150	5150	5.6	0.494	0.294	6.472	6.496	0.472	1.139	9.642	99.032	16.3	8100
SD7-02	9	3000	1840	3160	6160	6.3	0.536	0.327	5.241	7.283	0.551	1.738	12.512	84.783	18.6	8100
IL7-12	10	1000	3190	1810	4810	0.85	1.259	0.422	3.067	12.008	0.748	5.277	28.219	4.857	17.4	6400
IL7-17	11	1000	2520	2480	5480	0.206	0.459	0.316	7.326	9.055	0.118	0.099	3.360	3.241	16.7	6400
IL7-11	12	3000	1420	3580	6580	0.48	0.897	0.731	1.099	6.496	0.354	0.641	7.231	3.871	17.1	6400
IL7-16	13	4000	1000	4000	7000	0.9	1.405	0.816	0.698	8.661	0.315	0.875	8.570	4.633	16.7	6400

Determinación del Skin por Berhmann para Barea (Carga de 15.0 gramos)

(CD/20) ² dP psi	k	porosidad %	porosidad frac	D (pulg.)	D (cm)	Skin	Arastre
1.6129	500	10.525	0.114	0.4	4.022	4.182	247.749
1.6129	1000	6.871	0.133	0.4	3.832	4.117	343.160
1.6129	2000	7.048	0.125	0.37	3.350	3.960	757.103
1.6129	3000	7.939	0.124	0.4	2.920	3.820	1186.929
1.6129	500	173.899	0.179	0.7	4.110	4.207	542.234
1.6129	1000	198.999	0.19	0.9	3.995	4.166	1013.560
1.6129	1000	78.207	0.173	1.2	3.987	4.164	676.124
1.6129	1000	99.032	0.163	1.2	3.991	4.167	764.531
1.6129	3000	84.783	0.185	1.4	3.557	4.013	1775.719
3.629025	1000	4.857	0.174	1.9	9.079	9.407	138.180
3.629025	1000	3.241	0.167	0.3	8.683	9.272	204.612
3.629025	3000	3.871	0.171	0.9	6.675	8.923	471.212
3.629025	4000	4.633	0.167	0.8	6.907	8.661	729.153

Línea de Acidificación de King para Arenas saturadas con Aceite

500	200	430.5535748	436.4963289
2000	4	1760.582582	1856.091992

Pico UB/UCS

UB/UCS	Teff/UCS	Perf S	UB	Max UB	MaxUB/UB	Max UB calc	% dev
0.392	0.992	5.336	1000	1960	1.96	2142.8	9.3%
0.33	0.705	4.569	2000	2640	1.32	2753.5	4.3%
0.54918	1.04098	2.872	3000	3350	1.11667	3364.2	0.4%
0.216049	0.58642	11.182	500	1750	3.5	1837.45	5.0%
0.202465	0.57284	3.455	1000	1640	1.640	2142.8	-0.8%
0.266667	0.63704	8.038	1000	2160	2.16	2142.8	-0.3%
0.265432	0.6358	6.472	1000	2150	2.15	3364.2	6.5%
0.390123	0.76049	5.241	3000	3160	1.05333	2142.8	-13.6%
0.382816	0.75166	3.067	1000	1810	1.810	3364.2	-6.0%
0.3875	0.85625	7.326	1000	2480	2.48	3974.9	-0.6%
0.559375	1.02813	1.099	3000	3580	1.19333		
0.625	1.09375	0.698	4000	4000	1		

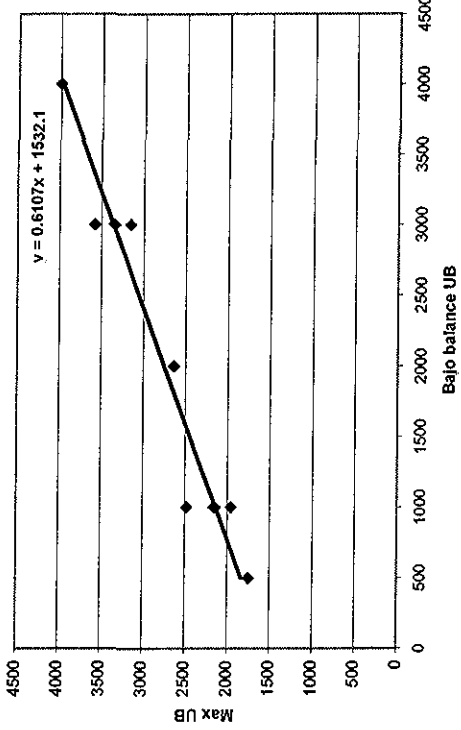


Tabla 16 Datos de entrada y cálculos para la obtención de los gráficos de King, Berhmann y Walton



6. Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio experimental verificamos que se cumplen las teorías anteriores (ver página 82) respecto al limpiado progresivo mayor con el aumento de los niveles de presión bajo balance. Sin embargo, los valores medidos del daño por el disparo en los blancos de rocas carbonatadas no se ajustan a las correlaciones previamente establecidas para Arenas. En particular, *la dependencia de la permeabilidad de la roca como parámetro predictor del limpiado de la perforación no aplica para Carbonatos.*

El daño por el disparo en los Carbonatos, en lugar de depender de la permeabilidad de la matriz y del valor de presión bajo balance estático como se supone para las Arenas, parece depender en gran medida del valor de presión bajo balance pico y la Resistencia compresiva uniaxial de la roca.

Esta es una concepción relativamente nueva en donde se relaciona la Resistencia compresiva de la roca en lugar de su permeabilidad con el limpiado de la perforación hecha por el disparo.

La extrapolación de los datos disponibles de las pruebas nos permite predecir un *valor de presión bajo balance dinámica pico igual o mayor del 64% del valor de la Resistencia compresiva uniaxial de la roca para obtener un daño por disparo de cero en Carbonatos.*

Este modelo planteado permite la obtención de una correlación entre el nivel de presión bajo balance y la magnitud del daño por el disparo.

Aunque se propone una correlación para obtener el valor de bajo balance estático necesario para tener un agujero limpio con cero daño en función de la Resistencia compresiva uniaxial de la roca, se recomienda realizar mas pruebas para dar mayor solidez a esta propuesta.

Apéndice

A.1 Gráficos de transitorios de presión

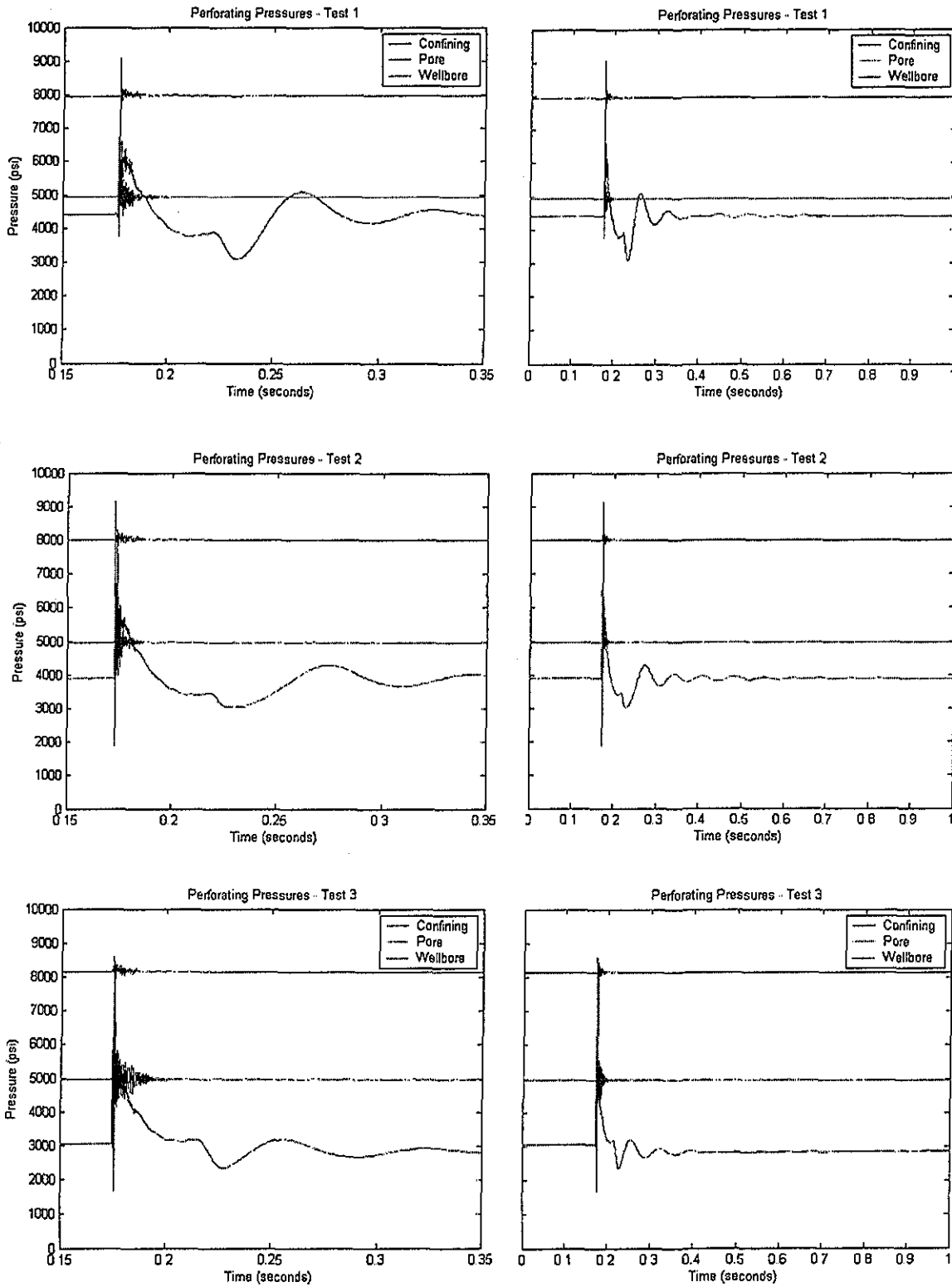


Figura A 1 Gráfico presiones transitorias, Pruebas 1 a 3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

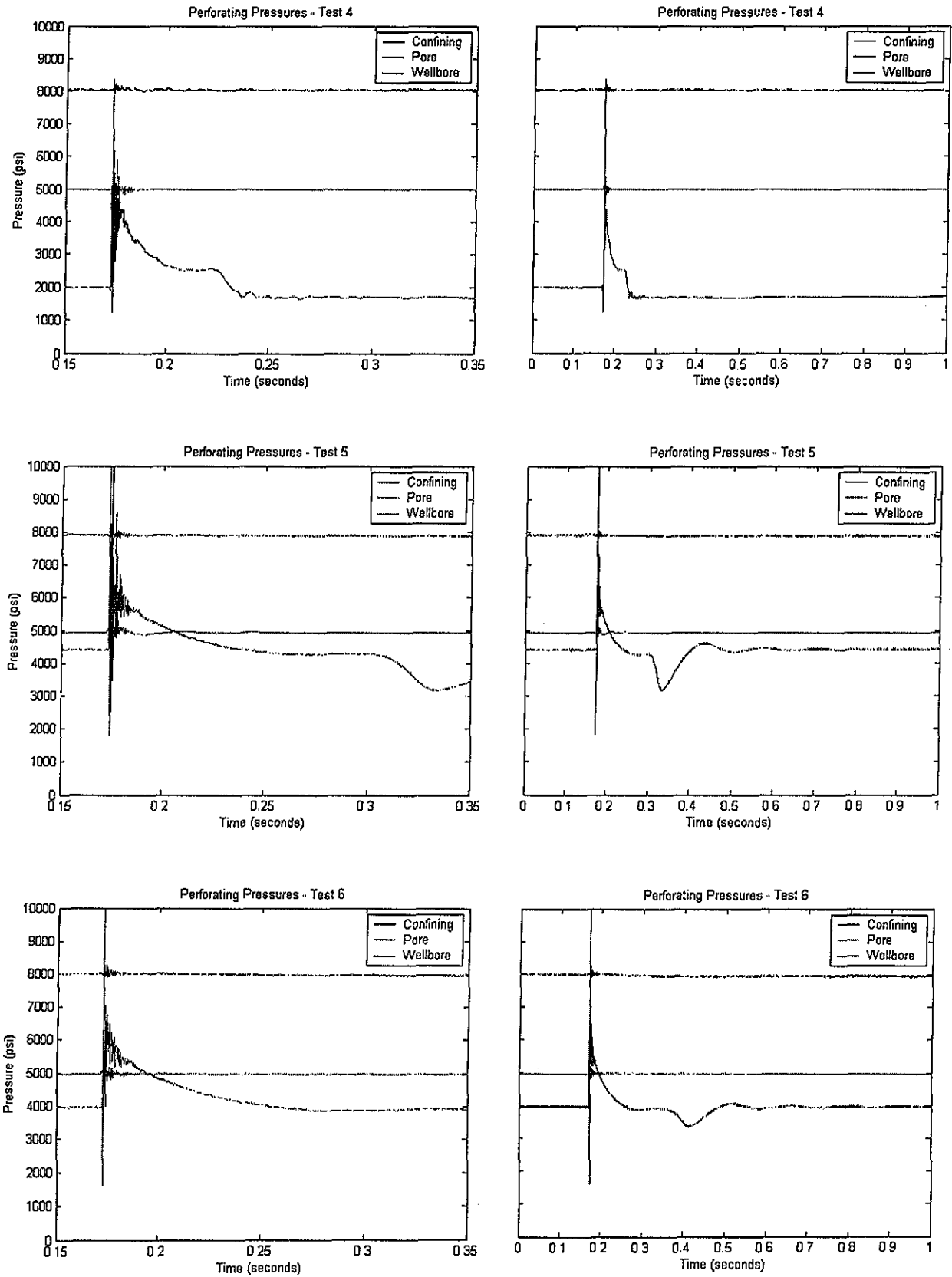


Figura A 2 Gráfico presiones transitorias, Pruebas 4 a 6

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

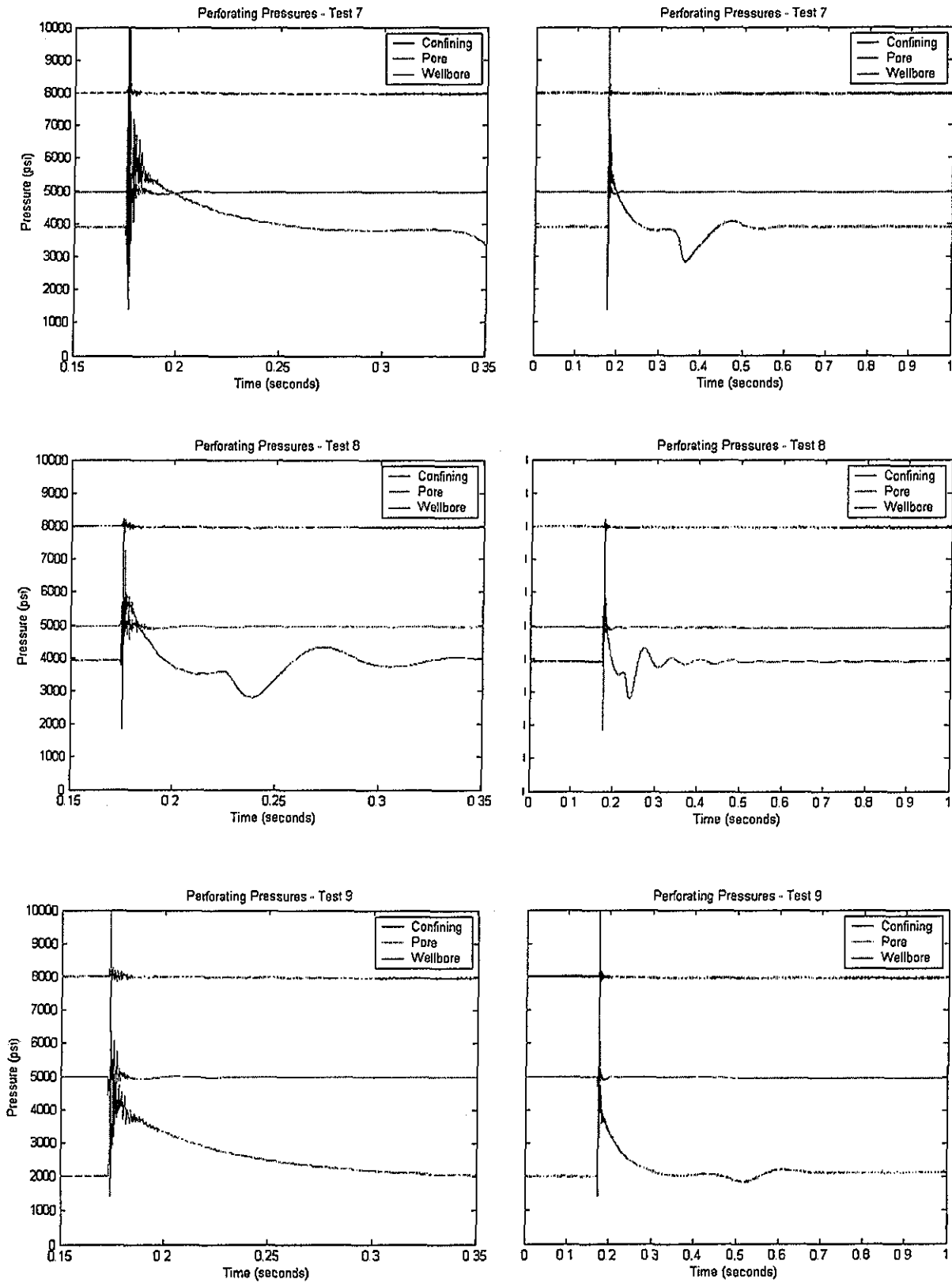


Figura A.3 Gráfico presiones transitorias, Pruebas 7 a 9

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

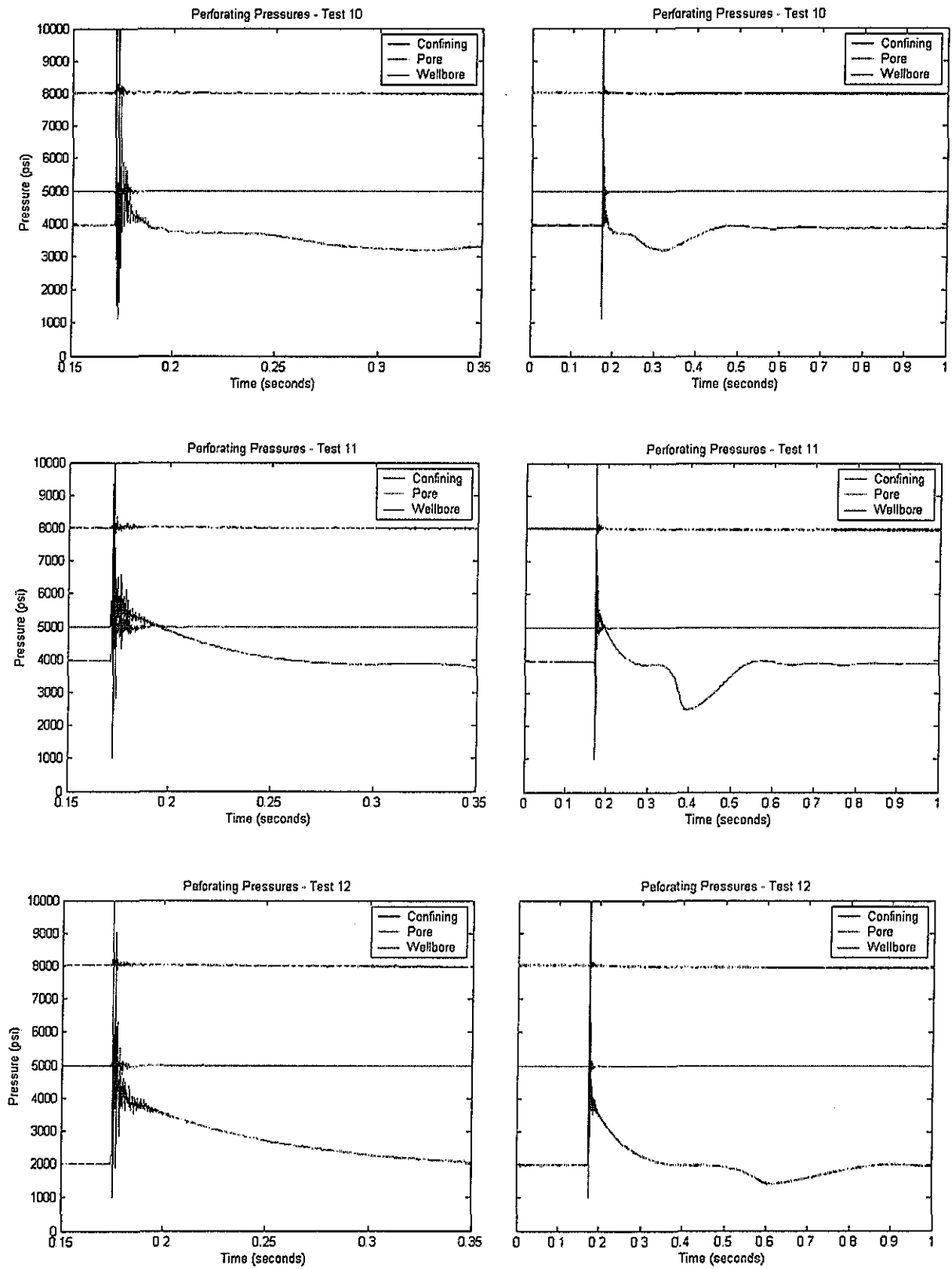


Figura A.4 Gráfico presiones transitorias, Pruebas 10 a 12

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

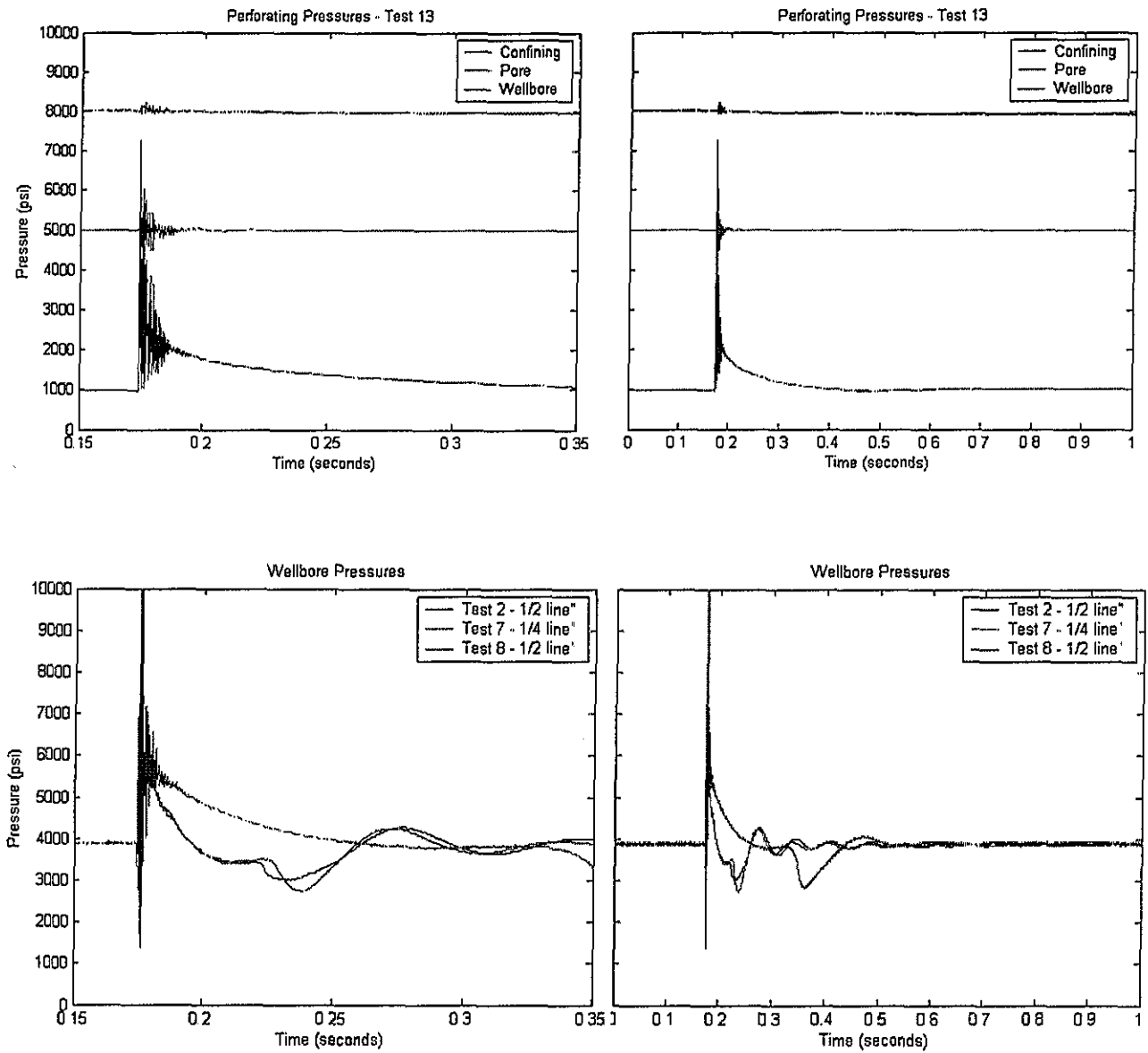


Figura A 5 Gráfico presiones transitorias Prueba 13 y superposición Pruebas 2, 7 y 8

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1. El presente documento es una copia de un documento original que se encuentra en el archivo de la Secretaría de Educación Pública, y no debe ser considerado como una versión definitiva o autorizada.

2. El presente documento es una copia de un documento original que se encuentra en el archivo de la Secretaría de Educación Pública, y no debe ser considerado como una versión definitiva o autorizada.

3. El presente documento es una copia de un documento original que se encuentra en el archivo de la Secretaría de Educación Pública, y no debe ser considerado como una versión definitiva o autorizada.

4. El presente documento es una copia de un documento original que se encuentra en el archivo de la Secretaría de Educación Pública, y no debe ser considerado como una versión definitiva o autorizada.

5. El presente documento es una copia de un documento original que se encuentra en el archivo de la Secretaría de Educación Pública, y no debe ser considerado como una versión definitiva o autorizada.

A.2 Galería de fotografías

Núcleos disparados

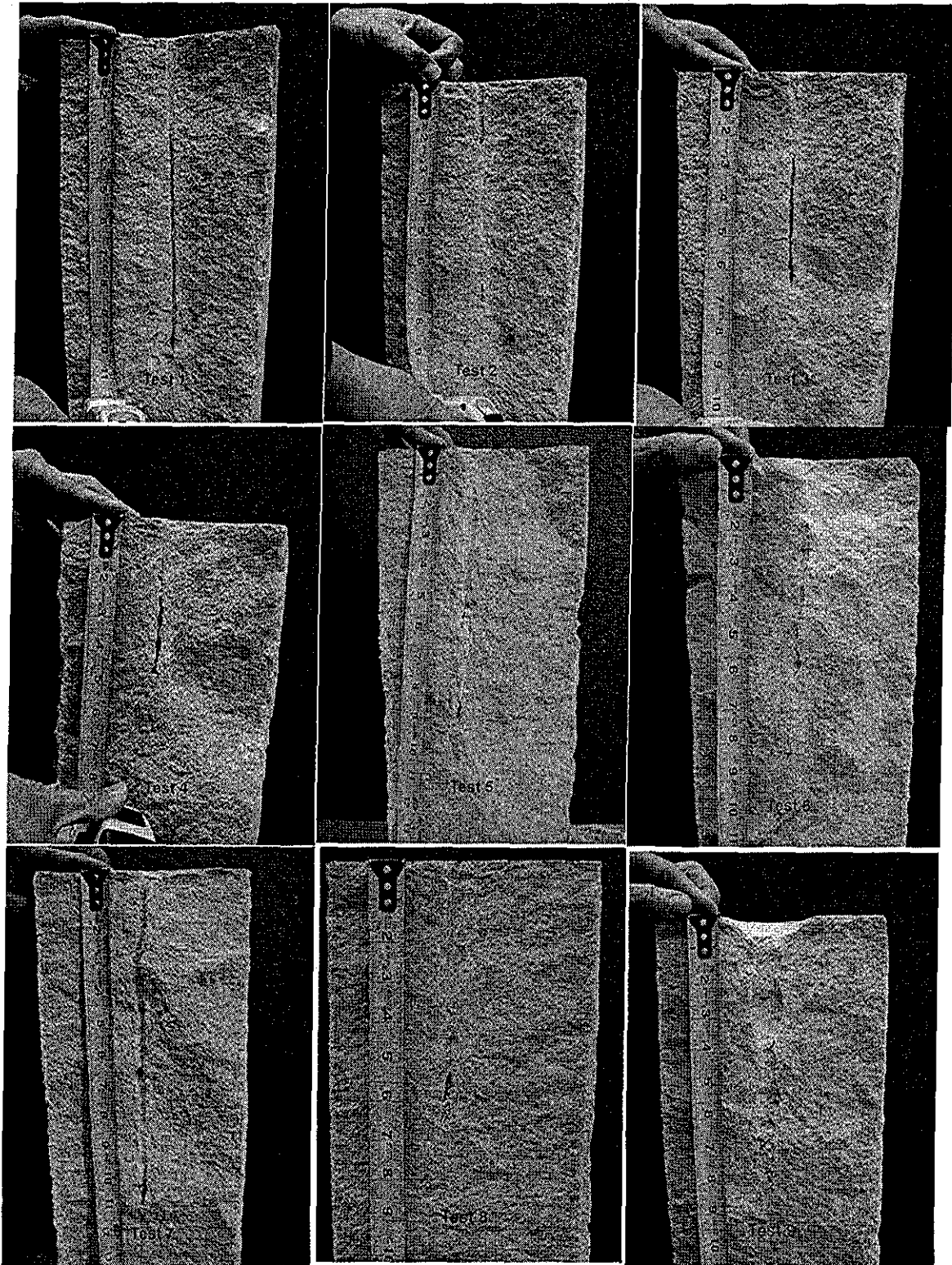


Figura A 6 Blancos 1 al 9 disparados

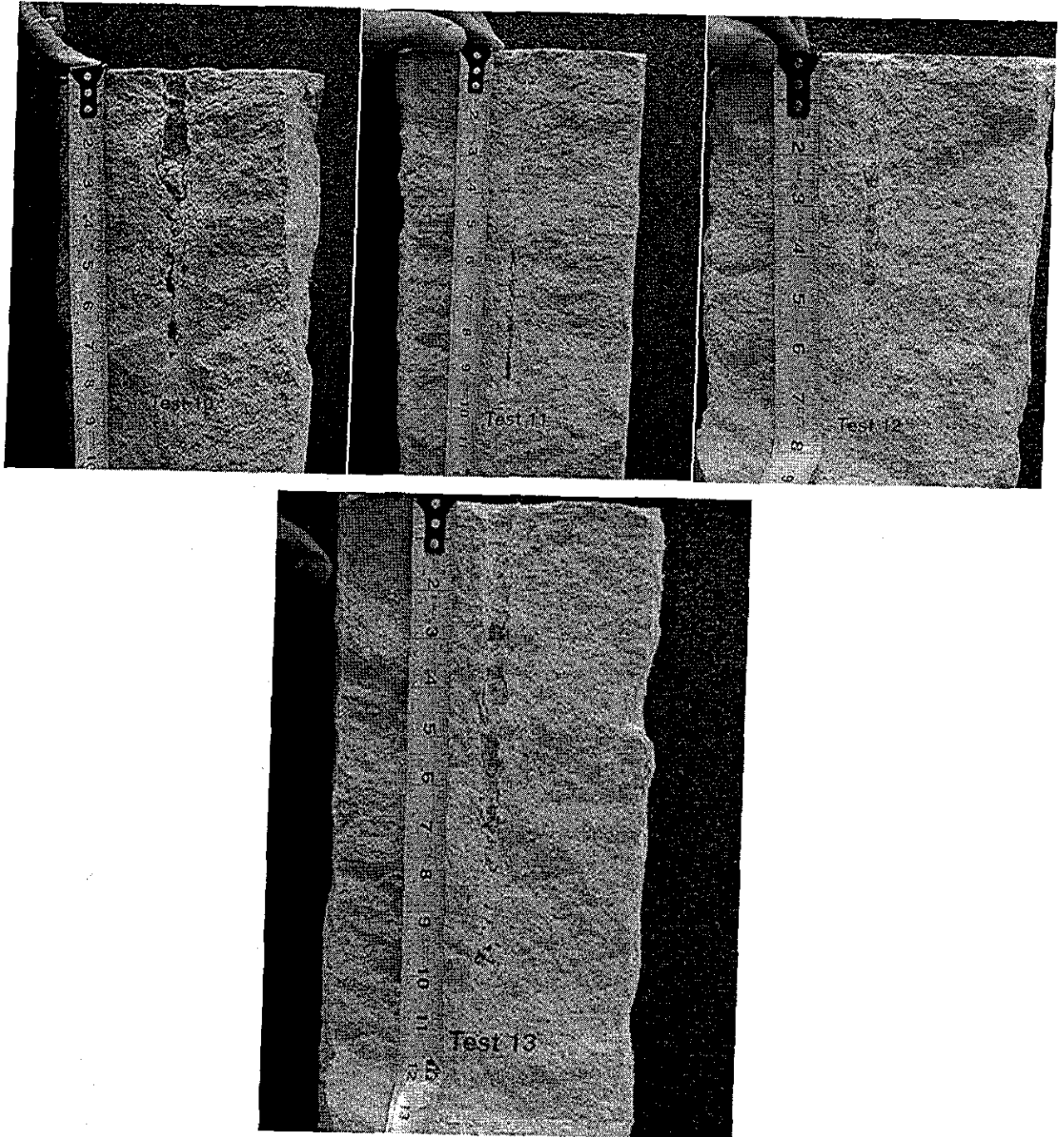


Figura A.7 Blancos 10 al 13 disparados

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Equipo del Laboratorio



Figura A.8 Extracción del blanco de la fosa para medir permeabilidad

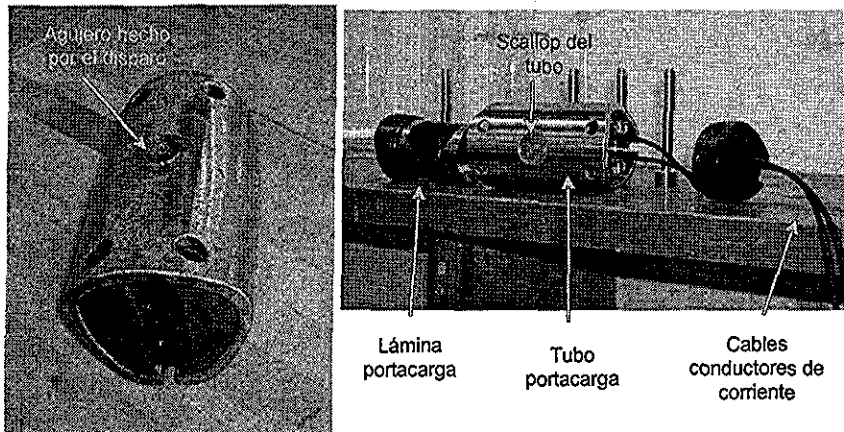


Figura A.9 Fotografías del arreglo de montaje de la carga explosiva

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

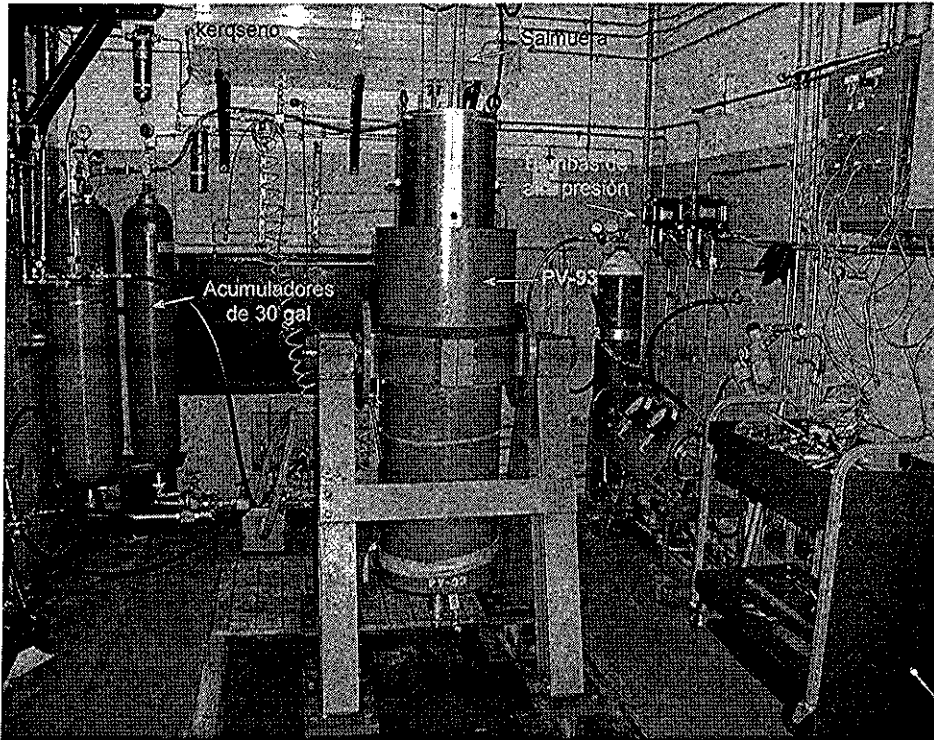


Figura A 10 Fotografía del Contenedor presurizado PV-93 y parte del laboratorio



Figura A 11 Fotografía del Tablero de control de presiones. Cortesía SRC, Schlumberger

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

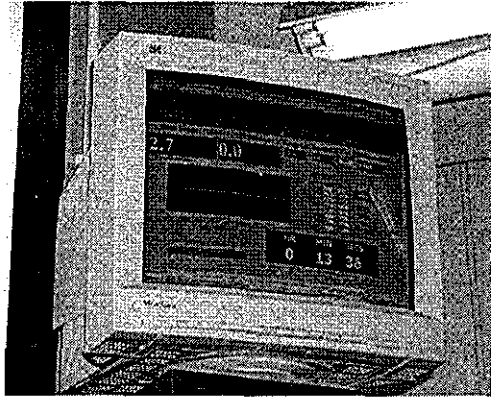


Figura A.12 Fotografía de monitor de presiones. Cortesía SRC, Schlumberger

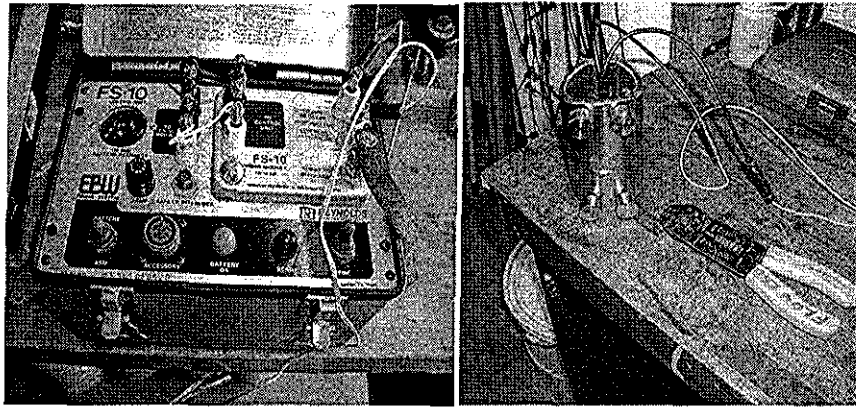


Figura A.13 Caja de disparo y pistola armada

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

130 130
130 130
130 130

A.3 Lista de Tablas y Figuras

Tablas:

Núm.	Descripción	Página
1	Tipos de pistolas, aplicación, ventajas y desventajas	6
2	Muestra de resultados de cálculos de formación del jet y el proyectil	14
3	Características físicas de los explosivos usados en los disparos	18
4	Importancia relativa de los 4 factores geométricos	42
5	Importancia relativa de los 4 factores geométricos de acuerdo al tipo de terminación	43
6	Propiedades mecánicas promedio del yacimiento	43
7	Gradientes de esfuerzo in-situ	44
8	Representación del disparo y su vecindad en el modelo de elementos finitos de Tariq	63
9	Resultados experimentales en Arenisca Berea usando aceite pesado	66
10	Rocas obtenidas de afloramientos y sus características	84
11	Características del Contenedor presurizado	98
12	Propiedades de los núcleos	103
13	Condiciones del Arreglo Experimental y Resumen de Resultados Experimentales (Caliza Bedford, Carga PJ 2906). Se define PI como el Gasto/Presión diferencial en unidades cc/seg/100 lbs/plg ²	104
14	Condiciones del Arreglo Experimental y Resumen de Resultados Experimentales (Dolomita Silurian, Carga PJ2906)	105
15	Condiciones del Arreglo Experimental y Resumen de Resultados Experimentales (Caliza Bedford, Carga PJ4512)	106
16	Datos de entrada y cálculos para la obtención de los gráficos de King, Berhmann y Walton	125

Figuras:

Núm.	Descripción	Página
1	Sistema de disparo entubado	7
2	Sistemas de disparo expuestos tipo semirecuperable	7
3	Sistemas de disparo expuestos tipo desintegrable desplegable	8
4	Sistemas de disparo de diámetro grande (TCP).	8
5	Factores geométricos de un sistema de disparo	9
6	Patrón de agujeros producidos por sistemas de disparo de fase 0° y 60°	9
7	a) Partes de una carga explosiva, b) Cargas explosivas y liners	10
8	Etapas de la formación del jet de una carga moldeada revestida	11
9	(a) Proceso de colapso del liner y formación del jet, (b) Dirección de proyección de la pared del liner	12
10	(a) Distribución del material en el jet y el proyectil, (b) Curvatura del liner colapsándose	13
11	Penetración del jet fluido	15
12	Estabilidad de los diferentes explosivos. Límites operacionales para sistemas entubados	17
13	Fotografía y dibujo de un blanco de concreto sección 1, API RP 19B	19
14	Fotografía y dibujo de un blanco de concreto sección 1, API RP 19B, disparado	20
15	Geometría típica de flujo radial	25
16	Geometría típica de flujo Axial	25
17	Esquema de un equipo típico de prueba sección 4, API RP 19B, 1ª Edición	26
18	Efecto de la penetración y la densidad en la Relación de productividad	28
19	Efecto de la penetración y zona de daño en la Relación de productividad	28
20	Efecto de la fase en la Relación de productividad	29
21	Zona de permeabilidad alterada del pozo	30
22	Caída de presión debida al daño por la perforación	30
23	Daño a la formación debido al proceso de disparo	33
24	Zonas con diferentes permeabilidades	33
25	Mecanismo de creación de la zona dañada por el disparo	34
26	Núcleo de 0.1016 m (4 plgs.) disparado con una carga de 22-g	40
27	Gráficos de contorno de deformación plástica equivalente de una cavidad disparada (a) en la dirección de máximo esfuerzo in situ (σ_H) y (b) con un ángulo de $\pm 25^\circ$ con respecto a σ_H	44

Núm.	Descripción	Página
28	(a) Pistola TCP estándar y con fase especial	45
	(b) Distancia mínima entre perforaciones del disparo	
29	Efecto del esfuerzo efectivo y de la formación en la penetración	47
30	Reducción de la penetración inducida por el esfuerzo para 5 cargas en arenisca Berea	47
31	Dispositivo para prueba de múltiples disparos en roca sometida a esfuerzo	48
32	Factores que afectan el flujo en pozo abierto	50
33	Factores que afectan el flujo en pozo disparado	50
34	Disparo bajo balance y sobre balance	54
35	Bajo balance vs. Permeabilidad. Gráfico de King	57
36	Representación del disparo y su vecindad en el modelo de elementos finitos de Tariq	61
37	Gráfico Presión bajo balance vs Skin para Arena Berea y Arena Gold	64
38	Flujo total y Gasto vs Tiempo (de Van Everdingen, $r_0/r = 10$)	69
39	Skin por disparo vs. Fuerza de arrastre	70
40	Gradiente máximo de presión durante el brote de flujo	74
41	Transitorios de presión durante el disparo con un bajo balance inicial de 1,000 psi	78
42	Transitorios de presión durante el disparo con un sobre balance inicial de 500 psi	78
43	Blancos de caliza Bedford	84
44	Blancos de dolomía Silurian	85
45	Centro de preparación de los blancos (núcleos)	86
46	Recipiente al vacío para saturación de núcleos.	87
47	Geometría típica para Flujo Radial	88
48	Geometría típica para Flujo Axial	88
49	Preparación e introducción del blanco en la fosa para medir permeabilidad	89
50	Hoja API RP 19B, 1ª. Edición, sección 1 de la carga de 15 gramos	92
51	Hoja API RP 19B, 1ª Edición, sección 1 de la carga de 22 gramos	93
52	Esquema del arreglo de montaje	94
53	Fotografía del arreglo de montaje en el portacargas	94
54	Esquema del Contenedor presurizado PV-93	95
55	Funda o camisa de hule para aislar núcleo y muestra (núcleo) disparado dentro de la camisa de hule	96
56	Diagrama del Contenedor presurizado PV-93 y ubicación de sensores de presión	97

Núm.	Descripción	Página
57	Fotografía del Contenedor presurizado PV-93	98
58	Fotografía del blanco de Caliza Bedford disparado usado en la prueba 1	100
59	Gráfico Daño por disparo (Skin) vs Bajo balance estático	107
60	Gráfico Eficiencia Flujo en Núcleo CFE vs Bajo balance estático	108
61	Gráfico Relación de Índice de productividad PI vs Bajo balance estático	109
62	Gráfico de transitorios de Presión Pruebas 2, 7 y 8	112
63	Gráfico de transitorios de Presión Pruebas 2, 7 y 8, Escala ampliada de tiempo	112
64	Gráfico de transitorios de Presión Prueba 1	113
65	Gráfico de transitorios de Presión Prueba 1, Escala de tiempo ampliada	114
66	Gráfico de transitorios de Presión Prueba 9, Escala reducida de tiempo	115
67	Gráfico de transitorios de Presión Prueba 9	115
68	Gráfico de transitorios de Presión Prueba 12, Escala reducida de tiempo	116
69	Gráfico de transitorios de Presión Prueba 12	116
70	Gráfico con el criterio de King y los resultados de estas pruebas	117
71	Gráfico con el criterio de Berhmann y los resultados de estas pruebas	119
72	Gráfico de Daño por disparo - CFE vs Bajo balance dinámico pico	120
73	Gráfico de Daño por disparo vs Bajo balance pico/Resistencia compresiva sin confinar	121
74	Gráfico de Daño por disparo vs. Bajo balance pico/Resistencia compresiva sin confinar	123

Bibliografía y Referencias

#	Título
1	Subiaur Artiachi, Servio Tulio, "Manual de Técnicas de Disparo", Gerencia de Perforación y Mantenimiento de Pozos, Región Sur, 1995
2	Atlas Perforating Manual, Páginas 28-31
3	Yew, C.H. and Xichang Zhang,: "A Study of the Damage Zone Created by Shaped-Charge Perforating", SPE 25902, SPE Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, CO. U.S.A., abril 12-14, 1993
4	API RP 1 9B: "Recommended Practices for Evaluation of Well Perforators", First Edition, November 2000
5	API RP 43: "Recommended Practices for Evaluation of Well Perforators", Fifth Edition, January 1997
6	Halleck, P. M. ,: "Advances in Understanding Perforator Penetration and Flow Performance", SPE 27891, University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium, Tulsa, OK, U.S.A., 29-31 agosto, 1994
7	Pucknell, J.K.; Behrmann, L. A. ,: "An Investigation of the Damaged Zone Created by Perforating", SPE 22811, 66 th Annual Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, Tx, octubre 6-9, 1991
8	Yew, C.H ; Liu, Gefei,: "Pore Fluid and Wellbore Stabilities", SPE 22381, SPE International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, China, 24-27 marzo, 1992
9	Sulbaran, A L ; Carbonell, R.S.; López de.Cárdenas, J.E. ,: "Oriented Perforating for Sand Prevention", SPE 57954, SPE European Formation Damage Conference, The Hague, Netherlands, 31 mayo-1 junio, 1999
10	Halleck, P.M.; Saucier, R.J.; Berhmann, L. A. : "Reduction of Jet Perforator Penetration in Rock Under Stress", SPE 18245, 63 rd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, Tx, octubre 2-5, 1988
11	
12	Elshawaki, H; Gad, K. : "Evaluation of Skin for High Deliverability Gas Well Tests", SPE 68684, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 17-19 abril, 2001
13	Berhmann, L. A ; Pucknell, J.K.; Bishop, S.R.; Hsia, I Y. : "Measurement of Additional Skin Resulting Form Perforation Damage", SPE 22809, 66 th Annual Technical Conference of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, Tx, octubre 6-9, 1991
14	W.I Bell, Inc. & Moseley Associates, Inc. : "Course Manual for Perforating Techniques", Página 8.1, 1990
15	Handren, P.J., Jupp, I.B. and Dees, J.M. : "Overbalance Perforating and Stimulation Method for Wells", SPE 26515, 66 th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, Tx, octubre 6-9, 1991
16	King, G.E.; Anderson, A R.; Bingham, M D : "A Field Study of Underbalance Pressures Necessary To Obtain Clean Perforations Using Tubing Conveyed Perforating", Journal of Petroleum Technology, páginas 662-664, junio 1986

#	Titulo
17	Halleck, P M.; Deo, M.: "The Effects of Underbalance on Perforation Flow", SPE 16895, 62 nd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, Tx, septiembre 27-30, 1987
18	Iariq, S.M.: "New, Generalized Criteria for Determining the Level of Underbalance for Obtaining Clean Perforations", SPE 20636, 65 th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans, LA, septiembre 23-26, 1990
19	Berhmann, L. A., Hsia, T. Y.: "Perforating Skin as a Function of Rock Permeability and Underbalance", SPE 22810, 66 th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, Tx, octubre 6-9, 1991
20	Berhmann, L.A.: "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE 30081, SPE European Formation Damage Conference, The Hague, Netherlands, 15-16 mayo, 1995
21	Walton, I.C., "Optimum Underbalance for the Removal of Perforation Damage", SPE 63108, 2000 Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Tx, octubre 1-4, 2000
22	van Everdingen, A.F. and Hurst, W : "The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs", <i>Trans. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers</i> , 186, Dallas, 1949
23	Pearson, J.R.A. and Zazovsky, A.F.: "A Model for the Transport of sand grains form a perforation During Underbalance Surge", SPE 38634, 72 nd Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, octubre 5-8, 1997
24	Walton I.C., Johnson, A.B., Behrman, L.A., Atwood, D.C.: "Laboratory Experiments Provide New Insights into Underbalanced Perforating", SPE 71642, 2001 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 septiembre- 3 octubre, 2001
25	Berhmann, L.A., Li, J.L., Venkitaraman, A.: "Borehole Dynamics During Underbalanced Perforating", SPE 38139, 1997 SPE European Formation Damage Conference, The Hague, The Netherlands, 2-3 junio, 1997
26	Subiaur Artiachi, Servio T., Subdirección de Perforación y Mantenimiento de Pozos "Pruebas de Sistemas de Disparo", Schlumberger Perforating & Testing Center, Rosharon, Texas, 26 de julio al 6 de agosto de 1999