

01174

3 rej.

"HIDRAULICA DE FLUIDOS DE EMULSION
INVERSA EN PERFORACION ROTATORIA"

Créditos asignados a la tesis: 10

Jurado:

Firma:

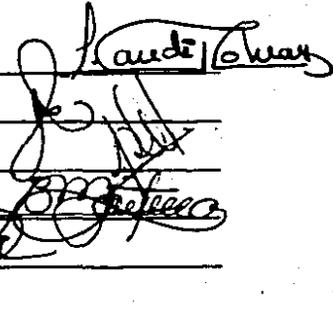
PRESIDENTE: M. EN I. PEDRO CAUDILLO MARQUEZ

VOCAL: ING. EUSEBIO CAPITANACHI GONZALEZ

SECRETARIO: M. EN I. CARLOS ISLAS SILVA

SUPLENTE: ING. BERNARDO MARTEL ANDRADE

SUPLENTE: DR. PEDRO SILVA LOPEZ

The block contains five handwritten signatures, each written over a horizontal line. The signatures are: 1. Pedro Caudillo Marquez (top), 2. Eusebio Capitanachi Gonzalez, 3. Carlos Islas Silva, 4. Bernardo Martel Andrade, and 5. Pedro Silva Lopez (bottom). The signatures are written in dark ink and are somewhat stylized.



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENPA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

Prof. PEDRO CAUDILLO MARQUEZ
P r e s e n t e

Comunico a usted que a propuesta del COORDINADOR DE LA
SECCION DE PETROLERA ha sido designado
como director de tesis del alumno(a) _____
EMILIO DE LA TORRE RAMOS para obtener el grado de
IN EN I EN PETROLERA.

Mucho he de agradecerle su comunicación, por escrito, de la
aceptación a esta designación y el nombre de la tesis a de-
sarrollar.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 24 de junio de 1987
EL JEFE DE LA DIVISION

Gallas
p. a. DR. GABRIEL ECHAVEZ ALDAPE

TESIS CON
FALLA DE GRADO

E.5.1

INDICE

	Pág.
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I	
PRUEBAS DE CAMPO. DESCRIPCION, CONDICIONES Y RESULTADOS.....	3
CAPITULO II	
PERDIDAS EN LA BARRENA.....	17
CAPITULO III	
AJUSTE DE UN MODELO REOLOGICO A LOS FLUIDOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS DE CAMPO.....	29
CAPITULO IV	
COMPARACION Y ANALISIS DE CAIDAS DE PRESION CALCULADAS CON EL MODELO VS. REALES DE PRUE BAS CE CAMPO.....	56
CAPITULO V	
OBTENCION DE CAIDAS DE PRESION EN EL SISTEMA BAJO CONDICIONES REALES DE FLUJO PERMANENTE Y EN ESTADO ESTABLE.....	83
CONCLUSIONES GENERALES.....	109
ANEXO DE COMPUTACION.....	111

INTRODUCCION

Debido a la importancia que los fluidos de emulsión inversa han ido cobrando en la perforación de pozos petroleros, se realizó este estudio de hidráulica sobre dichos fluidos y de esta manera contribuir a la solución de problemas relacionados -- con ellos, que la gerencia de perforación de PEMEX debe enfrentar en sus operaciones de campo.

El objetivo principal del trabajo es la determinación de caídas de presión en la sarta, un objetivo secundario es la comprobación de las fórmulas tradicionalmente usadas para calcular las caídas de presión en la barrena.

El primer problema por resolver consiste en ajustar un modelo reológico al comportamiento real del fluido, una vez logrado esto se podrán obtener las caídas de presión en el interior y espacio anular de una tubería. Con este fin se efectuaron mediciones reológicas a los fluidos en estudio y posteriormente se compararon las caídas de presión obtenidas en pruebas hidráulicas de campo con las calculadas en base al modelo ajustado.

Se analizan los parámetros que difieren en pruebas de laboratorio y campo, y se llega a la obtención de caídas de presión reales bajo condiciones de flujo permanente y estado estable.

En este trabajo no se pretende obtener una expresión que calcule caídas de presión con una exactitud del 100%, ya que es to implicaría un estudio muy extenso el cual tendría que incluir temas como transferencia de calor en fluidos no-Newtonianos en condiciones dinámicas y variación de propiedades reológicas en relación a presión y temperatura. Si consideramos que los manómetros instalados en los equipos de perforación son de un rango de 0-6,000 psi. y que la exactitud de las lecturas obtenidas -- son del rango de ± 50 psi, se puede afirmar que una aproximación dentro del rango ± 50 psi, es completamente aceptable en operaciones de campo.

La comprensión de la mecánica que gobierna estos fluidos -- es de primordial importancia para la adecuada planeación y ejecución de la perforación de pozos petroleros.

CAPITULO I

PRUEBAS DE CAMPO. DESCRIPCION, CONDICIONES Y RESULTADOS

Para conocer el comportamiento de los lodos de emulsión inversa se diseñaron dos series de pruebas, la segunda serie es consecuencia de las dudas que surgieron después del análisis de la información obtenida en la 1ª serie.

Todos los lodos de emulsión inversa que se utilizan en --- PEMEX son fabricados en base diesel, por lo tanto todas las --- pruebas efectuadas fueron en lodos con dicha base.

Para la primera serie de pruebas se seleccionaron dos pozos con geometría y sarta muy similares, pero con lodos de marca diferente con objeto de detectar posibles diferencias en su comportamiento.

Los dos pozos escogidos para la primera serie de pruebas fueron el Chacuaco #1 y el Caletón #1, el primero con lodo DRILEX, de 2.05 gr%c.c. de densidad y el segundo con lodo PERFOIL con 1.84 gr%c.c. de densidad.

Ambas pruebas se efectuaron con unidades de alta presión con objeto de medir los gastos con la mayor exactitud posible,-

para esto se utilizaron cronómetros Baroid con una precisión de 1/5 de segundo.

La presión fue medida con un manómetro Martin DEcker de -- rango 0 - 5,000 PSI, con amortiguador de vibraciones, colocado en la línea de bombeo entre las unidades de alta presión y el stand-pipe del equipo.

Es importante mencionar que en todos los casos cuando se mencionan pérdidas en conexiones superficiales, se refiere a pérdidas en las conexiones que van desde las unidades de alta presión, al standpipe, cuello de ganso y finalmente la flecha de perforación (kelly), las cuales son obviamente superiores a las normales del equipo, operando con sus propias bombas.

Todas las mediciones se efectuaron dentro de la tubería de revestimiento para conocer con exactitud las dimensiones del espacio anular.

En las dos primeras pruebas se contó con tubería de revestimiento de 10 3/4" de diámetro nominal y 50.7#/pie de peso, -- lastrabarrenas de 7 1/4" de diámetro exterior por 2 13/16" de diámetro interior y tubería de pared gruesa de 5" tamaño nominal -- (Hevi-Wate).

En el pozo Chachuaco #1 se tenía tubería de perforación --

5 X.H., 19.5 #/pie, grados E y X, clase Premium. En el Caletón #1 tubería de perforación 5" X.H., 19.5 H/pie, grado G, clase Premium.

En ambos casos se midió la temperatura del fluido en las cajas de las unidades de alta presión antes de comenzar a bombear, y se tomaron muestras del lodo para su posterior análisis.

En todos los casos antes de iniciar las pruebas se probaron conexiones superficiales con 3,000 PSI y se estableció circulación después de cada movimiento de tubería.

En las dos primeras pruebas (Chacuaco #1 y Caletón #1), los gastos utilizados en las mediciones estuvieron en el rango de 1 - 10 bl/min.

El procedimiento de medición consistía en alcanzar un gasto predeterminado y establecer un flujo permanente, una vez establecido el flujo permanente se leía la presión de bombeo, la operación se repetía hasta completar la tabla de 1-10 bl/min.

En el pozo Chacuaco #1 la primera prueba se hizo en conexiones superficiales, posteriormente se conectó una barrena de 9½" con dos toberas de 18/32 y una tapada y se efectuó la 2ª prueba.

La 3er prueba se efectuó con barrena y 196 m de la Lastrabarrenas mencionada, la 4a con barrena, 196 m de lastrabarrenas y 137 m de tubería de pared gruesa de 5" (Hevi-wate).

La 5a. 6a y 7a pruebas se efectuaron con barrena, lastrabarrenas tubería de pared gruesa y tubería de perforación, con la barrena estacionada a 1,000, 2,000 y 3,000 m de profundidad respectivamente.

En el pozo caletón # 1 se hicieron básicamente las mismas pruebas, sólo que aquí se comenzó la primera prueba con la barrena estacionada a 4,000 m, la 2a, 3a y 4a pruebas se efectuaron con la barrena estacionada a 3,000, 2,000 y 1,000 m respectivamente, la 5a prueba fue con barrena, 222 m de lastrabarrenas y 138 m de tubería de pared gruesa, la 5a con barrena y los 222 m de lastrabarrenas.

En el pozo Caletón #1 se efectuaron pruebas en dos tipos de barrenas una de diamante y otra tricónica con toberas.

La barrena de diamante (policristalino) era marca ACC, tipo RT_23 con 8 vías de agua de 3/8" de ancho por 0.328" de profundidad.

Fue esta barrena de diamantes la que estuvo conectada durante las pruebas 1 a 7 en el Caletón # 1.

La 7a prueba fue precisamente con barrena de diamantes y -
conexiones superficiales solamente.

La 8a prueba se hizo con una barrena tricónica con dos to-
beras de 13/32" y una de 14/32", y la 9a prueba se efectuó en -
conexiones superficiales solamente.

Las tablas de los resultados de las pruebas del Chachuaco-
#1 y Caletón #1 se presentan al final del capítulo.

Después de analizar los resultados obtenidos en las prue--
bas mencionadas, y debido principalmente a la influencia tan --
grande que la temperatura mostró en el comportamiento del flui-
do (punto que se analizará con detenimiento en los subsecuentes
capítulos), se decidió efectuar una 2a serie de pruebas, en dos
pozos más, tratando de eliminar en lo posible el efecto de la -
temperatura.

Por otro lado habiendo obtenido ya resultados concluyentes
en lo referente a caídas de presión en la barrena -(Capítulo III)
y con el objeto de aislar en lo posible el fenómeno de caídas de
presión en la sarta, esta 2a serie de pruebas se efectuó sola--
mente con un tipo de tubería a la vez, lastrabarrenas, tubería-
de pared gruesa, tubería de perforación francas y finalmente co-
nexiones superficiales. Como se aprecia, el único ruido que no
es posible eliminar es el de conexiones superficiales.

Los dos pozos escogidos para esta segunda serie de pruebas fueron el Ocuapan # 201-A y el Luna # 33.

El Ocuapan # 201-A contaba con tubería de revestimiento de 9 5/8" de diámetro nominal y 47 #/pie de peso, y el Luna #33 -- también con tubería de revestimiento de 9 5/8" y 53.5 #/pie de peso.

En ambos casos se hicieron 4 pruebas, la primera con las-- trabarrenas de 6½" de diámetro exterior y 2 13/16" de diámetro interior, la segunda con tubería de pared gruesa de 5", la tercera con tubería de perforación de 5" X.H., 19.5 #/pie de peso, grado E, clase premium y la 4a con conexiones superficiales.

El bombeo se llevó a cabo en la misma manera que se describió anteriormente, sin embargo, se amplió el rango de bombeo de 20 bl/min o lo máximo permisible por las dos unidades de alta presión a toda su capacidad, la razón para computar gastos grandes fue el determinar si el comportamiento del fluido tuviera variaciones.

Se monitoreó la temperatura de entrada y salida en todas las pruebas de manera constante.

Las pruebas se hicieron a menos de 200 m de profundidad -- con el objeto de eliminar en lo posible el efecto temperatura --

eliminándose de paso también el efecto presión.

Se verificó que los termómetros utilizados marcaran correctamente las posibles diferencias de temperaturas de entrada y salida, y también se tomaron muestras del lodo para su posterior análisis.

Al igual que con el Chacuado #1 y Caletón #1, se escogieron pozos de geometría similar, pero lodos de distinta marca, - el Ocuapan # 201-A con lodo perfoil de 2.01 gr/c.c. de densidad y el pozo Luna # 33 con lodo DRILEX de densidad 1.67 gr/c.c.

Las tablas de resultados de los pozos Ocuapan # 201-A y Luna # 33 están a continuación de las de los pozos Chacuaco # 1 y Caletón # 1 al final del capítulo (Tablas 1-17 a 1-24).

Q (gal/min)	P (psi)
360	500
315	370
280	270
229	185
194	170
168	128
140	100

Tabla 1-1.- Gastos y caídas de Presión en Conexiones superficiales (pozo chachuaco #1)

Q (gal/min)	P (psi)
336	1150
303	975
252	650
194	284
168	375
140	200

Tabla 1-2.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y una barrena tricónica con 2 toberas de 18/32" y una tapada. (Pozo chacuaco #1).

Q (gal/min)	P (psi)
388	1800
348	1550
240	900
210	660
174	550
126	490
84	250
42	175

Tabla 1-3.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales, barrena y 197 m de lastrabarrenas. (Pozo Chacuaco # 1)

Q (gal/min)	P (psi)
388	1825
336	1600
297	1500
247	900
210	775
168	500
126	350
84	300
42	190

Tabla 1-4.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales, barrena, 197 m de lastrabarrenas y 137 m de tubería de pared gruesa (Hevi-Wate). (Pozo chacuaco #1).

Q (gal/min)	P (psi)	Q (gal/min)	P (psi)
388	2400	360	2350
336	2200	306	2100
306	1950	252	1650
246	1200	210	900
210	1050	168	750
171	700	126	580
126	500	84	400
84	420	42	250
44	250		

Tabla 1-5.- Gastos y caídas de presión con la barrera estacionada a 1,000 m. (Pozo Chacuaco #1).

Tabla 1-6.- Gastos y caídas de presión con la barrera estacionada a 2,000 m. (Pozo Chacuaco #1).

Q (gal/min)	P (psi)
338	2425
297	2050
246	1200
210	1100
168	850
126	630
84	510
42	330

Tabla 1-7.- Gastos y caídas de presión con la barrera estacionada a 3,000 m. (Pozo chacuaco # 1).

Q (gal/min)	P (psi)
509	900
420	650
376	500
350	450
307	400
252	300
203	190
173	175
124	120

Tabla 1-8.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales (Pozo Caletón # 1)

Q (gal/min)	P (psi)
422	1500
367	1200
336	1000
290	850
238	500
218	320
129	200
84	100
42	70

Tabla 1-10.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales, barrenas y 222 m de lastrabarras (Pozo Caletón # 1).

Q (gal/min)	P (psi)
435	1000
374	750
340	600
268	450
250	430
210	300
168	280
125	150
84	140
42	100

Tabla 1-9.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y barrenas de diamantes policristalino Marca ACC, Modelo RT-23. (Pozo Caletón #1).

Q (gal/min)	P (psi)
416	2000
374	1800
345	1500
298	1050
225	600
200	550
168	380
133	300
79	150

Tabla 1-11.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales, barrenas, 222m de lastrabarras y 138 m de tubería de pared gruesa (Hevi-Wate) (Pozo Caletón #1).

Q (gal/min)	P (psi)
423	2100
374	1900
338	1600
297	1200
238	830
206	600
168	480
132	450
84	350
44	200

Tabla 1-12.- Gastos y caídas de presión con la barrera estacionada a 1,000 m. (Pozo Caletón #1).

Q (gal/min)	P (psi)
420	2300
390	2100
357	2000
300	1500
240	900
203	750
148	650
126	550
84	400
42	180

Tabla 1-13.- Gastos y caídas de presión con la barrera estacionada a 2,000 m de profundidad (Pozo Caletón #1).

Q (gal/min)	P (psi)
420	2350
361	2000
336	1800
296	1700
258	1250
210	950
168	650
126	450
84	250
46	150

Tabla 1-14.- Gastos y caídas de presión con la barrera estacionada a 3,000 m. (Pozo Caletón # 1)

Q (gal/min)	P (psi)
365	2500
336	2250
296	1700
240	1050
210	900
168	800
126	500
84	350
42	150

Tabla 1-15.- Gastos y caídas de presión con la barrera estacionada a 4,000 m. (Pozo Caletón # 1).

Q (gal/min)	P (psi)
414	2000
376	1720
336	1550
291	1120
247	800
210	500
178	420
118	290
82	100
42	80

Tabla 1-16.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y una barrena tricónica con 2 toberas de 13/32" y una de 14/32" (Pozo Caletón # 1).

Q (gal/min)	P (psi)
484	800
406	700
360	550
315	450
280	350
252	300
210	250
158	180

T.E. = 102°F.

T.S. = 103°F.

Tabla 1-17.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales (Pozo Ocuapan # 201-A).

Q (gal/min)	P (psi)
434	1300
360	800
315	650
274	500
252	400
210	300
168	200
126	170

T.E. = 104°F.

T.S. = 106°F.

Tabla 1-19.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y 137 m de tubería de pared gruesa de 5" (Hevi-Wate de 5") (Pozo Ocuapan # 201-A).

Q (gal/min)	P (psi)
504	1450
406	1000
307	700
280	600
242	500
210	400
163	200
126	150

T.E. = 104°F.

T.S. = 106°F.

Tabla 1-18.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y 136 m de lastrabarreras de 6½" x 2 13/16" (Pozo Ocuapan # 201-A).

Q (gal/min)	P (psi)
484	900
370	650
307	450
286	400
206	250
163	200
126	150

T.E. = 102°F.

T.S. = 104°F.

Tabla 1-20.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y 141 m de tubería de perforación de 5", 19.5 #/pie, grado-E (Pozo Ocuapan # 201-A).

Q (gal/min)	P (psi)
840	1890
718	1700
621	1175
558	900
504	750
407	700
357	600
315	450
277	350
247	300
210	220
168	180

T.E. = 116°F.

T.S. = 117°F.

Tabla 1-21.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales (Pozo Luna # 33).

Q (gal/min)	P (psi)
826	2550
720	2000
698	1850
542	1175
466	1100
393	950
350	700
286	500
252	400
210	300
165	200

T.E. = 116°F.

T.S. = 119°F.

Tabla 1-22.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y 129 m de lastrabarrenas de 6 1/4" - R 2 13/16" (Pozo Luna #33).

Q (gal/min)	P (psi)
848	2100
720	1925
500	1025
434	900
340	600
315	550
252	400
203	250
163	200

T.E. = 114°F.

T.S. = 116°F.

Tabla 1-23.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y 107 m de tubería de pared gruesa de 5" (Hevi-Wate de 5") (Pozo Luna # 33)

Q (gal/min)	P (psi)
700	1725
615	1300
548	950
504	825
420	800
370	650
315	480
252	320
210	230
168	190

T.E. = 116°F.

T.S. = 118°F.

Tabla 1-24.- Gastos y caídas de presión en conexiones superficiales y 141 m de tubería de perforación de 5", 19.5 #/pie, grado-E (Pozo Luna # 33).

CAPITULO II

PERDIDAS EN LA BARRENA

Aunque no es el objetivo primordial de esta tesis el estudio de pérdidas en la barrena, debido a que en las dos primeras series de pruebas fue necesario calcular dichas pérdidas, se estimó conveniente verificar las fórmulas establecidas para calcular las caídas de presión en la barrena.

No obstante haberse efectuado cálculos de caídas de presión en dos barrenas tricónicas con toberas y en una de diamantes, en este capítulo se analizarán primordialmente las pérdidas en las toberas, limitándonos solamente a mostrar los resultados obtenidos en la barrena de diamante y señalar los aspectos más sobresalientes al respecto.

El proceso de pérdida de presión en una tobera es esencialmente una transformación de energía potencial (presión) a energía cinética (velocidad), más una pequeña pérdida por fricción.

La expresión que define la pérdida de presión en una tobera⁽¹⁾ es:

$$Q = C A \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \text{ ----- (2.1) Despejando } P \text{ en (2.1)}$$

$$\Delta P = \frac{\rho v^2}{2C^2} \text{ ----- (2.2) o bien}$$

$$\Delta P = \frac{\rho Q^2}{2C^2 A^2} \text{ ----- (2.3)}$$

En la Ecuación (2.2) si la densidad es constante y la velo cidad también (flujo permanente), lo único que nos quedará por-determinar será el coeficiente de fricción C.

De la ecuación (2.2) ó (2.3), se deduce que la pérdida de- presión en las toberas es independiente de las condiciones reo- lógicas del fluido.

El coeficiente de fricción en una tobera dependerá de la - forma que ésta tenga⁽²⁾, entonces si a la velocidad y densidad- las consideramos constantes y asumiendo que todas las toberas - (estándares) tienen la misma forma, lo único que nos resta por- hacer es calcular dicho coeficiente y corroborar el valor $C=0.95$ usado en la literatura^{(3),(4)} para nuestro caso.

Despejando C de la ecuación (2.2) obtenemos:

$$C = \sqrt{\frac{\rho v^2}{2 \Delta P}} \text{ ----- (2.4)}$$

Para obtener la caída de presión en la barrena, utilizaremos los datos obtenidos en las tablas 1-1 y 1-2 del pozo Chacuco #1 y las 1-8 y 1-16 del pozo Caletón # 1, el procedimiento consiste en restar a la presión de barrena y conexiones superficiales, la presión obtenida en conexiones superficiales sin barrena.

Posteriormente substituiremos los valores de ΔP , ρ y V en la ecuación (2.4) y obtenemos C.

Existen ciertas consideraciones de carácter práctico sin embargo que deberán considerarse.

En primer lugar los gastos obtenidos en las tablas 1-1, 1-2 y 1-8, 1-16 no son exactamente los mismos, esto es debido a que ajustar a un gasto exacto predeterminado en flujo permanente, trabajando con dos unidades de alta presión simultáneamente es muy tardado y por lo mismo impráctico.

Sin embargo el hecho de que los gastos obtenidos no sean exactamente los mismos no implica que éstos sean imprecisos.

La imprecisión de los gastos recabados se considerará del rango de $\pm 1/5$ de seg/barril, que en el caso de 420 gal/min ó 6 seg/bl será de 3.5% como máximo, en el caso de 252 gal/min o 10 seg/bl será del 2% como máximo, gastos menores tendrán errores máximos aún menores.

Lo anterior será cierto no sólo para los gastos recabados en barrena y conexiones superficiales, sino para todos los gastos recabados en los cuatro pozos.

Para poder obtener las diferencias de presiones a cualquier gasto deseado se decidió ajustar los gastos y presiones de las tablas 1-1 y 1-8 (conexiones superficiales) a curvas del tipo $P=k Q^m$ para esto se elaboró un programa de cómputo en lenguaje-BASIC para ajustar los puntos por medio de una serie de linealización de Taulor (programa que se utilizará posteriormente en el capítulo IV).

El programa se presenta en el Anexo de este trabajo. Para las conexiones superficiales del pozo Chacuaco #1 se obtuvieron los siguientes parámetros: $k = 0.00464$ y $m = 1.963$, y para las del Caletón # 1: $K = 0.03794$ y $m = 1.6125$.

La medida aritmética del error, el promedio de porcentaje de error y las desviaciones estándares fueron respectivamente: $\bar{E} = -2.73$, $\% \bar{E} = -4.0$, $SD = 18.64$ psi y $\bar{E} = -3.02$, $\% \bar{E} = -3.22$, $SD = 23.03$ psi.

Donde las fórmulas utilizadas para definir dichos parámetros son:

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{n} \text{ ----- (2.5)}$$

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{n} \quad (2.6) \quad y$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \quad (2.7)$$

La medida más indicativa ya que nos muestra la dispersión de los puntos respecto a la curva ajustada, es la desviación estándar.

Esta medida nos indica en este caso, que los puntos están muy poco dispersos en relación a la curva, si además consideramos que 20 psi no son leebles en el manómetro utilizado, podemos considerar tan válidas las presiones obtenidas por medio de la expresión $p = k Q^m$, como las leídas en el manómetro, siempre y cuando se esté dentro del rango de gastos y presiones dentro del cual se efectuó el ajuste.

La otra consideración del tipo práctico muy importante es la precisión del manómetro utilizado.

Como ya se dijo se utilizó un manómetro con graduación de 0 - 5,000 PSI, con amortiguador de vibraciones, con una escala de separación mínima de 100 psi, es evidente por lo tanto que aproximaciones de menos de 50 psi son meras suposiciones apreativas, si además tomamos en cuenta el error propio del instrumento, tendremos en la realidad un error acumulado aún mayor.

En rangos bajos de presión (menos de 250 psi) el error del instrumento aumentará considerablemente, ya que no fue diseñado para operar en dichos rangos y por lo tanto su confiabilidad es menor.

Es por las dos razones anteriores principalmente, que a lo largo de toda esta tesis se trabajará con tendencias, los puntos que se disparen de la tendencia general serán deshechados, por otro lado puntos con lecturas de presión de menos de 250 psi se considerarán con un menor peso específico que los demás y puntos con lecturas de presión de menos de 125 psi no se considerarán.

Se elaboró un programa de cómputo en lenguaje BASIC para obtener el coeficiente de fricción en las toberas, las pérdidas en conexiones superficiales se obtuvieron en base a las curvas-tipo $P = k Q^m$ mencionadas con anterioridad y las pérdidas conjuntas de barrena y conexiones superficiales de las tablas 1-2- y 1-16.

El programa se presenta en el anexo de este trabajo y los resultados obtenidos en las tablas 2-1 y 2-2 al final del capítulo.

Como se puede observar en las tablas 2-1 y 2-2, eliminando los puntos que se salen de la tendencia general, en la barrena del pozo Chacuaco #1, $C = 0.925$ y en la del Pozo Caletón #1, --

$C = 0.956.$

Las toberas utilizadas en el pozo Chacuaco #1 habrían sido usadas en varias barrenas anteriores y aunque no se apreciaba - visualmente ningún desgaste, es probable que éste existiera y - fuera la causa del coeficiente menor al normalmente supuesto.

Las toberas de la barrena utilizada en el pozo Caletón eran nuevas y fueron utilizadas por primera vez en la prueba.

Por lo tanto en capítulos posteriores cuando se requiera -- calcular caídas de presión en barrenas con toberas, se utilizarán las ecuaciones (2.2) ó (2.3), con un valor de $C = 0.95$, normalmente utilizado.

En lo referente a barrenas de diamante, las caídas de presión (Tabla 1-9) no podrán obtenerse por medio de las fórmulas (2.2) ó (2.3).

El obtener una área de flujo equivalente, referente a dimensiones y número de vafas de agua (la barrena utilizada en el Caletón #1 tenía 8 vfas de circulación de 3/8" de ancho por --- 0.328" de profundidad, lo cual arroja una área equivalente de - 0.7728 pulg²), y aplicar las fórmulas (2.2) ó (2.3) con $C = 0.95$ nos llevará por lo general a resultados erróneos, como puede -- comprobarse en este caso donde las caídas de presión calculadas con el método mencionado son consistentemente mayores a las reales (Tabla 2-3).

En capítulos posteriores para calcular caídas de presión - en la sarta, donde se utilizó la barrena de diamantes, se ajustaron caídas en barrena y conexiones superficiales (Tabla 1-9), a una curva del tipo $P = k Q^m$ con el programa mencionado.

Los parámetros obtenidos son: $k = 0.0415$ y $n = 1.667$, el promedio o media aritmética del error fue $\bar{E} = -2.89$, el promedio del porcentaje de error $\% \bar{E} = -2.67$ y la desviación estándar $SD = 25.4$ psi, al igual que en los ajustes anteriores la dispersión de puntos es pequeña y se pueden considerar tan válidos -- estos valores como los obtenidos físicamente.

La caída de presión en una barrena de diamantes, dependerá del número de vías de agua y las dimensiones de éstas, del tipo de formación que esté perforando y el peso aplicado sobre la -- misma.

La caída de presión en una barrena de diamantes suspendida (sin tocar fondo), será diferente a la caída de presión cuando se le aplica peso y perfora, en el segundo caso será mayor y -- esa diferencial dependerá del peso aplicado y el tipo de formación perforado.

CONCLUSIONES

No obstante los resultados obtenidos en el pozo Chacuaco #1 no existe ninguna evidencia significativa de que el coeficiente

de fricción en la tobera de 0.95, recomendado por la mayoría de la literatura no sea el correcto, mas bien al contrario. Los resultados obtenidos en la barrena del pozo Caletón #1 concuerdan con el coeficiente de 0.95 de una manera notable, sobre todo si se toman en cuenta las consideraciones de tipo práctico ya mencionadas en lo referente a posibles errores de precisión en las lecturas obtenidas.

En lo referente a barrenas de diamante concluimos, lo, la fórmula (2.1) no es aplicable y 2° la manera más confiable de conocer las caídas de presión en las mismas serán medirlas físicamente en el equipo, la diferencial de presión debida al peso aplicado para perforar también deberá calcularse en el sitio y momento de su operación.

No.	Q (gal/min)	C
1	336	0.93
2	303	0.90
3	252	0.93
4	168	0.77
5	140	0.94

$\bar{C} = 0.925$, sin punto No. 4.

Tabla 2-1.- Gastos y coeficientes de fricción en las toberas de la barrena del pozo chacuaco # 1 (2 toberas de 18/32") y su promedio (C) excluyendo el punto No. 4.

No.	Q (gal/min)	C
1	414	0.97
2	376	0.95
3	336	0.88
4	247	0.93
5	210	1.07
6	178	0.96
7	118	0.71
8	182	0.97

$\bar{C} = 0.954$ (de los 8 puntos)

$\bar{C} = 0.956$, sin puntos 3, 5 y 7.

Tabla 2-2.- Gastos y coeficientes de fricción en las toberas de la barrena del pozo Caletón # 1 (2 toberas de 13/32" y una de 14/32") y sus promedios para los 8 puntos y excluyendo los puntos 3, 5 y 7 (Pozo Caletón #1).

Q (gal/min)	Pc (psi)	Pm (psi)
435	444	318
374	328	216
340	271	142
268	169	138
210	103	89
126	37	30

Pc = Presión calculada con Ec.(3.2) y
C = 0.95.

Pm = Presión medida en el equipo.

Tabla 2-3.- Comparación de la presión calculada con la ecuación (3.2) y un coeficiente de fricción C = 0.95 y la presión medida en el equipo de una barrena de diamantes policristalino, marca-ACC, modelo RT - 23, con sus respectivos gastos (Pozo Caletón - # 1).

NOMENCLATURA

A = Area de Tobera

C = Coeficiente de fricción de toberas

\bar{C} = Promedio de valores de coeficiente de toberas

\bar{E} = Promedio de error

$\% \bar{E}$ = Promedio de porcentaje de error

P = Presión

Q = Gasto

SD = Desviación estándar

p = Densidad del fluido

REFERENCIAS

- (1) Streeter, V. L., Mecánica de Fluidos, Libros McGraw-Hill, México, Cuarta edición, (1974), p. 459.
- (2) Eckel, J. R. and Bielstein, J.W., Nozzle Design and its Effect on Drilling Rate and Pump Operation, Humble Oil Refining, Co., Beaumont, Tx., Marzo, 1951, p. 28 - 39.
- (3) Moore, P.L., Drilling Practices Manual, The Petroleum Publishing, Co. Tulsa, Oklahoma, (1974), p. 226.
- (4) Adams, N. J. Drilling Engineering, Penn Well Publishing, Co. Tulsa, Oklahoma, (1985), p. 702.

CAPITULO III

AJUSTE DE UN MODELO REOLOGICO A LOS FLUIDOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS DE CAMPO

Como ya se mencionó en todas las pruebas de campo se tomaron muestras que posteriormente se analizaron en el laboratorio.

En los dos primeros pozos (Chacuaco #1 y Caletón #1), las pruebas a las muestras se hicieron con un viscosímetro rotacional Fann modelo 35-A, de 12 velocidades y una termocopa Macgobar-Dresser con graduación de 0 a 250°F, la temperatura se midió con un termómetro marca Baroid modelo 4200 con graduación de 2-220°F (Igual al utilizado en el campo para medir las temperaturas del lodo en los cuatro pozos).

En las muestras de los dos últimos pozos (Ocuapan # 201-A y Luna #33) se utilizó el mismo equipo, con excepción del viscosímetro que en este caso fue un Fann modelo 35 de 6 velocidades.

En las muestras del pozo Chacuaco #1 se tomaron sus propiedades reológicas a 90, 120 y 150°F, de temperatura, en las del Caletón #1 a 100, 120 y 150°F.

Las temperaturas escogidas son en primer lugar la temperatura de entrada al pozo medida durante la prueba (en las caídas de la unidad de alta presión), la 2a es la temperatura de sali-

da del pozo que se reportó mientras se perforaba (en estado estable) y la tercer temperatura es la máxima estimada que se tendría (a la salida), si el equipo perforara a su máxima capacidad.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3-1 a 3-6.

Para obtener el esfuerzo de corte (T_b) y la velocidad de corte (γ_w) en el viscosímetro Fann 35-A, ⁽¹⁾ en fluidos no-Newtonianos que obedecen el modelo de Ostwald-DeWeale (Ley de potencias).

a) El esfuerzo de corte es independiente de las propiedades reológicas del fluido y se obtiene de la siguiente expresión:

$$T_b = \frac{T}{2 r_b^2 h_e} \quad (3.1)$$

Substituyendo en (3.1) las constantes del viscosímetro utilizado tenemos:

$$T_b = 1.067 \theta \text{ lb/100 ft}^2 \quad (3.2)$$

b) La velocidad de corte será igual a ⁽¹⁾:

$$\gamma_w = \frac{4 \text{ RPM}}{(\theta-1)} \frac{2}{60} \text{ Fkm} \quad (3.3)$$

$$\text{Fkm} = [1 + K_1 ((1/s)-1) + K_2 ((1/s)-1)^2] \quad (3.4)$$

$$\beta = r_c / r_b \text{ ----- (3.5)}$$

$$k_1 = \frac{\beta^2 - 1}{2\beta^2} (1 + 2/3 \ln \beta) \text{ ----- (3.6)}$$

$$k_2 = \frac{\beta^2 - 1}{16\beta^2} (\ln \beta) \text{ ----- (3.7)}$$

$$s = d (\ln \theta) / d (\ln \text{RPM}) \text{ ----- (3.8)}$$

Donde las ecuaciones (3.1) a (3.8), T será el torque del resorte del viscosímetro, r_c y r_b los radios del BOP y de la copa del viscosímetro, h la altura del fluido, RPM y θ serán las revoluciones por minuto y la lectura del viscosímetro, finalmente k_1 y k_2 serán constantes (tomadas de la referencia (1)).

Substituyendo en 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 las constantes del viscosimétrico utilizado tendremos:

$$\gamma_u = 1.703 \text{ RPM Fkm (1/seg) ----- (3.9) donde:}$$

$$\text{Fkm} = [1 + 0.064 ((1/s) - 1) + 0.0013 ((1/2) - 1)^2] \text{ ----- (3.10)}$$

La pendiente de una recta en una gráfica logarítmica será las derivadas de los logaritmos de θ y RPM (Ecuación 3.11).

$$s = \frac{\ln(\theta_2) - \ln(\theta_1)}{\ln(\text{RPM}_2) - \ln(\text{RPM}_1)} \text{ ----- (3.11)}$$

Substituyendo los valores de η y RPM de las tablas 3-1 a 3-6 en las ecuaciones (3.2), (3.11) y (3.9) obtenemos los valores de las tablas 3-7 a 3-12, ya en función de esfuerzo de corte en $lb/100\text{ ft}^2$ y velocidad de corte en 1/seg.

Graficando los valores de las tablas 3-7 a 3-12 en papel log-log podemos observar el comportamiento del lodo DRILEX de densidad 2.05 gr/c.c. (pozo Chacuaco #1) y PERFOIL de densidad 1.84 gr/c.c. (pozo Caletón #1). Figuras 3-1 y 3-2).

De las figuras 3-1 y 3-2 observamos que existen dos claras tendencias en el comportamiento del fluido, ambas obedecen el modelo de Ostwald-DeWeale, una tendencia a velocidades de corte bajas, puntos que corresponden a las lecturas a 0.9, 1.8, 3 y 6 RPM y otra a velocidades de corte altas (8 puntos restantes), en las gráficas las rectas que delimitan las dos tendencias mencionadas se unen en la intersección de dos líneas discontinuas. Las líneas continuas indican que la tendencia en ese tramo está comprobada experimentalmente, las líneas discontinuas son una extrapolación de las líneas continuas en el rango de lecturas de 6 a 30 RPM, donde no se dispone de datos.

Este tipo de comportamiento ya ha sido observado en fluidos de emulsión inversa base aceite. (5)

El punto de intersección de las dos rectas se considerará como el punto de velocidad de corte en el cual el comportamien-

to del fluido cambia, en otras palabras k y n (índices de consistencia y comportamiento), dejan de ser constantes.

Pero el punto de cambio de comportamiento no es exactamente el mismo para todos los casos, en las figuras 3-1 y 3-2 se observa la tendencia que a mayor temperatura la intersección resulta en un punto de velocidades de corte ligeramente mayor.

El hecho de que se considere el punto de intersección como el punto de cambio de comportamiento es para tener alguna referencia ya que la línea punteada es sólo una extrapolación con un determinado grado de incertidumbre, la cual disminuirá conforme la línea punteada se acerque a la línea continua y viceversa.

Así que desde el punto de vista práctico, lo más conveniente es considerar que dicho cambio ocurre dentro de una zona, esta zona en nuestro caso abarcará a todos los puntos de intersección en los cuatro casos, y estará entre los 15 y 40 seg^{-1} .

Dentro de esta zona de incertidumbre se podrán usar indistintamente cualquiera de los dos pares de constantes de que se disponen y la confiabilidad será la misma.

Fuera de esta zona la confiabilidad es cercana al 100%.

Para ajustar los valores de las tablas 3-7 a 3-12 a curvas

del tipo $\tau = k\gamma^n$ (modelo de Ostwald-DeWeale) y obtener los valores de n y k mostrados en las mismas, se utilizó el programa de linealización de Taylor mencionado en el capítulo anterior, que se encuentra en el anexo.

No es práctico el utilizar este programa para ajustar las constantes en el campo, aquí se utilizó con el propósito de obtener los datos lo más verídico posibles y demostrar sin lugar a dudas que el fluido sigue el comportamiento reológico de acuerdo al modelo de Ostwald - DeWeale.

El rango superior de velocidades de corte es el que normalmente existe durante la perforación de un pozo (gastos de 25 a 55 galones por pulgada de agujero), tanto en el interior de las diferentes tuberías como en los espacios anulares, y es con el que trabajaremos a lo largo de todo este trabajo. El rango inferior se presenta cuando el gasto está por alguna razón muy -- por abajo del régimen normal de perforación, cuando esto suceda habrá que analizar en cada sección de la sarta que par de constantes serán las adecuadas para utilizar las mismas.

La velocidad de corte en el interior de una tubería será⁽²⁾

$$\gamma_w = ((3n+1)/(4n)) (8V/D) \text{ ----- (3.12)}$$

Y dentro del espacio anular tendremos⁽³⁾:

$$\gamma_w = ((2n+1)/(3n)) (12V/(D_h - D_f)) \text{ ----- (3.13)}$$

Podemos observar en las tablas 3-7 a 3-12 que el error que todos los puntos tienen con respecto al modelo ajustado es despreciable, lo anterior se confirma al observar los valores de promedios de error, porcentaje de error y desviación estándar.

Por lo tanto se desprende que el modelo escogido se ajusta muy bien a los valores medidos, esto es importante, ya que nos garantiza que dentro del rango mencionado, cualquier par de puntos tomados dentro del rango demostrado experimentalmente para ajustar el modelo serán aceptables y su margen de error será mínimo, y esto será precisamente lo que se hará regularmente en el campo, se tomarán las lecturas a 300 y 600 RPM para ajustar el modelo.

Para ajustar constantes con dos puntos se tendrá ⁽⁴⁾:

$$n = 3.32 \log (\vartheta_{600} / \vartheta_{300}) \text{ ----- (3.14)}$$

$$k = \vartheta_{300} / 511^n \text{ ----- (3.15)}$$

De la ecuación (3.2) y (3.9) suponemos $\tau = 0$ y $\gamma_o = 1.703$ -RPM y aunque sabemos que esto no es exacto ya que se desprecian las constantes 1.067 y F_{km} , el error es mínimo ya que ambas constantes son aproximadamente del mismo orden en numerador y denominador.

El análisis de los lodos utilizados se da en las tablas 3-17 a 3-20, y no obstante las diferencias entre ellos referentes a relación aceite-agua, contenido de sólidos, etc. todos --

tienen el mismo comportamiento (modelo de Ostwald-DeWeale).

En lodos contaminados, subtratados o sobretadados no es válida la suposición de que continúan siguiendo el mismo modelo y por lo tanto este estudio excluye esos casos.

En los dos pozos restantes (Luna #33 y Ocuapan #201-A) los resultados obtenidos son exactamente los mismos y confirman todo lo dicho anteriormente. Las mediciones se hicieron a una sola temperatura (temperatura de salida de la prueba), ya que se consideró que el efecto temperatura había sido ya estudiado en los dos casos anteriores.

El procedimiento utilizado para procesar los datos fue el mismo que en los dos casos anteriores. En las figuras 3-3 y -- 3-4 se observa lo bien que los puntos se ajustan al modelo de - Ostwald-DeWale.

Los resultados mostrados en las tablas 3-13 a 3-16 confirman lo anterior.

CONCLUSIONES

Los fluidos de emulsión inversa base Diesel siguen fielmente el modelo de Ostwald-DeWeale (ley de potencias) en los rangos señalados de velocidades de corte, a temperatura y presión constantes.

La variable temperatura es determinante en las condiciones reológicas del fluido y aunque hay estudios que indican que la presión tiene también efectos sobre dichas propiedades, comparativamente son mucho menores que los debidos a cambios de temperatura. (5)

Son dos las tendencias observadas y muy bien definidas en el rango de velocidades de corte estudiado (1.7 a 1055 seg^{-1}), - ambas siguen el modelo de Oswald-DeWale en los rangos señalados.

POZO CHACUACO N° 1

τ_b (lb/100 ft²)

LODO DRILEX, DENSIDAD 2.05 gr/c.c.

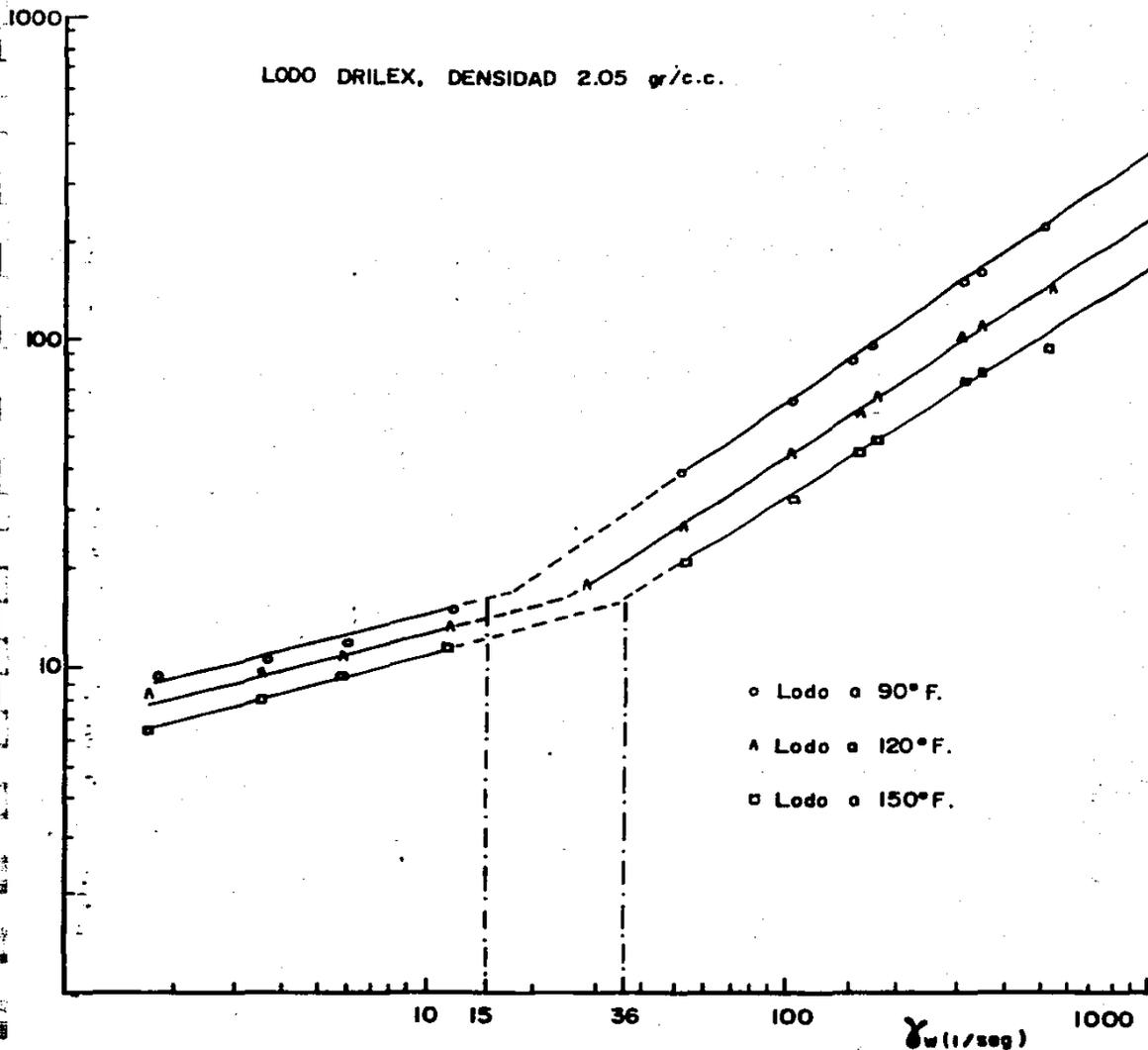


FIGURA N°3-1 Comportamiento reológico del Lodo Drilex a 90, 120 y 150° F. con respecto al modelo ajustado (líneas).

POZO CALETON N° 1

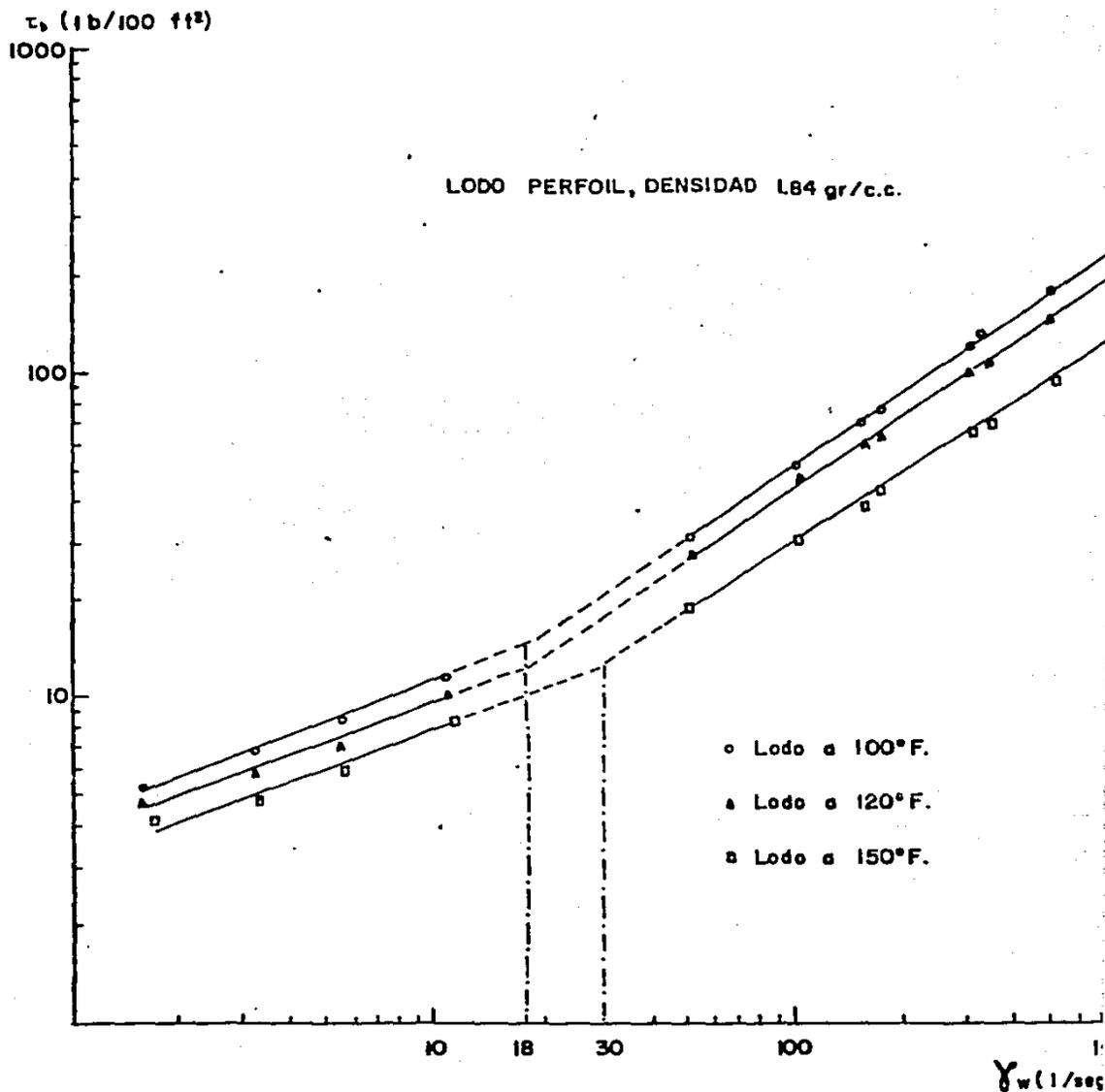


FIGURA N° 3-2 Comportamiento reológico del Lodo Perfoil a 100, 120, y 150°F. con respecto al modelo ajustado (líneas).

POZO OCUAPAN N° 201-A

τ_b (lb/100 ft²)

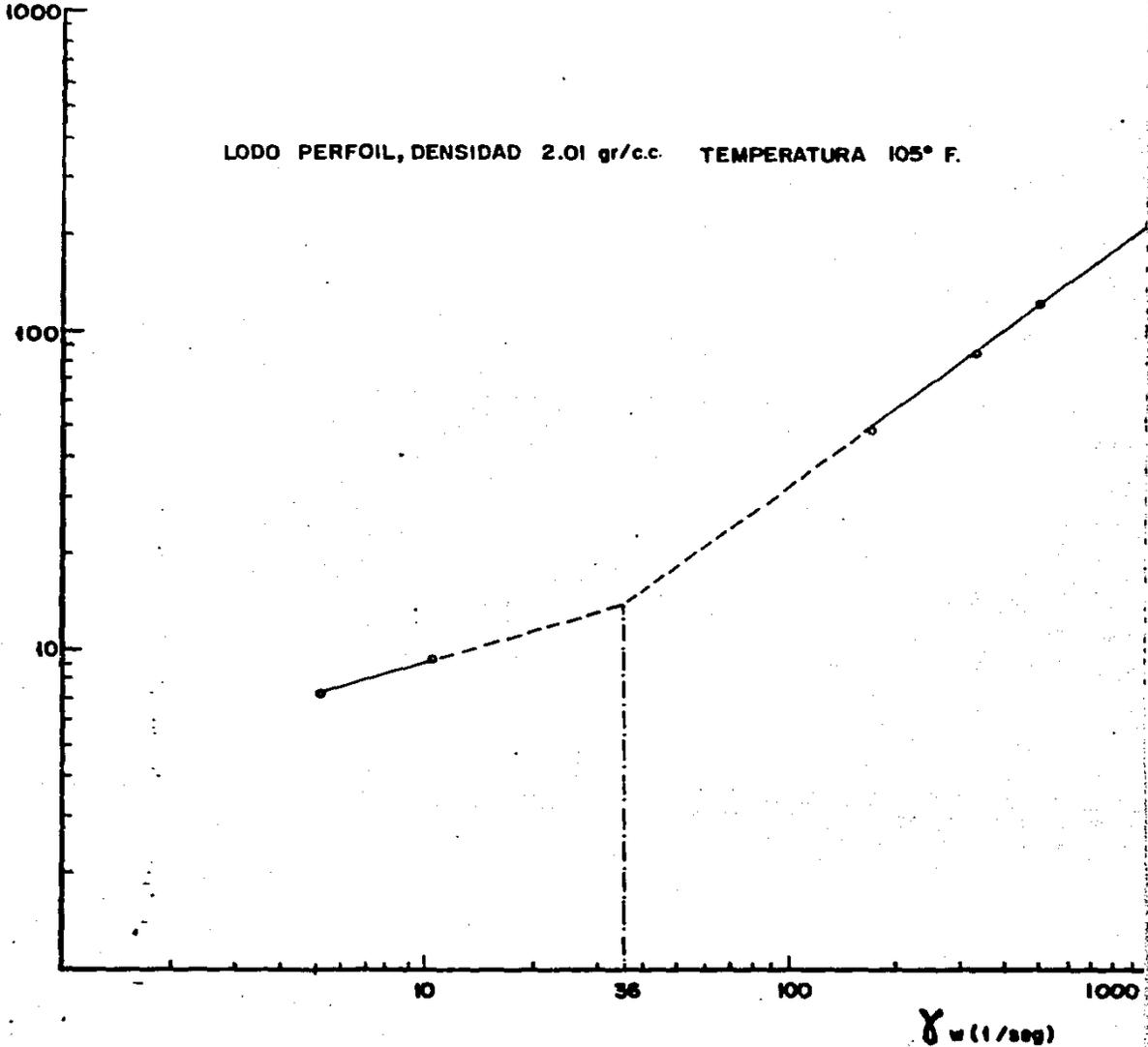


FIGURA N° 3-3 Comportamiento reológico del Lodo Perfoil a 105° F. con respecto al modelo ajustado. (línea).

POZO LUNA N° 33

τ_b (lb/100 ft²)

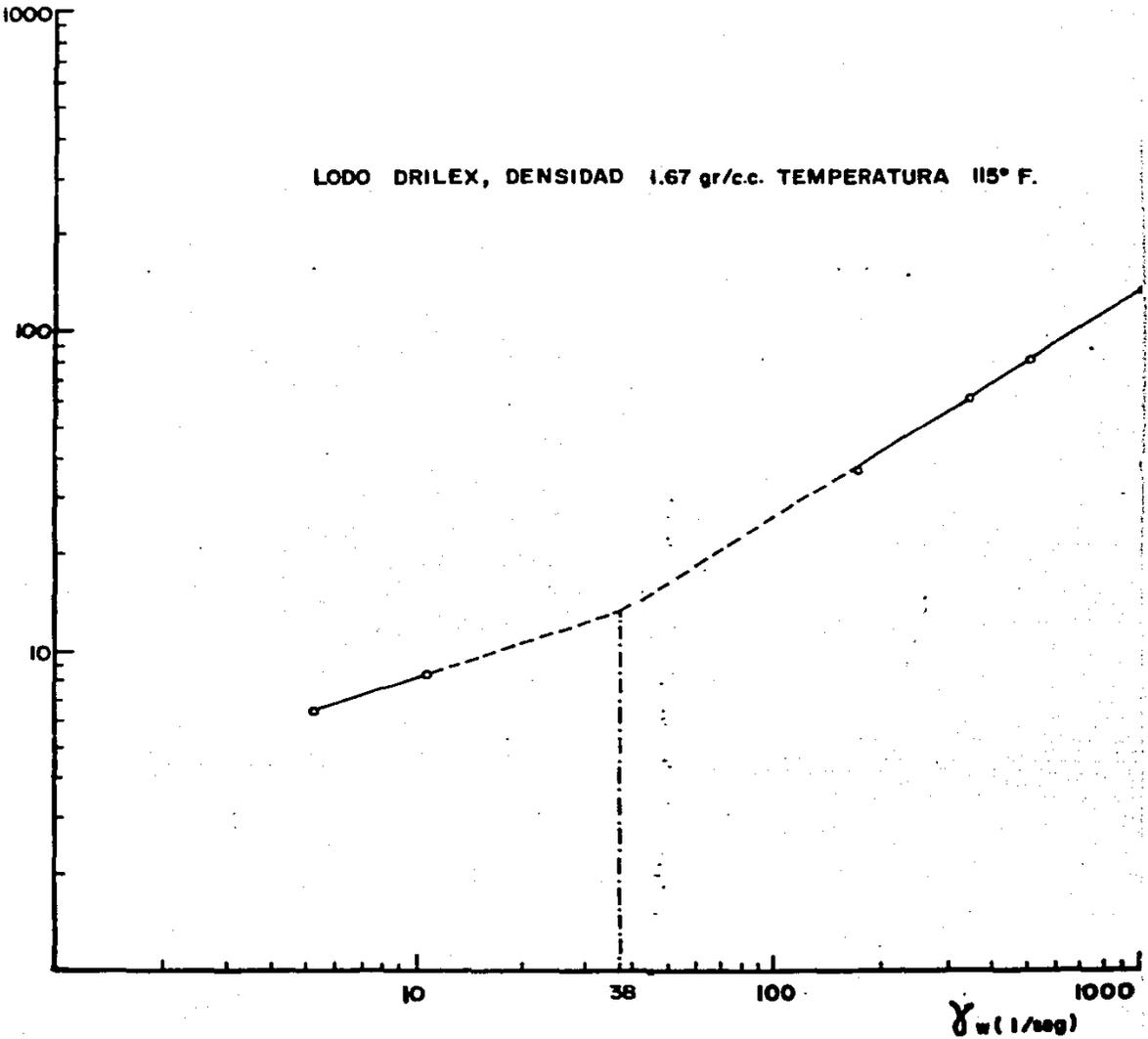


FIGURA N° 3-4 Comportamiento reológico del Lodo Drilex a 115° F. con respecto al modelo ajustado (línea).

RPM	0
600	Más de 300
300	210
200	150
180	142
100	88
90	82
60	60
30	37
6	14
3	11
1.8	10
0.9	9

Tabla 3-1.- Mediciones viscosimétricas del lodo Drilex a 90°F, densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco # 1).

RPM	0
600	216
300	133
200	104
180	95
100	62
90	55
60	42
30	25
6	13
3	10
1.8	9
0.9	8

Tabla 3-2.- Mediciones viscosimétricas del lodo Drilex a 120°F, densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco # 1).

RPM	ϕ
600	151
300	90
200	75
180	70
100	46
90	42
60	31
30	20
6	11
3	9
1.8	7.5
0.9	6

Tabla 3.3.- Mediciones viscosimétricas del lodo Drilex a 150°F, densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco # 1).

RPM	Ø	RPM	Ø
600	269	600	220
300	166	300	135
200	120	200	98
180	112	180	94
100	70	100	59
90	65	90	55
60	48	60	42
30	29	30	25
6	11	6	9.5
3	8	3	6.5
1.8	6.5	1.8	5.5
0.9	5	0.9	4.5

$$Fkm_1 = 1.018$$

$$Fkm_2 = 1.076$$

Tabla 3-4.- Mediciones viscosimétricas del lodo Perfoil a 100°F, -- densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

$$Fkm_1 = 1.023$$

$$Fkm_2 = 1.076$$

Tabla 3-5.- Mediciones viscosimétricas del lodo Perfoil a 120°F, -- densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

RPM	ϕ
600	144
300	87
200	64
180	61
100	39
90	36
60	28
30	18
6	7
3	5.5
1.8	4.5
0.9	4

$$F_{km_1} = 1.026$$

$$F_{km_1} = 1.125$$

Tabla 3-6.- Mediciones viscosimétricas del lo do Perfoil a 150°F, -- densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

γ_w (1/seg)	T_b (lb/100 ft ²)	E (lb/100 ft ²)
520	224	-0.92
347	160	2.88
312	152	-2.04
173	94	0.80
156	87	0.48
104	64	-0.17
52	39	-1.76
12	15	-0.38
6	11.7	0.60
3.6	10.6	0.23
1.8	9.6	-0.47

$$n_1 = 0.777, \quad k_1 = 1.725, \quad SD_1 = 1.574, \quad \bar{E}_1 = -0.103, \quad \bar{E}_1 = -0.475$$

$$n_2 = 0.248, \quad k_2 = 7.884, \quad SD_2 = 0.446, \quad \bar{E}_2 = -0.005, \quad \bar{E}_2 = -0.350$$

Tabla 3-7.- Velocidad y esfuerzo de corte medidos y error con respecto al modelo ajustado con las n y k mostradas en la parte inferior de la tabla, además desviación estándar, media y promedio del porcentaje de los errores, a una temperatura de 90°F -- del lodo Drilex con densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco # 1).

γ (1/seg)	T_b (lb/100 ft ²)	E (lb/100 ft ²)
1048	230	0.90
524	142	0.44
340	111	-3.68
314	101	-1.30
174	66	0.06
157	50	2.49
104	45	1.15
52	27	1.47
11.7	13.8	-0.35
5.8	10.6	0.57
3.5	9.6	0.17
1.7	8.5	-0.42

$n_1 = 0.696$, $k_1 = 1.813$, $SD_1 = 1.806$, $\bar{E}_1 = 0.193$, $\% \bar{E}_1 = 1.05$

$n_2 = 0.264$, $k_2 = 7.021$, $SD_2 = 0.406$, $\bar{E}_2 = -0.065$, $\% \bar{E}_2 = -0.06$

Tabla 3-8.- Velocidad y esfuerzo de corte medidos y su error -- con respecto al modelo ajustado con las n y k mostradas en la parte inferior de la tabla, además desviación estándar, media y promedio del porcentaje de los errores del lodo drilex a una temperatura de 120°F con densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco - # 1).

$\dot{\gamma}_w$ (1/seg)	T_b (lb/100 ft ²)	E (lb/100 ft ²)
1055	161	-0.74
527	96	4.93
352	80	-2.85
317	75	-3.05
176	49	-0.38
158	45	0.24
105	33	1.46
53	21	0.85
11.6	11.7	0.05
5.8	9.6	-0.14
3.5	8.6	0.065
1.7	6.4	0.026

$$n_1 = 0.666, \quad k_1 = 1.553, \quad SD_1 = 2.384, \quad \bar{E}_1 = 0.058, \quad \bar{\%E}_1 = 0.666$$

$$n_2 = 0.614, \quad k_2 = 5.438, \quad SD_2 = 0.085, \quad \bar{E}_2 = 0.0009, \quad \bar{\%E}_2 = 0.051$$

Tabla 3-9.- Velocidad y esfuerzo de corte medidos y su error -- con respecto al modelo ajustado con las n y k mostradas en la parte inferior de la tabla, además desviación estándar, media y promedio del porcentaje de las errores; lodo Drilex a una temperatura de 150°F, con densidad de 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco # 1).

γ_w (1/seg)	T_b (lb/100 ft ²)	E (lb/100 ft ²)
1041	287	1.81
521	177	-4.0
347	128	0.03
312	120	-1.65
174	75	1.80
156	69	1.83
104	51	1.46
52	31	0.40
11	11.7	-0.093
5.5	8.5	0.158
3.3	6.9	0.07
1.6	5.3	-0.161

$$n_1 = 0.740, \quad k_1 = 1.684, \quad SD_1 = 1.968, \quad \bar{E}_1 = 0.213, \quad \bar{\%E}_1 = 0.783$$

$$n_2 = 0.422, \quad k_2 = 4.212, \quad SD_2 = 0.128, \quad \bar{E}_2 = -0.004, \quad \bar{\%E}_2 = -0.215$$

Tabla 3-10.- Velocidad y esfuerzo de corte medidos y su error - con respecto al modelo ajustado con las n y k mostradas en la parte inferior de la tabla, además desviación estándar, media y promedio del porcentaje de los errores, lodo Perfoil a una temperatura de 100°F, con densidad de 1.84 gr/c.c. (Pozo Chacuaco # 1).

γ_w (1/seg)	T_b (lb/100 ft ²)	E (lb/100 ft ²)
1046	235	0.038
523	144	-1.11
349	105	1.87
314	100	-0.93
175	63	2.10
157	59	1.22
105	49	-3.88
52	27	0.24
11	10.1	-0.256
5.5	6.9	0.465
3.3	5.8	0.148
1.6	4.8	-0.405

$n_1 = 0.718$, $k_1 = 1.596$, $SD_1 = 1.826$, $\bar{E}_1 = -0.055$, $\% \bar{E}_1 = -0.19$

$n_2 = 0.418$, $k_2 = 3.609$, $SD_2 = 0.342$, $\bar{E}_2 = -0.0122$, $\% \bar{E}_2 = -0.42$

Tabla 3-11.- Velocidad y esfuerzo de corte medidos y su error - con respecto al modelo ajustado con las n y k mostradas en la parte inferior de la tabla, además desviación estándar, media y promedio del porcentaje de los errores, lado perfoil a una temperatura de 120°F, y densidad de 2.05 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

χ_w (1/seg)	T_b (lb/100 ft ²)	E (lb/100 ft ²)
1049	154	-0.36
525	93	0.12
350	68	1.45
315	65	-0.63
175	42	0.07
157	38	0.89
105	30	-0.92
52	19	-1.50
11.5	7.4	-0.08
5.7	5.8	0.069
3.4	4.8	0.189
1.7	4.2	-0.187
$n_1 = 0.723, k_1 = 1.003, SD_1 = 0.909, \bar{E}_1 = -0.111, \% \bar{E}_1 = -0.93$		
$n_2 = 0.314, k_2 = 3.396, SD_2 = 0.943, \bar{E}_2 = -0.0026, \% \bar{E}_2 = -0.106$		

Tabla 3-12.- Velocidad y esfuerzo de corte medidos y su error con respecto al modelo ajustado con las n y k mostradas en la parte inferior de la tabla, además, desviación estándar, media y promedio del porcentaje de los errores, lodo perfail a una temperatura de 150°F y densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

CHACUACO #1 CALETON #1 OCUAPAN #201-A LUNA #33

p(gr/c.c.)	2.05	1.84	2.01	1.67
Gel 10"/10'	5/26	8/17	7/16	7/18
Alc.	0.2	0.2	0.2	0.1
Sal- (p.p.m.)	250,000	230,000	260,000	110,000
Agua (%)	14	17	12	14
Aceite (%)	47	49	50	60
Sol. (%)	39	34	38	26
R.A.A. (%/%)	77/23	74/26	80/20	81/19

Tabla 3-17.- Análisis Químico de los lodos de los pozos Chacua-
co #1, Caletón #1, Ocuapan 201-A y Luna #33.

NOMENCLATURA

- D = Diámetro interior de la tubería (pies).
D_h = Diámetro del agujero (pies)
D_p = Diámetro exterior de la tubería (pies).
E = Error
 \bar{E} = Promedio de errores
%E = Promedio de porcentaje de errores
F_{km} = Factor de corrección para fluidos no-Newtonianos, pseudo--
plásticos y dilatantes en viscosímetros rotacionales.
h_e = Altura del fluido (viscosímetro rotacional Fann-35).
k = Índice de consistencia
n = Índice de comportamiento de flujo
r_b = Radio del BOP (viscosímetro rotacional Fann-35)
r_c = Radio de la copa (viscosímetro rotacional Fann-35)
RPM = Revoluciones por minuto.
s = Pendiente en una gráfica logarítmica de lectura del visco-
símetro contra revoluciones por minuto
SD = Desviación estándar
T = Torque del resorte del viscosímetro rotacional Fann-35
V = Velocidad media del fluido en el interior de una tubería -
(pies)
 γ_w = Velocidad de corte en la pared (1/seg)
 ϕ = Lectura del viscosímetro rotacional Fann-35
T_b = Esfuerzo de corte (lb/100 ft²)

Nota: Los parámetros con subíndice uno son los ajustados para -
la tendencia con velocidades de corte altas (30 a 600 RPM)
y los de subíndice dos para la de velocidades de corte ba-
jas (0.9 a 6 RPM).

REFERENCIAS

- (1) Wilkinson, W.L., Non-Newtonian Fluids, Pergamon Press, Inc. New York. (1960), p. 22 - 24.
- (2) Dodge D.W. and Metzner, A.B., Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems, A.I.Ch.E. Journal. Vol 5 (1959), p. 191.
- (3) Woh, M.H., Dynamics of Flow Between Parallel Plates and in Non-Circular Ducts, Chemical Engineering, Mayo 6, (1968), - p. 185.
- (4) Adams, J.N. Drilling Engineering a Complete Well Planning - Approach Pennwell Publishing Co. Tulsa, Oklahoma, 1985, p.- 691.
- (5) McMordie, W.C. Jr y otros. The Effect of Temperature and -- Pressure on the viscosity of Oil Base Muds. Paper No. SPE - 4947, Dallas, Tex. (1974).

CAPITULO IV

COMPARACION Y ANALISIS DE CAIDAS DE PRESION CALCULADAS CON EL MODELO VS. REALES DE PRUEBAS DE CAMPO

Una vez determinado el modelo reológico del fluido, podemos calcular sus caídas de presión.

Para esto debemos distinguir el tipo de flujo que existe -- tanto en el interior de la tubería como en el espacio anular, -- éste puede ser laminar, turbulento o de transición, empezaremos por estudiar el flujo laminar y posteriormente veremos los de -- transición y turbulento.

Para flujo laminar Metzner y Reed partiendo de la ecuación de Rabinowitch produjeron la primera ecuación general para flujos no-Newtonianos independientes del tiempo⁽¹⁾, utilizando una forma modificada de la gráfica de número de Reynolds y el factor de fricción convencional.

El factor de fricción se obtiene de la ecuación de Fanning usual, ésta es:

$$f = \frac{D \Delta P / 4L}{\rho V^2 / 2g_c} = \frac{D \Delta P}{2 \rho V^2 L} g_c \text{ ----- (4.1)}$$

Y el número de Reynolds se define como:

$$Re' = \frac{D^{n'} v^{2-n'} \rho}{g_c K' 8^{n'-1}} \text{-----} \quad (4.2)$$

En las ecuaciones (4.1) y (4.2), f es el coeficiente de -- fricción de Fanning, ΔP caída de presión, L longitud, D diámetro, ρ densidad, g_c la constante gravitacional, V velocidad y Re' el número de Reynolds generalizado definido por Metzner.

La ecuación (4.2) es una ecuación general para todos los -- fluidos no-Newtonianos donde:

$$\frac{1}{n'} = \frac{d \ln(8V/D)}{d \ln(D \Delta P/4L)} \text{-----} \quad (4.3)$$

Y el factor de fricción para cualquier fluido no-Newtoniano independiente del tiempo, en flujo laminar será:

$$f = 16 g_c K' 8^{n'-1} / D^{n'} v^{2-n'} \text{-----} \quad (4.4)$$

Substituyendo (4.2) en (4.4) obtendremos:

$$f = 16/Re' \text{-----} \quad (4.5)$$

La ecuación (4.5) funciona para cualquier fluido indepen-- diente del tiempo y ha sido demostrada de manera rigurosa, con la única consideración implícita de que no existe resbalamiento en la pared de la tubería, si el fluido no sigue la relación de la ecuación (4.5) en la región de flujo laminar, los datos o --

cálculos son erróneos o el fluido evidencia un comportamiento - de tipo tixotrópico o reopéctico.

En el caso particular de fluidos que obedecen la ley de po-
tencias (nuestro caso), tendremos que: (2)

$$n' = n \text{ ----- (4.6) y}$$

$$k' = k (3n+1/4n)^n \text{ ----- (4.7)}$$

Substituyendo (4.6) y (4.7) en (4.4) y (4.4) en (4.1), lle-
garemos a la ecuación para calcular caídas de presión en el in-
terior de una tubería en flujo laminar:

$$\Delta P = [(8 V/D) (3n+1/4n)]^n kL/3600D \text{ ----- (4.8)}$$

En la ecuación (4.8) D está en pies, V en pies/seg y L en pies.

Para el caso del espacio anular, si la longitud de la tube-
ría es muy grande en relación al diámetro, se podrá suponer un-
flujo en placas paralelas, con un error despreciable y como és-
te es precisamente nuestro caso, así se asumirá.

Desarrollando una ecuación generalizada para velocidad y -
esfuerzo de corte, para materiales moviéndose entre placas para-
lelas y aplicando el modelo del fluido (ley de potencias) a és-
ta, se llega a la ecuación para calcular caídas de presión en -

el espacio anular en un régimen de flujo laminar: (3)

$$\Delta P = [(12V/D_h - D_f) (2n+1/3n)]^n k L/3600 (D_h - D_p) \quad (4.9)$$

Las ecuaciones (4.8) y (4.9) son las mostradas en la literatura para obtener caídas de presión en el interior y espacio-anular de una tubería, para fluidos que obedecen el modelo de ley de potencias en régimen de flujo laminar.

Para calcular las caídas de presión en flujo turbulento o de transición no existe una ecuación general que haya sido demostrada de manera rigurosa y podamos obtener las caídas de presión.

No obstante lo anterior Dodge y Metzner (4), obtuvieron un factor de fricción para fluidos pseudo-plásticos de manera experimental, que substituido en la ecuación de Fanning (4.1) nos da las caídas de presión en regímenes de flujo turbulento o de transición, la ecuación que define dicho factor es:

$$\sqrt{1/f} = 4.0/(n')^{0.75} \log [Re' (f)^{1-n'/2}] - 0.40/(n')^{1.2} \quad (4.10)$$

Pero es posible aproximar la ecuación (4.10) a una ecuación más simple del tipo Blasius: (5)

$$f_{tu} = a/(Re')^b \quad (4.11)$$

Schuh ajustó las constantes a y b para flujo turbulento: (6)

$$a = (\log n + 3.93) / 50 \text{ ----- (4.12)}$$

$$b = (1.75 - \log n) / 7 \text{ ----- (4.13)}$$

Y para la zona de transición tendremos:

$$f_{tr} = f'_1 + \frac{[Re' - (3470 - 1370 n)]}{800} (f'_{tu} - f'_1) \text{ ---- (4.14)}$$

Los criterios para definir las zonas de transición y turbulenta serán respectivamente (6):

$$Re'_{tr} = 3,470 - 1,370 n \text{ ----- (4.15)}$$

$$Re'_{tu} = 4,270 - 1,370 n \text{ ----- (4.16)}$$

Por lo tanto si $Re' < Re'_{tr}$, existirá flujo laminar, si $Re'_{tu} > Re' > Re'_{tr}$, existirá flujo transición y si $Re' > Re'_{tu}$ existirá flujo turbulento.

Entonces para flujo turbulento o de transición despejando ΔP de la ecuación (4.1) tendremos:

$$\Delta P = 2 f \rho v^2 L / g_c D \text{ ----- (4.17)}$$

Como se ve lo único que cambia en este caso es el factor de fricción a utilizar, el cual dependerá del número de Reynolds que se obtenga (ecuación 4.2).

La ecuación (4.17) también podrá utilizarse en flujo laminar y su factor de fricción será el definido por la ecuación -- (4.5).

Una vez delineados los criterios para los diferentes tipos de flujos y su cálculo de caídas de presión, hay que comparar - las caídas obtenidas en las pruebas de campo y las obtenidas en base al modelo reológico.

Para obtener las caídas de presión en base al modelo reológico, se deberán aplicar las ecuaciones mencionadas en las diferentes secciones tubulares de la sarta, tales como lastrabarrenas, tubería de pared gruesa y las diferentes tuberías de perforación con que se cuente.

Hacer esto manualmente es laborioso, de manera que se elaboró un programa de computación en lenguaje basic para obtener caídas de presión en el sistema, el programa se presenta en el anexo de este trabajo.

El programa calcula las caídas de presión en cada sección de la sarta utilizando subrutinas para calcular la caída de presión en cada sección y posteriormente sumar los resultados para obtener la caída de presión total en el sistema.

En el programa se puede trabajar con viscosidad aparente y plástica, pero estos parámetros solamente son utilizados para -

obtener las lecturas a 300 y 500 RPM del viscosímetro y posteriormente los parámetros n y k .

Es importante recalcar que la viscosidad plástica no tiene prácticamente ningún significado en la evaluación de este tipo de fluidos, ya que la misma implica un comportamiento reológico de acuerdo al modelo de Bingham, comportamiento que no sigue este tipo de fluidos, la razón de trabajar con la misma es su arraigo tan profundo en el medio petrolero. En el programa también se puede trabajar con las lecturas a 300 y 600 RPM de viscosímetro o directamente con los parámetros n y k .

El funcionamiento en detalle del programa se explica en el anexo.

Ya se observó que la temperatura afecta grandemente las condiciones reológicas del fluido y a cada temperatura corresponden un par de parámetros n y k , sin embargo la acción que la temperatura tiene en caídas de presión no se ha apreciado todavía.

Las tablas 4-1 a 4-11 nos dan una idea de las presiones en función de las temperaturas del fluido, P_{c1} , P_{c2} , P_{c3} , que son las presiones calculadas en base a los parámetros n y k obtenidos a las 3 diferentes temperaturas ya mencionadas en el capítulo anterior, y su diferencia en relación a las presiones medidas (P_m) en las pruebas.

Es importante mencionar que en ninguna de las dos primeras pruebas (Chacuaco #1 y Caletón #1) existieron condiciones de estado estable, para lograr esto habría sido necesario circular - varios ciclos completos hasta que las temperaturas de entrada y salida del pozo se estabilizaran, lo cual no ocurrió.

Lo anterior implica que la distribución de temperaturas en las diferentes mediciones a una misma profundidad son en general distintas en cada caso y por lo tanto su correlación a una misma temperatura "equivalente" no es posible.. Como temperatura equivalente de un fluido con una determinada distribución de temperaturas, nos referimos a la temperatura (constante) que debería tener el fluido para obtener las pérdidas por fricción -- que se tienen con esa determinada distribución.

Podemos observar en las tablas 4-1 a 4-11 que conforme aumenta la profundidad a la cual se efectuó la prueba, las pérdidas calculadas a la temperatura de entrada de la prueba aumentan en relación a las medidas, esto es particularmente evidente a 3,000 o más metros de profundidad.

Una de las principales razones para hacer este análisis -- comparativo era determinar si este tipo de fluidos sigue el comportamiento delineado por Dodge y Metzner⁽⁷⁾ en los regímenes -- de flujo turbulento y de transición, sin embargo, los resultados de las tablas 4-1 a 4-11 tienen una influencia tan grande -- de la temperatura que no es posible determinar si el flujo se -

comporta de acuerdo a esas teorías o no.

Pero es posible detectar cuantitativa y cualitativamente la influencia que tiene la temperatura en caídas de presión, y podemos concluir que no es posible despreciar el efecto temperatura al calcular las caídas de presión en un pozo sin caer en errores de magnitud considerable.

Por otro lado el efecto de la presión en el cálculo de caídas de presión en un pozo (opuesto al efecto temperatura) ⁽⁸⁾, es tan pequeño en relación al efecto de temperatura que no se detecta.

Para determinar si el fluido se comporta de acuerdo a las teorías mencionadas en este capítulo en los regímenes de flujo turbulento y de transición, se efectuaron una segunda serie de pruebas en los pozos Ocuapan # 201-A y Luna # 33 (tablas 4-12 a 4-17) donde se trató de eliminar en lo posible el efecto temperatura, a pesar de lo cual existió una diferencia entre temperaturas de entrada y salida de 2 a 3°F.

Para eliminar el efecto temperatura las pruebas se hicieron a menos de 200 m de profundidad, eliminando de paso el efecto presión.

Aunque existió una pequeña diferencia en la entrada y salida en lo referente a temperatura (medida continuamente), es po-

sible considerar el fenómeno a temperatura y presión constantes con un error pequeño.

El problema principal en esta segunda serie de pruebas es la precisión del manómetro utilizado, ya que tratándose de tramos de poca longitud, las diferencias entre caídas de presión en conexiones superficiales y caídas de presión en conexiones superficiales más sarta, son pequeñas, particularmente en el caso de tubería de perforación de 5" X.H. °E, con un diámetro interior mayor al de los lastrabarrenas o tubería de pared gruesa.

Analizando las tablas 4-12 a 4-14 del pozo Ocuapan # 201-A observamos que en todos los casos el error máximo es del orden de 30 PSI, si consideramos la precisión en el tipo de manómetro utilizado y los errores acumulados debidos a medición de gasto, medición en presiones en conexiones superficiales y pequeñas diferencias de temperatura, concluiremos que el error obtenido es despreciable en todos los casos, y este tipo de fluidos se ajusta a los lineamientos mencionados para flujos laminar de transición y turbulentos bajo condiciones de presión y temperatura -- constantes.

En el pozo Luna # 33 (tablas 4-15 a 4-17) los gastos programados fueron mayores a los de las demás pruebas, mientras -- que en las otras pruebas los gastos fueron menores a los 500 -- g.p.m., aquí se llegó cerca de los 900 g.p.m., esto se hizo con

el único propósito de investigar el comportamiento del fluido a velocidades de corte altas, ya que gastos de más de 65 galones-por pulgada de agujero prácticamente nunca se utilizan.

El resultado fue que a velocidades de corte altas (más de $1,100 \text{ seg}^{-1}$) el comportamiento reológico del fluido vuelve a -- cambiar, es decir, los parámetros k y n cambian nuevamente.

Lo anterior se puede apreciar en figura 4-1 y se confirma al comparar caídas de presión reales contra calculadas en el pozo Luna # 33.

Este comportamiento a velocidades de corte muy altas (más de 1100 seg^{-1}) no ha sido reportado en la literatura disponible.

En el pozo Luna # 33 a gastos elevados en lastrabarreras y tubería de pared gruesa la magnitud del error se dispara, confirmando un cambio en el comportamiento reológico del fluido a velocidades de corte elevadas (más de $1,100 \text{ seg}^{-1}$).

Este cambio de comportamiento dependerá además del gasto - del diámetro interno de la sección tubular en cuestión, ya que las velocidades de corte en el interior de una tubería se definen con la ecuación (3.11).

Como ejemplo, en el pozo Luna #33 los gastos utilizados -- fueron lo suficientemente grandes para alcanzar velocidades de

corte superiores a los $1,100 \text{ seg}^{-1}$ en lastrabarrenas y tubería de pared gruesa, pero no para alcanzarlos en la tubería de perforación de 5" X.H. °E, la tabla 4-17 lo confirma al no existir ese cambio brusco de diferencia de errores que se encuentran en las tablas 4-15 y 4-16.

Ese rango de velocidades de corte altas tampoco se da dentro del rango de gastos normales de perforación, solamente cuando alguna operación especial requiera gastos muy elevados se -- tendrá que considerar lo expuesto.

Un problema que se presenta con el cambio de comportamiento a velocidades de corte altas, es que la ecuación $P = C Q^m$ -- utilizada en los otros 3 pozos para evaluar caídas de presión en conexiones superficiales, en el caso del pozo Luna # 33 no es utilizable para todo el rango de gastos evaluados. La ecuación se usa en el rango de gastos hasta 500 g.p.m., donde los puntos tienen un error pequeño, para gastos mayores se correlaciona linealmente a la lectura más cercana al punto de interés, ya que la ecuación en rango de gastos altos arroja errores grandes con una desviación estándar de más de 100 PSI.

Hasta ahora no se han mencionado los efectos de extremo, dichos efectos serán significativos cuando existan varios cambios bruscos de sección en una tubería, el caso de los extremos (empalme con la junta) de la tubería de perforación podría ser significativo si el recalque no fuera ahusado (tipo vénturi), la -

gran mayoría de las tuberías usadas en Perforación PEMEX son -- de este tipo, es decir, API con recalque exterior e interior y -- en algunos casos sólo interior⁽⁹⁾ y como las pérdidas en un vén turi son muy pequeñas⁽¹⁰⁾, los efectos de extremo resultarán -- despreciables y por lo tanto no se considerarán.

CONCLUSIONES

Los fluidos de emulsión inversa base diesel siguen el comportamiento delineado por Metzner y Reed⁽¹¹⁾ en flujo laminar y el delineado por Dodge y Metzner⁽⁷⁾ en flujo transicional y turbulento en condiciones de presión y temperatura constantes.

El efecto temperatura en caídas de presión en este tipo de fluidos es grande y no es posible despreciarlo sin caer en errores de magnitud considerable.

Existe un cambio en el comportamiento reológico del fluido a velocidades de corte altas (más de $1,100 \text{ seg}^{-1}$), además del mencionado a velocidades de corte bajas en el capítulo III, dicho comportamiento no podrá ser evaluado con el viscosímetro -- utilizado actualmente (Fann-35), debido a su limitación a 600 -- RPM.

POZO LUNA N° 33

CONEXIONES SUPERFICIALES.

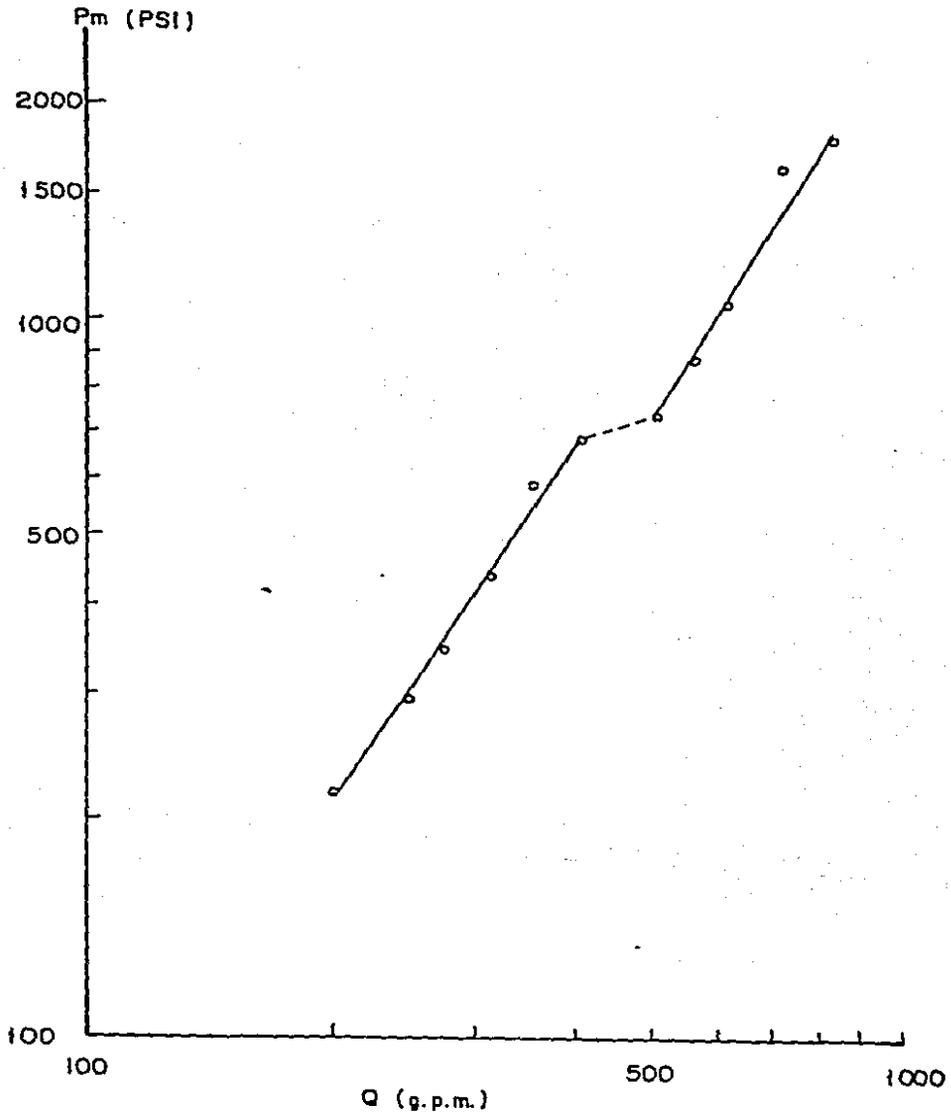


FIGURA N° 4-1 Gastos y Presiones en conexiones superficiales (Pozo Luna N° 33).

POZO CHACUACO # 1

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	p _{c1} (PSI)	P _{c2} (PSI)	P _{c3} (PSI)
388	1800	2134	2008	1938
348	1550	1747	1640	1580
240	900	823	829	793
210	660	660	640	621
174	550	492	435	441
126	490	305	264	238

Tabla 4-1.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas con el fluido a 3 diferentes temperaturas, en barrena y 196 m de -- lastrabarrenas, Lodo drilex, densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo chacuaco #1).

Q (g.p.m.)	P _m (PSI)	p _{c1} (PSI)	P _{c2} (PSI)	P _{c3} (PSI)
388	1825	2493	2236	2138
336	1600	1857	1718	1639
297	1500	1458	1374	1308
247	900	974	985	934
310	775	748	711	697
168	500	539	463	454
126	350	364	307	270

Tabla 4-2.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas con el fluido a 3 diferentes temperaturas en barrena, 196 m de lastrabarrenas y 137 m de tubería de pared gruesa de 5". Lodo Dri lex, densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco #1).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	Pc3 (PSI)
388	2400	2693	2511	2388
336	2200	2105	1912	1832
306	1950	1782	1622	1548
246	1200	1160	1122	1039
210	1050	920	840	795
171	700	700	587	558
126	500	480	397	339

Tabla 4-3.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas con el fluido a 90, 120 y 150°F con la barrena estacionada a 1,000 m Lodo drilex, densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco #1).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	Pc3 (PSI)
360	2350	2759	2520	2423
306	2100	2127	1879	1798
252	1650	1508	1387	1252
210	900	1177	1033	942
168	750	900	740	665
126	580	653	533	444

Tabla 4-4.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas con el fluido a 90, 120 y 150°F con la barrena estacionada a 2,000m lodo drilex, densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco # 1).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	Pc3 (PSI)
338	2425	2878	2530	2483
297	2050	2360	2050	1932
246	1200	1746	1556	1377
210	1100	1437	1220	1091
168	850	1119	907	792
126	630	828	670	549

Tabla 4-5.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas con el fluido a 90, 120 y 150°F, con la barrena estacionada a 3,000 m, lodo drilex, densidad 2.05 gr/c.c. (Pozo Chacuaco # 1).

q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	PC3 (PSI)
422	1500	1583	1516	1438
367	1200	1268	1223	1148
336	1000	1103	1063	996
290	850	875	843	787
238	500	603	619	575
218	320	507	518	500
129	200	264	242	204

Tabla 4-6.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas con el fluido a 100, 120 y 150°F con barrena y 222 m de lastrabarras. Lodo Perfoil, densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón #1).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	Pc3 (PSI)
416	2000	1831	1756	1637
374	1800	1546	1482	1379
345	1500	1361	1304	1211
298	1050	1080	1035	957
225	600	621	632	612
200	550	529	500	508
168	380	430	395	379
133	300	328	300	242

Tabla 4-7.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas con el fluido a 100, 120 y 150°F, con barrena, 222m de lastrabarrenas y 138 m de tubería de pared gruesa de 5". Lodo Perfoil, densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	Pc3 (PSI)
423	2100	2180	2116	1952
374	1900	1789	1714	1603
338	1600	1538	1455	1365
297	1200	1265	1200	1106
238	830	846	850	765
206	600	690	650	617
168	480	552	501	446
132	450	429	387	297

Tabla 4-8.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas con el fluido a 100, 120 y 150°F, con la barrena estacionada a 1,000 m. Lodo Perfoil, densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	Pc3 (PSI)
420	2300	2616	2571	2350
390	2100	2285	2242	2090
357	2000	2030	1910	1777
300	1500	1588	1489	1328
240	900	1106	1076	926
203	750	897	824	732
148	650	655	588	449
126	550	562	503	368

Tabla 4-9.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas a 100, 120 y 150°F, con la barrena estacionada a 2,000 m. Lodo-Perfoil, densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	Pc3 (PSI)
420	2350	3078	3051	2749
361	2000	2427	2282	2167
336	1800	2209	2038	1950
296	1700	1853	1728	1577
258	1250	1507	1433	1214
210	950	1153	1058	903
168	650	932	831	658
126	450	716	637	454

Tabla 4-10.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas a 100, 120 y 150°F, con la barrena estacionada a 3,000 m. Lodo-Perfoil, densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón #1).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc1 (PSI)	Pc2 (PSI)	Pc3 (PSI)
365	2500	2834	2673	2559
336	2250	2553	2337	2249
296	1700	2151	1995	1816
240	1050	1600	1505	1227
210	900	1377	1252	1038
168	800	1122	996	765
126	500	869	772	540

Tabla 4-11.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas a 100, 120 y 150°F, con la barrena estacionada a 4,000 m. Lodo-Perfoil, densidad 1.84 gr/c.c. (Pozo Caletón # 1).

El cálculo de Pcs se hizo con la ec. $P = C Q^m$, donde:

$c = 0.0711$, $m = 1.52$ y $\bar{E} = -0.614$, $SD = 20.81$ PSI (Pozo Ocuapan # 201-A).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc (PSI)	E (PSI)	Pcs (PSI)
504	1450	1455	5	911
406	1000	1038	38	656
307	700	683	-17	429
280	600	589	-11	373
242	500	472	-28	299
210	400	381	-19	241

$\bar{E} = -5.33$ y $SD = 21.8$ PSI

Tabla 4-12.- Caídas de presión medidas y calculadas a 105°F, y error de la presión calculada con respecto a la medida en conexiones superficiales y 137 m de lastrabarreras de 6½" x 2 13/16". Lodo perfoil, densidad 2.01 gr/c.c. (Pozo Ocuapan # 201-A)

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc (PSI)	E (PSI)	Pcs (PSI)
434	1000	1020	20	726
360	750	718	-32	546
315	650	617	-33	446
274	500	498	-2	361
252	400	416	16	318
210	300	330	30	241

$\bar{E} = -0.166$ y $SD = 24.7$ PSI

Tabla 4-13.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas a 105°F, y error de la presión calculada con respecto a la medida en conexiones superficiales y 137 m de tubería de pared gruesa de 5". Lodo Perfoil, densidad 2.01 gr/c.c. (Pozo Ocuapan # 201-A).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc (PSI)	E (PSI)	Pcs (PSI)
484	900	930	30	857
370	650	620	-30	570
307	450	467	17	429
286	400	424	24	385
206	250	256	6	234

$\bar{E} = 0.4$ y SD - 21.2 PSI

Tabla 4-14.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas a 105°F en conexiones superficiales y 140 m de tubería de perforación de 5", 19.5 #/pie, grado E, y sus errores de la presión calculada con respecto a la medida. Lodo Perfoil, densidad 2.01 gr/c.c. (Pozo Ocuapan # 201-A).

El cálculo de Pcs se hizo ;on la ec. $P = C Q^m$, en gastos bajos (menos de 420 g.p.m.), donde $C = 0.0178$, $m = 1.76$ y $SD=15.7$.PSI (Pozo Luna # 33).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc (PSI)	E (PSI)	Pcs (PSI)
825	2550	2647	97	1858
720	2000	2322	322	1705
698	1850	2240	390	1653
542	1175	1271	96	824
466	1100	1096	-4	780
393	950	902	-48	656
350	700	740	40	533
286	500	528	28	374
252	400	429	29	300
210	300	317	17	217

$$\bar{E} = 10.5 \text{ y } SD = 29.5 \text{ PSI}$$

Tabla 14-15.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas a 115°F, en conexión superficiales y 129 m de lastrabarrenas de 6½" x 2 13/16", y errores de la presión calculada con respecto a la medida, lodo drilex, densidad 1.67 gr/c.c. (Pozo - Luna # 33).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc (PSI)	E (PSI)	Pcs (PSI)
848	2100	2371	271	1908
720	1925	2061	136	1705
500	1025	960	-65	758
434	900	882	-18	720
340	600	616	16	508
315	550	540	-10	444
252	400	368	-32	300
203	250	254	4	205

$$\bar{E} = 17.5 \text{ y } SD = 26.1 \text{ PSI}$$

Tabla 4-16.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas a 115°F en conexiones superficiales y 107 m de tubería de pared gruesa de 5", y errores de la presión calculada con respecto a la medida, lodo drilex, densidad 1.67 gr/c.c. (Pozo - Luna # 33).

Q (g.p.m.)	Pm (PSI)	Pc (PSI)	E (PSI)	Pcs (PSI)
700	1725	1770	45	1657
615	1300	1258	-42	1164
548	980	971	-9	884
504	825	839	14	769
420	800	791	9	737
370	650	634	-14	590
315	480	481	1	444
252	320	323	3	300

$\bar{E} = 0.875$ y SD - 23.3 PSI

Tabla 4-17.- Gastos y caídas de presión medidas y calculadas a 115°F en conexiones superficiales y 141 m de tubería de perforación de 5", 19.5 #/pie, grado E, y errores de la presión calculada con respecto a la medida. Lodo drilex, densidad -- 1.67 gr/c.c. (Pozo Luna # 33).

NOMENCLATURA

- a = Parámetro definido por la ecuación (4.11)
- b = Parámetro definido por la ecuación (4.12)
- C = Coeficiente en la ecuación $P = C Q^m$
- D = Diámetro (pies).
- D_h = Diámetro de agujero (pies)
- D_p = Diámetro de la tubería (pies)
- E = Error
- \bar{E} = Media del error.
- f = Coeficiente de fricción de Fanning
- f'_l = Coeficiente de fricción de flujo laminar máximo
- f'_{tu} = Coeficiente de fricción de flujo turbulento mínimo
- g_c = Constante gravitacional [32.17 (lb_m/lb_f) (ft/seg²)]
- k = Índice de consistencia del fluido (ley de potencias)
- k' = Índice de consistencia definido por la ecuación (4.6)
- L = Longitud (pies)
- m = Exponente del gasto (Q) en $P = C Q^m$
- n = Índice de comportamiento de flujo (ley de potencias)
- n' = Índice de comportamiento de flujo definido por ec. (4.3)
- P_m = Presión medida (psi)
- P_c = Presión calculada (psi)
- Q = Gasto (galones/minuto)
- Re' = Número de Reynolds generalizado definido por ec. (4.2)
- SD = Desviación estándar.
- V = Velocidad (ft/seg)
- ΔP = Diferencia de Presión (lb/pie²).

Pcs = Presión en conexiones superficiales (PSI)

ρ = Densidad (lb/pie³)

Nota: Los subíndices 1, 2 y 3 corresponden a las presiones calculadas a las tres diferentes temperaturas a las cuales se calcularon las propiedades reológicas de los lodos de los pozos Chacuaco #1 y Caletón #1.

REFERENCIAS

- (1) Metzner A.B. and Reed J.C. Flow of Non-Newtonian Fluids Correlation of the Laminar, Transition and Turbulent-Flow Regions. A.I.Ch.E. Journal, Diciembre, 1955, p. 434-435.
- (2) Dodge D.W. and Metzner A.B. Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems. A.I.Ch.E. Journal Vol. 5, No. 2, Junio 1959, p. 191.
- (3) Wohl, M.H. Dynamics of Flow Between Parallel Plates and in Noncircular Ducts. Chemical Engineering, parte 5, 6 de mayo de 1968, p. 183-185.
- (4) Dodge D.W. and Metzner, A.B. Turbulent flow of Non-Newtonian Systems. A.I.Ch.E. Journal, Vol. 5, No. 2, Junio de 1959, p. 197.
- (5) Richard LeBaron, Bowen, Jr. Designing Turbulent-Flow Systems Chemical Engineering, Julio 24, 1961, p. 145.

- (6) Zamora, M. and Lord. D.L. Practical Analysis of Drilling -- Mud Flow in pipes and Annuli. Paper No. SPE 4976, Dallas, - Tex. 1974, p. 4.
- (7) Dodge D.W. and Metzner, A.B. Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems. A.I.Ch.E. Journal, Vol. 5, No. 2, Junio 1959, p. - 189-204.
- (8) McMordie, W.C., Bennett, R.B. and Bland R.G. The effect of- Temperature and Pressure on the viscosity of Oil Base Muds. Paper No. Spe 4974. Dallas, Tex. 1974, p. 2, Figs. 4, 5, 6- y 8.
- (9) API Spec. 5.A., Edición 33. American Petroleum Institute. - Dallas Tex. Marzo, 1976, p. 32-33.
- (10) Streeter, V.L. Mecánica de Fluidos. Libros McGraw-Hill, Mé xico, Cuarta Edición, 1974, p. 457.
- (11) Metzner, A.B. y Reed, J.C. Flow of Non-Newtonian Fluids Co rrelation of the Laminar, Transition, and Turbulent - Flow Regions. A.I.Ch.E. Journal. Diciembre, 1955, p. 434-440.

CAPITULO V

OBTENCION DE CAIDAS DE PRESION EN EL SISTEMA BAJO CONDICIONES REALES DE FLUJO PERMANENTE Y EN ESTADO ESTABLE

En el capítulo anterior se obtuvieron caídas de presión con los criterios delineados, bajo condiciones de temperatura y presión constantes.

La realidad sin embargo, es que en los pozos las condiciones existentes no son ni de presión ni de temperatura constantes. Tanto presión como temperatura aumentan conforme al agujero se profundiza y es diferente en cada punto.

En este capítulo trataremos condiciones de estado estable, es decir cuando la variación de la temperatura (perfil de temperaturas) sea constante en el tiempo.

Se considerará que un sistema está en estado estable cuando las temperaturas del lodo a la entrada y salida del pozo permanezcan constantes.

Para analizar condiciones de flujo permanente y en estado estable se recabaron datos de varios pozos trabajando bajo tales condiciones, y se compararon sus caídas de presión reales (medidas en el pozo), con las caídas de presión calculadas en

base a las condiciones reológicas del lodo medidas a temperatura de salida del lodo del pozo.

Para tal propósito se definirá un factor de corrección F_c que será igual a la presión medida en el pozo entre la presión calculada con los criterios delineados por Metzner y Reed en flujo laminar y los de Dodge y Metzner en flujo turbulento, y con los parámetros n y k calculados a la temperatura del fluido en la salida del pozo ($F_c = P_m/P_c$).

Se escogieron 10 pozos de la zona sureste de México trabajando en condiciones de estado estable, su geometría, condiciones del lodo, así como las presiones medida y calculada a condiciones de salida del pozo están en las tablas 5-1 a 5-10. En las mismas tablas están los factores de corrección.

Las presiones utilizadas para el cálculo de dichos factores son las presiones totales menos las presiones en barrena y conexiones superficiales, el factor de corrección debe aplicarse a la caída de presión en la sarta únicamente, ya que la presión en la barrena dependerá solamente de la densidad y velocidad del fluido y la presión en conexiones superficiales medida en el pozo es la real, ya que tanto temperatura como presión permanecen constantes.

Para calcular las caídas de presión en la barrena se consideró que el lodo es incomprensible y de densidad constante, aun

que se sabe que ningún lodo exhibe estas características al -- 100% (1), en base a lo anterior aquí consideraremos las caídas de presión en la barrena reales y calculadas de igual magnitud.

En el capítulo III se vió el efecto de la temperatura en las condiciones reológicas del lodo y en el IV su efecto sobre caídas de presión.

En este capítulo únicamente se pretenderá demostrar que el factor de corrección propuesto tiene aplicaciones prácticas dentro de los límites que se señalan.

La temperatura del lodo en el pozo dependerá del gradiente geotérmico del área y de la profundidad del pozo, si el pozo se encuentra circulando, también dependerá del gasto con que se -- trabaje. (2)

A mayor gasto, mayor enfriamiento, menor temperatura y viceversa.

Un parámetro más adecuado para cuantificar este enfriamiento es el gasto por unidad de longitud del diámetro del agujero, en nuestro caso utilizaremos galones por minuto por pulgada de diámetro de agujero.

Dicho parámetro es más adecuado por el hecho de que gastos por pulgada de diámetro de agujero iguales arrojarán tiempos de

estancia dentro del pozo y regímenes de flujo "similares".

Al hablar de gastos en este capítulo nos referiremos al parámetro definido anteriormente (galones por minuto por pulgada de diámetro de agujero), a menos que se especifique lo contrario.

El otro parámetro que también afecta a las condiciones reológicas del lodo aunque en menor grado es la presión, que dependerá de la profundidad del pozo y de la densidad del fluido. - Este último parámetro (la presión) será considerado para el cálculo del factor de corrección sólo parcialmente, es decir, en función únicamente de la profundidad.

La densidad del lodo se utiliza para calcular las caídas de presión en la sarta a presión y temperatura constantes, donde se omite parcialmente el cálculo del factor de corrección.

En la figura No. 5-1 se grafican los factores de corrección reales de los 10 pozos mencionados (Tablas 5-1 a 5-10) contra la profundidad, un rápido análisis es suficiente para percatarse que a mayor profundidad corresponderá mayor corrección.

Un análisis más detallado nos indica que a una misma profundidad gastos mayores arrojan correcciones menores, es decir, existe una relación inversa entre el gasto y el factor de corrección, considerando el factor de corrección nulo igual a la

unidad.

Cuando la corrección a hacer es cero, las presiones medida y calculada serán iguales y $F_c=1$. Mientras mayor sea la corrección F_c se alejará más de la unidad.

Entonces para un mismo gradiente geotérmico tendremos una línea para cada gasto dentro de los ejes definidos (F_c vs. Profundidad). Si el gradiente geotérmico define un comportamiento lineal con respecto a la profundidad, entonces nuestras líneas que definen al factor de corrección serán una familia de rectas (cada una definiendo a un gasto) con ordenada al origen igual a uno.

Este es precisamente nuestro caso ya que el gradiente geotérmico de la zona sureste exhibe un comportamiento lineal con respecto a la profundidad.

Dicho comportamiento lineal se acentúa después de los 1,000m aunque el gradiente geotérmico promedio se tomará considerando un comportamiento lineal a lo largo de todo el pozo, el rango de utilización del factor de corrección propuesto será de 1,000 a 7,000 m.

El gradiente geotérmico promedio de la zona sureste es de: $2.1^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ ó $1.15^{\circ}\text{F}/100 \text{ Ft.}$ con una desviación máxima y mínima de $0.12^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ y $0.14^{\circ}\text{C}/100 \text{ m.}$ (3)

La familia de rectas mencionada anteriormente será del tipo $y = m x + 1$, donde y = factor de corrección, x = profundidad y m = pendiente.

La pendiente guardará una relación inversa al gasto, y tendremos entonces que $m = C/QA$, donde C será una constante que deberá obtenerse experimentalmente y que variará de acuerdo al -- gradiente geotérmico del área, y QA el gasto por unidad de longitud de diámetro de agujero.

Para el caso de la zona sureste de México, basándose en -- los 10 pozos en estudio, $C = -8.2 \times 10^{-4}$ x gal/min. pulg. m.

Para la obtención de dicha constante se elaboró un programa de computación en lenguaje BASIC, que se expone en el anexo de esta tesis.

El error máximo obtenido con este valor de C fue de 40.08-PSI, el promedio de errores -1.762 y la desviación estándar -20.30 PSI.

En la tabla 5-11 están los errores resultantes en los 10 -- pozos, gastos, densidades, relación agua/aceite, contenido de -- sólidos y factor de corrección calculado con $C = -8.2 \times 10^{-4}$ -- gal/min. pulg. m.

En la tabla 5-11 podemos observar que no existe ningún indicio claro del efecto que la densidad pudiera tener en el factor de corrección, aunque las densidades estuvieron en un rango definido de 1.62 , a 2.02 gr/c.c. con un promedio de densidades en los 10 pozos de 1.83 gr/c.c.

Las profundidades por otro lado son de 2,100 a 6,238 m, pero la mayoría de los casos están entre los 3,000 y 6,500 m (8 - casos) y 6 entre los 4,500 y 6,500 m.

Los factores de corrección calculados con $C = -8.2 \times 10^{-4}$ (familia de rectas) están graficados en la figura 5-1 y se puede observar su relación con los factores reales (puntos).

Para verificar si el factor de corrección propuesto reproduce presiones medidas (reales) dentro de rangos aceptables se hará este sencillo estudio:

El error E se definirá como $E = P_c - P_m$ ----- (5.1)

La media de los errores \bar{E} será $\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$ ----- (5.2)

y la desviación estándar de los errores: $S\bar{E} = SD / \sqrt{n}$ ----- (5.3)

Primero probaremos la hipótesis: $H_0: \bar{E} = 0$, mediante la verificación de la hipótesis alterna: $H_a: \bar{E} \neq 0$.

Para lo anterior se calculará el parámetro estadístico "t":

$$t = \bar{E} / \bar{SE} \text{ ----- (5.4)}$$

Criterios:

a) H_A será verdadera si

$$|t| > t_{v_1} (1-\alpha) \text{ (de tablas), donde:}$$

v = Grados de libertad (n-1)

α = Probabilidad de error

Si H_A es verdadera se rechaza H_0 y el modelo NO predice P_m bajo condiciones de confianza.

b) Si $|t| \leq t_{v_1} (1-\alpha)$ (de tablas)

Se rechaza H_A , se acepta H_0 y se concluye que, para $(1-\alpha)\%$ de casos, el modelo reproducirá la presión medida con $(1-\alpha)\%$ de confianza.

1.- Se fijará el 95% de confianza mínima.

De la tabla 5-12 tendremos: $\bar{E} = -1.765$, $SD = 20.308$

$\therefore t = -0.274$; de tablas ⁽⁴⁾ obtenemos: $t_{(0.05)} = 2.265$,

como $|t| < t_{(0.05)}$, se rechaza H_A , se acepta H_0 y concluimos que con un 95% de confiabilidad el modelo propuesto resulta

en valores de presión que son iguales a los valores medidos.

En lo referente al intervalo de confianza tendremos:

$I_c = (E \pm (SE * t_{(0.05)}))$ con un nivel de 95% de confianza

$I_c = -1.756 \pm (6.421 * 2.262)$

$I_{c(0.095)} = (-16.28, 12.77)$ psi

Lo cual indica que con un 95% de confianza aseguramos que nuestro modelo ($F_c = (-c/QA) * Profundidad + 1$), no rebasará el intervalo mencionado ($I_{c(0.095)}$).

Lo anterior hace evidente que el rango de ± 50 Psi está -- muy por encima de los valores calculados dentro del rango de -- 95% de confiabilidad.

Ya que el rango de gastos utilizados fue de 24.4 galones - por minuto por pulgada de diámetro de agujero (g.p.p.a.) a 43.3 g.p.p.a., se propone este factor para un rango de 20 a 50 g.p.p.a. con un rango de profundidades de 1,000 a 7,000 m.

Por lo que respecta a densidades de un rango de 1.55 a 2.10 gr/c.c., es el recomendado.

Las restricciones antes mencionadas están dentro de los -- rangos comprobados experimentalmente, pero nada nos indica que--

su ampliación no sea posible y correcta, sin embargo mientras -- más fuera de los límites señalados, la probabilidad de error -- será mayor.

CONCLUSIONES

- 1.- El factor de corrección propuesto toma como base las condiciones de presión y temperatura del fluido a la salida del pozo. Si las condiciones reológicas del fluido son tomadas bajo otras condiciones, el factor propuesto carece de significado.
- 2.- La forma general del factor de corrección propuesto será -- $F_c = (C/QA) \times \text{Profundidad} + 1$, donde C será una constante -- que dependerá del gradiente geotérmico del área y deberá obtenerse experimentalmente, en la zona sureste de México: -- $C = -8.2 \times 10^{-4}$ gal/min. pulg. m.
- 3.- Con la utilización de este factor y las teorías delineadas en el capítulo IV se puede calcular la presión real en un pozo con un error menor a ± 50 PSI.

POZO # 1R

OCUAFAN # 201

Lodo Perfoil

VA = 75

VP = 55

Q = 316 g.p.m.

ρ = 2.00 gr/c.c.

3 Toberas = 0.5" Diam.

HERRAMIENTA

Di = 2.8125"

DE = 6.5"

DA = 8.4"

L = 196 m

HEVI-WATE

DI = 3"

DE = 5"

DA = 8.4"

L = 140 m

T.P. # 1

DI = 4.27"

DE = 5"

DA = 8.4"

DJ = 3.75

L = 5,386 m

LT = 5,722 m

S = 25 PSI

QA = 37.5 g.p.p.a.

Pm = 175 Kg/cm² = 2485 psi

Pc = 2,769 psi

Pb = 439 psi

Fc = 0.876

Pr = 2,481 psi

Fcc = 0.875

E = -4 psi

Tabla # 5-1

POZO # 2R

PALAPA # 1

Lodo Perfoil

VA = 105

VP = 88

Q = 387 g.p.m.

3 Toberas = 0.5" Diam.

ρ = 2.02 gr/c.c.

HERRAMIENTA

DI = 2.8125"

DE = 8"

DA = 12.1"

L = 140 m

LT = 4,531 m

S = 30 psi

QA = 31.9 g.p.p.a.

Pm = 180 Kg/cm² = 2,556 psi

Pc = 2,761 psi

FC = 0.900

Pb = 665 psi

Pr = 2,521 psi

Fcc = 0.883

E = -35 psi

HEVI-WATE

DI = 3"

DE = 5"

DA = 12.1"

L = 140 m

T.P. # 1

DI = 4.27"

DE = 5.0"

DA = 12.1"

DJ = 3.75"

L = 4,251 m

Tabla # 5-2

POZO # 3R

ARRASTRADERO # 3-D

Lodo Perfoil

VA = 72

VP = 55

Q = 417 g.p.m.

ρ = 1.76 gr/c.c.

3 Toberas = 0.5" Diam.

HERRAMIENTA

DI = 2.8125"

DE = 7.25"

DA = 9.6"

L = 196 m

LT = 3,600 m

S = 42 psi

QA = 43.4 g.p.p.a.

$P_m = 160 \text{ Kg/cm}^2 = 2,270 \text{ psi}$

Pc = 2,381 psi

Pb = 672 psi

Fc = 0.933

Pr = 2,268 psi

Fcc = 0.932

E = -2 psi

HEVI-WATE

DI = 0

T.P. # 1

DI = 4.27"

DE = 7.25"

DA = 9.6"

DJ = 3.75"

L = 3,409 m

Tabla # 5-3

POZO # 4R

LUNA # 22

Lodo Drilex

VA = 57

VP = 61

Q = 440 g.p.m.

$\rho = 1.92$ gr/c.c.

3 Toberas = 0.5" Diam.

HERRAMIENTA

DI = 2.8125"

DE = 8"

DA = 12.1"

L = 118 m.

HEVI-WATE

DI = 3"

DE = 5"

DA = 12.1"

L = 114 m

T.P. # 1

DI = 4.27"

DE = 5"

DA = 12.1"

DJ = 3.5"

L = 2.933

LT = 3,160 m

QA = 36.3 g.p.p.a.

Pm = 170 kg/cm² = 2,414 psi

Pc = 2,521 psi

Pb = 815 psi

Fc = 0.936

Pr = 2,402 psi

Fcc = 0.929

E = -12 psi

Tabla # 5-4

POZO # 5R

IRIDE # 151

Lodo Drilex

VA = 46

VP = 42

Q = 370 g.p.m.

$\rho = 1.65 \text{ gr/c.c.}$

3 Toberas = 0.5" Diam.

HERRAMIENTA

DI = 2.8125"

DE = 8"

DA = 12.3"

L = 114 m

HEVI-WATE

DI = 0

T.P. # 1

DI = 3.82"

DE = 4.5"

DA = 12.3"

L = 1,986 m

LT = 2,100 m

S = 32 psi

QA = 30.0 g.p.p.a.

Pm = 100 Kg/cm² = 1,420 psi

Pc = 1,465 psi

Pb = 496 psi

Fc = 0.951

Pr = 1,411 psi

Fcc = 0.943

E = -9 psi

Tabla # 5-5

POZO # 6R

TAPANCO # 11-B

Lodo Perfoil

VA = 110

VP = 100

Q = 400 g.p.m.

ρ = 2.00 gr/c.c.

3 Toberas = 0.5" diam.

HERRAMIENTA

DI = 2.8125"

DE = 8"

DA = 12.1"

L = 152 m

LT = 5,140 m

S = 40 psi

QA = 33.0 g.p.p.a.

Pm = 200 Kg/cm² = 2,840 psi

Pc = 3,193 psi

Pb = 703 psi

Fc = 0.856

Pr = 2,880

Fcc = 0.872

E = 40 psi

HEVI-WATE

DI = 3"

DE = 5"

DA = 12.1"

L = 114 m

T.P. # 1

DI = 4.27"

DE = 5"

DA = 12.1"

DJ = 3.75"

L = 4,874 m

Tabla # 5-6

POZO # 7R

LUNA # 23

Lodo Perfoil

VA = 57

VP = 42

Q = 160 g.p.m.

ρ = 1.62 gr/c.c.

3 Toberas = 0.5" Diam.

T.P. # 2

DI = 2.76"

DE = 3.5"

DA = 6.6"

DJ = 2.5"

L = 3,485 m

HERRAMIENTA

DI = 2.25"

DE = 4.75"

DA = 5.9"

L = 227 m

LT = 5,612 m

S = 7 psi

QA = 25.3 g.p.p.a.

Pm = 190 Kg/cm² = 2,698 psi

Pc = 3,285 psi

Pb = 91 psi

Fc = 0.815

Pr = 2,705 psi

Fcc = 0.818

E = 7 psi

HEVI-WATE

DI = 2.1"

DE = 3.5"

DA = 5.9"

L = 114 m

T.P. # 1

DI = 2.76

DE = 3.5"

DA = 5.9"

DJ = 2.68"

L = 1,786 m

TABLA # 5-7

POZO # 8R

LUNA # 4

Lodo Perfoil

VA = 68

T.P. # 2

VP = 52

DI = 2.76"

Q = 155 g.p.m.

DE = 3.5"

$\rho = 1.83 \text{ gr/c.c.}$

DA = 5.9"

3 Toberas = 0.9375" Diam (S/T)DJ = 2.68"

L = 1,503 m

HERRAMIENTA

DI = 2.25"

LT = 5,193 m

DE = 4.75"

S = 7 psi

DA = 5.9"

QA = 24.4 g.p.p.a.

L = 240 m

$P_m = 182 \text{ Kg/cm}^2 = 2,584 \text{ psi}$

Pc = 3,140 psi

HEVI-WATE

Pb = 8 psi

DI = 0

Fc = 0.822

Pr = 2,594 psi

T.P. # 1

Fcc = 0.825

DI = 2.75"

E = 11 psi

DE = 3.5"

DA = 6.6"

DJ = 2.43"

L = 3,450 m

Tabla # 5-8

POZO # 9R

CALETON # 1-A

Lodo Perfoil

VA = 105

LT = 6,238 m

VP = 89

S = 24 psi

Q = 336 g.p.m.

QA = 35.0 g.p.p.a.

ρ = 1.84 gr/c.c.

Pm = 170 Kg/c.c. = 2,414 psi

3 Toberas = 0.5625" Diam

Pc = 2,742 psi

Pb = 285 psi

HERRAMIENTA

Fc = 0.865

DI = 2.8125"

Pr = 2,386

DE = 7.25"

Fcc = 0.854

DA = 9.6"

E = -28

L = 200 m

HEVI-WATE

DI = 3"

DE = 5"

DA = 9.6"

L = 114 m

T.P. # 1

DI = 4.27"

DE = 5"

DA = 9.6"

DJ = 3.25"

TABLA # 5-9

L = 5,925 m

POZO # 10R

LUNA # 33

Lodo DRILEX

VA = 80

VP = 62

Q = 250 g.p.m.

$\rho = 1.67$ gr/c.c.

2 T = 0.4375" y 1 T = 0.4687" Diam DJ = 3.5"

T.P. # 2

DI = 4.27"

DE = 5"

DA = 8.4"

L = 3,000 m

HERRAMIENTA

DI = 2.8125"

DE = 6.5"

DA = 8.4"

L = 180 m

LT = 5,574 m

S = 15 psi

QA = 29.7 g.p.p.a.

Pm = 110 Kg/cm² = 1,562 psi

Pc = 1,794 psi

Pb = 355 psi

Fc = 0.837

Pr = 1,574 psi

Fcc = 0.846

E = 12 psi

HEVI-WATE

DI = 3"

DE = 5"

DA = 8.4"

L = 114 m

T.P. # 1

DI = 4.27"

DE = 5"

DA = 8.4"

DJ = 3.75"

L = 2,290 m

Tabla # 5-10

Pozo No.	Prof. (m)	QA (g.p.p.a.)	F _c	R.A.A. (%/%)	Sol.	ρ (gr/c.c.)	E (psi)
1R	5,722	37.6	0.876	80/20	38	2.00	-3.63
2R	4,531	31.9	0.900	80/20	36	2.02	-34.58
3R	3,600	43.4	0.933	74/26	30	1.76	-2.38
4R	3,160	36.3	0.935	78/22	35	1.92	-11.56
5R	2,100	30.0	0.951	72/28	28	1.65	-8.78
6R	5,140	33.0	0.855	80/20	40	2.00	40.08
7R	5,612	25.3	0.815	78/22	28	1.62	7.31
8R	5,193	24.4	0.822	75/25	32	1.83	10.62
9R	6,238	35.0	0.865	73/27	38	1.84	-27.57
10R	5,574	29.7	0.837	81/19	26	1.67	12.85

Tabla # 5-11.- Errores obtenidos en los 10 pozos estudiados y su comparación con los parámetros, densidad, contenido de sólidos y relación agua aceite.

Pozo No.	Pm (psi)	Pr (psi)	'E (psi)
1R	2,485	2,481	-4
2R	2,556	2,521	-35
3R	2,270	2,268	-2
4R	2,414	2,402	-12
5R	1,420	1,411	-9
6R	2,840	2,880	40
7R	2,698	2,705	7
8R	2,584	2,594	11
9R	2,414	2,386	-28
10R	1,562	1,574	12

Tabla No. 5-12.- Presiones medidas en los pozos y calculadas-
utilizando el factor de corrección propuesto, con sus respec-
tivos errores.

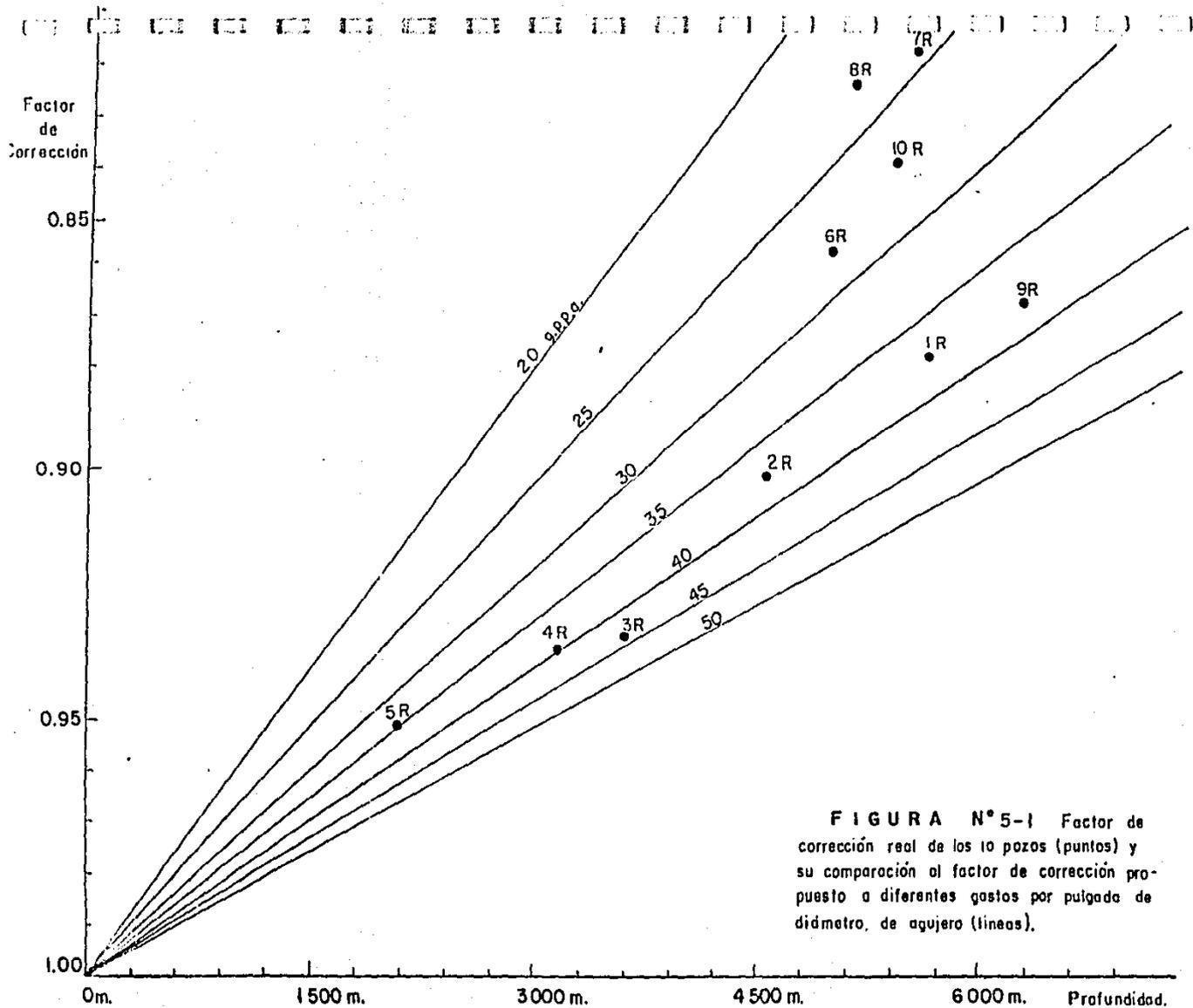


FIGURA N° 5-1 Factor de corrección real de los 10 pozos (puntos) y su comparación al factor de corrección propuesto a diferentes gastos por pulgada de diámetro, de agujero (lineas).

REFERENCIAS

- (1) Steeter, V.L. Mecánica de los Fluidos. Libros McGraw-Hill, México. Cuarta Edición, 1974. p. 26.
- (2) Galate, J.W. y Mitchell, R.F. Behavior of Oil Muds During Drilling Operations. SPE Drilling Engineering. Abril, 1986. p. 99 - 101.
- (3) Estudios hechos por el IMP y el Depto. de Yacimientos de -- PEMEX de Villahermosa, Tab., 1978. En base al gradiente de 10 diferentes campos de la zona sureste en el intervalo de 1,000 a 5,000 m de profundidad.
- (4) F.J. Rohlf y R.R. Sokal. Statistical Tables. 2nd Edition. W.H. Freeman and Co. State University of New York at Stony-Brook, 1967, Tabla No. 12, p. 81.

NOMENCLATURA

- C = Constante a obtener experimentalmente que depende del gradiente geotérmico.
- DA = Diámetro del agujero
- DE = Diámetro externo
- DI = Diámetro interno
- DJ = Diámetro interior de la junta de la tubería de perforación
- E = Error
- \bar{E} = Media del error
- Fc = Factor de corrección real
- Fcc = Factor de corrección calculado
- Ic = Intervalo de confianza
- L = Longitud
- LT = Longitud total
- Pb = Caída de presión en la barrena
- Pc = Presión calculada
- Pm = Presión medida
- Pr = Presión calculada con el factor de corrección propuesto
- Q = Gasto
- QA = Gasto por unidad de longitud del diámetro del agujero
- R.A.A. = Relación aceite-agua del lodo
- S = Presión en conexiones superficiales
- SD = Desviación estándar
- Sol. = Contenido de sólidos en el lodo
- t = Parámetro estadístico

T.P. = Tubería de perforación

VA = Viscosidad aparente

VP = Viscosidad plástica

ρ = Densidad

CONCLUSIONES GENERALES

Haciendo un resumen de las conclusiones obtenidas en cada capítulo tendremos:

- A) Nada indica que las fórmulas tradicionalmente usadas para obtener caídas de presión en las toberas de la barrena, no sean correctas.
- B) Los fluidos de emulsión inversa base Diesel siguen el modelo de Ostwald-DeWale en los rangos de interés para la perforación de pozos petroleros.

Existen dos tendencias bien definidas en el comportamiento reológico del fluido, una a velocidades de corte bajas (menos de 40 seg^{-1}) y otra a velocidades de corte altas (de 40 a $1,050 \text{ seg}^{-1}$), ambas tendencias siguen el modelo de Ostwald DeWeale.

Una tercer tendencia a velocidades de corte muy altas (más de $1,100 \text{ seg}^{-1}$) ha sido detectada, pero su estudio no podrá efectuarse con el viscosímetro rotacional estándar debido a su limitación a 600 R.P.M.

- C) Es posible calcular caídas de presión cuando se utiliza este tipo de fluidos, con un error menor a ± 50 PSI bajo condiciones de flujo permanente y en estado estable.

Para esto las caídas de presión deberán calcularse con las - condiciones reológicas a la temperatura del lodo a la salida del pozo, siguiendo las teorías delineadas por Metzner, Reed y Dodge, y posteriormente aplicando el factor de corrección- propuesto en este trabajo.

ANEXO DE COMPUTACION

PROGRAMA PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN LAS TOBERAS

Este programa calcula el valor del coeficiente de fricción (C) en base a la fórmula $C = \sqrt{\rho V^2 / 2 \Delta P}$, con los diferentes gastos y presiones en la barrena de que se disponga, en el ejemplo aquí ilustrado se utilizaron los datos recabados en la prueba 4 del pozo Caletón # 1, en una barrena con dos toberas de 13/32" y una de 14/32".

Después de calcular el coeficiente para cada gasto, el programa proporciona el coeficiente promedio.

NOMENCLATURA

- A = Area total de toberas (pulg²)
- B(N) = Suma de presiones a diferentes gastos (psi)
- C(J) = Coeficientes de fricción en la tobera
- D(J) = Caída de presión en la barrena (lb/pie²)
- F(J) = Caída de presión en la barrena (psi)
- G = Constante gravitacional (lbm/lbf) (ft/seg²)
- k = Coeficiente de la fórmula $P = k Q^m$ para conexiones superficiales
- M = Exponente de la fórmula $P = k Q^m$ para conexiones superficiales
- N = Número de puntos (presiones vs. gastos)
- P(J) = Presiones (psi)
- PRO = Coeficiente de fricción promedio
- Q(J) = Gastos (g.p.m.)
- R = Densidad en lb/pie³
- RM = Densidad en gr/c.c.
- S(J) = Presiones en conexiones superficiales
- V(J) = Velocidades en las toberas

JPRND
JLIST

10 REM COEFICIENTE DE TOBERAS
20 INPUT "NO. DE PUNTOS?"= "IN
30 INPUT "AREA TOTAL DE TOBERAS?
="A
40 INPUT "DENSIDAD (GR/CC)? ="IR
M
45 R = 62.3 * RM
50 INPUT "COEF. CONEX. SUP. (K)?="I
K
60 INPUT "EXP. CONEX. SUP. (M)?="IM

70 G = 32.17
80 FOR J = 1 TO N
90 READ P(J)
100 DATA 2000, 1720, 1550, 2000, 500
120 NEXT J
120 FOR J = 1 TO N
130 READ Q(J)
140 DATA 414, 376, 396, 274, 210, 17
B. 118, 82
150 NEXT J
160 FOR J = 1 TO N
170 V(J) = 0.32000 * Q(J) / A
180 S(J) = K * (Q(J) ^ M)
190 D(J) = P(J) - S(J)
200 PRINT "P.C.S.=";S(J); " @ ";
Q(J)
210 PRINT "P.D.C.=";D(J); " @ ";
B(J)
220 F(J) = D(J) * 144
230 C(J) = SER ((R * (V(J) ^ 2))
/ (2 * G * F(J)))
240 PRINT "C=";C(J); " @ ";Q(J)

245 B(0) = 0
240 B(J) = B(J - 1) + C(J)
250 PRINT
260 NEXT J
270 PRINT
280 PRO = B(N) / N
290 PRINT "COEFICIENTE PROMEDIO=
";PRO
300 END

JRUN
NO. DE PUNTOS?=8
AREA TOTAL DE TOBERAS?=3.40957
DENSIDAD (GR/CC)? =1.84
COEF. CONEX. SUP. (K)?=0.03794
EXP. CONEX. SUP. (M)?=1.5125
P.C.S.=629.521224 @ 414
P.D.C.=1370.47878 @ 414
C=-.974562858 @ 414

P.C.S.=533.998711 @ 376
P.D.C.=1181.00129 @ 376

PROGRAMA PARA AJUSTAR UNA CURVA DEL TIPO $P = k Q^m$ POR MEDIO DE
 UNA SERIE DE LINEALIZACION DE TAYLOR

En una serie de linealización de Taylor para linealizar --
 una curva del tipo $P=kQ^m$ ó $\tau=k\gamma^n$, tendremos que en términos -
 MATRICIALES:

$$b_{j+1} = b_j + (Z'_j Z_j)^{-1} Z'_j (y-f)$$

Donde suponiendo $P = k Q^m$ tendremos:

$$b_j = \begin{bmatrix} k \\ m \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} P_1 & kQ_1^m \\ P_2 & kQ_2^m \\ \vdots & \vdots \\ P_m & kQ_n^m \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{bmatrix} \quad Z_j = \begin{bmatrix} Q_1^m & kQ_1^m & \ln(Q) \\ Q_2^m & kQ_2^m & \ln(Q) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_n^m & kQ_n^m & \ln(Q) \end{bmatrix}$$

y Z'_j será la traspuesta de Z_j .

El resultado consistirá en una serie de iteraciones que con-
 vergerá dependiendo de los valores iniciales k y m , si con los-
 valores escogidos la serie no convergiera, se escogerán otros--
 valores iniciales hasta que la serie converja.

En el caso aquí ilustrado se tomaron las 8 lecturas del --
 viscosímetro del rango de velocidades de corte superior (de 30-
 a 600 R.P.M.) del lodo del pozo caletón #1 a una temperatura de
 120°F.

En los resultados podrá observarse como la serie converge arrojando un mismo valor en las sucesivas iteraciones.

Posteriormente el programa da los errores que son la diferencia entre los valores medidos y los calculados con parámetros n y k previamente calculados y los porcentajes del error en relación a la lectura real.

Finalmente el programa calcula el promedio de errores (media), el porcentaje del promedio de error y la desviación estándar.

NOMENCLATURA

ERR(J) = Errores

$K=C$ = Valor inicial del coeficiente de $P=kQ^m$ ó $\tau=k\delta^n$

M = Valor inicial de exponente de $P=kQ^m$ ó $\tau=k\delta^n$

MA = Media

NP = N = Número de puntos (lecturas)

P(J) = Presiones o esfuerzos de corte medidos

PCA(J) = Presiones o esfuerzos de corte calculados

PMM = Promedio del porcentaje de error

POE(J) = Porcentaje del error

Q(J) = Gastos o velocidades de corte medidos

SD = Desviación estándar.

b_j = B(I,J)

Y = Y(I,J)

$$f = F(I, J)$$

$$Z_j = Z(I, J)$$

$$Z'_j = U(I, J)$$

$$(Z'_j Z_j) = V(I, J)$$

$$(Z'_j Z_j)^{-1} = W(I, J)$$

$$(Z'_j Z_j)^{-1} Z'_j = X(I, J)$$

$$(Y-f) = R(I, J)$$

$$(Z'_j Z_j)^{-1} Z'_j (Y-f) = T(I, J)$$

1PRN0
1LIST

```
10 REM SERIE DE TAYLOR PARA LIN  
REALIZAR.  
20 DIM Y(10,1),B(2,1),F(10,1),Z(  
10,2),U(2,10),V(2,2),W(2,2),  
X(2,10),R(10,1),T(2,1)  
30 INPUT "N=";N  
40 INPUT "K=";K  
50 INPUT "M=";M  
60 FOR J = 1 TO N  
70 READ P(J)  
80 DATA 287,177,128,128,75,69,5  
1,31  
90 NEXT J  
100 FOR J = 1 TO N  
110 READ Q(J)  
120 DATA 1041,521,347,312,174,1  
56,104,52
```

```
130 NEXT J  
140 B(1,1) = C  
150 B(2,1) = M  
160 FOR I = 1 TO 10  
170 FOR J = 1 TO N  
180 FOR K = 1 TO 1  
190 Y(I,J) = P(I)  
200 NEXT J,I  
210 FOR I = 1 TO N  
220 FOR J = 1 TO 1  
230 F(I,J) = C * (Q(I) ^ M)  
240 NEXT J,I  
250 FOR I = 1 TO 1  
260 FOR J = 2 TO N  
270 FOR K = 1 TO N  
280 Z(K,I) = Q(K) ^ M  
290 Z(K,J) = C * (Q(K) ^ M) * LOG  
(Q(K))  
300 NEXT K,J,I  
310 FOR I = 1 TO N  
320 FOR J = 1 TO 2  
330 U(J,I) = Z(I,J)  
340 NEXT J,I  
350 FOR I = 1 TO 2  
360 FOR J = 1 TO N  
370 V(I,J) = B(I)  
380 FOR K = 1 TO N  
390 V(I,J) = V(I,J) + U(I,K) * Z(  
K,J)  
400 NEXT K,J,I  
410 D = (V(1,1) * V(2,2)) - (V(1,  
2) * V(2,1))  
420 W(1,1) = V(2,2) / D  
430 W(1,2) = -V(1,2) / D  
440 W(2,1) = -V(2,1) / D  
450 W(2,2) = V(1,1) / D  
460 FOR I = 1 TO 2  
470 FOR J = 1 TO N  
480 X(I,J) = 0.0  
490 FOR K = 1 TO 2  
500 X(I,J) = X(I,J) + U(I,K) * U(  
K,J)  
510 NEXT K,J,I  
520 FOR I = 1 TO N  
530 FOR J = 1 TO 1  
540 R(I,J) = Y(I,J) - F(I,J)  
550 NEXT J,I  
560 FOR I = 1 TO 2  
570 FOR J = 1 TO 1  
580 T(I,J) = 0.0  
590 FOR K = 1 TO N  
600 T(I,J) = T(I,J) + X(I,K) * R(  
K,J)  
610 NEXT K,J,I  
620 FOR I = 1 TO 2  
630 FOR J = 1 TO 1  
640 F(I,J) = F(I,J) + T(I,J)
```

```

670 PRINT "M=";B(2,1)
680 PRINT
682 C = B(1,1)
684 M = B(2,1)
690 NEXT L
700 FOR J = 1 TO N
710 PCA(J) = B(1,1) * (Q(J) ^ B(2
1))
720 ERR(J) = PCA(J) - P(J)
730 PRINT "ERROR=";ERR(J)
740 MED(0) = 0
750 MED(J) = MED(J - 1) + ERR(J)
752 S(0) = 0
754 S(J) = S(J - 1) + ERR(J) ^ 2
760 POE(J) = (ERR(J) / P(J)) * 10
0
770 PRO(0) = 0
780 PRO(J) = PRO(J - 1) + POE(J)
790 PRINT "% ERROR=";POE(J)
800 PRINT
810 NEXT J
820 MA = MED(N) / N
830 PRINT "MEDIA=";MA
840 PMM = PRO(N) / N
845 PRINT
850 PRINT "PRO,% ERR.=";PMM
852 SD = (S(N) / N) ^ 0.5
854 PRINT
856 PRINT "SD=";SD

```

```

858 PRINT
860 END

```

```

IRUN
NP=8
K=0.7
M=1.5
K=.0847607148
M=1.48430721

```

```

K=.0928876543
M=1.34392604

```

```

K=.189849125
M=1.08630895

```

```

K=.634178341
M=.719950404

```

```

K=1.65703613
M=.782201424

```

```

K=1.6427529
M=.749114782

```

```

K=1.68297943
M=.740579679

```

```

K=1.69415237
M=.748440496

```

```

K=1.68413509
M=.74844213

```

```

K=1.6841353
M=.748442111

```

```

ERROR=1.81620643
% ERROR=.633521404

```

```

ERROR=-4.08321275
% ERROR=-2.24170212

```

```

ERROR=.9374788384
% ERROR=.0388428425

```

```

ERROR=-1.65386707
% ERROR=-1.37822256

```

ERROR=1.602259
% ERROR=2.403012

ERROR=1.8367759
% ERROR=2.66199406

ERROR=1.46545008
% ERROR=2.87343153

ERROR=.403504588
% ERROR=1.3016277

MEDIA=.213574377

PRO,% ERR.=.783063107

SD=1.96852308

PROGRAMA PARA CALCULAR CAIDAS DE PRESION EN EL SISTEMA

En este programa se utilizan las fórmulas vistas en el capítulo II para obtener pérdidas en la barrena y las analizadas en el capítulo IV (Metzner, Reed y Dodge) para obtener las pérdidas en la sarta.

Se utilizan las aproximaciones de Schuh para obtener un -- factor de fricción en una aproximación del tipo Blasius ($f=a Re^{-b}$) al factor definido por Dodge y Metzner, así como para determinar el tipo de flujo (laminar, transición o turbulento).

El programa está diseñado en base a subrutinas, cada una -- de éstas calculará la presión en cada sección de la sarta (barrena, Herramienta, Hevi-Wate y tubería de perforación) y al final del programa las sumará para obtener la presión total calculada (PTC).

El programa puede trabajar con los parámetros n y k , la -- viscosidad aparente y plástica, o directamente con las lecturas del viscosímetro a 300 y 600 R.P.M.

Inicia pidiendo el valor de n , si no deseamos trabajar con n y k basta poner un cero al valor de n y nos pedirá el valor -- de la viscosidad aparente, si tampoco deseamos trabajar con viscosidades aparente y plástica igualamos a cero la viscosidad -- aparente y se nos pedirá la lectura del viscosímetro a 600 R.P.M.

y posteriormente la lectura a 300 R.P.M.

En la primera subrutina nos pedirá el diámetro de las toberas a utilizar, si no deseamos que se calcule la presión en la barrena se deberá poner un número mayor a uno como diámetro de la primer tobera y el programa se saltará esa subrutina, y procederá a pedirnos las dimensiones de los lastrabarrenas.

Si no se desea que se calcule la presión en los lastrabarrenas, se deberá igualar a cero el primer dato que nos pida acerca de la misma (diámetro interior) y se saltará dicha subrutina.

El procedimiento será el mismo si no deseamos que calcule caídas de presión en Hevi-Wate o tubería de perforación.

Las variables que no se utilicen, al final del programa se tomarán como cero y no afectarán el resultado final.

El programa prevé un tipo de lastrabarrenas, un tipo de tubería de pared gruesa y dos tipos de tubería de perforación, pero puede ampliarse al número que se desee de secciones de lastrabarrenas, tubería de pared gruesa o tubería de perforación - simplemente duplicando el procedimiento de cálculo para cualquiera de estas secciones, esto se puede apreciar claramente si se revisan las memorias de cálculo para las secciones de tubería de perforación Nos. 1 y 2, en donde el cálculo para obtener ca

das de presión para la sección #1 es el mismo que para la sección #2, lo único que cambiarán serán los datos y el nombre de las variables a usar.

El programa considera las reducciones que tienen las juntas en el interior con respecto al diámetro interior del tubo - en la tubería de perforación, pero las desprecia en el espacio anular por considerar la diferencia en caídas de presión insignificantes.

Asimismo, considera la posibilidad de los tres diferentes tipos de flujo en el interior de la sarta y solamente considera el flujo laminar para el espacio anular, lo anterior ya que para alcanzar velocidades para flujos de transición o turbulento en el espacio anular se necesitarían velocidades de corte demasiado altas en el interior de la sarta, lo cual como se vio en el capítulo IV se saldrá del rango de estudio y dará resultados erróneos.

En espacios anulares reducidos (agujeros reducidos), donde esto podría no ser cierto, las caídas de presión en el sistema, debido a la profundidad a la que generalmente se encuentran los pozos, imposibilitan el usar gastos elevados y alcanzar otro tipo de flujo en el espacio anular que no sea el laminar.

En el ejemplo ilustrado aquí se escogió el pozo No. 7R (Luna # 23) por utilizar dos tipos de tubería de perforación. Pri

mero se da un listado del programa y luego se corre con los datos del pozo mencionado.

NOMENCLATURA

- A = Variable definida por la Ecuación 4.12.
- AC = Diámetro exterior de la herramienta.
- AH = Diámetro exterior de la Hevi-^oate
- A1 = Diámetro del agujero en la sección de T.P. #1
- B = Variable definida por la ecuación 4.13
- BN = Area total de toberas
- C1 = No. de Reynolds generalizado de cambio de flujo laminar a transición
- C2 = No. de Reynolds generalizado de cambio de flujo de transición a turbulento
- DA = Diámetro de agujero
- DC = Diámetro interior de la herramienta
- DH = Diámetro del agujero en la sección de hevi-wate
- DW = Diámetro en el interior de la hevi-wate
- DE = Diámetro equivalente (del espacio anular)
- E1 = Diámetro exterior de la sección de T.P. #1
- E2 = Diámetro exterior de la sección de T.P. #2
- F = Factor de fricción
- F1 = Factor de fricción en el interior de juntas de secc. de T.P. #1
- F2 = Factor de fricción en el interior del tubo de secc. de T.P. #2.

F4 = Factor de fricción en el int. de juntas de secc. de T.P. #2
 I1 = Diámetro interior del tubo de la secc. de T.P. #1
 I2 = Diámetro interior del tubo de la secc. de T.P. #2
 J1 = Diámetro interior de la junta de la secc. de T.P. #1
 J2 = Diámetro interior de la junta de la sección de T.P. #2
 k = Índice de consistencia
 KP = Índice de consistencia definido por la ecuación 4.6 (K'')
 L = Longitud de la herramienta o hevi-wate
 LC = Longitud de la herramienta en metros
 LH = Longitud de la hev-wate en metros
 L1 = Longitud de las juntas de la sección de T.P. #1 en pies
 L2 = Longitud del tubo de la sección de T.P. # 1 en pies
 L3 = Longitud total de la sección de T.P. #1 en pies
 L4 = Longitud de las juntas de la sección de T.P. #2 en pies
 L5 = Longitud del tubo de la sección de T.P. #2 en pies
 L6 = Longitud total de la sección de T.P. #2 en pies
 M1 = Longitud total de la sección de T.P. #1 en metros
 M2 = Longitud total de la sección de T.P. #2 en metros
 N = Índice de comportamiento de flujo
 NRE = No. de Reynolds generalizado en herramienta o hevi-wate
 N1 = No. de Reynolds generalizado en interior de juntas de la--
 sección de T.P. # 1
 N2 = No. de Reynolds generalizado para el interior del tubo de-
 la sección de T.P. #1.
 N3 = No. de Reynolds generalizado para el interior de las jun--
 tas de la sección de T.P. #2.

N4 = No. de Reynolds generalizado para el interior del tubo de la sección de T.P. #2
 PA = Caída de presión en el espacio anular de hta. o H.W.
 PB = Caída de presión en la barrena
 PC = Caída de presión total en la herramienta
 PH = Caída de presión total en hevi-wate
 PI = Caída de presión en el interior de herramienta o hevi-wate
 PT=PTC = Presión total calculada
 P1 = Caída de presión en el int. de juntas de secc. de T.P. #1
 P2 = Caída de presión en el int. del tubo de secc. de T.P. #1
 P3 = Caída de presión en el espacio anular de secc. de T.P. #1
 P4 = Caída de presión en el interior de juntas de secc. de T.P. #2
 P5 = Caída de presión en el interior del tubo de secc. de T.P. #2
 P6 = Caída de presión en el espacio anular de la secc. de T.P. #2
 Q = Gasto
 R = Densidad en lb/pie³
 RM = Densidad en gr/c.c.
 R3 = Lectura del viscosímetro 300 R.P.M.
 R6 = Lectura del viscosímetro 600 R.P.M.
 S = Caída de presión en conexiones superficiales
 ST = No. de secciones de tubería de perforación
 T1 = Caída de presión total en la sección de T.P. #1
 T2 = Caída de presión total en la sección de T.P. #2
 VA = Viscosidad aparente
 VE = Velocidad en el espacio anular de herramienta o hevi-wate
 VI = Velocidad en el interior de herramienta o hevi-wate
 VP = Viscosidad plástica

VT = Velocidad en las toberas de la barrena

V1 = Velocidad en el interior de juntas de secc. de T.P. #1

V2 = Velocidad en el interior del tubo de la secc. de T.P. #1

V3 = Velocidad en el espacio anular de la sección de T.P. #1

V4 = Velocidad en el interior de juntas de la secc. de T.P. #2

V5 = Velocidad en el interior del tubo de la sección de T.P. #2

V6 = Velocidad en el espacio anular de la sección de T.P. #2

X1 = Diámetro de tobera # 1

X2 = Diámetro de tobera # 2

X3 = Diámetro de tobera # 3

LIST

```

10 REM CALCULO DE PERDIDAS EN E
L SISTEMA.
12 INPUT "N=";N
14 IF N = 0 GOTO 20
16 INPUT "K=";K
18 GOTO 80
20 INPUT "VISC. APARENTE ?=";VA
22 IF VA = 0 GOTO 34
30 INPUT "VISC. PLASTICA ?=";VP
40 R6 = 2 * VA
50 R3 = R6 - VP
52 GOTO 60
54 INPUT "LECTURA A 600 RPM? =" ;
R6
56 INPUT "LECTURA A 300 RPM? =" ;
R3
60 N = 1.44 * LOG (R6 / R3)
70 K = R3 / (511. ^ N)
80 KP = (K / 100) * (((3 * N) +
1) / (4 * N)) ^ N
90 INPUT "GASTO (G.P.M.)?=";Q
100 INPUT "DENSIDAD (GR/C.C.)?=" ;
RM
110 R = RM * 62.31
120 INPUT "PRESION EN CONEX.SUP.
(P.S.I.)?=";S
130 A = ((0.434 * LOG (N)) + 3.9
3) / 50
140 B = (1.75 - (0.434 * LOG (N)
1) / 7
144 C1 = 3470 - (1370 * N)
148 C2 = 4270 - (1370 * N)
150 GOSUB 220
160 GOSUB 250
170 GOSUB 430
180 GOSUB 560
190 PT = PB + PC + PH + T1 + T2 +
S
195 PRINT
200 PRINT "PTC=";PT;" PSI @ ";Q;
"G.P.M."
205 PRINT
210 END
220 INPUT "DIAM.TOBERA #1(PULG.)
?=";X1
225 IF X1 > 1 GOTO 140
230 INPUT "DIAM.TOBERA #2(PULG.)
?=";X2
240 INPUT "DIAM.TOBERA #3(PULG.)?
=";X3
250 BN = (((X1 ^ 2) * 0.785) + ((
X2 ^ 2) * 0.785) + ((X3 ^ 2)
* 0.785))
260 VT = (0.32 * Q) / BN
270 PB = (R * (VT ^ 2)) / 8270
272 PRINT
275 PRINT "PB=";PB
278 PRINT
280 RETURN
290 INPUT "DIAM.INT.HTA.(PULG.)?
=";DC
295 IF DC = 0 GOTO 170
300 INPUT "DIAM.EXT.HTA.(PULG.)?
=";AC
310 INPUT "DIAM.AGUJERO (PULG.)?
=";DA
320 INPUT "LONG.HTA.(M)?=";LC
330 L = 3.2784 * LC
340 VI = (0.32 * Q) / (0.785 * (D
C ^ 2))
350 NRE = (((DC / 12) ^ N) * (VI ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
355 IF NRE < C2 GOTO 364
360 F = A / (NRE ^ B)
362 GOTO 370

```

```

364 F = 16 / NRE
366 IF NRE < C1 GOTO 370
368 F = (16 / C1) + (((NRE - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
370 PI = ((2 * F * L * R * (VI ^
2)) / (32.2 * (DC / 12))) /
144
380 DE = DA - AC
390 VE = (0.32 * Q) / (0.785 * ((
DA ^ 2) - (AC ^ 2)))
400 PA = (((144 * VE / DE) * ((2
* N) + 1) / (3 * N))) ^ N *
((K * L) / (300 * DE))
410 PC = PI + PA
412 PRINT
414 PRINT "PAC=";PA
416 PRINT "PC=";PC
418 PRINT
420 RETURN
430 INPUT "DIA. INT. H.W. (PULG.)?="
;DW
435 IF DW = 0 GOTO 180
440 INPUT "DIA. EXT. H.W. (PULG.)?="
;AH
450 INPUT "DIA. AGUJERO H.W. (PULG
.)?=";DH
460 INPUT "LONG. H.W. (M)?=";LH
470 L = 3.2786 * LH
480 VI = (0.32 * Q) / (0.785 * (D
W ^ 2))
490 NRE = (((DW / 12) ^ N) * (VI ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
495 IF NRE < C2 GOTO 504
500 F = A / (NRE ^ B)
502 GOTO 510
504 F = 16 / NRE
506 IF NRE < C1 GOTO 510
508 F = (16 / C1) + (((NRE - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
510 PI = ((2 * F * L * R * (VI ^
2)) / (32.17 * (DW / 12))) /
144
520 DE = DH - AH
525 VE = (0.32 * Q) / (0.785 * ((
DH ^ 2) - (AH ^ 2)))
530 PA = (((144 * VE / DE) * ((2
* N) + 1) / (3 * N))) ^ N *
((K * L) / (300 * DE))
532 PRINT
535 PRINT "PAH=";PA
540 PH = PI + PA
545 PRINT "PH=";PH
547 PRINT
550 RETURN
560 INPUT "No. DE SECC. DE T.P.?="
;ST
565 IF ST = 0 GOTO 190
570 INPUT "DIAM. INT. T.P.#1 (PULG.
.)?=";I1
580 INPUT "DIAM. EXT. T.P.#1 (PUL
G.)?=";E1
590 INPUT "DIAM. AGUJERO T.P. #1
(PULG.)?=";A1
600 INPUT "DIAM. INT. JUNTA T.P.#1
(PULG.)?=";J1
610 INPUT "LONG. SECC. TP. #1 (M)
?=";M1
620 L1 = 0.22 * M1
630 L2 = (3.278 * M1) - L1
640 L3 = L1 + L2
650 V1 = (0.32 * Q) / (0.785 * (J
1 ^ 2))
660 N1 = (((J1 / 12) ^ N) * (V1 ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
665 IF N1 < C2 GOTO 674
670 F1 = A / (N1 ^ B)
672 GOTO 680
674 F1 = 16 / N1
676 IF N1 < C1 GOTO 680
678 F1 = (16 / C1) + (((N1 - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
680 F1 = (16 * F1 * L1 * R * (V1 ^

```

```

144
682 PRINT
685 PRINT "P1=";P1
698 V2 = (8.32 * Q) / (8.785 * (I
1 ^ 2))
708 N2 = (((I1 / 12) ^ N) * (V2 ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
705 IF N2 < C2 GOTO 714
710 F2 = A / (N2 ^ B)
712 GOTO 720
714 F2 = 16 / N2
716 IF N2 < C1 GOTO 720
718 F2 = (16 / C1) + (((N2 - C1) /
880) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
720 P2 = ((2 * F2 * L2 * R * (V2 ^
2)) / (32.17 * (I1 / 12))) /
144
725 PRINT "P2=";P2
730 V3 = (8.32 * Q) / (8.785 * ((
A1 ^ 2) - (E1 ^ 2)))
740 DE = A1 - E1
750 P3 = (((144 * V3 / DE) * (((2
* N) + 1) / (3 * N))) ^ N) *
((K * L3) / (300 * DE))
755 PRINT "P3=";P3
760 T1 = P1 + P2 + P3
765 PRINT "PT1=";T1
767 PRINT
770 IF ST < 2 GOTO 190
780 INPUT "DIAM.INT. T.P.#2 (PUL
G.)?=";I2
790 INPUT "DIAM.EXT. T.P.#2 (PUL
G.)?=";E2
800 INPUT "DIA.AGUJERO T.P.#2 (P
ULG.)?=";A2
810 INPUT "DIA. JUNTA T.P.#2 (PU
LG.)?=";J2
820 INPUT "LONG.T.P.#2 (H)?=";M2

830 L4 = 8.22 * M2
840 L5 = (3.278 * M2) - L4
850 L6 = L4 + L5
860 V4 = (8.32 * Q) / (8.785 * (J
2 ^ 2))
870 N4 = (((J2 / 12) ^ N) * (V4 ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
875 IF N4 < C2 GOTO 884
880 F4 = A / (N4 ^ B)
882 GOTO 890
884 F4 = 16 / N4
886 IF N4 < C1 GOTO 890
888 F4 = (16 / C1) + (((N4 - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
890 P4 = ((2 * F4 * L4 * R * (V4 ^
2)) / (32.17 * (J2 / 12))) /
144
892 PRINT
895 PRINT "P4=";P4
900 V5 = (8.32 * Q) / (8.785 * (I
2 ^ 2))
910 N5 = (((I2 / 12) ^ N) * (V5 ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
915 IF N5 < C2 GOTO 924
920 F5 = A / (N5 ^ B)
922 GOTO 930
924 F5 = 16 / N5
926 IF N5 < C1 GOTO 930
928 F5 = (16 / C1) + (((N5 - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
930 P5 = ((2 * F5 * L5 * R * (V5 ^
2)) / (32.17 * (I2 / 12))) /
144
935 PRINT "P5=";P5

```

A2 ^ 2) - (E2 ^ 2)))
950 DE = A2 - E2
960 P6 = (((144 * V6 / DE) * (((2
* N) + 1) / (3 * N))) ^ N) *
(K * L6) / (300 * DE))
965 PRINT *P6=;P6
970 T2 = P4 + P5 + P6
975 PRINT *PT2=;T2

977 PRINT
980 RETURN

JRUM
N=0
VISC. APARENTE ?=57
VISC. PLASTICA ?=42
GASTO (G.P.M.)?=160
DENSIDAD (GR/C.C.)?=1.62
PRESION EN CONEX.SUP.(P.S.I)?=7
DIAM.TOBERA #1(PULG.)?=0.5
DIAM.TOBERA #2(PULG.)?=0.5
DIAM.TOBERA #3(PULG.)?=0.5

PB=91.1193247

DIAM.INT.HTA.(PULG.)?=2.25
DIAM.EXT.HTA.(PULG.)?=4.75
DIAM.AGUJERO (PULG.)?=5.9
LONG.HTA.(M)?=227

PAC=203.560432
PC=410.298307

DIA.INT.H.W.(PULG.)?=2.1
DIA.EXT.H.W.(PULG.)?=3.5
DIA.AGUJERO H.W.(PULG.)?=5.9
LONG.H.W.(M)?=114

PAH=20.2919641
PH=160.141169

No.DE SECC.DE T.P.?=2
DIAM.INT.T.P#1 (PULG.)?=2.76
DIAM.EXT. T.P.#1 (PULG.)?=3.5
DIA.AGUJERO T.P.#1 (PULG.)?=5.9
DIAM.INT.JUNTA T.P.#1 (PULG.)?=2.68
LONG.SECC. TP. #1 (M)?=1786

P1=49.7286402
P2=606.517459
P3=317.849259
PT1=974.095359

DIAM.INT. T.P.#2 (PULG.)?=2.76
DIAM.EXT. T.P.#2 (PULG.)?=3.5
DIA.AGUJERO T.P.#2 (PULG.)?=5.6
DIA. JUNTA T.P.#2 (PULG.)?=2.5
LONG.T.P.#2 (M)?=3485

P4=132.170606
P5=1183.49011
P6=326.323302
PT2=1641.9841

PTC=3284.63826 PSI @ 160 G.P.M.

PROGRAMA PARA DETERMINAR LA CONSTANTE "C" DEL FACTOR DE CORRECCION (FC), PARA LA ZONA SURESTE DE MEXICO

El programa primeramente calcula los factores de corrección reales y los imprime, posteriormente ejecuta una serie de iteraciones en la fórmula $Fc = [(-C/QA) \times Prof] + 1$, para obtener el valor óptimo de Fc en base a los datos de los 10 pozos valorados.

El rango propuesto de "C" se puede obtener con uno o varios de los puntos evaluados.

El programa proporciona los errores que se obtienen con los diferentes valores de "C" en los 10 pozos, el promedio de errores y la desviación estándar para cada valor de "C" evaluado.

Se observa como en la iteración con $C = 8.2 \times 10^{-4}$ gal/min.-pulg.m. se obtiene el valor óptimo de "C", ya que tanto valores superiores como inferiores arrojan mayor margen de error.

El programa ya tiene todos los datos necesarios (de los 10 pozos) de manera que sólo se requiere correrlo.

NOMENCLATURA

BS(J) = Presiones en barrena y conexiones superficiales (psi)

E(J) = Errores (psi)

F(J) = Factores de corrección reales

FC(J) = Factores de corrección calculados

L(J) = Profundidad de los pozos (m)

MA = Media

PM(J) = Presiones medidas (psi)

PP(J) = Presión calculada con F(J) (reales) (psi)

PR(J) = Presión calculada con FC(J) (psi)

Q(J) = Gastos por unidad de longitud de diámetro de agujero
(g.p.m./pul.)

SD = Desviación estándar (psi)

JPR#0
JLIST

```
2 REM CALCULO DEL FACTOR DE COR  
RECCION.  
4 FOR J = 1 TO 10  
6 READ L(J)  
8 DATA 5722,4591,3600,3160,2100  
5140,3612,5193,6238,5574  
10 NEXT J  
20 FOR J = 1 TO 10  
30 READ Q(J)  
40 DATA 37.6,31.9,43.4,36.3,30,  
33,25.3,24.4,35,29.7  
50 NEXT J  
60 FOR J = 1 TO 10  
70 READ PC(J)  
80 DATA 2769,2761,2381,2521,146  
5,3193,3285,3140,2742,1794  
90 NEXT J  
100 FOR J = 1 TO 10  
110 READ BS(J)  
120 DATA 464,704,714,860,528,74
```

```
3,98,15,309,370  
130 NEXT J  
140 FOR J = 1 TO 10  
150 READ PH(J)  
160 DATA 2485,2556,2270,2414,14  
20,2840,2698,2584,2414,1562  
170 NEXT J  
180 FOR J = 1 TO 10  
190 F(J) = (PH(J) - BS(J)) / (PC(J)  
J) - BS(J)  
200 PRINT "F";J;"=" ;F(J)  
210 NEXT J  
215 PRINT  
220 FOR I = 7 TO 9 STEP 0.1  
230 FOR J = 1 TO 10  
240 FC(J) = - (((I / 10000) / Q(J)  
J) * L(J)) + 1  
250 PR(J) = ((PC(J) - BS(J)) * F(J)  
J) + BS(J)  
260 PP(J) = ((PC(J) - BS(J)) * FC(J)  
J) + BS(J)  
270 E(J) = PP(J) - PR(J)  
275 PRINT "E";J;"=" ;E(J)  
280 M(0) = 0  
290 M(J) = M(J - 1) + E(J)  
300 S(0) = 0  
310 S(J) = S(J - 1) + (E(J) ^ 2)  
320 NEXT J  
330 MA = M(10) / 10  
335 PRINT  
340 PRINT "MEDIA=";MA;" PSI CON  
C=";I  
350 SD = (S(10) / 10) ^ 0.5  
360 PRINT "SD=";SD;" PSI CON C=";  
I  
365 PRINT  
370 NEXT I  
380 END
```

IRUN
F1= .876789388
F2= .988348381
F3= .933413317
F4= .935588975
F5= .951974386
F6= .855918367
F7= .815814245
F8= .82288
F9= .865187812
F10= .837878652

E1= 38.4561968
E2= .488834828
E3= 14.2864314
E4= 5.78424263
E5= -.913088187
E6= 85.8757572
E7= 92.1458178
E8= 98.4398373
E9= 24.4589193
E10= 44.9237981

MEDIA=39.5857255 PSI CON C=7
SD=53.269435 PSI CON C=7

E1= 34.9484282
E2= -2.441679
E3= 12.8236866
E4= 4.33838357
E5= -1.56898811
E6= 82.8596972
E7= 85.8764723
E8= 83.788166
E9= 28.1226187
E10= 42.2512888

MEDIA=36.1398874 PSI CON C=7.1
SD=49.5937889 PSI CON C=7.1

E1= 31.4486595
E2= -3.36339283
E3= 11.4487218
E4= 2.89236355
E5= -2.22488811
E6= 78.2436361
E7= 78.8871278
E8= 77.1372948
E9= 15.7863178

E10= 39.5787635

MEDIA=32.6938892 PSI CON C=7.2
SD=45.9722943 PSI CON C=7.2

E1= 27.9328989
E2= -8.28518666
E3= 18.858157
E4= 1.44642448
E5= -2.88878811
E6= 74.4275761
E7= 78.9377813
E8= 78.4864244
E9= 11.458817
E10= 36.9862467

MEDIA=29.2479711 PSI CON C=7.3
SD=42.4188512 PSI CON C=7.3

E1= 24.4251223
E2= -11.2068285
E3= 8.67539215
E4= 4.85420227E-04
E5= -3.53668811
E6= 78.611515
E7= 63.8484368
E8= 63.8355322
E9= 7.11671518

MEDIA=25.8828529 PSI CON C=7.4
SD=38.9528779 PSI CON C=7.4

E1= 28.9173536
E2= -14.1285343
E3= 7.29262793
E4= -1.4454546
E5= -4.19249964
E6= 66.795455
E7= 56.7998913
E8= 57.1846828
E9= 2.77741432
E10= 31.5612125

MEDIA=22.3561349 PSI CON C=7.5
SD=38.5973857 PSI CON C=7.5

E1= 17.489584
E2= -17.8582481
E3= 5.98986156
E4= -2.89139366
E5= -4.84839964
E6= 62.979394
E7= 49.7297459
E8= 58.5338116
E9= -1.55888653
E10= 28.8886952

MEDIA=18.9182166 PSI CON C=7.6
SD=32.3893546 PSI CON C=7.6

E1= 13.9818173
E2= -19.971962
E3= 4.5278977
E4= -4.33733273
E5= -5.58429964
E6= 59.1633339
E7= 42.6684884
E8= 43.8829483
E9= -5.89518738
E10= 26.2161779

MEDIA=15.4642986 PSI CON C=7.7
SD=29.3763641 PSI CON C=7.7

E1= 18.3948477
E2= -22.8936758
E3= 3.14433193
E4= -5.78327274
E5= -6.16819965
E6= 58.3472729
E7= 38.6918549
E8= 37.23287
E9= -18.2314892
E10= 23.5436611

MEDIA=12.8183881 PSI CON C=7.8
SD=26.6246951 PSI CON C=7.8

E1= 6.88627911
E2= -25.8153896
E3= 1.76156712
E4= -7.22921181
E5= -6.81689964
E6= 51.5312119
E7= 28.5217895
E8= 38.5811996
E9= -14.56779
E10= 28.8711438

MEDIA=8.57246199 PSI CON C=7.9
SD=24.2232691 PSI CON C=7.9

E1= 3.37851048
E2= -28.7371825
E3= -37.8382299
E4= -18.67515888
E5= -7.87199965

E1 = 21.4000004
E2 = 23.9303284
E3 = -18.9840789
E4 = 18.1986265

MEDIA=5.12654395 PSI CON C=8
SD=22.2859212 PSI CON C=8

E1 = -1.129257282
E2 = -31.6588173
E3 = -1.08396252
E4 = -18.1218909
E5 = -8.12798813
E6 = 43.8998988
E7 = 14.3838185
E8 = 17.2794571
E9 = -23.2483927
E10 = 15.5261892

MEDIA=1.68862549 PSI CON C=8.1
SD=29.9417324 PSI CON C=8.1

E1 = -9.63782583
E2 = -34.5885311
E3 = -2.38672829
E4 = -11.58783
E5 = -8.78388813
E6 = 48.8838387
E7 = 7.31367382
E8 = 18.6285858
E9 = -27.5766735
E10 = 12.8535919

MEDIA=-1.76529274 PSI CON C=8.2
SD=28.388825 PSI CON C=8.2

E1 = -7.14479447
E2 = -37.582244
E3 = -3.7894931
E4 = -13.812969
E5 = -9.43978813
E6 = 36.28667697
E7 = 24.4326591
E8 = 3.7771349
E9 = -31.9129753
E10 = 18.1818746

MEDIA=-5.21121897 PSI CON C=8.3
SD=28.4583355 PSI CON C=8.3

E1 = -18.6525641
E2 = -48.43239588
E3 = -5.15032782
E4 = -14.458988
E5 = -18.89555957
E6 = 32.4589887
E7 = 18.82581793
E8 = -16.67815579
E9 = -36.2492842
E10 = 7.58855732

MEDIA=-8.65712934 PSI CON C=8.4
SD=21.3594989 PSI CON C=8.4

E1 = -14.1683227
E2 = -43.3456724
E3 = -8.58582274

E4 = -15.9848481
E5 = -18.7514957
E6 = 28.6348484
E7 = -13.8949384
E8 = -9.8348386
E9 = -48.5885587
E10 = 4.83884882

MEDIA=-12.1838475 PSI CON C=8.5
SD=22.9371994 PSI CON C=8.5

E1 = -17.6681813
E2 = -46.7373855

E4# -17.3507881
E5# -11.4873997
E6# 24.8187876
E7# -28.9637898
E8# -15.9748983
E9# -44.9218988
E10# 2.1635232

MEDIA--15.5489658 PSI CON C=8.68888881
SD=23.8399427 PSI CON C=8.68888881

E1# -21.1758699
E2# -49.1891883
E3# -9.28833333
E4# -18.7967272
E5# -12.8633881
E6# 21.8827273
E7# -28.8338558
E8# -22.6237687
E9# -49.2381997
E10# -.588994182

MEDIA--18.9948841 PSI CON C=8.78888881
SD=27.6822587 PSI CON C=8.78888881

E1# -24.6836376
E2# -32.1188141
E3# -18.8833181
E4# -28.2426663
E5# -12.7192881
E6# 17.1866665
E7# -33.1824888
E8# -29.2766399
E9# -33.5945886
E10# -3.18151893

MEDIA--22.4488822 PSI CON C=8.88888881
SD=38.4592679 PSI CON C=8.88888881

E1# -28.1914872
E2# -55.8323279
E3# -12.8668663
E4# -21.8888863
E5# -13.3731881
E6# 13.3784883
E7# -42.1717463
E8# -35.9275183
E9# -57.9388823
E10# -5.85482823

MEDIA--25.8867286 PSI CON C=8.98888881
SD=33.5586731 PSI CON C=8.98888881

PROGRAMA PARA CALCULAR PERDIDAS REALES EN EL SISTEMA

Es exactamente el mismo programa que el utilizado para -- calcular las pérdidas en el sistema, con la diferencia de haber añadido el factor de corrección de la zona sureste de México.

El ejemplo aquí ilustrado es el mismo pozo No. 7R (Luna # 23) y la única diferencia con el programa de pérdidas en el -- sistema es que además de darnos la presión total calculada, -- nos dará la presión real. (La presión real será la calculada -- aplicando el factor de corrección propuesto).

NOMENCLATURA

NOTA: La nomenclatura es exactamente la misma que la del programa Pérdidas en el sistema, con las siguientes adiciones:

DQ = Diámetro promedio del agujero (pulg.)

FC = Factor de corrección calculado (Zona sureste)

LT = Longitud total (profundidad del pozo) (m)

PR = Presión real (psi)

QA = Gasto por unidad de longitud del diámetro del agujero (g.p.m./pulg. de diam.).

LIST

```

10 REM CALCULO DE PERDIDAS EN E
L SISTEMA.
12 INPUT "N=";N
14 IF N = 0 GOTO 20
16 INPUT "K=";K
18 GOTO 60
20 INPUT "VISC. APARENTE ?=";VA
25 IF VA = 0 GOTO 54
30 INPUT "VISC. PLASTICA ?=";VP
40 R4 = 2 * VA
50 R3 = R4 - VP
52 GOTO 60
54 INPUT "LECTURA A 600 RPM? ";
R4
56 INPUT "LECTURA A 300 RPM? ";
R3
60 N = 1.44 * LOG (R4 / R3)
70 K = R3 / (511 ^ N)
80 KP = (K / 100) * (((3 * N) +
1) / (4 * N)) ^ N
90 INPUT "GASTO (G.P.M.)?";G
100 INPUT "DENSIDAD (GR/C.C.)?";
IRM
110 R = IRM * 62.31
120 INPUT "PRESION EN CONEX.SUP.
(P.S.I)?";S
130 A = ((0.434 * LOG (N)) + 3.9
3) / 50
140 B = (1.75 - (0.434 * LOG (N)
)) / 7
144 C1 = 3470 - (1370 * N)
148 C2 = 4270 - (1370 * N)
150 GOSUB 220
160 GOSUB 290
170 GOSUB 430
180 GOSUB 540
190 PT = PB + PC + PH + T1 + T2 +
S
195 PRINT
200 PRINT "PTC=";PT;" PSI @ ";G;
"G.P.M."
201 LT = LC + LH + M1 + M2
202 DG = ((DA * LC) + (DH * LH) +
(A1 * M1) + (A2 * M2)) / LT
203 QA = Q / DG
204 FC = (( - 0.00082 / QA) * LT)
+ 1
205 PR = ((PT - PB - S) * FC) + P
B + S

```

```

200 PRINT
207 PRINT "PRESION REAL=";PR;" P
51 # "181" G.P.M."
210 END
220 INPUT "DIAM.TOBERA #1(PULG.)
7=";X1
225 IF X1 > 1 GOTO 160

```

```

230 INPUT "DIAM.TOBERA #2(PULG.)
7=";X2
240 INPUT "DIAM.TOBERA #3(PULG.)?
=";X3
250 BM = (((X1 ^ 2) * 0.785) + ((
X2 ^ 2) * 0.785) + ((X3 ^ 2)
* 0.785))
260 VT = (0.32 * Q) / BM
270 PB = (R * (VT ^ 2)) / 8378
272 PRINT
275 PRINT "PB=";PB
278 PRINT
280 RETURN
290 INPUT "DIAM.INT.HTA.(PULG.)?
=";DC
295 IF DC = 0 GOTO 170
300 INPUT "DIAM.EXT.HTA.(PULG.)?
=";AC
310 INPUT "DIAM.AGUJERO (PULG.)?
=";DA
320 INPUT "LONG.HTA.(M)?=";LC
330 L = 3.2786 * LC
340 VI = (0.32 * Q) / (0.785 * (D
C ^ 2))
350 NRE = (((DC / 12) ^ N) * (VI ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
355 IF NRE < C2 GOTO 364
360 F = A / (NRE ^ B)
362 GOTO 370
364 F = 16 / NRE
366 IF NRE < C1 GOTO 370
368 F = (16 / C1) + (((NRE - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
370 PI = ((2 * F * L * R * (VI ^
2)) / (32.2 * (DC / 12))) /
144
380 DE = DA - AC
390 VE = (0.32 * Q) / (0.785 * ((
DA ^ 2) - (AC ^ 2)))
400 PA = (((144 * VE / DE) * ((2
* N) + 1) / (3 * N))) ^ N *
((K * L) / (300 * DE))
410 PC = PI + PA
412 PRINT
414 PRINT "PAC=";PA
416 PRINT "PC=";PC
418 PRINT
420 RETURN
430 INPUT "DIA.INT.H.W.(PULG.)?
=";DW
435 IF DW = 0 GOTO 180
440 INPUT "DIA.EXT. H.W.(PULG.)?
=";AH
450 INPUT "DIA.AGUJERO H.W.(PULG
.)?=";DH
460 INPUT "LONG.H.W.(M)?=";LH
470 L = 3.2786 * LH
480 VI = (0.32 * Q) / (0.785 * (D
W ^ 2))
490 NRE = (((DW / 12) ^ N) * (VI ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
495 IF NRE < C2 GOTO 504
500 F = A / (NRE ^ B)
502 GOTO 510
504 F = 16 / NRE
506 IF NRE < C1 GOTO 510
508 F = (16 / C1) + (((NRE - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))

```

```

144
525 DE = DH - AH
525 VE = (0.32 * Q) / (0.785 * ((
DH ^ 2) - (AH ^ 2)))
535 PA = (((144 * VE / DE) * (((2
* N) + 1) / (3 * N))) ^ N) *
((K * L) / (300 * DE))
535 PRINT
535 PRINT *PAH=";PA
545 PH = PI + PA
545 PRINT *PH=";PH
545 PRINT
545 RETURN
565 INPUT *No.DE SECC.DE T.P.7="

```

```

1ST
545 IF ST = 0 GOTO 190
570 INPUT *DIAM.INT.T.P.#1 (PULG.
17)=";I1
580 INPUT *DIAM.EXT. T.P.#1 (PUL
G.17)=";E1
590 INPUT *DIAM.AGUJERO T.P. #1
(PULG.)?=";A1
600 INPUT *DIAM.INT.JUNTA T.P.#1
(PULG.17)=";J1
610 INPUT *LONG.SECC. TP. #1 (M)
7=";M1
620 L1 = 0.22 * M1
630 L2 = (3.278 * M1) - L1
640 L3 = L1 + L2
650 V1 = (0.32 * Q) / (0.785 * (J
1 ^ 2))
660 N1 = (((J1 / 12) ^ N) * (V1 ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
665 IF N1 < C2 GOTO 674
670 F1 = A / (N1 ^ B)
672 GOTO 680
674 F1 = 16 / N1
676 IF N1 < C1 GOTO 680
678 F1 = (16 / C1) + (((N1 - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
680 P1 = ((2 * F1 * L1 * R * (V1 ^
2)) / (32.17 * (J1 / 12))) /
144
682 PRINT
685 PRINT *P1=";P1
690 V2 = (0.32 * Q) / (0.785 * (I
1 ^ 2))
700 N2 = (((I1 / 12) ^ N) * (V2 ^
(2 - N)) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1)))
705 IF N2 < C2 GOTO 714
710 F2 = A / (N2 ^ B)
712 GOTO 720
714 F2 = 16 / N2
716 IF N2 < C1 GOTO 720
718 F2 = (16 / C1) + (((N2 - C1) /
800) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
720 P2 = ((2 * F2 * L2 * R * (V2 ^
2)) / (32.17 * (I1 / 12))) /
144
725 PRINT *P2=";P2
730 V3 = (0.32 * Q) / (0.785 * ((
A1 ^ 2) - (E1 ^ 2)))
740 DE = A1 - E1
750 P3 = (((144 * V3 / DE) * (((2
* N) + 1) / (3 * N))) ^ N) *
((K * L3) / (300 * DE))
755 PRINT *P3=";P3
760 T1 = P1 + P2 + P3
765 PRINT *PT1=";T1
767 PRINT
770 IF ST < 2 GOTO 190
780 INPUT *DIAM.INT. T.P.#2 (PUL
G.)?=";I2
790 INPUT *DIAM.EXT. T.P.#2 (PUL
G.)?=";E2

```

```

ULG.)?="I2
818 INPUT *DIA. JUNTA T.P.#2 (PU
LG.)?="I2
828 INPUT *LONG.T.P.#2 (M)?="I#2

838 L4 = 8.22 * M2
848 L5 = (3.278 * M2) - L4
858 L6 = L4 + L5
868 V4 = (8.32 * Q) / (8.785 * (J
2 ^ 2))
878 N4 = (((J2 / 12) ^ N) * (V4 ^
(2 - N) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1))))
878 IF N4 < C2 GOTO 884
888 F4 = A / (N4 ^ B)
882 GOTO 898
884 F4 = 16 / N4
884 IF N4 < C1 GOTO 898
888 F4 = (16 / C1) + (((N4 - C1) /
888) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
898 P4 = ((2 * F4 * L4 * R * (V4 ^

```

```

2)) / (32.17 * (J2 / 12))) /
144
892 PRINT
895 PRINT *P4="I#P4
908 V5 = (8.32 * Q) / (8.785 * (I
2 ^ 2))
918 N5 = (((I2 / 12) ^ N) * (V5 ^
(2 - N) * R) / (32.17 * KP *
(8 ^ (N - 1))))
915 IF N5 < C2 GOTO 924
928 F5 = A / (N5 ^ B)
922 GOTO 938
924 F5 = 16 / N5
926 IF N5 < C1 GOTO 938
928 F5 = (16 / C1) + (((N5 - C1) /
888) * ((A / (C2 ^ B)) - (16
/ C1)))
938 P5 = ((2 * F5 * L5 * R * (V5 ^
2)) / (32.17 * (I2 / 12))) /
144
935 PRINT *P5="I#P5
948 V6 = (8.32 * Q) / (8.785 * ((
A2 ^ 2) - (E2 ^ 2)))
958 DE = A2 - E2
968 P6 = (((144 * V6 / DE) * ((2
* N) + 1) / (3 * N))) ^ N *
((K * L6) / (388 * DE))
965 PRINT *P6="I#P6
978 T2 = P4 + P5 + P6
975 PRINT *PT2="IT2
977 PRINT
988 RETURN

```

IRUN

N=8

VISC. APARENTE ?=57

VISC. PLASTICA ?=42

GASTO (G.P.M.)?=168

DENSIDAD (GR/C.C.)?=1.62

PRESION EN CONEX.SUP.(P.S.I)?=7

DIAM.TOBERA #1(PULG.)?=8.5

DIAM.TOBERA #2(PULG.)?=8.5

DIAM.TOBERA #3(PULG.)?=8.5

PB=91.1193247

DIAM.INT.HTA.(PULG.)?=2.25

DIAM.EXT.HTA.(PULG.)?=4.75

DIAM.AGUJERO(PULG.)?=3.9

LONG.HTA.(M)?=227

PAC=265.560432

DIA. INT. H.W. (PULG.)? = 2.1
DIA. EXT. H.W. (PULG.)? = 3.5
DIA. AGUJERO H.W. (PULG.)? = 5.9
LONG. H.W. (H)? = 114

PAH = 28.2919641
PH = 166.141169

No. DE SECC. DE T.P. ? = 2
DIAM. INT. T.P. #1 (PULG.)? = 2.76
DIAM. EXT. T.P. #1 (PULG.)? = 3.5
DIA. AGUJERO T.P. #1 (PULG.)? = 5.9
DIAM. INT. JUNTA T.P. #1 (PULG.)? = 2.68
LONG. SECC. T.P. #1 (H)? = 1786

P1 = 49.7286482
P2 = 606.517459
P3 = 317.849259
PT1 = 974.895359

DIAM. INT. T.P. #2 (PULG.)? = 2.76
DIAM. EXT. T.P. #2 (PULG.)? = 3.5
DIA. AGUJERO T.P. #2 (PULG.)? = 6.4
DIA. JUNTA T.P. #2 (PULG.)? = 2.5
LONG. T.P. #2 (H)? = 3485

P4 = 132.178686
P5 = 1183.45811
P6 = 326.323332
PT2 = 1641.9841

PTC = 3284.63826 PSI @ 168 G.P.M.

PRESION REAL = 2704.06953 PSI @ 168 G.P.M.