

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**FACULTAD DE PETROLEO**



**TESIS**

PARA OPTAR EL TITULO BACHILLER EN:

**Ingeniería de Petróleo**

**“Cambios de Presión en la Perforación Debido al  
Movimiento de Tubería”**

—————:o:—————

**Presentado por**

**JORGE FLORES GONZALES**

PROMOCION "Ing. Juan Rodríguez del Castillo"

**LIMA • PERU • 1965**

A MIS PADRES  
CON TODO CARÍO.

#### AGRADECIMIENTO

El autor expresa su eterna gratitud a to dos los Srs. Profesores de la Facultad de Petróleo por todas las enseñanzas y ayuda que he recibido de ellos, y en forma especial al Ingeniero Arturo Osorio quién me asesoró en el presente trabajo.

---

## I N D I C E

	<u>PAGINA</u>
<b>INTRODUCCION</b>	
<b>CAPITULO I.- DESCRIPCION TEORICA DE COMO SE GENERAN LOS CAMBIOS DE PRESION. -----</b>	1 - 10
-Presión generada por rotura de la gela tinización del lodo.	
-Presión generada por inercia de la co- lumna de lodo.	
-Presión debida al arrastre por viscosi- dad de la columna de lodo.	
-Nomenclatura y diferencia con otros - términos.	
<b>CAPITULO II.- RESULTADOS DE UNA PRUEBA DE CAMPO EN EL CALCULO DE UNA PRUEBA DE PRESION. -----</b>	11 - 18
-Condiciones para el experimento.	
-Equipo en el fondo del pozo.	
-Análisis del gráfico de presión obteni- do.	
-Tipos de fluidos.	
-Determinación de velocidad crítica.	
<b>CAPITULO III.- CAMBIO EQUIVALENTE EN PESO EFECTIVO DEL LODO COMO CONSECUENCIA DE LOS CAMBIOS - DE PRESION.- -----</b>	19 - 31
-Tubería de Perforar = 5".	
-Tubería de Perforar = 4 1/2"	
-Tubería de Perforar = 3 1/2"	
-Determinación de Factores.	
<b>CAPITULO IV.- ESTIMACION CONTROL PRACTICO DE LOS CAM- BIOS DE PRESION. CONSTRUCCION DE CURVAS</b>	32 - 35
-Tubería de Perforar = 5"	
-Tubería de Perforar = 4 1/2"	
-Tubería de Perforar = 3 1/2"	

<b>CAPITULO V.- FACTORES QUE DETERMINAN LA MAGNITUD DE LOS CAMBIOS DE PRESION .-----</b>	<b>36 - 39</b>
<b>CAPITULO VI.- APLICACIONES PRACTICAS DEL ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DE PRESION. -----</b>	<b>40 -</b>
<b>CONCLUSIONES.- -----</b>	<b>41 - 42</b>
<b>INDICE CLAFURA.-</b>	
<b>REFERENCIAS.-</b>	

\*\*\*\*\*

## INTRODUCCION

Es ampliamente conocido que la bajada o sacada de tubería en un pozo lleno de un fluido, produce variaciones momentáneas en la presión ejercida por ese fluido, comunmente llamadas variaciones de presión en los pozos; producidos por el movimiento de tubería. Consecuentemente, pueden ocurrir dos tipos de presiones: negativa y positiva. La magnitud de estas presiones es la que quizá haya sido ignorado o descuidado. Cannon midió las variaciones negativas y demostró que ellas podrían ser lo suficientemente grandes como para causar el flujo de los fluidos de la formación al pozo, pudiendo inclusive crear condiciones para producirse un Reventón. Igualmente Goins indicó las variaciones positivas asociadas con la bajada de tubería y sus resultados juntamente con las operaciones de campo demostraron sorprendentemente que estos cambios de presión podrían ser un factor importante en algunos casos de Pérdida de Circulación.

El estudio de estos cambios de presión en operaciones de perforación, sirvió naturalmente para intentar explicar las causas físicas, naturaleza y magnitud de las variaciones. Es así cómo fueron presentadas varias teorías por Cardwell, Ormsby y Clark, tratando de predecir la magnitud de estas variaciones momentáneas de presión, por medio de ecuaciones complejas y haciendo ciertas suposiciones.

Este presente trabajo tiene por objeto hacer esos mismos estudios cuantitativos considerando las características y naturaleza

más comunes de los fluidos de perforación y los tres efectos fundamentales que originan los cambios de presión. Y a su vez sea presentado en tal forma que fuera posible su uso práctico en el campo por medio de curvas.

-----

## CAPITULO I

### DESCRIPCION TEORICA DE COMO SE GENERAN LOS CAMBIOS DE PRESION

---

La causa de todas las variaciones de presión, observadas durante las operaciones de movimiento de tubería, fué la resistencia natural al movimiento de la columna de lodo. Este movimiento está relacionado con el desplazamiento de la tubería, es decir, con su velocidad y su aceleración.

La FIG. 2 muestra las velocidades y aceleraciones de la tubería durante el mismo intervalo de tiempo en que fueron observados los cambios de presión en la FIG. 1. Un cambio grande de variación de presión positiva (b) en FIG. 1 ocurrió a la máxima velocidad de la tubería (B) en FIG. 2; indicando que el arraastre por viscosidad del lodo que fluye, es un factor importante en el origen de las variaciones de presión; y que al mismo tiempo es función directa de la velocidad de desplazamiento de la tubería. Algunas variaciones de presión negativas (c) ocurrieron cuando la tubería fué repentinamente desacelerada (C); por aplicación de los frenos. Esto indica que los efectos de inercia pueden también causar variaciones de presión.



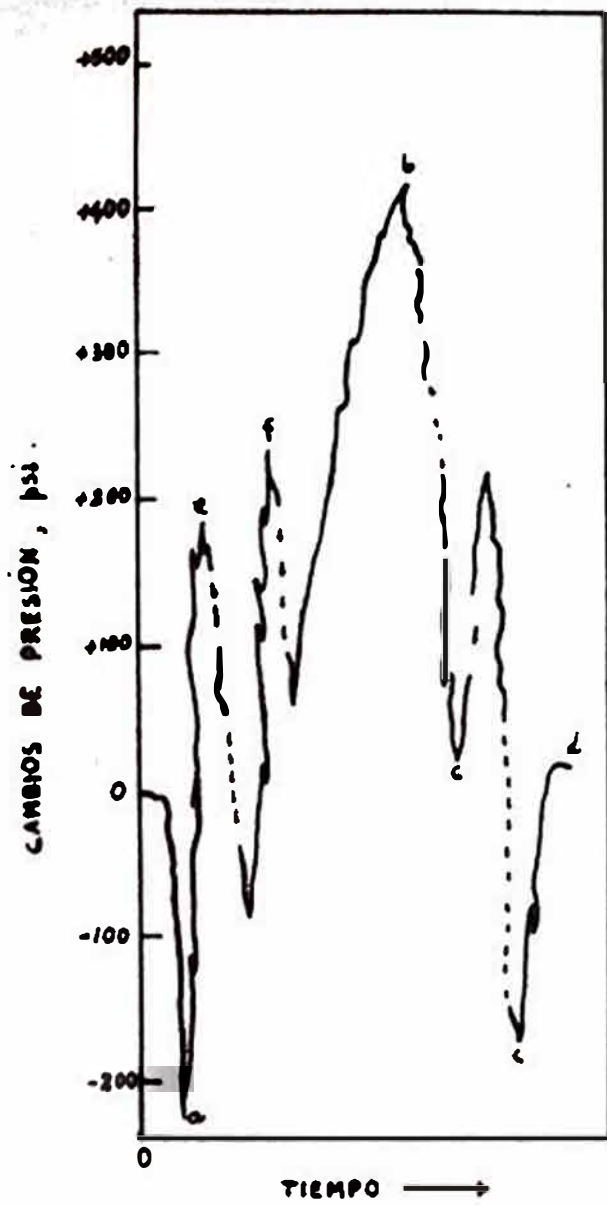


FIG. 1

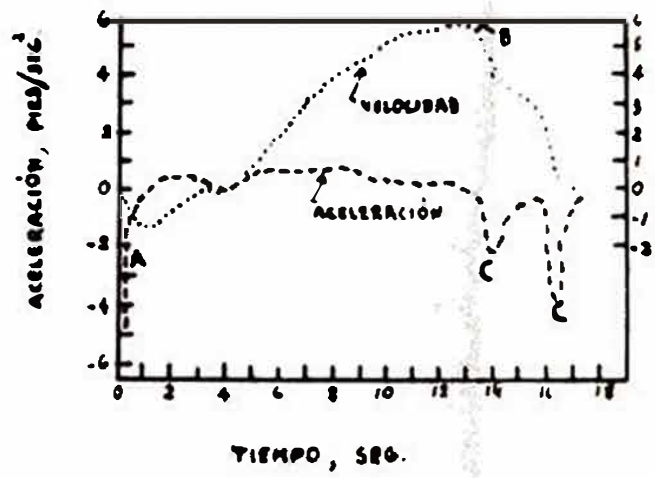


FIG 2

Otro cambio de presión negativa (a) invariablemente ocurrió - cuando la revestidora debió iniciar su movimiento hacia arriba (A). Esto podría ser debido a la rotura de la gelatinización del lodo y a la necesidad de acelerar el fluido del anillo para llenar el vacío creado por la revestidora en movimiento.

Como conclusión, una comparación de las FIG. 1 y 2 revela - que cada variación de presión individual puede ser debido a uno o más de tres efectos: arrastre por viscosidad, inercia y rotura de la gelatinización del lodo.

#### **PRESION GENERADA POR ROTURA DE LA GELATINIZACION DEL LODO.-**

Este exeso de presión necesario para iniciar el movimiento de la columna de lodo, hay que considerarlo dentro de la tubería y en el anillo, derivando sus propias expresiones.

A).- Dentro de la Tubería.- Se tiene la ecuación fundamental:

Fuerza que origina el flujo=Fuerza que resiste el flujo

Entonces:

(Presión)(Sección transversal)=(Resistencia al corte)(Area lat.cort)

$$P \times \frac{\bar{n} D_1^2}{4} = \xi \times \bar{n} \frac{D_1}{12} \times L$$

De donde:

$$P = \frac{\xi}{3} \left( \frac{L}{D_1} \right) = \frac{\xi}{3} \sum \frac{L}{D_1} \text{ ----- (1)}$$

B).- En el Anillo.- Se tiene análogamente:

$$P \times \frac{\pi}{4} (D_h^2 - D_e^2) = \xi \frac{\pi}{12} (D_h + D_e) \times L$$

De donde:

$$P = \frac{\xi \times L}{3 (D_h - D_e)} = \frac{\xi}{3} \sum \frac{L}{D_h - D_e} \text{ ----- (2)}$$

Una vez que la presión requerida para romper el gel sea superada y la tubería comienza a moverse, este efecto de rotura del gel no tiene mayor importancia.

**PRESION GENERADA POR INERCIA DE LA COLUMNA DE LODO.-**

La componente de la variación de presión debido a la inercia es debido a la tendencia de la columna de lodo a resistir un cambio en el movimiento. Se puede derivarla directamente de la segunda Ley Movimiento de Newton y serán discutidos dos casos según se tenga tubería cerrada o tubería abierta.

A).- Tubería Cerrada.- En este caso no hay comunicación del fluido del

anillo con el fluido dentro de la tubería. Se tiene:

$$F = M \times A_p$$

Fuerza en el anillo = Fuerza originada por el desplazamiento de la tubería acelerada.

$$P \times \frac{\pi}{4} (D_h^2 - D_p^2) = \frac{F'}{g} \times A_p$$

$$\text{Pero: } F' = P \times A = 0.052 (L \times \rho) \times \frac{\bar{v}}{4} D_p^2$$

Luego reemplazando estos valores:

$$P \times \frac{\pi}{4} (D_h^2 - D_p^2) = \frac{0.052 L \times \rho \times \frac{\bar{v}}{4} D_p^2}{g} \times A_p$$

Finalmente:

$$P = \frac{0.052 \times L \times \rho \times A_p \times D_p^2}{g (D_h^2 - D_p^2)} \text{ ----- (3)}$$

B.- Tubería Abierta.- Cuando se trata de tubería abierta, existe comunicación entre los fluidos del anillo y dentro de la tubería. Se tiene análogamente:

$$P \times \frac{\bar{n}}{4} D_h^2 - (D_p^2 - D_i^2) = \frac{0.052 \times L \times \rho \times \frac{\bar{n}}{4} (D_p^2 - D_i^2)}{\epsilon} \times A_p$$

Finalmente:

$$\dot{P} = \frac{0.052 \times L \times \rho \times A_p (D_p^2 - D_i^2)}{\epsilon (D_h^2 - D_p^2 + D_i^2)} \text{----- (4)}$$

Ante todo, el efecto de rotura de gel, este efecto de inercia tiene poca importancia relativa.

**FRENIO DEBIDA AL ARRASTRE POR VISCOSIDAD DE LA COLUMNA DE LODO.-**

Este efecto del arrastre por viscosidad, de la columna de lodo, es el más importante y al mismo tiempo, el más complicado. Incluye directamente el efecto de las paredes de la tubería en movimiento; el mismo que tiene una influencia grande en la velocidad del lodo en el anillo y por consiguiente en la Variación de Presión. Las paredes de la tubería en movimiento transportan lodo en la dirección del movimiento de la tubería, y al mismo tiempo el volumen de la tubería desplaza al lodo en una dirección opuesta al movimiento de la tubería.

La velocidad efectiva del lodo que produce cambios de presión,

es una combinación de la velocidad del lodo debido a la tubería desplazando lodo, y debido a la tendencia de las paredes de ella, a transportar lodo. La primera es función:

- a) -Del área transversal de la tubería.
- b) -Del área transversal del anillo.
- c) -De la velocidad de la tubería.

La segunda no es una simple relación; depende de:

- a) -La naturaleza del fluido (Bingham o Newtoniano).
- b) -La geometría del pozo.
- c) -Tipo de flujo (laminar o turbulento)
- d) -Velocidad de la tubería.

Beck ha demostrado que la mayoría de los lodos de perforación pueden ser aproximados como Plásticos Bingham debido principalmente a sus propiedades tixotrópicas y así serán considerado en los cálculos que se realizará posteriormente.

Las ecuaciones que se va a usar; para los cálculos de este efecto son una simplificación de la teoría; y ellas han sido computadas - para condiciones específicas en términos de la velocidad de tubería, - propiedades del lodo, tamaño del hueco y geometría de la tubería.

Usando un computador de alta velocidad, fueron usadas 500 combinaciones de tubería, tamaño de hueco y propiedades del lodo, para eva-

lugar las ecuaciones aproximadas en las condiciones más frecuentemente encontradas en operaciones de campo.

Se llegó a deducir así en el flujo laminar, que la curva aproximada estaba dada por una ecuación de la fórmula:

$$P_s = \phi V_p + \eta \quad (\text{psi}/1000 \text{ pies}) \text{ ----- (A)}$$

En la región de flujo turbulento se encontró:

$$P_s = \theta V_p^{1.8} \quad (\text{psi}/1000 \text{ pies}) \text{ ----- (B)}$$

Los parámetros  $\phi$ ,  $\eta$ ,  $\theta$  fueron evaluados para un rango de propiedades de lodo, tamaño de hueco y geometría de la tubería.

Estos parámetros, deben ser diferenciados tanto para tubería cerrada, como para tubería abierta. Estos dos casos, entonces, serán discutidos separadamente.

A).- Tubería Cerrada.- Para una tubería cerrada se encontró que las ecuaciones A y B podrían ser expresadas como sigue:

Para flujo laminar:

$$P_s = B \mu_p V_p + \frac{\tau_o}{0.3 (D_h - D_e)} \text{-----} (5)$$

Para flujo turbulento:

$$P_s = A \mu_p^{0.21} f^{0.806} V_p^{1.8} \text{-----} (6)$$

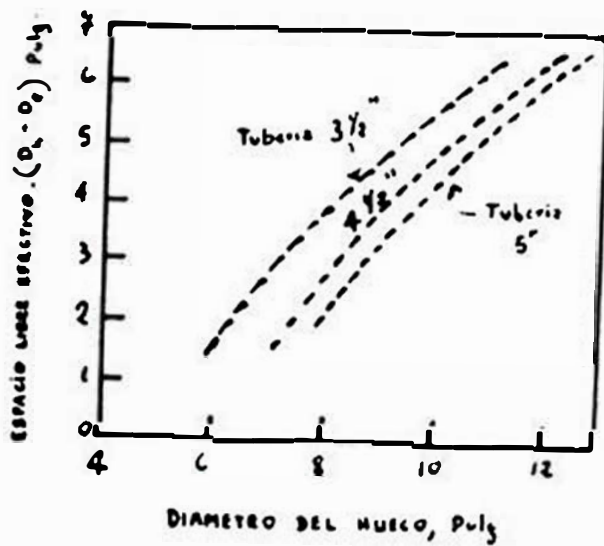
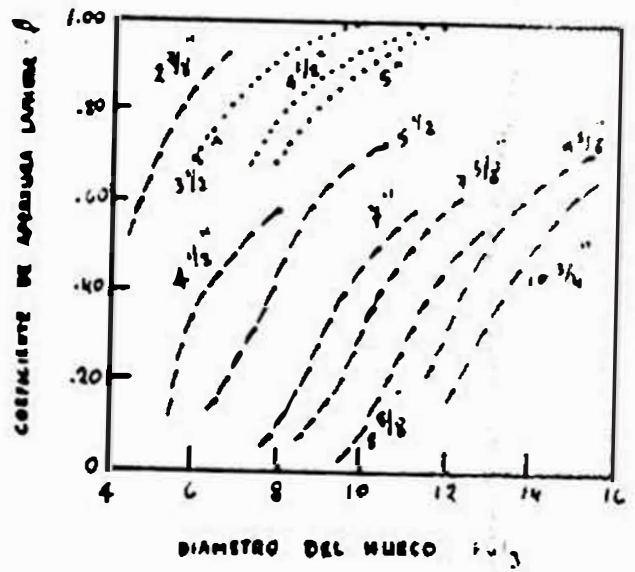
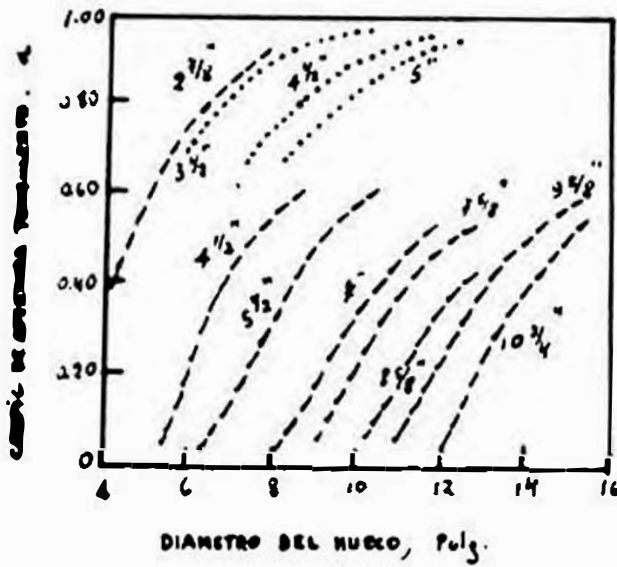
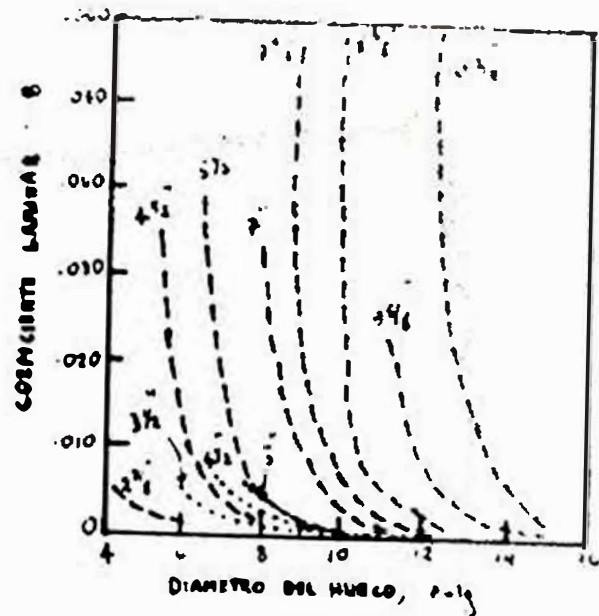
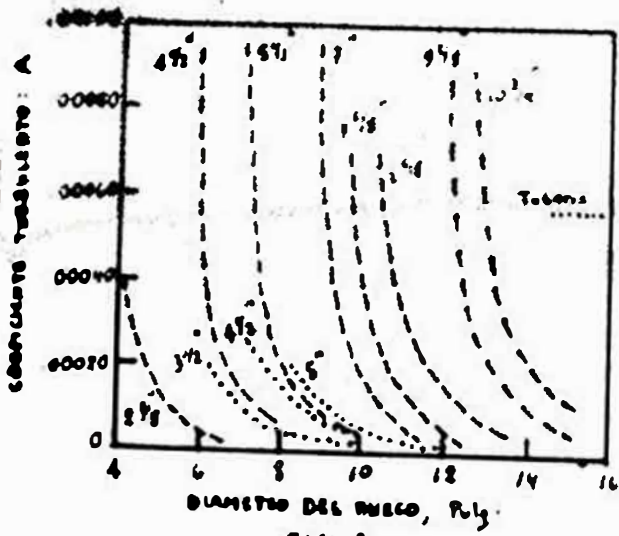
En estas ecuaciones aparece directamente la velocidad de la tubería y las propiedades del lodo:  $\mu_p$ ,  $\tau_o$  y  $\rho$ . Los parámetros B,  $D_e$  y A, están relacionados con la geometría de la tubería y del hueco.

Los valores numéricos de A y B están ploteados en las FIGS. 3 y 4 como una función del tamaño del hueco y para varias tuberías. Igualmente la diferencia  $(D_h - D_e)$ , se puede obtener del gráfico - (FIG. 7):  $(D_h - D_e)$  vs  $D_h$ , para tubería nominal de 3 1/2, 4 1/2 y 5 pulgadas.

B).- Tubería abierta.- La aproximación para este caso es realizada modificando las ecuaciones 5 y 6 para tubería cerrada. La modificación es la siguiente:

Para flujo laminar:





$$P_s = \beta B \sqrt{P} V_p + \frac{\gamma_o}{0.3(D_h - D_e)} \text{----- (7)}$$

Para flujo turbulente:

$$P_s = \alpha A \sqrt{P}^{0.21} \rho^{0.806} V_p^{1.8} \text{----- (8)}$$

Los coeficientes de apertura  $\alpha$  y  $\beta$  son usados para ajustar las ecuaciones de tubería cerrada a tubería abierta.

Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  están ploteados en la FIG. 5 y 6 como una función del tamaño del hueco y para varias tuberías.

#### **NO MENCLATURA Y DIFERENCIA CON OTROS TERMINOS.-**

Para nombrar las variaciones de presión que ocurren al bajar o sacar la tubería, existen términos en inglés, a los mismos que se tratará de darles una traducción adecuada para indicar el efecto.

Así por ejemplo, el término "Running Pressure" empleado para indicar el aumento de presión o cambio de presión positiva, al bajar la tubería se puede expresar muy bien como "Presión por bajada de la columna".

Análogamente, la disminución de presión o cambio de presión -

negativa que se produce al sacar la tubería es indicado por medio - del término "Pulling Suction" y esto puede ser expresado con bastante propiedad por medio de la expresión "Succión por izaje de la columna". Algunas veces para indicar este efecto se ha usado el término "Presión por Succión" que en verdad no indica lo que se quiere expresar.

Consecuentemente las dos frases "Presión por bajada" y "Suoción por izaje" serán usados a través de este trabajo.

-----

## CAPITULO II

### RESULTADOS DE UNA PRUEBA DE CAMPO EN EL CALCULO DE LOS CAMBIOS DE PRESION

---

Los propósitos de esta prueba, fueron determinar la magnitud de las variaciones de presión y comparar los valores con aquellos computados por métodos matemáticos.

La prueba demostró que los cambios de presión y las presiones de circulación pueden ser de considerable magnitud. Variaciones negativas pueden permitir que los fluidos de la formación entren al pozo; mientras que variaciones positivas o presiones de circulación pueden romper la formación causando pérdida de circulación. Ya se demostró que altas variaciones de presión son causados por movimiento rápido de la tubería.

#### CONDICIONES PARA EL EXPERIMENTO.

El pozo usado fué el Chiasson 1, un pozo seco en el área Morse, Vermilion Parish, Louisiana. Había sido perforado a 14,500 pies con revestidora de protección de 9 5/8" a 11,456 pies. El lodo de -

perforar de 17.5 lbs/gal. usado en la perforación del pozo estaba aún en el sistema y no fué alterado para la prueba.

La tubería de perforar fué de 4 1/2" O.D., 16.6 lb/ pie, - lastrabarreras de 6" O.D. , tres estabilizadores y una broca a - chorro de 8 1/2".

El aparejo fué equipado con un doble freno hidráulico de - 48 pulgadas de diámetro el cual proporcionaba, relativamente, un buen control de la velocidad de tubería. Para evitar pérdidas de circulación o una posible pérdida de herramientas en hueco abierto, el experimento fué efectuado completamente dentro de la revestidora de 9 5/8" .

El lodo en el sistema tenía una viscosidad aparente de 63 sp., viscosidad plástica de 50 cp., límite al esfuerzo de corte de Bingham de 26 lb/100 pies<sup>2</sup>, pérdida de filtrado de 2.2 cc. y 7% de aceite diesel. El volumen de sólido fué de 34%.

Las propiedades del lodo fueron chequeadas durante la circulación a intervalos de tiempos pre determinados con el fin de - establecer valores promedios para el sistema entero. Se admite que estas propiedades reflejan condiciones verdaderas en la superficie en lugar de las condiciones existentes en el pozo que son indeterminadas.

El experimento se realizó, unas cuantas horas después de la terminación de las operaciones de perforación, así es que el sistema del lodo y la sarta de perforación no fueron cambiados.

#### EQUIPO EN EL FONDO DEL POZO.

El equipo usado está mostrado en la FIG. 8. La broca fué una broca a chorro de 8 1/2" con tres orificios de 7/16". El área de las aberturas de circulación sobre el sustituto ciego fué igual al área de los orificios de la broca. Estas aberturas fueron usadas para simular orificios de broca, así es que las condiciones de presión debajo del sustituto ciego debería ser similar a aquellas creadas debajo de la broca a chorro.

El registrador de presión ubicado en la parte superior graficó la presión en el anillo y el que está inmediatamente sobre el sustituto de circulación, graficó la presión dentro de la tubería.

Los tres registros inferiores fueron instalados, para registrar la misma presión. Dos fueron equipados con relojes de 12 horas y uno con reloj de 6 horas. Los dos registradores con reloj de 12 horas tuvieron termómetros de máxima lectura, el registrador con el reloj de 6 horas fué equipado con un termómetro de registro. Al final del experimento, los tres registradores inferiores coincidieron en presión y temperatura. La temperatura más alta registrada fué 180°F.

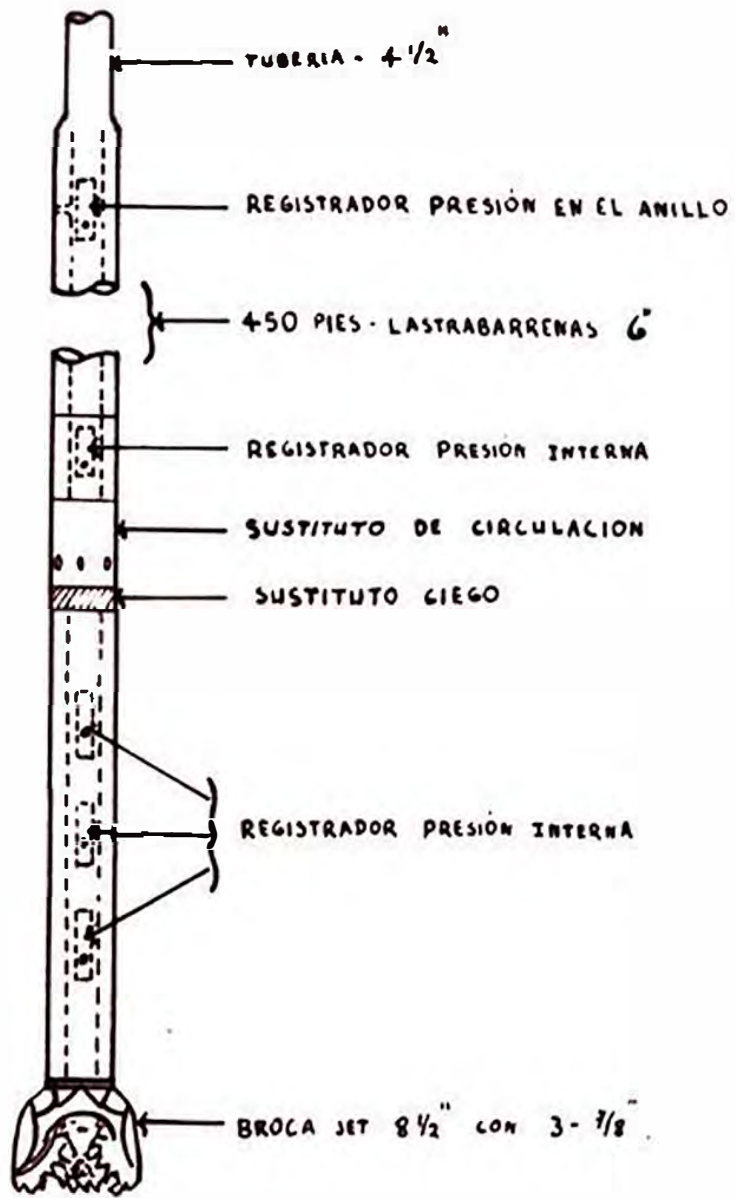


FIG. 8

#### **ANÁLISIS DEL GRÁFICO DE PRESIÓN OBTENIDO.-**

El gráfico indicó que la variación de presión fue de 1110 psi. (equivalente a un incremento en peso de lodo de 1.9 lb/galón) cuando la tubería fue bajada a 570 pies/minuto (velocidad máxima posible).

La variación de presión inducida por la bajada de tubería a un régimen normal de 225 pies/minuto fue de 443 psi. (0.7 lb/galón)

El cambio de presión negativa, fue cerca de 100 psi. a un régimen normal.

Para realizar la comparación de las presiones de flujo calculadas con las presiones medidas, se asumió que el fluido se comportó como un plástico Bingham, el cual requirió una presión definida para comenzar y mantener el movimiento. Se hará entonces un estudio previo correspondiente a los tipos de fluidos, con el objeto de comprender mejor los resultados.

#### **TIPOS DE FLUIDOS.-**

Existen dos grandes grupos: los llamados líquidos verdaderos o Newtonianos y líquidos no Newtonianos.

a).- Líquidos Newtonianos.- Estos se caracterizan debido a que una fuerza mínima aplicada a estos fluidos hará que empiecen a fluir lentamente. No hay evidencia de una estructura interna permanente dentro del fluido y la viscosidad es constante.



Las condiciones de flujo en este tipo de fluidos son consideradas como laminar y turbulento, y quedan definidas por el número de Reynolds (sin dimensiones).

$$N_R = \frac{928 \rho v d}{\mu}$$

Es considerado que si:

$N_R < 2000$ , el flujo es laminar.

$N_R > 4000$ , el flujo es turbulento.

$2000 < N_R < 4000$ ; el flujo está en transición y no es laminar ni turbulento.

b).- Líquidos no Newtonianos.- Son aquellos cuya viscosidad no es únicamente función de la presión y temperatura, sino que dependen esencialmente del flujo mismo. Particularmente los lodos de perforación tixotrópicos (aquellos que manifiestan una estructura de gel o de aspecto gelatinoso) cuando están en reposo son un magnífico ejemplo. Cuando empiezan a fluir su viscosidad medida o aparente es alta, pero disminuye al continuar el flujo y la estructura de gel es entonces destruida. Dentro de estos fluidos hay pues, evidencia de una estructura interna. Estos fluidos no Newtonianos, comúnmente se comportan como fluidos plásticos; pero en lodos emulsionados tienden a comportarse como fluidos pseudo plásticos.

**DETERMINACION DE LA VELOCIDAD CRITICA.**

Si la velocidad del fluido está debajo de una cierta velocidad crítica, el fluido está en flujo laminar. Una valor sobre dicha velocidad indicará condición de flujo turbulento. Esta velocidad crítica de flujo puede ser determinada por la siguiente fórmula:

$$v_o = \frac{1.08 u_p + 1.08 \sqrt{\mu_p^2 + 9.3 \rho D^2 \gamma_o}}{D}$$

La expresión del número de Reynolds queda definido por:

$$N_R = \frac{2970 \rho v d}{\mu_p}$$

La velocidad del lodo en el anillo, ya sea en la bajada o sacada de la tubería puede ser calculada con bastante aproximación por la fórmula de Ormsby:

$$v_a = \frac{v_p \times D_p^2}{D_h^2 - D_p^2} + \frac{v_p}{2} = v_p \left( \frac{D_p^2}{D_h^2 - D_p^2} + \frac{1}{2} \right)$$

Volviendo al experimento, considerando entonces como un plástico Bingham y teniendo un gasto de 280 galones por minuto se encontró:

Valor medido en la prueba ----- 185 psi.

Valor calculado correspondiente a flujo laminar 387 psi.

La velocidad crítica de flujo, para este caso particular, fue de 358 pies/minuto al rededor del lastrabarrenas y de 327 pies/minuto al rededor de la tubería de perforar.

Las velocidades del lodo medidas fueron 189 pies/minuto y 130 pies/minuto respectivamente, entonces el flujo era laminar. Sin embargo la presión de flujo calculada fué de 387 psi. Fué evidente entonces que este lodo no se comportó como un plástico Bingham; sino más bien como un pseudo plástico. (El lodo tenía 7% de diesel). El uso de ecuaciones desarrolladas para flujo plástico, resultan en grandes errores para tales lodos (pseudo plásticos), especialmente a bajos regímenes de circulación.

En cuanto a los cambios de presión, debido al movimiento de tubería, para condiciones usadas en este experimento la velocidad crítica calculada de la tubería fué de 260 pies/minuto. A una velocidad de la tubería sobre este régimen el lodo debería estar en flujo turbulento. Debajo de este régimen estaría en flujo laminar.

Lógicamente cuando se corrió un trazo a 570 pies/minuto, el lodo estaba en flujo turbulento y se encontró:

Valor medido ----- 1,110 psi.

Cambio de presión calculado (tubería abierta) 1,050 "

Cuando la tubería fué bajada a 357 pies/minuto originalmente -  
también flujo turbulento se determinó:

Valor medido ----- 626 psi.

Cambio de presión calculado (tubería abierta) --- 590 "

Puede ser visto de estas comparaciones que los cambios de presión medidos están muy aproximados con aquellos calculados.

Consecuentemente si el fluido no se comporta como un plástico Bingham, el Ingeniero de Perforación no tiene un método plástico utilizable para el cálculo de las presiones de circulación, ya que ellas están en función de ecuaciones muy complejas.

-----

### CAPITULO III

#### CAMBIO EQUIVALENTE EN PESO EFECTIVO DEL LODO COMO CONSECUENCIA DE LOS CAMBIOS DE PRESION. CONSTRUCCION DE CURVAS.

---

##### A).- FLUJO LAMINAR.-

La ecuación que define los cambios de presión viene dada por la expresión:

$$P_s = \beta B \mu_p V_p + \frac{\gamma_o}{0.3 (D_h - D_e)} \quad \text{----- (A)}$$

El parámetro B es sumamente pequeño dentro de los límites lógicos y prácticos (FIG. 4); en consecuencia se puede considerar nulo el primer sumando. Esto indica que los cambios de presión, en el flujo laminar, solamente son funciones del "yield point" (límite del esfuerzo al corte de Bingham) y de la diferencia entre el diámetro del hueco y el diámetro exterior efectivo de la tubería. A su vez, la influencia de la viscosidad plástica y de la velocidad de -

la tubería son mínimas.

La determinación de los cambios de presión, en el flujo laminar, para diferentes esfuerzos de corte de Bingham y distintos diámetros de hueco y de tubería se realiza en los siguientes cuadros en base de la ecuación (A) simplificada:

$$P_s = \frac{\tau_o}{0.3 (D_h - D_e)}$$

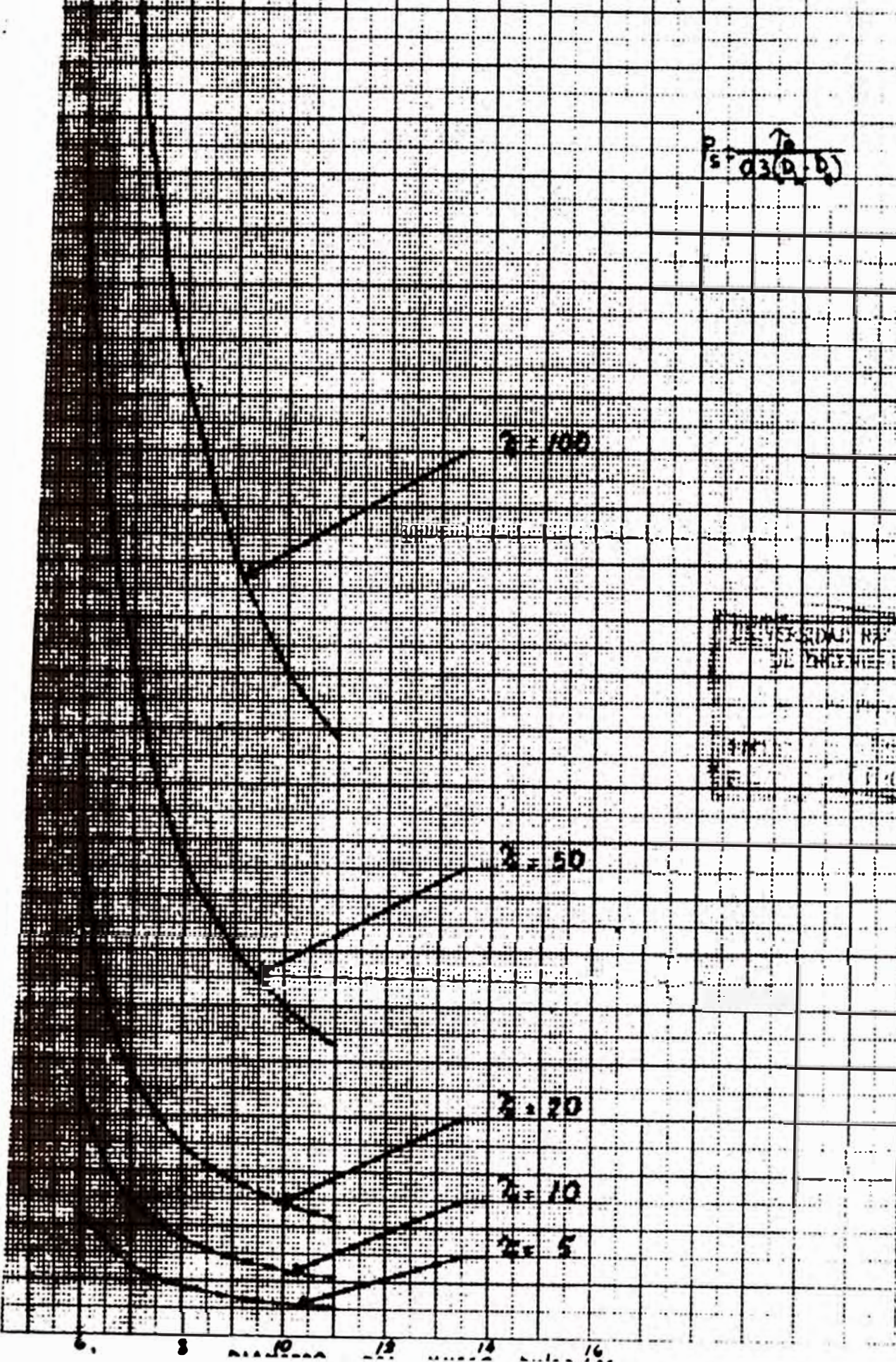
$\tau_o$	$D_h$	$D_p$	$D_h - D_e$	psi/1000 pies	lb/galón
5	7	3 1/2	2.8	6	0.115
10	7	3 1/2	2.8	12	0.230
20	7	3 1/2	2.8	24	0.460
50	7	3 1/2	2.8	60	1.150
100	7	3 1/2	2.8	120	2.300

INGENIERIA DE PERFORAR

3 1/2

FLUJO LAMINAR

$$P_s = \frac{\tau_0}{0.3(d_1 - d_2)}$$



UNIVERSIDAD NA  
DE INGENIERIA

$\gamma_o$	$D_h$	$D_p$	$D_h - D_e$	psi/1000 pies	lb/galón
5	8	4 1/2	2.7	6.2	0.119
10	8	4 1/2	2.7	12.4	0.238
20	8	4 1/2	2.7	24.8	0.476
50	8	4 1/2	2.7	62.0	1.190
100	8	4 1/2	2.7	124.0	2.380

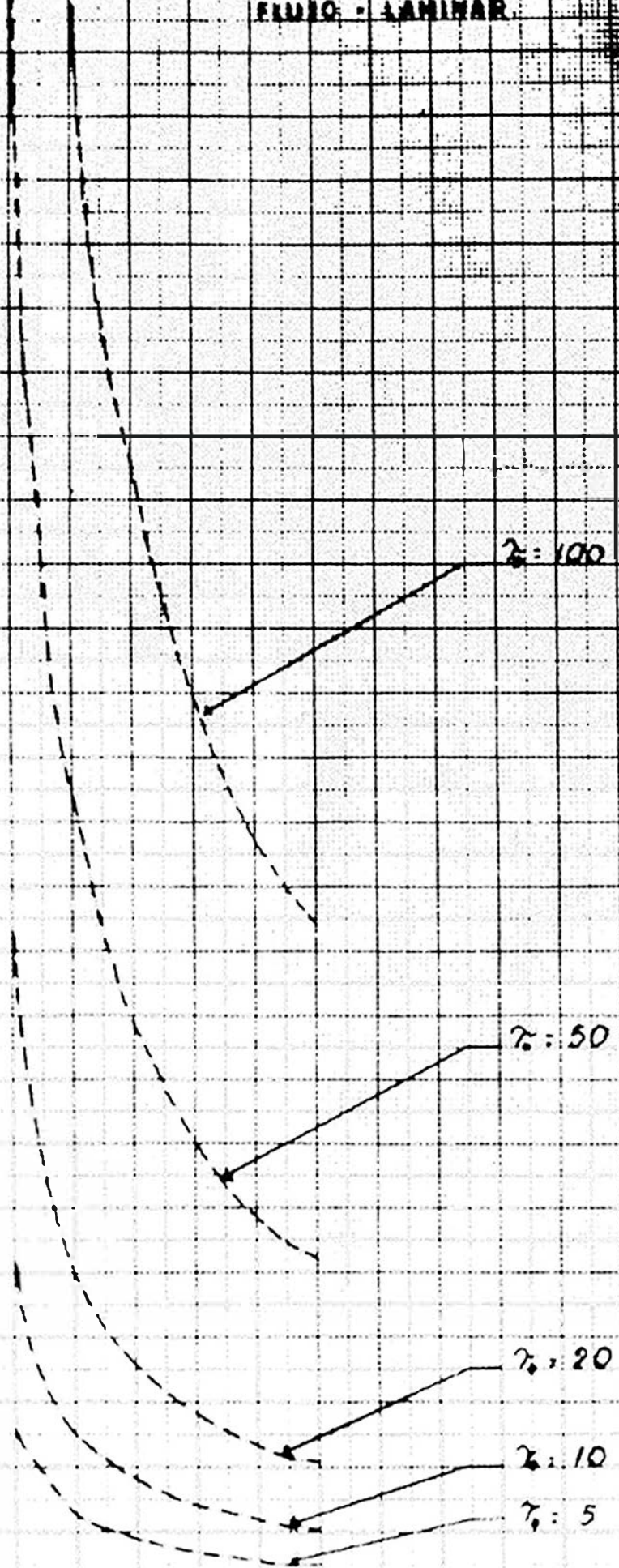
$\gamma_o$	$D_h$	$D_p$	$D_h - D_e$	psi/1000 pies	lb/galón
5	10	5	4.3	3.9	0.075
10	10	5	4.3	7.8	0.150
20	10	5	4.3	15.6	0.300
50	10	5	4.3	39.0	0.750
100	10	5	4.3	78.0	1.500



TUBERIA DE PERFORAR

4 1/2"

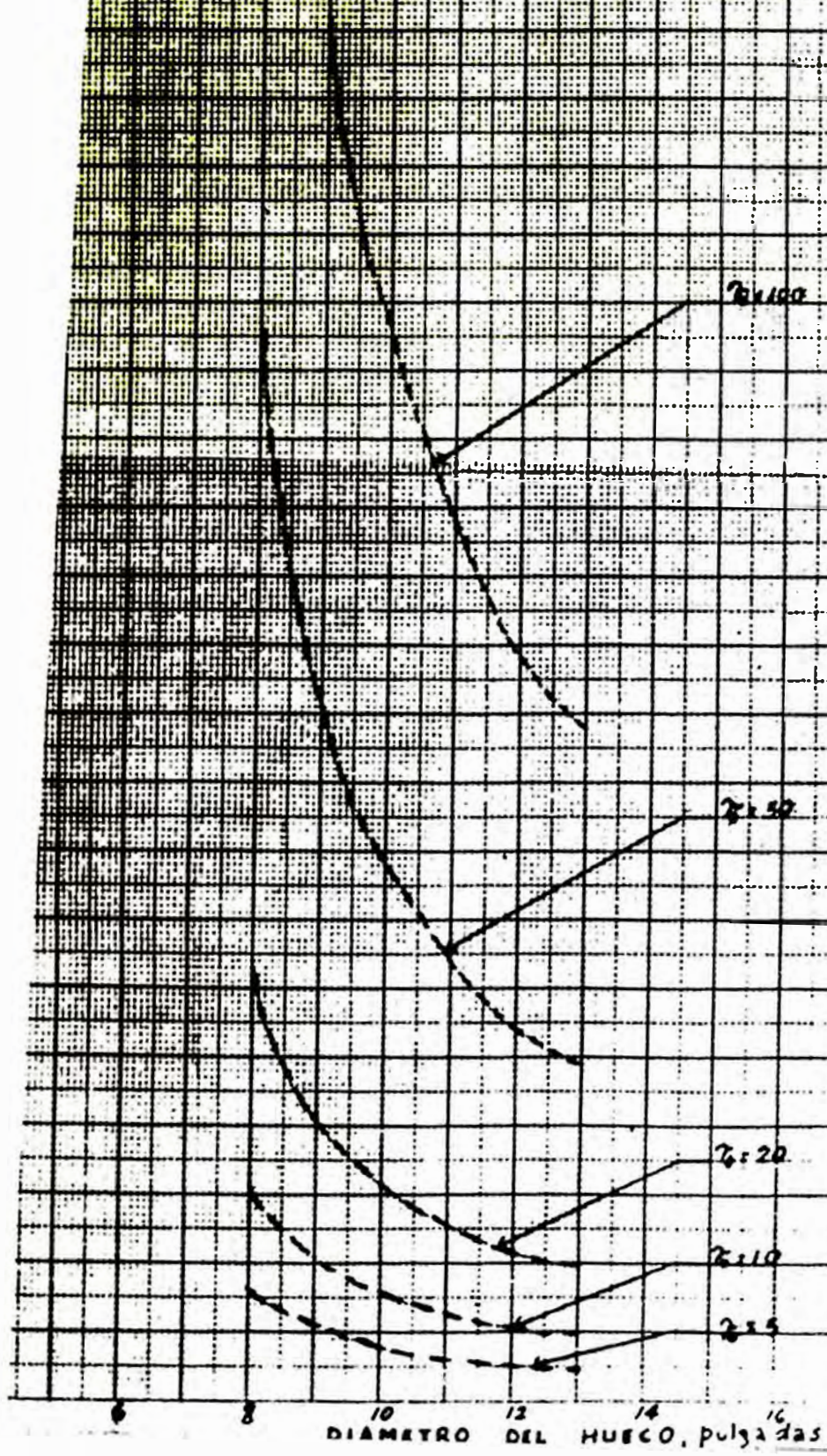
FLUIDO - LAMINAR.



GRUPO DE BOMBAS

FLUIDO - LÍQUIDO

$$P_s = \frac{\gamma_0}{0.12(\gamma_0 - \gamma_1)}$$



DIAMETRO DEL HUECO, pulgadas

$\gamma_o$	$D_h$	$D_p$	$D_h - D_e$	psi/1000 pies	lb/galón
5	12	5	6.1	2.7	0.052
10	12	5	6.1	5.4	0.104
20	12	5	6.1	10.8	0.208
50	12	5	6.1	27.0	0.520
100	12	5	6.1	54.0	1.040

La diferencia ( $D_h - D_e$ ) se conoce generalmente con el nombre de "espacio libre efectivo".  $D_e$  es un diámetro efectivo de la tubería - teniendo en cuenta la influencia de los "tool joints" o uniones. Dicha diferencia se obtiene de la FIG. 7 , para tuberías de 3 1/2 , - 4 1/2 y 5".

Los resultados obtenidos se puede plotearlos y obtener curvas que representan los cambios de presión para una tubería determinada, distintos diámetros de hueco y diferentes esfuerzos de corte de Bingham. Dichas curvas serán construídas para tuberías de perforar de 3 1/2 , 4 1/2 y 5 pulgadas.

El cambio de presión en peso equivalente de lodo, se obtiene de acuerdo a la siguiente deducción:

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{galón}} = 7.48 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} = 7.48 \frac{\frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}}{\text{pie}}$$

Es decir:

$$\frac{7.48 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}}{144 \frac{\text{pulg}^2}{\text{pie}^2}} = \frac{0.052 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}}{\text{pie}} = 0.052 \text{ psi/pie} = 52 \text{ psi/1000 pies}$$

Entonces:

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{galón}} = 52 \frac{\text{psi}}{1000 \text{ pies}}$$

Luego la fórmula será:

$$\text{Peso equivalente del lodo} \left( \frac{\text{lb}}{\text{galón}} \right) = \frac{\text{psi}}{\frac{1000 \text{ pies}}{52}}$$

Los cuadros y las curvas construídas indican claramente, para un flujo laminar que el cambio de presión aumenta cuando la diferencia  $D_h - D_e$  disminuye, es decir cuando  $D_e$  se acerca a  $D_h$  permaneciendo constante el esfuerzo de corte del lodo. En el límite cuando  $D_e$  es igual a  $D_h$ , el cambio de presión se hace infinito.

Es obvio la relación directa que existe entre el esfuerzo de corte y el cambio de presión; para cuando la diferencia ( $D_h - D_e$ ) es constante.

Además, las curvas indican también que el incremento de los cambios de presión que se produce al pasar por ejemplo de un hueco de 12" a 10", para una misma tubería, es mucho mayor cuanto más alto sea el esfuerzo de corte del lodo.

#### B).c FLUJO TURBULENTO.

La expresión que define la variación de presión es:

$$P_s = Q A \mu_p^{0.21} \rho^{0.806} v_p^{1.8} \text{ ----- (B)}$$

En esta ecuación aparece directamente la velocidad de la tubería y las características del lodo. Se observa que este tipo de flujo, el cambio de presión varía casi con el cuadrado de la velocidad de la tubería, contrariamente al flujo laminar en el cual desaparece prácticamente la influencia de dicha velocidad.

Los parámetros Q y A están en función del diámetro del hueco y del diámetro nominal de la tubería: FIGS. 5 y 3.

Los cálculos que se realizará, responderán a un lodo con determinadas características, y posteriormente se determinará los -

factores correspondientes para encontrar la variación de presión de un lodo con otras características.

La velocidad de la tubería que se va a considerar en los cálculos será un 100% mayor que la real debido a que en las fórmulas A y B se considera solamente el efecto de arrastre por viscosidad (el más importante) sin considerar los efectos de inercia y de rotura de gel.

Esta velocidad de la tubería se refieren al tiempo empleado para bajar o sacar un tramo de 90 pies.

—	t	$v_p$ pies/seg.	$v_p$ pies/minuto.
1	13	14	840
2	15	12	720
3	18	10	600
4	25	7	420
5	36	5	300
6	60	3	180
7	90	2	120

Los diámetros de tubería con los cuales se realizará los cálculos son: 3 1/2 , 4 1/2 y 5 pulgadas. Además dichos cálculos

se hará para pozos perforados con broca a chorro de 7 7/8" soportando un peso de 40,000 libras.

Considerando el diámetro de la broca de 7 7/8" , se infiere - que los diámetros de hueco en los anillos correspondiente a la tubería de perforar y al lastrabarreras serán de 10 y 8 1/2 pulgadas respectivamente. Estos diámetros se considerará en la construcción de las curvas.

El lodo base se refiere a un lodo con un peso de 10 lb.galón y una viscosidad plástica de 14 cp.

Con el propósito de que las curvas que se obtenga sean una - línea recta, el ploteo de los resultados que se determinen en papel log-log, de acuerdo a la siguiente deducción:

Para un lodo determinado y diámetros de tubería y hueco conoidos, la ecuación para flujo turbulento es de la forma:

$$P_s = C \times V_p^{1.8}$$

$$\text{Donde: } C = Q \frac{\mu_p^{0.21}}{\rho^{0.806}}$$

Aplicando logaritmos:

$$\log P_s = \log C + 1.8 \log V_p$$

Esta última ecuación representa una línea recta, cuya pendiente es 1.8 cuando se plotea en papel log-log:  $P_s$  vs.  $V_p$ .

Además, como la pendiente es constante todas las rectas que se obtengan serán paralelas, variando únicamente la ordenada en el origen. En consecuencia, en los resultados que se tabulen para obtener las curvas, bastará un sólo punto para determinar las demás rectas una vez que se haya ploteado la primera.

#### TUBERIA DE PERFORAR = 5"

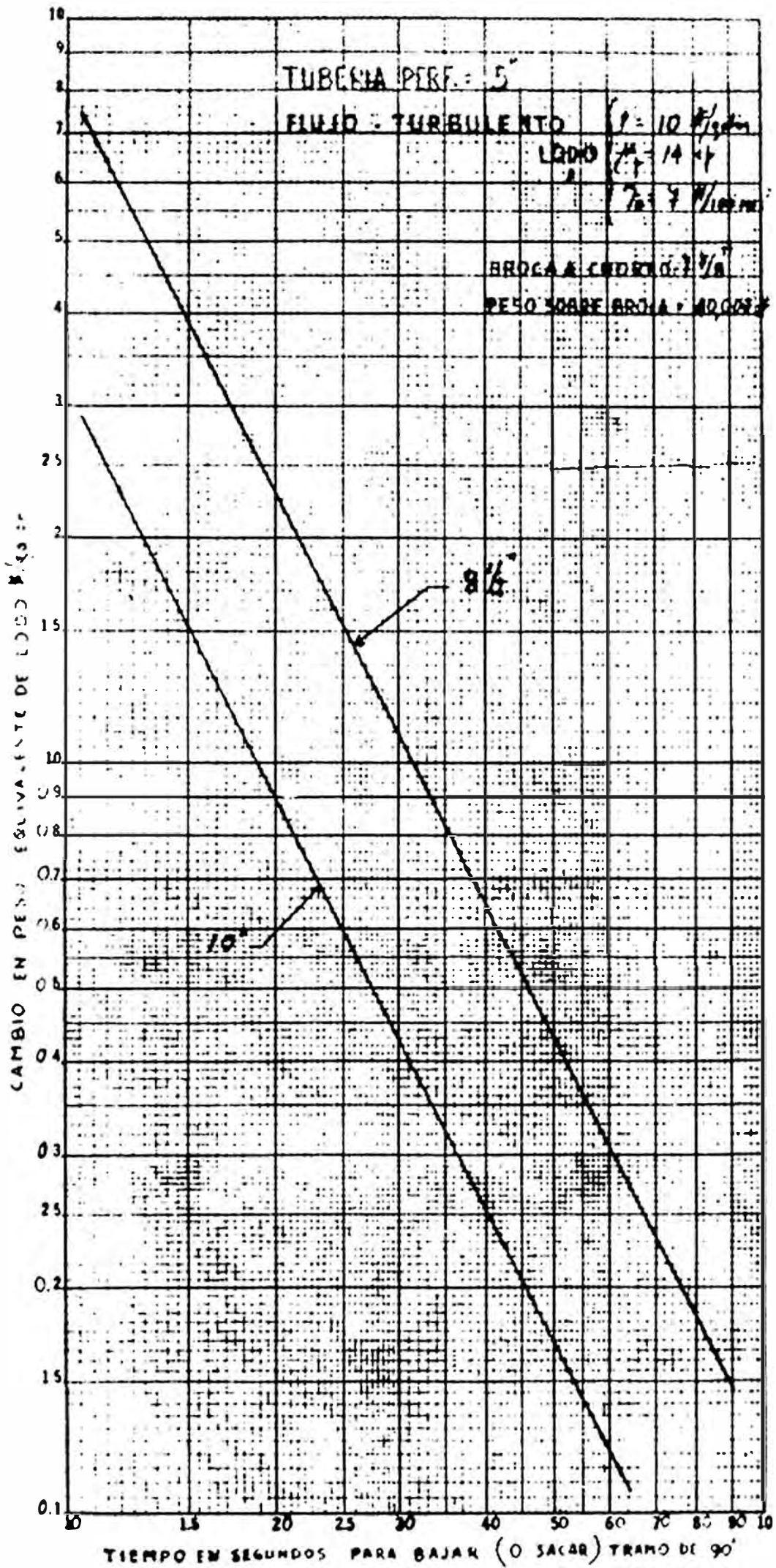
a).- Para  $D_h = 10''$

t	Q	A	C	$V_p^{1.8}$	$P_s$	lb/gal.
13	0.83	$6 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^4$	102.0	1.960
18	0.83	$6 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^4$	56.0	1.080
36	0.83	$6 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^4$	15.6	0.302

b).- Para  $D_h = 8 \frac{1}{2}''$

13	0.72	$1.8 \times 10^{-4}$	$14.5 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^4$	264.0	5.07
18	0.72	$1.8 \times 10^{-4}$	$14.5 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^4$	145.0	2.78





TUBERIA DE PERFORAR 4 1/2"

a).- Para  $D_h = 10''$

t	Q	A	C	$\sqrt{1.8}$ P	P <sub>s</sub>	lb/gal
13	0.9	$4.7 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^4$	85.5	1.65
18	0.9	$4.7 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^4$	47.0	0.91
36	0.9	$4.7 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^4$	13.2	0.253

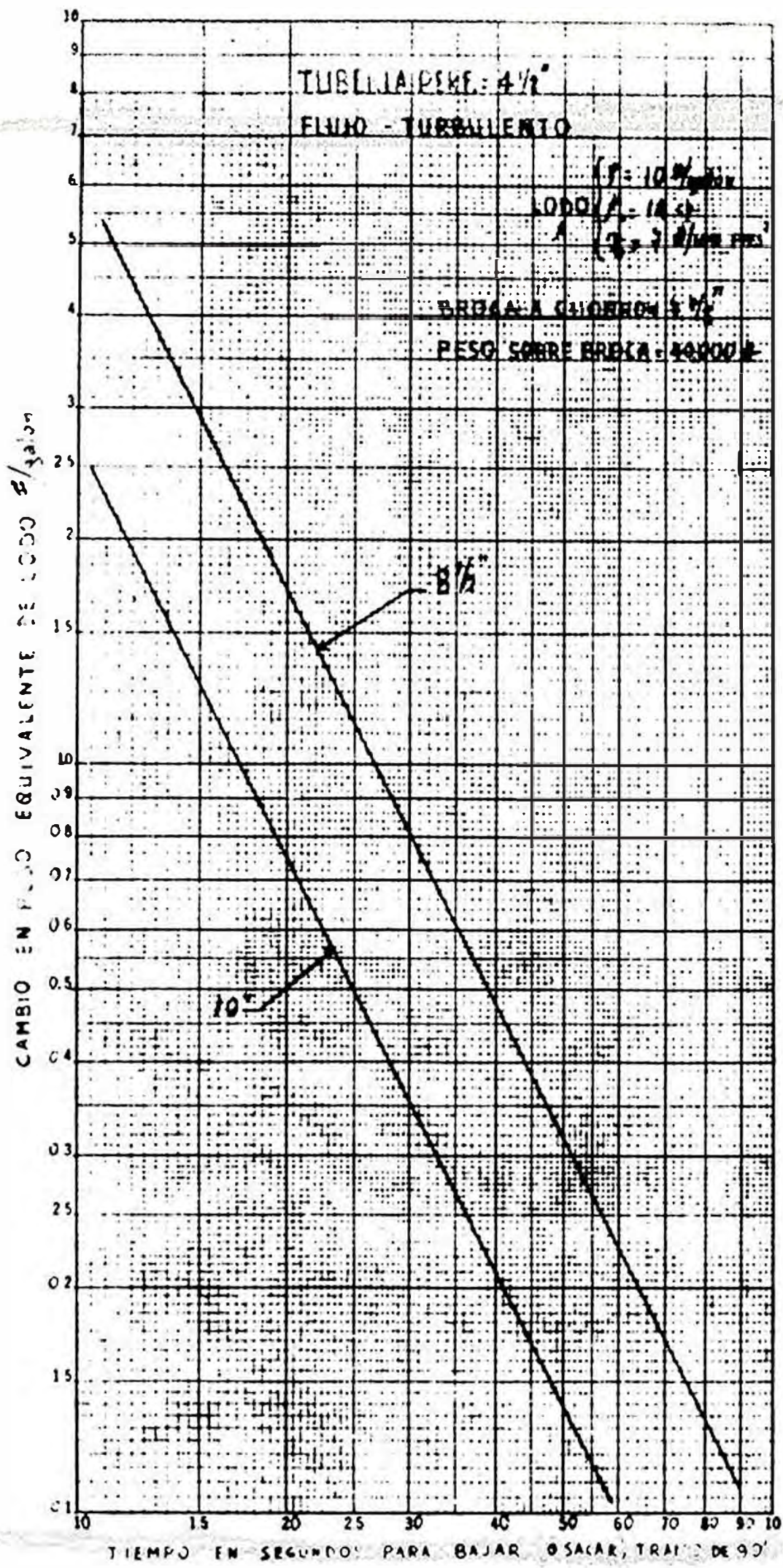
b).- Para  $D_h = 8 1/2''$

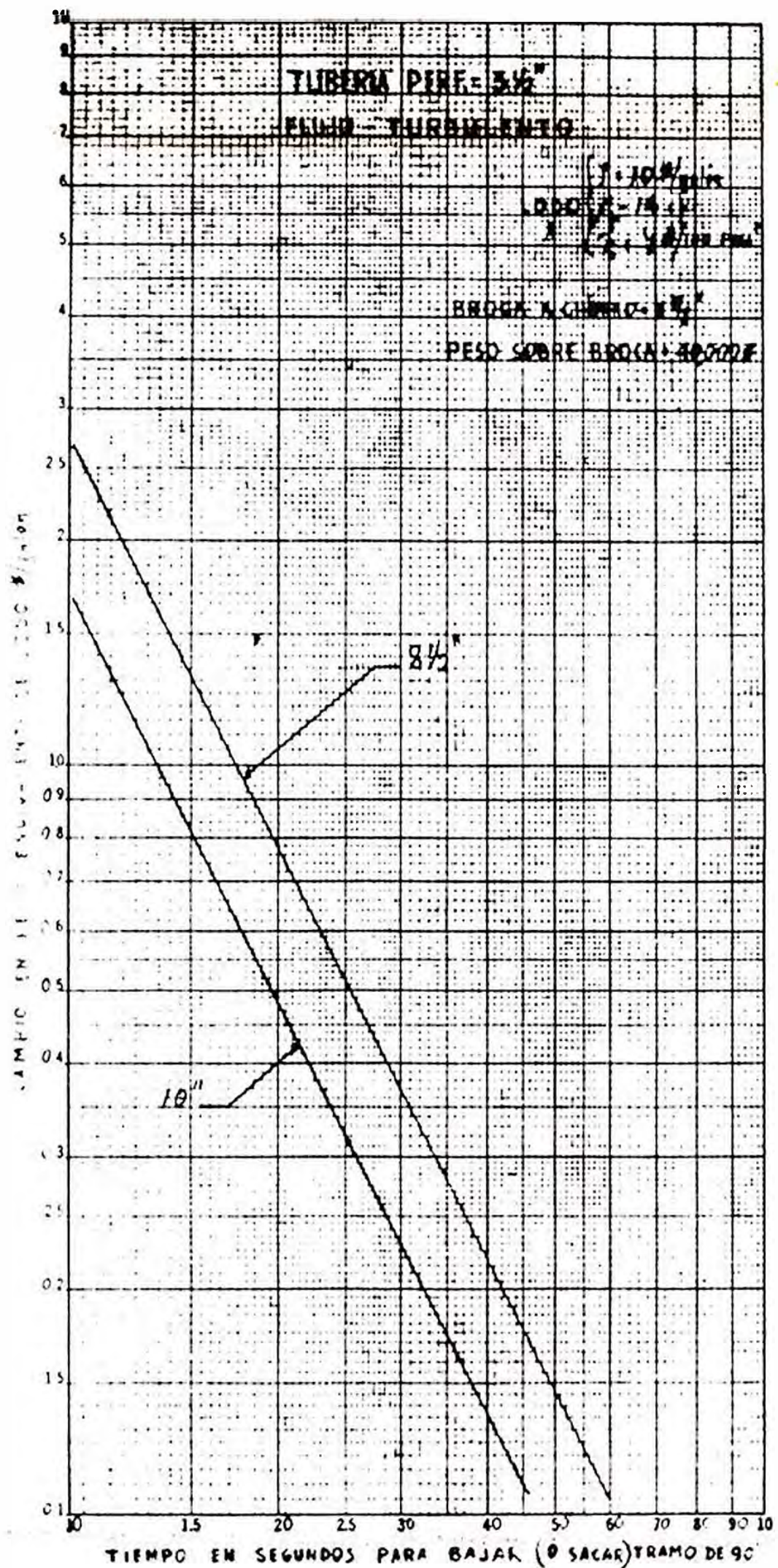
13	0.81	$1.2 \times 10^{-4}$	$10.8 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^4$	197.0	3.78
18	0.81	$1.2 \times 10^{-4}$	$10.8 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^4$	108.0	2.08

TUBERIA DE PERFORAR = 3 1/2"

a).- Para  $D_h = 10''$

t	Q	A	C	$\sqrt{1.8}$ P	P <sub>s</sub>	lb/gal.
13	0.97	$2.8 \times 10^{-5}$	$3.03 \times 10^{-4}$	$18.2 \times 10^4$	55.0	1.06
18	0.97	$2.8 \times 10^{-5}$	$3.03 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^4$	30.3	0.594





b).- Para  $D_p = 8 \frac{1}{2}''$

t	Q	A	C	$V_p^{1.8}$	$P_s$	lb/gal.
18	0.94	$4.7 \times 10^{-5}$	$4.92 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^4$	49.2	0.946

**DETERMINACION DE FACTORES**

Para una viscosidad constante, y considerando como 100% el lodo de 10 lb/gal. se tiene el siguiente cuadro:

$\mu_p$	$\rho$	$\rho^{0.806}$	$\%$
14	10	6.4	100
14	11	6.9	108
14	12	7.4	116
14	13	7.9	124
14	14	8.4	131
14	15	8.9	139
14	16	9.4	147
14	17	9.8	153
14	18	10.3	161
14	19	10.8	169
14	20	11.2	175
14	25	13.5	211

Si se tiene por ejemplo, el cambio de presión para un lodo de 10 lb/gal. y 14 op. (obtenido de las curvas) y se quiere conocer el cambio de presión que ocurrirá para un lodo de 13 lb/gal. y la misma viscosidad, bastará solamente multiplicar el cambio de presión obtenido de las curvas por el factor 1.24.

Si por el contrario se varía la viscosidad del lodo manteniendo el peso constante y considerando como 100% el lodo de 14 op. se tiene el siguiente cuadro:

$\rho$	$\mu_p$	$\mu_p^{0.21}$	%
10	14	1.74	100
10	20	1.88	108
10	25	1.97	113
10	30	2.04	117
10	35	2.11	121
10	40	2.17	125
10	50	2.27	130
10	60	2.36	136

Igualmente, si en las curvas se lee el cambio de presión para un lodo de 14 cp. y se quiere conocer el cambio, para un lodo de 40 cp. y el mismo peso de 10 lb/gal., bastará multiplicar el cambio de presión obtenido de las curvas por el factor 1.25.

-----

## CAPITULO IV

### ESTIMACION Y CONTROL PRACTICOS DE LOS CAMBIOS DE PRESION. CONSTRUCCION DE CURVAS

---

Las curvas que serán construídas estarán en función del peso del lodo y del cambio de presión, para distintas viscosidades considerando una velocidad base de 18 segundos para bajar o sacar la tubería. Se hará uso de los factores obtenidos.

TUBERIA DE PERFORAR = 5"  $V_p = 600$  pies/min.

a).- Para  $D_h = 10"$

$\mu_p$	$\rho$	lbs/gal.
20	10	1.16
20	15	1.61
20	20	2.02
40	10	1.35
40	15	1.88
40	20	2.36
60	10	1.47



TUBERIA P.E.C. = 5"

TIEMPO = 18 SEGUNDOS PARA BAJAR (O SACAR) 90'

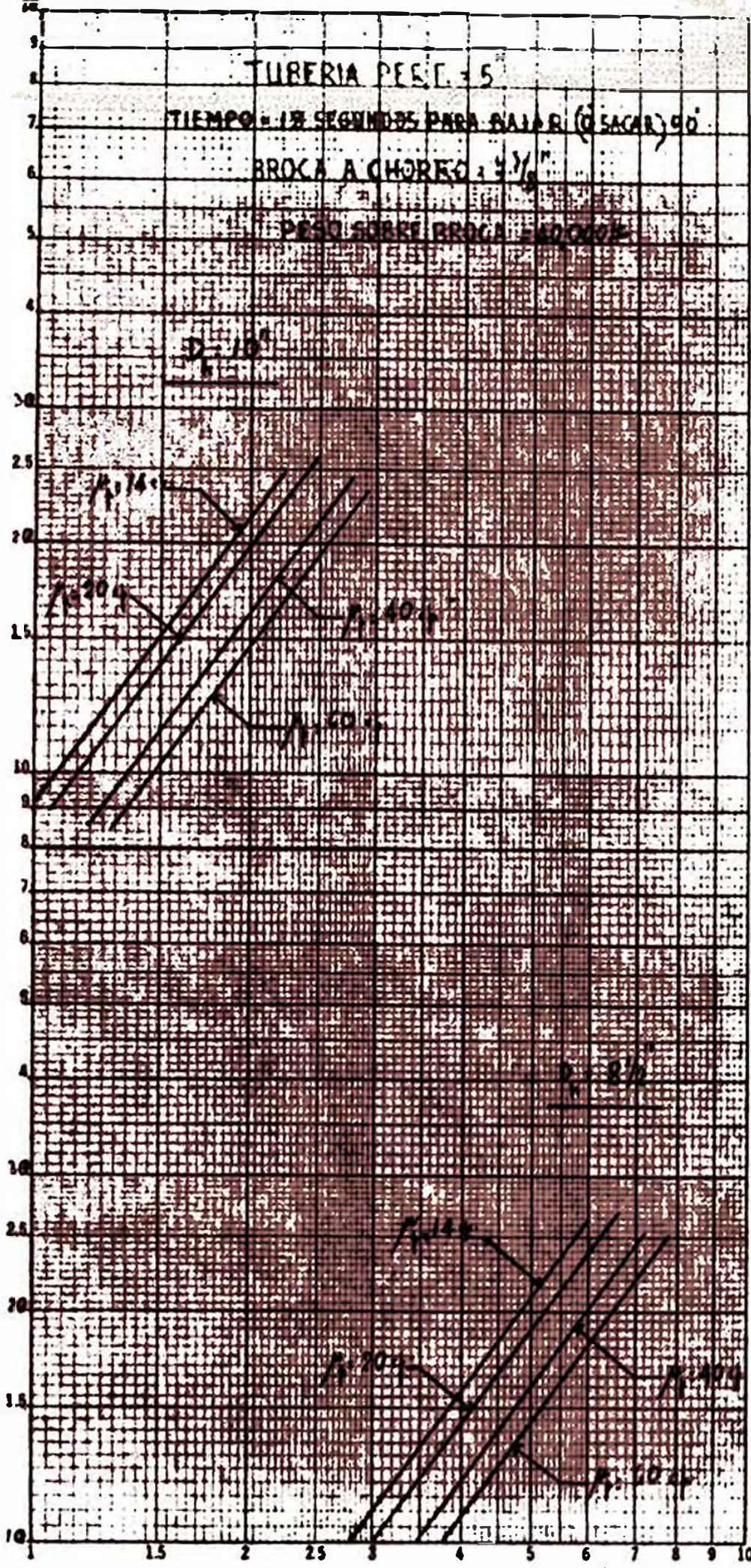
BROCA A CHOREO = 3 3/4"

PESO SOBRE BROCA = 4000 LB.

D = 10'

PESO DE LODO #/galon

PESO DE LODO #/galon



CAMBIO EN PESO EQUIVALENTE DE LODO #/galon

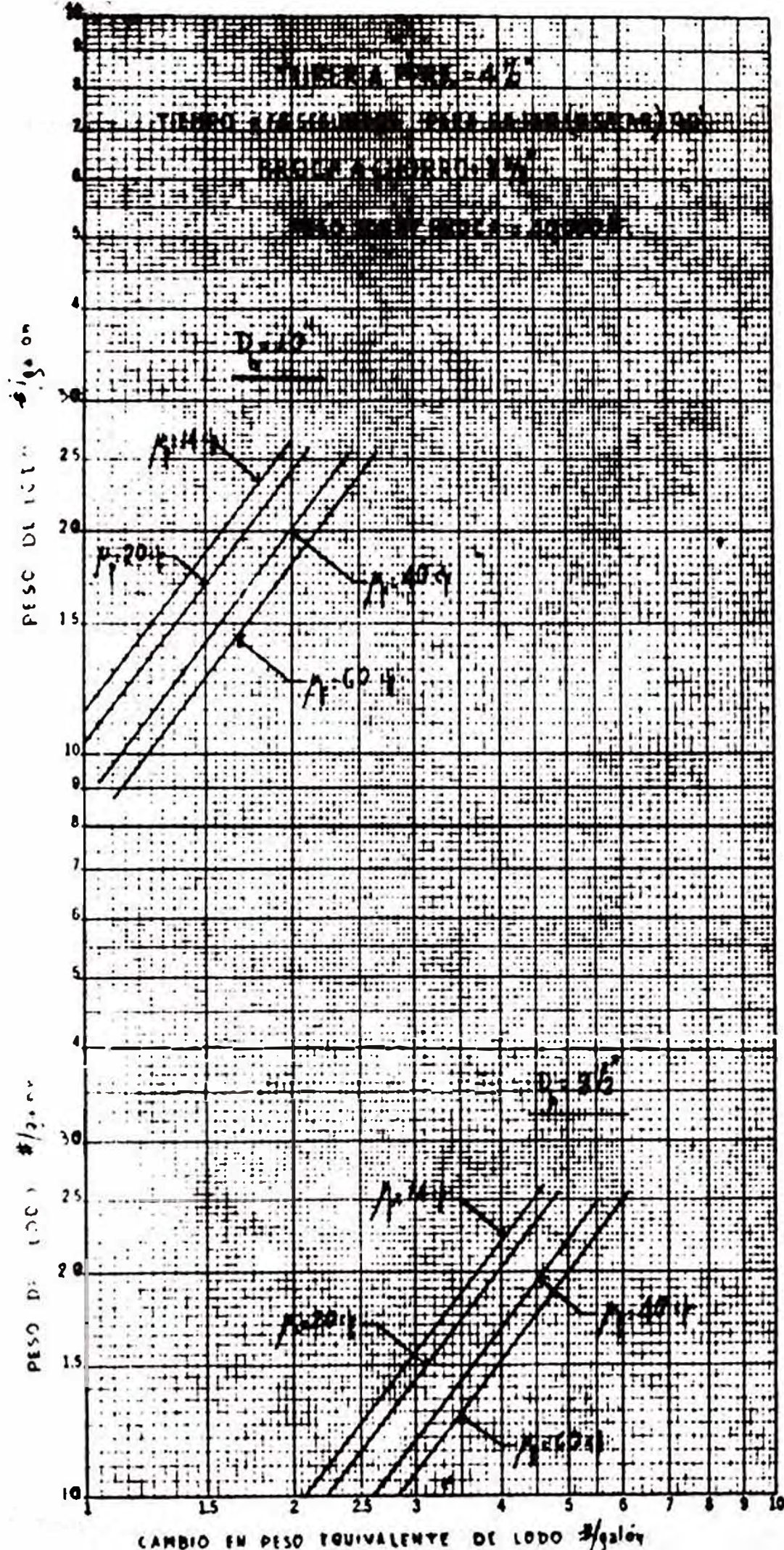
b).- Para  $D_h = 8 \frac{1}{2}"$

$\rho_p$	$\rho$	lbs/gal.
20	10	3
20	20	5.25
40	10	3.48
60	10	3.78

TUBERIA DE PERFORAR =  $4 \frac{1}{2}"$   $V_p = 600$  pies/min.

a).- Para  $D_h = 10"$

$\rho_p$	$\rho$	lbs/gal.
20	10	0.982
20	15	1.365
20	20	1.720
40	10	1.140
60	10	1.240



CAMBIO EN PESO EQUIVALENTE DE LODO #/galón

b).- Para  $D_h = 8 \frac{1}{2}''$

$\mu_p$	$\rho$	lbs/gal.
20	10	2.24
20	15	3.12
40	10	2.60
60	10	2.83

TUBERIA DE PERFORAR =  $3 \frac{1}{2}''$   $v_p = 600$  pies/min.

a).- Para  $D_h = 10''$

$\mu_p$	$\rho$	lbs/gal.
20	20	1.10
20	25	1.33
40	20	1.28
60	20	1.39

b).- Para  $D_h = 8 \frac{1}{2}''$

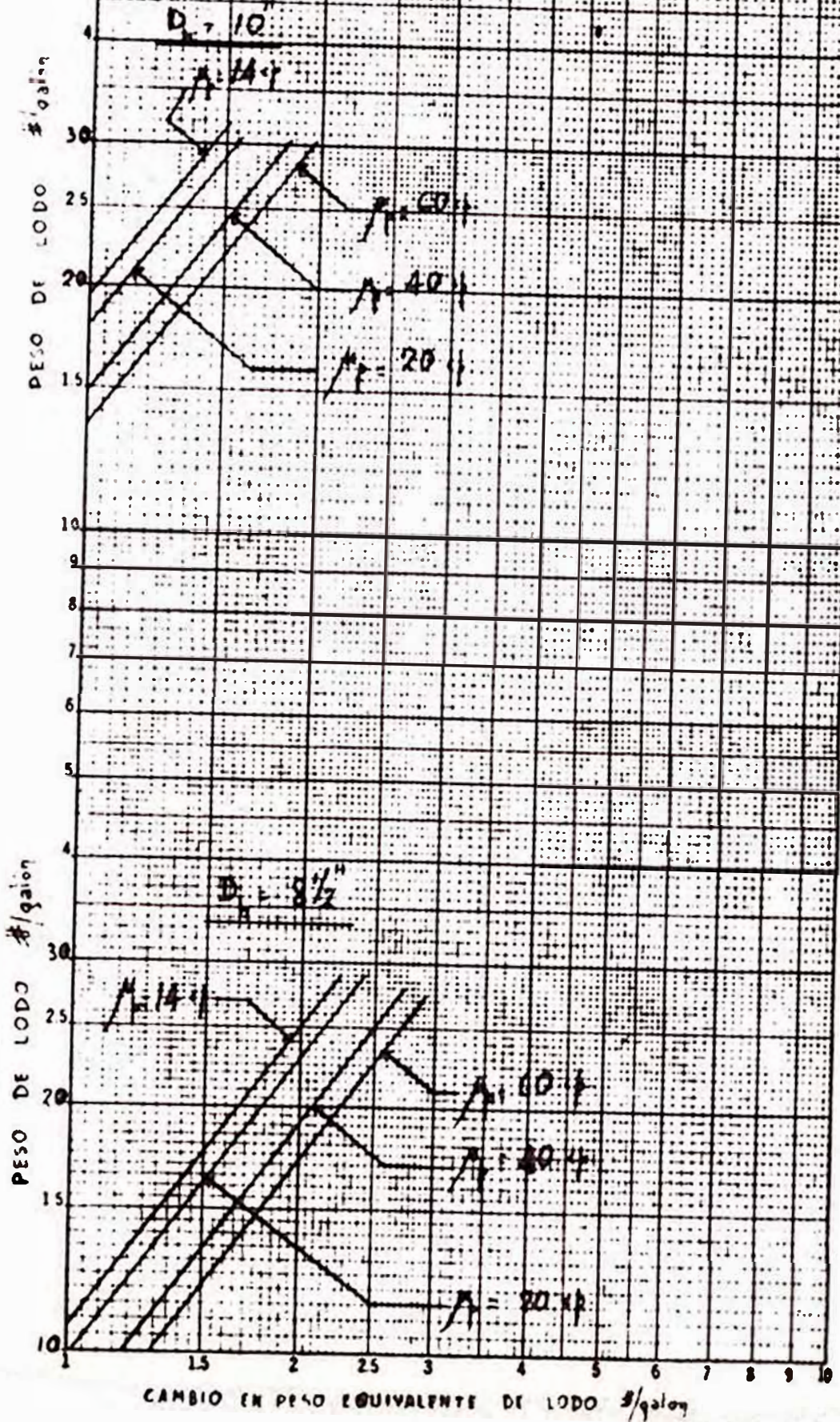
20	10	1.02
20	20	1.79
40	10	1.18
60	10	1.29

TUBERIA PERE = 3 1/2"

TIEMPO DE SEQUEDOS PARA BAJAS (O SEAR) 90'

BROCA A HORRO = 1 1/2"

PESO SOBRE BROCA = 4000 LB



El siguiente cuadro indica los factores que deben usar, para corregir el cambio de presión cuando se baja o saca la tubería de perforar a un tiempo diferente de 18 seg. ( $V_p = 600$  pies/min.)

t	$V_p$	$V_p^{1.8} \times 10^3$	FACTORES
13	840	182	1.82
15	720	139	1.39
18	600	100	1.00
25	420	55	0.55
36	300	28	0.28
60	180	11.5	0.115
90	120	5.5	0.055

-----

## CAPITULO V

### FACTORES QUE DETERMINAN LA MAGNITUD DE LOS CAMBIOS DE PRESION.

---

Las curvas y tablas anteriores indican claramente los distintos factores que afectan los cambios de presión. En primer término, es obvio que los cambios de presión son proporcionales a la longitud de tubería sumergida. Esto significa que mientras la operación de perforación sea más profunda, dichos cambios de presión serán más grandes. La longitud de la tubería es un factor que no se puede controlar, si un pozo tiene que ser perforado a 15,000 pies no se puede evitar tener 15,000 pies de tubería sumergida. Si los cambios de presión deben ser empujados, debe hacerse controlando los otros factores.

Considerando que el tiempo de la perforación y el costo fueran insignificantes, el factor más fácil de controlar sería la velocidad de bajada o sacada de la tubería. Analizando la fórmula para flujo turbulento donde:  $P_s = f (V_p)^{1.8}$ , se deduce que el cambio de presión prácticamente disminuye en la cuarta parte cuando la velocidad disminuye en la mitad. A cualquier grado que sea posible econó-

Por lo tanto, la velocidad de bajada o sacada de la tubería debe ser disminuida cuando pérdidas de circulación o reventones sean inminentes.

Por otra parte, menores serán los cambios de presión cuanto más pequeño sea el diámetro de la tubería y más grande sea el diámetro del pozo. Es decir, los cambios de presión están en razón inversa a la diferencia ( $D_h - D_o$ ). Los diámetros de la tubería y del pozo pueden ser más o menos controlados, pero ellos generalmente deben ser regulados en función de otras consideraciones. Sin embargo, algunas veces el tamaño nominal del pozo puede resultar afectado resultando entonces un tamaño real o actual del diámetro del pozo. Además es importante notar que cuando el hueco no es mucho más grande que la tubería, los cambios de presión son muy sensibles a las variaciones del tamaño del hueco. Así por ejemplo, con tubería de 4 1/2" en un hueco de 8", los cambios de presión serán incrementados aproximadamente en un 50% por un espesor de costra de 1/2" que reduce el tamaño efectivo del pozo a 7". Estas variaciones del tamaño del hueco, si pueden ser controlables. Es obvio deducir entonces, que los cambios de alta pérdida de filtrado afectan la magnitud de los cambios de presión, debido a la formación de un espesor de costra opuesta a la capa permeable, disminuyendo así el diámetro efectivo del pozo. La pérdida de filtrado deberá ser, pues, disminuida.



Los cambios de presión son proporcionales a la viscosidad plástica, al límite del esfuerzo al corte de Bingham y al peso específico del lodo. Sin embargo, en el flujo turbulento las variaciones de la viscosidad tienen poco efecto comparados con aquellos que son producidas por el peso del lodo. En el flujo laminar los cambios de presión son directamente proporcionales al límite del esfuerzo del corte de Bingham ( $\tau_0$ ). A medida que la perforación se haga más profunda, más énfasis debe ser puesto en las medidas de las propiedades del fluido de perforar, y todo esfuerzo para mejorar los métodos actuales de medida, va a ayudar a un control más exacto de estas variaciones de presión, permitiendo indudablemente menores pérdidas de circulación y menos reventones.

Finalmente, otro factor importante es el coeficiente de fricción entre el lodo y las áreas de contacto en el anillo, dicho coeficiente debe ser mínimo para disminuir la presión diferencial entre la presión cinética ( $P_k$ ) y la presión de los fluidos de la formación ( $P_f$ ). Cuando esta diferencial es muy grande, multiplicada por el área de contacto dará una fuerza de gran magnitud como para pegar la tubería a la pared del pozo. La ecuación ideal sería:

$$P_f - P_k < P_R$$

Donde:

$$P_x = P_h \pm P_s$$

$P_h$  - Presión hidrostática

$P_R$  - Presión de ruptura de la formación

\*\*\*\*\*

## CAPITULO VI

### APLICACIONES PRACTICAS DEL ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DE PRESION.-

---

- A).- Calcular el ~~cárgen~~ margen de seguridad en la densidad del lodo.
- B).- Calcular la velocidad de cascada de la tubería, para que la "succión por izaje" tenga un máximo práctico en relación con las presiones del reservorio.
- C).- Determinaciones de los límites, dentro de los cuales debe ser mantenido la presión del fondo del pozo para evitar los serios problemas de "pérdida de circulación" y "reventón"

Estos límites quedan definidos por:

Condición Normal.-  $P_p < P_k < P_R$

Condición ideal.-  $P_p = P_k < P_R$

- D).- Ahorro en material de lodo (baritina principalmente) que se puede lograr al usar solamente el peso exacto y no 0.5 lbs/gal. de más en pozos de 3,000 , 4,000 y 5,000 pies.
- E).- Ahorro en tiempo de perforación al usar lodo más liviano.

## CONCLUSIONES

- A).- La "Succión por Izaje" determinará el límite de velocidad de sacada de la tubería, para que no se produzcan reventones.
- B).- La "Presión por Bajada" determinará el límite de velocidad de bajada de la tubería para que no se produzcan pérdidas de circulación.
- C).- Los cambios de presión varían:
- a).- Con la velocidad de la tubería.
  - b).- Con las propiedades del lodo.
  - c).- Con la longitud de la tubería.
  - d).- Con los diámetros del hueco y tubería.
  - e).- Con las condiciones del flujo y el tipo de fluido.
- D).- La determinación de los cambios de presión, sirve para probar el lodo más liviano que se puede usar.
- E).- Las fórmulas desarrolladas contienen grandes errores cuando el lodo no se comporta como un plástico Bingham ideal.
- F).- La "Presión por Bajada" y la "Succión por Izaje" no ocurren úni

camente por debajo del extremo de la tubería. Ellos ocurren en todos los puntos de arriba a abajo en el pozo, declinando hacia cero en la superficie, y en condiciones especiales pueden ser del orden de miles de libras por pulgada cuadrada.

- G).- La "Succión por Izaje" es ligeramente menor que la "Presión por Bajada", debido a las limitaciones de la potencia en las velocidades de izaje, y además la lentitud de los motores es mucho más gradual que la aplicación del freno.

## N O M E N C L A T U R A

---

- A - Coeficiente de geometría empírico, flujo turbulento.
- $A_p$  - Aceleración de la tubería, pies/seg<sup>2</sup>.
- B - Coeficiente de geometría empírico, flujo laminar.
- D - Diámetro ó diámetro equivalente, pulgadas.
- $D_i$  - Diámetro interno de la tubería, pulgadas.
- $D_h$  - Diámetro del hueco, pulgadas.
- $D_p$  - Diámetro externo de la tubería, pulgadas.
- $D_e$  - Diámetro externo efectivo de la tubería, pulgadas.
- g - Aceleración de la gravedad, pies/seg<sup>2</sup>.
- L - Longitud de la tubería, pies.
- $N_R$  - Número de Reynolde.
- P - Presión, psi.
- $P_s$  - Cambio de presión, psi/1000 pies de tubería.
- $P_k$  - Presión cinética
- $P_f$  - Presión de los fluidos de la formación.
- $P_R$  - Presión de ruptura de la formación.
- $P_h$  - Presión estática del lodo.
- T - Tiempo, segundos.
- $V_a$  - Velocidad en el anillo, pies/minuto.
- $V_p$  - Velocidad de la tubería, pies/minuto.
- $v_c$  - Velocidad crítica, pies/seg.

- $\alpha$  = Coeficiente de apertura empírico, flujo turbulento.
- $\beta$  = Coeficiente de apertura empírico, flujo laminar.
- $\rho$  = Peso del lodo lbs/gal.
- $\tau_0$  = Límite al esfuerzo de corte de Bingham, lbs/100 pies<sup>2</sup>.
- $\mu$  = Viscosidad aparente, cp.
- $\mu_p$  = Viscosidad plástica, cp.
- $\xi$  = Esfuerzo de gel, lbs/pies<sup>2</sup>.

\*\*\*\*\*

## REFERENCIAS

---

- 1.- "Bottom Hole Pressure Surges while Running Pipe" .- Petroleum Engineer, 27, B-60 (1955), E.H. Clark, Jr.
  - 2.- "Wellbore Pressure Surges Produced by Pipe Movement".- AIME -- Transactions, 222, Pag. 595 (1961), J.A. Burkhardt.
  - 3.- "Pressure Changes in Drilling wells Caused by Pipe Movement" Drilling and Production Practice API (1953), Pág. 97.
  - 4.- "Results of a field test on circulating and surge pressures" World Oil, Pág. 57 (1962), L.E. Wilson.
  - 5.- "Rotary Drilling Hydraulics".- Petroleum Engineering Cap. 7 - Pág. 94.- Carl Gatlin.
  - 6.- "A Graphic View of Pressure Surges and lost Circulation".- Drilling and Production Practice, Pag. 424 (1956).- E.H. Clark Jr.
-