

24-39



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

**EL USO DE MICROCOMPUTADORAS EN LA RESOLU-
CION DE PROBLEMAS DE LA PERFORACION DE
POZOS PETROLEROS.**

T E S I S

**Que para obtener el Título de
INGENIERO PETROLERO
P r e s e n t a**

Antonio Rodríguez García

México, D. F.

1984



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

I N D I C E

Introducción	
I. Diseño hidráulico	1
II. Diseño de tubería de revestimiento	15
III. Cementación de T.R.	31
IV. Presiones de suaveo y surgencia	51
Conclusiones	72

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

El evolucionista establece una distinción entre los seres vivos - hoy existentes y conceptuados como superiores, y aquéllos que han conseguido sobrevivir y resultan evidentemente inferiores, y por otra parte, el de aquellas formas estáticas que han permanecido inalterables por espacio de - centenares de millones de años. Ello vale tanto como decir que el biólogo - evolucionista no opera a través de simples criterios de supervivencia o per - manencia.

El biólogo utiliza, además, otros criterios, tales como definir - el progreso evolutivo como el mejoramiento, el perfeccionamiento de la orga - nización vital que permite aumentar la intervención en el medio ambiente, - con independencia de los cambios que se van operando en tal medio y de la - facultad de seguir operando en el mismo sentido progresista. Los tipos alta - mente especializados fracasan en este respecto; fracaso, por otra parte, -- inherente a todo animal íntimamente ligado a un modo de vida peculiar. No - siendo, pues, el hombre un animal altamente especializado, como tampoco lo - fueron sus antepasados, por no hallarse prisionero de los éxitos de la su - perespecialización, es por lo que fue posible el ir ascendiendo gradualmen - te a niveles de perfección cada vez más elevados.

De esta manera fue concebido el hombre. Su desarrollada capacidad cerebral, su perfeccionada estructura anatómica, fueron los factores que le permitieron llegar a convertirse en un constructor de herramientas. Así, se sucedieron el descubrimiento y la utilización del fuego, el cultivo de la - tierra y el pastoreo de los animales útiles, lo que constituyó la cimenta - ción de la civilización. En la construcción de viviendas, la irrigación y - el cultivo de la tierra, el transporte y demás recursos utilizados por él, - halló el hombre la fuerza más cabal y completa para luchar contra la domina - ción y dependencia que sobre él ejercía el medio ambiente.

En la actualidad el hombre ha logrado esta independencia en un -- grado relativamente alto. Sin embargo, esta lucha continúa, y para seguir - en ella el hombre constantemente debe proveerse de las herramientas necesi -

rias para asegurar su éxito.

Quizá, en los últimos años, la herramienta más útil para el hombre ha sido la computadora, herramienta sin la cual una gran cantidad de -- problemas estarían todavía sin resolver.

La computadora ha llegado a ser un arma tan potente, que su utili- zación no escapa, hoy en día, de ningún área del quehacer humano.

La Industria Petrolera no ha escapado de los beneficios que las - computadoras aportan. Debido que son extremadamente rápidas en sus cálculos, son precisas, pueden almacenar grandes cantidades de informa- ción a la cual pueden tener acceso rápidamente, y son capaces de ejecutar - secuencias de operaciones en forma automática; se han podido resolver en -- forma relativamente fácil y rápida problemas que de otro modo implicarían - en su resolución muchas horas de cálculo.

En este trabajo se muestra el uso de microcomputadores en un as- pecto específico de la Industria Petrolera, que es la perforación y termina- ción de pozos. Además de proporcionar a los estudiantes de Ingeniería Petro- lera un medio para atacar de manera rápida, los problemas que en sus asigna- turas se presenten.

Aquí se trabajará con la computadora de bolsillo Radio Shack - -- "TRS-80", sin embargo, los programas desarrollados en el trabajo se pueden emplear en cualquier otra computadora de bolsillo, y con mucha más razón, - en una computadora de mayor capacidad.

D I S E Ñ O H I D R A U L I C O

La perforación rotatoria se inició en el año de 1900, dentro de la Industria Petrolera, y se ha ido expandiendo y desarrollando a través de una combinación de tecnología y arte.

Una de las características esenciales de un sistema de perforación rotatorio, es el sistema de circulación, también conocido como sistema de lodo.

Para que el sistema de perforación rotatorio pueda funcionar, es indispensable circular fluido a través de la sarta de perforación y por el espacio anular entre la sarta de perforación y la pared del agujero o la tubería de revestimiento. Inicialmente, cuando se introdujo en la perforación de pozos petroleros el uso de fluidos, el propósito primordial de esta utilización era el de acarrear los sólidos de las formaciones constantemente. En la actualidad, y dentro de la perforación rotatoria esta función del lodo es quizás aún, entre otras, la más importante.

Se ha demostrado, que la velocidad de penetración y, por ende, la eficiencia económica de la perforación, depende de la capacidad de acarreo de los recortes de la roca perforada (limpieza del agujero), proporcionada por el lodo a través de un buen diseño de la hidráulica del pozo.

Existen otros factores que también afectan la velocidad de penetración, como la carga sobre la barrena, la velocidad rotatoria y tipo de características de fluido de perforación. Sin embargo, en muchos casos el -

fluido de perforación y la forma como es circulado, son los factores de control o limitantes que gobiernan la efectividad de la perforación. Los factores específicos predominantes de un lodo que ejerce la mayor influencia en la penetración, indudablemente varía de una región a otra debido a diferencias de las formaciones perforadas y a las prácticas de perforación. No obstante, en todos los casos el sistema circulatorio es una parte integral del proceso de perforación rotatoria, y como tal deben utilizarse las mayores ventajas para obtener una penetración óptima en la perforación. Dichas ventajas se obtienen como ya se mencionó antes, con un buen diseño de la hidráulica del pozo.

Para efectuar de manera satisfactoria este diseño, es necesario, previamente, tener algunas nociones de los componentes del ciclo del lodo y de los fenómenos que en ellos se suscitan.

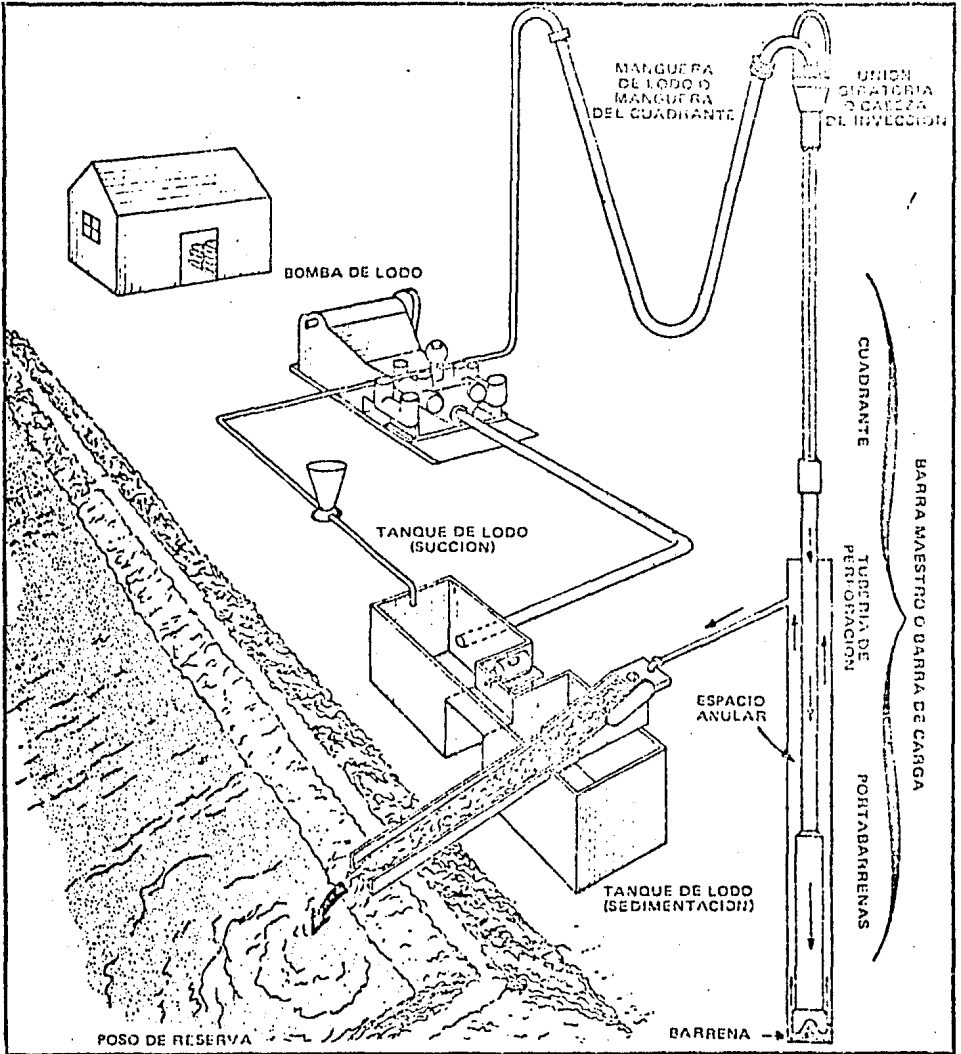
Se entiende por componente del ciclo de lodo a todas aquellas herramientas o dispositivos por los que el lodo circula en las operaciones de perforación. Dicho ciclo se lleva a cabo de la siguiente manera:

El lodo se bombea desde el tanque de succión, a través de una línea de descarga hasta el tubo vertical, después pasa a la manguera de lodo, ésta va conectada a la unión giratoria. El lodo entra a la unión giratoria, baja por la flecha o barretón cuadrado por la tubería de perforación, por los lastrabarrenas y sale por las toberas de la barrena. Aquí, vira hacia arriba por el espacio anular. Finalmente, el lodo deja el pozo a través de un tubo de acero llamado línea de descarga y cae sobre un aparato de tela metálica vibratoria llamada "la temblorina". La malla separa los recortes del lodo y los echa a un foso de reserva. Entonces es cuando el lodo --

vuelve a los tanques y circula por el pozo impulsado por la bomba.

Durante el ciclo de lodo en el sistema se suscitan fuerzas de --- fricción, tanto en el interior de la tubería, en el espacio anular, como en la propia barrena, por lo tanto, la presión ejercida en la superficie por la bomba se emplea para cubrir por una parte las pérdidas por fricción en el - sistema, y por otra, para proporcionar potencia hidráulica en la barrena.

Un buen diseño hidráulico será aquel que contemplando estas pérdi- das de energía por fricción durante el ciclo de lodo, y la presión y gastos máximos permisibles para diferentes tipos de bombas, indique cuál de ellas es más favorable, y en base a esto, se obtenga el diámetro de toberas en la barrena que cumpla con las necesidades de gasto y presión calculadas.



Los sistemas para circulación de fluido y tratamiento de lodo

FORMULAS EMPLEADAS

1) VELOCIDADES:

$$V_s = \frac{175 \text{ dc } (21 - \delta)^{0.667}}{(\delta \mu)^{0.333}} \quad ; \quad V_c = \frac{1.62 \mu + 1.62 \sqrt{\mu^2 + 8.20 \delta d^2 P_c}}{d}$$

$V \geq V_c$ Flujo será turbulento d en espacio anular =
= $d_a - d_t$

$V < V_c$ Flujo será laminar

$$V = \frac{17.15 Q}{d^2} \quad ; \quad V_t = \frac{13.44 Q}{A_t}$$

2) PRESIONES

a) Interior de la tubería

a1.) Flujo laminar

$$P = \frac{6.72 \times 10^{-4} \mu V L}{d^2} + \frac{P_c L}{225 d}$$

a2.) Flujo turbulento

$$P = \frac{f L V^2 \delta}{25.6 d}$$

b) Espacio anular

b1.) Flujo laminar

$$P = \frac{6.72 \times 10^{-4} \mu V L}{d_a^2 - d_t^2} + \frac{P_c L}{225 (d_a - d_t)}$$

b2.) Flujo turbulento

$$P = \frac{f L V^2 \delta}{25.6 (d_a - d_t)}$$

Caballaje hidráulico

$$P_b = 0.64 P_s$$

Fuerza de impacto

$$P_b = 0.47 P_s$$

$$P_b = \frac{\delta v_t^2}{1120}$$

$$Re = \frac{2965 \text{ dV } \delta}{\mu}$$

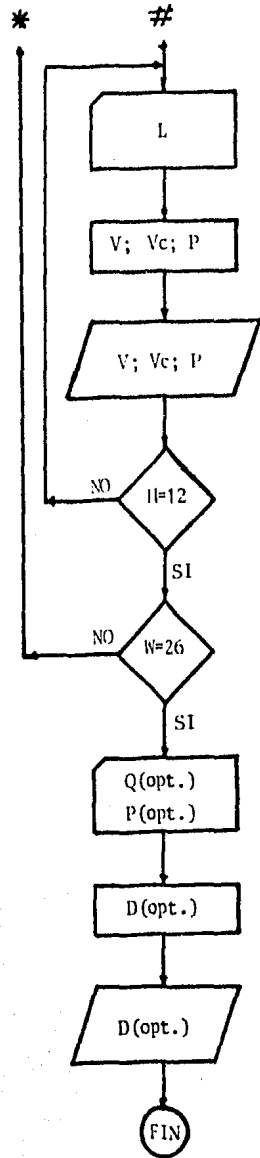
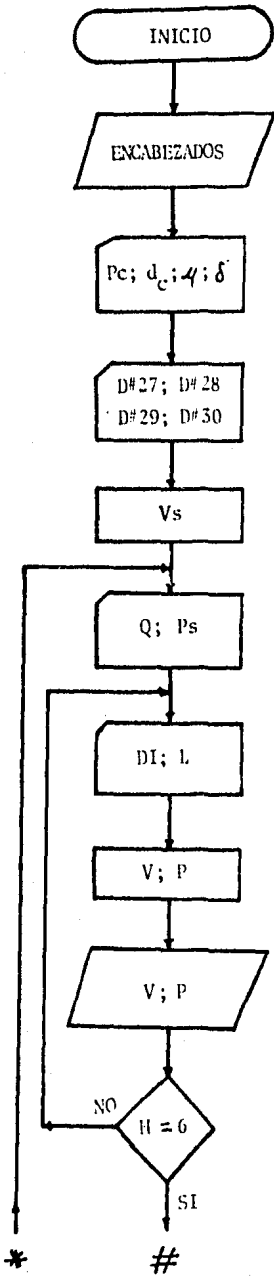
$$f = \frac{0.046}{Re^{0.23854}}$$

$$P_t = P_c + P_b$$

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

- V= Velocidad (pies/seg)
Vc= Velocidad crítica (pies/seg)
Vt= Velocidad en las toberas (pies/seg)
Vs= Velocidad de asentamiento (pies/min)
P= Presión (lb/pg²)
Q= Gasto (bl/min)
L= Longitud (pies)
 μ = Viscosidad plástica (centipoises)
f= Factor de fricción de Fanning
Re= Número de Reynolds
Pc= Punto de cedencia
At= Area de toberas (pg²)
Ps= Presión superficial máxima (lb/pg²)
Pb= Presión en la barrena (lb/pg²)
Pc= Presión en el sistema (lb/pg²)
Pt= Presión total (lb/pg²)
 δ = Densidad del lodo (lb/gal)

PROGRAMA.
DIAGRAMA DE
FLUJO



P R O G R A M A

SUBINDICES:

- 1, Tubo vertical
- 2, Manguera
- 3, Unión Giratoria
- 4, Flecha
- 5, Interior de la tubería de perforación
- 6, Interior de lastrabarrenas
- 7, Espacio anular formado por los tubos lastrabarrenas y el agujero
- 8, Espacio anular formado por la T.P. y el agujero
- 9, Espacio anular formado por la T.P. y la T.R.

SIMBOLOS:

- PV Viscosidad Plástica
- Y Punto de cedencia
- DC Diámetro de los recortes
- D#27 Diámetro exterior de los tubos lastrabarrenas
- D#28 Diámetro interior de la T.P.
- D#29 Diámetro interior de la T.R.
- D#30 Diámetro de la barrena
- S Velocidad de asentamiento
- PS Presión superficial
- Q Gasto
- DI Diámetro interior
- L Longitud

SIMBOLOS:

V	Velocidades
P	Presiones
VC	Velocidad Crítica

PROGRAMA

LISTADO

<pre> 5: PRINT "***** DISEÑO*****" 6: PRINT "****HI DRAULICO****" 7: PRINT " " 8: PRINT " " 9: CLEAR 10: INPUT "PV(CP)=";B 11: PRINT "PV(CP)=";B 20: INPUT "YP(LB /100FT2)=";C 21: PRINT "YP(LB /100FT2)=";C 30: INPUT "DENS(LB/G)=";D 31: PRINT "DENS(LB/G)=";D 40: INPUT "IC(PG)=";E 41: PRINT "IC(PG)=";E 42: INPUT "QS A PROBAR=";U 43: FOR H=27 TO 3 0 44: PAUSE "I#";H : INPUT "=";A (H) 45: NEXT H 46: PRINT " " 47: PRINT " " 48: S=175+E*(21- D)^2/3)/C*B R^(1/3) 49: FOR H=1 TO U 50: INPUT "PS(PS </pre>	<pre> I)=";F 51: PRINT "PS(PS I)=";F 60: INPUT "Q(CB/ M)=";G;G=G+1 7.15 61: PRINT "Q(CB/ M)=";G 68: PRINT "****IN T. TUE.****" 69: PRINT " " 75: FOR H=1 TO 6 80: PAUSE "VALOR ES=";H: INPUT "DI(PG)=";I 90: INPUT "L(FT)=";J 100: K=G/I^2 110: PRINT "V#";H : "=";K;"(FT/ S)" 120: L=296.5*H*(K*D /E 121: IF L<2100 GOTO 141 130: L=.046*L^(.2 5254) 140: L=L*J*K*K*D/ I/25.6:GOTO 150 141: L=.672E-4*B* K*J/I^2+C*J/I /225 150: PRINT "P#";H : "=";L;"(PSI)" 160: M=M+L 161: PRINT " " 170: NEXT H 190: PRINT "E*ESP . ANULAR**" </pre>	<pre> 200: PRINT " " 210: FOR H=7 TO 9 220: IF H=7 THEN 2 50 230: IF H=8 THEN 2 60 240: I=A(29)^2-A(20)^2:J=A(29)-A(28):GOTO 270 250: I=A(30)^2-A(27)^2:J=A(30)-A(27):GOTO 270 260: I=A(30)^2-A(28)^2:J=A(30)-A(28) 270: PAUSE "L#";H : INPUT "=";K 280: L=G/I 290: PRINT "V#";H : "=";L;"(FT/ S)" 300: N=(1.62*(B+C B^2+.2*D)*J* J*(C^.5))/K(D *T) 310: PRINT "VC#"; H: "=";N;"(FT /S)" 320: IF N<L THEN 350 330: O=.672E-4*B* L*(L+J)/I/225 340: GOTO 370 350: P=.046/(2965 +D*L*J/D)^.2 5254 </pre>	<pre> 360: O=O*(L*L*L/D 25.6)*J 370: PRINT "P#";H : "=";O;"(PSI)" 380: O=O+C 391: PRINT " " 390: NEXT H 400: R=M+O+.47*F 401: PRINT " " 410: PRINT "PRES. TOR=";R;"(PS I)" 420: T=L 430: E=T/60-S 440: V=100*E/(T*6 0) 450: PRINT "CAP.A CHR.=";V;"%" " 451: PRINT " " 452: PRINT " " 453: PRINT "***** *****" 460: NEXT H 461: PRINT " " 462: PRINT " " 470: INPUT "PS OP T.(PSI)=";F 480: INPUT "Q OPT (CB/H)=";G 490: I=(.47+P*112 O/D)^.5 500: J=13.44*G/I 510: K=(4*J/O)^.5 520: PRINT "D.UNI T.=";K;"(PG) " 530: STOP </pre>
---	--	---	---

E J E M P L O

Profundidad total = 15,000 ft

Viscosidad plástica (PV) = 25 cp

Punto de cedencia (YP) = 15 lb/100ft

Densidad de lodo = 16.5 lb/gl

Diámetro de la barrena = 7 7/8"

Tubería de perforación = 4 1/2" x 3.78" = 14300 ft

L. Bnas. 6 1/4" x 2.75 = 700 ft

T.R. 9 5/8" a 12000 ft . D.I. = 8.681" ; dc = 3/8"

Conexiones superficiales tipo 3:

Tubo vertical d=4 pg ; L= 45 ft

Manguera d=3 pg ; L= 55 ft

U. giratoria d=2.25 pg ; L=5 ft

Flecha d= 3.25 pg ; L= 40 ft

Q (gal/min) Ps (lb/pg²)

250 2900

200 2050

Obtener la presión en la superficie necesaria para cada caso, así como su capacidad de acarreo y determine el diámetro unitario de las toberas para el caso más conveniente.

<p>****DISEÑO**** ***HIDRAULICO***</p> <p>PV(CP)=25. YP(LB/100FT2)=15 DENS(LB/G)=16.5 DC(PG)=0.375</p> <p>PS(PSI)=2900. Q(CB/M)=102.0833 333 ***INT. TUB.***</p> <p>VN1.=6.380208331 (FT/S) PN1.=8.836373903 E-01(PSI)</p> <p>VN2.=11.34259259 (FT/S) PN2.=4.232197387 (PSI)</p> <p>VN3.=20.16460905 (FT/S) PN3.=1.507699824 (PSI)</p>	<p>VN4.=9.664694277 (FT/S) PN4.=2.104900191 (PSI)</p> <p>VN5.=7.144490167 (FT/S) PN5.=367.3111523 (PSI)</p> <p>VN6.=13.49862259 (FT/S) PN6.=81.41434752 (PSI)</p> <p>***ESP. ANULAR**</p> <p>VN7.=4.447469933 (FT/S) VN7.=6.18438378 1(FT/S) PN7.=30.99660343 (PSI)</p> <p>VN8.=2.444195036 (FT/S) VN8.=5.20975359 2(FT/S) PN8.=47.69337694 (PSI)</p> <p>VN9.=1.852363927 (FT/S) VN9.=5.04895012 4(FT/S) PN9.=198.118017 (PSI)</p>	<p>PRES.TOT=2097.26 1922(PSI) CAP.ACARR.=81.17 622364%</p> <p>***** PS(PSI)=2050. Q(CB/M)=81.66666 667 ***INT. TUB.***</p> <p>VN1.=5.104166667 (FT/S) PN1.=5.983120001 E-01(PSI)</p> <p>VN2.=9.074074075 (FT/S) PN2.=2.865626229 (PSI)</p> <p>VN3.=16.13168724 (FT/S) PN3.=1.020965466 (PSI)</p> <p>VN4.=7.731755425 (FT/S) PN4.=1.425230595 (PSI)</p> <p>VN5.=5.715592136 (FT/S) PN5.=248.706848 (PSI)</p> <p>VN6.=10.79889807 (FT/S) PN6.=55.12575813 (PSI)</p>	<p>***ESP. ANULAR**</p> <p>VN7.=3.557975948 (FT/S) VN7.=6.18438378 1(FT/S) PN7.=30.54087249 (PSI)</p> <p>VN8.=1.95535603 (FT/S) VN8.=5.20975359 2(FT/S) PN8.=47.2411213 (PSI)</p> <p>VN9.=1.481891142 (FT/S) VN9.=5.04895012 4(FT/S) PN9.=196.7627705 (PSI)</p> <p>PRES.TOT=2282.04 9337(PSI) CAP.ACARR.=76.47 027956%</p> <p>*****</p> <p>D.UNIT.=5.736854 584E-01(PG)</p>
--	--	--	--

B I B L I O G R A F I A

- 1.- MC CRAY & COLE: Tecnología de la Perforación de Pozos Petroleros, Sexta Edición, México, D. F., CECSA 1982, p.p. 574, gráficas e ilustraciones.
- 2.- PRESTON L. MORE: Drilling Practice Manual, Tulsa Oklahoma, Ed. Penn -- Well Publishing Company, p.p. 448, gráficas e ilustraciones.
- 3.- UNIVERSIDAD DE TEXAS, AUSTIN; IMP: El Equipo Rotatorio y sus Componentes, EE UU, UTA, p.p. 43, gráficas e ilustraciones.
- 4.- BENITEZ HERNANDEZ MIGUEL ANGEL: Apuntes de Tecnología de la Perforación, México, D.F., Facultad de Ingeniería, p.p. 103, gráficas e ilustraciones.

D I S E Ñ O D E T . R .

La tubería de revestimiento es una parte esencial de la perforación y terminación de un pozo petrolero.

Desde el mismo momento en que se principia la perforación de un pozo, surge la necesidad de contener las paredes de éste. En un principio, esta función de contención es realizada por el lodo de perforación, pero a medida que en las maniobras de perforación se va ganando profundidad, es necesario revestir el agujero con un cuerpo tubular que cumpla con los requerimientos de sustentación, ahora perdidos por el fluido de perforación. Esta ineficiencia adquirida por el lodo con el avance de la perforación, de contener en su totalidad las paredes del agujero, se debe a la presencia de zonas de presión anormal, o bien, porque de no revestirse la parte superior del agujero, el uso de fluidos de mayor o menor densidad para contener las presiones en la parte inferior, ocasionará pérdidas de lodo en dichas formaciones superiores o pegaduras de tubería.

Sin embargo, la sustentación de las paredes del pozo no es la única función que debe cumplir una tubería de ademe o revestimiento durante la perforación y terminación de un pozo, siendo su colocación dentro del pozo, lo que determina dichas funciones. De acuerdo a lo anterior, las tuberías de revestimiento se clasifican como:

- I.- Tubería conductora;
- II.- Tubería superficial;
- III.- Tubería intermedia;
- IV.- Tubería de explotación, y
- V.- Tubería corta o "Liner"

Las funciones de estas tuberías son:

I.- TUBERIA CONDUCTORA. Es la primera tubería que se introduce durante la

perforación del agujero, y además de contener las paredes del agujero recién perforado, su única función es la de transportar el fluido de perforación a la presa de asentamiento o succión. Su diámetro, por ser la primera tubería, es el más grande de todos los cuerpos que se introducirán en el pozo.

II.- TUBERIA SUPERFICIAL. Su principal función es la de proteger y aislar - las formaciones deleznable y acíferas superficiales, así como sostener -- las siguientes tuberías de revestimiento y servir de base a los primeros - controles del pozo. La profundidad, hasta la que va colocada esta tubería, - depende de la profundidad de las arenas y agua dulce del área.

III.- TUBERIA INTERMEDIA. Aislar la formación perforada es una de las fun-- ciones de esta tubería, teniendo otras como el de permitir elevar la densi-- dad del fluido de control, si es necesario; proteger la tubería de perfora-- ción en caso de problemas y anclar la siguiente tubería que se introduzca - al pozo. Su profundidad varía de 1500 a 4000 metros, dependiendo de la pro-- fundidad total del pozo.

IV.- TUBERIA DE EXPLOTACION. Quizá de todas las tuberías de revestimiento, - la de explotación sea la que cumple las funciones de más trascendencia en - la perforación y vida productiva del pozo. Sus funciones son las de tener - control del yacimiento por explotar y el poder anclar en ella las herramien-- tas necesarias durante la terminación del pozo.

V.- TUBERIA CORTA O "LINER". Sus funciones son el evitar las pérdidas de lo-- do o intentos de pegadura, permitir incrementar o disminuir la densidad del lodo en zonas presionadas anormalmente, así como revestir agujeros que se - perforaron con menor diámetro debido a falta de capacidad del equipo.

Para que todas las tuberías antes mencionadas cumplan de la mane-- ra más satisfactoria estos requerimientos, es misión del ingeniero petrole-- ro llevar a cabo un diseño de dichas tuberías, tomando en cuenta la serie - de esfuerzos a que éstas se encuentran sujetas en el momento de estar den--

tro del agujero. Entre los esfuerzos que se deben tomar en consideración para diseñar una tubería de revestimiento, se tienen:

COLAPSO. Este esfuerzo presenta su mayor valor en la parte exterior y más baja de la tubería.

TENSION. Es otro esfuerzo que debe tomarse en cuenta en un diseño y su esfuerzo máximo se presenta en el último tubo, cuando ya se ha introducido la tubería a la profundidad programada.

PRESION INTERNA. El mayor valor de la presión interna se presenta también en la parte superior de la tubería de revestimiento, en el momento en que al estar perforando se tiene un descontrol y es necesario cerrar los preventores.

Tomando en cuenta estos esfuerzos en el diseño de la tubería de revestimiento, se toman factores de seguridad para cada uno de estos fenómenos:

Presión Interna	1.00 a 1.75
Colapso	1.00 a 1.50
Tensión (tubo)	1.60 a 1.80
Tensión (junta)	1.80 a 2.00

Otro factor importante que hay que considerar y que es determinante en el diseño, es la fuerza axial a que está sujeta una tubería. Este fenómeno está determinado por la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales, que determina una reducción sobre la presión de colapso debido al peso de la tubería.

El programa de cómputo que posteriormente se presenta, está basado en dicha ecuación, que es la siguiente:

$$\frac{Sc^2}{Yp^2} - \frac{Sc St}{Yp^2} + \frac{St^2}{Yp^2} = 1$$

Donde:

Y_p = Mínimo esfuerzo a la deformación

Sc = Esfuerzo periférico o de arco

St = Esfuerzo a la tensión

Sin embargo, la ecuación de la elipse de esfuerzos a la tensión biaxiales puede escribirse en la forma más conveniente como sigue:

$$y^2 + yx + x^2 = 1$$

Donde:

$y = - \frac{Sc}{Y_p}$ = Resistencia parcial al colapso

$x = \frac{St}{Y_p}$ = Esfuerzo parcial a la tensión límite

Esta forma de ecuación de la elipse de esfuerzos a la tensión biaxiales es más conveniente, porque tanto la resistencia parcial al aplastamiento como el esfuerzo parcial a la tensión límite, pueden expresarse en cantidades conocidas. Los fabricantes de tubería de revestimiento proporcionan tablas de resistencia al aplastamiento para diversos tamaños, pesos y grados de tubería, que son esencialmente una porción de la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales a la tensión hecha especialmente para un peso, tamaño y grado determinado. Estas cartas o tablas son curvas del peso suspendido por la tubería contra la presión externa de aplastamiento. Se puede llegar a ellas por las siguientes sustituciones:

$$y = \frac{P_{ca}}{P_{co}} \quad ; \quad x = \frac{T}{Y_p \Delta s}$$

Donde:

P_{ca} = Mínima presión de colapso bajo efecto de tensión (psi)

P_{co} = Mínima presión de colapso sin efecto de tensión (psi)

T = Peso soportado por la tubería de revestimiento (lb)

Δs = Area de la sección transversal del tubo (pg^2)

El procedimiento consiste en:

I.- Con el valor de Pco para la segunda tubería se calcula la profundidad -- hasta donde se puede colocar la primera tubería.

$$P(n) = \frac{P_{co}(n+1)}{0.052 \times 1.125 \times \delta}$$

Pco (psi) ; 1.125 (adimensional) ; δ (lb/gal) ; 0.052 (lb/pg²/pie)
0.052 = Gradiente de presión para un fluido cuya densidad es igual a 1 lb/gal

II.- Con la profundidad obtenida se calcula el valor de x

$$x = \frac{T}{\Delta s Y_p}$$

III.- Con la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales se obtiene el va lor de Y

$$y = \sqrt{1 - 0.75 x^2} - 0.5 x$$

IV.- Se obtiene el valor de Pca

$$P_{ca} = y P_{co}$$

V.- Se divide Pca entre la presión de la columna hidrostática y se obtiene el Fdc

$$F_{dc} = \frac{P_{ca}}{P_{cl}}$$

Si este factor es mayor que 1.125, se prosigue. En caso contrario, se calcula una nueva P (n) haciendo Pca = Pco, y se repite el procedimiento.

VI.- Se calcula el factor de diseño a la tensión (Dft)

$$D_{ft} = \frac{\text{Resistencia a la tensión de la junta}}{\text{Peso de la columna de tubería}}$$

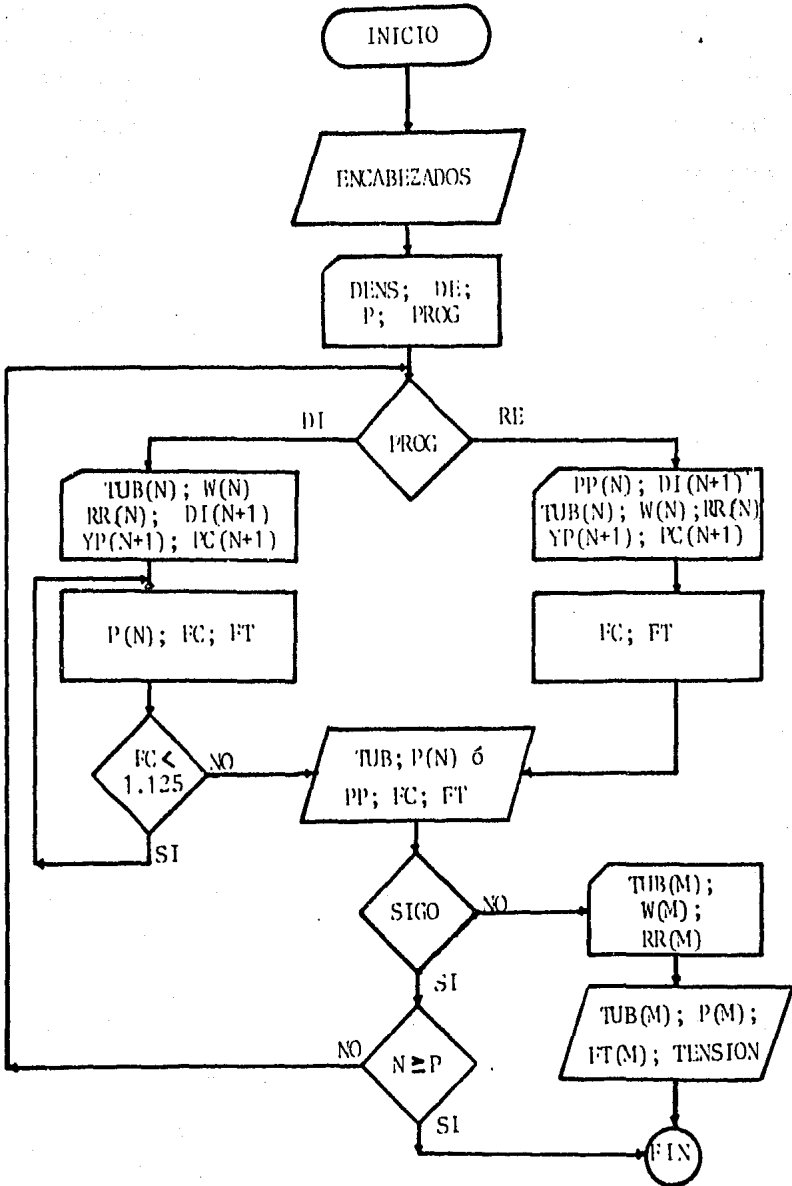
En caso de ser satisfactorio se procede a diseñar la siguiente tu

T.R.

bería, si no lo es, habrá que cambiar el tipo de junta o bien el tubo en su totalidad.

El programa de cómputo sigue el procedimiento de diseño antes mencionado, además de que rectifica los factores de tensión y de colapso de un diseño de tubería ya establecido, como en el caso del método gráfico.

PROGRAMA
DIAGRAMA DE FLUJO



PROGRAMA

SIMBOLOS:

DENS	Densidad
DE	Diámetro exterior
P	Profundidad total
PROG	Tipo de programa
DI	Diseño
RE	Rectificación
F.C.	Factor de colapso
TUB	Tipo de tubería
FT	Factor a la tensión
RR	Resistencia de la rosca
W	Peso
DI	Diámetro interior
YP	Mínimo esfuerzo a la deformación
PC	Resistencia al colapso
PP	Profundidad propuesta
P (N)	Profundidad hasta donde queda la tub N
M	Condiciones de la última tubería de revestimiento

* Las tuberías al introducirse en el programa deben haber sido previamente numeradas, empezando por la tubería que será colocada a la mayor profundidad, como se muestra en los ejemplos posteriores.

* Debe contestarse NO a la pregunta SIGO, después de haber obtenido los resultados de la tubería (M - 1).

PROGRAMA

(LISTADO)

10: PRINT "***** TUBERIA*****"	300: GOSUB 600	382: PRINT "FT=";	V
20: PRINT "DE RE VESTIMIENTO"	180: IF G#="RE" THEN 210	H	477: PRINT "TENSI ON=";K
24: PRINT " " *	190: A=C	383: INPUT "SIGO= ";O#	478: GOTO 490
25: PRINT " " *	200: Q=A/(D*.052* 1.125)	384: IF O#="SI"	480: GOTO 180
26: PRINT " " *	210: S=((P-Q)*W)+ K	THEN 390	490: END
27: PRINT " " *	220: U=PI/4*(E+E-I *I)*H	385: PAUSE "TUB="	600: PAUSE "TUB="
30: CLEAR	230: K=S/U	IAC(30): INPUT	IAC(30)
40: A(30)=1	240: Y=T*(1-(X**X. 75))-1.5*X	"TUB=";I2#;	601: INPUT "TUB="
50: INPUT "DENS. (LB/G)=";D	270: Q=Y+C	INPUT "N=";N	I2#
51: PRINT "DENS. (LB/G)=";D	280: L=D*.052*Q	386: INPUT "RR=";	605: INPUT "W TRC LB/FT)=";W
60: INPUT "DE(PG)=";E	290: F=(A/L)+.000 1	V	606: INPUT "RR=";
61: PRINT "DE(PG)=";E	300: PAUSE "F.C="	387: K=S+(N*Q).	H
70: INPUT "P(FT) =";P	IF	388: GOTO 474	607: A(30)=A(30)+
71: PRINT "P(FT) =";P	310: IF G#="RE"	390: N=P-Q	1
72: PRINT " "	THEN 324	400: IF N)=P THEN	608: PAUSE "TUB="
73: PRINT " "	320: IF F<1.125	490	IAC(30)
74: INPUT "PROG= ";G#	THEN 200	410: K=(N*(P-Q))+ K	610: INPUT "DI(PG)=";I
	324: PRINT " "	420: P=Q	620: INPUT "YP=";
	325: PRINT "TUB="	430: GOSUB 600	M
	I2#	472: IF O#="SI"	630: INPUT "PC(CPS I)=";C
	330: PRINT "HASTA ";O;"(FT)"	THEN 480	640: IF G#="DI"
	380: PRINT "FC=";	473: K=K+K	THEN 660
	F	474: PRINT " ";	650: INPUT "PP(FT)=";P
	381: H=W/S	PRINT "TUB="	660: RETURN
		I2#; PRINT "H ASTA SUPERFI CIE"	
		475: V=V/K	
		476: PRINT "FT=";	

PROGRAMA

EJEMPLO No. 1

En un pozo se tienen disponibles las siguientes tuberías, con sus respectivas características:

TUBERIA	DIAM. INT.	P COL	TIPO DE ROSCA	RESIST. ROSCA
P110 - 47	8.681	5,310	CLRR8	1,213,000
P110 - 43.5	8.755	4,430	CLRR8	1,106,000
N80 - 43.5	8.755	3,810	BCN	1,074,000
N80 - 40	8.835	3,090	EL	1,027,000

Diseñe las longitudes de tubería a usar para revestir completamente el agujero:

Profundidad total = 3520 mts = 11545.6 ft

Densidad de lodo = 9.74 lb/gal

Diámetro de la barrena = 12 1/2"

Cementar tubería 9 5/8" O.D.

PROGRAMA

(EJEMPLO No. 1)

*****TUBERIA****
DE REVESTIMIENTO

DENS. (LB/G)=9.74
DE(PG)=9.625
P(FT)=11545.6

TUB=P110-47
HASTA 7124.16039
1(FT)
FC=1.125041147
FT=5.837128384

TUB=P110435
HASTA 5581.78993
1(FT)
FC=1.125036749
FT=4.023269827

TUB=N80-435
HASTA 4141.01971
6(FT)
FC=1.125006527
FT=3.181521995

TUB=N80-40
HASTA SUPERFICIE
FT=2.040876878
TENSION=503215.0
696

P R O G R A M A

EJEMPLO No. 2

De un diseño gráfico se obtuvieron las siguientes tuberías con -- sus correspondientes profundidades.

TUBERIA	PROFUNDIDAD (hasta) (ft)	DIAM. INT. (pg)	PCOL (psi)	TIPO ROSCA	RESIST. ROSCA (1000 lbs)
1.- P110 - 35	14 104	6.004	13010	CLRR8	996
2.- P110 - 32	12 464	6.094	10760	CLRR8	897
3.- N80 - 35	11 250	6.004	10180	CLRR8	746
4.- C75 - 35	9 840	6.004	9710	CLRR8	703
5.- P110 - 29	9 184	6.184	8510	CLRR8	797
6.- N80 - 32	6 232	6.094	8600	CLRR8	672
7.- P110 - 26	0	6.276	6210	BCN	853

Comprobar los factores al colapso y a la tensión para estas pro-- fundidades y en caso de no ser satisfactorios, diseñar las nuevas profundi-- dades, si:

Profundidad total = 16400 ft

Densidad del lodo = 1.51 gr/cm^3 12.5981 lb/gal

Cementar tubería de 7" O.D.

PROGRAMA
(EJEMPLO No. 2)

a) COMPROBACION

*****TUBERIA**** DE REVESTIMIENTO ***** ***** DENS. (LB/G)=12.5 981 DE(PG)=7. P(FT)=16400. TUB=P110-35 HASTA 14104. (FT) FC=1.116316342 FT=12.39422598 TUB=P110-32 HASTA 12464. (FT) FC=1.132579693 FT=6.752484192	TUB=N80-35 HASTA 11250. (FT) FC=1.139876533 FT=4.254533742 TUB=C75-35 HASTA 9840. (FT) FC=1.131438409 FT=3.128894428 TUB=P110-29 HASTA 9184. (FT) FC=1.137343602 FT=3.270360766 TUB=N80-32 HASTA 6232. (FT) FC=1.113735875 FT=1.987177971 TUB=P110-26 HASTA SUPERFICIE FT=1.705317873 TENSION=500200.
---	--

b) Como los factores no satisfacen los requerimientos de seguridad, será necesario modificar las longitudes de tubería.

*****TUBERIA***** DE REVESTIMIENTO ***** ***** DENS. (LB/G)=12.5 931 DC(PG)=7. P(FT)=16400.	TUB=N80-35 HASTA 9900.2012 7(FT) FC=1.125014062 FT=3.151990235 TUB=P110-29 HASTA 9330.10320 2(FT) FC=1.125007363 FT=3.322819666 TUB=N80-32 HASTA 6156.56001 2(FT) FC=1.12507018 FT=1.964629227 TUB=P110-26 HASTA SUPERFICIE FT=1.700557014 TENSION=501600.3 539
TUB=P110-35 HASTA 13902.2743 2(FT) FC=1.125035821 FT=11.62576267	
TUB=P110-32 HASTA 12592.4784 5(FT) FC=1.125065544 FT=6.9264277	
TUB=N80-35 HASTA 11484.1112 9(FT) FC=1.125035155 FT=4.441981803	

T.R.

Ya que tampoco modificando las longitudes, se alcanzan los factores de seguridad para todas las tuberías, habrá que hacer modificaciones al número y tipo de tuberías.

Una posible combinación, es la siguiente:

****TUBERIA**** DE REVESTIMIENTO ***** ***** DENS.(LB/G)=12.5 981 DE(PG)=T. P(FT)=16400.	TUB=P110-32 HASTA 11941.1138 S(FT) FC=1.125041704 FT=5.976897738 TUB=C95-32 HASTA 10002.4001 S(FT) FC=1.125054662 FT=3.621505657 TUB=P110-29 HASTA SUPERFICIE FT=1.901874824 TENSION=502136.0 985
---	---

B I B L I O G R A F I A

- 1.- MC CRAY & COLE: Tecnología de la Perforación de Pozos Petroleros, Sexta Edición, México, D. F., Ed. CECSA. 1952, p.p. 574 gráficas e ilustraciones.
- 2.- BENITEZ HERNANDEZ MIGUEL ANGEL: Apuntes de Tecnología de la Perforación, México, D.F., Facultad de Ingeniería, p.p. 103, gráficas e ilustraciones.
- 3.- BENITEZ HERNANDEZ MIGUEL ANGEL: Apuntes de Terminación de Pozos, México, D.F., Facultad de Ingeniería, p.p. 76, gráficas e ilustraciones.
- 4.- HOLMQUIST AND NADAI, 1934: Elipse de Esfuerzos Biaxiales.

CEMENTACION DE T.R.

La cementación de un pozo es el proceso de mezclar cemento con agua formando una lechada, misma que será bombeada a través de la tubería de revestimiento y depositada en el espacio anular formado por la tubería y la pared del agujero.

Las principales funciones que se cubren con la cementación primaria de una tubería son:

- 1.- Aislar las formaciones que han quedado comunicadas por la perforación del agujero.
- 2.- Adherir la tubería a la pared del pozo para proporcionarle un soporte a la primera.
- 3.- Evitar la corrosión de la tubería de revestimiento ocasionada por los fluidos de las formaciones.
- 4.- Proporcionar una base firme para el soporte del equipo de seguridad en la superficie.
- 5.- Sellar zonas con pérdidas de circulación.

En la actualidad el análisis hidráulico del pozo durante las operaciones de cementación cobra mucha importancia. Por lo tanto, se ha incrementado la necesidad de tener un método de análisis relativamente fácil, -- que trabaje con las condiciones de flujo existentes en el pozo durante las operaciones de cementación.

La práctica que recibe mayor atención, es la sugerida en 1948 por Howard y Clark, en la cual se alcanza flujo turbulento con la circulación de fluidos durante las operaciones. Las propiedades de la lechada que se -- usan en la cementación, deben ser medidas y se debe contar con el método de cálculo, que determine la velocidad de circulación que se debe alcanzar y -- las probables consecuencias de ésta en términos de pérdidas de presión por fricción y utilización de potencia en la superficie. Resulta, hasta cierto-

punto, inapropiado alcanzar altas velocidades si con ello se alcanzan grandes pérdidas por fricción.

Para poder medir las propiedades reológicas de la lechada, es necesario disponer de un viscosímetro rotacional, en donde se puedan medir, - al menos, dos parámetros. Estos dos parámetros, requeridos usualmente para definir el fluido, son denotados con los símbolos n' y k' , y son conocidos como "índice de comportamiento de flujo" e "índice de consistencia", respectivamente.

El cálculo de estas propiedades se realiza con:

$$n' = 3.32 \log \frac{(\text{lect. } 600 \text{ rpm})}{(\text{lect. } 300 \text{ rpm})} \quad \delta \quad n' = 3.32 \log \frac{(2V_p + P_c)}{(V_p + P_c)}$$

y,

$$k' = \frac{(\text{lect. } 300 \text{ rpm}) 1.066}{100 \times 511^{n'}} \quad \delta \quad k' = \frac{(V_p + P_c) 1.066}{100 \times 511^{n'}}$$

Donde:

n' = índice de comportamiento de flujo	(adimensional)
k' = índice de consistencia	(lbf. seg/pie ²)
V_p = Viscosidad plástica	(cp)
Y_p = Punto cedente	(lb/1000 pie ²)

Estas dos propiedades de la lechada permiten calcular el número de Reynold's y la velocidad crítica, o la velocidad a la cual desaparece el flujo laminar.

La ecuación del número de Reynold's con la constante requerida para permitir el uso de todo tipo de fluidos utilizados en la industria petrolera, es la siguiente:

$$N_{re} = \frac{1.86 V^{2-n'} \rho}{k' (96/D)^{n'}}$$

Donde:

- V = Velocidad (pies/seg)
- ρ = Densidad del fluido (lb/gal)
- Nre = Número de Reynold's (adimensional)

Otra expresión usual para alguna fase del cálculo es la relación entre el factor de fricción de Fanning y el número de Reynold's en la zona de transición y turbulencia.

$$f = 0.00454 + 0.645 (\text{Nre})^{-0.7}$$

La caída de presión por fricción es:

$$\Delta p_f = \frac{0.039 L \rho V^2 f}{D}$$

Donde:

- L = Longitud de la sección considerada (pies)
- D = Diámetro de la sección considerada (pg)

Un descubrimiento muy interesante durante el establecimiento de la correlación de Fanning vs el número de Reynold's, fue la muy pronunciada divergencia, a partir del flujo laminar, la cual ocurría a Nre = 2100. En vista de esto, un criterio mínimo para flujo turbulento fue establecido en este número de Reynold's. Así, que agrupando la ecuación de Nre se tiene:

$$V_c^{2-n'} = \frac{1129 k' (96/D)^{n'}}{\rho} ; \quad Q = D^2 \cdot V_c / 17.15$$

También se utiliza la presión para la potencia hidráulica:

$$\begin{aligned} \text{HHP} &= 0.0245 P_w Q \\ \Delta P_w &= P_f + P_{ha} - P_{hc} \end{aligned}$$

Donde:

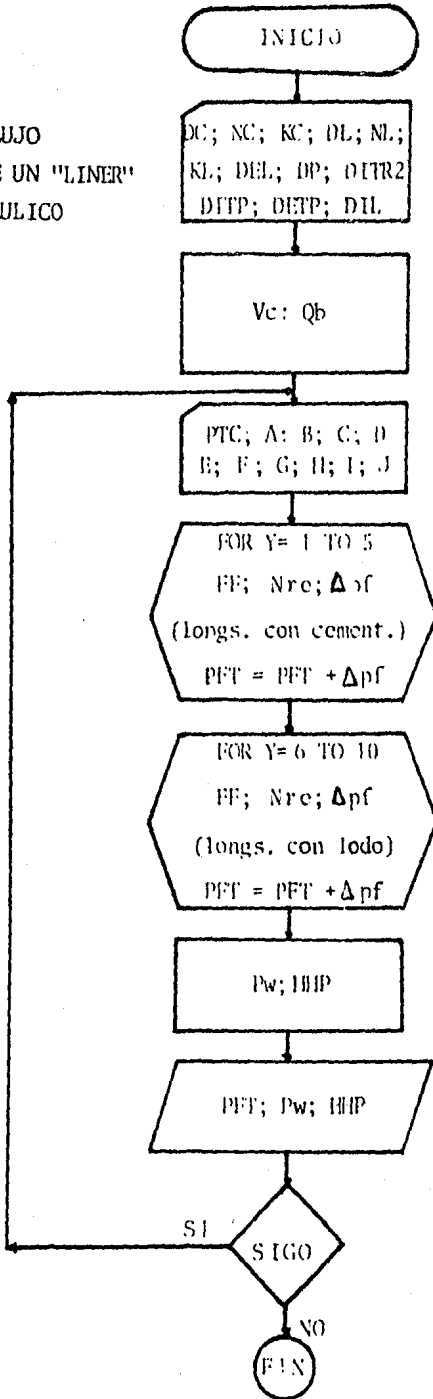
$$\text{HHP} = \text{Potencia hidráulica (HHP)}$$

CEMENTACION DE T.R.

- P_w = Presión de operación (lb/pg^2)
 Δp_f = Pérdidas por fricción (lb/pg^2)
 P_{ha} = Presión de la columna hidrostática en el exterior de la tu
bería (lb/pg^2)
 P_{hc} = Presión de la columna hidrostática en el interior de la tu
bería (lb/pg^2)
 Q = Gasto (bl/min)

Para establecer el volumen de lechada a usar, se utiliza el crit
erio de 10 minutos de contacto en la zapata de la tubería

PROGRAMA
DIAGRAMA DE FLUJO
CEMENTACION DE UN "LINER"
ANALISIS HIDRAULICO



P R O G R A M A
CEMENTACION DE T.R.
ANALISIS HIDRAULICO

SIMBOLOS:

DC	Densidad del cemento
NC	Indice de comportamiento de flujo del cemento
KC	Indice de consistencia del cemento
DL	Densidad del lodo
NL	Indice de comportamiento de flujo del lodo
KL	Indice de consistencia del lodo
DETR	Diámetro exterior de la T.R.
DP	Diámetro del pozo
DITR2	Diámetro interior de la T.R. antes cementada
PTR2	Profundidad de la T.R. antes cementada
PT	Profundidad total
# TUBS	Número de secciones que forman la sarta de T.R.
DEQ	Diámetro equivalente
CEQ	Capacidad equivalente
Vc	Velocidad crítica
Qb	Gasto
Vint	Velocidad interior
PTC	Profundidad del tapón superior
U	Volumen entre PTC y PT
S	Volumen de lechada
S1	Volumen de lechada total - volumen de lechada dentro de la - T.R.
C1	Capacidad del espacio anular
B	Longitud ocupada por cemento en el interior de la T.R.
C	Longitud ocupada por cemento en el espacio anular
D	Longitud ocupada por lodo en el interior de la T.R.
E	Longitud ocupada por lodo después de PTR ²
PFT	Pérdidas por fricción totales

SIMBOLOS:

Nre	Número de Reynold's
FF	Factor de fricción de Fanning
Δpf	Pérdidas por fricción en una sección dada
Pw	Presión de operación
HHP	Potencia hidráulica

CEMENTACION DE T.R.

PROGRAMA
(LISTADO)
CEMENTACION DE UNA T.R.
ANALISIS HIDRAULICO

<pre> 3: PRINT "+CEME NTACION DE*" 4: PRINT "***** T.R. *****" 5: PRINT " " 9: CLEAR 10: INPUT "DC(LD /G)=";G 20: INPUT "HC="; H 30: INPUT "KC="; I 40: INPUT "DL(LD /G)=";J 50: INPUT "NL="; K 60: INPUT "KL="; L 70: INPUT "DETRK PG)=";H 80: INPUT "DP(PG)"=";H 90: INPUT "DITR2 (PG)=";J 100: INPUT "PTR2K FT)=";F 110: INPUT "PT(FT)"=";F 120: INPUT "#TUBS =";Q 130: FOR R=1 TO Q 140: PAUSE "TUB#=" R 150: INPUT "L(FT) =";S 160: INPUT "CAP(B D-FT)=";T 170: INPUT "DI(CG </pre>	<pre>)"=";Q 180: U=U+S:T=T+S 190: V=V+U:N=N+T 200: NEXT R 210: V=V/P:N=N/P 220: Q=(1129*H*(G 6/(H-H))^(H/G))^(1/(2-H)) 230: R=(H*(2-H^2)* 6/17.15 240: S=R+17.15/V^ 2 250: A(27)=0 251: INPUT "PTC(F T)=";T 252: PRINT "PTC(F T)=";T 260: U=(P-T)*M 270: IF U<(R+10) THEN 290 280: GOTO 310 290: GOSUB 800 300: GOTO 320 310: GOSUB 850 320: FOR X=2 TO 3 330: IF X=3 THEN 3 70 340: Y=.059*(A(X)* 645^2/V 350: Y=Y+.00454+ .645*(1.86*S ^(2-H)*G/(I* (96*(V^H))^(- .7) 360: GOTO 400 370: IF A(X)=0 THEN 410 380: Y=.059*(A(X)* 645^2/(H-H) </pre>	<pre> 390: Y=Y+.00454+ .645*(1.86*S ^(2-H)*J/(L* (96*(H-H))^(- .7) 400: A(27)=A(27)+ Y 410: NEXT X 420: FOR X=1 TO 6 430: IF X=6 THEN 5 10 440: IF X=5 THEN 4 90 450: Y=.059*(A(X)* 645^2/V 460: Y=Y+.00454+ .645*(1.86*S ^(2-H)*J/(L* (96*(H-H))^(- .7) 470: GOTO 550 480: Y=.059*(A(X)* 645^2/(H-H) 490: Y=Y+.00454+ .645*(1.86*S ^(2-H)*J/(L* (96*(H-H))^(- .7) 500: GOTO 500 510: IF A(X)=0 THEN 560 520: A=R+17.15/(G ^(2-H^2) 530: Y=.059*(A(X)* 645^2/(H-H) 540: Y=Y+.00454+ .645*(1.86*S ^(2-H)*J/(L* (96*(H-H))^(- </pre>	<pre>))^(.7) 550: A(27)=A(27)+ Y 560: NEXT X 561: PRINT "PFE=" (A(27)*("PSI ")) 570: A=.052*(C*(F* -H)*S*(C-70)* 6)*A(27) 571: PRINT "F="; A("PSI") 580: A=.00194R 581: PRINT "HMP=" (A) 582: PRINT " " 589: BEEP 3 590: PAUSE "QUIER ES OTRA PROF UNDAD?" 591: BEEP 4 600: INPUT "=";Z 610: IF Z="2" THEN 250 620: END 800: B=P-T 810: C=(R+10-U)/(2-H^2) 820: D=T 830: E=P-F-C 840: RETURN 850: B=R+10/W 860: C=0 870: D=P-B 880: E=P-F-C 890: RETURN </pre>
--	--	--	--

CEMENTACION DE T.R.

EJEMPLO No. 1

Ejemplo de un Análisis Hidráulico

Cementar una T.R. combinada, en un pozo con diámetro de 9 1/2" a la profundidad de 14760 pies, empleando el volumen de la lechada de cemento de acuerdo al gasto crítico y con un tiempo de contacto en la zapata de 10 minutos. Ultima T.R. 10 3/4 - 55.5 lb/pie - 6000 pies.

T.R.	PROF. (pies)	LONG. (pies)	d.i. (pg)	Cap. bl/pie
N-80-38 lb/pie	14760 - 9160	5600	5.920	0.034
C-75-32 lb/pie	9160 - 3326	5830	6.094	0.036
C-95-38 lb/pie	3326 - 0	3326	5.920	0.034

T.R. 10 3/4" - d.i. = 9.760 pg

Propiedades reológicas de los fluidos

	Lechada de cemento	Lodo
n'	0.30	0.29
k' (lb seg ^{n'} /pie ²)	0.166	0.066
f (lb/gal)	15.2	12.5
Grad. Presión (psi/pie)	0.790	0.650

CEMENTACION DE ***** T.R. *****	SI) HHP=533.4387349	PTC(FT)=13000. FFT=1940.928948(P PSI) PW=2182.439138(P SI) HHP=1094.889023	PW=2531.461505(P SI) HHP=1269.987037
PTC(FT)=6000. FFT=1873.145149(P PSI) PW=1063.301895(P SI) HHP=533.4387349	PTC(FT)=9000. FFT=1873.282376(P PSI) PW=1065.567565(P SI) HHP=534.5753793	PTC(FT)=13500. FFT=1949.384771(P PSI) PW=2322.048086(P SI) HHP=1164.928229	PTC(FT)=14500. FFT=1966.296414(P PSI) PW=2601.265978(P SI) HHP=1305.006639
PTC(FT)=7000. FFT=1873.145149(P PSI) PW=1063.301895(P SI) HHP=533.4387349	PTC(FT)=11000. FFT=1907.105663(P PSI) PW=1624.003353(P SI) HHP=814.7322018	PTC(FT)=14000. FFT=1957.840592(P PSI) PW=2461.657032(P SI) HHP=1234.967434	PTC(FT)=14600. FFT=1967.987578(P PSI) PW=2629.187767(P SI) HHP=1319.01448
PTC(FT)=8000. FFT=1873.145149(P PSI) PW=1063.301895(P SI) HHP=533.4387349	PTC(FT)=12000. FFT=1924.017306(P PSI) PW=1903.221246(P SI) HHP=954.8106126	PTC(FT)=14250. FFT=1962.068503(P PSI)	PTC(FT)=14700. FFT=1969.678742(P PSI) PW=2657.109556(P SI) HHP=1333.022521

CEMENTACION DE T.R.

EJEMPLO No. 2

Ejemplo de un Análisis Hidráulico

Cementar una T.R. combinada en un pozo con diámetro de 12 1/4" a la profundidad de 10725.6 ft, empleando el volumen de lechada de cemento de acuerdo al gasto crítico y con el tiempo de contacto en la zapata de 10 minutos. No existe otra tubería de revestimiento dentro del pozo.

T.R.	PROF. (pies)	LONG. (pies)	d.i. (pg)	Cap. (bl/pie)
N-80-47 lb/pie	0-4361.1444	4361.1444	8.681	0.0732
N-80-53.5 lb/pie	4361.1444-6832.9949	2471.8505	8.535	0.0707
P-110-53.5 lb/pie	6832.9949-8744.0306	1911.0357	8.535	0.0707
V-150-53.5 lb/pie	8744.0306-10725.6	1981.5694	8.535	0.0707

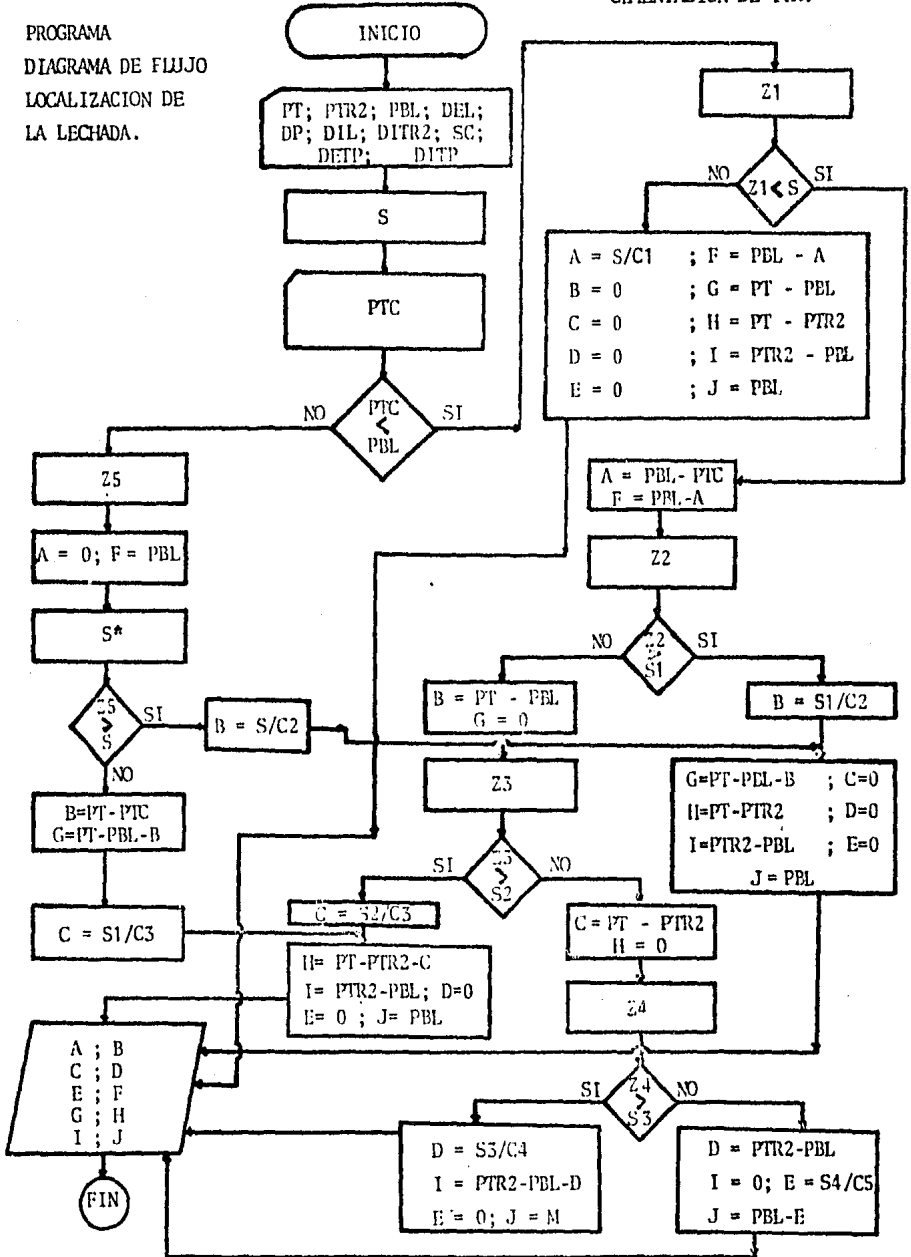
Propiedades reológicas de los fluidos.

	Lechada de cemento	Lodo
n'	0.797	0.7771
k' (1b seg ^{n'} /pie ²)	0.00311	0.004102
ρ (lb/gal)	16.0	15.0
Grad. Presión(psi/pie)	0.832	0.780

CEMENTACION DE ***** T.R. *****	PTC(FT)=8000, PFT=157.1786691(PSI) PW=82.48636409(P SI) HHP=21.24290649	HHP=27.98580332	PW=232.8811187(P SI) HHP=59.97441979
PTC(FT)=6000, PFT=157.1786691(PSI) PW=82.48636409(P SI) HHP=21.24290649	PTC(FT)=9000, PFT=157.1786691(PSI) PW=82.48636409(P SI) HHP=21.24290649	PTC(FT)=10000, PFT=160.9820183(PSI) PW=170.775099(P SI) HHP=43.98011112	PTC(FT)=10600, PFT=164.1925419(PSI) PW=245.3023227(P SI) HHP=63.17328154
PTC(FT)=7000, PFT=157.1786691(PSI) PW=82.48636409(P SI) HHP=21.24290649	PTC(FT)=9500, PFT=158.3065821(PSI) PW=108.6690827(P SI)	PTC(FT)=10250, PFT=162.3197364(PSI) PW=201.8281088(P SI) HHP=51.97726544	PTC(FT)=10680, PFT=164.6206116(PSI) PW=255.2392857(P SI) HHP=65.73237089
		PTC(FT)=10500, PFT=163.8574546(PSI)	

CEMENTACION DE T.R.

PROGRAMA
DIAGRAMA DE FLUJO
LOCALIZACION DE
LA LECHADA.



P R O G R A M A
CEMENTACION DE UN "LINER"
LOCALIZACION DE LA LECHADA

SIMBOLOS:

PT	Profundidad total
PTR2	Profundidad de la T.R. antes cementada
PBL	Profundidad de la boca del "Liner"
DP	Diámetro del pozo
DEL	Diámetro exterior del "Liner"
DIL	Diámetro interior del "Liner"
DITR2	Diámetro interior de la T.R. antes cementada
SC	Sacos de cemento
DETP	Diámetro exterior de la T.P.
DITP	Diámetro interior de la T.P.
S	Volumen de lechada total
PTC	Profundidad del tapón superior
S *	$S + A * CI$
Z1	Volumen interior de la T.P. entre PTC y PBL
Z2	Volumen interior del "Liner"
Z3	Volumen del espacio anular entre PT y PTR2
Z4	Volumen del espacio anular entre PTR2 y PBL
Z5	Volumen interior del "Liner" entre PTC y PT
C1	Capacidad interior de la T.P.
C2	Capacidad interior del "Liner"
C3	Capacidad del espacio anular entre PT y PTR2
C4	Capacidad del espacio anular entre PTR2 Y PBL
C5	Capacidad del espacio anular arriba de PBL
S1	$S - A * CI$
S2	$S1 - B * C2$
S3	$S2 - C * C3$
A	Longitud ocupada por cemento en interior de la T.P.
B	Longitud ocupada por cemento en interior del "Liner"

CEMENTACION DE T.R.

- C Longitud ocupada por cemento en el espacio anular entre PT y PTR2
- D Longitud ocupada por cemento en el espacio anular entre PTR2 y PBL
- E Longitud ocupada por cemento en el espacio anular arriba de PBL
- F Longitud ocupada por lodo en el interior de la T.P.
- G Longitud ocupada por lodo en el interior del "Liner"
- H Longitud ocupada por lodo en el espacio anular entre -- PT y PTR2
- I Longitud ocupada por lodo en el espacio anular entre -- PTR2 y PBL
- J Longitud ocupada por lodo en el espacio anular arriba - de PBL

PROGRAMA
(LISTADO)
CEMENTACION DE UN "LINER"
LOCALIZACION DE LA LECHADA

4: PRINT " CE MENTACION"	10 130: IF T<M THEN 1 50	425: PRINT "J="; J J*(V*0^2)	680: G=K-M-B
5: PRINT " DE UN LINER"	140: GOTO 220	430: INPUT "OTRA PROP ?="; I;#	690: C=0
6: PRINT " "	150: Z=(M-T)+V*P^ 2	440: IF I#="S1" THEN 120	700: H=K-L
7: PRINT " LOC ALIZACION"	160: IF Z<S THEN 1 80	450: END	710: D=0
8: PRINT " DE LA LECHADA"	170: GOTO 200	500: G=M-T	720: I=L-M
9: PRINT " "	180: GOSUB 500	510: F=M-A	730: E=0
10: CLEAR :V=9.7 13486769E-4	190: GOTO 340	520: Z=(K-M)+V*0^ 2	740: J=M
20: INPUT "PT="; K	200: GOSUB 380	530: IF Z>(S-A)*V* R^2 THEN 670	750: GOTO 370
30: INPUT "PTR2="; L	210: GOTO 340	540: B=K-H	760: C=(S-V*(A+R^ 2+B*0^2))/CV
40: INPUT "PBL="; M	220: Z=(K-T)+V*0^ 2	550: G=0	*(P^2-U^2))
50: INPUT "DP="; N	230: A=1: LET F=M	560: Z=(K-L)+V*(N ^2-U^2)	770: H=K-L-C
60: INPUT "DEL="; O	240: S=S+A*V*R^2	570: IF Z>(S-V*(A +R^2+B*0^2))	780: D=0
70: INPUT "DIL="; P	250: IF Z>(S-A)*V* R^2 THEN 270	580: C=K-L	790: I=L-M
80: INPUT "DITR2 ="; P	260: GOTO 300	590: H=0	800: E=0
90: INPUT "DETP="; Q	270: GOSUB 670	600: Z=(L-M)+V*(P ^2-U^2)	810: J=M
100: INPUT "DITP="; R	280: A=0: S=S-A*V* R^2	610: IF Z>(S-V*(A +R^2+B*0^2)+C *(H^2-U^2))	820: GOTO 370
110: INPUT "SO="; S: S=S*50.5/1 59	290: GOTO 340	620: D=L-M	830: D=(S-V*(A+R^ 2+B*0^2)+C*(H ^2-U^2))/CV
120: INPUT "PTC="; T	300: B=K-T	630: I=0	*(P^2-U^2))
121: PRINT " "	310: G=K-M-B	640: E=(S-V*(A+R^ 2+B*0^2)+C*(H ^2-U^2)+D*(P ^2-U^2))/CV	840: I=L-M-D
122: PRINT "PTC="	320: GOSUB 560	650: I=N-E	850: E=0
	330: A=0: S=S-A*V* R^2	660: GOTO 370	860: J=M
	340: PRINT "A=";A	670: E=(S-A)*V*R^2	870: RETURN
	350: PRINT "B=";B		880: A=S*(V+R^2)
	360: PRINT "C=";C		890: B=0
	370: PRINT "D=";D		900: C=0
	380: PRINT "E=";E		910: D=0
	390: PRINT "F=";F		920: E=0
	400: PRINT "G=";G		930: F=M-A
	410: PRINT "H=";H		940: G=K-H
	420: PRINT "I=";I		950: I=L-M
			960: J=M
			970: RETURN

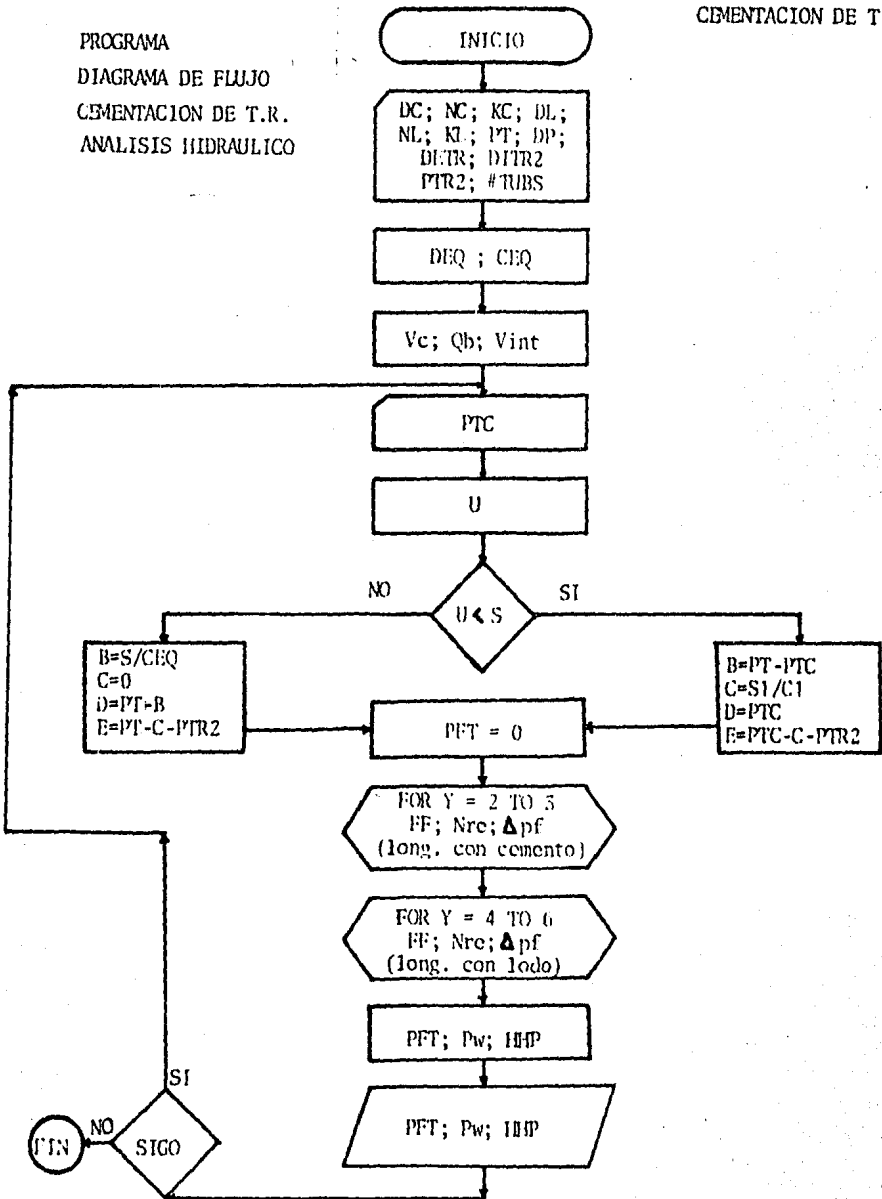
CEMENTACION DE T.R.

PROGRAMA
(LISTADO)
CEMENTACION DE UN "LINER"
LOCALIZACION DE LA LECHADA

4:PRINT " CE MENTACION"	:T	425:PRINT "Z=";Z	770:PRINT "Z="
5:PRINT " DE UN LINER"	130:IF T<0THEN 1	430:INPUT "OTRA PREG=";M	680:G=K-R
6:PRINT " "	50	440:IF M="2" THEN 120	690:G=0
7:PRINT " LOC ALIZACION"	140:GOTO 220	450:END	700:R=K-L
8:PRINT " DE LA LECHADA"	150:Z=(H-T)*VAR 2	500:R=M-1	710:R=0
9:PRINT " "	160:IF Z<0THEN 1	510:F=M-N	720:R=L-M
10:CLEAR :V=9.7	80	520:Z=(R-H)*VAR 2	730:G=0
13486769E-4	170:GOTO 200	530:IF Z<0 THEN 670	740:R=M
20:INPUT "PT=";	180:GOSUB 500	540:R=M-N	750:GOTO 670
K	190:GOTO 340	550:G=0	760:G=0:MEG=0
30:INPUT "PTR2="	200:GOSUB 580	560:Z=(R-H)*VAR 2	770:PRINT "M="
:;L	210:GOTO 340	570:IF Z<0 THEN 670	780:R=0
40:INPUT "PBL="	220:Z=(R-T)*VAR 2	580:Z=(R-H)*VAR 2	790:R=L
:;N	230:A=1:LET F=M	590:G=0	800:R=0
50:INPUT "DP=";	240:S=S+M*P/2	600:Z=(L-R)*VAR 2	810:R=M
N	250:IF Z<0 THEN 270	610:IF Z<0 THEN 670	820:G=0:MEG=0
60:INPUT "DEL="	R/2	620:G=L-M	830:R=0
:;U	260:GOTO 300	630:G=0	840:R=L
70:INPUT "DIL="	270:GOSUB 670	640:Z=(R-H)*VAR 2	850:R=0
:;O	280:A=0:S=S-A*V* R/2	650:GOTO 670	860:R=0
80:INPUT "DITR2	290:GOTO 340	660:Z=(R-H)*VAR 2	870:R=L
=:;P	300:R=K-T	670:G=0	880:R=0
90:INPUT "DETP="	310:G=K-N-E	680:GOTO 670	890:R=0
:;S	320:GOSUB 560	690:G=0	900:R=0
100:INPUT "DITP="	330:A=0:S=S-A*V* R/2	700:Z=(R-H)*VAR 2	910:R=L
:;R	340:PRINT "A=";A	710:G=0	920:R=0
110:INPUT "SC=";	350:PRINT "B=";B	720:Z=(R-H)*VAR 2	930:R=L
S=S+33.6/1	360:PRINT "C=";C	730:G=0	940:R=L
59	370:PRINT "D=";D	740:R=M	950:R=L
120:INPUT "PTC="	380:PRINT "E=";E	750:GOTO 670	960:R=0
:;T	390:PRINT "F=";F	760:Z=(R-H)*VAR 2	970:R=L
121:PRINT " "	400:PRINT "G=";G	770:PRINT "M="	980:R=0
122:PRINT "PTC="	410:PRINT "H=";H	780:PRINT "N="	990:R=L
	420:PRINT "I=";I	790:PRINT "O="	

CEMENTACION DE T.R.

PROGRAMA
DIAGRAMA DE FLUJO
CEMENTACION DE T.R.
ANALISIS HIDRAULICO



P R O G R A M A
CEMENTACION DE UN "LINER"
ANALISIS HIDRAULICO

SIMBOLOS:

DC	Densidad del cemento
NC	Indice de comportamiento de flujo de cemento
KC	Indice de consistencia del cemento
DL	Densidad del lodo
NL	Indice de comportamiento de flujo del lodo
KL	Indice de consistencia del lodo
DEL	Diámetro exterior del "Liner"
DP	Diámetro del pozo
DITR2	Diámetro interior de la T.R. antes cementada
DITP	Diámetro interior de la T.P.
DETP	Diámetro exterior de la T.P.
DIL	Diámetro interior del "Liner"
Vc	Velocidad crítica
Qb	Gasto
FF	Factor de fricción de Fanning
Nre	Número de Reynold's
Δp_f	Pérdidas por fricción de una sección dada
Pft	Pérdidas por fricción totales
Pw	Presión de operación
HHP	Potencia hidráulica

Los símbolos: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J son los mismos que para el programa de localización de la lechada.

PROGRAMA
(LISTADO)
CEMENTACION DE UN "LINER"
ANALISIS HIDRAULICO

1:PRINT " CEM ENT.LINER"	73:PRINT "PTC(F T)=";A(27)	2 240:A(31)=R-W	401:PRINT "PW(KPS I)=";A(32)
2:PRINT " DISEÑO"	74:INPUT "A=";A	245:GOSUB 580	405:A(32)=.025*A (32)+Z
3:PRINT " HI DRAULICO"	75:INPUT "B=";B	250:NEXT Y	406:PRINT "HHP="
4:PRINT " "	76:INPUT "C=";C	255:FOR Y=6TO 10	;(A(32)
5:PRINT " "	77:INPUT "D=";D	256:IF A(Y)=0	407:INPUT "OTRA NUEVA PROF.?
15:CLEAR :INPUT	78:INPUT "E=";E	THEN 395	=;IT;
"DC=";U	79:INPUT "F=";F	260:IF Y=10THEN	408:PRINT " "
20:INPUT "NC=";	80:INPUT "G=";G	390	409:IF T#="S1"
K	81:INPUT "H=";H	265:IF Y=9THEN 3	THEN 72
25:INPUT "KC=";	82:INPUT "I=";I	60	410:END
L	83:INPUT "J=";J	270:IF Y=8THEN 3	580:A(30)=2*17.1
30:INPUT "DL=";	100:S=0	35	S+A(30)
M	103:PRINT " "	275:IF Y=7THEN 3	585:A(32)=.039*A
35:INPUT "NL=";	140:FOR Y=1TO 5	10	(Y)+A(30)^2*
N	141:IF A(Y)=0	285:A(30)=V^2	U/A(31)
40:INPUT "KL=";	GOTO 250	290:A(31)=V:GOTO	590:A(32)=A(32)*
O	145:IF Y=5THEN 2	290	(.00454+.645
45:INPUT "DEL="	35	310:A(30)=W^2	+(1.86*A(30)
IF	150:IF Y=4THEN 2	315:A(31)=X:GOTO	*(2-R)*U/CL*
50:INPUT "DP=";	10	390	(96/A(31))^K
Q	155:IF Y=3THEN 1	335:A(30)=0^2-P^)^-.7)
55:INPUT "DITR2	85	2	595:S=S+A(32)
=";R	156:IF Y=2THEN 1	340:A(31)=0-P:	600:RETURN
60:INPUT "DITP="	61	GOTO 390	605:A(30)=2*17.1
";V	157:A(30)=V^2	360:A(30)=R^2-P^	S+A(30)
65:INPUT "DETP="	245	2	610:A(32)=.039*A
";W	158:A(31)=V:GOTO	365:A(31)=R-P:	(Y)+A(30)^2*
69:INPUT "DIL="	245	GOTO 390	N/A(31)
"X	161:A(30)=X^2	380:A(30)=R^2-W^	615:A(32)=A(32)*
70:S=(1129+L*(9	165:A(31)=X:GOTO	2	(.00454+.645
6*(O-P))^K/U	245	385:A(31)=R-W	*(1.86*A(30)
)^(1/(2-K))	185:A(30)=0^2-P^	390:GOSUB 605	^(2-R)*U/CL*
71:Z=(0^2-P^2)*	2	395:NEXT Y	(96/A(31))^K
S+17.15	190:A(31)=0-P:	396:PRINT "PFTCP)^-.7
72:INPUT "PTC="	GOTO 245	31)=";S	620:S=S+A(32)
;A(27)	210:A(30)=R^2-P^	400:A(32)=.052*(625:RETURN
	2	(J+H+I-F-G)*	
	215:A(31)=R-P:	M*(C+D+E-B-A	
	GOTO 245)/U)+S	
	235:A(30)=R^2-W^		

CEMENTACION DE T.R.

EJEMPLO No. 3

Ejemplo de un Análisis Hidráulico

Cementar un "Liner" de 7" en un pozo de 8.5" a la profundidad de 7380 ft, si la boca del "Liner" queda a 3972 . D.I. "Liner" - 6.184 . T.R.- anterior 9 5/8 - D.I. = 8.681" a 4300 pies . T.P. 4.5" - D.I. = 3.826".

Propiedades reológicas de los fluidos:

	Lechada de cemento	Lodo
n'	0.675	0.727
k' (lb seg ⁿ /pie ²)	0.00755	0.00332
ρ (lb/gal)	13.33333	9.16666

Primero se procede a localizar la lechada de cemento para los diferentes puntos donde se encuentre el tapón superior, en el momento en que se quiera hacer el análisis hidráulico.

CEMENTACION DE UN LINER	LOCALIZACION DE LA LECHADA	PTC=3990.	PTC=5000.	PTC=6000.
PTC=3900.	PTC=3970.	A=0.	A=0.	A=0.
A=72.	A=2.	B=3400.	B=1380.	B=880.
B=3408.	B=3408.	C=1609.870688	C=3080.	C=3080.
C=1551.380762	C=1595.452991	D=0.	D=328.	D=328.
D=0.	D=0.	E=0.	E=278.710487	E=973.163354
E=0.	E=0.	F=3972.	F=3972.	F=3972.
F=3900.	F=3970.	G=8.	G=1528.	G=2508.
G=0.	G=0.	H=1470.129312	H=0.	H=0.
H=1528.619238	H=1484.547009	I=328.	I=0.	I=0.
I=328.	I=328.	J=3972.	J=3693.289551	J=2998.836665
J=3972.	J=3972.			
		PTC=4000.	PTC=5500.	PTC=7000.
		A=0.	A=0.	A=0.
		B=3380.	B=1880.	B=380.
		C=1643.396512	C=3080.	C=3080.
		D=0.	D=328.	D=328.
		E=0.	E=278.710487	E=1320.399779
		F=3972.	F=3972.	F=3972.
		G=28.	G=1528.	G=3008.
		H=1436.603488	H=0.	H=0.
		I=328.	I=0.	I=0.
		J=3972.	J=3693.289551	J=2651.610221
		PTC=4500.	PTC=6000.	PTC=7500.
		A=0.	A=0.	A=0.
		B=2880.	B=1380.	B=80.
		C=2466.431622	C=3080.	C=3080.
		D=0.	D=328.	D=328.
		E=0.	E=625.8363921	E=1528.831093
		F=3972.	F=3972.	F=3972.
		G=528.	G=2008.	G=3328.
		H=613.568378	H=0.	H=0.
		I=328.	I=0.	I=0.
		J=3972.	J=3346.063108	J=2443.168167

CEMENTACION DE T.R.

En seguida, entrando con los resultados anteriores como datos, para las diferentes profundidades del tapón superior, se obtiene el análisis-hidráulico.

<p>CEMENT, LINER DISCNG HIDRAULICG</p> <p>PTC(FT)=3900.</p> <p>PFT(PSI)=484.241 9713 FW(PSI)=66.37447 01 HHP=13.35332587</p> <p>PTC(FT)=3970.</p> <p>PFT(PSI)=484.005 8859 FW(PSI)=90.85403 43 HHP=18.27816516</p>	<p>PTC(FT)=3980.</p> <p>PFT(PSI)=484.289 7938 FW(PSI)=96.52844 321 HHP=19.41975215</p> <p>PTC(FT)=4000.</p> <p>PFT(PSI)=462.334 289 FW(PSI)=2166.070 2 HHP=435.7735919</p> <p>PTC(FT)=4500.</p> <p>PFT(PSI)=509.821 6262 FW(PSI)=420.2152 044 HHP=84.5395911</p>	<p>PTC(FT)=5000.</p> <p>PFT(PSI)=531.857 0816 FW(PSI)=725.5540 3 HHP=145.5857986</p> <p>PTC(FT)=5500.</p> <p>PFT(PSI)=534.427 2707 FW(PSI)=925.8812 008 HHP=186.2705141</p> <p>PTC(FT)=6000.</p> <p>PFT(PSI)=533.940 8052 FW(PSI)=1108.960 265 HHP=223.1024636</p>	<p>PTC(FT)=5500.</p> <p>PFT(PSI)=533.453 9357 FW(PSI)=1290.039 329 HHP=259.9346131</p> <p>PTC(FT)=7000.</p> <p>PFT(PSI)=532.967 2742 FW(PSI)=1475.118 392 HHP=296.7687623</p> <p>PTC(FT)=7500.</p> <p>PFT(PSI)=532.675 3272 FW(PSI)=1584.989 113 HHP=318.870736</p>
--	--	--	---

B I B L I O G R A F I A

- 1.- BENITEZ HERNANDEZ MIGUEL ANGEL: Apuntes de Tecnología de la perforación. México, D.F., Facultad de Ingeniería, p.p. 103, gráficas e ilustraciones.
- 2.- KNOX A. SLAGLE: Rheological Design of Cementing Operations Journal of - Petroleum Technology, Marzo 1962.
- 3.- BENITEZ HERNANDEZ MIGUEL ANGEL: Apuntes de Terminación de Pozos, México, D.F., Facultad de Ingeniería, p.p. 76, gráficas e ilustraciones.

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

La ejecución de diferentes maniobras durante la perforación y terminación de pozos, dentro de la industria petrolera, ha dejado bien asentado que el movimiento de la tubería dentro del fluido que llena el pozo produce variaciones momentáneas en la presión de dicho fluido. Las presiones de surgencia están asociadas con el flujo del fluido, causado por la introducción de la tubería dentro del pozo, mientras que las presiones de suaveo se relacionan con la extracción de la tubería.

El conocimiento de la magnitud de dichas presiones es importante por las siguientes razones:

- 1.- Más del 25% de los reventones resultan a partir de las reducciones de presión en el pozo, debido directamente al suaveo originado en el momento de sacar tubería.
- 2.- Presiones de surgencia excesivas han iniciado problemas de pérdidas de circulación tanto en las operaciones de perforación, como en la introducción de tubería de revestimiento dentro del pozo.
- 3.- Los cambios de presión causados por la alternancia entre las presiones de suaveo y surgencia, debidas al movimiento de la tubería, ocasionan algunas inestabilidades en el pozo como el asentamiento de sólidos desprendidos de las formaciones, en el fondo del pozo.
- 4.- Las presiones de suaveo ocasionan la contaminación del lodo con los fluidos que entran de la formación. Esto puede traducirse en crecientes tratamientos del lodo y costos.

En el cálculo de las presiones de suaveo y surgencia la principal dificultad matemática es el efecto del movimiento de las paredes de la tubería en la velocidad del lodo en el espacio anular; el movimiento de las paredes de la tubería transporta lodo en la dirección del movimiento de la tubería, y al mismo tiempo el volumen de lodo desplazado por la tubería se mueve en sentido opuesto. Por lo tanto, la velocidad efectiva del lodo, sin tomar en cuenta aquella originada por el bombeo en la superficie, es una -

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

combinación de la velocidad del lodo debida al desplazamiento de éste por la tubería y a la tendencia de las paredes de la tubería de transportarlo.- La velocidad del lodo debida al desplazamiento de éste por la tubería, es fácilmente relacionada con el área de la sección transversal. Sin embargo, la componente de la velocidad debida al movimiento de las paredes de la tubería, no puede expresarse fácilmente en una ecuación. El procedimiento para llegar a este valor, es el siguiente: 1) Teóricamente se describe el perfil de velocidades del lodo debido al movimiento de la tubería; y entonces, 2) Se integra el perfil de velocidades para obtener una componente de la velocidad efectiva del lodo, debido al movimiento de las paredes de la tubería. Aquí el componente de la velocidad V_m , debido al movimiento de las paredes de la tubería, se relaciona con la velocidad de la tubería V_p a través de una constante de proporcionalidad k . Burkhardt en su trabajo define esta constante, variando de 0.4 a 0.5; en este trabajo se toma el valor de 0.45, quedando la ecuación como:

$$V_m = -0.45 V_p$$

El signo negativo aparece en la ecuación, debido que la velocidad originada por el desplazamiento de lodo y la ocasionada por el arrastre viscoso de la tubería son de dirección opuesta.

En las operaciones de perforación y terminación de pozos, las presiones de suaveo o surgencia se originan por la introducción o extracción de la tubería, dentro o fuera del pozo. Cualquiera de los dos movimientos puede presentarse dentro de los siguientes casos:

- 1) Tubería cerrada;
- 2) Tubería abierta bombeando, y
- 3) Tubería abierta sin bombear.

TUBERIA CERRADA.- Las sartas de tubería cerrada son todas aquellas que no permiten el flujo del lodo del espacio anular hacia el interior de la sarta de tubería, y un ejemplo típico de este tipo de tuberías, son las sartas de

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

tubería de revestimiento equipadas con zapatas flotadoras.

Para determinar la velocidad efectiva en el espacio anular, se debe considerar, además de la componente de la velocidad, debida al transporte de lodo por las paredes de la tubería, V_m , la componente de la velocidad originada por el desplazamiento de lodo por la tubería, V_{da} . Esta se determina por las áreas relativas de la sección transversal del espacio anular y de la tubería cerrada.

$$V_{da} = - \frac{D_p^2}{D_h^2 - D_p^2} V_p$$

Por consecuencia, la velocidad efectiva en el espacio anular será la suma de las velocidades ocasionadas por ambos efectos.

$$V_{ae} = V_{da} - V_m$$

$$V_{ae} = \left(\frac{D_p^2}{D_h^2 - D_p^2} - 0.45 \right) V_p$$

Con este valor de velocidad se calcula la caída de presión en el interior de la tubería, usando la siguiente secuencia:

Conociendo los valores del índice de consistencia (k') y el índice de comportamiento del fluido (n'), se calcula el número de Reynold's, Re , de la siguiente forma:

$$Re = \frac{1.86 V_{ae}^{2-n'} \rho}{k' (96 / (D_h - D_p))^{n'}}$$

Con el valor del número de Reynold's se procede a obtener el factor de fricción, f :

$$f = 0.00454 + 0.645 Re^{-0.7}$$

El valor del factor de fricción se emplea en la ecuación de las caídas de presión de la manera siguiente:

$$\Delta Pa = \frac{0.39 L \rho V_{ae}^2 f}{D_h - D_p}$$

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

En aquellas situaciones en donde la geometría del agujero o de la tubería cambie, se debe calcular la contribución a los gradientes de presión para cada geometría particular. La presión total será la suma de las diversas componentes.

Dentro del cálculo se hará el análisis para la cuantificación de la magnitud de la presión de surgencia, y la presión de suaveo se considerará de la misma magnitud, pero de signo contrario:

$$P_{sg} = - P_{sw}$$

TUBERÍA ABIERTA BOMBEANDO.- Para este segundo caso, la velocidad efectiva en el espacio anular, se debe a tres fenómenos:

- a) El arrastre viscoso de las paredes de la tubería;
- b) El desplazamiento del lodo por la tubería, y
- c) La acción del bombeo en la superficie.

Además, para este caso, las presiones de suaveo y surgencia no resultan iguales y de sentido contrario, sino que se debe considerar el sentido del movimiento de la tubería. De este modo la velocidad efectiva en el espacio anular está dada por:

Sacando tubería:

$$V_{ae} = V_b - V_{da} + V_m$$

Metiendo tubería

$$V_{ae} = V_b + V_{da} - V_m$$

Donde V_b es la velocidad del lodo en el espacio anular, debida a la acción del bombeo en la superficie, dada por:

$$V_b = \frac{183.34 Q}{(D_h^2 - D_p^2)}$$

V_{da} , que es la velocidad de desplazamiento, se define como:

$$V_{da} = \frac{(D_p^2 - D_i^2)}{(D_h^2 - D_p^2)} V_p$$

y V_m sigue siendo:

$$V_m = -0.45 V_p$$

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

Por lo tanto:

Sacando tubería

$$V_{ae} = \frac{183.34 Q}{D_h^2 - D_p^2} - \frac{D_p^2 - D_i^2}{D_h^2 - D_p^2} V_p + 0.45V_p$$

Metiendo tubería

$$V_{ae} = \frac{183.34 Q}{D_h^2 - D_p^2} + \frac{D_p^2 - D_i^2}{D_h^2 - D_p^2} V_p - 0.45V_p$$

Una vez conocido el valor de la velocidad efectiva del lodo en el espacio anular, se procede de igual manera que en el inciso anterior, para obtener el valor de la presión de suaveo o de surgencia.

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

TUBERIA ABIERTA SIN BOMBLEAR.- Al considerar el caso donde la tubería se -- mueve dentro del pozo, estando abierta y no se bombea en la superficie, se debe considerar lo siguiente: El lodo de perforación desplazado debido al movimiento de la sarta de tubería es libre de moverse por el espacio anular o por el interior de la tubería. En este caso, la determinación de la velocidad del fluido en el espacio anular no es tan simple como antes. La distribución del flujo entre el espacio anular y el interior de la tubería debe ser determinada tal que, la caída de presión dentro de la sarta de tubería sea igual a la ocurrida en el espacio anular.

El volumen total desplazado por la sección más baja de la tubería, será igual a la suma de los volúmenes de los diferentes cuerpos que integren la sección. Este volumen por unidad de longitud, relacionado con la velocidad de la tubería, nos proporcionará el gasto de desplazamiento.- Para el programa, el gasto desplazado por el movimiento de la tubería, Q_{ab} , está definido como:

$$Q_{ab} = \frac{(D_p^2 - D_t^2) V_p}{183.34}$$

Donde:

$$Q_{ab} = Q_a + Q_b$$

y Q_a es el gasto en el espacio anular debido al volumen desplazado y Q_b es el correspondiente en el interior de la tubería. La velocidad en el interior de la sarta de tubería para cada sección de diferente geometría, está dada por:

$$V_{be} = \frac{183.34 Q_b}{D_i^2}$$

La velocidad en cada sección del espacio anular, es la suma de las velocidades producidas por el arrastre viscoso de la sarta de perforación, V_m , y el desplazamiento total de la tubería reducida por el volumen

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

de lodo que fluye hacia el interior de la tubería.

$$V_{ae} = \frac{183.34 Q_a}{D_h^2 - D_p^2} - 0.45 V_p$$

Inicialmente se asume en los cálculos que Q_b está dado por el - gasto total de desplazamiento, multiplicado por la fracción del área total en el fondo de la tubería, representada por el área abierta de ésta:

$$Q_b = \frac{D_t^2 Q_{ab}}{D_h^2 - D_p^2 + D_t^2}$$

y, por lo tanto,

$$Q_a = Q_{ab} - Q_b$$

Con estos valores se calculan las caídas de presión, tanto en - el interior de la tubería, como en el espacio anular, usando la siguiente secuencia:

Conociendo los valores del índice de consistencia (k') y el índice de comportamiento del fluido (n'), se calcula el número de Reynold's, Re , de la siguiente forma:

Espacio Anular

$$Re = \frac{1.86 V_{ae}^{2-n'} \rho}{k' (96/(D_h - D_p))^{n'}}$$

Interior de Tubería

$$Re = \frac{1.86 V_{be}^{2-n'} \rho}{k' (96/D_i)^{n'}}$$

Con el valor del número de Reynold's se procede a obtener el -- factor de fricción, f :

Para el espacio anular e interior de la tubería

$$f = 0.00454 + 0.645 Re^{-0.7}$$

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

El valor del factor de fricción se emplea en la ecuación de las caídas de presión, en la manera siguiente:

$$\Delta Pa = \frac{0.039 L \rho V_{ae}^2 f_a}{D_h - D_p}$$

$$\Delta Pb = \frac{0.039 L \rho V_{be}^2 f_b}{D_i}$$

Si las caídas de presión resultante dentro y fuera de la tubería no caen dentro de un 2% de diferencia, entonces la segunda estimación de Q_b se hace como sigue: Se supone que la caída de presión dentro de la tubería está dada por:

$$P_b = B Q_b^2$$

Usando el valor de B calculado a partir de esta ecuación y las caídas de presión en el espacio anular, P_a , y en el interior de la tubería, P_b , se estima un nuevo valor de Q_b , dado por:

$$Q_b = \left(\frac{\Delta Pa + \Delta Pb}{2 B} \right)^{0.5}$$

La nueva estimación de Q_b no debe exceder Q_{ab} .

El valor de Q_a vuelve a calcularse como:

$$Q_a = Q_{ab} - Q_b$$

Y consecuentemente, el proceso iterativo continúa hasta alcanzar la tolerancia marcada en la diferencia de las caídas de presión.

Dentro de este tercer caso, es importante hacer la siguiente reflexión: Es claro que mientras el área de la tubería que está abierta es pequeña, comparada con el área del espacio anular, las presiones de suaveo o surgencia obtenidas como si la tubería estuviera cerrada, darán una mejor aproximación. Aparentemente la gelatinización del lodo, la cual no se considera en el programa, efectivamente taponea la tubería, particularmente a -

PRESIONES DE SJAVERO Y SURGENCIA

bajas velocidades de ésta.

La presión de suaveo en este tercer caso, resulta de igual magnitud a la presión de surgencia, pero de signo contrario.

Aquí, se presentan dos programas de cómputo. El primero de estos cubre los primeros dos casos. El segundo de los programas ataca el caso en donde la tubería abierta se mueve sin bombear en la superficie.

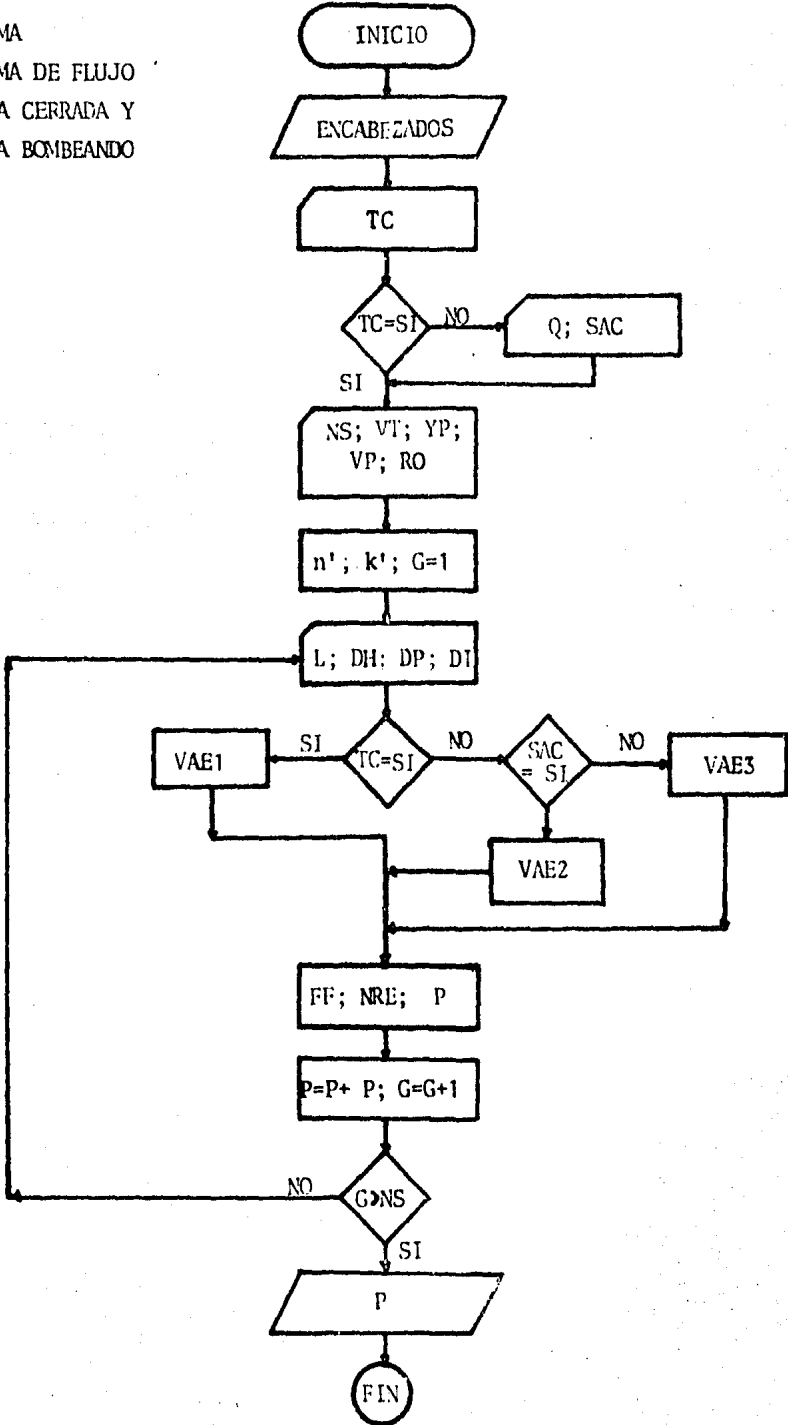
PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

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

- V_m = Componente de la velocidad en el espacio anular, debida al movimiento de las paredes de la tubería (ft/min).
- V_p = Velocidad de la tubería (ft/min).
- V_{da} = Componente de la velocidad en el espacio anular, debido al desplazamiento de la tubería (ft/min).
- V_{ae} = Velocidad efectiva en el espacio anular (ft/min).
- V_{be} = Velocidad efectiva en el interior de la tubería (ft/min).
- V_b = Componente de la velocidad en el espacio anular, debida a la acción de bombeo en la superficie (ft/min).
- D_h = Diámetro del agujero o interior de la T.R. (pg)
- D_p = Diámetro exterior de la tubería (pg).
- D_i = Diámetro interior de la tubería (pg).
- D_t = Diámetro del área abierta en el fondo de la tubería (pg)
- γ_o = Punto de cedencia ($lb/100\text{ ft}^2$).
- μ_p = Viscosidad plástica (cp).
- ρ = Densidad del lodo (lb/gal).
- Re = Número de Reynolds (adimensional).
- f = Factor de fricción (adimensional).
- L = Longitud (ft)
- ΔP_a = Caída de presión en el espacio anular (psi).
- ΔP_b = Caída de presión en el interior de la tubería (psi).
- P_{sg} = Presión de surgencia (psi).
- P_{sw} = Presión de suaveo (psi)
- n' = Índice de comportamiento del fluido.
- k' = Índice de consistencia.

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

PROGRAMA
DIAGRAMA DE FLUJO
TUBERIA CERRADA Y
ABIERTA BOMBEANDO



PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

P R O G R A M A

TUBERIA CERRADA Y ABIERTA BOMBEANDO

SIMBOLOS:

TC	Pregunta si la tubería está cerrada.
Q	Gasto.
SAC	Pregunta si está sacando la tubería.
NS	Número de secciones de diferente diámetro.
VT	Velocidad de la tubería.
YP	Punto de cedencia.
VP	Viscosidad plástica.
RO	Densidad del lodo.
G	Contador.
n'	Indice del comportamiento del fluido.
k'	Indice de consistencia.
L	Longitud de la sección.
DH	Diámetro del pozo o interior de la T.R.
DP	Diámetro exterior de la tubería.
DI	Diámetro interior de la tubería.
VAE1	Velocidad en el espacio anular si la tubería está cerrada.
VAE2	Velocidad en el espacio anular si la tubería está abierta y sacando.
VAE3	Velocidad en el espacio anular si la tubería está abierta y metiendo.
FF	Factor de fricción.
NRE	Número de Reynolds.
ΔP	Caída de presión por sección.
P	Presión de suaveo o surgencia, según sea el caso.

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

PROGRAMA
LISTADO
TUBERIA CERRADA Y ABIERTA BOMBEANDO

<pre> 4:PRINT " PRE SIONES DE" 5:PRINT " SU AVEO Y" 6:PRINT " SU RGENCIA" 7:PRINT " " 8:PRINT " " 10: CLEAR 20: INPUT "TC?=" :S# 30: IF S#="SI" THEN 60 40: INPUT "D(FT) /M)="?R 41: PRINT "D(FT) /M)="?R 50: INPUT "SAC=" :S# 60: INPUT "HS="; R 70: INPUT "VT(FT /M)="?C 71: PRINT "VT(FT /M)="?C 80: INPUT "YP="; Y </pre>	<pre> 81:PRINT "YP="; Y 90: INPUT "VP(CP)=?"E 91:PRINT "VP(CP)=?"E 92:K=3.32*LOG ((E+D)/(E+D)) 93:Y=(E+D)*1.06 6/SI100 100: INPUT "RO(LB /GAL)="?F 101: PRINT "RO(LB /GAL)="?F 102: PRINT " " 110: G=1 120: PRINT "DATOS # "G 121: PRINT " " 130: INPUT "L(FT) ="?H 140: INPUT "DH(CP G)="?I 150: INPUT "DP(CP G)="?J 155: INPUT "DI(CP G)="?K </pre>	<pre> 160: IF Q#="SI" THEN 220 170: IF S#="SI" THEN 200 180:K=R*183.34/(I^2-J^2)+((J^2-Z^2)/(I^ 2-J^2)-.45) *G 190: GOTO 230 200:K=R*183.34/(I^2-J^2)-((I^2-Z^2)/(I^ 2-J^2)-.45) *G 210: GOTO 230 220:K=ABS (((J^2 /(I^2-J^2))- .45)*G) 230: PRINT "VEA=" H3 "CFT/M)" 250:K=K/60 260: N=1.86*K*(2- N)*F/(Y*(96/ (I-J)*K) 270: PRINT "REVENO LOS="N 290: N=.00454+.64 5*H^-.7 </pre>	<pre> 291:PRINT "FF="; N 300:G=N*H*K*F/((I-J)*.039^-1) 301:PRINT "DELTA P(PSI)="?G 302:PRINT " " 310: P=P+G; G=G+1 320: IF G>ETHEN 3 39 330: GOTO 120 339: PRINT " " 340: IF Q#="SI" THEN 400 350: IF S#="SI" THEN 380 360: PRINT "PSG(P SI)="?P 370: GOTO 410 380: PRINT "PSN(P SI)="?P 390: GOTO 410 400: PRINT "PSG(P SI)="?P 410: END </pre>
---	---	---	---

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

PROGRAMA

EJEMPLO No. 1

En un pozo con profundidad total de 12,000 ft y perforado con barrera de 12 1/2", se está moviendo una sarta de tubería de revestimiento -- con una zapata flotadora en el fondo, Calcular la presión de surgencia, si se está metiendo tubería cuando ésta se encuentra a 11545 ft.

T.R. 9 5/8" O.D.

Vp = 270 ft/min

Lodo = 14.2 lb/gal : $\gamma_o = 34 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$; $\mu_p = 88 \text{ cp}$

Toda tubería de revestimiento que contenga zapata flotadora en su parte inferior se considera cerrada.

PRESIONES DE
SUAVEO Y
SURGENCIA

VT(FT./M)=270.
YP=34.
VP(CP)=88.
RO(LB/GAL)=14.2

DATOS # 1.

VEA=271.727082(
FT/M)
REYNOLDS=4181.33
2395
FF=6.422085849E-
03

PSG(PSI)=64.6796
7396

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

P R O G R A M A

EJEMPLO No. 2

Con los datos del problema anterior obtener las presiones del suaveo y surgencia. Si se bombean 20 ft/min, la parte más baja de la T.R. está constituida por tubos P110-47 con un diámetro interior de 8.681".

Metiendo tubería

```
PRESIONES DE
SUAVEO Y
SURGENCIA

Q(FT3/10)=20.
VT(FT/10)=270.
YP=34.
VP(CP)=08.
ROCLB(GAL)=14.2

DATOS # 1.

VEA=9.496936864
FT/10
REYNOLDS=70.5944
7238
FF=3.750575058E-
02

PSG(PSI)=13.1315
8701
```

PRESIONES DE SIAVEO Y SURGENCIA

Sacando tuberfa

PRESIONES DE
SIAVEO Y
SURGENCIA

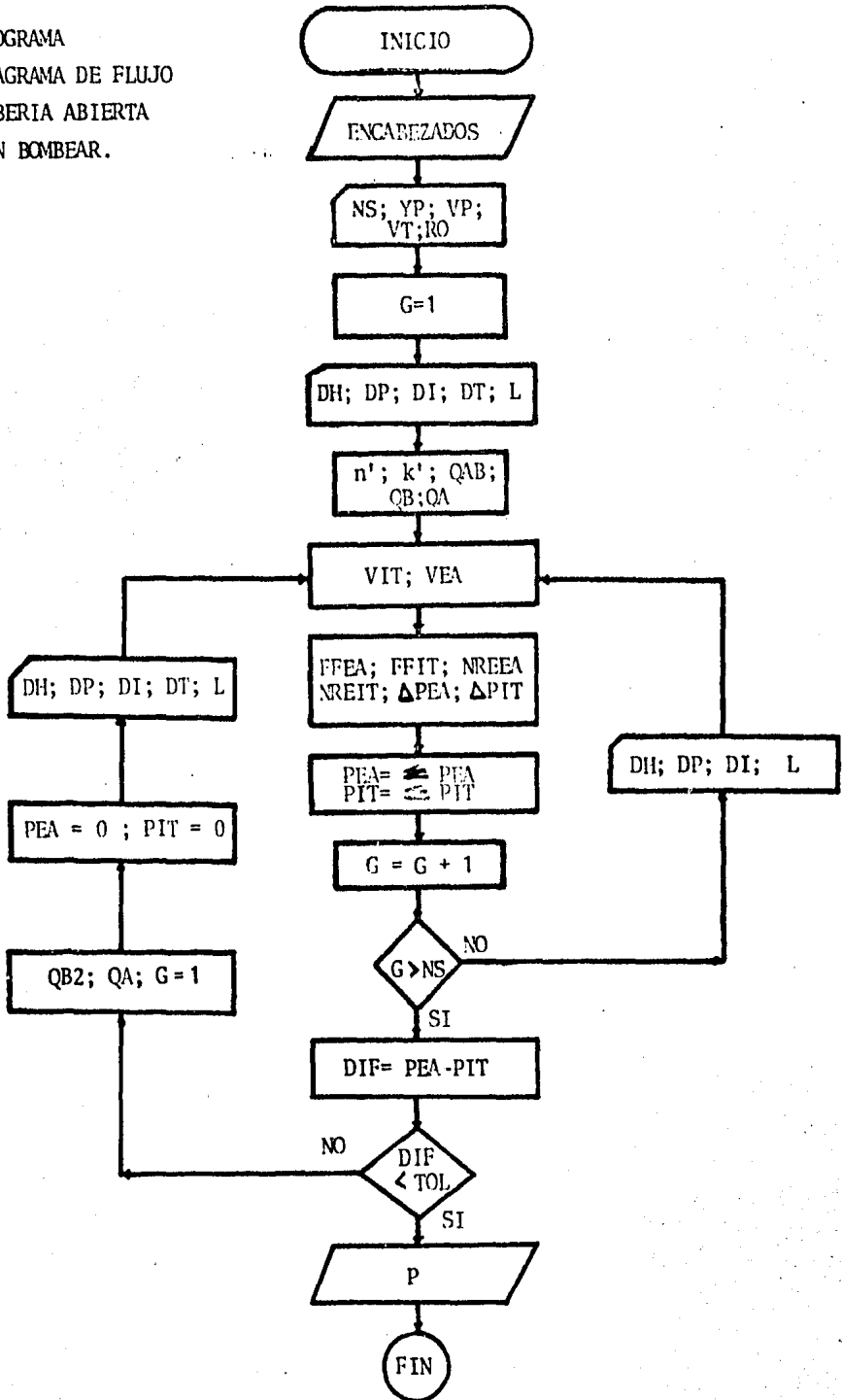
OKFTS/ND=20.
VY(FT/ID)=270.
VP=24.
VP(OCP)=88.
ROCLE/GAL=14.2

DATOS # 1.

VEA=105.7240447K
FT/ID
RFVHELIS=1326.67
9126
FF=0.743621334E-
05

PSM(PSI)=54.2855
5211

PROGRAMA
DIAGRAMA DE FLUJO
TUBERIA ABIERTA
SIN BOMBEAR.



P R O G R A M A

TUBERIA ABIERTA SIN BOMBLEAR

SIMBOLOS:

NS	Número de secciones de diferente geometría.
YP	Punto de cedencia.
VP	Viscosidad plástica.
VT	Velocidad de la tubería.
RO	Densidad del lodo.
G	Contador.
L	Longitud de la sección.
DH	Diámetro del pozo o interior de la T.R.
DP	Diámetro exterior de la tubería.
DI	Diámetro interior de la tubería.
DT	Diámetro del área abierta en el fondo.
n'	Indice de comportamiento del fluido.
k'	Indice de consistencia.
QAB	Gasto total desplazado.
QA	Gasto en el espacio anular.
QB	Gasto en el interior de la tubería.
VIT	Velocidad en el interior de la tubería.
VEA	Velocidad en el espacio anular.
FFEA	Factor de fricción en el espacio anular.
FFIT	Factor de fricción en el interior de la tubería.
NREEA	Número de Reynolds en el espacio anular.
NREIT	Número de Reynolds en el interior de la tubería.
Δ PEA	Caída de presión en el espacio anular para una sección.
Δ PIT	Caída de presión en el interior de la tubería para una sección dada.
PEA	Caída de presión total en el espacio anular.
PIT	Caída de presión total en el interior de la tubería.
QB2	Nueva suposición del gasto en el interior de la tubería.
P	Presión de suaveo y surgencia, según sea el caso.

PRESIONES DE SUAVEO Y SURGENCIA

PROGRAMA

LISTADO

TUBERIA ABIERTA SIN BOMBEAR

4:PRINT " PRE SIGNOS DE"	51:PRINT "VT(FT >N)="I D	160:O=1.864N*(2- N)4E*(Y4*(96/ (H-D))X)	350:L=((T+U)/(2* W))*.5
5:PRINT " SU AVEO Y"	60:INPUT "ROCLB >G)="I E	180:R=.00454+.64 540**-.7	360:U=O:T=O:G=1: GOSUB 800
6:PRINT " SU RGENCIA"	61:PRINT "ROCLB >G)="I E	190:S=F*(R+H)*.0 35*(H-1)	370:GOTO 110
7:PRINT " "	62:PRINT " "	200:T=S+T	378:PRINT " "
8:PRINT " "	70:G=1	230:O=1.864O*(2- N)*E*(Y4*(96/ K)*O)	379:PRINT " "
10:CLEAR	80:GOSUB 800	250:P=.00454+.64 540**-.7	380:PRINT "VEA(F T/S)="I H
20:INPUT "HS=":	85:INPUT "DT(CPG >S)="I Z	260:S=F*(R+H)*.0 35*(H-1)	381:PRINT "OACBL >N)="I M
A	87:(R*(B+C)*1.06 6/51100	270:U=S+U	389:PRINT "PSG(CP SI)="I T
30:INPUT "YP=":	88:(R*(B+C)*1.06 6/51100	280:G=5+1	390:END
B	90:J=N/576*(1+2 -2*2+3+0)	290:IF G>0 THEN 3 20	800:PAUSE "DATOS # "I G
31:PRINT "YP=":	100:L=J*(2+2*(H)*2 -1*(2+2*2))	300:GOSUB 800	810:INPUT "L(FT) ="I F
40:INPUT "VP(CP >S)="I C	110:M=J-L	310:GOTO 120	820:INPUT "DH(CPG >S)="I H
41:PRINT "VP(CP >S)="I C	120:M=ABS (576*M >O)/(H*2-1+2 >>-.45+D)	320:V=ABS (U-T)* 100*U	830:INPUT "DP(CPG >S)="I I
50:INPUT "VT(FT >N)="I D	130:O=576*L*(O+K /2)	330:IF V<12 THEN 3 78	840:INPUT "DI(CPG >S)="I G
	140:N=N+50:O=O/6 3	340:N=O/L*2	850:RETURN

PRESIONES DE SIJAVEO Y SURGENCIA

P R O G R A M A

EJEMPLO No. 3

Dentro de un pozo perforado con barrena de 9 5/8" a 16,000 ft se mueve una T.R. abierta con un diámetro exterior de 7" e interior de 6.276". Encontrar la presión de surgencia a dicha profundidad, sí:

Lodo = 14.2 lb/gal ; $V_D = 34 \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$; $\mu_p = 88 \text{ cp}$
 $V_p = 300 \text{ ft}/\text{min.}$

PRESIONES DE
SUAJEO Y
SURGENCIA

YP=34.
VP(CP)=88.
VT(FT/D)=300.
RO(LB/G)=14.2

VEA(FT/S)=7.5131
56683E-01
QA(EL/D)=42.8628
7294
PSG(PSI)=15.6656
2196

B I B L I O G R A F I A

- 1.- CANNON, GEORGE E.: "Changes in hydrostatic pressure due to with drawing drill pipe from the hole", Drill. and Prod. Pract., API (1934) 42.
- 2.- CLARK, E. H. Jr.: "Bottom hole pressure surges while running pipe", --- ASME Paper No. 54 - PET - 22. Publicado en Pet. Eng. (1955) 27. B-68.
- 3.- MELROSE J.C., Savings, J.G., Foster W.R. and Parrish, E.R.: "A practical utilization of the theory of bingham plastic flow in stationary pipes and annul" Trans., AIME (1958) 213, 316.
- 4.- PRESTON L. MOORE: Drilling Practice Manual, Penn Well Publishing Company, Tulsa, Oklahoma.

CONCLUSIONES

La civilización moderna está basada en buena parte sobre la ingeniería. La mayoría de los productos utilizados para facilitar el trabajo, la comunicación y el transporte, y para brindar sustento, habitación, e incluso la salud, son directa o indirectamente resultado de la ingeniería.

El científico y el ingeniero forman un equipo que marca el paso a la tecnología moderna; en la ciencia está el fundamento sobre el que el ingeniero construye el progreso de la humanidad, en la medida que él contribuye. Con el desarrollo continuado de la ciencia y las muchas aplicaciones de la ingeniería, se puede esperar que mejoren los niveles de vida y - se aumente todavía más la demanda de aquellas cosas que contribuyen al gusto del hombre por lo hermoso y confortable.

En los últimos años la herramienta que ha hecho posible que el avance tecnológico se haya incrementado a pasos desmesurados ha sido la computadora; ésta ha representado el báculo de científicos e ingenieros en la manipulación o alteración del campo físico para obtener productos y servicios, a tal grado, que a la época actual se le denomina la era de las computadoras.

Los ingenieros en ejercicio han sentido, en forma directa, los efectos de la computadora en dos aspectos. Para muchos, se ha traducido en el aprendizaje de nuevas técnicas: métodos numéricos (una rama de las matemáticas que raras veces se aplicaba antes de aparecer las computadoras) y programación en computadora. Para la mayoría ha significado el adquirir otro tipo de conocimientos, como los relativos a la comprensión general de la naturaleza de las computadoras, lo que pueden hacer, sus limitaciones y sus aplicaciones.

En forma indirecta, la computadora ha afectado al ingeniero en ejercicio, de diversas formas. Para unos, se ha convertido en la necesidad de hacer mayor uso de las matemáticas. El uso práctico de técnicas matemáticas era muy limitado por el tiempo que requería para resolver las ecuaciones. Este ostáculo ya ha desaparecido. Ahora se puede aplicar una variedad enorme de técnicas de gran utilidad; la computadora puede realizar la parte tediosa con rapidez y a un costo tolerable.

La capacidad de ahorro de trabajo de la computadora tiene otra ventaja; antes de éstas los ingenieros a menudo se veían forzados a hacer simplificaciones toscas e indeseables en muchos de los modelos matemáticos y simulaciones.

Por lo antes expuesto, queda claro que la computadora está ayudando a utilizar en mejor forma lo que ya se sabe y ha ampliado notablemente la capacidad de logros de los ingenieros, convirtiéndose cada vez más en un recurso indispensable.

Sin embargo, debido a los sistemas económicos prevalescientes en el mundo, se hace una clasificación de los países de acuerdo a sus características económicas. México, al igual que otros países denominados del tercer mundo, presentan un atraso tecnológico con respecto a sus omónimos del primer y segundo bloque. En estos países, es en donde con justificada razón, debe inculcarse en el modo de vida de sus habitantes el uso de la computadora. De lo contrario se exponen a quedar perenemente sumergidos en el retraso y dependencia tecnológica: aspecto básico en el desarrollo de la vida económica de todo país.