

14
290

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**



FACULTAD DE INGENIERIA

**TEORIA Y ANALISIS DE PRUEBAS
DE IMPULSO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
CESAR JAVIER LOMELI TORRES

DIRECTOR DE TESIS: M. EN I. RAUL LEON VENTURA

MEXICO, D. F.

SEPTIEMBRE, 1993



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

RESUMEN	1
I. INTRODUCCION.	3
II. DESARROLLO ANALITICO DE PRUEBAS DE IMPULSO.	6
II.1 DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS DE IMPULSO.	6
II.2 DESARROLLO ANALITICO DE PRUEBAS DE IMPULSO.	11
III. ANALISIS DE PRUEBAS DE IMPULSO.	17
III.1 DEFINICIONES.	17
III.2 ANALISIS DE PRUEBAS DE IMPULSO.	25
III.3 CONSIDERACIONES PRACTICAS.	28
IV. EJEMPLOS ILUSTRATIVOS.	32
IV.1 EJEMPLO 1. PRUEBA DE IMPULSO EN UN YACIMIENTO DE ALTA PERMEABILIDAD.	32
IV.2 EJEMPLO 2. PRUEBA DE IMPULSO EN UN YACIMIENTO DE BAJA PERMEABILIDAD.	40
IV.3 EJEMPLO 3. ANALISIS DE UNA PRUEBA DE IMPULSO SIMULADA.	49
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	53
NOMENCLATURA.	55
REFERENCIAS.	57

RESUMEN

En Ingeniería de Yacimientos, el Ingeniero Petrolero debe tener información suficiente para llevar a cabo análisis cualitativos y cuantitativos de las características de la formación para diagnosticar las condiciones de producción bajo distintas alternativas de explotación. Mucha de esta información es obtenida de la aplicación de pruebas de presión en pozos.

El presente trabajo expone un método nuevo en México para la evaluación de pozos, las pruebas de impulso. En estas pruebas, la formación se sujeta a gastos de impulso creados por flujos cortos de producción o flujos cortos de inyección. La respuesta de presión para un gasto ideal de impulso puede ser dada por la derivada de la respuesta de presión, para un cambio convencional en las etapas de gastos. El cálculo de la derivada aporta información básica para la identificación de los regímenes de flujo ocurridos durante la prueba, además de que elimina los efectos del tiempo de producción sobre los datos de presión.

Se presenta, detalladamente, el desarrollo analítico considerando los conceptos matemáticos necesarios, ecuación de continuidad, ecuación de movimiento y la ecuación de estado correspondiente, así como las condiciones que presenta el sistema, partiendo de la ecuación de difusividad para flujo radial.

Se considera una metodología de análisis, a partir de la definición de grupos adimensionales necesarios, para poder representar las propiedades del yacimiento. Esta se basa en la interpretación de datos de presión mediante la técnica de ajuste con curvas tipo para pruebas de impulso. Además se recomienda una

serie de consideraciones prácticas, para una mejor comprensión y análisis de estas pruebas.

Una serie de ejemplos es incluida para la mejor comprensión de las pruebas de impulso, así como de su técnica de análisis . En estos ejemplos se demuestra la efectividad de dichas pruebas y su congruencia con otros métodos de análisis, en estos casos, con el método de la derivada de la presión.

CAPITULO I

INTRODUCCION.

Las formaciones productoras de hidrocarburos son comúnmente probadas con mediciones de presión de fondo y gastos, en función del tiempo de duración.

La interpretación de pruebas de presión ha tenido un avance importante durante las dos décadas pasadas. Esto fue posible debido al desarrollo de nuevas técnicas matemáticas que hacen posible la solución de problemas de flujo complejos en determinados yacimientos. Como consecuencia de la calidad y la cantidad de información obtenida de las pruebas de pozos, se ha logrado una mejor estimación de las propiedades del yacimiento.

Sin embargo, no obstante los avances logrados en pruebas de pozos, el régimen de flujo y la unicidad de solución principalmente, son aspectos importantes en la interpretación de los datos. Así, curvas tipo en términos de la derivada de la presión se desarrollan con el fin de superar el problema de unicidad, para casos de daño y almacenamiento y para yacimientos fracturados. Estas curvas permiten un análisis simultáneo de la presión y su derivada⁴.

Las pruebas de pozos son aplicadas con el fin de evaluar las características de un yacimiento bajo condiciones dinámicas. El procedimiento de las pruebas en pozos establece un flujo a la superficie por tiempos largos (horas o días) y desarrollos recientes, como el método de la derivada de la presión, mejoran las técnicas de interpretación.

En el presente trabajo se describe una nueva tecnología en pruebas de pozos, denominadas pruebas de impulso y las cuales son aplicadas principalmente en pozos no fluyentes a la superficie, en pozos donde no es posible, principalmente por cuestiones económicas, un cierre del pozo por tiempos largos o en pozos donde no es deseable un flujo por tiempos largos (yacimientos con formación de arena), inclusive, este tipo de pruebas pueden llevarse a cabo con el principal objetivo de no contaminar en exceso el medio ambiente, como es el caso, por ejemplo, de pruebas de interferencia o de pulsos donde se queman hidrocarburos a la atmósfera por tiempos largos, ya que las pruebas de impulso requieren de tiempos cortos de producción, esto es minutos.

Las pruebas de impulso constituyen un procedimiento relativamente reciente, en las que un pozo se somete a impulsos con periodos de producción seguidos por cierres o con periodos de inyección seguidos por cierres.

Estudios realizados sobre la base del análisis de las pruebas de impulso son considerados en la realización de este trabajo, desde la definición de las funciones de Green para la solución de problemas de flujo complejos, hasta la base del análisis para pruebas de impulso y su aplicación a yacimientos de alta o baja permeabilidad.

Estas pruebas están fundamentadas en el concepto de pruebas de pulsos principalmente, en las cuales la formación también se sujeta a periodos de producción o inyección, seguidos por periodos de cierre, con la gran limitante, en el caso de las pruebas de impulsos del tiempo de duración de los periodos de producción o inyección, el cual debe ser apenas de unos minutos.

El objetivo de este trabajo es dar una alternativa de análisis de datos de presión para yacimientos con formaciones problemáticas y/o pozos con características que requieren de cuidados especiales, demostrando la efectividad de la técnica de análisis, considerando que requieren de costos relativamente bajos de evaluación con respecto a otros métodos de análisis.

De esta forma las pruebas de impulso pueden ser de gran utilidad en la evaluación de yacimientos, principalmente en aquellos cuya transmisibilidad es ideal para estas pruebas, esto es, ni muy alta ni muy baja; o para pozos dañados, ya que las pruebas de impulso pueden llevarse a cabo incluso durante la estimulación de un pozo.

CAPITULO II

DESARROLLO ANALITICO DE PRUEBAS DE IMPULSO.

II.1 DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS DE IMPULSO.

Las pruebas de impulso consisten de una corta inyección o un corto periodo de flujo, seguido por un periodo de cierre.

Requieren de mediciones exactas de las variaciones de presión con respecto al tiempo y del volumen total de fluido inyectado o producido.

Las pruebas de impulso son aplicadas principalmente en pozos no fluyentes a la superficie, en pozos donde no es posible, por cuestiones económicas principalmente, un cierre del pozo por tiempos largos o en pozos donde no es deseable un flujo por tiempos largos (yacimientos con formación de arena), inclusive, este tipo de pruebas pueden llevarse a cabo con el objetivo de conservar al máximo el medio ambiente, como no es el caso por ejemplo, de pruebas de interferencia o de pulsos en las cuales se queman hidrocarburos a la atmósfera por tiempos largos. Todo esto debido a que las pruebas de impulso requieren de tiempos de producción relativamente cortos (algunos minutos).

Las pruebas de impulso son también aceptables desde el punto de vista económico, ya que implican bajos costos de evaluación del yacimiento y de las condiciones del pozo.

Comúnmente, las pruebas de impulso también son realizadas

para determinar la comunicación interpozos y de esta forma poder modelar el posible comportamiento del yacimiento, y así tener una idea más clara de cuales serán las mejores condiciones de explotación del mismo.

Cuando la formación es sometida a fuentes instantáneas de fuerza o "Impulso Dirac", figura 1, las variaciones de la presión con el tiempo son dadas por las funciones de Green².

En años recientes, la teoría de Green y las funciones fuente han sido aplicadas en el desarrollo de nuevos modelos para la solución de problemas complejos de flujo en yacimientos³. El punto de partida es el concepto de "fuente instantánea", el cual indica una extracción o una inyección brusca al yacimiento, creando un cambio en la presión del sistema.

La figura 2 muestra el comportamiento de la presión en un punto, cuando el movimiento del fluido ocurre al tiempo t_0 . En la práctica, se requiere de un tiempo determinado de producción para remover un volumen Q de fluido del yacimiento, aún en el caso de tener una fuente continua activa. La respuesta de presión después de la extracción o inyección del fluido dependerá de la geometría del yacimiento y de la fuente (sistema).

La figura 3 muestra una gráfica de la relación $\Delta p_{tp} / \Delta p_{t_{nat}}$ contra $\Delta t / t_p$ para una fuente continua y para una fuente instantánea. De aquí se puede observar que para propósitos prácticos, la caída de presión causada por una fuente continua es igual a la caída de presión causada por una fuente instantánea, esta aproximación puede ser aplicada incluso para tiempos cortos en caso de flujos lineal o bilineal.

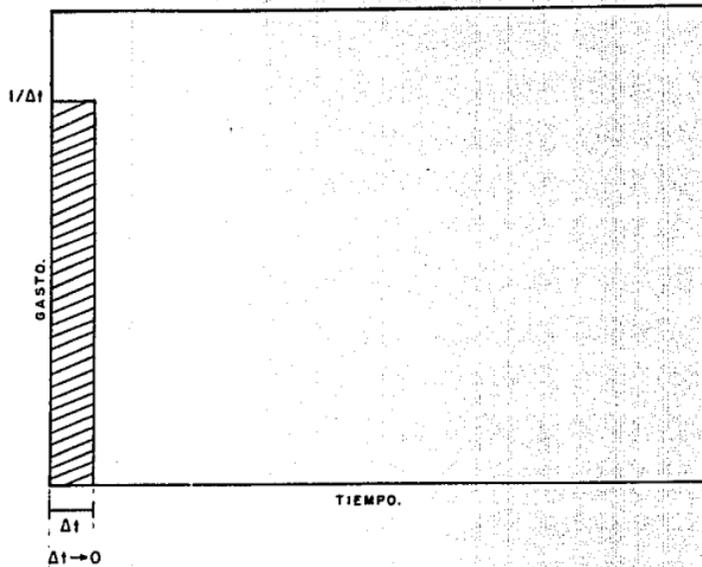


FIG.1 IMPULSO DE PRODUCCION IDEAL (FUNCION DELTA DE DIRAC).

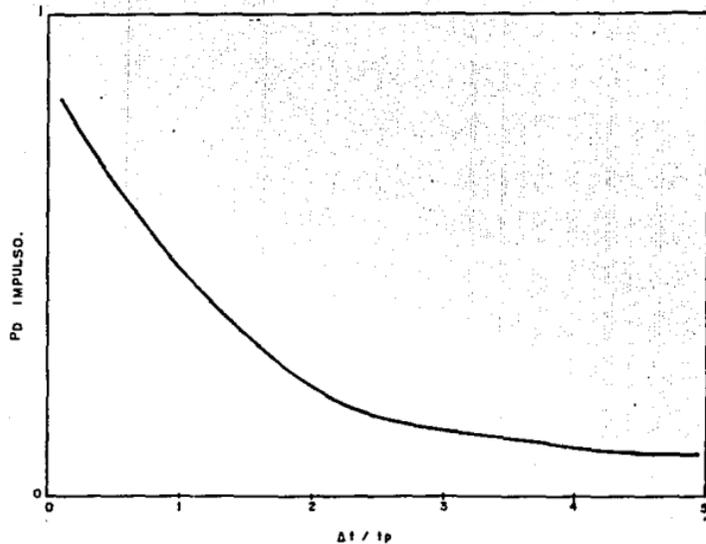


FIG. 2 ABATIMIENTO DE PRESION CAUSADA POR UNA FUENTE INSTANTANEA ².

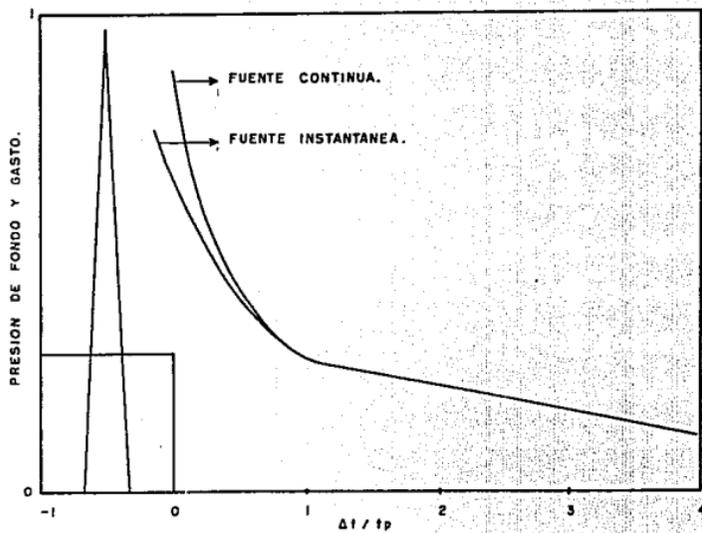


FIG. 3 COMPORTAMIENTO DE PRESION CAUSADA POR FUENTES CONTINUA E INSTANTANEA².

Cabe mencionar que el valor de Δt será una función del daño y de la transmisibilidad del yacimiento; esto es, s/T . Así mismo, la respuesta de presión del impulso es inversamente proporcional a la transmisibilidad; esto es, que para una alta transmisibilidad, la respuesta de presión es débil y viceversa.

II.2 DESARROLLO ANALITICO DE PRUEBAS DE IMPULSO.

El flujo de fluidos a través de un medio poroso puede describirse matemáticamente a partir de los siguientes conceptos físicos: (a) el principio de conservación de masa (ecuación de continuidad), (b) la ley de Darcy (ecuación de movimiento) y (c) la ecuación de estado correspondiente.

Partiendo de estas ecuaciones y como comúnmente el flujo de fluidos hacia un pozo ocurre en forma radial, se tiene que:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

que es la ecuación de difusividad para flujo radial.

La ecuación de difusividad relaciona la presión con el tiempo y la distancia en un sistema poroso con fluido ligeramente compresible. La ecuación es aplicada a todos los sistemas porosos, sin embargo, la solución de la ecuación depende de las condiciones iniciales y de frontera establecidas en el sistema.

Para pruebas de impulso la solución de la ecuación de difusividad considera un yacimiento infinito y gasto constante, de esta manera la ecuación 1 tiene como suposiciones principales : medio poroso homogéneo e isótropo, medio poroso incompresible, viscosidad independiente de la presión (constante), no existe variación de la presión en la dirección z, la presión es la misma en todas direcciones para una r dada, efectos capilares y gravitacionales despreciables, fluido ligeramente compresible y flujo laminar.

Para obtener la solución de la ecuación 1 es necesario usar una condición inicial y dos condiciones de frontera:

- a) $p(r, 0) = p_i \quad r \geq 0$ condición inicial.
- b) $\left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=0} = - \frac{q\mu}{2\pi kh} \quad t > 0$ condición de frontera interna.
- c) $\lim_{r \rightarrow \infty} p(r, t) = p_i \quad t \geq 0$ condición de frontera externa.

La condición b puede aproximarse por:

$$\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial p}{\partial r} = - \frac{q\mu}{2\pi kh} ,$$

de esta forma se tiene que:

$$p = p_i - \frac{q\mu}{4\pi kh} \operatorname{Ei} \left(- \frac{\phi \mu c_t r^2}{4kt} \right) . \quad (2)$$

Para radios pequeños y/o tiempos grandes, la ecuación 2 puede aproximarse por:

$$p = p_i - \frac{q\mu}{4\pi kh} \left[\ln \left(\frac{\phi\mu_c r^2}{4kt} \right) + 0.5772 \right] . \quad (3)$$

La diferencia entre la solución dada por la ecuación 2 y la que se obtendría aplicando la condición b), solo es notable para tiempos de explotación demasiado cortos; por tanto, es factible su aplicación a pruebas de impulso si para éstas se consideran tiempos de explotación mayores a los 5 minutos.

Las pruebas de impulso requieren que se mantenga el gasto de producción o inyección constante durante el desarrollo de toda la prueba.

El principio de superposición es una herramienta muy poderosa y de gran utilidad para representar el comportamiento de la presión en yacimientos infinitos y semi-infinitos, sin flujo o con presión constante en la frontera externa.

Conforme al principio de superposición, los datos para una prueba de incremento de presión incluyen dos componentes²:

$$\Delta p_{ws}(\Delta t) = q\Delta p_i(t_p + \Delta t) - q\Delta p_i(\Delta t) . \quad (4)$$

Para identificar el régimen de flujo existente en la prueba, se requiere del cálculo de la función influencia. Este puede ser hecho con la ecuación 4 suponiendo que $t_p \gg \Delta t$, ya que el primer término de esta ecuación puede ser considerado como una constante.

De acuerdo al concepto de fuente instantánea, el cual implica una extracción o inyección súbita de fluido en el yacimiento creando un cambio en la presión del sistema, la caída (o restauración) de la presión es dada por³:

$$\Delta p_{inst} = \frac{QS(t-t_0, M, M_0)}{\theta c_t} \quad (5)$$

donde Q es el volumen de fluido extraído o inyectado, M es el punto de observación, M_0 representa la localización de la fuente y S representa la función fuente, que depende de la geometría del yacimiento y de la fuente (figura 4). Como se muestra en la figura 2, en la práctica se requiere de un cierto tiempo t_p para remover un gasto q de fluido.

Bajo estas condiciones, la respuesta de presión después de la extracción del fluido puede ser expresada por²:

$$\Delta p_{t_p} = \frac{1}{\theta c_t} \int_{t_0 - t_p/2}^{t_0 + t_p/2} q(\tau) S(t-\tau, M, M_0) d\tau \quad (6)$$

Para pruebas de impulso, Δp_{t_p} tiende a Δp_{inst} a medida que el tiempo aumenta, entonces:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta p_{t_p} = \Delta p_{inst} \quad (7)$$

lo cual es equivalente a:

$$\lim_{t_p \rightarrow 0} \Delta p_{t_p} = \Delta p_{inst} \quad (7.a)$$

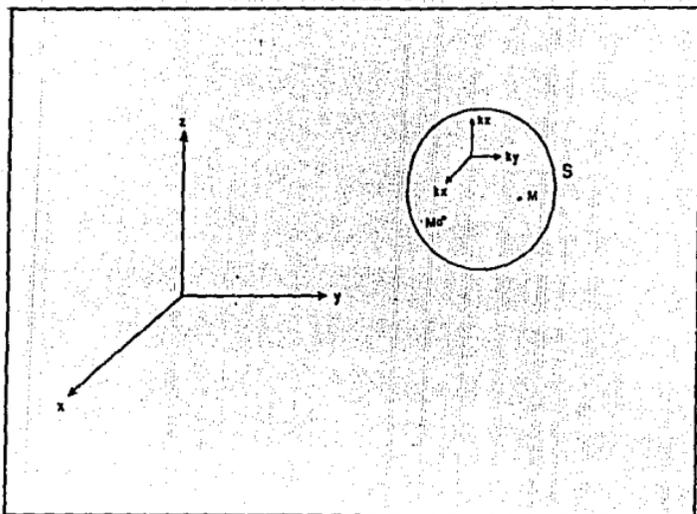


FIG. 4 ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PUNTO DE OBSERVACION (M), EL PUNTO DE LOCALIZACION DE LA FUENTE (M₀) Y LA FUNCION FUENTE (S) ³.

De la figura 3 se observa que la caída de presión causada por una fuente instantánea para tiempos de cierre grandes igual a $2t_p$, es igual a la caída de presión causada por una fuente continua.

De esta forma, y por el principio de superposición, la caída de presión causada por una fuente continua puede ser expresada en términos de la función influencia como sigue:

$$\Delta p = \int_0^t q(\tau) \frac{\partial \Delta p(t-\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (8)$$

de las ecuaciones 6 y 8 se tiene:

$$\frac{1}{\partial c_l} S(c, M, Mo) = \frac{\partial \Delta p_1(t)}{\partial t}, \quad (9)$$

así, la derivada de la función influencia puede ser aproximada por:

$$\frac{\partial \Delta p_1}{\partial t} = \frac{1}{Q} \Delta p_{t_p} \quad (10)$$

Esta expresión fue usada por Ayoub como base para el análisis de pruebas de impulso⁴.

CAPITULO III

ANALISIS DE PRUEBAS DE IMPULSO

III.1 DEFINICIONES.

Las propiedades del yacimiento: permeabilidad (k), porosidad (ϕ) y espesor de la formación productora (h); las propiedades del fluido de la formación: viscosidad (μ) y compresibilidad total (c_t); así como los parámetros de la misma prueba: periodo de impulso, periodo de cierre, tiempos de retraso y amplitud de la respuesta, son necesarias para definir los siguientes grupos adimensionales:

a) Relación de impulso:

$$R' = \frac{\text{periodo de impulso}}{\text{periodo de impulso} + \text{periodo de cierre}}$$

así:

$$R' = \frac{\Delta t}{\Delta t + R\Delta t} = \frac{1}{1+R}, \quad (11)$$

donde R es la relación entre el periodo de impulso y el periodo de cierre.

b) Periodo del ciclo adimensional:

$$\Delta t_{cD} = \frac{k \Delta t_c}{569000 \mu c_l r^2}, \quad (12)$$

donde Δt_c es el periodo del ciclo, figura 5.

c) Tiempo de retraso adimensional:

$$t_{LD} = \frac{t_L}{\Delta t_c} = \frac{t_L}{\Delta t(1+R)}, \quad (13)$$

donde t_L es el tiempo de retraso, figura 5.

d) Amplitud de la respuesta adimensional:

$$\Delta p_D = \frac{kh \Delta p}{70.6 B \mu q}, \quad (14)$$

donde Δp es la amplitud de la respuesta, figura 5.

e) Derivada de la amplitud de la respuesta adimensional:

$$\Delta p'_D (t_D / c_D) = \frac{\Delta t \Delta p k h}{141.2 q B \mu}, \quad (15)$$

f) Radio adimensional:

$$r_D = \frac{r}{r_v}. \quad (16)$$

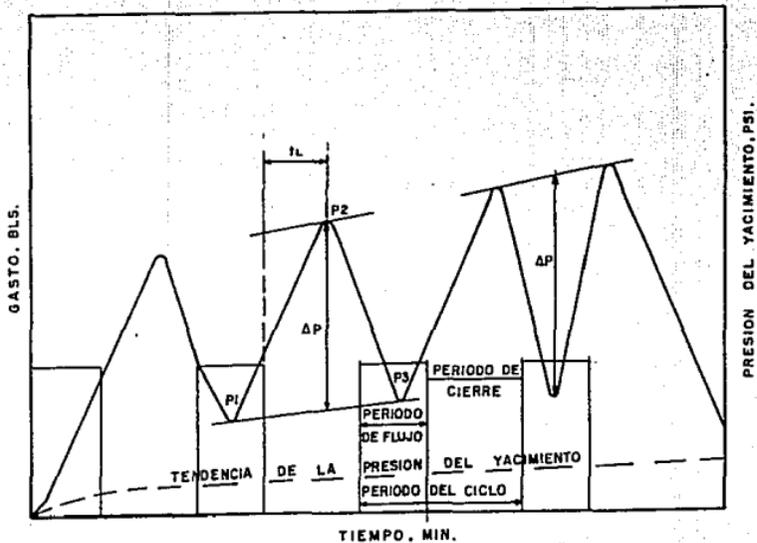


FIG. 5 TERMINOLOGIA DE PRUEBAS DE PULSOS⁵.

Los conceptos adimensionales definidos anteriormente, pueden ser usados para diseñar pruebas de impulso mediante el método de análisis con curvas tipo de la derivada de la presión.

Es práctica común que los datos de presión dominados por efectos de daño y almacenamiento sean interpretados por medio de la técnica de ajuste con curvas tipo. Una curva tipo es una familia de curvas de decremento de presión que representan el comportamiento de la presión de un yacimiento teórico. Es la solución gráfica que representa la respuesta de presión de un yacimiento.

Así, la derivada de la curva tipo propuesta por Bourdet⁶ es una familia de curvas que representan el comportamiento de la presión de un yacimiento con mayor exactitud y que minimiza los efectos de daño y almacenamiento (figura 6).

La respuesta de presión para un gasto ideal de impulso puede ser dado por la derivada de la respuesta de presión. El cálculo de la derivada aporta información básica para la identificación de los regímenes de flujo ocurrientes durante la prueba (figura 7), además de que elimina los efectos del tiempo de producción sobre los datos de presión.

La figura 8 muestra el análisis de resultados de una prueba de impulso simulada sobre un yacimiento de doble-porosidad⁷. En este análisis la simulación del yacimiento es clara y facilita la aplicación de las curvas tipo de la derivada de la presión, la característica depresión de un yacimiento de doble-porosidad es evidente en la figura.

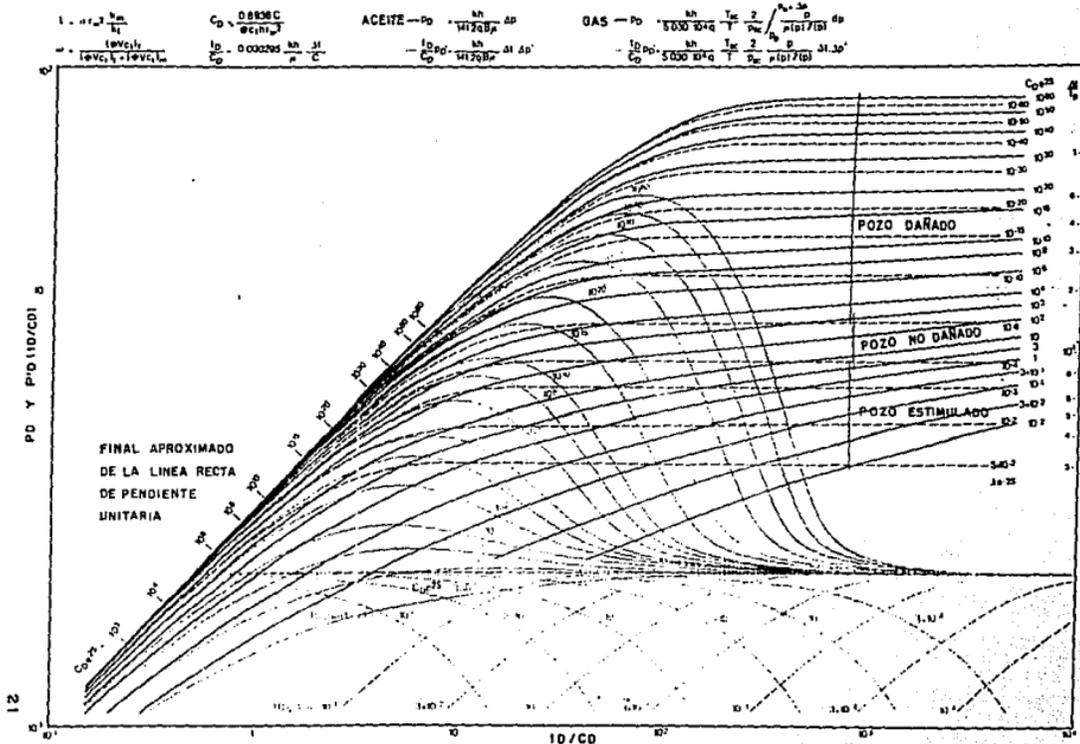


FIG. 6 CURVA TIPO PARA UN POZO CON ALMACENAMIENTO Y DAÑO EN UN YACIMIENTO INFINITO.

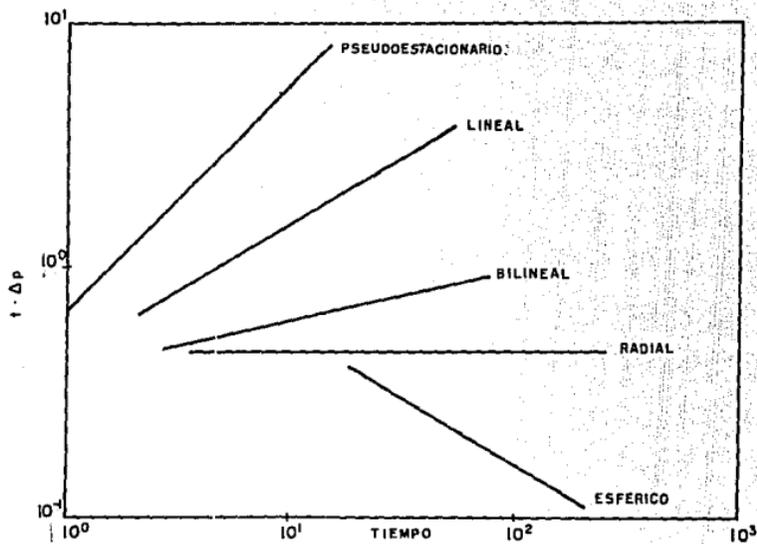


FIG. 7 GRAFICA DE IDENTIFICACION DEL REGIMEN DE FLUJO.

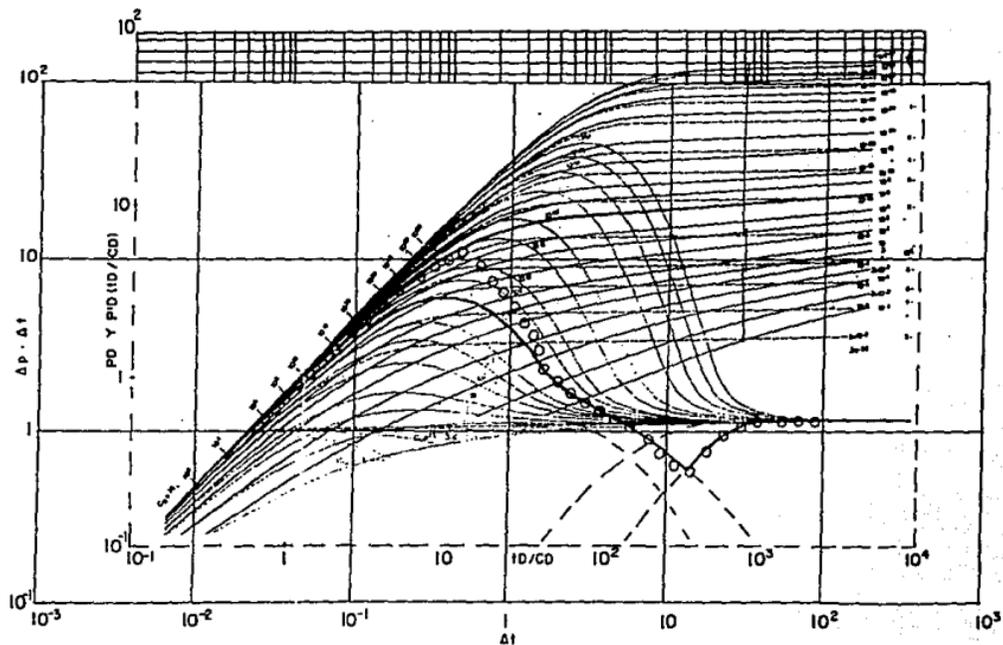


FIG. 8 AJUSTE DE DATOS DE UNA PRUEBA DE IMPULSO, EN UN YACIMIENTO DE DOBLE POROSIDAD ⁷.

Del análisis de simulaciones similares, se supone que un impulso debe crear una respuesta que teóricamente debe acarrear toda la información característica del yacimiento. En la práctica, sin embargo, sólo una parte de esta información es obtenida debido a los límites en la resolución de la respuesta. Por lo tanto, la confiabilidad de la información obtenida está directamente relacionada con la exactitud de las presiones medidas.

El método de solución de pruebas de impulso, por medio del uso de curvas tipo de la derivada de la presión, es relativamente sencillo ya que sólo requiere de mediciones exactas del abatimiento de la presión con respecto al tiempo. De esta forma, para analizar una prueba de impulso se puede aplicar el siguiente procedimiento:

1. Determinar el tiempo de duración del impulso y del cierre, dependiendo de las características del pozo y de los requerimientos de explotación principalmente, estas pruebas pueden llevarse a cabo incluso durante la estimulación de un pozo.

2. Con el dato de la presión inicial, hacer el cálculo de la respuesta de presión por el tiempo transcurrido para cada presión registrada ($\Delta p \Delta t$).

3. Sobre un papel transparente, graficar $\Delta p \Delta t$ contra Δt a la misma escala de las curvas tipo.

4. Superponer la gráfica de datos (papel transparente) sobre la gráfica de las curvas tipo.

5. Deslizar el papel transparente de la curva de datos horizontal y verticalmente, manteniendo paralelos los ejes principales, hasta que la curva de datos se ajuste a una de las curvas tipo de la derivada de la presión, figura 9.

6. Se elige un punto de ajuste y se registran sus coordenadas sobre ambas curvas: p'_D , t_D/c_D , $\Delta p \Delta t$, Δt .

7. Con los datos del punto de ajuste calcular la transmisibilidad y el factor de daño de la formación mediante las ecuaciones siguientes:

$$T = \frac{kh}{\mu} \quad (17)$$

donde k será calculado de la información de la prueba.

$$s = 0.5 \ln \left[\left(\frac{t_D}{c_D} \right) / t_{D,D} \right] c_{D,D} e^{2s} \quad (18)$$

donde la relación t_D/c_D es el punto de ajuste sobre el eje horizontal de las curvas tipo de la derivada de la presión; y $t_{D,D}$ es calculada con la ecuación 12 con respecto al mismo punto de ajuste.

III.2 ANALISIS DE PRUEBAS DE IMPULSO.

En la práctica los gastos de impulso no son instantáneos. Un tiempo finito es necesario para producir o inyectar un volumen bastante grande de fluido para crear una perturbación en las presiones medidas durante un tiempo suficiente.

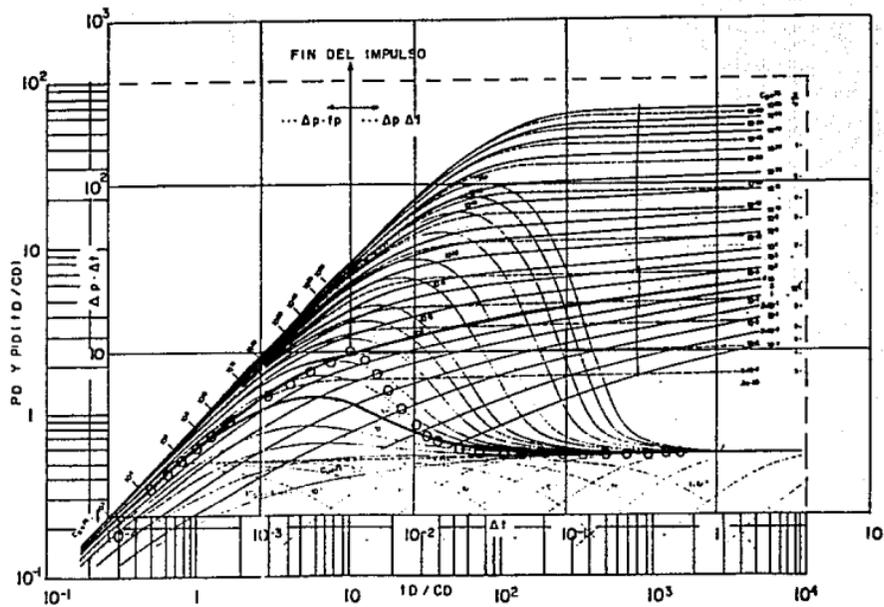


FIG. 9 ILUSTRACION DEL AJUSTE CON CURVAS TIPO DE LOS DATOS DE UNA PRUEBA DE IMPULSO¹.

Consecuentemente, los datos no siguen la respuesta de la derivada hasta que la duración del impulso sea pequeño, comparada con la duración de la prueba. Cuando esta condición es satisfecha o cuando la duración del impulso es instantáneo, la respuesta de presión puede ser escrita como⁴:

$$(p_i - p) \Delta t = \frac{3388.8Q_t \mu}{kh} P_D' , \quad (19)$$

para $\Delta t > t_p$.

Durante el periodo de producción, las variaciones de presión son dadas por la ecuación:

$$p_i - p = \frac{141.2qB\mu}{kh} P_D , \quad (20)$$

si:

$$P_D' = P_D \frac{\Delta t}{t_p} , \quad (21)$$

y si se multiplican las variaciones de presión durante el periodo de impulso por la duración del impulso, se tiene:

$$(p_i - p) t_p = \frac{3388.8Q_t \mu}{kh} P_D , \quad (22)$$

para $\Delta t \leq t_p$.

Multiplicando las variaciones de presión durante el periodo de impulso por la duración del periodo:

$$(p_i - p) t_p, \quad \text{para } \Delta t \leq t_p \quad (23)$$

y los cambios de presión durante el cierre subsecuente, por el tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba:

$$(p_i - p) \Delta t, \quad \text{para } \Delta t > t_p \quad (24)$$

Los resultados se grafican en papel doble-logarítmico y pueden ser superpuestos en las curvas tipo de la derivada de la presión (figura 6).

III.3 CONSIDERACIONES PRACTICAS.

La realización de estas pruebas requiere de una condición necesaria: cualquier pozo no involucrado en la prueba, tiene que ser mantenido con un gasto de producción constante a lo largo de los ciclos de impulso y cierre, para minimizar interferencias en la presión.

Un impulso debe crear una respuesta que teóricamente debe acarrear toda la información característica del yacimiento. En la práctica, sin embargo, sólo una parte de esta información puede ser registrada debido a los límites de resolución de los aparatos de medición. De esta forma, el grado de exactitud de la información obtenida esta directamente relacionada con el porcentaje de exactitud de las presiones medidas.

La técnica de análisis presentada en este trabajo es ventajosa para impulsos muy cortos, idealmente instantáneos; en la práctica deben ser de unos minutos.

La técnica convencional de análisis debe ser usada, pero, la gráfica semilogarítmica de Horner puede comprimir los datos y los cálculos del daño pueden ser inexactos, a menos que el flujo radial infinito sea alcanzado durante el periodo de producción.

La técnica de curvas tipo también puede ser difícil de aplicar debido a que para periodos cortos de flujo las curvas tipo de incremento de presión son bastante diferentes a las curvas tipo de decremento normalmente usadas.

Además, con los equipos actuales, los gastos medidos esenciales para un análisis cuantitativo no son muy exactos para tiempos cortos de producción.

A medida que aumenta el tiempo de flujo, las técnicas clásicas de interpretación (curvas tipo, Horner y/o de convolución) son factibles de aplicar con una mayor confiabilidad. Para alcanzar una mayor representatividad, una combinación de la técnica de impulso con otras técnicas de análisis es recomendable, siempre que sea factible.

Es interesante hacer notar que la teoría de impulso se puede aplicar también para periodos mas largos. Soliman⁸ propuso una gráfica de $(p_i - p)$ contra $(t_p + \Delta t)$, figura 10, para detectar líneas rectas representando flujo radial infinito ($m = -1$) y flujo lineal ($m = -0.5$). Estos resultados pueden ser predichos directamente cuando se usa la derivada de la presión respecto al tiempo, debido a que la derivada muestra las líneas rectas características mencionadas anteriormente.

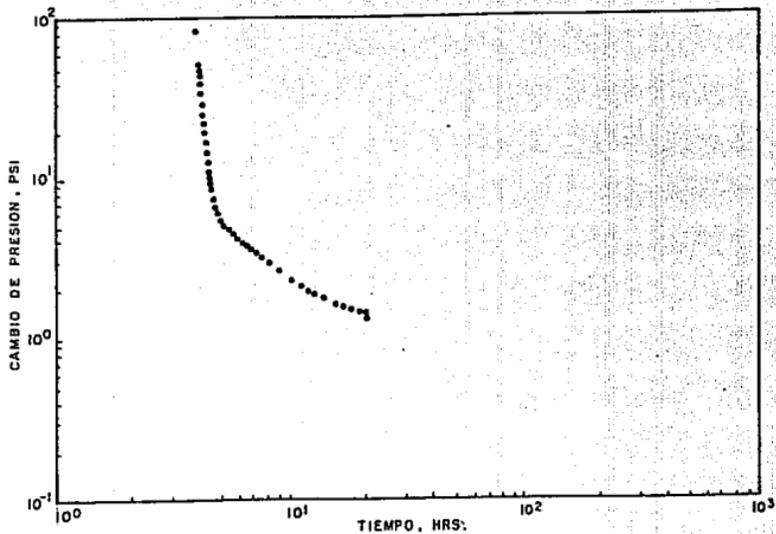


FIG. 10 GRAFICA PROPUESTA POR SOLIMAN EN LA REFERENCIA 8.

La amplitud de las variaciones de presión durante y después de la producción del impulso, dependerá de las características de la formación y del volumen total de fluido producido o inyectado.

Si se tiene una alta transmisibilidad en el yacimiento, se requiere de una gran cantidad de fluido para crear una amplitud considerable de variación de presión. Por tanto, las pruebas de impulso son difíciles para yacimientos con alta transmisibilidad.

Los pozos típicos del Golfo de México pueden ser probados exitosamente mediante la técnica de impulso debido a sus permeabilidades de 70 a 500 mD y con recuperaciones de 10 a 35 barriles en un tiempo de 5 a 10 minutos.

CAPITULO IV

EJEMPLOS ILUSTRATIVOS.

Con el propósito de ilustrar la aplicación de las pruebas de impulso, con base en la teoría descrita anteriormente, se presentan en este capítulo tres ejemplos que reúnen las características de estas pruebas y las cuales son analizadas mediante las técnicas apropiadas.

En este caso, los ejemplos uno y dos son analizados mediante la técnica de impulso los datos del cierre inicial y por el método de la derivada los datos del cierre final; esto con el objetivo de demostrar la congruencia y efectividad de la técnica de impulso con respecto a otros métodos de análisis. El tercer ejemplo consiste de la simulación de una prueba de impulso sobre un yacimiento homogéneo e isótropo durante un periodo de flujo y uno de cierre.

IV.1 EJEMPLO 1. PRUEBA DE IMPULSO EN UN YACIMIENTO DE ALTA PERMEABILIDAD.

Este ejemplo consiste de mediciones de presión y recuperación de fluido de un pozo cerrado en superficie y presumiblemente dañado. Se registraron las presiones únicamente durante los periodos de cierre de los dos ciclos de que consistió la prueba⁴.

El pozo fue abierto permitiendo un flujo inicial de 20 barriles durante un tiempo de 12 minutos y después fue cerrado durante 1 hora y 32 minutos.

En la Tabla 1 se presentan los datos medidos durante el periodo de cierre y también se dan los parámetros calculados para efectuar el análisis. Los parámetros del pozo y del yacimiento son los siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 B = 1.3 & r_w = 0.29 \text{ pies} \\
 c_t = 2 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1} & \mu = 0.9 \text{ cp} \\
 h = 52 \text{ pies} & \phi = 0.15 \\
 p_i = 8634.2 \text{ psi} &
 \end{array}$$

Aunque el flujo inicial fue mayor a los 10 minutos, el cierre inicial fue analizado por la técnica de impulso para ilustrar su aplicación.

Con los datos de $\Delta p/\Delta t$ y Δt se construyó la gráfica de la figura 11, la cual se ajusta con la curva tipo de $p'_D(t_D/c_D)$ contra t_D/c_D . De la superposición de gráficas, la cual es satisfactoria, se observa el punto de ajuste elegido cuyos datos se utilizaron para calcular los parámetros del yacimiento. Así, de la ecuación 19, y como $\Delta t > t_p$, se tiene:

$$k = \frac{3388.8 \times 20 \times 0.9}{52} \left(\frac{21.17}{100} \right)$$

$$k = 248 \text{ mD ,}$$

TABLA 1. DATOS DE LA PRUEBA DE IMPULSO DURANTE EL CIERRE INICIAL DE UN POZO EN UN YACIMIENTO DE ALTA PERMEABILIDAD.

Δt (hr)	Presión (psi)	Ap (psi)	ΔpΔt (psi-hr)	Δt (hr)	Presión (psi)	Ap (psi)	ApΔt (psi-hr)
0.196	7371.7	1262.5	247.45	0.315	8621.7	12.5	4.07
0.200	7862.6	771.6	154.32	0.325	8622.5	11.7	4.06
0.205	8386.6	247.9	50.82	0.333	8623.0	11.2	3.90
0.210	8513.8	120.4	25.28	0.341	8623.7	10.5	3.82
0.215	8567.9	66.9	14.38	0.350	8624.2	10.0	3.67
0.220	8587.9	46.3	10.23	0.358	8624.9	9.8	3.58
0.222	8590.9	43.3	9.61	0.356	8624.5	9.7	3.40
0.224	8593.6	40.6	9.10	0.375	8625.5	8.7	3.34
0.225	8595.3	38.9	8.75	0.383	8625.9	8.3	3.33
0.226	8597.9	36.3	8.20	0.392	8626.0	8.2	3.25
0.228	8598.6	35.6	8.11	0.400	8626.0	8.2	3.28
0.229	8600.6	33.6	7.70	0.408	8626.5	7.7	3.34
0.230	8601.6	32.6	7.50	0.416	8626.8	7.4	3.20
0.232	8606.2	32.2	7.47	0.425	8627.7	7.5	3.14
0.235	8605.0	30.7	7.21	0.433	8627.2	7.0	3.25
0.238	8606.4	28.2	6.71	0.442	8627.1	7.1	3.10
0.239	8606.6	27.8	6.64	0.450	8627.5	6.7	3.20
0.240	8607.6	27.6	6.62	0.458	8628.2	6.0	3.07
0.242	8608.2	26.0	6.44	0.466	8628.2	6.0	2.80
0.244	8609.0	25.2	6.34	0.483	8628.5	5.7	2.89
0.246	8609.7	24.5	6.20	0.490	8628.7	5.5	2.56
0.250	8610.5	23.7	6.00	0.512	8628.8	5.4	2.83
0.254	8611.6	22.6	5.82	0.533	8629.1	5.1	2.88
0.255	8612.4	21.8	5.76	0.550	8629.9	4.3	2.80
0.257	8612.7	21.5	5.60	0.566	8630.6	3.6	2.43
0.258	8612.7	21.5	5.55	0.550	8630.6	3.4	2.33
0.260	8613.5	20.6	5.59	0.733	8631.6	2.9	2.50
0.261	8613.6	20.5	5.38	0.816	8631.7	2.5	2.36
0.262	8614.6	20.2	5.37	0.900	8631.7	2.5	2.24
0.264	8614.2	20.0	5.33	0.983	8632.0	2.2	2.46
0.265	8614.6	19.6	5.30	1.23	8631.8	2.4	2.53
0.267	8614.8	19.4	5.23	1.40	8632.6	1.6	2.96
0.268	8615.0	19.2	5.20	1.48	8632.8	1.4	2.29
0.269	8615.4	18.8	5.16	1.56	8632.7	1.5	2.07
0.271	8615.6	18.6	5.10	1.65	8633.2	1.0	2.35
0.272	8615.9	18.3	5.06	1.66	8632.9	1.3	3.30
0.274	8616.1	18.1	5.01	1.68	8633.1	1.1	2.16
0.275	8617.3	16.9	4.97	1.70	8633.2	1.0	1.85

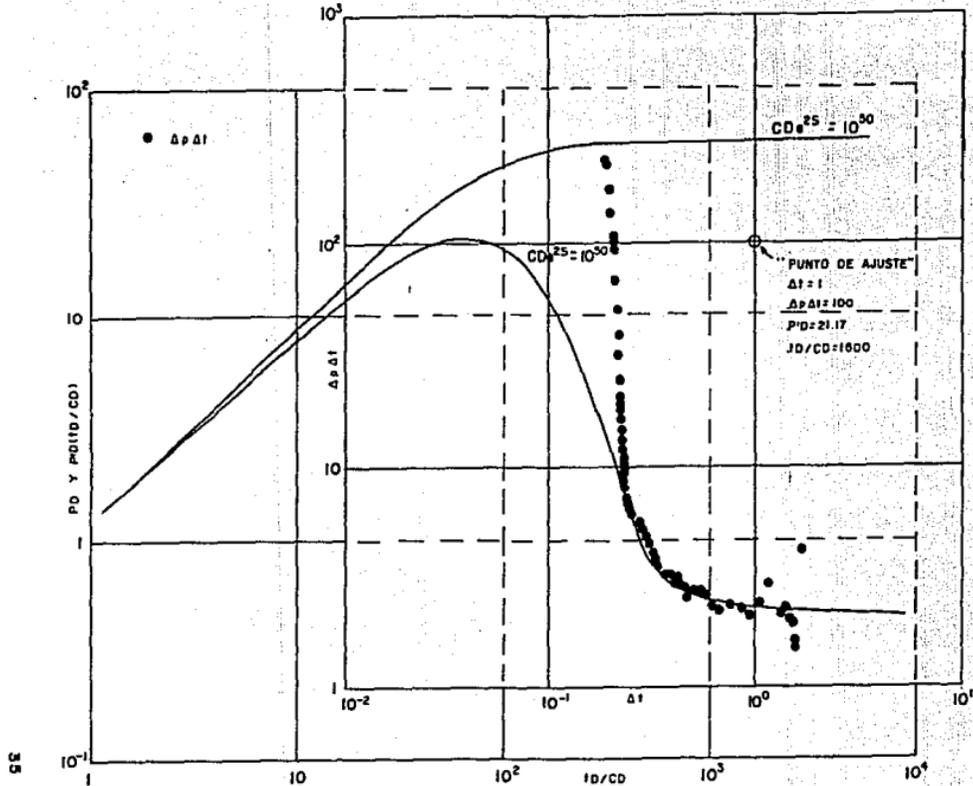


FIG. 11 ANALISIS DEL CIERRE INICIAL MEDIANTE LA TECNICA DE IMPULSO, EJEMPLO 1.

la transmisibilidad del yacimiento (ecuación 17), es:

$$T = \frac{248 \times 52}{0.9} = 14348 \text{ (md-pies)/cp .}$$

De la ecuación 12, se tiene $t_p = 191946$, y según la ecuación 18 el daño del pozo es:

$$s = 0.5 \ln \left[\left(\frac{1600}{191946} \right) \times 10^{50} \right]$$

$$s = 56 .$$

El gran descenso de los datos de la respuesta de la presión es indicativo de un pozo dañado. Al principio del cierre, la compresibilidad del gas libre en el pozo es predominante y el resultado es un alto coeficiente de almacenamiento. Al aumentar la presión el gas libre se disuelve en el aceite y la compresibilidad decrece resultando un bajo coeficiente de almacenamiento, este fenómeno es frecuente en pozos dañados y cerrados en superficie como es el caso de este ejemplo.

Para demostrar la efectividad de la técnica de impulso, el cierre final de la prueba realizada en el pozo en cuestión fue analizado mediante el método de la derivada (figura 12). El ajuste es hecho con curvas tipo para pozos con daño y almacenamiento y yacimiento homogéneo.

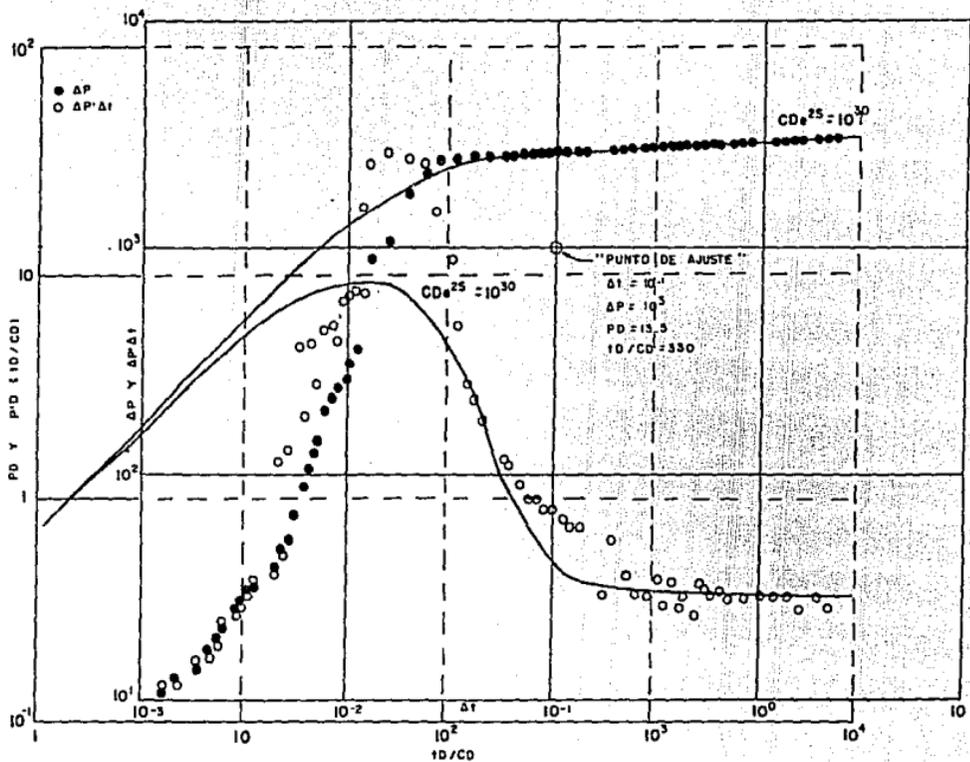


FIG. 12 ANALISIS DEL CIERRE FINAL MEDIANTE LA DERIVADA DE LA PRESION. EJEMPLO 1.

Después del primer ciclo flujo-cierre, el pozo es abierto nuevamente, ahora permitiendo un flujo de 6950 barriles durante 10 horas y 14 minutos y después fue cerrado durante 2 horas y 20 minutos.

Los datos de presión registrados durante el periodo de cierre, así como los cálculos de $\Delta p \cdot \Delta t$ son dados en la Tabla 2.

Por tanto, del ajuste que se muestra en la figura 12 se tiene:

$$k = \frac{141.2 \times 6950 \times 1.3 \times 0.9}{52} \left(\frac{13.5}{1000} \right)$$

$$k = 298 \text{ mD} ,$$

la transmisibilidad del yacimiento es:

$$T = \frac{298 \times 52}{0.9} = 17222 \text{ (md-pies)/cp} ,$$

de la ecuación 12, se tiene $t_D = 23064$ y el daño del pozo es:

$$s = 0.5 \text{ Ln} \left[\frac{330}{23064} 10^{30} \right]$$

$$s = 34 .$$

TABLA 2. DATOS DE LA PRUEBA DE IMPULSO DURANTE EL CIERRE FINAL
 DEL EJEMPLO 1.

Δt (hr)	Presión (psi)	Δp (psi)	$\Delta p/\Delta t$ (psi)	Δt (hr)	Presión (psi)	Δp (psi)	$\Delta p/\Delta t$ (psi)
5.55E-04	8629.8	4.3		4.16E-02	6330.6	2303.4	180.6
8.33E-04	8627.6	6.5	6.5	4.58E-02	6319.4	2314.9	124.3
1.11E-03	8625.4	8.7	8.7	6.25E-02	6288.8	2345.4	93.7
1.38E-03	8623.2	10.9	11.1	7.08E-02	6279.9	2354.3	75.9
1.66E-03	8621.0	13.1	12.9	7.91E-02	6271.4	2364.2	73.3
1.94E-03	8618.8	15.3	15.1	8.75E-02	6265.5	2358.7	69.7
2.22E-03	8616.7	17.5	17.3	9.58E-02	6259.5	2374.7	69.2
2.50E-03	8614.5	19.6	19.6	0.112	6250.4	2383.8	62.9
2.77E-03	8612.3	21.8	22.4	0.129	6243.3	2390.1	58.0
3.05E-03	8610.1	24.0	23.8	0.146	6237.6	2393.6	55.8
3.33E-03	6607.9	26.2	26.0	0.162	6234.5	2399.7	31.3
3.61E-03	8605.4	28.4	28.1	0.179	6229.6	2404.5	52.6
3.88E-03	8603.6	30.6	31.4	0.212	6223.5	2410.4	38.5
4.16E-03	8601.4	32.8	32.4	0.246	6215.7	2418.5	56.4
4.44E-03	8599.2	35.0	34.6	0.279	6210.4	2423.5	44.8
4.72E-03	8597.0	37.2	36.8	0.312	6206.3	2427.9	38.7
5.00E-03	8590.0	44.1	124.7	0.346	6202.4	2431.8	39.6
5.27E-03	8582.5	51.7	146.7	0.379	6198.7	2435.4	42.4
5.55E-03	8566.3	67.8	320.6	0.412	6195.6	2438.6	38.7
5.11E-03	8549.4	84.7	184.0	0.446	6192.6	2441.1	32.7
6.66E-03	8521.8	112.3	334.1	0.479	6190.4	2443.8	39.1
7.22E-03	8502.5	131.6	249.3	0.512	6187.8	2446.6	40.3
7.77E-03	8473.2	160.9	412.9	0.546	6185.8	2448.4	32.1
8.88E-03	8421.0	213.1	371.3	0.579	6184.0	2450.2	31.5
9.44E-03	8389.5	244.6	531.5	0.762	6175.3	2458.9	29.3
1.00E-02	8356.6	277.5	597.5	0.846	6171.3	2462.4	35.2
1.05E-02	8626.2	307.9	689.0	0.929	6169.3	2464.9	27.9
1.11E-02	8244.4	389.9	1513.4	1.012	6166.4	2467.8	35.3
1.25E-02	7980.4	653.8	2357.2	1.179	6161.7	2472.5	33.1
1.38E-02	7721.9	912.2	2743.6	1.346	6158.0	2475.2	29.8
1.52E-02	7488.1	1146.1	2538.7	1.512	6154.7	2479.5	30.0
1.66E-02	7285.4	1348.8	2403.4	1.679	6151.8	2483.2	29.1
2.08E-02	6814.8	1819.6	2331.5	1.846	6149.2	2485.0	28.7
2.50E-02	6555.6	2078.9	1543.4	2.012	6147.1	2487.1	25.4
2.91E-02	6430.8	2203.4	883.6	2.179	6144.9	2489.3	28.7
3.33E-02	6377.2	2257.0	424.9	2.346	6143.1	2491.3	25.2

Algunos datos son afectados por el almacenamiento que presenta el pozo. Al igual que en el cierre inicial, a tiempos cortos se presenta un alto coeficiente de almacenamiento debido a la compresibilidad del gas, al aumentar la presión el coeficiente de almacenamiento disminuye y decrece la compresibilidad. La derivada muestra que el flujo radial infinito fue alcanzado aproximadamente después de 45 minutos del cierre.

Los resultados de ambos análisis son consistentes entre sí. La diferencia en los valores de daño puede ser explicado por la posibilidad de una mayor limpieza del pozo durante el periodo de flujo radial final, resultando una reducción del daño.

IV.2 EJEMPLO 2. PRUEBA DE IMPULSO EN UN YACIMIENTO DE BAJA PERMEABILIDAD.

El ejemplo 2 consiste de mediciones de presión y recuperación de fluido de un pozo que no fluye a la superficie y en los cuales el análisis de datos de presión transitorio es difícil.

El pozo fue disparado permitiendo un flujo de 1.4 barriles durante 5 minutos y 10 segundos y después fue cerrado durante 1 hora y 33 minutos.

Se registraron presiones únicamente durante los periodos de cierre. De la misma forma, el cierre inicial fue analizado mediante la técnica de impulso y el cierre final por el método de

la derivada con el mismo propósito de demostrar la efectividad de las pruebas de impulso con respecto a otros métodos de análisis.

Los datos de presión registrados durante el periodo de cierre, así como los cálculos de $\Delta p/\Delta t$ son dados en la Tabla 3. La historia de presión es mostrada en la figura 13.

Los parámetros del pozo y del yacimiento son los siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 B = 1.0 & r_w = 0.26 \text{ pies} \\
 c_l = 5 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1} & \mu = 0.9 \text{ cp} \\
 h = 30 \text{ pies} & \theta = 0.08 \\
 p_i = 2094 \text{ psi} &
 \end{array}$$

La figura 14 muestra el ajuste de los datos del cierre inicial, mediante el cual se obtiene:

$$k = \frac{3388.8 \times 1.4 \times 0.9}{30} \left(\frac{1.32}{100} \right)$$

$$k = 1.88 \text{ mD} ,$$

la transmisibilidad del yacimiento es:

$$T = \frac{1.88 \times 30}{0.9} = 63 \text{ (md-pies)/cp} ,$$

TABLA 3. DATOS DE LA PRUEBA DE IMPULSO DURANTE EL CIERRE INICIAL
 DE UN POZO EN UN YACIMIENTO DE BAJA PERMEABILIDAD.

Δt (hr)	Presión (psi)	A_p (psi)	$\Delta p \Delta t$ (psi-hr)
0.112	406.82	1687.2	188.96
0.128	597.08	1496.9	192.05
0.145	808.59	1285.4	186.38
0.162	1005.90	1088.1	175.84
0.178	1175.90	918.1	163.42
0.195	1327.70	766.3	149.43
0.212	1452.20	641.8	135.80
0.228	1548.40	545.6	124.40
0.245	1629.30	464.7	113.85
0.262	1695.10	398.9	104.51
0.295	1792.30	301.7	89.00
0.328	1854.00	240.0	78.72
0.362	1896.50	197.5	71.42
0.395	1927.90	166.1	65.61
0.428	1951.10	142.9	61.20
0.462	1968.30	125.7	58.07
0.495	1982.50	111.5	55.19
0.528	1993.60	100.4	53.04
0.562	2003.80	90.2	50.70
0.595	2010.80	83.2	49.50
0.678	2025.00	69.0	46.30
0.762	2036.10	57.9	44.10
0.845	2044.20	49.8	42.08
0.928	2050.30	43.7	40.56
1.012	2054.40	39.6	40.03
1.095	2058.40	35.6	38.98
1.178	2061.40	32.6	38.40
1.262	2064.50	29.5	37.20
1.345	2065.50	28.5	38.33
1.428	2067.50	26.5	37.84
1.512	2069.50	24.5	37.02
1.595	2070.60	23.4	37.32
1.648	2071.60	22.4	35.91

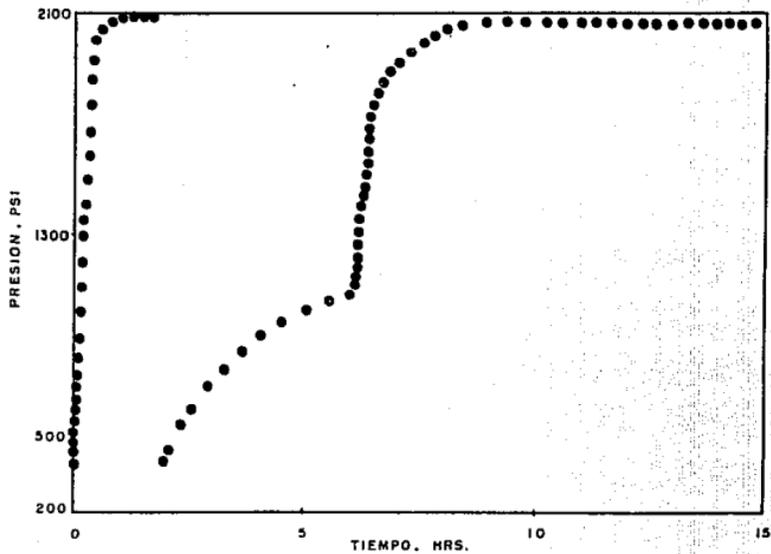


FIG. 13 DATOS DE LA RESPUESTA DE PRESION DEL EJEMPLO 2^a.

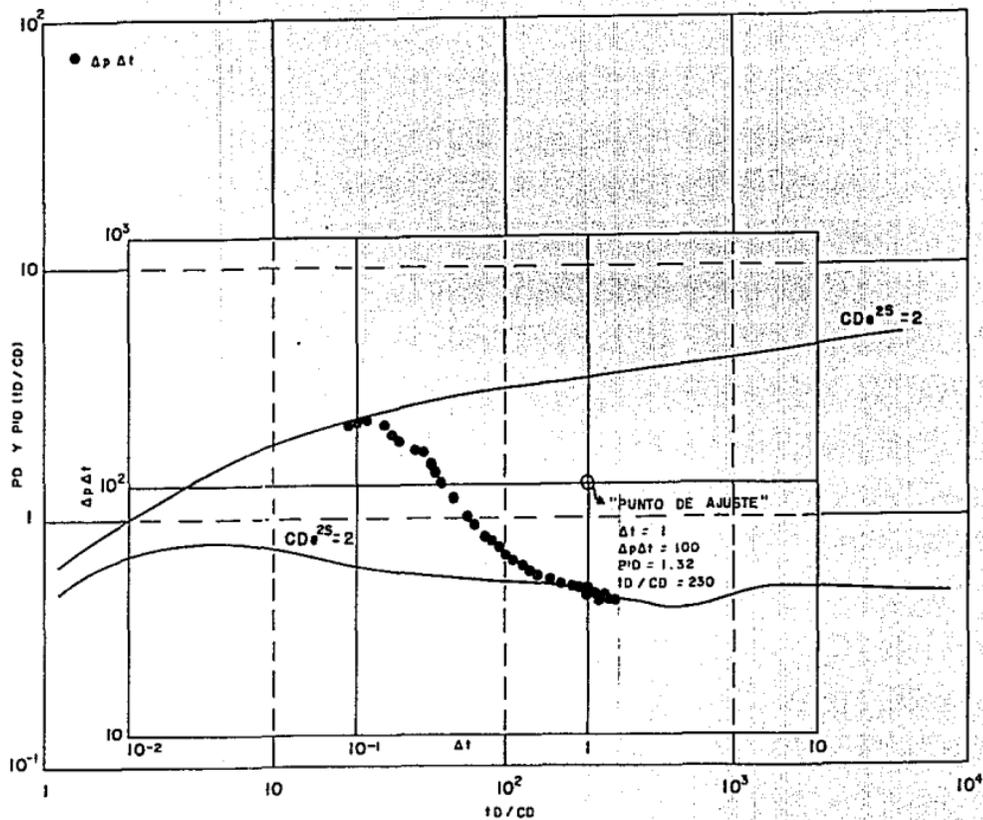


FIG. 14 ANALISIS DEL CIERRE INICIAL MEDIANTE LA TECNICA DE IMPULSO, EJEMPLO 2^a.

de la ecuación 12, se tiene $t_p = 1358$ y el daño del pozo es:

$$s = 0.5 \ln \left[\frac{230}{1358} \cdot 2 \right]$$

$$s = -0.5413 .$$

Debido a la corta duración del flujo y a la mala calidad de los datos registrados, el análisis resulto difícil. Se obtuvo un bajo coeficiente de almacenamiento debido a la corta duración de dicho flujo y a la baja permeabilidad del yacimiento.

El cierre final de esta prueba fue analizado también mediante el método de la derivada, con el mismo propósito de demostrar la eficiencia de la técnica de impulso, en este caso sobre un yacimiento de baja permeabilidad.

Después del primer ciclo flujo-cierre el pozo es abierto nuevamente, permitiendo un flujo promedio de 140 barriles durante 4 horas y 20 minutos.

Los datos de presión registrados, así como los cálculos de $\Delta p' \Delta t$ son enlistados en la Tabla 4.

Los datos fueron ajustados a una curva tipo para pozo con almacenamiento y daño, para un yacimiento de doble-porosidad, figura 15. A partir de este ajuste se obtiene:

TABLA 4. DATOS DE LA PRUEBA DE IMPULSO DURANTE EL CIERRE FINAL
 DEL EJEMPLO 2.

Δt (hr)	Presión (psi)	Δp (psi)	$\Delta p \cdot \Delta t$ (psi)
5.00E-02	1762.0	331.94	172.724
5.66E-02	1717.5	376.46	178.616
6.33E-02	1681.1	412.90	181.764
0.100	1651.7	442.24	175.688
0.116	1626.4	467.54	183.425
0.133	1603.2	490.82	182.132
0.150	1583.9	510.05	169.676
0.166	1565.7	528.26	188.928
0.200	1536.3	557.61	172.647
0.233	1512.1	581.90	171.502
0.266	1491.8	602.14	163.147
0.300	1473.6	620.36	160.765
0.333	1457.4	636.55	163.372
0.366	1444.3	649.70	145.845
0.400	1432.1	661.85	142.941
0.433	1422.0	671.97	132.787
0.466	1412.9	681.08	128.644
0.500	1404.8	689.17	118.970
1.000	1329.9	764.06	149.780
1.500	1295.5	798.47	103.230
2.000	1273.2	820.73	89.040
2.500	1259.1	834.90	70.850
3.000	1247.9	846.03	66.780
3.500	1239.8	854.13	56.700
4.000	1233.8	860.20	48.560
4.500	1228.7	865.26	45.540
5.000	1224.6	869.31	40.500
5.500	1222.6	871.33	22.220
6.000	1220.6	873.36	24.360
6.500	1218.6	875.38	25.870
7.000	1214.5	879.43	56.700
7.500	1212.5	881.45	30.300
8.000	1209.5	884.49	48.640
8.500	1208.5	885.50	17.170
9.000	1207.5	886.51	18.180
9.500	1205.5	888.54	38.570
10.000	1205.5	888.54	0.000
10.500	1204.4	889.55	21.210
11.000	1204.4	889.55	0.000
11.958	1202.4	891.59	50.215

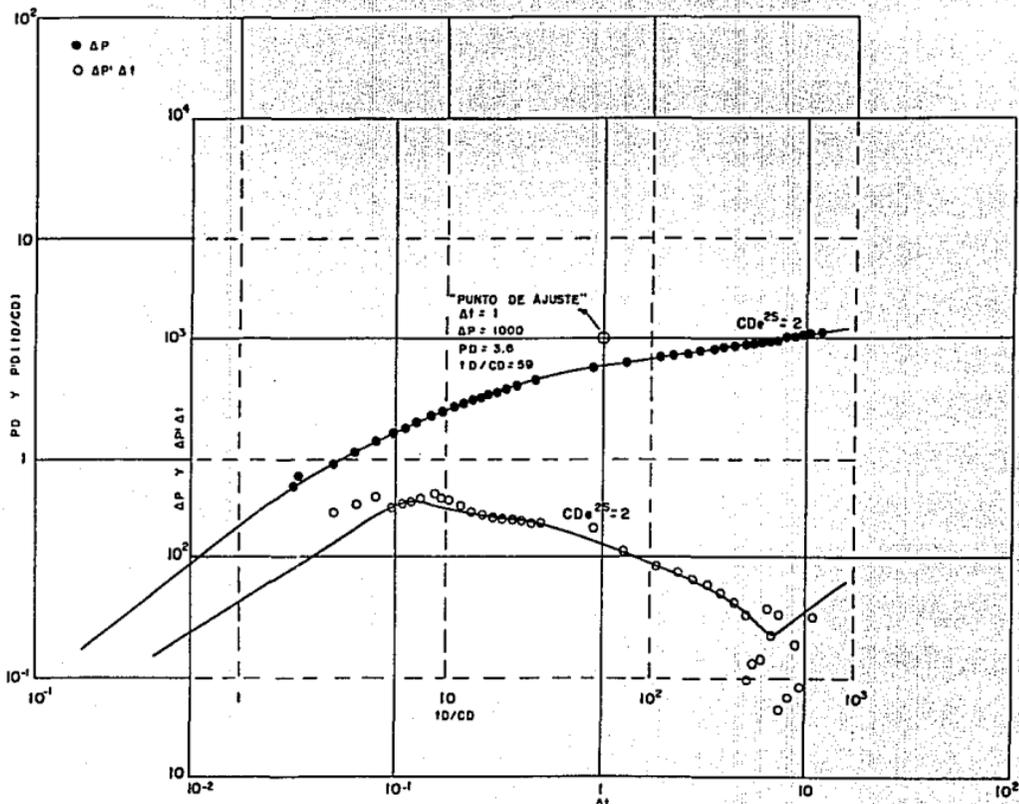


FIG. 15 ANALISIS DEL CIERRE FINAL MEDIANTE LA DERIVADA DE LA PRESION. EJEMPLO 2^a.

$$k = \frac{141.2 \times 140 \times 1 \times 0.9}{30} \left(\frac{3.60}{1000} \right)$$

$$k = 2.150 \text{ mD ,}$$

la transmisibilidad del yacimiento es:

$$T = \frac{2.150 \times 30}{0.9} = 72 \text{ (md-pies)/cp ,}$$

de la ecuación 12, se tiene $t_D = 1553$ y el daño del pozo es:

$$s = 0.5 \ln \left[\frac{59}{1553} \right] \quad 21$$

$$s = -1.2 .$$

Los resultados numéricos de ambos análisis son consistentes entre sí, lo que demuestra la aplicabilidad y eficiencia de la técnica de impulso en análisis de formaciones productoras que es la finalidad de estos ejemplos.

IV.3 EJEMPLO 3. ANALISIS DE UNA PRUEBA DE IMPULSO SIMULADA.

Para ilustrar la aplicación de las pruebas de impulso y su técnica de análisis, se realizó una simulación suponiendo un yacimiento homogéneo e isótropo.

La simulación consiste de un flujo de 14 BPM durante 6 minutos y 22 segundos, después el pozo es cerrado.

Los parámetros del pozo y del yacimiento son los siguientes:

$B = 1.2$	$r_w = 0.35$ pies
$c_t = 3 \times 10^{-8}$ psi ⁻¹	$\mu = 0.8$ cp
$h = 40$ pies	$\phi = 0.3$
$p_i = 5000$ psi	

Los datos de presión registrados durante el ciclo flujo-cierre, así como los cálculos de $\Delta p/\Delta t$ son dados en la Tabla 5.

La figura 16 muestra el ajuste realizado mediante la técnica de impulso, los datos de tiempos cortos se ajustan a la línea de pendiente unitaria indicando un flujo pseudoestacionario durante el periodo de flujo, mientras que el ajuste de los datos para tiempos largos indica que se alcanza flujo radial infinito aproximadamente después de 1 hora y 12 minutos del cierre. De la manera descrita en los ejemplos anteriores se obtiene:

TABLA 5. DATOS SIMULADOS DE UNA PRUEBA DE IMPULSO.

Δt (hr)	Presión (psi)	Δp (psi)	$\Delta p \Delta t$ (psi-hr)	Δt (hr)	Presión (psi)	Δp (psi)	$\Delta p \Delta t$ (psi-hr)
2.88E-03	4639.6	360.42	1.02	0.189	4954.9	45.50	8.60
3.24E-03	4645.0	364.94	1.15	0.202	4965.3	34.65	7.00
3.64E-03	4648.3	361.65	1.28	0.221	4978.6	24.43	5.40
4.18E-03	4653.1	346.89	1.45	0.237	4982.3	17.72	4.20
4.99E-03	4649.3	350.70	1.75	0.254	4987.8	13.00	3.30
5.80E-03	4658.5	341.38	1.98	0.259	4989.6	10.42	2.70
6.48E-03	4660.5	339.50	2.20	0.283	4991.5	8.48	2.40
7.29E-03	4657.0	342.93	2.60	0.310	4994.2	5.80	1.80
8.64E-03	4664.5	335.65	2.90	0.345	4995.6	4.35	1.50
9.72E-03	4670.8	329.22	3.20	0.383	4996.5	3.34	1.28
1.09E-02	4666.6	333.33	3.60	0.418	4997.4	2.58	1.08
1.24E-02	4677.4	322.58	4.00	0.500	4998.3	1.70	0.85
1.40E-02	4678.6	321.43	4.50	0.607	4998.8	1.18	0.72
1.60E-02	4693.7	306.25	4.90	0.756	4999.1	0.86	0.65
1.80E-02	4708.3	291.66	5.25	0.945	4999.4	0.63	0.60
2.02E-02	4702.9	297.03	6.00	1.118	4999.5	0.52	0.58
2.43E-02	4711.9	288.06	7.00	1.485	4999.6	0.37	0.55
2.75E-02	4712.7	287.27	7.90	1.890	4999.7	0.28	0.54
3.24E-02	4728.4	271.60	8.80	2.430	4999.7	0.21	0.52
3.78E-02	4740.7	259.26	9.80	2.970	4999.8	0.17	0.50
4.60E-02	4760.3	239.65	11.00	3.510	4999.8	0.14	0.50
5.40E-02	4777.7	222.22	12.00	4.040	4999.8	0.12	0.50
6.75E-02	4795.6	204.44	13.80	4.860	4999.9	0.10	0.50
8.10E-02	4814.8	185.18	15.00	5.400	4999.9	0.09	0.50
9.99E-02	4839.8	160.16	16.00	6.750	4999.9	0.07	0.50
0.124	4879.0	120.97	15.00	8.100	4999.9	0.06	0.50
0.148	4915.5	84.46	12.50	9.450	4999.9	0.05	0.50
0.172	4938.9	61.05	10.50	10.800	4999.9	0.04	0.50

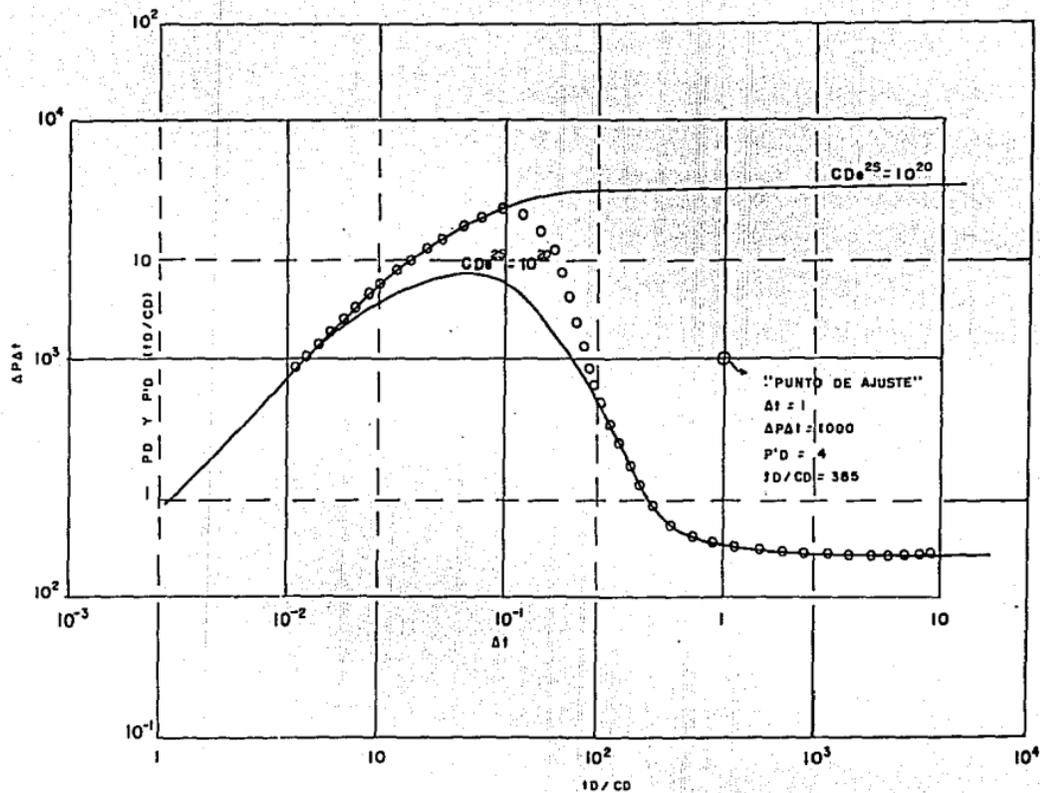


FIG. 16 ANALISIS DE UNA PRUEBA SINTETICA DE IMPULSO, EJEMPLO 3.

$$k = \frac{3388.8 \times 84 \times 0.8}{40} \left(\frac{4}{1000} \right)$$

$$k = 22.77 \text{ mD} ,$$

la transmisibilidad del yacimiento es:

$$T = \frac{22.77 \times 40}{0.8} = 1138 \text{ (md-pies)/cp} ,$$

de la ecuación 12, se tiene $t_d = 45371$ y el daño del pozo es:

$$s = 0.5 \ln \left[\frac{385}{45371} 10^{20} \right]$$

$$s = 22 .$$

Los resultados muestran que a pesar de que el yacimiento tiene una permeabilidad aceptable, el abatimiento de presión causado por el impulso es pequeño, esto quizás se deba al daño que presenta el pozo y a la baja compresibilidad del sistema.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se recomienda y describe detalladamente un método que permite probar pozos, sometiendo a la formación a impulsos de producción o inyección; a este método se le denomina pruebas de impulso.

La aplicabilidad de la técnica es generalmente para pozos nuevos, pozos no fluyentes o pozos donde no es posible o deseable tener un flujo de la formación a la superficie o de la superficie a la formación por tiempos largos.

La técnica de análisis presentada produce, con exactitud aceptable, la misma información que es obtenida de una prueba de análisis clásica, con la ventaja de que se requiere de un menor tiempo de duración de la prueba.

Se requiere de buenas mediciones de gastos, mas aun cuando el impulso se debe a producción, donde mantener un gasto constante resulta mas difícil que en el caso de inyección y con esto incrementar la confiabilidad del análisis.

La técnica de interpretación presentada es ventajosa para impulsos muy cortos. De esta forma, la duración del impulso es significativo.

El método presentado provoca bajos costos de evaluación del

yacimiento así como de las condiciones del pozo, debido a que los tiempos de prueba son cortos.

El método de análisis presentado es recomendable para una mayor conservación del medio ambiente, ya que al realizarse las pruebas en tiempos cortos se evita al máximo la quema de hidrocarburos en superficie.

La alta transmisibilidad de un yacimiento provoca una baja amplitud de la respuesta y esto disminuye el nivel de resolución.

En el caso de que se tenga un yacimiento con alta transmisibilidad, se requiere de volúmenes grandes de fluido producido o inyectado para causar un abatimiento de presión que sea considerable.

Cambios demasiado pequeños de presión, menores de 0.01 psi, requieren de mediciones precisas.

Efectos extraños de presión de otros pozos, complican la interpretación de la prueba, estos efectos pueden minimizarse manteniendo el gasto de producción o inyección constante en dichos pozos.

Aunque un análisis cuantitativo no es posible en todos los casos, los datos pueden indicar cualitativamente la condición del pozo y los posibles gastos de la formación.

Las pruebas de impulso son de gran utilidad para la evaluación de yacimientos, entonces, se recomienda que estas sean combinadas con otros métodos de análisis siempre que sea factible.

NOMENCLATURA

- B: factor de volumen de la formación, adimensional.
 C_D : coeficiente de almacenamiento adimensional.
 C_t : compresibilidad total, psi^{-1} .
h: espesor de la formación, pies.
k: permeabilidad de la formación, mD.
M: punto de observación.
Mo: localización de la fuente.
p: presión, psi.
 p_D : presión adimensional.
 p_D' : derivada de la presión adimensional.
 p_i : presión inicial del yacimiento, psi.
 Δp : respuesta de presión, psi.
 $\Delta p_D'$: derivada de la respuesta de presión, psi
 Δp_D : respuesta de presión adimensional.
q: gasto, bpd.
Q: volumen de fluido extraído o inyectado, bis.
 Q_t : gasto producido (o inyectado) acumulado, bis.
R: relación entre los periodos de impulso y cierre.
 R' : relación de impulso.
r: radio de drene, pies.
 r_w : radio del pozo, pies.
s: factor de daño.
S: función fuente.
t: tiempo, hrs.
 t_D : tiempo adimensional.
tL: tiempo de retraso, hrs
 t_{LD} : tiempo de retraso adimensional.
 t_p : tiempo de producción, hrs.
T: transmisibilidad, (md-pies)/cp

Δt : tiempo de cierre, hrs.
 Δt_c : periodo del ciclo, hrs.
 Δt_{c_d} : periodo del ciclo adimensional.
 μ : viscosidad, cp
 θ : porosidad, fracción.
 τ : constante de integración.

REFERENCIAS

1. León Ventura R.: "Apuntes del Curso de Análisis de Pruebas de Variación de Presión". IMP. 1984.
2. Cinco Ley H., Kuchuk F.: "Analysis of Pressure Tests Through the Use of Instantaneous Source Response Concepts". SPE 15476, October, 1986.
3. Gringarten A.C., Ramey H.J.: "The Use of Source and Green's Functions in Solving Unsteady Flow Problems in Reservoirs". Trans., AIME. October, 1973.
4. Ayoub J.A., Bourdet D.P., Chauvel Y.L.: "Impulse Testing". SPE 16348. September, 1988.
5. Kamal M., Brigham W.E.: "Design and Analysis of Pulse Test With Unequal Pulse and Shut-In Periods". Trans., AIME. October, 1975.
6. Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M.: "Use of Pressure Derivative in Well Test Interpretation". SPE 12777, April, 1984.
7. Bourdet D.: "Interpreting Well Test in Fractured Reservoirs". Word Oil, October, 1983.
8. Soliman M.Y. "Analysis of Buildup Test With Short Producing Time". Trans., AIME. August, 1986.
9. Ferris J.G., Knowles D.B.: "The Slug Test for Estimating Transmissibility". Geological Survey, 1954.

10. Earlougher R.C., Kersh K.M.: "Analysis of Short Time Transient Test Data by Type-Curve Matching". JPT, July, 1974.

11. Raghavan R.: "The Effect of Producing Time of Type-Curve Analysis". JPT, June, 1980.

12. Raghavan R.: "Analysis of Pressure Data Following a Short Flow Period". JPT, April, 1982.