

39
24



**Universidad Nacional Autónoma
de México**

Facultad de Ingeniería

**CALCULO HIDRAULICO EN
PERFORACION DE POZOS**

T E S I S

Que para obtener el título de
INGENIERO PETROLERO
p r e s e n t a

PEDRO PALOMARES LOPEZ



**TESIS CON.
FALLA DE ORIGEN**

México, D. F.

1989



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.

I N D I C E

	página
Capítulo 1 "Introducción".	
1.1. Impotencia del sistema hidráulico.	I-1
1.2. Temario.	I-1
1.3. Nomenclatura y unidades.	I-2
Capítulo 2 "Conceptos fundamentales".	
2.1. Definición de reología.	II-1
2.2. Clasificación de los diferentes tipos de flujo.	II-2
2.3. Características reológicas.	II-3
2.4. Determinación de los parámetros reológicos.	II-5
2.5. Ecuaciones reológicas.	II-13
2.6. Modificación de los parámetros reológicos para los fluidos Bingham y ley de Potencia.	II-19
2.7. Atenuación del esfuerzo cortante.	II-21
2.8. Flujo en un espacio anular.	II-22
Capítulo 3 "Selección del modelo reológico".	
3.1. Introducción.	III-1
3.2. Selección del modelo.	III-3
3.3. Determinación de los parámetros reológicos.	III-4
Capítulo 4 "Caídas de presión por fricción".	
4.1. Determinación del tipo de flujo.	IV-1
4.2. Cálculo de las caídas de presión.	IV-4
Capítulo 5 "Variaciones de presión y elevación de recortes".	
5.1. Variaciones de presión durante la introducción o extracción de tubería.	V-1
5.2. Elevación de recortes.	V-8
Capítulo 6 "Potencia hidráulica".	
6.1. Definición y obtención.	VI-1
6.2. El papel de las condiciones hidráulicas.	VI-2
6.3. Optimización de los valores de P_{nw} e I_n .	VI-3
6.4. Determinación del gasto óptimo en base a la distribución óptima de ΔP .	VI-8
6.5. Cálculo de los orificios de la barrena (toberas).	VI-13
6.6. Velocidad de levantamiento del lodo en el espacio anular.	VI-15
6.7. Método práctico para determinar la distribución óptima de la potencia hidráulica a una profundidad determinada.	VI-15

Capítulo 7 "Aplicaciones".

página

7.1. Introducción.	VII-1
7.2. Ejemplo no. 1 (para un fluido Bingham).	VII-2
7.3. Ejemplo no. 2 (para un fluido ley de Potencia).	VII-5
7.4. Desarrollo explícito del ejemplo no. 1.	VII-9
7.5. Desarrollo explícito del ejemplo no. 2.	VII-28
7.6. Conclusiones y recomendaciones.	VII-49

CAPITULO I

Introducción

1.1. Importancia del sistema hidráulico.

El sistema hidráulico juega un papel muy importante durante las operaciones de perforación. Su apropiado diseño y su correcta aplicación puede acelerar el trabajo de la perforación y disminuir el costo total por pozo. De la misma forma, un diseño inadecuado puede disminuir la velocidad de perforación, hacer inadecuada la remoción de los recortes y causar pérdidas económicas.

El sistema hidráulico es propiamente el sistema del fluido dentro del pozo, tanto en condiciones dinámicas como estáticas. El sistema estático ocurre cuando se suspende la circulación del fluido; en forma contraria el estado dinámico ocurre cuando el lodo es puesto en movimiento, es decir la circulación se reanuda.

Entre las funciones y razones más importantes por las cuales se debe hacer un diseño adecuado del sistema hidráulico, destacan las siguientes:

- * Controlar las presiones subsuperficiales.
- * Proporcionar un efecto de flotación a la sarta de perforación y de tubería de revestimiento.
- * Minimizar la erosión de las paredes del pozo, causada por la acción lavadora del lodo durante la circulación del mismo.
- * Remover los recortes del pozo, limpiar la barrena y remover aquellos recortes que se encuentran abajo de la barrena.
- * Incrementar la velocidad de penetración.
- * Controlar las presiones de surgencia, originadas al bajar la tubería dentro del pozo.
- * Minimizar las reducciones de presión en el pozo, provocadas por el efecto de sonda cuando la tubería se extrae a la superficie.
- * Evaluar los incrementos de presión en el pozo, debidos a la circulación del lodo.
- * Diseñar el tamaño apropiado del equipo superficial. Ejemplo las bombas.
- * Mantener el control del pozo cuando ocurra un brote.

1.2. Temario.

Para estudiar el sistema hidráulico de la perforación de un pozo, se consultó diversa bibliografía, entre la cual se encontró el Libro "Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual" de French Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et du Gaz Naturel, Exploitation Commission, Exploitation Laboratoires Sub-Commission, presidida por Raymond Erec (Compagnie Française des Pétroles), editado por GULF PUBLISHING COMPANY División Houston, Texas, Edición 1962. Este Libro presenta el tema con una excelente claridad y permite la aplicación inmediata y sencilla de los procedimientos sugeridos; por tal razón se consideró de gran utilidad para la ingeniería petrolera el estudio, análisis y presentación de los aspectos que contiene.

El presente trabajo se basó en el Libro indicado, dividiendo los temas que se juzgaron de mayor importancia, en la forma siguiente:

(a) El capítulo 2, trata los aspectos fundamentales, referentes a los tipos de fluidos y características de los mismos, utilizados en la perforación de pozos.

(b) En el capítulo 3, se presenta la forma en que se determina la selección de un determinado modelo reológico y la manera de calcular los parámetros característicos de los mismos.

(c) El capítulo 4, muestra el procedimiento para determinar las caídas de presión en toda la trayectoria que sigue el fluido de perforación. Para ello es necesario desarrollar dos pasos:

- 1.- Determinar el tipo de flujo, y
- 2.- Calcular las caídas de presión.

(d) En el capítulo 5 se estudia de una manera detallada algunas de las funciones del sistema hidráulico:

- 1.- Todas aquellas, referentes a la elevación de recortes, y
- 2.- Todas las que se refieren a las variaciones de presión.

(e) Propiamente en el capítulo 6 se presenta la forma en que deben de determinarse los parámetros básicos del cálculo hidráulico.

(f) Finalmente el capítulo 7, muestra algunos ejemplos simplificados, que ilustran de manera global la aplicación de los conceptos vistos en los capítulos anteriores.

1.3. Nomenclatura y unidades.

En este trabajo, básicamente todas las ecuaciones que se utilizan están dadas en el Sistema Internacional de Unidades SI. Sólo en algunos casos se tiene la opción de aplicar el Sistema Inglés de Unidades y un sistema práctico de unidades utilizado por organizaciones francesas; a este último se le ha denominado "otras unidades".

La tabla A, muestra la simbología de una lista de variables que

exclusivamente manejan el Sistema Internacional de Unidades.

La tabla B, muestra la simbología de una lista de variables complementarias (algunas ya están especificadas en la tabla A), las cuales manejan además del Sistema Internacional de Unidades, el Sistema Inglés de Unidades y el sistema práctico de unidades, utilizado por organizaciones francesas.

Como un complemento se incluye la tabla C, la cual muestra una lista de factores de conversión.

TABLA A

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSION	UNIDADES
A	Area total de toberas.	L^2	m^2
A_v	Velocidad de perforación.	LT^{-1}	m/s
C_r	Coefficiente de resistencia (asentamiento).		
D	Diámetro interior de la sarta de perforación.	L	m
D_i	Diámetro interior del espacio anular (diámetro exterior de la sarta de perforación).	L	m
D_o	Diámetro exterior del espacio anular.	L	m
f	Factor de fricción.		
g	Aceleración de la gravedad.	LT^{-2}	m/s^2 (9.81)
g_t	Esfuerzo gel a un tiempo t.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
I _r	Impacto hidráulico.	MLT^{-2}	N (Newton)
K	Índice de consistencia.	$ML^{-1}T^{-2}$	$Pa \cdot s^n$
L	Longitud.	L	m
n	Índice de comportamiento de flujo.		
P	presión.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
P_h	Presión hidrostática.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
P_d	Presión de descarga.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
P_s	Presión de servicio.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
-			
P	Potencia.	ML^2T^{-3}	W (Watt)
-			
P_h	Potencia hidráulica.	ML^2T^{-3}	W
-			
P_{hc}	Potencia hidráulica para el circuito del lodo, excepto barrena.	ML^2T^{-3}	W
-			
P_{hw}	Potencia hidráulica para la barrena.	ML^2T^{-3}	W
-			
P_{hd}	Máxima potencia hidráulica disponible.	ML^2T^{-3}	W
Q	Gasto.	LT^{-1}	m^3/s
Q_c	Gasto crítico.	L^3T^{-1}	m^3/s
Q_m	Mínimo gasto para levantar los recortes.	L^3T^{-1}	m^3/s

T A B L A A (final)

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSION	UNIDADES
Q_m	Máximo gasto en la presión Ps.	$L^3 T^{-1}$	m^3/s
Re	Número de Reynolds.		
Re_c	Número de Reynolds crítico.		
Re_m	Número de Reynolds para la caída de una partícula.		
V	Volumen de un recorte.	L^3	m^3
V	Velocidad del fluido (lodo).	LT^{-1}	m/s
V_a	Velocidad del lodo en el espacio anular	LT^{-1}	m/s
V_c	Velocidad crítica del fluido.	LT^{-1}	m/s
V_l	Velocidad de levantamiento de los recortes.	LT^{-1}	m/s
V_r	Velocidad de resbalamiento de los recortes.	LT^{-1}	m/s
$\dot{\gamma}$	Velocidad de corte.	T^{-1}	$1/s$
ΔP	Pérdidas de presión.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
ΔP_m	Pérdidas de presión en el espacio anular.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
ΔP_c	Pérdidas de presión en todo el circuito del lodo, excepto en la barrena (toberas).	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
ΔP_r	Pérdidas de presión en la barrena.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
ΔP_l	Máximas pérdidas de presión, permisibles para todo el circuito.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
μ	Viscosidad dinámica.	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa.s
μ_a	Viscosidad aparente.	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa.s
μ_e	Viscosidad equivalente.	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa.s
μ_p	Viscosidad plástica.	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa.s
ρ	Densidad.	ML^{-3}	Kg_m/m^3
ρ_l	Densidad del fluido.	ML^{-3}	Kg_m/m^3
ρ_m	Densidad de los recortes.	ML^{-3}	Kg_m/m^3
τ	Esfuerzo de corte.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
τ_c	Punto de cedencia.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
Σ_m	Diámetro equivalente del espacio anular.	L	m
Σ_r	Diámetro hidráulico.	L	m
Σ_p	Diámetro equivalente del recorte.	L	m

T A B L A B

SIMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSION	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS
A	Area total de toberas.	L^2	m^2	pg^2
a_p	Aceleración de la sarta de perforación.	LT^{-2}	m/s^2	pie/s^2
AV	Velocidad de perforación.	LT^{-1}	m/s	pie/h
C_w	Coefficiente de toberas.			
C_r	Coefficiente de resistencia (asentamiento).			
d	Diámetro de los recortes cilíndricos.	L	m	Pg
D	Diámetro interior de la sarta de perforación.	L	m	Pg
D_p	Diámetro del pozo.	L	m	Pg
D_i	Diámetro interior del espacio anular (diámetro exterior de la sarta de perforación).	L	m	Pg
D_o	Diámetro exterior del espacio anular.	L	m	Pg
g	Aceleración de la gravedad.	LT^{-2}	$m/s^2 (9.81)$	$pie/s^2 (32.2)$
g_t	Esfuerzo gel a un tiempo t.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	$lb./100 pie^2$
h	Espesor de los recortes cilíndricos.	L	m	Pg
I_h	Impacto hidráulico.	MLT^{-2}	N (Newton)	lb.
K	Indice de consistencia.	$ML^{-1}T^{-2}$	$Pa.s^2$	$lb.s^2/100pie^2$
L	Longitud.	L	m	pie
n	Indice de comportamiento de flujo.			
P_s	Presión hidrostática.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	$lb./pg^2$
P_d	Presión de descarga.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	$lg./pg^2$
P_r	Presión de surgencia o sondeo, debida a los movimientos de tubería (introducción o extracción).	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	$lb./pg^2$
P_w	Presión de servicio.	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	$lb./pg^2$
P_h	Potencia hidráulica.	ML^2T^{-3}	W	HP
P_{h1}	Máxima potencia hidráulica disponible.	ML^2T^{-3}	W	HP
Q	Gasto.	L^3T^{-1}	m^3/s	galón/min
Q_c	Gasto crítico.	L^3T^{-1}	m^3/s	galón/min
Q_1	Máximo gasto para el cual no hay erosión.	L^3T^{-1}	m^3/s	galón/min
Q_m	Mínimo gasto para levantar los recortes.	L^3T^{-1}	m^3/s	galón/min

T A B L A E (cont.)

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSION	UNIDADES SI	UNIDADES INGLÉSAS
Re	Número de Reynolds.			
Re _c	Número de Reynolds para la caída de una partícula.			
v	Velocidad del fluido (lodo).	LT ⁻¹	m/s	pie/min
V _c	Velocidad crítica del fluido.	LT ⁻¹	m/s	pie/min
V _m	Velocidad equivalente de desplazamiento del lodo durante el movimiento de tubería.	LT ⁻¹	m/s	pie/min
V _{mcr}	Máxima velocidad de desplazamiento del lodo, para el caso de una sarta cerrada.	LT ⁻¹	m/s	pie/min
V _{mco}	Máxima velocidad de desplazamiento del lodo, para el caso de una sarta abierta con un llenado total.	LT ⁻¹	m/r	pie/min
V _{is}	Velocidad de introducción de la sarta de perforación.	LT ⁻¹	m/s	pie/min
V _l	Velocidad de levantamiento de los recortes.	LT ⁻¹	m/s	pie/min
V _u	Velocidad de resbalamiento de los recortes.	LT ⁻¹	m/s	pie/min
v _c	Velocidad de corte.	T ⁻¹	1/s	1/s
ΔP _a	Pérdidas de presión en el espacio anular.	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa	lb _r /pg ²
ΔP _b	Pérdidas de presión en la barrera.	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa	lb _r /pg ²
ΔP _i	Variaciones de presión provocadas por los efectos inerciales (sarta cerrada).	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa	lb _r /pg ²
ΔP _j	Pérdidas de presión en el interior de la sarta.	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa	lb _r /pg ²
ΔP _s	Variaciones de presión provocadas por los efectos inerciales (sarta abierta).	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa	lb _r /pg ²
ΔP _u	Pérdidas de presión en superficie.	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa	lb _r /pg ²
μ	Viscosidad dinámica.	ML ⁻¹ T ⁻¹	Pa.s	centipoise
μ _e	Viscosidad equivalente	ML ⁻¹ T ⁻¹	Pa.s	centipoise
μ _p	Viscosidad plástica.	ML ⁻¹ T ⁻¹	Pa.s	centipoise
ρ _s	Densidad del lodo.	ML ⁻³	Kg _m /m ³	lb _m /galón
ρ _r	Densidad del lodo incluyendo los recortes.	ML ⁻³	Kg _m /m ³	lb _m /galón
ρ _l	Densidad de los recortes.	ML ⁻³	Kg _m /m ³	lb _m /galón
ρ ^l	Densidad equivalente de circulación.	ML ⁻³	Kg _m /m ³	lb _m /galón
τ _c	Esfuerzo de corte que resulta del asentamiento de los recortes.	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa	lb _r /100pie ²
τ _o	Punto de cedencia.	ML ⁻¹ T ⁻²	Pa	lb _r /100pie ²
δ _r	Diámetro equivalente del recorte.	L	m	pg

T A B L A B (cont.)

SIMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSION	OTRAS UNIDADES
A	Area total de toberas.	L^2	pg^2
A_p	Aceleración de la sarta de perforación.	LT^{-2}	m/s^2
A_v	Velocidad de perforación.	LT^{-1}	m/h
C_w	Coefficiente de toberas.		
C_r	Coefficiente de resistencia (asentamiento).		
d	Diámetro de los recortes cilíndricos.	L	mm
D	Diámetro interior de la sarta de perforación.	L	pg
D_p	Diámetro del pozo.	L	pg
D_i	Diámetro interior del espacio anular (diámetro exterior de la sarta de perforación).	L	pg
D_o	Diámetro exterior del espacio anular.	L	pg
g	Aceleración de la gravedad.	LT^{-2}	$cm/s^2(981)$
g_t	Esfuerzo gel a un tiempo t.	$ML^{-1}T^{-2}$	$lb./100\text{pie}^2$
h	Espesor de los recortes cilíndricos.	L	mm
I_h	Impacto hidráulico.	MLT^{-2}	Kgr
K	Índice de consistencia.	$ML^{-1}T^{-2}$	$lb./s^2/100\text{pie}^2$
L	Longitud.	L	m
n	Índice de comportamiento de flujo.		
P_s	Presión hidrostática.	$ML^{-1}T^{-2}$	bar
P_d	Presión de descarga.	$ML^{-1}T^{-2}$	bar
P_r	Presión de surgencia o sondeo, debida a los movimientos de tubería (introducción o extracción).	$ML^{-1}T^{-2}$	bar
P_s	Presión de servicio.	$ML^{-1}T^{-2}$	bar
P_h	Potencia hidráulica.	ML^2T^{-3}	
P_{h1}	Máxima potencia hidráulica disponible.	ML^2T^{-3}	
Q	Gasto.	L^3T^{-1}	l/min
Q_c	Gasto crítico.	L^3T^{-1}	l/min
Q_1	Máximo gasto para el cual no hay erosión.	L^3T^{-1}	l/min
Q_m	Mínimo gasto para levantar los recortes.	L^3T^{-1}	l/min

T A B L A B (final)

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSION	OTRAS UNIDADES
Re	Número de Reynolds.		
Re _c	Número de Reynolds para la caída de una partícula.		
V	Velocidad del fluido (lodo).	LT ⁻¹	m/min
V _c	Velocidad crítica del fluido.	LT ⁻¹	m/min
V _m	Velocidad equivalente de desplazamiento del lodo durante el movimiento de tubería.	LT ⁻¹	m/min
V _{m1}	Máxima velocidad de desplazamiento del lodo, para el caso de una sarta cerrada.	LT ⁻¹	m/min
V _{m2}	Máxima velocidad de desplazamiento del lodo, para el caso de una sarta abierta con un llenado total.	LT ⁻¹	m/min
V _p	Velocidad de introducción de la sarta de perforación.	LT ⁻¹	m/min
V _r	Velocidad de levantamiento de los recortes.	LT ⁻¹	m/min
V _s	Velocidad de resbalamiento de los recortes.	LT ⁻¹	m/min
V _c	Velocidad de corte.	T ⁻¹	1/s
ΔP _a	Pérdidas de presión en el espacio anular.	ML ⁻¹ T ⁻²	bar
ΔP _b	Pérdidas de presión en la barrena.	ML ⁻¹ T ⁻²	bar
ΔP _c	Variaciones de presión provocadas por los efectos inerciales (sarta cerrada).	ML ⁻¹ T ⁻²	bar
ΔP _d	Pérdidas de presión en el interior de la sarta.	ML ⁻¹ T ⁻²	bar
ΔP _e	Variaciones de presión provocadas por los efectos inerciales (sarta abierta).	ML ⁻¹ T ⁻²	bar
ΔP _f	Pérdidas de presión en superficie.	ML ⁻¹ T ⁻²	bar
μ	Viscosidad dinámica.	ML ⁻¹ T ⁻¹	centipoise
μ _e	Viscosidad equivalente.	ML ⁻¹ T ⁻¹	centipoise
μ _p	Viscosidad plástica.	ML ⁻¹ T ⁻¹	centipoise
ρ _l	Densidad del lodo.	ML ⁻³	Kg _m /dm ³
ρ _s	Densidad del lodo incluyendo los recortes.	ML ⁻³	Kg _m /dm ³
ρ _r	Densidad de los recortes.	ML ⁻³	Kg _m /dm ³
ρ _l	Densidad equivalente de circulación.	ML ⁻³	Kg _m /dm ³
τ _c	Esfuerzo de corte que resulta al asentamiento de los recortes.	ML ⁻¹ T ⁻²	lb _r /100pie ²
τ _o	Punto de cedencia.	ML ⁻¹ T ⁻²	lb _r /100pie ²
φ _e	Diámetro equivalente del recorte.	L	mm

T A B L A C

Factores de conversión de unidades

	PARA OBTENER EL NUMERO DE	MULTIPLIQUE EL NUMERO DE	POR
0.03937	mm	pulgada (pg)	25.4
3.28084	m	pie	0.3048
0.155	cm ²	pg ²	6.45163
196.8504	m/s	pie/minuto (pie/min)	5.03 10 ⁻³
11 811.02	m/s	pie/hora (pie/h)	3.46667 10 ⁻³
60 000	m ³ /s	litro/minuto (l/min)	1.6667 10 ⁻³
15 850.37	m ³ /s	galón/minuto	6.309 10 ⁻³
8.3452 10 ⁻³	Kgm/m ³	lbm/galón	119.829
0.1020	Newton (N)	Kg	9.807
0.22481	N	lb	4.4482
10 ⁻³	Pascal (Pa)	bar	10 ³
1.4504 10 ⁻⁴	Pa	lb./pg ² (psi)	6 894.7
2.03784	Pa	lb./100 pg ²	0.478964
1 000	Pascal.segundo (Pa.s)	centipoise (cP)	10 ⁻³
1.341 10 ⁻³	Watt (W)	caballo fuerza (HP)	745.7
POR	MULTIPLIQUE EL NUMERO DE	PARA OBTENER EL NUMERO DE	

CAPITULO 2

Conceptos Fundamentales

2.1 Definición de reología.

La reología es la ciencia que estudia la deformación de los materiales, en el caso de que estos sean sólidos; o de sus flujos en el caso de que sean líquidos, cuando se les aplica una fuerza.

En el caso de los sólidos, existen dos tipos de deformaciones:

(a) Elástica.- Esta ocurre cuando el material regresa a sus condiciones originales, tan pronto como la fuerza es retirada. Un cuerpo que se comporta de esta manera, es por ejemplo una liga.

(b) Plástica.- Esta se presenta en aquellos cuerpos, que necesariamente se les debe de aplicar otras fuerzas para que regresen a sus condiciones originales, tal ocurre por ejemplo con una bola de mastiche.

En el caso de los líquidos, la fuerza aplicada induce un flujo.

2.2. Clasificación de los diferentes tipos de flujos.

Existen varios tipos de flujos:

(a) Flujo estable o permanente.- Se considera cuando las condiciones de flujo no varían con el tiempo y puede presentarse como:

(i) Flujo laminar.- En este tipo de flujo, el fluido se divide en capas laminares, las cuales se desplazan paralelas a la dirección de flujo y cada una moviéndose a una velocidad específica. Como se puede observar en la figura 1, la velocidad es mayor en la parte central del conducto (eje longitudinal) y va disminuyendo gradualmente a medida que el fluido se aproxima a la pared del conducto, hasta alcanzar el valor de cero en la pared del mismo, debido a la falta de resbalamiento.

(ii) Flujo turbulento.- Este se caracteriza porque se forman pequeñas corrientes en todo el volumen de fluido (fig. 2).

(iii) Flujo tapon.- Este tipo de flujo no es muy común y se caracteriza porque el fluido se mueve a lo largo del eje del tubo a una velocidad constante (como si fuera un tapón), independientemente de la distancia que haya al eje del tubo (fig. 3). Algunas suspensiones de bentonita presentan dicho comportamiento.

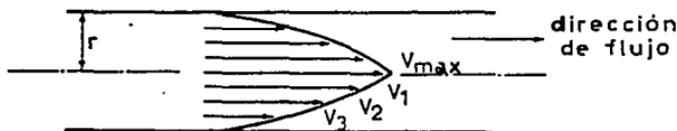


Fig. 1. - Flujo laminar.

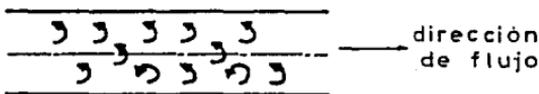


Fig. 2. - Flujo turbulento.



Fig.3. - Flujo tapón.

(b) Flujo transitorio.- Este tipo de flujo ocurre justamente después de que las condiciones de flujo han sido modificadas, \sqrt{V} continúa mientras no se establezcan las nuevas condiciones permanentes de flujo. Se pueden citar algunas circunstancias por las cuales ocurre:

- (i) Iniciación del flujo.
- (ii) Cambio en la velocidad de flujo.
- (iii) Ensanchamiento o estrechamiento de la sección transversal del conducto, etc..

(c) Cambio de tipo de flujo, dependiendo de la velocidad promedio.

Las siguientes situaciones pueden ocurrir, dependiendo de la velocidad de flujo promedio V con la que fluye un determinado fluido a través de un conducto cilíndrico recto de dimensiones dadas:

(i) En la ausencia de flujo tapón, como el que se ilustra en la Figura 4.

(ii) En la presencia de flujo tapón, como el que se ilustra en la Figura 5.

Aquí, V_1 es la velocidad crítica para la cual termina el flujo laminar, y V_2 es la velocidad crítica para un incipiente flujo turbulento.

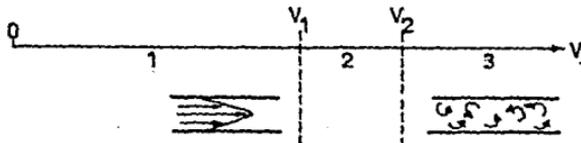


Fig. 4. - Cambio de tipo de flujo.

1. Flujo laminar (estable).
2. Zona de flujo laminar - turbulento (transitorio).
3. Flujo turbulento (promedialmente estable).

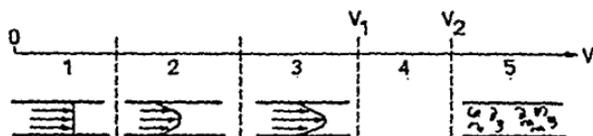


Fig. 5. - Cambio de tipo de flujo.

1. Flujo tapón (estable).
2. Disminución del espesamiento de la muestra con el incremento de V (transitorio).
3. Flujo laminar (estable).
4. Flujo laminar - turbulento (zona de transición).
5. Flujo turbulento (promedialmente estable).

2.3. Características reológicas.

A una determinada presión y temperatura, los fluidos se caracterizan por:

A. Su comportamiento bajo condiciones transitorias, así como por sus tiempos de respuesta que manifiestan al cambiar las condiciones de flujo.

B. Su comportamiento en flujo laminar, caracterizado por su curva de flujo experimental o reograma. Dicha curva se representa mediante una ecuación de flujo, cuyos coeficientes son los parámetros reológicos, los cuales a su vez son específicos para cada fluido en particular.

Si el flujo es laminar, la ecuación de flujo relaciona el esfuerzo de corte τ con la velocidad de corte $\dot{\gamma}$. Para cada fluido, estos varían con la temperatura y la presión.

Anteriormente se señaló, que en flujo laminar el fluido se corta en capas laminares, paralelas a la dirección de flujo, y cada capa moviéndose a una velocidad específica. De acuerdo a lo anterior se puede definir:

(a) Una velocidad de corte tal que

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = \frac{\text{Diferencia de velocidad entre dos capas adyacentes}}{\text{distancia entre las dos capas}} \quad (1)$$

La ecuación dimensional de $\dot{\gamma}$ es

$$\frac{LT^{-1}}{L} = T^{-1}$$

es decir, la dimensión de $\dot{\gamma}$ es el inverso del tiempo (s^{-1} ó $1/s$).

(b) Un esfuerzo de corte, el cual es una fuerza por unidad de área de la capa laminar que está induciendo el corte.

La ecuación dimensional de τ es

$$\frac{MLT^{-2}}{L^2} = ML^{-1}T^{-2}$$

es decir, tiene dimensiones de presión. Generalmente se expresa en $lb_{f}/100 \text{ pie}^2$ o, en el Sistema Internacional de Unidades (SI) en pascuales (Pa).

Para una velocidad de corte determinada, la viscosidad aparente μ_a se define como:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

donde τ es el esfuerzo de corte por el cual se da $\dot{\gamma}$.

La ecuación dimensional de μ_a es

$$\frac{ML^{-1}T^{-2}}{T^{-1}} = ML^{-1}T^{-1}$$

es decir, tiene las dimensiones de viscosidad.

En el sistema SI, μ se expresa en pascal-segundo (Pa . s). La unidad generalmente empleada es un submultiplo de esta, el milipascal-segundo (mPa . s). Este a su vez es igual a un centipoise (cP).

C. Su comportamiento en reposo, el cual para fluidos tixotrópicos, se manifiesta mediante la formación de un gel después de un cierto período de tiempo.

Un fluido es tixotrópico si:

- (a) Al ser agitado y dejado en reposo forma un gel.
- (b) Al ser agitado nuevamente vuelve a su condición original.

Para una temperatura y presión constantes, el comportamiento tixotrópico es reversible.

2.4. Determinación de los parámetros reológicos.

Los siguientes instrumentos se utilizan en el campo :

- (a) El viscosímetro embudo Marsh.
- (b) El viscosímetro Fann.

2.4.1. El viscosímetro embudo Marsh (fig. 6).

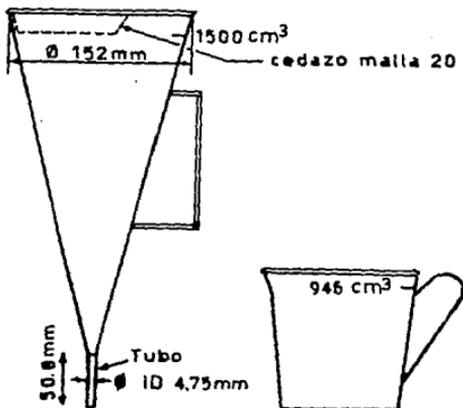


Fig. 6. - Viscosímetro embudo Marsh.

2.4.1.1. Principio.

Este es un instrumento tipo-estático. La variable medida es el tiempo, en segundos, requerido para que una cantidad dada de lodo pase a través del tubo del instrumento; el tiempo de escurrimiento es simplemente una estandarización del embudo.

2.4.1.2. Procedimiento.

Tome el embudo en sus manos y tape el extremo del orificio con su dedo. Vacíe el lodo a través del cedazo, hasta que el nivel del lodo este razante con el cedazo; a este nivel corresponde un volumen de 1500cm^3 .

Sosteniendo el embudo de la aza, presione un cronómetro y permita que el lodo fluya dentro de una copa graduada. Presione nuevamente el cronómetro, cuando 346cm^3 ($1/4$ de galón) estén colectados en la copa graduada. El número de segundos marcados en el cronómetro es la viscosidad Marsh del lodo.

Por otro lado debe tomarse en cuenta, que el método no es tan rígido, ya que 1000 cm³ ó 500 cm³ de lodo pueden colectarse, o de otro modo el embudo se llena con 500 cm³ y se determina el tiempo requerido para vaciar el embudo. Sin embargo, el procedimiento estándar es como el indicado anteriormente. Si otra variante se emplea, tanto el volumen de lodo vertido dentro del embudo, como el volumen colectado en la copa deben reportarse.

2.4.1.3. Calibración.

El instrumento se calibra con agua pura. Los tiempos encontrados de esta manera se muestran en la Tabla I.

TABLA I

VOLUMEN DE AGUA		TIEMPO DE ESCURRIMIENTO (segundos para 20 ± 1 °C)
cm ³ en el embudo	cm ³ colectados	
1 500	946 (¼ de galon)	26 ± 1
1 500	1 000	28 ± 1
1 500	500	14

2.4.1.4. Fuentes de error.

Los errores más comunes se deben a:

- Errores cometidos en la calibración del instrumento.
- Extremo del orificio bloqueado por enjarre o lodo tamizado imperfectamente.
- Demasiado tiempo fué dejado pasar, desde el momento en que el embudo fue llenado y el momento inicial de escurrimiento (el gel en el lodo pudo haberse formado, extendiéndose así el tiempo de escurrimiento).
- Errores de apreciación al leer el tiempo escurrimiento; un cronómetro debe utilizarse.

2.4.2. El viscosímetro Fann (fig. 7).

2.4.2.1. Principio.

Este instrumento es del tipo cilindro-coaxial rotacional. Constan de:

- Todos tienen dos velocidades de rotación (600 y 300 rpm). Los hay en dos clases:

- (i) Rotor operado manualmente (viscosímetro de manivela).
 (ii) Rotor operado mediante un motor eléctrico (viscosímetro operado por motor).

(b) O seis velocidades de rotación (600,300,200,100,6 y 3 rpm). En este caso únicamente hay aquellos cuyo rotor se opera mediante un motor eléctrico.

Tanto las dimensiones del cilindro del rotor, como las del bulbo vienen especificadas en el API RP 13B.

El esfuerzo de corte (escala de la lectura) se determina como una función de la velocidad de corte (a partir de la velocidad de rotación).

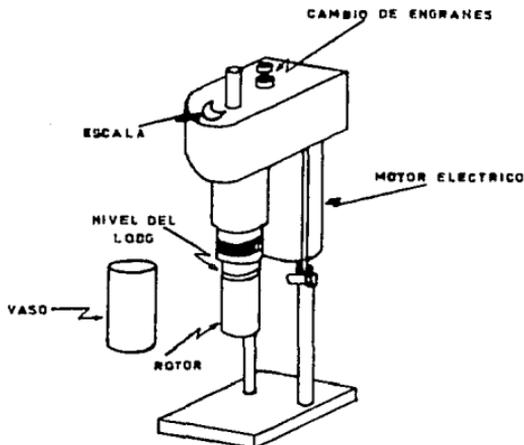


Fig. 7. - Viscosímetro Fann.

2.4.2.2. Ecuaciones a utilizarse con viscosímetros cilindro-coaxial rotacionales.

Se introducirán los siguientes símbolos:

- r_i = radio del cilindro interior (mm),
 r_o = radio del cilindro exterior (mm),
 h = altura de inmersión del cilindro (mm),

C = torsión que actúa en el cilindro interior (Newton . m),
 Ω = velocidad angular del rotor (rpm), definida por

$$\Omega = \frac{2\pi N}{60}$$

donde N es la velocidad de rotación en rpm

El esfuerzo de corte que actúa en la pared del cilindro interior, queda definido por la ecuación:

$$\tau_i = \frac{C}{2\pi r_i^2 (h + \epsilon)} \quad (3)$$

donde ϵ es un término de corrección (tiene dimensión de longitud), introducido para tomar en cuenta los efectos finales.

La velocidad de corte, que actúa en la pared del cilindro interior es:

$$v_i = \frac{2\Omega}{1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2} = \frac{4\pi N}{60 \left[1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2 \right]} \quad (4)$$

si $\frac{r_i}{r_o} > 0.9$.

2.4.2.3. Aplicación para el viscosímetro Fann.

El instrumento tiene las siguientes dimensiones:

$$\begin{aligned} r_o &= 18.42 \text{ mm} \\ r_i &= 17.25 \text{ mm} \\ h &= 38.00 \text{ mm} \end{aligned}$$

La torsión, proporcional a la deflexión de la escala, está definida por:

$$C = k\theta$$

donde θ es la lectura de la escala, y k la constante del resorte.

Para la mayoría de los resortes

$$k = 3.87 \times 10^{-4} \quad (\text{N . m / unidad de la escala}).$$

donde:

N = Newton, y

m = metro.

Con la información anterior, ya se pueden derivar las ecuaciones generales:

a. Esfuerzo de corte τ .

(a) En unidades SI (τ , en pascuales):

$$\tau_1 = \frac{k\theta}{2\pi r_1^2(h+\epsilon)} = 0.51\theta \quad (5)$$

(b) En unidades del sistema inglés (τ , en lb \dots /100 pie²):

$$\tau_1 = \theta \quad (5')$$

para cuando

$$\frac{k}{2\pi r_1^2(h+\epsilon)} = 1$$

b. Velocidad de corte $\dot{\gamma}_1$.

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{4\pi N}{60 \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_w} \right)^2 \right]} = 1.7N \quad (6)$$

La tabla siguiente muestra la relación entre N y $\dot{\gamma}_1$.

N (rpm)	600	300	200	100	6	3
$\dot{\gamma}_1$ (s ⁻¹)	1 020	510	340	170	10	5

2.4.2.4. Procedimiento.

El lodo se pasa a través de la malla del embudo Marsh, después de haberse agitado previamente durante 5 minutos, y es entonces vertido dentro del recipiente del viscosímetro.

Los cilindros coaxiales son sumergidos (para tal efecto el instrumento cuenta con un patín y una cremallera) hasta que la marca de referencia del rotor coincida con la superficie del lodo.

El rotor se pone a funcionar a 600 rpm (colocando apropiadamente el selector de velocidad y el interruptor) y se lee la deflexión de la escala.

Sin parar el rotor, se ajusta la velocidad de rotación de 300 rpm, y se lee nuevamente la deflexión de la escala.

Este procedimiento se repite para otras velocidades de rotación. Es importante aclarar dos aspectos:

(a) El viscosímetro prácticamente no requiere calibración. Sin embargo si se descara calibrar el aparato, se puede hacer funcionar con soluciones acuosas de glicerol de viscosidades conocidas. La curva de flujo se grafica en coordenadas (cartesianas, con las velocidades de rotación en el eje de las abscisas, y las deflexiones de la escala en el eje de las ordenadas. La gráfica que debe resultar es una línea recta que pasa a través del origen, debido a que las soluciones de glicerol son líquidos Newtonianos.

(b) El rotor y el estator están diseñados de una forma tal, para que los efectos por energía cinética sean eliminados; y por lo tanto la densidad de la muestra no afecta los resultados.

2.4.2.5. Determinación de la viscosidad aparente.

La viscosidad aparente, μ_a , se debe determinar tanto para los fluidos de perforación, como para las lechadas de cemento, de acuerdo con el procedimiento estandar del API RP 13B, para una velocidad de corte de 1020 s^{-1} , la cual corresponde a una velocidad de rotación de 600 rpm. Si μ_a se expresa en pascal-segundo, se obtiene por combinación de las ecuaciones 2, 5 y 6:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{0.510_{\text{DPO}}}{1020} \quad (7)$$

Si μ_a se expresa en centipoises (un Pascal-segundo es igual a 1000 cp), se tiene:

$$\mu_a = 0.50_{\text{DPO}} = \frac{\text{Lectura del Fann a 600 rpm}}{2} \quad (8)$$

2.4.2.6. Determinación de la tixotropía.

La tixotropía puede estimarse observando los cambios en el esfuerzo que ocurre en un gel, como una función del tiempo.

Conforme al API RP 13B, dos valores - el esfuerzo gel de 10 segundos (G_{10}) y el esfuerzo gel de 10 minutos (G_{10}) - son determinados en un viscosímetro Fann de dos velocidades. El siguiente procedimiento se emplea:

(a) EL rotor se pone en movimiento a 600 rpm, durante 30 segundos después de los cuales el motor es parado y la pequeña perilla estriada superior se coloca en su posición intermedia.

(b) Se dejan transcurrir 10 segundos y posteriormente la perilla estriada grande, la cual está colocada encima del instrumento, se gira lentamente con la mano, en dirección contraria a las manecillas del reloj, hasta cerca de las 3 rpm.

(c) La máxima deflexión de la escala se anota. Este valor

corresponde al esfuerzo gel inicial en lb/100 pie²

(d) Se permite transcurrir un periodo de 10 minutos, sin alterar el lodo, y la operación se repite. La máxima deflexión de la escala es igual al esfuerzo gel para 10 minutos, en lb/100 pie².

Si el viscosímetro Fann de seis-velocidades se utiliza, el procedimiento es similar, pero la velocidad de 3 rpm se utiliza en lugar de girar manualmente el rotor

2.4. Ecuaciones reológicas.

2.5.1. Fluidos Newtonianos.

El esfuerzo de corte de los fluidos Newtonianos es directamente proporcional a la velocidad de corte: si una variable se duplica, la otra también se duplica. La ecuación reológica es:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (9)$$

La representación gráfica en coordenadas Cartesianas (fig. 8) es una línea recta que pasa a través del origen.

El fluido empieza a moverse tan pronto como se le aplique una fuerza diferente de cero. Ejemplos de tales fluidos son el agua y la gasolina.

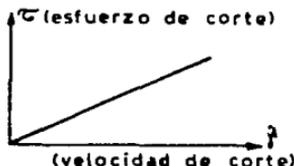


Fig. 8

En el caso de los fluidos Newtonianos, la relación $\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ (viscosidad) es constante a una determinada presión y temperatura.

2.5.2. Fluidos No-Newtonianos.

Únicamente se verán dos tipos de fluidos no-Newtonianos, los cuales generalmente son encontrados en los lodos de perforación y lechadas de cemento:

- (a) Fluidos Bingham.
- (b) Fluidos ley de potencia.

2.5.2.1. Fluidos Bingham.

A. Definición y curva típica.

En los fluidos plásticos de Bingham, el esfuerzo de corte también varía linealmente con la velocidad de corte, pero a diferencia de los fluidos Newtonianos, una mínima fuerza debe aplicarse para impartirles

movimiento. Esta fuerza se conoce como el punto de cedencia o valor de cedencia.

Tales fluidos se caracterizan por dos constantes:

(a) Punto de cedencia o valor de cedencia τ_0 , el cual corresponde a la mínima fuerza requerida para poner en movimiento al fluido.

(b) Viscosidad plástica, μ_p , la cual es una relación entre el incremento en el esfuerzo de corte y el correspondiente incremento en la velocidad de corte, es decir, se trata de la pendiente de la curva que se obtiene al graficar τ como una función de $\dot{\gamma}$.

La ecuación teórica de flujo de tales fluidos es:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (10)$$

La gráfica que se obtiene en coordenadas Cartesianas, es una línea recta (fig. 9).

Las curvas experimentales que se obtienen con un viscosímetro cilindro-coaxial rotacional no son rectilíneas estrictamente, sino más bien como la que se muestra en la Figura 10.

B. Determinación de la viscosidad plástica μ_p y del punto de cedencia τ_0 .

Estas determinaciones se llevan a cabo en un viscosímetro Fann, de acuerdo al API RP 13B. Los valores a determinarse son el esfuerzo de corte τ_{1020} , a la velocidad de corte $\dot{\gamma}_2 = 1020 \text{ s}^{-1}$ (a 600 rpm), y el esfuerzo de corte τ_{510} , a la velocidad de corte $\dot{\gamma}_1 = 510 \text{ s}^{-1}$ (a 300 rpm). Estos valores están ilustrados en la Figura 11.

a. Determinación de la viscosidad plástica μ_p .

En unidades SI, se tiene

$$\mu_p = \frac{\tau_{1020} - \tau_{510}}{1020 - 510} \quad (11)$$

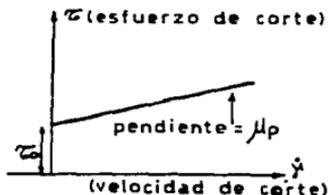


Fig. 9. - Curva de flujo teórica de un fluido Bingham.

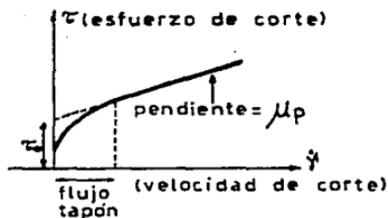


Fig. 10. - Curva de flujo experimental de un fluido Bingham.

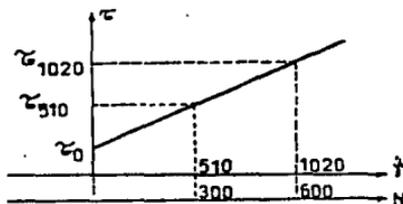


Fig. 11. - Determinación de los parámetros reológicos de un fluido Bingham.

Si μ_p se expresa en centipoises, se tiene, de acuerdo a la ecuación 5:

$$\mu_p = \frac{0.5(\theta_{600} - \theta_{300})}{1020 - 510} 1000 = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (12)$$

es decir, $\mu_p(\text{cP}) = \text{Lect. del Fann a 600 rpm} - \text{Lect. del Fann a 300 rpm}$.

b. Determinación del punto de cedencia τ_0 .

De la figura 11 se puede ver que:

$$\tau_0 = \tau_{1020} - 2(\tau_{1020} - \tau_{510}) \quad (13)$$

O, si τ_0 se expresa en $\text{lb}/100 \text{ pie}^2$ y μ_p y μ_n en cP, de acuerdo a las ecuaciones 5', 8 y 12 se tiene:

$$\tau_0 = \theta_{max} - 2(\theta_{acc} - \theta_{con}) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &= \theta_{acc} - 2\mu_p \\ &= 2(\mu_w - \mu_p) \end{aligned} \quad (14')$$

2.5.2.2. Fluidos pseudo-plásticos o ley de potencia.

A. Definición y curva típica.

Al igual que los fluidos Newtonianos, los fluidos pseudo-plásticos fluirán si se les aplica un esfuerzo, por muy pequeño que este sea. Pero en forma diferente, ya que el esfuerzo de corte no es proporcional a la velocidad de corte, sino más bien a su potencia n ; de aquí el nombre de fluidos ley de potencia. La ecuación de flujo de tales fluidos es

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (15)$$

donde K es el índice de consistencia en $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ o en $\text{lb}\cdot\text{s}^n/100\text{ pie}^2$, y n es el índice de comportamiento de flujo, el cual es adimensional, y es igual o más pequeño que la unidad.

Si $n=1$, la ecuación se transforma a aquella que tienen los fluidos Newtonianos, y K sería equivalente a la viscosidad.

Las gráficas que se muestran en la Figura 12, son curvas de flujo de un fluido ley de potencia, en coordenadas Cartesianas y logarítmicas respectivamente.

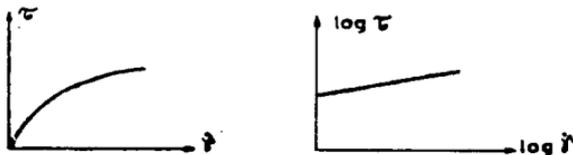


Fig. 12. - Curva de flujo de un fluido ley de potencia.

En coordenadas logarítmicas, la curva de flujo es una línea recta, cuya ecuación es:

$$y = \log K + nx \quad (16)$$

donde

$$\begin{aligned} y &= \log \tau & y \\ x &= \log \dot{\gamma} \end{aligned}$$

Así, el índice de comportamiento de flujo n , representa la pendiente de esta línea; mientras que el índice de consistencia K , se obtiene mediante la intersección de la curva, con el eje de las ordenadas, para $\dot{\gamma} = 1$:

$$n = \frac{\log \tau - \log \tau^1}{\log \dot{\gamma} - \log \dot{\gamma}^1} = \frac{\log \tau / \tau^1}{\log \dot{\gamma} / \dot{\gamma}^1} \quad (17)$$

C. Determinación del índice de comportamiento de flujo n e índice de consistencia K en un viscosímetro Fann.

Las determinaciones realizadas en un viscosímetro Fann de seis-velocidades (si no se tiene, se usa un viscosímetro Fann de dos velocidades, utilizando también ω_0 , el cual se considera que representa una determinación a 3 rpm) se grafican en papel log-log, graficando las velocidades de corte (en s^{-1}) en el eje de las abscisas y los esfuerzos de corte (en $lb/100\text{ pie}^2$) en el eje de las ordenadas (fig. 13), y de esta forma se obtiene la curva de flujo o también llamada reograma.

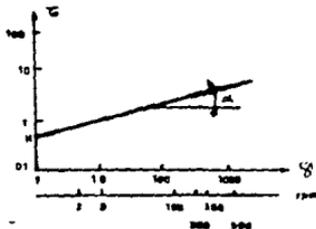


Fig. 13. - Determinación de los parámetros reológicos de un fluido ley de potencia

a. Determinación de n.

Se ha visto que

$$n = \frac{\log \tau / \tau^1}{\log \dot{\gamma} / \dot{\gamma}^1} \quad (\text{número adimensional})$$

Si $\dot{\gamma} = 2\dot{\gamma}^1$, se tiene

$$n = \frac{\log \tau / \tau^1}{\log 2} = \frac{\log \theta / \theta^1}{\log 2} = 3.32 \log \frac{\theta}{\theta^1} \quad (18)$$

Ejemplo.

Si se determinan las mediciones para las siguientes velocidades de corte:

$$\dot{\gamma}_2 = 1020 \text{ s}^{-1} \text{ (a 600 rpm)}$$

$$\dot{\gamma}_1 = 510 \text{ s}^{-1} \text{ (a 300 rpm)}$$

se tiene que

$$n = 3.32 \log \frac{\text{Lectura del Fann a 600 rpm}}{\text{Lectura del Fann a 300 rpm}}$$

b. Determinación de K

$$K = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^n} \quad (19)$$

Si $\dot{\gamma} = 1$, $K = \tau_1$.

Si τ se da en lb/100 pie² y $\dot{\gamma}$ en s⁻¹, la unidad de K será lb.sⁿ/100.pie². Si τ se da en pascales, la unidad de K será Pa.sⁿ.
Recuérdese que 1 lb_f/100 pie² = 0.478964 Pa.

2.5.2.3. Breviario de las relaciones velocidad de corte-esfuerzo de corte.

TABLA III

FLUJO	ECUACION REOLOGICA	CURVA DE FLUJO EN COORDENADAS CARTESIANAS	CURVA DE FLUJO EN COORDENADAS LOGARITMICAS
Newtoniano	$\tau = \mu \dot{\gamma}$		
Plástico de Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$		
Pseudo-plástico o Ley de potencia	$\tau = K \dot{\gamma}^n$		

2.6. Modificación de los parámetros reológicos para los fluidos Bingham y Ley de Potencia.

2.6.1. Fluidos Bingham.

La circulación de los fluidos Bingham esta gobernada por dos parámetros: la viscosidad plástica y el punto de cedencia.

2.6.1.1. Viscosidad plástica.

Este parámetro es función de :

- (a) La concentración de sólidos.
- (b) El tamaño y forma de las partículas sólidas.
- (c) La viscosidad de la fase líquida.

La viscosidad plástica aumenta con el incremento en el contenido de sólidos o, para un contenido de sólidos constante, con el incremento en el número de partículas sólidas (partículas finas). En

forma contraria, disminuye cuando decrece el contenido de sólidos o bien, para un contenido constante de sólidos, cuando el número de partículas finas disminuye (las partículas finas se floculan, dando lugar a la formación de partículas gruesas).

2.6.1.2. Punto de cedencia.

El punto de cedencia resulta de las fuerzas de cohesión que existen entre las partículas; dichas fuerzas a su vez se deben a las cargas eléctricas superficiales de cada partícula. La magnitud de estas fuerzas dependerá de:

- (a) El tipo de sólidos y de sus cargas superficiales.
- (b) La cantidad de sólidos presente.
- (c) La concentración iónica de la fase líquida.

Puntos de cedencia muy altos, pueden deberse a:

- (a) La trituration de los sólidos por la barrena, tubería, etc., con el consecuente incremento en sus áreas superficiales específicas.
- (b) Un incremento en el contenido de sólidos, con el consecuente decremento, de la distancia entre cada partícula.
- (c) Una contaminación por sal, yeso, etc., la cual favorece la floculación de las partículas.
- (d) Una concentración insuficiente del agente adelgazante, cuya función es neutralizar las fuerzas de atracción.

Si se conocen y se entienden estos factores causantes de la variabilidad de dichos parámetros; tratamientos apropiados pueden llevarse a cabo. De esta manera la viscosidad plástica puede reducirse (o su incremento se ve retardado) mediante el desarenamiento, eliminación de sedimentos, centrifugación, tratamientos en vibradores sofisticados, o por disolución.

Por otro lado el punto de cedencia será reducido adicionando sustancias que neutralicen las cargas eléctricas, tales como agentes adelgazantes, y por la adición de productos químicos que precipiten los contaminantes. Si la eliminación de los contaminantes es imposible (por ejemplo en el caso de la sal), el punto de cedencia puede reducirse, ya sea disminuyendo el contenido de sólidos (dilución) o bien utilizando un lodo más apropiado.

Como una regla general, la viscosidad plástica puede disminuirse, reduciendo el contenido de sólidos; mientras que el punto de cedencia se puede modificar más fácilmente mediante tratamientos químicos.

2.6.2. Fluidos ley de potencia.

La circulación de estos fluidos está regida por dos parámetros: índice de consistencia K e índice de comportamiento de flujo n .

2.6.2.1. Índice de consistencia K .

La variación de K , se debe a los mismos factores que intervienen

en el caso de la viscosidad plástica, para fluidos Bingham.

2.6.2.2. Exponente de potencia n.

El valor del exponente n puede modificarse por los mismos factores que afectan al punto de cedencia; sin embargo los factores que incrementan el punto de cedencia, reducen el valor de n.

El valor de n, también puede reducirse introduciendo ciertos aditivos, tales como:

- (a) Biopolímeros.
- (b) Bentonita prehidratada, la cual ha sido floculada por sales.
- (c) "super bentonita" o bentonita tratada químicamente.
- (d) Ciertos carboxymethylcellulose, goma guar, alalpulgita, fibras de asbesto, etc.

2.6.3. Geles.

Los esfuerzos gel inicial y el de 10 minutos, son una indicación de las fuerzas de atracción que actúan en una suspensión en reposo.

Si la diferencia entre estos dos esfuerzos es grande, el gel se conoce como "progresivo". Si la diferencia es muy pequeña, el gel se conoce como "plano".

Los geles son una medida de las fuerzas de atracción estáticas, mientras que el punto de cedencia es una medida de las fuerzas de atracción dinámicas. Así, el punto de cedencia y el esfuerzo gel se incrementan o disminuyen, de la misma forma, con los mismos tratamientos.

2.6.4. Viscosidad del embudo Marsh.

Esta determinación cualitativa, refleja todos los parámetros reológicos y otras características físicas del lodo; pero no permite identificar los principales parámetros que afectan el resultado de las mediciones.

De acuerdo a lo anterior, los valores numéricos obtenidos en esta prueba, no pueden utilizarse para cualesquiera de los cálculos hidráulicos. Únicamente proporcionan indicaciones relativas, que nos ayudan a comparar tipos de lodos y propiedades físicas.

2.7. Atenuación del esfuerzo cortante.

La viscosidad aparente de los fluidos Bingham y ley de potencia, disminuye durante el flujo laminar, a medida que se incrementa la velocidad de corte. A este efecto se conoce como "atenuación del esfuerzo de corte".

La viscosidad aparente, es por definición, $\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$.

Para fluidos Newtonianos, $\mu_a = \mu = \text{constante}$.

Para fluidos Bingham, $\mu_a = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu_p$, es decir, μ_a disminuye con el incremento de $\dot{\gamma}$.

Para fluidos ley de potencia, $\mu_a = K \dot{\gamma}^{n-1} = \frac{K}{\dot{\gamma}^{1-n}}$, es decir, μ_a

disminuye a medida que se incrementa $\dot{\gamma}$, para $n < 1$.

Las gráficas de la figura 14, representan las variaciones de la viscosidad aparente, con respecto a $\dot{\gamma}$.

En el caso de los fluidos ley de potencia ($n < 1$), la variación de μ_a con respecto a la velocidad de corte es mucho mayor; de aquí que n adquiera su valor mínimo, y por lo tanto, esta característica sea la mayor diferencia que existe entre este tipo de fluidos y los fluidos Newtonianos.

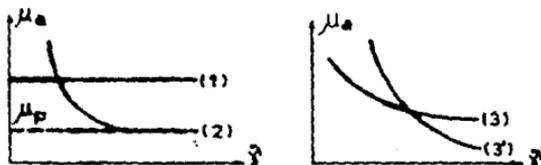


Fig. 14

1. Fluido Newtoniano.
2. Fluido plástico de Bingham.
- 3, 3'. Fluidos ley de potencia o pseudo-plásticos; $n' < n$.

2.8. Flujo en un espacio anular.

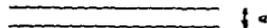
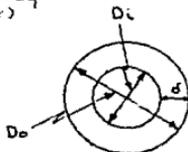
Las ecuaciones que describen el flujo en tuberías, pueden generalizarse para aplicarse a otras formas de conductos, tales como espacios anulares concéntricos o placas paralelas. En tales casos, el diámetro D del tubo, debe remplazarse por un diámetro equivalente d_e , definido por:

$$d_e = 5 \sqrt{2\psi r} \quad (21)$$

donde

$$\delta = \frac{D_1 - D_2}{2} \text{ para un espacio anular, o}$$

$$\delta = e \text{ para dos placas paralelas,}$$



$$k = \frac{D_1}{D_2}$$

y

$$\Psi(k) = \frac{(1+k^2) \ln k + (1-k^2)}{2(1-k)^2 \ln k} \quad (22)$$

en la cual, si

$$k \rightarrow 1 \quad \Psi(k) \rightarrow \frac{1}{3}$$

es decir, en el límite para $k = 1$, se tiene el caso de dos placas paralelas. Las dimensiones D_2 y D_1 son infinitamente grandes, por lo que $D_2/D_1 = 1$; pero $D_2 - D_1 = 0$.

Por otro lado si:

$$k \rightarrow 0 \quad \Psi(k) \rightarrow \frac{1}{2}$$

es decir, en el límite para $k = 0$, se tiene el caso de un tubo cilíndrico.

De acuerdo a lo anterior, se tiene:

(a) Para dos placas paralelas, $\sigma_w = 0.8165 * 2e$ (b) Para un espacio anular, $\sigma_w \approx 0.8165(D_2 - D_1)$

CAPITULO 3

Selección del modelo reológico

3.1. Introducción.

En este capítulo se presentará la forma de elegir un determinado modelo reológico, y como determinar los parámetros reológicos que lo caracterizan. Pero para ello, es necesario conocer previamente la problemática que involucra su cálculo.

La determinación de las características reológicas de los fluidos de perforación y lechadas de cemento, trae consigo algunas dificultades, debido a las siguientes razones:

A. Las propiedades de los fluidos

Los fluidos son no Newtonianos. Estrictamente no se apoyan a las leyes reológicas vistas en el capítulo anterior, más bien muestran un comportamiento intermedio, tal como el que se observa en la figura 15.

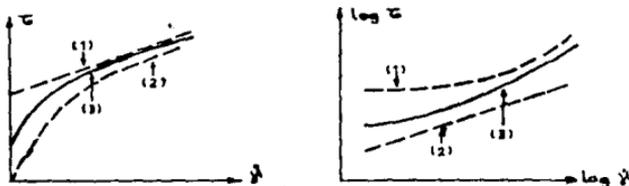


Fig. 15

1. Fluido Bingham.
2. Fluido ley de potencia.
3. Lodo de perforación. Lechada de cemento.

Las características reológicas son variables, debido a los cambios de presión y temperatura, existentes en el pozo.

B. La geometría del sistema de circulación.

Esta geometría es variable (forma irregular de las paredes del pozo, excentricidad, etc.).

C. La complejidad de los movimientos.

Además del flujo longitudinal:

(a) Durante la circulación del lodo, se tiene el movimiento rotativo de la sarta de perforación, el cual es el causante del flujo helicoidal.

(b) Durante la cementación, otro componente adicional de movimiento puede originarse, debido al desplazamiento de la tubería de revestimiento (movimiento recíprocante y movimiento rotatorio).

De acuerdo a lo anterior, una solución rigurosa, sería demasiado compleja; y además no se justifica, teniendo presente la aproximación natural de los datos y el nivel de exactitud necesitado.

Por consiguiente, se han hecho algunas simplificaciones:

(a) Son despreciables las irregularidades en la forma del agujero, los movimientos tanto de la tubería de perforación como de la tubería de revestimiento, el efecto de la temperatura y la presión de fluido.

(b) El flujo en el espacio anular, se considera como aquel que ocurre entre dos placas paralelas infinitamente grandes.

(c) El fluido a considerar, es ya sea un fluido Bingham o una ley de potencia. La selección de uno u otro, se explica en la sección inmediata 3.2.

(d) Para cada velocidad de corte, el fluido tiene una viscosidad equivalente característica μ_e , la cual se encuentra definida en la tabla IV.

TABLA IV

ECUACIONES PARA LA VISCOSIDAD EQUIVALENTE DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS

		MODELO	BINGHAM	LEY DE POTENCIA
FLUJO				
Laminar	Tubería de perforación		$\mu_e = \frac{\tau}{8V/D}$ $= \mu_p + \frac{\tau_0}{8V/D}$	$\mu_e = \frac{\tau}{f}$ $= K \left(\frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1}$
	Espacio anular		$\mu_e = \frac{\tau}{12V(D_2 - D_1)}$ $= \mu_p + \frac{\tau_0}{12V(D_2 - D_1)}$	$\mu_e = \frac{\tau}{f}$ $= K \left(\frac{12V}{D_2 - D_1} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1}$
Turbulento	Tubería de perforación		$\mu_e = \mu_p$	$\mu_e = \frac{\tau}{f}$ $= K \left(\frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1}$
	Espacio anular		(se desprecia el efecto de τ_0)	$\mu_e = \frac{\tau}{f}$ $= K \left(\frac{12V}{D_2 - D_1} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1}$

3.2. Selección del modelo.

De acuerdo a lo expuesto en la sección anterior, al modelo reológico seleccionado será:

- (a) El más cercano al modelo Bingham, o
- (b) El más cercano al modelo ley de potencia.

En la mayoría de los casos es imposible hacer esta selección, basándose únicamente en la curva de flujo, independientemente de que se trace en coordenadas Cartesianas o logarítmicas. En consecuencia es necesario efectuar algunos cálculos, los cuales se pueden hacer en forma fácil y rápida con la ayuda de minicomputadoras de bolsillo.

Del viscosímetro Fann, solamente se pueden aprovechar, en la mayor parte de los casos, cuatro puntos experimentales. Esto se debe a que no pueden utilizarse las lecturas a 3 y 6 rpm, si el fluido tiene un punto de cedencia (flujo tapón), o si este es tixotrópico.

Los cuatro puntos restantes (a 100, 200, 300 y 600 rpm), se pueden utilizar para efectuar una regresión lineal en sucesión, en coordenadas Cartesianas (Modelo de Bingham) y logarítmicas (Modelo ley de Potencia). El modelo con un coeficiente de correlación más cercano a la unidad, será el seleccionado para los cálculos posteriores. Este coeficiente de correlación, se define mediante la siguiente ecuación:

$$r = \frac{P \sum x y - \sum x \sum y}{\sqrt{[P \sum x^2 - (\sum x)^2] [P \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

donde

- P, es el número de lecturas realizadas en el Fann,
- x, es la velocidad de corte, o su correspondiente logaritmo ($\dot{\gamma}$ ó $\log \dot{\gamma}$),
- y, es el esfuerzo de corte, o su correspondiente logaritmo (τ ó $\log \tau$).

NOTA. En teoría, este método es válido únicamente, si la diferencia entre los dos coeficientes de correlación es significativa. Recientemente, un método más riguroso ha sido propuesto, en el cual los parámetros a, b y c de la ecuación $\theta = a N^b + c$, se determinan mediante un programa iterativo, a partir de las lecturas (θ) a 100, 200, 300, y 600 rpm).

Los valores encontrados para los parámetros b y c, son utilizados como criterio para la elección del modelo:

- (a) Si $b = 1$, se selecciona el modelo de Bingham.
- (b) Si $b < 1$ y $c \neq 0$, se selecciona el modelo ley de potencia.

Como se vio en el capítulo anterior, si el modelo de Bingham se selecciona, los parámetros a determinarse son la viscosidad plástica M_0 y el punto de cedencia τ_0 . En el caso de que se seleccione el modelo ley de potencia, los parámetros a determinarse son el índice de

consistencia K y el índice ley de potencia n .

3.3. Determinación de los parámetros reológicos.

3.3.1. Para un viscosímetro Fann de seis velocidades

Como se vio la regresión lineal se aplica únicamente sobre los cuatro puntos experimentales útiles (100, 200, 300 y 600 rpm).

Después de haber seleccionado el modelo, el siguiente paso consiste en determinar los parámetros reológicos, según sea el caso:

- (a) τ_0 y μ_p , para un fluido Bingham.
- (b) n y K , para un fluido ley de potencia.

Esta determinación puede hacerse gráficamente, o por el método de los mínimos cuadrados.

3.3.1.1. Determinación gráfica de los parámetros para el modelo de Bingham.

Las lecturas del viscosímetro Fann, se grafican en coordenadas Cartesianas, tal como se muestra en la figura 16. μ_p es proporcional a la pendiente de la línea, que pasa lo más cercano posible a través de los cuatro puntos. τ_0 es proporcional al valor de la ordenada al origen.

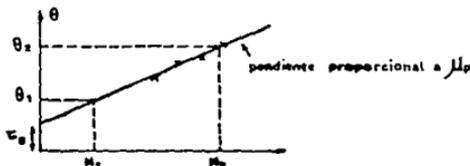


Fig. 16.- Curva en coordenadas Cartesianas del modelo Bingham.

Si las lecturas de la escala se grafican directamente, como una función de la velocidad del rotor N en rpm, la viscosidad plástica, en centipoises será:

$$\mu_p = \frac{0.51 (\theta_2 - \theta_1)}{1.7 (N_2 - N_1)} 1000$$

Si $N_2 = 600$ rpm y $N_1 = 300$ rpm: $\mu_p = \theta_2 - \theta_1$

3.3.1.2. Determinación gráfica de los parámetros para el modelo ley de potencia.

Las lecturas del viscosímetro Fann se grafican en coordenadas doble logarítmicas, tal como se muestra en la figura 17.

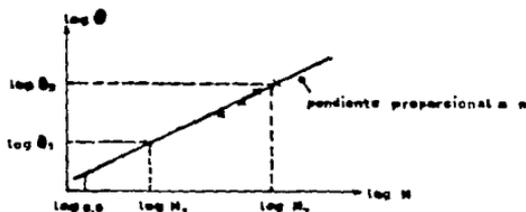


Fig. 17. - Curva en coordenadas logarítmicas del modelo ley de potencia.

n es proporcional a la pendiente de la línea recta, que pasa lo más cercano posible a los cuatro puntos. K es proporcional al valor de la ordenada al valor de la ordenada para el punto $\log \theta = 0$ ($\theta = 1$).

Si los logaritmos de las lecturas de la escala, se grafican contra los logaritmos de la velocidad angular del rotor (en rpm); n estará dada por

$$n = \frac{\log \theta_2 - \log \theta_1}{\log N_2 - \log N_1} = \frac{\log \theta_2 / \theta_1}{\log N_2 / N_1}$$

K , expresada en $\text{lb. s}^n / 100 \text{ pie}^2$, es la ordenada que le corresponde al punto $N = 0.6$ ($\log N = \log 0.6$).

Si $N_2 = 600 \text{ rpm}$ y $N_1 = 300 \text{ rpm}$, se tiene:

$$n = \frac{\log \theta_2 / \theta_1}{\log 2} = 3.32 \log \theta_2 / \theta_1$$

3.3.1.3. Método de los mínimos cuadrados.

Sean P puntos, cuyas abscisas son x_p y cuyas ordenadas son y_p . La línea recta que ajusta los puntos P puede representarse mediante la ecuación $y = ax + b$, donde los parámetros a y b se definen de la

siguiente manera:

$$a = \frac{\sum y_p \sum x_p - P \sum x_p y_p}{(\sum x_p)^2 - P \sum x_p^2}$$

$$b = \frac{\sum x_p y_p \sum x_p - \sum y_p \sum x_p^2}{(\sum x_p)^2 - P \sum x_p^2}$$

Si el modelo Bingham se ha seleccionado, la viscosidad plástica μ_p y el punto de cedencia τ_0 , se deducen a partir de las ecuaciones anteriores, haciendo $y = \tau$ y $x = \dot{\gamma}$.

En la práctica, las siguientes ecuaciones se utilizan:

(a) En el Sistema Internacional de Unidades SI:

$$y = 0.51\theta$$

$$x = 1.7N$$

(b) En unidades prácticas:

$$y = \theta$$

$$x = 1.7N$$

En consecuencia se tiene

$$\mu_p = 3 \frac{\sum \theta \sum N - P \sum (\theta N)}{(\sum N)^2 - P \sum N^2} \quad (\text{en p})$$

$$\mu_p = 300 \frac{\sum \theta \sum N - P \sum (\theta N)}{(\sum N)^2 - P \sum N^2} \quad (\text{en cp})$$

$$\tau_0 = \frac{\sum (N\theta) \sum N - \sum \theta \sum N^2}{(\sum N)^2 - P \sum N^2} \quad (\text{en lb/100 pie}^2)$$

$$\tau_0 = 0.51 \frac{\sum (N\theta) \sum N - \sum \theta \sum N^2}{(\sum N)^2 - P \sum N^2} \quad (\text{en Pa})$$

Si el modelo ley de potencia ha sido seleccionado, n y $\log K$ se obtienen a partir de las ecuaciones para a y b , tomando:

(a) En unidades del SI:

$$y = \log \tau = \log 0.5108$$

$$x = \log \dot{\gamma} = \log 1.7N$$

(b) En unidades prácticas:

$$y = \log \tau = \log \theta$$

$$x = \log \dot{\gamma} = \log 1.7N$$

En consecuencia se tiene:

$$n = \frac{E \log \theta - E \log \dot{\gamma} - P \Sigma (\log \theta \cdot \log \dot{\gamma})}{(E \log \dot{\gamma})^2 - P \Sigma (\log \dot{\gamma})^2}$$

$$\log K = \frac{E (\log \theta \cdot \log \dot{\gamma}) \log \dot{\gamma} - E \log \theta \Sigma (\log \dot{\gamma})^2}{(E \log \dot{\gamma})^2 - P \Sigma (\log \dot{\gamma})^2}$$

donde K, esta en lb.sⁿ/100 pie².

Como se dijo anteriormente, los cálculos pueden facilitarse considerablemente si se utiliza una microcomputadora.

3.3.2. Para un viscosímetro Fann de dos velocidades.

En este caso la selección del modelo es difícil; el único camino que se tiene es de guiarse de acuerdo a la composición del fluido. De esta manera se tiene:

(a) Los lodos con alto contenido en sólidos y altas densidades (peso específico mayor que 1.5), se comportan aproximadamente como fluidos Bingham.

(b) Los lodos con un bajo contenido en sólidos, se comportan aproximadamente como fluidos ley de potencia.

(c) La adición de un agente adelgazante, modifica el comportamiento reológico, de tal manera que el fluido se aproxima más al comportamiento del modelo ley de potencia.

Lo señalado anteriormente, son simplemente reglas de dedo. No obstante, sirven para que de alguna manera, el procedimiento de selección sea menos arbitrario.

Si el modelo Bingham se selecciona, la viscosidad plástica μ_p y el punto de cedencia τ_0 , son determinados a partir de las lecturas del Fann a 300 y 600 rpm, según ecuaciones 12, 13, 14 y 14' del capítulo anterior:

$$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$$

(cp)

$$\tau_0 = \theta_{600} - 2(\theta_{700} - \theta_{300}) \quad (\text{en lb/100 pie}^2)$$

Si el modelo ley de potencia se selecciona, el índice de comportamiento de flujo n y el índice de consistencia K , se obtienen a partir de las lecturas del Fann a 300 y 600 rpm, utilizando las ecuaciones 19 y 20 del capítulo anterior:

$$n = 3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}$$

$$K \text{ (lb. s}^n\text{/100 pie}^2\text{)} = \frac{\theta_{600}}{1020^n}$$

CAPITULO 4

Caídas de Presión por Fricción

4.1. Determinación del tipo de flujo.

El tipo de flujo de un fluido se caracteriza mediante el Número de Reynolds Re , el cual a su vez se compara con un valor crítico, llamado Número de Reynolds crítico Re_c .

4.1.1. Expresión general para el Número de Reynolds y su valor crítico.

En la Tabla V, se pueden ver las expresiones que se utilizan para el cálculo del Número de Reynolds, incluyendo sus valores críticos. Estas expresiones son las que se aceptan generalmente y como se puede observar, las hay para fluidos de varios modelos reológicos, que circulan, ya sea a través de tuberías o espacios anulares.

TABLA V

ECUACIONES PARA EL NUMERO DE REYNOLDS Y SUS VALORES CRITICOS

MODELO	INTERIOR DE TUBERIAS	ESPACIOS ANULARES
Newton	$Re = \frac{VD\rho}{\mu}$ $Re_c = 2100$	$Re = \frac{0.816(D_o - D_i)V\rho}{\mu}$ $Re_c = 2100$
Bingham	$Re = \frac{VD\rho}{\mu_o}$ $Re_c = 2100$	$Re = \frac{0.816(D_o - D_i)V\rho}{\mu_o}$ $Re_c = 2100$
Ley de potencia	$Re = \frac{VD\rho}{\mu_o} \frac{4n}{3n+1}$ $Re_c = 3470 - 1370n$	$Re = \frac{0.816(D_o - D_i)V\rho}{\mu_o} \frac{3n}{2n+1}$ $Re_c = 3470 - 1370n$

En esta tabla se puede ver que para un fluido ley de potencia, con $n = 1$, sus ecuaciones se transforman a aquellas que tienen los fluidos Newtonianos.

En la zona de transición, que se presenta cuando el flujo cambia de laminar a turbulento, deben utilizarse las ecuaciones de ΔP para flujo turbulento. Esto debido a que en dicha zona el flujo es muy irregular y las presiones en el fluido son altamente inestables.

La velocidad crítica V_c , es la velocidad en el Número de Reynolds

crítico Re_c . Si $V \leq V_c$, el flujo es laminar.

4.1.2. Ecuaciones para el Número de Reynolds y Velocidad Crítica en función de los parámetros reológicos.

4.1.2.1. Fluidos Newtonianos.

$$Re = \frac{V D \rho}{\mu}$$

$$V_c = \frac{2100 \mu}{D \rho}$$

4.1.2.2. Fluidos Bingham.

A. En tuberías de perforación.

Se tiene

$$Re = \frac{V D \rho}{\mu_w}$$

sustituyendo la expresión para μ_w de la tabla IV:

$$Re = \frac{V D \rho}{\frac{\tau_o D}{8 V} + \mu_p} = \frac{8 V^2 D \rho}{\tau_o D + 8 V \mu_p}$$

$$V_c = \frac{2100 \mu_w}{D \rho} = 2100 \frac{\mu_p + \frac{\tau_o}{8 V_c/D}}{D \rho}$$

por lo tanto

$$8 V_c^2 D \rho - 16800 V_c \mu_p - 2100 \tau_o D = 0$$

de esta ecuación de segundo grado, V_c es la raíz positiva:

$$V_c = \frac{16800 \mu_p + \sqrt{(16800 \mu_p)^2 + (4 \cdot 8 D \rho \cdot 2100 \tau_o D)^2}}{16 D \rho}$$

$$V_c = \frac{16800 \mu_w + \sqrt{(16800 \mu_w)^2 + (32 \cdot 2100 \cdot \tau_o D^2 \rho)}}{16 D \rho}$$

B. En el espacio anular.

De acuerdo al procedimiento anterior:

$$Re = \frac{0.8165 (D_o - D_i) V \rho}{\frac{\tau_o (D_o - D_i)}{12 V} + \mu_w}$$

$$Re = \frac{9.8 (D_o - D_i) V^2 \rho}{\tau_o (D_o - D_i) + 12 V \mu_w}$$

$$V_c = \frac{2100 \mu_w}{0.8165 (D_o - D_i) \rho} = 2572 \frac{\mu_w + \frac{\tau_o}{12 V_c / (D_o - D_i)}}{(D_o - D_i) \rho}$$

$$V_c = \frac{30864 \mu_w + \sqrt{(30864 \mu_w)^2 + 48 \cdot 2572 \tau_o (D_o - D_i)^2 \rho}}{24 (D_o - D_i) \rho}$$

4.1.2.3. Fluidos ley de potencia.

A. En tuberías de perforación.

Las ecuaciones para Re y Vc quedan como:

$$Re = \frac{V D \rho}{\mu_w} \frac{4n}{3n+1} = \frac{V D \rho}{K \left[\frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \right]^{n-1}} \frac{4n}{3n+1}$$

$$Re = \frac{V^{2-n} D^n P}{K \cdot 8^{n-1} \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^n}$$

si $Re = Rec = 3470 - 1370 n$, se obtiene de esta ecuación:

$$Vc = \left[\frac{(3470 - 1370 n) K \cdot 8^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n}{D^n P} \right]^{1/(2-n)}$$

B. En el espacio anular.

Se tiene en este caso:

$$Re = \frac{0.8165 V (D_o - D_i) P}{\mu_w} \frac{3n}{2n+1}$$

$$Re = \frac{0.8165 V (D_o - D_i) P}{K \left[12 \frac{V}{D_o - D_i} \frac{2n+1}{3n} \right]^{n-1} \frac{3n}{2n+1}}$$

$$Re = \frac{0.8165 V^{2-n} (D_o - D_i)^n P}{K \cdot 12^{n-1} \left[\frac{2n+1}{3n} \right]^n}$$

$$Vc = \left[\frac{(3470 - 1370 n) K \cdot 12^{n-1} \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^n}{0.8165 (D_o - D_i)^n P} \right]^{1/(2-n)}$$

4.2. Cálculo de las caídas de presión.

4.2.1. Ecuaciones.

La ecuación general que determina la caída de presión ΔP , entre dos puntos separados por una distancia L es:

$$\Delta P = \frac{2 f L V^2 \rho}{D}, \text{ para un tubo cilíndrico}$$

$$\Delta P = \frac{2 f L \rho V^2}{d_e}, \text{ para un espacio anular}$$

donde:

- ΔP = caída de presión (Pa),
- d_e = diámetro equivalente del espacio anular (m),
- L = longitud que separa los dos puntos (m),
- ρ = densidad del fluido (Kg_m/m^3),
- V = velocidad del fluido (m/s),
- D = diámetro interior de la sarta de perforación (m),
- f = coeficiente de fricción (adimensional).

Este último factor varía:

- (a) Con el tipo de fluido,
- (b) Con el tipo de flujo, y
- (c) Con el Número de Reynolds.

La Tabla VI lista las ecuaciones generales, para f y ΔP , las cuales se aplican a diferentes tipos de fluidos y flujos.

TABLA VI

ECUACIONES PARA EL CALCULO DE LAS PERDIDAS DE PRESION

Flujo laminar	Fluidos de Newton y de Bingham ($Re < 2100$)	INTERIOR DE TUBERIAS	ESPACIOS ANULARES
		$f = \frac{16}{Re}$ $\Delta P = \frac{32L\mu_e V}{D^3}$	$f = \frac{16}{Re}$ $\Delta P = \frac{48L\mu_e V}{(D_o - D_i)^3}$
Fluidos ley de potencia ($Re > 3470 - 1370n$)	$\Delta P = \frac{32L\mu_e V}{D^3} \frac{3n+1}{4n}$	$\Delta P = \frac{48L\mu_e V}{(D_o - D_i)^3} \frac{2n+1}{3n}$	
Flujo turbulento	Fluidos de Newton y de Bingham ($Re > 2100$)	$f = \frac{0.05}{Re^{0.1}}$ $\Delta P = \frac{0.117L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu_e^{0.2}}{D^{1.2}}$	$f = \frac{0.05}{Re^{0.1}}$ $\Delta P = \frac{0.127L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu_e^{0.2}}{(D_o - D_i)^{1.2}}$
	Fluidos ley de potencia ($Re > 3470 - 1370n$)	donde $c = \frac{\log n + 2.5}{50}$ $b = \frac{1.4 - \log n}{7}$ $\Delta P = \left(\frac{2cL\rho^{1-b}V^{2-b}}{D^{1+b}} \right) \cdot \left(\mu_e^b \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^b \right)$	donde $c = \frac{\log n + 2.5}{50}$ $b = \frac{1.4 - \log n}{7}$ $\Delta P = \left(\frac{2cL\rho^{1-b}V^{2-b}}{(0.8163(D_o - D_i))^{1+b}} \right) \cdot \left(\mu_e^b \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^b \right)$

Las expresiones para la viscosidad equivalente μ_e , están definidas en la Tabla IV del capítulo anterior.

Las ecuaciones para las caídas de presión, aplicables a diferentes modelos reológicos y en varios sistemas de unidades, están definidas en las siguientes Tablas (véanse al final de este capítulo):

Tabla VII. Fluidos Newtonianos. Circulación en tubería de perforación.

Tabla VIII. Fluidos Newtonianos. Circulación en espacio anular.

Tabla IX. Fluidos Bingham. Circulación en tubería de perforación.

Tabla X. Fluidos Bingham. Circulación en espacio anular.

Tabla XI. Fluidos Bingham. Circulación en instalaciones superficiales.

Tabla XII. Fluidos ley de potencia. Circulación en tubería de perforación.

Tabla XIII. Fluidos ley de potencia. Circulación en espacio

anular.

Tabla XIV. Fluidos ley de potencia. Circulación en instalaciones superficiales.

Tabla XV. Pérdidas de presión a través de las toberas de la barrera.

Estas ecuaciones se deben de utilizar, para cada sección de la sarta, con diámetro constante (diámetro interior D_i , para una sarta de perforación o en el caso de un espacio anular: diámetro externo de la sarta de perforación D_e y diámetro externo del pozo D_o).

4.2.2. Procedimiento de cálculo.

El cálculo comprende los siguientes pasos:

- Determinación del tipo de flujo.
- Selección y utilización de la ecuación apropiada.

Lo anterior puede representarse, mediante el siguiente diagrama de flujo:

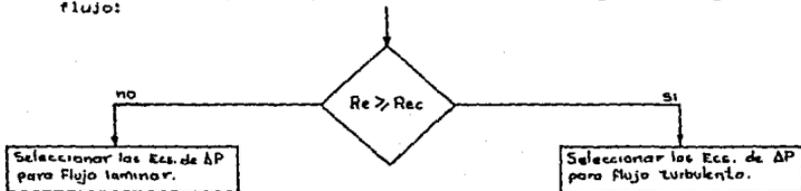


TABLA VII
FLUIDOS NEWTONIANOS. CIRCULACION EN TUBERIA DE PERFORACION

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS *
(1) V_s	$\frac{2100\mu}{D\rho}$	$\frac{13582\mu}{D\rho}$	$\frac{496\mu}{D\rho}$
(2) Q_s	$\frac{525\pi D\mu}{\rho}$	$\frac{5.54D\mu}{\rho}$	$\frac{2.514D\mu}{\rho}$
(3) ΔP_f (laminar)	$\frac{32LV\mu}{D^3}$	$\frac{VL\mu}{89775D^3}$	$\frac{VL\mu}{120967D^3}$
	$\frac{128QL\mu}{\pi D^3}$	$\frac{QL\mu}{3663D^3}$	$\frac{QL\mu}{61295D^3}$
(4) ΔP_f (turbulento)	$\frac{0.1L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.3}}{D^{1.3}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.3}}{3212923D^{1.3}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.3}}{306529D^{1.3}}$
	$\frac{1.2126L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.3}}{\pi^{1.8}D^{4.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.3}}{10141D^{4.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.3}}{90163D^{4.8}}$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1

TABLA VII
FLUIDOS NEWTONIANOS. CIRCULACION EN TUBERIA DE PERFORACION

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS *
(1) V_c	$\frac{2100\mu}{Dp}$	$\frac{135.82\mu}{Dp}$	$\frac{4.96\mu}{Dp}$
(2) Q_c	$\frac{513\kappa D\mu}{\rho}$	$\frac{5.54D\mu}{\rho}$	$\frac{2.514D\mu}{\rho}$
(3) ΔP_L (Laminar)	$\frac{32LV\mu}{D^3}$	$\frac{VL\mu}{89775D^3}$	$\frac{VL\mu}{120967D^3}$
	$\frac{128QL\mu}{\pi D^4}$	$\frac{QL\mu}{3663D^4}$	$\frac{QL\mu}{61295D^4}$
(4) ΔP_T (turbulenta)	$\frac{0.1L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.2}}{D^{1.3}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.2}}{3212923D^{1.3}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.2}}{306529D^{1.3}}$
	$\frac{1.2126L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.2}}{\pi^{1.8}D^{4.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.2}}{10141D^{4.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.2}}{90163D^{4.8}}$

* Ver Sección 1.8, Capítulo 1

TABLE VIII
FLUIDOS NEWTONIANOS. CIRCULACION EN ESPACIO ANULAR

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS *
(1) K	$\frac{2572\mu}{(D_o - D_i)\rho}$	$\frac{166.35\mu}{(D_o - D_i)\rho}$	$\frac{6.08\mu}{(D_o - D_i)\rho}$
(2) Q_c	$\frac{643\pi(D_o + D_i)\mu}{\rho}$	$\frac{6.79(D_o + D_i)\mu}{\rho}$	$\frac{3.08(D_o + D_i)\mu}{\rho}$
(3) ΔP_o (laminar)	$\frac{48LV\mu}{(D_o - D_i)^3}$	$\frac{VL\mu}{39851(D_o - D_i)^3}$	$\frac{VL\mu}{80645(D_o - D_i)^3}$
	$\frac{192QL\mu}{\pi(D_o + D_i)(D_o - D_i)^3}$	$\frac{QL\mu}{2442(D_o + D_i)(D_o - D_i)^3}$	$\frac{QL\mu}{40863(D_o + D_i)(D_o - D_i)^3}$
(4) ΔP_o (turbulento)	$\frac{0.1275L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.2}}{(D_o - D_i)^{4.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.2}}{2519939(D_o - D_i)^{4.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu^{0.2}}{240415(D_o - D_i)^{4.8}}$
	$\frac{1.5465L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.2}}{\pi^{4.8}(D_o + D_i)^{1.8}(D_o - D_i)^{3.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.2}}{7952(D_o + D_i)^{1.8}(D_o - D_i)^{3.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu^{0.2}}{70696(D_o + D_i)^{1.8}(D_o - D_i)^{3.8}}$

* Ver Sección 1.3 , Capítulo 1.

TABLA IX
FLUIDOS BINGHAM. CIRCULACION EN TUBERIA DE PERFORACION

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS *
(1) V_f	$\frac{1050}{Dp} \left[\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + \frac{\tau_0 D^3 p}{4200}} \right]$	$\frac{67.91}{Dp} [\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + 8.816 \tau_0 D^3 p}]$	$\frac{2.48}{Dp} [\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + 73.37 \tau_0 D^3 p}]$
(2) Q_c	$\frac{262.5 \pi D}{\rho} \left[\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + \frac{\tau_0 D^3 p}{4200}} \right]$	$\frac{2.77 D}{\rho} [\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + 8.816 \tau_0 D^3 p}]$	$\frac{1.257 D}{\rho} [\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + 73.37 \tau_0 D^3 p}]$
(3) ΔP_f (laminar)	$\frac{32LV\mu_p}{D^3} + \frac{4\tau_0 L}{D}$ $\frac{128LQ\mu_p}{\pi D^3} + \frac{4\tau_0 L}{D}$	$\frac{LV\mu_p}{89775D^3} + \frac{\tau_0 L}{300D}$ $\frac{LQ\mu_p}{3663D^3} + \frac{\tau_0 L}{300D}$	$\frac{LV\mu_p}{120964D^3} + \frac{\tau_0 L}{1326D}$ $\frac{LQ\mu_p}{61295D^3} + \frac{\tau_0 L}{1326D}$
(4) ΔP_f (turbulento)	$\frac{0.11L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu_p^{0.2}}{D^{1.3}}$ $\frac{1.2126L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu_p^{0.2}}{\pi^{1.3}D^{1.3}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu_p^{0.2}}{3212923D^{1.3}}$ $\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu_p^{0.2}}{10141D^{1.3}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu_p^{0.2}}{306328D^{1.3}}$ $\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu_p^{0.2}}{90163D^{1.3}}$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1

TABLA X
FLUIDOS BINGHAM. CIRCULACION EN ESPACIO ANULAR

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS *
(1) V_c	$\frac{1286}{(D_s - D_j)^2} \left[\mu_r + \sqrt{\mu_r^2 + \frac{4d(D_s - D_j)^2 \rho}{7716}} \right]$	$\frac{83.17}{(D_s - D_j)^2} [\mu_r + \sqrt{\mu_r^2 + 4.81d(D_s - D_j)^2 \rho}]$	$\frac{304}{(D_s - D_j)^2} [\mu_r + \sqrt{\mu_r^2 + 40.051d(D_s - D_j)^2 \rho}]$
(2) Q_c	$\frac{321.49d(D_s + D_j)}{\rho} \left[\mu_r + \sqrt{\mu_r^2 + \frac{4d(D_s - D_j)^2 \rho}{7716}} \right]$	$\frac{3.39d(D_s + D_j)}{\rho} [\mu_r + \sqrt{\mu_r^2 + 4.81d(D_s - D_j)^2 \rho}]$	$\frac{1.339d(D_s + D_j)}{\rho} [\mu_r + \sqrt{\mu_r^2 + 40.051d(D_s - D_j)^2 \rho}]$
(3) ΔP_a (laminar)	$\frac{48LV\mu_r}{(D_s - D_j)^3} + \frac{4\tau_p L}{D_s - D_j}$ $\frac{192LQ\mu_r}{4(D_s + D_j)(D_s - D_j)^3} + \frac{4\tau_p L}{D_s - D_j}$	$\frac{LV\mu_r}{59851(D_s - D_j)^3} + \frac{\tau_p L}{300(D_s - D_j)}$ $\frac{LQ\mu_r}{2442(D_s + D_j)(D_s - D_j)^3} + \frac{\tau_p L}{300(D_s - D_j)}$	$\frac{LV\mu_r}{80643(D_s - D_j)^3} + \frac{\tau_p L}{1324(D_s - D_j)}$ $\frac{LQ\mu_r}{40483(D_s + D_j)(D_s - D_j)^3} + \frac{\tau_p L}{1324(D_s - D_j)}$
(4) ΔP_a (turbulento)	$\frac{0.1275L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu_r^{0.2}}{(D_s - D_j)^{4.8}}$ $\frac{1.5465L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu_r^{0.2}}{d^{1.8}(D_s + D_j)^{1.8}(D_s - D_j)^{4.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu_r^{0.2}}{2519939(D_s - D_j)^{4.8}}$ $\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu_r^{0.2}}{7832(D_s + D_j)^{1.8}(D_s - D_j)^{4.8}}$	$\frac{L\rho^{0.8}V^{1.8}\mu_r^{0.2}}{240413(D_s - D_j)^{4.8}}$ $\frac{L\rho^{0.8}Q^{1.8}\mu_r^{0.2}}{70896(D_s + D_j)^{1.8}(D_s - D_j)^{4.8}}$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1

TABLA XI
 FLUIDOS BINGHAM, CIRCULACION EN INSTALACIONES SUPERFICIALES

TIPO DE ARREGLO	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES *
I. Tubo vertical 40 pie - 3 pg D1 Cuello de ganso 40 pie - 3 pg D1 Unión giratoria 4 pie - 2 pg D1 Flecha 40 pie - 2 1/4 pg D1	$\Delta P_s = 2.525 \cdot 10^{-6} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}$	$\Delta P_s = 8.790 \cdot 10^{-6} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}$
II. Tubo vertical 40 pie - 3 1/2 pg D1 Cuello de ganso 55 pie - 2 1/2 pg D1 Unión giratoria 5 pie - 2 1/2 pg D1 Flecha 40 pie - 3 1/4 pg D1	$\Delta P_s = 9.619 \cdot 10^{-6} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}$	$\Delta P_s = 3.298 \cdot 10^{-6} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}$
III. Tubo vertical 45 pie - 4 pg D1 Cuello de ganso 55 pie - 3 pg D1 Unión giratoria 5 pie - 2 1/2 pg D1 Flecha 40 pie - 3 1/4 pg D1	$\Delta P_s = 5.335 \cdot 10^{-6} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}$	$\Delta P_s = 1.829 \cdot 10^{-6} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}$
IV. Tubo vertical 45 pie - 4 pg D1 Cuello de ganso 55 pie - 3 pg D1 Unión giratoria 6 pie - 3 pg D1 Flecha 40 pie - 4 pg D1	$\Delta P_s = 4.163 \cdot 10^{-6} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}$	$\Delta P_s = 1.427 \cdot 10^{-6} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1

TABLA XII
FLUIDOS LEY DE POTENCIA, CIRCULACION EN TUBERIA DE PERFORACION

PARAMETROS A DEFINIRSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS *
(1) V_c	$\left[\frac{(1470 - 1370n)K}{8\rho} \right]^{1/2} \left[\frac{6n + 2}{Dn} \right]^{1/2}$	$1.949 \left[\frac{5(1470 - 1370n)K}{\rho} \right]^{1/2} \left[\frac{3n + 1}{1.27Dn} \right]^{1/2}$	$0.6 \left[\frac{(1470 - 1370n)K}{1.27\rho} \right]^{1/2} \left[\frac{3n + 1}{1.27Dn} \right]^{1/2}$
(2) Q_c	$\left[\frac{(1470 - 1370n)n^3 D^3 K}{128\rho} \right]^{1/2} \left[\frac{24n + 8}{\pi D^2 n} \right]^{1/2}$	$0.016 \left[\frac{128(1470 - 1370n)D^3 K}{\rho} \right]^{1/2} \left[\frac{3n + 1}{6.44D^2 n} \right]^{1/2}$	$0.06 \left[\frac{15.37(1470 - 1370n)D^3 K}{\rho} \right]^{1/2} \left[\frac{3n + 1}{6.44D^2 n} \right]^{1/2}$
(3) ΔP_L (laminar)	$\frac{4KL}{D} \left(\frac{V}{D} \frac{6n + 2}{n} \right)^n$ $\frac{4KL}{D} \left(\frac{Q}{\pi D^2} \frac{24n + 8}{n} \right)^n$	$\frac{KL}{300D} \left(\frac{0.4V}{D} \frac{3n + 1}{n} \right)^n$ $\frac{KL}{300D} \left(\frac{0.8Q}{D^2} \frac{3n + 1}{n} \right)^n$	$\frac{KL}{1326D} \left(\frac{1.31V}{D} \frac{3n + 1}{n} \right)^n$ $\frac{KL}{1326D} \left(\frac{2.59Q}{D^2} \frac{3n + 1}{n} \right)^n$
(4) ΔP_L (turbulento)	$\frac{(\log n + 2.5)\rho V^2 L}{25D} \left[\frac{K}{D} \left(\frac{V}{D} \frac{6n + 2}{n} \right) \right]^{1.4 - 0.02n}$ $\frac{320 \log n + 2.5 \rho Q^2 L}{50n^2 D^3} \left[\frac{\pi^2 D^3 K}{128Q^2} \left(\frac{Q}{D^2} \frac{24n + 8}{n} \right) \right]^{1.4 - 0.02n}$	$\frac{(\log n + 2.5)\rho V^2 L}{4643029 D} \left[\frac{19.36K}{\rho V^2} \left(\frac{0.4V}{D} \frac{3n + 1}{n} \right) \right]^{1.4 - 0.02n}$ $\frac{(\log n + 2.5)\rho Q^2 L}{7732D^3} \left[\frac{D^3 K}{3103Q^2} \left(\frac{0.8Q}{D^2} \frac{3n + 1}{n} \right) \right]^{1.4 - 0.02n}$	$\frac{(\log n + 2.5)\rho V^2 L}{228600D} \left[\frac{K}{D} \left(\frac{1.31V}{D} \frac{3n + 1}{n} \right) \right]^{1.4 - 0.02n}$ $\frac{(\log n + 2.5)\rho Q^2 L}{38694D^3} \left[\frac{D^3 K}{1807Q^2} \left(\frac{2.59Q}{D^2} \frac{3n + 1}{n} \right) \right]^{1.4 - 0.02n}$

* Ver Sección 1.3, Capitulo 1

TABLA XIII
 FLUIDOS LEY DE POTENCIA, CIRCULACION EN ESPACIO ANULAR
 (Ecuaciones en unidades SI)

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES β 2
(1) V	$\left[\frac{(3470 - 1370n)K}{12 \cdot 0.8165\rho} \right]^{1/2} \left[\frac{8n+4}{(D_o - D_i)^n} \right]^{1/2}$
(2) Q	$\left[\frac{\pi^2(3470 - 1370n)(D_o + D_i)^2(D_o - D_i)^2 K}{12 \cdot 16 \cdot 0.8165\rho} \right]^{1/2} \left[\frac{32n+16}{\pi(D_o + D_i)(D_o - D_i)^2 n} \right]^{1/2}$
(3) ΔP_m (laminar)	$\frac{4KL}{D_o - D_i} \left(\frac{V}{D_o - D_i} \frac{8n+4}{n} \right)^n$ $\frac{4KL}{D_o - D_i} \left(\frac{Q}{\pi(D_o + D_i)(D_o - D_i)^2} \frac{32n+16}{n} \right)^n$
(4) ΔP_m (turbulento)	$\frac{32(\log n + 2.5)\rho^2 L}{25 \cdot 0.8165(D_o - D_i)} \left[\frac{K \left(\frac{V}{D_o - D_i} \frac{8n+4}{n} \right)^n}{12 \cdot 0.8165\rho^2} \right]^{1.4-0.1n}$ $\frac{32(\log n + 2.5)\rho^2 L}{30 \cdot 0.8165\pi^2(D_o + D_i)^2(D_o - D_i)^2} \left[\frac{\pi^2(D_o + D_i)^2(D_o - D_i)^2 K \left(\frac{Q}{\pi(D_o + D_i)(D_o - D_i)^2} \frac{32n+16}{n} \right)^n}{192 \cdot 0.8165Q^2\rho} \right]^{1.4-0.1n}$

TABLA XIII (cont.)
 FLUIDOS LEY DE POTENCIA, CIRCULACION EN ESPACIO ANULAR
 (Ecuaciones en unidades inglesas)

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES INGLESAS
(1) V_c	$1.969 \left[\frac{4.08(3470 - 1370n)K}{\rho} \right]^{1/2n} \left[\frac{2n+1}{0.64(D_o - D_i)^n} \right]^{1/n}$
(2) Q_c	$0.016 \left[\frac{104.74(3470 - 1370n)(D_o + D_i)^3(D_o - D_i)^3 K}{\rho} \right]^{1/2n} \left[\frac{2n+1}{3.22(D_o + D_i)(D_o - D_i)^3 n} \right]^{1/n}$
(3) Δf_{D_o} (laminar)	$\frac{KL}{300(D_o - D_i)} \left(\frac{0.8V}{D_o - D_i} \frac{2n+1}{n} \right)^n$ $\frac{KL}{300(D_o - D_i)} \left(\frac{19.6Q}{(D_o + D_i)(D_o - D_i)^3} \frac{2n+1}{n} \right)^n$
(4) Δf_{D_o} (turbulento)	$\frac{(\log n + 2.5)\rho V^3 L}{3792.669(D_o - D_i)^5} \left[\frac{15.81K \left(\frac{0.8V}{D_o - D_i} \frac{2n+1}{n} \right)^n}{\rho V^3} \right]^{1.4 + 0.1n}$ $\frac{(\log n + 2.5)\rho Q^3 L}{6314(D_o + D_i)^3(D_o - D_i)^5} \left[\frac{(D_o + D_i)^3(D_o - D_i)^3 K \left(\frac{19.6Q}{(D_o + D_i)(D_o - D_i)^3} \frac{2n+1}{n} \right)^n}{38\rho Q^3} \right]^{1.4 + 0.1n}$

TABLA XIII (fin)
 FLUIDOS LEY DE POTENCIA. CIRCULACION EN ESPACIO ANULAR
 (Ecuaciones en otras unidades)

PARAMETROS A CALCULARSE	OTRAS UNIDADES *
(1) V_c	$0.6 \left[\frac{(3470 - 1370n)K}{205\rho} \right]^{1-n} \left[\frac{2n+1}{0.64(D_o - D_i)n} \right]^{1-\frac{n}{2}}$
(2) Q_c	$0.06 \left[\frac{12.55(3470 - 1370n)K(D_o + D_i)^2(D_o - D_i)^2}{\rho} \right]^{1-n} \left[\frac{2n+1}{3.22(D_o + D_i)(D_o - D_i)n} \right]^{1-\frac{n}{2}}$
(3) ΔP_{oL} (laminar)	$\frac{KL}{1326(D_o - D_i)} \left(\frac{2.62V_c}{D_o - D_i} \frac{2n+1}{n} \right)^n$ $\frac{KL}{1326(D_o - D_i)} \left(\frac{5.18Q_c}{(D_o + D_i)(D_o - D_i)^2} \frac{2n+1}{n} \right)^n$
(4) ΔP_{oT} (turbulento)	$\frac{(\log n + 2.5)\rho V_c^2 L}{186652(D_o - D_i)} \left[\frac{K \left(\frac{2.62V_c}{D_o - D_i} \frac{2n+1}{n} \right)^{1.4-0.04n}}{5.68\rho V_c^2} \right]^{1.4-0.04n}$ $\frac{(\log n + 2.5)\rho Q_c^2 L}{47923(D_o + D_i)^2(D_o - D_i)^2} \left[\frac{(D_o + D_i)^2(D_o - D_i)^2 K \left(\frac{5.18Q_c}{(D_o + D_i)(D_o - D_i)^2} \frac{2n+1}{n} \right)^{1.4-0.04n}}{22.13Q_c^2 \rho} \right]^{1.4-0.04n}$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1.

TABLA XIV

FLUIDOS LEY DE POTENCIA-CIRCULACION EN INSTALACIONES SUPERFICIALES.
(ECUACIONES EN UNIDADES INGLESAS).

TIPO DE EQUIPO	UNIDADES INGLESAS
I. Tubo vertical 40 pie .3 pg DI Cuello de ganso 40 pie .2 pg DI Unión giratoria 4 pie .2 pg DI Flecha 40 pie .2 1/4 pg DI	$\Delta P_s = 2.888 \cdot 10^{-4} (\log n + 2.5) \rho Q^3 \left[\frac{1.075K \left(\frac{Q}{1.416} \frac{3n+1}{n} \right)^{1.4-\log n}}{Q^2 \rho} \right]$
II. Tubo vertical 40 pie .3 1/4 pg DI Cuello de ganso 55 pie .2 1/4 pg DI Unión giratoria 5 pie .2 1/4 pg DI Flecha 40 pie .3 1/4 pg DI	$\Delta P_s = 1.036 \cdot 10^{-4} (\log n + 2.5) \rho Q^3 \left[\frac{2.61K \left(\frac{Q}{2.753} \frac{3n+1}{n} \right)^{1.4-\log n}}{Q^2 \rho} \right]$
III. Tubo vertical 45 pie .4 pg DI Cuello de ganso 55 pie .3 pg DI Unión giratoria 5 pie .2 1/4 pg DI Flecha 40 pie .3 1/4 pg DI	$\Delta P_s = 5.584 \cdot 10^{-4} (\log n + 2.5) \rho Q^3 \left[\frac{4.118K \left(\frac{Q}{3.878} \frac{3n+1}{n} \right)^{1.4-\log n}}{Q^2 \rho} \right]$
IV. Tubo vertical 48 pie .4 pg DI Cuello de ganso 55 pie .3 pg DI Unión giratoria 6 pie .3 pg DI Flecha 40 pie .4 pg DI	$\Delta P_s = 4.3197 \cdot 10^{-4} (\log n + 2.5) \rho Q^3 \left[\frac{5.307K \left(\frac{Q}{4.691} \frac{3n+1}{n} \right)^{1.4-\log n}}{Q^2 \rho} \right]$

TABLA XIV (fin)
 FLUIDOS LEY DE POTENCIA, CIRCULACION EN INSTALACIONES SUPERFICIALES
 (Ecuaciones en otras unidades)

TIPO DE ARREGLO	O T R A S U N I D A D E S *
I. Tubo vertical 40 pie . 3 pg D1 Cuello de ganso 40 pie . 2 pg D1 Unión giratoria 4 pie . 2 pg D1 Flecha 40 pie . 2 1/4 pg D1	$\Delta P_s = 1.1597 \cdot 10^{-6} (\log n + 2.5) \rho Q^2 \left[\frac{1.846K \left(\frac{Q}{5.359} \frac{3n+1}{n} \right)^{1.4}}{Q^{1.4} \rho} \right]^{1.4 - \log n}$
II. Tubo vertical 40 pie . 3 1/2 pg D1 Cuello de ganso 55 pie . 2 1/2 pg D1 Unión giratoria 5 pie . 2 1/2 pg D1 Flecha 40 pie . 3 1/4 pg D1	$\Delta P_s = 4.159 \cdot 10^{-6} (\log n + 2.5) \rho Q^2 \left[\frac{4.483K \left(\frac{Q}{10.425} \frac{3n+1}{n} \right)^{1.4}}{Q^{1.4} \rho} \right]^{1.4 - \log n}$
III. Tubo vertical 45 pie . 4 pg D1 Cuello de ganso 55 pie . 3 pg D1 Unión giratoria 5 pie . 2 1/2 pg D1 Flecha 40 pie . 3 1/4 pg D1	$\Delta P_s = 2.2424 \cdot 10^{-6} (\log n + 2.5) \rho Q^2 \left[\frac{7.071K \left(\frac{Q}{14.673} \frac{3n+1}{n} \right)^{1.4}}{Q^{1.4} \rho} \right]^{1.4 - \log n}$
IV. Tubo vertical 45 pie . 4 pg D1 Cuello de ganso 55 pie . 3 pg D1 Unión giratoria 4 pie . 3 pg D1 Flecha 40 pie . 4 pg D1	$\Delta P_s = 1.7347 \cdot 10^{-6} (\log n + 2.5) \rho Q^2 \left[\frac{9.112K \left(\frac{Q}{17.748} \frac{3n+1}{n} \right)^{1.4}}{Q^{1.4} \rho} \right]^{1.4 - \log n}$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1.

TABLA XV
 PERDIDAS DE PRESION A TRAVES DE LAS TOBERAS

UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES*
$\Delta P_s = \frac{\rho V^2}{1.975 C_d^2}$	$\Delta P_s = \frac{\rho V^2}{4403.479 C_d^2}$	$\Delta P_s = \frac{\rho V^2}{711.000 C_d^2}$
$\Delta P_s = \frac{\rho Q^2}{1.975 C_d^2 A^3}$	$\Delta P_s = \frac{\rho Q^2}{11884 C_d^2 A^3}$	$\Delta P_s = \frac{\rho Q^2}{295941 C_d^2 A^3}$

C_d = Coeficiente de tobera.
 $C_d = 0.80$ para una barrena convencional.
 $C_d = 0.95$ para una barrena tipo corno.
 * Ver Sección 1.3 , Capítulo 1

CAPITULO 5

Variaciones de presión y elevación de recortes.

5.1. Variaciones de presión durante la introducción o extracción de la tubería.

Al mover una sarta de perforación o de T.R. dentro de un pozo, ocurre un cierto desplazamiento del lodo, el cual se ve acompañado con cambios de presión.

Dependiendo de la dirección de este desplazamiento, estos cambios pueden sumarse a la presión ejercida por el lodo y provocar una presión de surgencia, o de lo contrario pueden actuar en dirección opuesta y provocar un efecto de sonda. Dichas variaciones de presión, pueden así disminuir el grado de estabilidad de la pared del pozo y aun más provocar un brote imprevisto o la pérdida de circulación.

Las variaciones de presión pueden evaluarse en forma aproximada mediante el método utilizado en el cálculo de las caídas de presión.

5.1.1. Aplicación de presión a un lodo gelatinizado.

Si un lodo se deja en reposo, un gel se formará debido a su inherente tixotropía, y entonces una determinada presión deberá aplicarse para romper el gel y reestablecer de esta manera la fluidez del lodo. Si el esfuerzo gel es g_t (esfuerzo gel de tiempo largo), como el determinado en el viscosímetro Fann; la presión, la cual debe aplicarse para reestablecer la circulación del lodo, puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$P_r = \frac{4 g_t L}{D_o - D_i}$$

donde

g_t = esfuerzo gel de tiempo largo ($g_t > g_{10}$) (Pa).

L = Longitud de la sección (m).

D_o = Diámetro del pozo (m).

D_i = Diámetro exterior de la sarta (m).

P_r = Presión (Pa).

Desafortunadamente, el esfuerzo gel determinado en la superficie no puede ser completamente representativo del esfuerzo gel efectivo que ocurre dentro del pozo, especialmente si la gelatinización del lodo tiene lugar bajo la influencia de calor.

El operador debe asegurarse de que el movimiento del lodo, a partir del reposo (movimiento de la sarta de perforación o arranque de la bomba) no produzca una sobrepresión peligrosa, de ser posible el gel deberá romperse mediante la rotación de la sarta, antes de que inicie la circulación del lodo.

5.1.2. Variaciones de presión durante el movimiento de la tubería.

El movimiento de la sarta de perforación origina el desplazamiento del lodo, el cual a su vez es el causante de las variaciones de presión. Si se conocen las velocidades de desplazamiento a través de las diferentes secciones del espacio anular, entonces se podrán utilizar de igual forma para su cálculo, las ecuaciones generales que se utilizan en la determinación de las pérdidas por presión que ocurren durante la circulación de un fluido.

5.1.2.1. Velocidad teórica de desplazamiento del lodo.

La velocidad de desplazamiento dependerá de la velocidad con que se mueve la tubería y de la geometría involucrada (el lodo puede moverse por dentro de una sarta abierta, pero no en una sarta cerrada). Considerando que la velocidad de flujo del lodo, es igual al volumen de sarta desplazada por unidad de tiempo; se encuentra que:

(a) Para una sarta cerrada.

$$V_{L.T.} = \frac{V_p \cdot D_s^2}{D_o^2 - D_s^2} + \frac{V_p}{2}$$

$$V_{L.T.} = V_p \left[\frac{D_s^2}{D_o^2 - D_s^2} + \frac{1}{2} \right]$$

donde

$V_{L.T.}$ = Velocidad teórica del lodo (m/s).

V_p = Velocidad de la sarta (m/s).

(b) Para una sarta abierta con un llenado total.

Este es el caso de una sarta sin barrena o de una T.R. abierta. Un llenado diferencial de la T.R., no debe considerarse como una sarta abierta.

$$V_{L.T.} = \frac{V_p (D_s^2 - D^2)}{D_o^2 - D_s^2 + D^2} + \frac{V_p}{2}$$

$$V_{L.T.} = V_p \left[\frac{D_s^2 - D^2}{D_o^2 - D_s^2 + D^2} + \frac{1}{2} \right]$$

5.1.2.2. Velocidad de desplazamiento del lodo.

En la práctica, la velocidad de desplazamiento del lodo que se utiliza en las ecuaciones para el cálculo de las pérdidas de presión, es ligeramente diferente de la velocidad teórica, a medida que una sarta en movimiento deforma el perfil de velocidad (fig. 18).

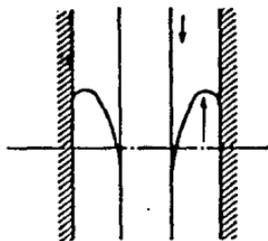


Fig. 18 - Deformación del perfil de velocidad, para el caso de una sarta en movimiento.

Las ecuaciones equivalentes promedio, se estiman de la siguiente manera:

$$V_m = V_p \left[\frac{D_s^2}{D_o^2 - D_s^2} + k \right]$$

y

$$V_m = V_p \left[\frac{D_s^2 - D^2}{D_o^2 - D_s^2 + D^2} + k \right]$$

donde

V_m = Velocidad equivalente de desplazamiento del lodo.

k = Es una función de la relación D_s/D_o y del tipo de flujo.

Para determinar el valor de k se utiliza la gráfica de la figura 19. Un valor promedio de k es

$$k = 0.45$$

Debido a que la velocidad de la sarta no es constante, se cree que en promedio la velocidad máxima del fluido es 1.5 veces la velocidad equivalente promedio.

$$V_m = 1.5 V_w$$

5.1.2.3. Cálculo de las presiones de surgencia.

Dependiendo, ya sea de que se maneje un fluido Bingham o una ley de potencia, y además del tipo de flujo (laminar o turbulento) correspondiente a la velocidad equivalente del lodo, se utilizarán las ecuaciones apropiadas para el cálculo de las pérdidas de presión (capítulo anterior: Tabla VI ó Tablas X y XIII, las cuales vienen para varios sistemas de unidades) y la densidad equivalente de circulación (sección 5.1.5.).

Desde luego, las presiones de surgencia se suman de la misma forma que las pérdidas de presión, y deben determinarse para cada sección del espacio anular. Sin embargo como ya se dijo, no es sencillo seleccionar los valores de los parámetros reológicos que se utilizarán en estas ecuaciones, debido a que sus valores determinados en la superficie no son completamente representativos, ya que las condiciones que existen en el pozo difieren de aquellas que se tienen en la superficie.

5.1.3. Efecto de las fuerzas de inercia.

Una presión de surgencia se produce inmediatamente después de empezar la circulación, debido a que la columna de lodo se opone a los cambios en la velocidad de desplazamiento, durante el período de aceleración. En forma similar, se produce la presión de sonda durante la etapa de desaceleración, justamente antes de que el movimiento del lodo sea suspendido.

Esta variación de presión, causada por los efectos inerciales, se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P = \frac{L \rho D_1^2 a_p}{D_o^2 - D_1^2}, \text{ para una sarta cerrada.}$$

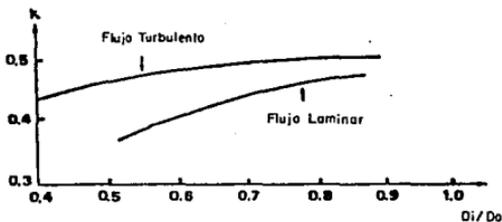


Fig. 19 - VALORES DE K :

$$\Delta P = \frac{L \rho (D_1^2 - D^2) a_p}{D_o^2 - D_1^2 + D^2}, \text{ para una sarta abierta.}$$

En estas ecuaciones a_p , es la aceleración ($a_p > 0$) o desaceleración ($a_p < 0$). Por lo general estos efectos inerciales son de mayor magnitud que la presión de ruptura del gel; y mucho mayor aún cuando las aceleraciones son repentinas.

5.1.4. Breve resumen del cálculo de las variaciones de presión, en varios sistemas de unidades.

La Tabla XVI deberá utilizarse para calcular:

- La presión de surgencia, correspondiente al rompimiento del gel.
- Las variaciones de presión, ocasionadas por los efectos inerciales.

Las variaciones de presión originadas por desplazamiento del lodo (el cual ocurre tanto en la introducción como en la extracción de tubería), se calculan siguiendo el procedimiento indicado en el diagrama de flujo no. 1.

Debe tenerse presente que:

- Para la introducción de la sarta de perforación, el signo de ΔP_s es positivo (presión de surgencia).
- Para la extracción de la sarta de perforación, el signo de ΔP_s es negativo (presión de sondeo).

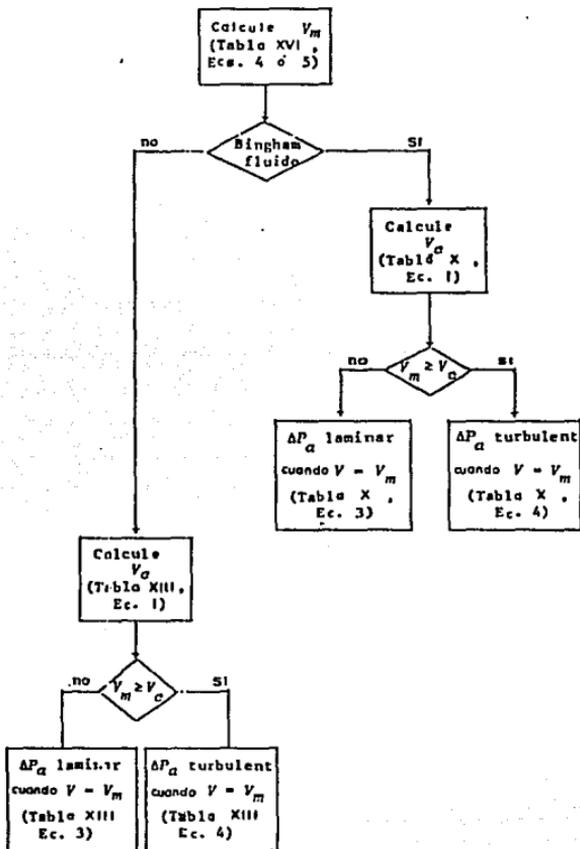
TABLA XVI
PRESIÓN DE SURGENCIA Y SONDEO DEBIDA A MOVIMIENTOS DE LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI'	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES*
(1) P_s	$\frac{4g_s L}{D_o - D_1}$	$\frac{g_s L}{300(D_o - D_1)}$	$\frac{g_s L}{1320(D_o - D_1)}$
(2) ΔP_f	$\frac{L \rho D_1^2 a_p}{D_1^2 - D_1^2}$	$\frac{L \rho D_1^2 a_p}{619(D_1^2 - D_1^2)}$	$\frac{L \rho D_1^2 a_p}{100(D_1^2 - D_1^2)}$
(3) ΔP_s	$\frac{L \rho (D_1^2 - D^2) a_p}{D_1^2 - D_1^2 + D^2}$	$\frac{L \rho (D_1^2 - D^2) a_p}{619(D_1^2 - D_1^2 + D^2)}$	$\frac{L \rho (D_1^2 - D^2) a_p}{100(D_1^2 - D_1^2 + D^2)}$
(4) V_{sw}	$1.5V_s \left(\frac{D_1^2}{D_1^2 - D_1^2} + 0.45 \right)$	$1.5V_s \left(\frac{D_1^2}{D_1^2 - D_1^2} + 0.45 \right)$	$1.5V_s \left(\frac{D_1^2}{D_1^2 - D_1^2} + 0.45 \right)$
(5) V_{so}	$1.5V_s \left(\frac{D_1^2 - D^2}{D_1^2 - D_1^2 + D^2} + 0.45 \right)$	$1.5V_s \left(\frac{D_1^2 - D^2}{D_1^2 - D_1^2 + D^2} + 0.45 \right)$	$1.5V_s \left(\frac{D_1^2 - D^2}{D_1^2 - D_1^2 + D^2} + 0.45 \right)$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1

DIAGRAMA DE FLUJO 1

CALCULO DE LAS VARIACIONES DE PRESION DEBIDAS AL DESPLAZAMIENTO DEL LODO DURANTE LA EXTRACCION O INTRODUCCION DEL EQUIPO



5.1.5. Densidad equivalente del lodo.

Durante la circulación del lodo, la presión P^1 en el espacio anular a una profundidad L es la suma de dos términos:

(a) La presión hidrostática ejercida por el lodo a la profundidad L (P_H).

(b) Las pérdidas de presión debidas al movimiento del lodo, ocurridas entre la profundidad L y la superficie (ΔP_a).

Por lo tanto:

$$P^1 = P_H + \Delta P_a$$

5.1.5.1. Presión hidrostática (P_H).

Esta se define mediante la siguiente ecuación:

$$P_H = \rho_{cl} g L$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

El término ρ_{cl} (densidad del fluido), incluye los recortes transportados por el lodo. A continuación se verá como se determina; para ello es necesario definir la siguiente simbología:

- q_d = Volumen de recortes perforados por unidad de tiempo,
- D_r = Diámetro de la barrena,
- A_v = Velocidad de perforación,
- M_d = Peso de los recortes perforados por unidad de tiempo. Se considera que su densidad es de 2500 Kg/m³,
- Q = Gasto de inyección,
- ρ = Densidad del lodo,
- ρ_{cl} = Densidad del lodo incluyendo los recortes.

Por lo tanto se tiene:

$$q_d = \frac{\pi D_r^2 A_v}{4}$$

$$M_d = 2.5 q_d$$

$$\rho_{cl} = \frac{\rho (Q - q_d) + M_d}{Q}$$

$$\rho_{cl} = \rho + \frac{q_d (2.5 - \rho)}{Q}$$

5.1.5.2. Pérdidas de presión en el espacio anular: ΔP_a .

Las pérdidas de presión se calculan utilizando las ecuaciones que aparecen en la sección 4.2., del capítulo anterior (Tabla VI).

5.1.5.3. Densidad equivalente de circulación y densidad relativa equivalente de circulación.

Las dimensiones de la densidad son ML^{-3} .

La densidad relativa es adimensional y se obtiene dividiendo la densidad del fluido entre la densidad del agua.

La densidad equivalente de circulación, se define como aquella densidad que es capaz de ejercer bajo condiciones estáticas, la misma presión que se tenga a una determinada profundidad L, en condiciones dinámicas.

De acuerdo a lo anterior, la densidad equivalente de circulación es:

$$\rho' = \frac{P^1}{g L} + \rho_w + \frac{\Delta P_w}{g L}$$

Para facilitar su cálculo, la Tabla XVII trae ésta expresión en varios sistemas de unidades.

En el SI, la densidad relativa equivalente del lodo se obtiene dividiendo la densidad equivalente del lodo entre 1000; esto debido a que en el SI la densidad del agua es 1000 Kg/m^3 .

La densidad equivalente de circulación puede calcularse en el fondo del pozo, o a cualquier profundidad. De preferencia se desea, que la diferencia entre ésta y la densidad verdadera del lodo sea lo más pequeña posible. Esto garantiza que la diferencia de presión entre las condiciones estáticas y dinámicas sea más pequeña y por lo tanto las pérdidas de presión también sean mínimas.

TABLA XVII

DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACION Y DENSIDAD RELATIVA EQUIVALENTE DE CIRCULACION

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES *
P_s	$\rho + \frac{\pi D^2 A (2500 - \rho)}{4Q}$	$\rho + \frac{6.80 \cdot 10^{-4} D^2 A (20.86 - \rho)}{Q}$	$\rho + \frac{8.45 \cdot 10^{-3} D^2 A (2.5 - \rho)}{Q}$
P_b	$10 \rho L$	$0.0529 \rho L$	$\frac{\rho L}{10}$
ρ'	$\rho + \frac{\Delta P_s}{10L}$	$\rho_w + \frac{18.87 \Delta P_s}{L}$	$\rho_w + \frac{10 \Delta P_s}{L}$
DENSIDAD RELATIVA EQUIVALENTE DE CIRCULACION	$\frac{\rho_s}{1000} + \frac{\Delta P_s}{10000L}$	$0.119829 \rho_s + \frac{2.76 \Delta P_s}{L}$	$\rho_s + \frac{10 \Delta P_s}{L}$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1

5.2. Elevación de recortes.

5.2.1. Limpieza del pozo.

Una de las funciones del lodo de perforación es conservar el pozo limpio, mediante una remoción apropiada de los recortes; pero debe de hacerse de tal forma, que la erosión en las paredes del pozo sea mínima. Estos dos problemas - Limpieza y Erosión - se verán a continuación.

5.2.1.1. Limpieza del pozo.

Se deben considerar dos etapas:

- (a) La entrada de los recortes hacia la corriente del lodo.
- (b) El levantamiento de los recortes hasta la superficie, con dirección a la unidad de separación.

5.2.1.1.1. Entrada de los recortes hacia la corriente del lodo.

Es bien importante, evitar que los fragmentos de roca quebrados por la barrena caigan al fondo del pozo. La separación de los recortes en el fondo del pozo, se ve favorecida por :

- (a) Una pequeña presión diferencial.
- (b) Un volumen de fluido grande (filtrado), y una tensión interfacial pequeña, que asegura una mejor penetración del líquido, tanto en los recortes y virutas de los mismos como en el fondo del pozo.
- (c) Un diseño adecuado de toberas; ya que de esta manera se logra impartir al lodo la suficiente energía para que arrastre a los recortes.

5.2.1.1.2. Levantamiento de los recortes en el espacio anular.

En este caso el problema no es sencillo, por el contrario es muy complejo.

A. Consideraciones cualitativas.

Ya en el espacio anular, sobre los recortes actúa:

- (i) El ascenso helicoidal del flujo de lodo.
- (ii) La fuerza de gravedad.
- (iii) La fuerza centrífuga.
- (iv) A menos que los recortes sean esféricos, también estarán sujetos a un efecto de torsión (Fig. 20), el cual depende del tamaño y forma de los recortes, de su velocidad, perfil y posición en el espacio anular.

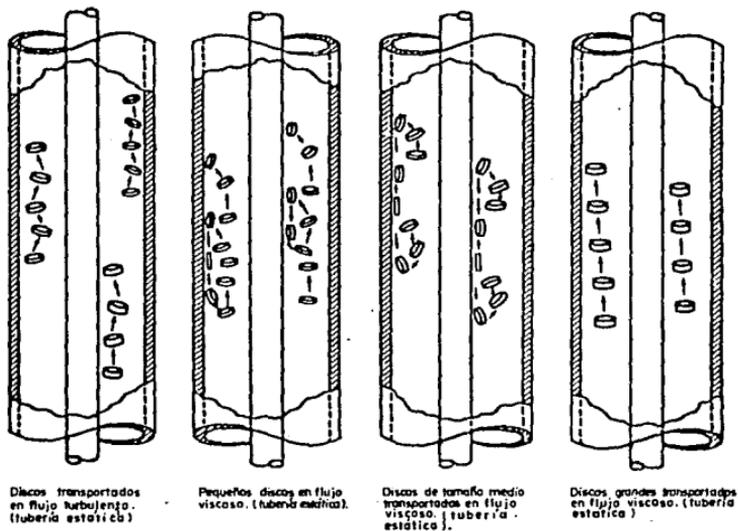


Fig. 20.- ELEVACION DE RECORTES EN UN LODO DE PERFORACION.

B. Consideraciones cuantitativas.

a. Cálculo de la velocidad de levantamiento de un recorte V_r .

Solamente una solución aproximada se puede obtener, debido a lo complejo del problema.

V_r se calcula mediante la ecuación:

$$V_r = V_b - V_w$$

donde:

V_b = Velocidad promedio con que sube el lodo a la superficie.

V_w = Velocidad final de asentamiento de los recortes o velocidad de resbalamiento,

V_r = Velocidad de levantamiento de los recortes.

b. Cálculo de la velocidad de resbalamiento V_s .

La ecuación que se utilice en el cálculo de V_s , debe involucrar el tipo de patrón de flujo que ocurre alrededor de la partícula; éste se caracteriza por:

- (i) La forma con que se resbala la partícula.
- (ii) El tipo de flujo.

En realidad todavía no se ha podido encontrar una solución satisfactoria que resuelva el problema.

c. Velocidad de resbalamiento de una partícula sólida en fluido en reposo.

1. El volumen de fluido considerado es infinitamente grande.

Una sinopsis de los métodos y ecuaciones (en unidades consistentes) que se utilizan (considerando varias formas de resbalamiento de las partículas), vienen definidas en la Tabla XVIII. El significado de los símbolos utilizados en la Tabla es el siguiente:

- v = Volumen de la partícula.
- s = Área proyectada (es decir, área que proyecta la partícula sobre un plano perpendicular a la dirección del movimiento (fig. 21)).
- f_p = Densidad de la partícula.
- f_L = Densidad del líquido.
- μ = Viscosidad del líquido.
- g = Aceleración de la gravedad.
- C_r = Coeficiente de resistencia.

Si la partícula no es esférica, su diámetro equivalente, es decir, el diámetro de una esfera que tiene un volumen igual a v , se determina mediante:

$$\bar{d}_p = \left[\frac{6v}{\pi} \right]^{1/3}$$

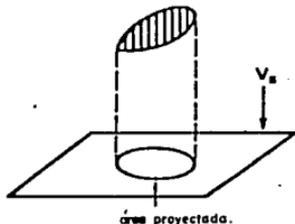
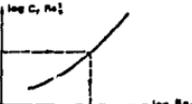


Fig. 21.

TABLA XVIII
VELOCIDAD DE RESBALAMIENTO DE UNA PARTICULA EN UN FLUIDO EN REPOSO

EJACION GENERAL : $V_s = \sqrt{\frac{2(\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} g \frac{r}{C_r}} \quad (1)$		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> FLUJO LAMINAR $Re_s < 0.2$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> TIPO DE FLUJO INTERMEDIO $0.2 < Re_s < \begin{matrix} 300 \\ 1000 \end{matrix}$ (DE ACUERDO A LA FORMA DE LA PARTICULA) </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> FLUJO TURBULENTO $Re_s > \begin{matrix} 300 \\ 1000 \end{matrix}$ </div>
$C_r < \frac{k_1}{Re_s} \quad (2)$	$C_r = f(V_s, \rho_p, \rho_s, \mu)$ $C_r Re_s^2 = f(\varphi_p, \rho_s, \rho_l, \mu, \text{forma})$	$C_r = k_1 \quad (5)$
$k_1 = \text{CONSTANTE PARA UNA DETERMINADA FORMA.}$	INDEPENDIENTE DE V_s	$k_1 = \text{CONSTANTE PARA UNA DETERMINADA FORMA.}$
(1)(2) $\rightarrow V_s \quad (3)$		(1)(5) $\rightarrow V_s \quad (6)$
PARA UNA ESPERA CON DIAMETRO d $k_1 = 24$ $V_s = \frac{(\rho_s - \rho_l)gd^2}{18\mu}$ (FORMULA DE STOKES)		PARA UNA ESPERA CON DIAMETRO d $k_1 = 0.45$ $V_s = 1.72 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} gd}$
PARA UN CILINDRO RECTO : $k_1 \approx 40$ $V_s = \frac{(\rho_s - \rho_l)g\varphi_p^2}{30\mu}$	$C_r Re_s^2 \rightarrow Re_s \rightarrow V_s \quad (4)$ METODO APROXIMADO PARA UN CILINDRO RECTO : $C_r = \frac{22}{\sqrt{Re_s}}$ $V_s = \frac{0.154[(\rho_s - \rho_l)g]^{0.447} \varphi_p}{\rho_l^{0.333} \mu^{0.333}}$	PARA UN CILINDRO RECTO : $k_1 \approx 1.5$ $V_s = 0.94 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} g\varphi_p}$

Una de las dificultades involucradas en el cálculo de la velocidad de asentamiento en un fluido no-Newtoniano, es la selección del valor de la viscosidad. Dicho cuestionamiento se verá en el párrafo d.

2. Corrección de la velocidad de resbalamiento por el efecto de las paredes.

Para involucrar este efecto, diversas ecuaciones han sido encontradas, las cuales toman en cuenta el diámetro de la partícula \bar{x}_p y el diámetro del espacio anular.

Para flujo turbulento se tiene:

$$V_w \text{ (corregida)} = \frac{V_w}{1 + (\bar{x}_p/\bar{x}_a)}$$

donde \bar{x}_a es el diámetro hidráulico del espacio anular ($\bar{x}_a = D_o - D_i$).

Para cuando el asentamiento de las partículas ocurre en un tubo de diámetro D y bajo la acción de un tipo de flujo intermedio; se tiene:

$$V_w \text{ (corregida)} = F_r V_w$$

donde

$$F_r = \frac{D - 1.6 \bar{x}_p}{D - \bar{x}_p}$$

Sin embargo no se señala, si D cambia su valor cuando el asentamiento ocurre en un espacio anular:

$$D \approx \bar{x}_a = D_o - D_i$$

ó

$$D \approx \frac{\bar{x}_p}{2} = \frac{D_o - D_i}{2}$$

- d. Velocidad de resbalamiento en un fluido en movimiento.

El tipo de viscosidad a introducirse, dentro de las ecuaciones mencionadas anteriormente, puede ser:

(i) La viscosidad equivalente μ_e , que resulta cuando el fluido esta en movimiento.

(ii) La viscosidad equivalente μ_w , que resulta del movimiento de la partícula.

1. En el primer caso, μ_e puede calcularse mediante dos métodos:

(a) μ_e es igual a la viscosidad equivalente μ_w , como la definida en el capítulo 3.

(b) μ_e es igual a la viscosidad promedio, la cual considera el efecto de rotación de la tubería de perforación. Este valor se obtiene

promediando 7 valores diferentes de viscosidad, los cuales a su vez se obtienen para cada punto, de los 7 puntos iguales en que se divide el grosor del espacio anular.

2. En el último caso, la viscosidad equivalente μ_w , se deriva según el esfuerzo de corte y velocidad de corte que resultan del resbalamiento de la partícula. Sin embargo todavía, para este caso, no hay definiciones válidas del esfuerzo y velocidad de corte.

Para propósitos prácticos, se recomienda utilizar el valor más pequeño entre μ_w y μ_s , en las ecuaciones para V_w . La Tabla XIX recomienda métodos para su cálculo, los cuales pueden utilizarse, dependiendo del tipo de flujo y formas de resbalamiento de los recortes.

TABLA XIX
VELOCIDAD DE RESBALAMIENTO PARA FLUIDOS EN MOVIMIENTO

PATRON DE FLUJO	RESBALAMIENTO	$\frac{\mu_s}{\mu_w}$	TIPO DE VISCOSIDAD	ECUACION A UTILIZARSE PARA V_w (TABLA XVIII)
LAMINAR	LAMINAR	> 1	μ_s	(3)
	INTERMEDIO	< 1	μ_w	(4)
	TURBULENTO	< 1	μ_w	(6)
TURBULENTO	LAMINAR			(6)
	INTERMEDIO			(6)
	TURBULENTO			(6)

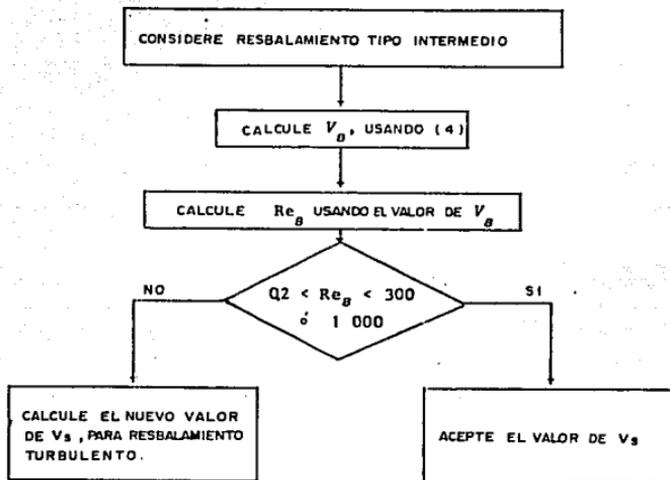
e. Procedimiento para el cálculo de V_w .

Para calcular V_w , se debe seleccionar una ecuación que se ajuste, tanto a la forma de resbalamiento, como al Número de Reynolds Re_i y además sea función de sí misma.

En la práctica, las condiciones de levantamiento de los recortes en el espacio anular, son tales que el resbalamiento laminar nunca ocurre, siempre es turbulento o intermedio.

Si el flujo del lodo en el espacio anular es laminar, se observa en la Tabla XVIII, que la ecuación 4 ó 6 debe utilizarse para el tipo de resbalamiento intermedio o turbulento respectivamente.

El cálculo consiste de los siguientes pasos:



Nota: En otros problemas de sedimentación (problemas referentes al empacamiento de grava, fracturamiento hidráulico, etc.), en los cuales se involucra la caída de pequeñas partículas en fluidos más viscosos (comparándolos con los utilizados en perforación), el valor experimental de Re puede ser menor que 0.2. En estos casos la velocidad de resbalamiento se calcula mediante la ecuación 3 (zona de Stokes).

5.2.1.2. Determinación de la velocidad de elevación de recortes

Para facilitar el cálculo de la velocidad de levantamiento de los recortes, tanto en un fluido Bingham, como en un fluido Ley de potencia, se utilizarán los diagramas de flujo no. 2 y no. 3 respectivamente, los cuales difieren solamente en la forma en que se estima el tipo de flujo y en la forma en que se calcula la viscosidad equivalente.

Todas las ecuaciones utilizadas en estos diagramas de flujo, se pueden ver en las Tablas XX y XXI (en varios sistemas de unidades).

DIAGRAMA DE FLUJO 2

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE LEVANTAMIENTO DE LOS RECORTES EN UN FLUIDO BINGHAM.

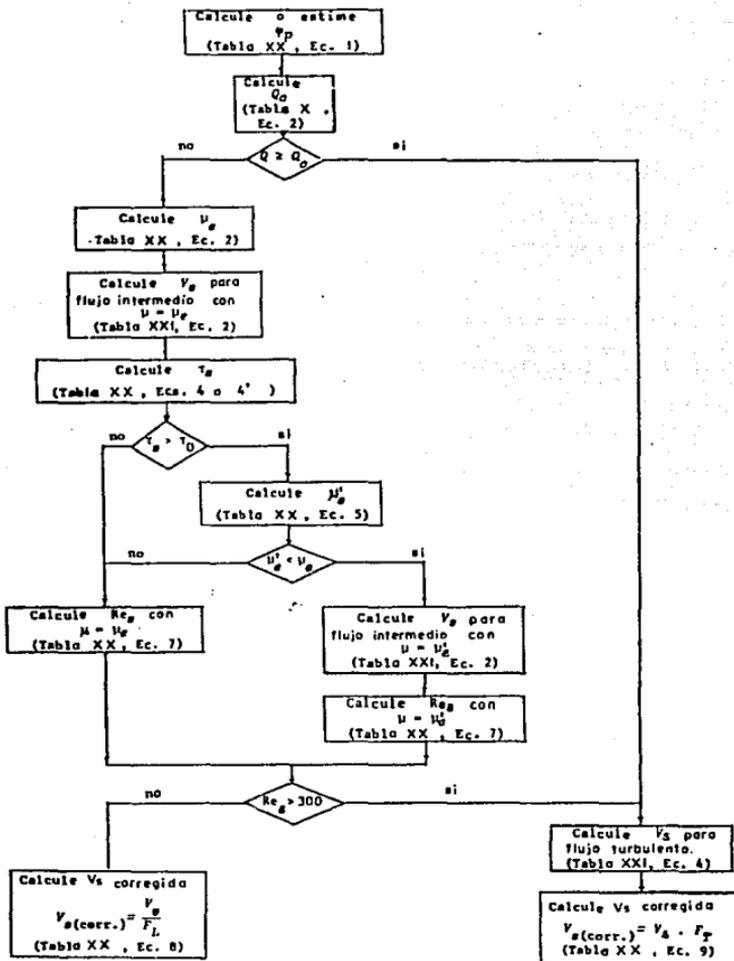


DIAGRAMA DE FLUJO 3

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE LEVANTAMIENTO DE LOS RECORTES EN UN FLUIDO LEY DE POTENCIA.

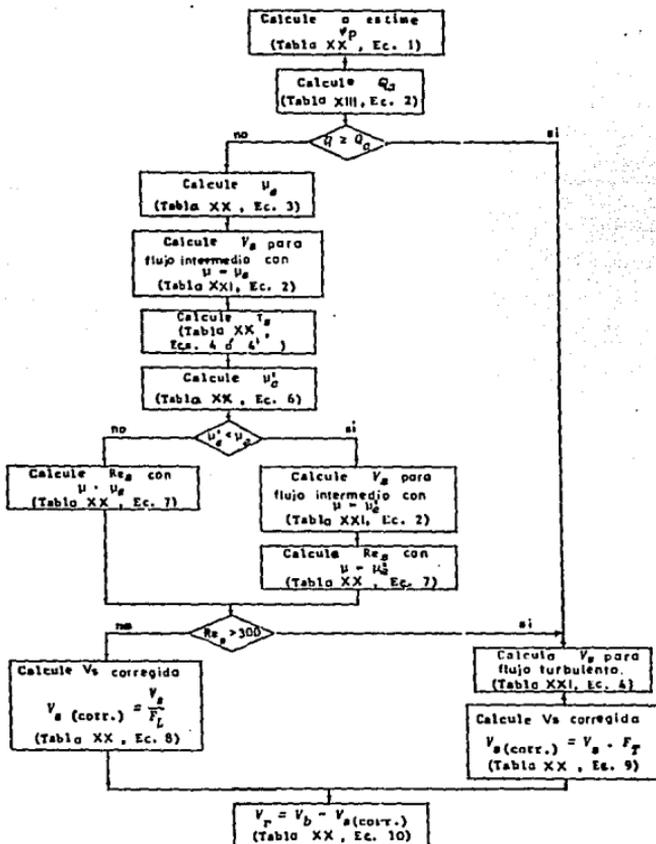


TABLA XX
LEVANTAMIENTO DE RECORTES EN UN ESPACIO ANULAR

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES *
(1) Φ_p (Para un disco)	$1.145 \sqrt{h d^2}$	$1.145 \sqrt{h d^2}$	$1.145 \sqrt{h d^2}$
(2) μ_p (Modelo de Bingham)	$\mu_p + \frac{\pi \tau_0 (D_o - D_i)^2 (D_o + D_i)}{48 Q}$	$\mu_p + \frac{8.14 \tau_0 (D_o - D_i)^2 (D_o + D_i)}{Q}$	$\mu_p + \frac{30.82 \tau_0 (D_o - D_i)^2 (D_o + D_i)}{Q}$
(3) μ_p (Modelo Ley de Potencia)	$K \left(\frac{48 Q}{\pi^2 (D_o - D_i)^2 (D_o + D_i)} \frac{2n + 1}{3n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$	$479 K \left(\frac{56.82 Q}{(D_o - D_i)^2 (D_o + D_i)} \frac{2n + 1}{3n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$	$479 K \left(\frac{15.54 Q}{(D_o - D_i)^2 (D_o + D_i)} \frac{2n + 1}{3n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$
(4) τ_s (Para un disco)	$2.169 \sqrt{h(\rho_s - \rho)}$	$7.9 \sqrt{h(\rho_s - \rho)}$	$4.53 \sqrt{h(\rho_s - \rho)}$
(4') τ_s (Para una esfera)	$1.77 \sqrt{d(\rho_s - \rho)}$	$6.45 \sqrt{d(\rho_s - \rho)}$	$3.7 \sqrt{d(\rho_s - \rho)}$
(5) μ'_p (Modelo de Bingham)	$\frac{\tau_s}{\tau_s - \tau_0} \mu_p$	$\frac{\tau_s}{\tau_s - \tau_0} \mu_p$	$\frac{\tau_s}{\tau_s - \tau_0} \mu_p$

* Ver Sección 1.3, Capítulo 1

TABLA XX (final)
LEVANTAMIENTO DE RECORTES EN UN ESPACIO ANULAR

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES *
(6) μ_c (Modelo Ley de Potencia)	$\frac{v_r}{\left(\frac{v_r}{K}\right)^{1/n}}$	$479 \frac{v_r}{\left(\frac{v_r}{K}\right)^{1/n}}$	$479 \frac{v_r}{\left(\frac{v_r}{K}\right)^{1/n}}$
(7) Re_c	$\frac{V_r \varphi_r \rho}{\mu}$	$\frac{15.46 V_r \varphi_r \rho}{\mu}$	$\frac{16.67 V_r \varphi_r \rho}{\mu}$
(8) F_L	$1 + \frac{\varphi_r}{D_o - D_i}$	$1 + \frac{\varphi_r}{D_o - D_i}$	$1 + \frac{\varphi_r}{25.4(D_o - D_i)}$
(9) F_T	$\frac{D_o - D_i - 1.6\varphi_r}{D_o - D_i - \varphi_r}$	$\frac{D_o - D_i - 1.6\varphi_r}{D_o - D_i - \varphi_r}$	$\frac{254(D_o - D_i) - 0.16\varphi_r}{254(D_o - D_i) - 0.1\varphi_r}$
(10) V_c	$\frac{4Q}{\pi(D_o^2 - D_i^2)} - V_i$	$\frac{24.51Q}{D_o^2 - D_i^2} - V_i$	$\frac{1.97Q}{D_o^2 - D_i^2} - V_i$

* Ver Sección 1.3., Capítulo 1

TABLA XXI
 VELOCIDAD DE RESBALAMIENTO DE LOS RECORTES EN UN ESPACIO ANULAR

PARÁMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES*
(1) V_c EQUACION GENERAL	$44.3 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \frac{1}{s C_r}}$	$139 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \frac{1}{s C_r}}$	$8.4 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \frac{1}{s C_r}}$
(2) V_c CILINDROS. FLUJO INTERMEDIO	$\frac{0.705(\rho_1 - \rho)^{0.467} \varphi_r}{\rho^{0.311} \mu^{0.311}}$	$\frac{174.2(\rho_1 - \rho)^{0.467} \varphi_r}{\rho^{0.311} \mu^{0.311}}$	$\frac{4.24(\rho_1 - \rho)^{0.467} \varphi_r}{\rho^{0.311} \mu^{0.311}}$
(3) V_c ESFERAS. FLUJO TURBULENTO.	$5.39 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \varphi_r}$	$169 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \varphi_r}$	$10.22 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \varphi_r}$
(4) V_c CILINDROS. FLUJO TURBULENTO.	$2.945 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \varphi_r}$	$92.37 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \varphi_r}$	$5.59 \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \varphi_r}$

* Ver sección 1.3, Capítulo 1

5.2.2. Esfuerzo mecánico de las paredes del pozo.

5.2.2.1. Causas de la erosión y desestabilidad de las paredes.

La erosión y la desestabilidad de las paredes puede deberse a varias causas:

- (a) Al esfuerzo del fluido de perforación contra la pared del pozo, durante la circulación.
- (b) Al efecto de succión, durante la extracción de la tubería.
- (c) A la excentricidad de la tubería con respecto al pozo.
- (d) Al choque de las partículas sólidas de lodo sobre las paredes.
- (e) A la interacción física y química que existe entre el lodo y la formación expuesta.
- (f) Al tiempo de contacto entre el lodo y la formación.

5.2.2.2. Efecto del patrón de flujo del lodo.

Se ha visto que el patrón de flujo tiene un mayor efecto sobre la estabilidad de las paredes del pozo. En base a ésta y al esfuerzo de corte τ_p , se definió un índice de erosión (EI) en la pared del pozo.

Debido a que el tipo de flujo se caracteriza mediante el Número de Reynolds, se tiene que:

- (a) Para flujo laminar ($Re < Rec$)

$$EI = k \tau_p$$

- (b) Para flujo turbulento ($Re > Rec$)

$$EI = (k \tau_p)^2$$

donde τ_p , esta en pascales y $k = 0.1$

τ_p se calcula tomando en cuenta la rotación de la tubería, como:

$$\tau_p = (\tau_{rz}^2 + \tau_{r\theta}^2)^{1/2}$$

donde:

τ_{rz} es el componente axial del esfuerzo de corte; el cual varía con la pérdida de presión.

$\tau_{r\theta}$ es el componente tangencial del esfuerzo de corte, y éste varía con la torsión generada por la rotación de la tubería.

En la mayoría de los casos se ha encontrado que:

- (a) τ_{rz} es el termino mayor.
- (b) El valor de τ_p es significativamente más pequeño que la resistencia que opone la roca al corte (de las paredes del pozo).

Posteriormente se utilizó la función adimensional $Z(r)$, en lugar del Número de Reynolds, para describir de una manera más precisa el tipo de flujo. En un espacio anular el valor de Z varía con la

distancia r , medida a partir de la pared de la tubería (diámetro exterior de la tubería).

Si el valor máximo de $Z(r)$ es menor que 808 el flujo es laminar, en el caso de que sea mayor el flujo es turbulento. Por otra parte el riesgo de tener erosión se incrementa, si el valor de Z alcanza el valor de 300 en la vecindad del pozo.

La Compañía Francesa del Petróleo, desarrollo un método práctico para minimizar la erosión.

El método desprecia la rotación de la tubería. Considera que una pared resiste la erosión bajo esta circunstancia, si cumple la siguiente condición: el Número de Reynolds frente a la pared del pozo debe ser menor que un cierto valor estadístico. Dicho valor se obtiene perforando previamente varios pozos bajo condiciones similares (naturaleza del terreno, fluido de perforación, etc.)

Por otro lado deben de ajustarse los gastos, las características reológicas del lodo, y/o los diámetros de los lastrabarrenas, para el período de tiempo durante el cual permanecen enfrente de la zona de estudio. El Número de Reynolds se calcula determinando previamente la viscosidad equivalente del fluido, frente a la pared de interés, mediante la Tabla IV.

Sin embargo este método no debe utilizarse, si la erosión mecánica (producida por percusión de la sarta de perforación) es de considerable magnitud.

5.2.2.3. El número Z .

Como se dijo anteriormente, la función adimensional $Z(r)$ es un criterio experimental más exacto (con respecto al Número de Reynolds), para determinar el tipo de flujo, que se manifiesta cuando un fluido es puesto en movimiento a través de un conducto.

Para el caso de un flujo longitudinal a través de una tubería cilíndrica recta, se tiene que $Z(r)$ es igual a:

$$Z(r) = \frac{-\int V(r) (dV/dr)}{dr/dr}$$

$$Z(r) = -\frac{R}{r(r)} \int V(r) \frac{dV}{dr}$$

donde

- R = Radio de la tubería.
- r = Distancia a partir del eje de la tubería.
- V = Velocidad longitudinal.
- ρ = Densidad del fluido.
- τ = Esfuerzo de corte.

$Z(r)$ vaía con r , y su máximo valor se utiliza como criterio para caracterizar el tipo de flujo. Si el máximo valor de $Z(r)$ es inferior a 808 el flujo es laminar; si esta por encima de 808 es turbulento.

El valor de 303 ha sido seleccionado, de tal forma que el Número de Reynolds para un fluido Newtoniano (con un perfil de velocidad parabólico), sea igual a 2100. Por consiguiente se tiene:

$$Z = 2 \left[\frac{1}{27} \text{Re} \right]^{1/2}$$

Este criterio expuesto anteriormente, se ha verificado en repetidas ocasiones, tanto para fluidos Newtonianos, como para fluidos no-Newtonianos, que fluyen en varias formas de conductos (cilíndricos, espacios anulares y placas paralelas), pero siempre paralelamente al eje del conducto.

Por otra parte, también el criterio se ha aplicado al flujo de un lodo de perforación a través del espacio anular; pero con la diferencia de que se toma en cuenta la rotación de la tubería (movimiento helicoidal). En este caso no se ha podido comprobar de forma clara la validez del criterio.

CAPITULO 6

Potencia hidráulica

6.1. Definición y obtención.

La capacidad de bombeo superficial esta limitada por:

(a) La potencia del equipo utilizado, es decir por:

- * La potencia de los motores (varia de acuerdo a sus condiciones superficiales).
- * El rendimiento de trabajo de la bomba.

(b) La eficiencia del equipo.

Si \bar{P}_m es la potencia del motor y η_T la eficiencia de transmisión (puede variar entre 0.65 y 0.90, dependiendo de si la instalación esta acondicionada con un convertidor de torsión), la potencia mecánica \bar{P}_m a la entrada de la bomba es:

$$\bar{P}_m = \bar{P}_m \eta_T \quad (1)$$

Si la eficiencia mecánica de la bomba es η_m (aproximadamente es igual a 0.80), su potencia hidráulica teórica será:

$$\bar{P}_{h1} = \eta_m \bar{P}_m$$

Por lo general la eficiencia hidráulica η_v , varia entre 0.90-0.95 y por ende la máxima potencia hidráulica disponible será:

$$\bar{P}_{h1max} = \eta_v \bar{P}_{h1} = \eta_v \eta_m \eta_T \bar{P}_m \quad (2)$$

Esta potencia hidráulica es proporcional al producto del gasto Q por la presión de inyección P_i .

Q es el gasto medido en la boca de la succión. P_i es igual a la suma de las pérdidas de presión que ocurren en todo el sistema de circulación.

$$\bar{P}_m = Q P_i = Q \Delta P$$

Por consiguiente se tiene:

$$\bar{P}_m = Q \Delta P \quad (3)$$

El gasto teórico varia con el diámetro de la camisa, la carrera del embolo, el diámetro del vastago y la velocidad de bombeo.

El fabricante de la bomba especifica una máxima presión de servicio, de acuerdo a un diámetro de camisa y a una velocidad nominal.

Por razones de economía, la potencia hidráulica utilizada no

deberá ser más que un 75 % de la máxima potencia disponible.

$$\bar{P}_{n1} = 0.75 \bar{P}_{n\text{máx}}$$

Como regla general, la máxima presión de servicio deberá ser el valor más pequeño, seleccionado entre la máxima presión de servicio de la bomba y la máxima presión de servicio de las conexiones superficiales.

6.2. El papel de las condiciones hidráulicas.

Si el gasto se incrementa en un circuito hidráulico dado, más potencia se consume en pérdidas de presión, y la potencia residual aprovechable para la barrena disminuirá, y viceversa. De acuerdo a lo anterior, existe un gasto óptimo para el cual se puede transmitir una mayor potencia a la barrena.

Las condiciones óptimas de trabajo en la barrena, se describen en relación a dos conceptos:

- (a) Potencia hidráulica.
- (b) Impacto hidráulico.

6.2.1. Potencia hidráulica en la barrena.

Como se dijo anteriormente, esta magnitud se define mediante el producto:

$$\bar{P}_{nw} = Q \Delta P_w \quad (4)$$

donde ΔP_w es la pérdida de presión en la barrena. Las dimensiones de este producto son ML^2T^{-2} .

La potencia hidráulica \bar{P}_{nw} , es la potencia desarrollada por el paso del lodo a través de las toberas de la barrena.

6.2.2. Impacto hidráulico en la barrena I_n .

Este se define como:

$$I_n = \rho Q V = \rho \frac{Q^2}{A} \quad (5)$$

donde V es la velocidad promedio del lodo, que pasa a través de las toberas, y A es el área total de la sección transversal.

Este producto tiene las dimensiones de una fuerza (MLT^{-2}). El impacto hidráulico I_n es la fuerza ejercida por el lodo en el fondo del pozo.

Numerosas pruebas de campo han demostrado que para un nivel dado de potencia hidráulica en la barrena (\bar{P}_{nw}), o un nivel dado de impacto hidráulico (I_n), la velocidad de perforación A_v es proporcional al peso que actúa sobre la barrena, hasta un valor límite A_{v1} .

Si dicho nivel se incrementa, ya sea a un valor (\bar{P}_{nw})₂ o a un valor (I_n)₂, el peso que actúa sobre la barrena también puede

incrementarse hasta un nuevo nivel A_{02} .

La limpieza deficiente en el fondo del pozo, es la causa por la cual se deben definir dichos niveles.

6.3. Optimización de los valores de \bar{P}_{pm} e I_m .

Debido a las limitaciones que se tienen en cuanto a potencia hidráulica disponible para el bombeo, y en cuanto a la máxima presión de servicio de las instalaciones superficiales, para un sistema determinado (bomba, conexiones superficiales, tubería de perforación, lastrabarrenas, etc.), los valores de \bar{P}_{pm} e I_m deberán optimizarse variando el gasto y el diámetro de las toberas, para así tener una adecuada distribución en las pérdidas de presión, tanto en la barrena como en el resto del sistema.

Todos los cálculos que se presentan a continuación, son específicamente para un fluido Bingham en flujo turbulento.

6.3.1. Pérdidas de presión. Ecuaciones y limitaciones.

A. Pérdidas de presión en la barrena.

Estas pueden expresarse como sigue:

$$\Delta P_m = K \rho V^2 \quad (6)$$

donde K es un factor de proporcionalidad, que depende del tipo de barrena.

B. Pérdidas de presión fuera de la barrena.

Para un determinado lodo, estas pérdidas varían con la profundidad. De acuerdo con la ecuación dada en la sección 4.2., pueden escribirse como:

$$\Delta P_c = \frac{2 f L \rho V^2}{D} = K_c Q^{1.75} \quad (7)$$

por consiguiente

$$\text{Log } \Delta P_c = \text{Log } K_c + 1.8 \text{ Log } Q$$

En coordenadas logarítmicas, la variación de ΔP_c con respecto a Q, se representa mediante una serie de líneas rectas paralelas, cuya pendiente es igual a 1.8; cada línea representa una profundidad diferente.

C. Pérdidas de presión en todo el circuito.

Son igual a la suma

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_c$$

Están limitadas hasta el valor máximo ΔP_1 (máxima caída de presión):

- (a) Por una parte, por la presión de servicio P_s de la instalación; y
 (b) Por otra, por la máxima potencia hidráulica disponible.

$$\Delta P_1 = \frac{\bar{P}_{n1}}{Q} \quad (8)$$

$$\text{Log } \Delta P_1 = \text{Log } \bar{P}_{n1} - \text{Log } Q$$

En coordenadas logarítmicas, al graficar ΔP_1 Vs Q , se obtiene un segmento rectilíneo, cuya pendiente es igual a -1 . La figura 22 muestra dicho comportamiento. Se considera una geometría constante.

Las máximas pérdidas de presión permisibles (totales) ΔP_1 , están representadas por los segmentos de la línea AB y BC.

En la figura se pueden distinguir dos zonas:

- (a) Zona 1, en la cual la presión de inyección no está limitada por la presión de servicio de la instalación superficial.
 (b) Zona 2, en la cual la presión de inyección sí está limitada por la presión de servicio de la instalación superficial.

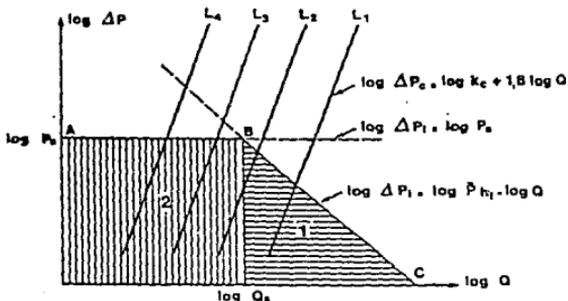


Fig. 22.- Gráfica de ΔP vs. Q .

6.3.2. Distribución óptima de las pérdidas de presión.

A. Criterio de la máxima potencia hidráulica en la barrena.

- a. Para el caso de que no exista limitación en cuanto a la presión superficial.

$$\bar{P}_n = \bar{P}_{nc} + \bar{P}_{ne}$$

$$\bar{P}_{ne} = \bar{P}_n - \bar{P}_{nc}$$

$$\bar{P}_{ne} = Q \Delta P - Q \Delta P_c$$

\bar{P}_{ne} tendrá su máximo valor, para cuando la diferencia $Q \Delta P - Q \Delta P_c$ adquiera su máximo valor.

Sea cual fuere el valor de Q , el término $Q \Delta P$ siempre será mayor, ya que corresponde a la potencia total disponible.

$Q \Delta P_c$ tomará su valor mínimo, cuando el valor de Q alcance su valor más pequeño; esto debido a que ΔP_c varía proporcionalmente con Q .

Por lo tanto \bar{P}_{ne} , tomará su valor máximo cuando:

$$\bar{P}_n = \bar{P}_{n1}$$

$$Q = Q_{min}$$

donde $Q_{min} \geq Q_c$.

Si esto no se cumple, se deberá hechar mano del caso b, el cual se verá a continuación.

- b. Para el caso de que si exista limitación en cuanto a la presión superficial.

$$\bar{P}_{ne} = Q \Delta P - Q \Delta P_c$$

Como se vio anteriormente $\Delta P_c = K_c Q^{1.8}$, así que

$$\bar{P}_{ne} = Q \Delta P - K_c Q^{2.8} \quad (9)$$

Para un gasto dado, \bar{P}_{ne} adquirirá su valor más grande para cuando la ΔP tome su máximo valor, es decir cuando sea igual a ΔP_1 ($\Delta P = \Delta P_1 = \Delta P_m$).

El valor máximo de \bar{P}_{ne} , en función de Q , se obtendrá cuando:

$$\frac{d\bar{P}_{ne}}{dQ} = 0$$

Al diferenciar la ecuación 9, se obtiene:

$$\Delta P - 2.8 K_c Q^{1.8} = 0$$

y como $\Delta P_c = K_c Q^{1.8}$; se tiene $\Delta P - 2.8 \Delta P_c = 0$

De acuerdo a ésta última ecuación, se obtiene la siguiente distribución de pérdidas de presión:

$$\Delta P_e = 0.35 \Delta P$$

$$\Delta P_m = 0.65 \Delta P$$

$$\Delta P = P_1 = P_m$$

B. Criterio del máximo impacto hidráulico sobre la barrena.

A partir de las ecuaciones 5 y 6, se tiene:

$$I_{1,2} = \rho Q V$$

$$\Delta P_m = K \rho V^2 = K_m \frac{Q^2}{A^2}$$

Por otra parte:

$$\Delta P_e = K_e Q^{2.75}$$

Por lo tanto:

$$\bar{P}_m = Q \Delta P_e + Q \Delta P_m$$

$$\bar{P}_m = K_e Q^{2.75} + K_m \frac{Q^3}{A^2}$$

$$\bar{P}_m = K_e Q^{2.75} + \frac{K_m I_{1,2}^2}{\rho^2 Q}$$

$$I_{1,2}^2 = \frac{\rho^2 \bar{P}_m Q}{K_m} - \frac{\rho^2 K_e Q^{2.75}}{K_m} \quad (10)$$

a. Para el caso de que no exista limitación en cuanto a la presión superficial.

Para un gasto determinado y con una \bar{P}_m igual a la máxima potencia disponible, el impacto hidráulico tendrá su máximo valor cuando:

$$\frac{dI_{1,2}}{dQ} = 0 = \left[\frac{\rho^2 \bar{P}_m}{K_m} - 3.8 \rho^2 \frac{K_e}{K_m} Q^{2.75} \right]$$

Por lo tanto $\bar{P}_m = 3.8 K_e Q^{2.75}$; y como $\Delta P_e = K_e Q^{2.75}$, se tiene:
 $Q \Delta P = 3.8 Q \Delta P_e$

Las pérdidas por presión, quedan entonces distribuidas de la siguiente forma:

$$\Delta P_e = 0.26 \Delta P$$

$$\Delta P_{\infty} = 0.74 \Delta P$$

$$\Delta P = \Delta P_1$$

b. Para el caso de que si exista limitación en cuanto a la presión superficial.

Si en la ecuación 10, \bar{P}_m se reemplaza por $Q \Delta P$, se tiene:

$$I_m^2 = \frac{\rho^2}{K_{\infty}} Q^2 \Delta P - \rho^2 \frac{K_c}{K_{\infty}} Q^{2.7}$$

I_m alcanzará su valor más grande, cuando ΔP tome su máximo valor. En este caso ΔP será igual a la presión límite ($\Delta P = \Delta P_1 = P_{\infty}$)

I_m como una función de Q , alcanzará su valor más grande cuando $dI_m/dQ = 0$, es decir:

$$\frac{dI_m}{dQ} = \left[2 \frac{\rho^2 Q \Delta P}{K_{\infty}} - 3.8 \frac{K_c \rho^2}{K_{\infty}} Q^{1.7} \right] = 0$$

El factor entre corchetes se hará cero cuando:

$$2 \Delta P = 3.8 K_c Q^{1.7}$$

y como $\Delta P_c = K_c Q^{1.7}$, se tiene:

$$\Delta P = \frac{3.8}{2} \Delta P_c = 1.9 \Delta P_c$$

La nueva distribución en el sistema se convierte en:

$$\Delta P_c = 0.52 \Delta P$$

$$\Delta P_{\infty} = 0.48 \Delta P$$

$$\Delta P = \Delta P_1 = P_{\infty}$$

6.3.3. Nota sobre la relación entre ΔP_c y Q , e impotancia.

Si en la práctica el lodo no es un fluido Bingham y/o el flujo en el espacio anular no es turbulento, las pérdidas de presión fuera de la barrena pueden escribirse como:

$$\Delta P_c = K_c Q^m$$

m es igual 1.8, para un fluido Bingham en régimen turbulento; pero puede ser tan pequeño como 1.2.

Si existe limitación en cuanto a la presión superficial, la

distribución óptima de pérdidas de presión puede tomarse de acuerdo a las siguientes relaciones:

(a) Criterio de la máxima potencia hidráulica en la barrena.

$$\Delta P_e = \frac{1}{1+m} \Delta P$$

$$\Delta P_w = \frac{m}{1+m} \Delta P$$

$$\Delta P = P_w$$

(b) Criterio del máximo impacto hidráulico sobre la barrena.

$$\Delta P_e = \frac{2}{2+m} \Delta P$$

$$\Delta P_w = \frac{m}{2+m} \Delta P$$

$$\Delta P = P_w$$

6.4 Determinación del gasto óptimo en base a la distribución óptima de ΔP .

Esta determinación se lleva a cabo gráficamente para cada etapa, utilizando diagramas (trazados en coordenadas doble logarítmicas), los cuales representan las diferentes ecuaciones lineales que fueron vistas en la sección anterior (6.3).

6.4.1. Diagrama básico (Fig. 23).

Utilizando el dato disponible para la instalación superficial y para la profundidad de perforación considerada, las siguientes líneas son trazadas:

(a) Las líneas rectas a_1, a_2, a_3, \dots , representan las pérdidas de presión (en función del gasto) en todo el circuito, excepto en la barrena, para las diferentes profundidades L_0, L_1, L_2, \dots , donde L_0 es la profundidad correspondiente al punto de partida del intervalo:

$$\log \Delta P_e = \log K_e + m \log Q$$

(b) La línea recta (b) representa la pérdida de presión total, compatible con la potencia hidráulica disponible de la bomba:

$$\log \Delta P_1 = \log \bar{F}_{H_1} - \log Q$$

(c) La línea recta (c) representa la pérdida de presión total, compatible con la presión de servicio de las instalaciones superficiales:

$$\text{Log } \Delta P_1 = \text{Log } P_w$$

Así las máximas pérdidas de presión permisibles en el circuito, están representadas por las secciones AB y BC. Sea Q_w el gasto máximo a la salida de la bomba, correspondiente a la presión P_w ; por lo tanto la abscisa del punto B es igual al $\text{Log } Q_w$.

El diagrama básico también incluye la línea recta (d), la cual representa el gasto permisible más pequeño Q_m :

$$\text{Log } Q = \text{Log } Q_m$$

Las coordenadas del punto I, el cual corresponde a la intersección de las líneas (c) y (d), son $\text{Log } Q_m$ y $\text{Log } P_w$.

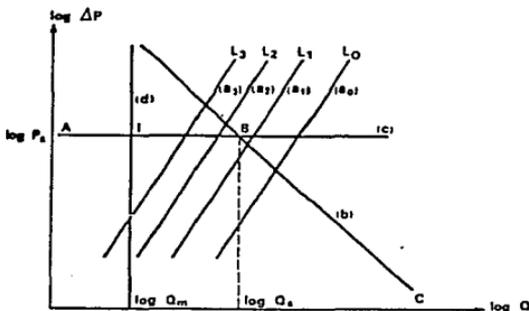


Fig. 23.- Diagrama Básico

6.4.2. Criterio de la máxima potencia hidráulica.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el párrafo 6.3.2.A:

a. Para cuando no se tiene limitación en cuanto a la presión superficial, se obtuvo que:

$$\bar{P}_m = \bar{P}_{m,1}$$

$$Q = Q_{m,1} \quad (Q_{m,1} \geq Q_w)$$

b. Para el caso contrario, en el que si se tiene limitación de la

presión superficial, se obtuvo que:

$$\Delta P_c = 0.35 \Delta P$$

$$\Delta P_w = 0.65 \Delta P$$

$$\Delta P = \Delta P_1 = P_w$$

el diagrama básico se complementa trazando la sección rectilínea A.B. sobre la línea (c') (Fig. 24), la cual es paralela a (c), y esta dada por la ecuación:

$$\text{Log } \Delta P = \text{Log } (0.35 P_w)$$

Aquí B₁, es la intersección de (c') con la línea Log Q = Log Q_w, e I₁ es la intersección de (c') con (d).

Sea L₁ la profundidad correspondiente a la línea (a₁), la cual pasa por B₁; y L₂ la profundidad correspondiente a la línea (a₂) que pasa por I₁.

De L₂ a L₁ (es decir en la zona 1, en la cual la presión no está limitada por la P_w), el gasto óptimo Q_{opt} será igual al gasto mínimo Q_m, si Q_m ≥ Q_w.

De la profundidad L₁ a la profundidad L₂ (es decir en la zona 2, en la cual la presión está limitada por P_w), la siguiente distribución de pérdidas de presión deberá considerarse:

$$\Delta P_c = 0.35 \Delta P$$

$$\Delta P_w = 0.65 \Delta P$$

$$\Delta P = \Delta P_1$$

La potencia hidráulica manejada para la barrena, disminuye con el aumento de la profundidad.

El valor del gasto óptimo Q_{opt}, está dado por la intersección de (c') con las líneas (a), para cada una de las profundidades. A medida que L aumenta, Q disminuye de Q_w para L = L₁ a Q_m para L = L₂.

Para una profundidad mayor que L₂, no se puede optimizar, y por lo tanto el gasto permanece constante para el valor de Q_m.

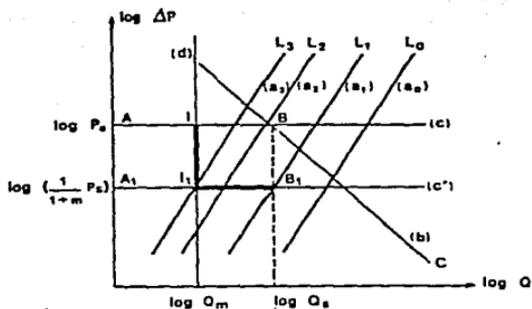


Fig. 24- Representación esquemática del criterio máxima potencia hidráulica en la barrera

6.4.3. Criterio del máximo impacto hidráulico.

El método de cálculo, utiliza la Figura 25.

$$\text{Si } m = 1.8, \quad \frac{1}{2 + m} = 0.26$$

$$\frac{2}{2 + m} = 0.52$$

De acuerdo con los resultados obtenidos en el párrafo 6.3.2.B, las líneas marcadas sobre el diagrama básico son:

- a) Los segmentos rectilíneos A_2B_2 y B_2C_2 , dados por:

$$\text{Log } (0.52 \Delta P_1) = f(\text{Log } Q)$$

es decir, están marcadas sobre las líneas:

- (c''), paralela a (c), dada por la ecuación

$$\text{Log } \Delta P = \text{Log } (0.52 P_m)$$

- (b''), paralela a (b), dada por la ecuación

$$\text{Log } \Delta P = \text{Log } (0.52 \bar{P}_m) - \text{Log } Q$$

- b) Los segmentos rectilíneos A_2B_2 y B_2C_2 , dados por

a través de L_2 .

De L_0 a L_1 (es decir en la zona 1), el gasto óptimo para cada profundidad en particular, está dado en teoría por las intersecciones de la línea (b'') con las líneas (a'), y deberán disminuir al incrementarse L .

Desgraciadamente en la práctica, es imposible estar cambiando constantemente la camisa de la bomba; no obstante se deberá seleccionar una camisa tal que proporcione un gasto $Q > Q_m$.

Para este caso, toda la potencia hidráulica disponible \bar{P}_m , se utiliza.

Entre las profundidades L_1 y L_2 , el gasto permanece constante para Q_m .

Entre las profundidades L_2 y L_3 (es decir en la zona 2, donde existen limitaciones en cuanto a la presión superficial), la distribución óptima de las pérdidas de presión son las siguientes:

$$\Delta P_c = 0.52 \Delta P$$

$$\Delta P_w = 0.48 \Delta P$$

$$\Delta P = \Delta P_1 = P_w$$

y la potencia hidráulica para la barrera disminuye al aumentar la profundidad.

El gasto óptimo Q_{opt} , dado por la intersección de la línea (c'') con las líneas (a'), disminuye al aumentar L , y llega a ser igual a Q_m para $L = L_3$.

Después de la profundidad L_3 , no se puede optimizar la distribución de la potencia hidráulica y el gasto permanece constante para Q_m .

6.5. Cálculo de los orificios de la barrera (toberas).

El área total aprovechable para el paso del lodo a través de la barrera está dada por la relación:

$$\Delta P_w = K_w \left(\frac{Q}{A} \right)^2$$

es decir, dado que se conocen la pérdida de presión en la barrera, el gasto y la potencia aprovechable por la barrera, se puede despejar el área.

Dicha ecuación aparece en la Tabla XXV del capítulo 4 (en varios sistemas de unidades).

Si se gráfica ΔP_e Vs Q en coordenadas doble logarítmicas, se obtiene una serie de líneas rectas, cuya pendiente es igual a 2; cada línea corresponde a una diferente área de toberas, tal como se ilustra en la figura 26.

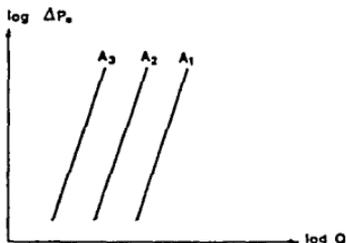


Fig. 26.-Variación de ΔP_e vs. Q

Entrando a la gráfica con los dos valores de Q y ΔP_e , se puede obtener el diámetro de las toberas.

Una vez determinada la combinación óptima de toberas, deben de probarse a fin de asegurar que la velocidad de flujo a través de las mismas, sea mayor que el valor mínimo permisible, es decir entre 6 - 7 m/seg (20 - 25 pie/seg) por cada pulgada de diámetro.

Las velocidades que se han obtenido - generalmente entre 120-185 m/seg - son en promedio mayores que estos límites. Si resultan ser más pequeñas se recomienda utilizar una barrena ordinaria en lugar de una tipo jet.

6.6. Velocidad de levantamiento del lodo en el espacio anular.

Se ha comprobado que velocidades del lodo entre 20-25 m/min son absolutamente reales. La remoción de los recortes depende principalmente de las velocidades que se tengan en el espacio anular. Si la velocidad de flujo disminuye, el lodo se torna más denso a causa de un incremento en el contenido de los recortes; esto trae como consecuencia:

- (a) Daño por sobrepresión.
- (b) Incremento en la presión diferencial y declinación en la velocidad de perforación.

Para evitar lo anterior, se recomienda que la velocidad del lodo en el espacio anular tenga el siguiente rango:

- (a) En formaciones suaves, $V = 30-40$ m/min.
- (b) En formaciones compactas, $V = 25-30$ m/min.

No obstante, en muchas ocasiones se debe trabajar con una velocidad inferior a la óptima calculada, debido a las siguientes causas:

- (a) Se produce daño por erosión en la pared del pozo, cuando se alcanzan velocidades grandes.
- (b) Se producen grandes pérdidas de presión en el espacio anular, las cuales inducen a un aumento en la densidad equivalente para la profundidad de la barrena.

En conclusión, la velocidad de flujo finalmente seleccionada, deberá estar de acuerdo, tanto con un adecuado valor en las pérdidas por presión en el espacio anular, como con el más grande valor que se alcance del producto ρQV o ρQV^2 para la profundidad de la barrena.

6.7. Método práctico para determinar la distribución óptima de la potencia hidráulica a una profundidad determinada.

Los diagramas de flujo no. 4 y 5 describen:

- (a) Un procedimiento basado en el criterio de la máxima potencia hidráulica en la barrena.
- (b) Un procedimiento basado en el criterio del máximo impacto hidráulico.

Los siguientes datos son utilizados:

- 1.- Máxima capacidad de bombeo.
- 2.- Presión de servicio de la instalación superficial.
- 3.- Dimensiones del pozo y sarta de perforación.
- 4.- Parámetros del lodo (ρ , μ , τ_0).
- 5.- Límite inferior del gasto Q_m , en el cual los recortes subirán lentamente por el espacio anular.

6.- Límite superior del gasto Q_L , para el cual no existe daño por erosión.

Consideraciones:

- * El lodo es un fluido Bingham en flujo turbulento.
- * Los gastos calculados no están limitados por el diámetro de camisa de la bomba.
- * Las velocidades en las toberas, obtenidas a partir de los valores calculados de A y Q deben ser suficientemente grandes.
- * El gasto límite Q_L es más grande que el gasto mínimo Q_m . Si esto no ocurre así, el gasto real debe determinarse sin utilizar el diagrama de flujo, considerando la relación existente entre la velocidad de levantamiento de los recortes y el daño de erosión de la pared del pozo.

Estos cálculos se realizan utilizando las ecuaciones dadas en la tabla XXII.

DIAGRAMA DE FLUJO · 4
 METODO BASADO EN EL CRITERIO DE LA MAXIMA
 POTENCIA HIDRAULICA PARA LA BARRENA .

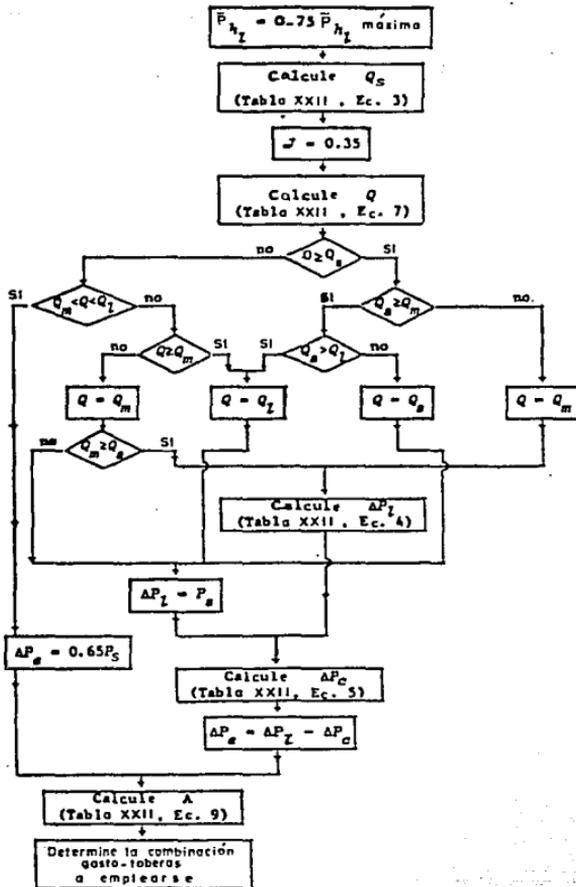


DIAGRAMA DE FLUJO - 5
 METODO BASADO EN EL CRITERIO DEL MAXIMO IMPACTO HIDRAULICO

VI-18

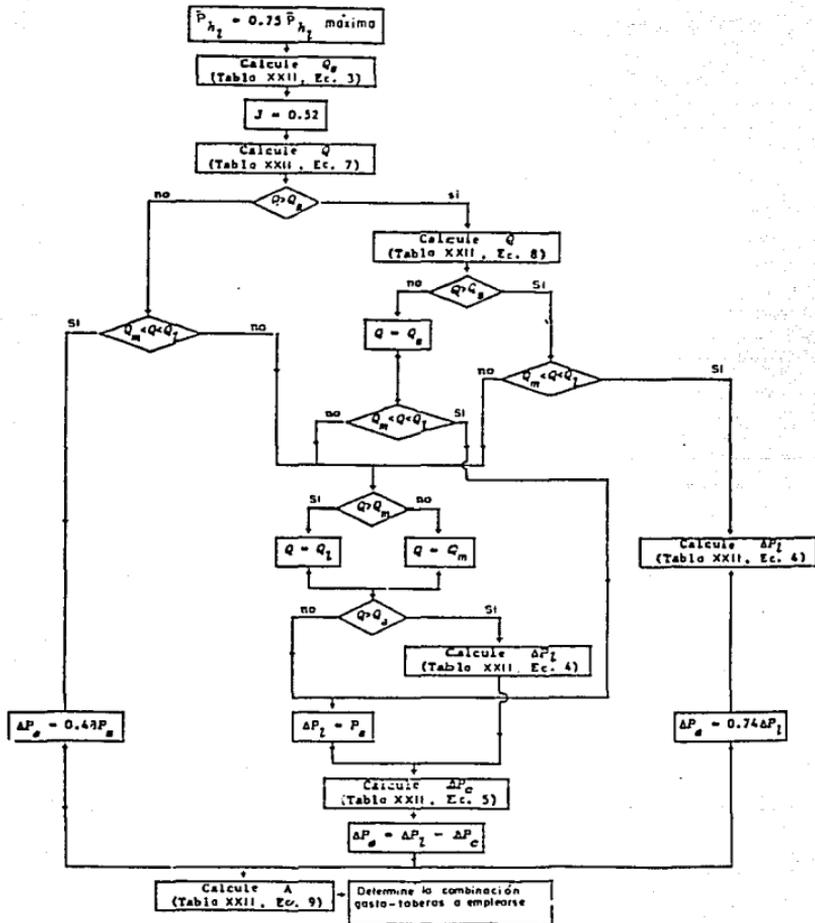


TABLA XXII
 POTENCIA HIDRAULICA

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES *
(1) \mathcal{P}_s	$Q\Delta P$	$\frac{Q\Delta P}{1715}$	$\frac{Q\Delta P}{442}$
(2) I_s	$\rho QV = \rho \frac{Q^3}{A}$	$\rho \frac{Q^3}{6019A}$	$\rho \frac{Q^3}{22785A}$
(3) Q_s	$\frac{\bar{P}_h}{P_s}$	$\frac{1715\bar{P}_h}{P_s}$	$\frac{442\bar{P}_h}{P_s}$
(4) ΔP_s	$\frac{\bar{P}_h}{Q}$	$\frac{1715\bar{P}_h}{Q}$	$\frac{442\bar{P}_h}{Q}$
(5) ΔP_s	$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$	$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$	$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$
	Para ΔP_1 , ver Tabla IX, ec. 4 ; para ΔP_2 , ver Tabla X, ec. 4 ; para ΔP_3 , ver Tabla XI, la ecuación seleccionada es de acuerdo al tipo de equipo utilizado.		

* Ver sección 1.3, Capítulo 1

TABLA XXII (fin)
 POTENCIA HIDRAULICA

PARAMETROS A CALCULARSE	UNIDADES SI	UNIDADES INGLESAS	OTRAS UNIDADES *
(6) k_s		$\rho^0 \mu^0 \rho^2 \left[I \left(\frac{L}{10141 D^{4.75}} \right) + C \right. \\ \left. + I \left(\frac{L}{7952(D_s + D)^{1.4} (D_s - D)^{1.1}} \right) \right]$ <p> C = 2.526 10⁻⁶ equipo I C = 9.619 10⁻⁶ equipo II C = 5.335 10⁻⁶ equipo III C = 4.163 10⁻⁶ equipo IV </p>	$\rho^0 \mu^0 \rho^2 \left[I \left(\frac{L}{90163 D^{4.75}} \right) + C \right. \\ \left. + I \left(\frac{L}{70694(D_s + D)^{1.4} (D_s - D)^{1.1}} \right) \right]$ <p> C = 8.79 10⁻⁶ equipo I C = 3.298 10⁻⁶ equipo II C = 1.829 10⁻⁶ equipo III C = 1.427 10⁻⁶ equipo IV </p>
(7) Q	$\left(\frac{I P_s}{k_s} \right)^{1/1.8}$	$\left(\frac{I P_s}{k_s} \right)^{1/1.8}$	$\left(\frac{I P_s}{k_s} \right)^{1/1.8}$
(8) Q	$\left(\frac{0.26 \bar{P}_s}{k_s} \right)^{1/1.8}$	$8.834 \left(\frac{\bar{P}_s}{k_s} \right)^{1/1.8}$	$5.443 \left(\frac{\bar{P}_s}{k_s} \right)^{1/1.8}$
(9) A (Tabla XV)	$\frac{Q}{C_s} \sqrt{\frac{\rho}{1975 \Delta P_s}}$	$\frac{Q}{109 C_s} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_s}}$	$\frac{Q}{544 C_s} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_s}}$

* Ver sección 1.3., Capítulo 1

CAPITULO 7

Aplicaciones

7.1. Introducción.

Este capítulo tiene como objetivo presentar de una forma sencilla, la aplicación de los conceptos vistos en los capítulos anteriores; para ello se utilizan dos ejemplos simplificados.

Los ejemplos se refieren a un pozo, cuya información es la siguiente:

* Potencia del motor disponible para el bombeo	$\bar{P}_M = 1104 \text{ KW (1480 HP).}$
* Potencia nominal a la entrada de la bomba	$\bar{P}_B = 883 \text{ KW (1184 HP).}$
* Porcentaje utilizado de la máxima potencia disponible	$F_e = 0.75 \text{ (75 \%).}$
* Tipo de equipo utilizado (ver Tabla XI ó XIV)	Tipo III.
* Presión de servicio del equipo superficial	$P_s = 20 \text{ MPa (200 bar).}$
* Diámetro interior de la T.R. de 9 5/8 pg	$D_{si} = 0.217 \text{ m (8.54 pg).}$
* Profundidad de la zapata	$S = 2500 \text{ m.}$
* Diámetro del pozo	$D_p = 0.216 \text{ m (8.5 pg).}$
* Profundidad del pozo	$H = 3500 \text{ m}$
* Diámetro exterior de los lastrarbarrenas	$D_e = 0.153 \text{ m (6.25 pg).}$
* Diámetro interior de los lastrarbarrenas	$D_i = 0.073 \text{ m (2.875 pg).}$
* Longitud de los lastrarbarrenas	$L = 200 \text{ m.}$
* Diámetro exterior de la tubería de perforación	$D_o = 0.127 \text{ m (5 pg).}$
* Diámetro interior de la tubería de perforación	$D_i = 0.109 \text{ m (4.28 pg).}$
* Coeficiente de toberas	$C_L = 0.95$

* Número de Reynolds de acorde al máximo gasto

$$Re = 2100$$

* Velocidad mínima en el espacio anular, compatible con el levantamiento de los recortes

$$V_m = 0.417 \text{ a } 0.5 \text{ m/s.} \\ (25 \text{ a } 30 \text{ m/min})$$

7.2. Ejemplo no. 1 (para un fluido Bingham).

Características del lodo:

Densidad	= 1200 Kg/m ³ (1.2 Kg/dm ³).
Lectura del Fann a 600 rpm	$\theta_{600} = 60$
Lectura del Fann a 300 rpm	$\theta_{300} = 38$
Lectura del Fann a 200 rpm	$\theta_{200} = 30$
Lectura del Fann a 100 rpm	$\theta_{100} = 22$

7.2.1. Selección del modelo y determinación de los parámetros reológicos.

A. Selección del modelo.

El cálculo se realiza utilizando las ecuaciones de la sección 3.2.

Desviación de acuerdo al modelo Bingham = 0.9997331

Desviación de acuerdo al modelo ley de Potencia = 0.9949425

Por consiguiente el modelo al cual se ajusta el lodo, es el Bingham.

B. Determinación de los parámetros reológicos.

Las ecuaciones del parrafo 3.3.1.3. se utilizan en los cálculos.

Viscosidad plástica, μ_p = 22.71 mPa . s (22.71 cp).

Punto de cedencia, τ_0 = 7.54 Pa (14.7857 lb./100 pie²).

7.2.2. Determinación del gasto máximo para un número de Reynolds de 1100.

El cálculo se efectúa utilizando las ecuaciones de la sección 4.1. Este se determina en el espacio anular, entre los lastrabarrenas (0.159 m = 6.25 pg) y el pozo (0.216 m = 8.5 pg).

El gasto encontrado es $Q_{max} = 0.01934 \text{ m}^3/\text{s}$ (1101 l/min).

7.2.3. Programa hidráulico.

El cálculo se realiza para una profundidad de 3500 m (fondo del pozo).

Se considera flujo turbulento, en la determinación de las pérdidas por presión.

A. Criterio de la máxima potencia en la barrena.

De acuerdo al diagrama de flujo 4 (sección 6.7.), se tiene:

$$Q = Q_1 = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1101 l/min).}$$

y el diámetro de las tres toberas, resulta ser de 0.007099 m (3.94/32 pg).

B. Criterio del máximo impacto hidráulico.

De acuerdo al diagrama de flujo 5 (sección 6.7.), se tiene:

$$Q = Q_u = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1101 l/min).}$$

y el diámetro de las toberas resulta ser igual al del caso A.

Para este caso en particular, independientemente del criterio que se adopte, no se puede hacer la optimización de la distribución de la potencia hidráulica entre la barrena y el resto del sistema. Las pérdidas de presión ΔP_c y ΔP_u que resultan para este gasto están definidas por $\Delta P_u = \Delta P_c - \Delta P_c$.

Q_1 es más pequeño que Q_u ($Q_u = 0.023841 \text{ m}^3/\text{s} = 1430 \text{ l/min}$); las pérdidas de presión totales que pueden ocurrir, son iguales a la presión de servicio de la instalación.

7.2.4. Pérdidas de presión.

El cálculo se realiza de acuerdo con el diagrama de flujo del párrafo 4.2.2.

Para las siguientes condiciones:

- (a) Para un gasto $Q = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s}$ (1101 l/min).
- (b) Para tres toberas de 3.94/32 pg.

se encontró:

Las pérdidas de presión en la barrena $\Delta P_u = 16.057 \text{ MPa}$ (160.57 bar).

Las pérdidas de presión para todo el sistema $\Delta P = 19.313 \text{ MPa}$ (193.13 bar).

7.2.5. Cálculo de la densidad equivalente.

Las ecuaciones de la Tabla XVII se utilizan para su cálculo. Para una velocidad de perforación $N_v = 10 \text{ m/h}$, se obtuvo:

Pérdida de presión en el espacio anular $\Delta P_u = 1.626 \text{ MPa}$ (16.26

bar).
 Densidad equivalente de circulación ECD = 1.254 Kg/m³ (1.25 Kg/dm³).

7.2.6. Velocidad y tiempo de levantamiento de los recortes.

El cálculo se realiza de acuerdo al diagrama de flujo 2, el cual viene en el párrafo 5.2.1.2.

Se considera un diámetro de recortes $\phi_p = 5$ mm y una densidad de 2500 Kg/m³ (2.5 Kg/dm³).

Velocidad de levantamiento en el espacio anular formado entre el pozo sin ademe y los lastrabarreras:

$$V_r = 0.997 \text{ m/s (59.81 m/min)}.$$

Velocidad de levantamiento en el espacio anular formado entre el pozo sin ademe y la tubería de perforación:

$$V_r = 0.6928 \text{ m/s (40.96 m/min)}.$$

Velocidad de levantamiento en el espacio anular formado entre el pozo ademado y la tubería de perforación:

$$V_r = 0.6725 \text{ m/s (40.35 m/min)}.$$

Tiempo que tardan los recortes y el lodo respectivamente, para llegar a la superficie, desde una profundidad de 3500 m:

$$T_r = 84.83 \text{ min} \quad \text{y} \quad T_{lodo} = 75.73 \text{ min}.$$

7.2.7. Presiones de inercia y de surgencia o sondeo.

Se considera una sarta cerrada y una aceleración o desaceleración equivalente a la velocidad de introducción de la sarta (el tiempo requerido para introducir una longitud de 27 m es $T_s = 3.4$ s).

Se obtuvo:

(a) Presión de surgencia o sondeo, para cuando se tiene la barrena en el fondo del pozo:

(i) Introducción o extracción (diagrama de flujo 1, párrafo 5.1.4.):

$$P_r = \pm 1.984 \text{ MPa } (\pm 19.84 \text{ bar}).$$

(ii) Inercial (Tabla XVI, ecuación no. 2):

$$\Delta P_r = \pm 1.87 \text{ MPa } (\pm 18.70 \text{ bar}).$$

(b) Densidad equivalente originada por el movimiento de la tubería:

$$\text{EPMD (+)} = 1256.7 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.257 Kg/dm}^3\text{)}.$$

$$\text{EPMD (-)} = 1143.3 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.143 Kg/dm}^3\text{)}.$$

(c) Densidad equivalente inercial:

$$\text{EIPMD (+)} = 1253 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.253 Kg/dm}^3\text{)}.$$

$$\text{EIPMD (-)} = 1147 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.147 Kg/dm}^3\text{)}.$$

7.2.8. Presión de surgencia para el rompimiento del gel (reestablecimiento de la circulación).

La ecuación no. 1 de la Tabla XVI se utiliza para su cálculo.

Para un gel de tiempo grande : $g_1 = 47.8 \text{ Pa}$, la presión de surgencia es de $P_s = 7.716 \text{ MPa (77.16 bar)}$.

7.3. Ejemplo no. 2 (para un fluido ley de Potencia).

Características del lodo:

$$\text{Densidad} = 1200 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.2 Kg/dm}^3\text{)}.$$

$$\text{Lectura del Fann a 600 rpm} \quad \theta_{600} = 60$$

$$\text{Lectura del Fann a 300 rpm} \quad \theta_{300} = 38$$

$$\text{Lectura del Fann a 200 rpm} \quad \theta_{200} = 28$$

$$\text{Lectura del Fann a 100 rpm} \quad \theta_{100} = 18$$

7.3.1. Selección del modelo y determinación de los parámetros reológicos.

A. Selección del modelo.

El cálculo se realiza utilizando las ecuaciones de la sección 3.2.

$$\text{Desviación del modelo Bingham} = 0.99645$$

$$\text{Desviación del modelo ley de Potencia} = 0.999693$$

Por consiguiente se elige el modelo ley de Potencia.

B. Determinación de los parámetros reológicos.

Las ecuaciones del párrafo 3.3.1.3. se utilizan en los cálculos.

$$\text{Índice de comportamiento reológico } n = 0.63$$

$$\text{Índice de consistencia } K = 0.27 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0.63} \text{ (0.56 lb} \cdot \text{s}^{0.63}/100 \text{ pie}^2\text{)}.$$

7.3.2. Determinación del gasto máximo para un número de Reynolds de 1100.

El cálculo se efectúa utilizando las ecuaciones de la sección 4.1. Este se determina en el espacio anular, entre los lastrabarreras

(0.159 m = 6.25 pg) y el pozo (0.216 m = 8.5 pg).

El gasto encontrado es $Q_{\text{max}} = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s}$ (1047 l/min).

7.3.3. Programa hidráulico.

El cálculo se realiza para una profundidad de 3500 m (fondo del pozo).

Para el cálculo de las pérdidas por presión, se considera flujo turbulento.

A. Criterio de la máxima potencia en la barrena.

De acuerdo al diagrama de flujo 4 (sección 6.7.), se tiene:

$$Q = Q_1 = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1047 l/min).}$$

y el diámetro de las tres toberas, resulta ser de 0.006859 m (8.64/32 pg).

B. Criterio del máximo impacto hidráulico.

De acuerdo al diagrama de flujo 5 (sección 6.7.), se tiene:

$$Q = Q_1 = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1047 l/min).}$$

y el diámetro de las toberas resulta ser igual al del caso A.

De igual forma que para un fluido Bingham (párrafo 7.2.3.), la optimización de la distribución de la potencia hidráulica entre la barrena y el circuito exterior, no se puede realizar debido a que el gasto únicamente puede ser Q_1 .

Q_1 es más pequeño que Q_2 ($Q_2 = 0.023841 \text{ m}^3/\text{s} = 1430 \text{ l/min}$); las pérdidas de presión totales que pueden ocurrir, son iguales a la presión de servicio.

7.3.4. Pérdidas de presión.

El cálculo se realiza de acuerdo con el diagrama de flujo del párrafo 4.2.2.

Para las siguientes condiciones:

(a) Para un gasto $Q = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s}$ (1047 l/min)

(b) Para tres toberas de 8.64/32 pg.

se encontró:

Las pérdidas de presión en la barrena $\Delta P_w = 16.69 \text{ MPa}$ (166.92 bar).

Las pérdidas de presión totales $\Delta P = 19.12 \text{ MPa}$ (191.22 bar).

7.3.5. Cálculo de la densidad equivalente.

Las ecuaciones de la Tabla XVII se utilizan para su cálculo. Para una velocidad de perforación $A_v = 10$ m/h, se obtuvo:

Pérdida de presión en el espacio anular $\Delta P_a = 1.134$ MPa (11.34 bar).

Densidad equivalente de circulación ECD = 1240 Kg/m³ (1.24 Kg/dm³).

7.3.6. Velocidad y tiempo de levantamiento de los recortes.

El cálculo se realiza de acuerdo al diagrama de flujo 3, del párrafo 5.2.1.2.

Se considera un diámetro de recortes $\phi_r = 5$ mm y una densidad de 2500 Kg/m³ (2.5 Kg/dm³).

Velocidad de levantamiento en el espacio anular formado entre el pozo sin ademe y los lastrabarrenas:

$$V_r = 0.93736 \text{ m/s (56.23 m/min)}.$$

Velocidad de levantamiento en el espacio anular formado entre el pozo sin ademe y la tubería de perforación:

$$V_r = 0.63125 \text{ m/s (38.0 m/min)}.$$

Velocidad de levantamiento en el espacio anular formado entre el pozo ademado y la tubería de perforación:

$$V_r = 0.62127 \text{ m/s (37.0 m/min)}.$$

Tiempo que tardan los recortes y el lodo respectivamente, para llegar a la superficie, desde una profundidad de 3500 m:

$$T_r = 91.75 \text{ min} \quad \text{y} \quad T_{\text{L}} = 79.59 \text{ min}.$$

7.3.7. Presiones de inercia y de surgencia o sondeo.

Se considera una sarta cerrada y una aceleración o desaceleración equivalente a la velocidad de introducción de la sarta (el tiempo requerido para introducir una longitud de 27 m es $T_{\text{L}} = 40$ s).

Se obtuvo:

(a) Presión de surgencia o sondeo, con la barrena en el fondo del pozo:

(i) Introducción o extracción (diagrama de flujo 1, párrafo 5.1.4.):

$$P_r = \pm 1.425 \text{ MPa } (\pm 14.25 \text{ bar}).$$

(ii) Inercial (Tabla XVI, ecuación no. 2):

$$\Delta P_r = \pm 1.588 \text{ MPa } (\pm 15.88 \text{ bar}).$$

(b) Densidad equivalente originada por el movimiento de la tubería:

$$\begin{aligned} \text{EPMD (+)} &= 1240.72 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.247 Kg/dm}^3\text{)} \\ \text{EPMD (-)} &= 1159.3 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.159 Kg/dm}^3\text{)}. \end{aligned}$$

(c) Densidad equivalente inercial:

$$\begin{aligned} \text{EIPMD (+)} &= 1245 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.245 Kg/dm}^3\text{)} \\ \text{EIPMD (-)} &= 1155 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.155 Kg/dm}^3\text{)}. \end{aligned}$$

7.3.8. Presión de surgencia para el rompimiento del gel (reestablecimiento de la circulación).

La ecuación no. 1 de la Tabla XVI se utiliza para su cálculo.
Para un gel de tiempo grande : $g_s = 47.9 \text{ Pa}$, la presión de surgencia es de $P_s = 7.716 \text{ MPa (77.16 bar)}$.

7.4 Desarrollo explícito del ejemplo no. 1.

7.4.1. Selección del modelo y determinación de los parámetros reológicos.

A. Selección del modelo

$$r = \frac{P \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(P \sum x^2 - (\sum x)^2) (P \sum y^2 - (\sum y)^2)}}$$

$$x_1 = 1020 \text{ S}^{-1} = 600 \text{ rpm.}$$

$$y_1 = 60 \text{ lb/100 pie}^2$$

$$x_2 = 510 \text{ S}^{-1} = 300 \text{ rpm.}$$

$$y_2 = 38 \text{ lb/100 pie}^2$$

$$x_3 = 370 \text{ S}^{-1} = 200 \text{ rpm.}$$

$$y_3 = 30 \text{ lb/100 pie}^2$$

$$x_4 = 140 \text{ S}^{-1} = 100 \text{ rpm.}$$

$$y_4 = 22 \text{ lb/100 pie}^2$$

$$\sum x = 2040 \quad 1200$$

$$\sum y = 150$$

$$r = \frac{4(1020(60)+510(38)+340(30)+170(22)) - (60+38+30+22)(1020+510+340+170)}{\sqrt{(4(60^2+38^2+30^2+22^2) - (60+38+30+22)^2)(4(1020^2+510^2+340^2+170^2) - (1020+510+340+170)^2)}}$$

$$r = 0.9997331 \text{ (fluido Bingham).}$$

Considerando los logaritmos de las lecturas se obtiene el siguiente resultado:

$$r = \frac{65.442511 - 64.728229}{\sqrt{(111.0636 - 109.79054)(38.566096 - 38.161244)}}$$

$$r = 0.9949425 \text{ (fluido ley de potencia).}$$

∴ El modelo seleccionado es el modelo Bingham.

B. Determinación de los parámetros reológicos.

$$\mu_P = 300 \frac{\sum \theta \sum N - P \sum (\theta N)}{(\sum N)^2 - P \sum N^2} \quad (\text{cp})$$

$$\mu_p = 300 \frac{150(1200) - 4(55\ 600)}{1440\ 000 - 4(500\ 000)}$$

$$\mu_p = 22.71 \text{ cp} = 0.02271 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\tau_o = 0.51 \frac{\Sigma(N\theta)\Sigma H - \Sigma\theta\Sigma N^2}{(\Sigma H)^2 - P\Sigma N^2} \quad ; (\text{Pa})$$

$$\tau_o = 0.51 \frac{55\ 600(1200) - (150)(500\ 000)}{1440\ 000 - 2000\ 000}$$

$$\tau_o = 7.54 \text{ Pa} = 14.78 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$$

7.4.2. Determinación del gasto máximo para un Número de Reynolds de 1100.

El cálculo se efectúa utilizando las ecuaciones de la sección 4.1. Este se determina en el espacio anular formado entre los lastrabarreras y el pozo.

$$V_c = \frac{16\ 167 \mu_p \cdot \sqrt{(16\ 167 \mu_p)^2 + 48(1347) \tau_o (D_o - D_i)^2 \rho}}{24 (D_o - D_i) \rho} \quad ; (\text{m/s})$$

$$V_c = \frac{16\ 167(0.02271) \cdot \sqrt{(16\ 167(0.02271))^2 + 48(1347)7.54(0.216 - 0.159)^2 1200}}{24(0.216 - 0.159) 1200}$$

$$V_c = 1.092698 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (0.216^2 - 0.159^2)$$

$$A = 0.0167878 \text{ m}^2$$

$$Q_c = V_c A = 1.092698 (0.0167878)$$

$$Q_c = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s} = 1101 \text{ l}/\text{min.}$$

$$Q_c = Q1$$

7.4.3. Programa hidráulico

El cálculo se realiza para una profundidad de 3530 m. Se considera flujo turbulento en la determinación de las pérdidas por presión.

A. Criterio de la máxima potencia en la barrena.

De acuerdo al diagrama de flujo 4 (sección 6.7), se tiene:

considerando una $\eta_m = 0.80$ y $\eta_v = 0.90$, se obtiene que:

$$\bar{P}_{hlmax} = \bar{P}_m \eta_m \eta_v = 883 (0.80) 0.90 = 635.76 \text{ KW}$$

$$\bar{P}_{hl} = 0.75 \bar{P}_{hlmax} = 0.75 (635.76) = 476.82 \text{ KW} = 639.4156 \text{ HP.}$$

$$Q_B = \frac{\bar{P}_{hl}}{P_B} = \frac{476\ 820}{20\ 000\ 000} = 0.023841 \text{ m}^3/\text{s} = 1430.46 \text{ l/min.}$$

Cálculo del gasto mínimo.

$$V_{min} = 0.417 \text{ a } 0.5 \text{ m/s.}$$

$V_{min} = 0.5 \text{ m/s}$, ocurre entre el pozo y los lastrabarreras

$$Q_{min} = V_{min} A = 0.5(0.0167878) = 0.0083939 \text{ m}^3/\text{s} = 503.63 \text{ l/min.}$$

Determinación de Q.

$$Q = \left(\frac{J P_B}{K_C} \right)^{1/1.8}; \text{ (Gal/min)}$$

$$J = 0.35$$

$$K_C = f^{0.8} \mu_P^{0.2} \left[\sum \left(\frac{L}{10141 D^{4.8}} \right) + c + \sum \left(\frac{L}{7952(D_0+D_1)^{1.8}(D_0-D_1)^3} \right) \right]$$

$$c = 5.335 \times 10^{-5}, \text{ para un equipo Tipo III.}$$

$$K_c = 10.014^{0.8} (22.71)^{0.2} \left(\frac{10\ 827}{10141(4.28)^{4.8}} + \frac{656}{10141(2.875)^{4.8}} + 5.335 \times 10^{-5} \right. \\ \left. + \frac{656}{7952(8.5+6.25)^{1.8}(8.5-6.25)^3} + \frac{2652}{7952(8.5+5)^{1.8}(8.5-5)^3} \right. \\ \left. + \frac{8\ 202}{7952(8.54 + 5)^{1.8}(8.54-5)^3} \right)$$

$$K_c = 0.021186$$

$$Q = \left(\frac{0.35(2900.8)}{0.021186} \right)^{1/1.8}$$

$$Q = 398.38 \text{ Gal/min} = 0.02513 \text{ m}^3/\text{s} = 1508 \text{ l/min.}$$

$Q > Q_s$; $Q_s > Q_m$ y $Q_l < Q_s$. se tiene que:

$$Q = Q_l$$

$$Q = 1101 \text{ l/min} = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s} = 290.759 \text{ Gal/min.}$$

$$\Delta P_l = P_s = 20\ 000\ 000 \text{ Pa.}$$

$$\Delta P_c = \Delta P_l + \Delta P_a + \Delta P_s.$$

$$\Delta P_l = \frac{1.2126 L_P^{0.8} \rho^{1.8} \mu_P^{0.2}}{\pi^{1.8} D^{4.8}} ; (\text{ Pa })$$

$$\Delta P_l = \frac{1.2126(3300)1200^{0.8}(0.01834)^{1.8}0.02271^{0.2}}{\pi^{1.8}(0.109)^{4.8}} + \frac{1.2126(200)1200^{0.8}(0.01834)^{1.8}0.02271^{0.2}}{\pi^{1.8}(0.073)^{4.8}}$$

$$\Delta P_l = 3\ 070\ 624 \text{ Pa} = 445 \text{ lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_a = \frac{1.5465 L F^{0.8} Q^{1.8} \mu_P^{0.2}}{1.8 (D_o + D_i)^{1.8} (D_o - D_i)^3}; \text{ (Pa)}$$

$$\Delta P_a = \frac{1.5465(200)1200^{0.8}(0.01834)^{1.8}0.02271^{0.2}}{1.8(0.216+0.159)^{1.8}(0.216-0.159)^3} + \frac{1.5465(800)1200^{0.8}(0.01834)^{1.8}0.02271^{0.2}}{1.8(0.216+0.127)^{1.8}(0.216-0.127)^3}$$

$$+ \frac{1.5465(2500)1200^{0.8}(0.01834)^{1.8}0.02271^{0.2}}{1.8(0.217+0.127)^{1.8}(0.217-0.127)^3}$$

$$\Delta P_a = 753924.3 \quad P_a = 109.35 \text{ lb/pg}^2.$$

Para un equipo superficial Tipo III:

$$\Delta P_a = 5.335 \times 10^{-5} F^{0.8} Q^{1.8} \mu_P^{0.2}; \text{ (lb/pg}^2 \text{)}$$

$$\Delta P_a = 5.335 \times 10^{-5} (10.014)^{0.8} (290.76)^{1.8} 22.71^{0.2}$$

$$\Delta P_a = 17.108 \text{ lb/pg}^2 = 117 \ 960.5 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_c = 445.36 + 109.35 + 17.108 = 571.82 \text{ lb/pg}^2 = 3942 \ 509 \text{ Pa.}$$

$$\Delta P_e = \Delta P_1 - \Delta P_c$$

$$\Delta P_e = 20 \ 000 \ 000 - 3942 \ 509 = 16 \ 057 \ 491 \quad P_a = 2 \ 329 \text{ lb/pg}^2.$$

Cálculo del área de las toberas.

$$A = \frac{Q}{C_e} \sqrt{\frac{P}{1.975 \Delta P_e}}; \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A = \frac{0.01834}{0.95} \sqrt{\frac{1200}{1.975(16 \ 057 \ 491)}}$$

$$A = 1.18753 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.18406 \text{ pg}^2.$$

$$A = 3 \frac{\pi D^2}{4} \quad \therefore \quad D = \sqrt{\frac{4A}{3\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4(0.18406)}{3\pi}} = 0.2795 \text{ pg} = 0.007099 \text{ m} = 8.94/32 \text{ pg.}$$

El diámetro de c/u (tres) de las toberas es de 8.94/32 pg.

B. Criterio del máximo impacto hidráulico.

De acuerdo al diagrama de flujo 5 (sección 6.7.), se tiene:

$$\bar{P}_{hl} = 476.82 \text{ KW} = 639.4156 \text{ HP.}$$

$$Q_s = 0.023841 \text{ m}^3/\text{s} = 1430.46 \text{ l/min.}$$

$$Q_m = 0.0083939 \text{ m}^3/\text{s} = 503.63 \text{ l/min.}$$

$$Q_l = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s} = 1101 \text{ l/min.}$$

$$J = 0.52$$

$$K_c = 0.021186$$

$$Q = \left(\frac{0.52(2900.8)}{0.021186} \right)^{\frac{1}{1.8}}$$

$$Q_c = 496.38 \text{ Gal/min} = 0.0313168 \text{ m}^3/\text{s} = 1879 \text{ l/min.}$$

Debido a que $Q > Q_s$, se tiene que calcular nuevamente mediante:

$$Q = 8.834 \left(\frac{\bar{P}_{hl}}{K_c} \right)^{1/2.8} ; \text{ (Gal/min)}$$

$$Q = 8.834 \left(\frac{639.415}{0.021186} \right)^{1/2.8}$$

$$Q = 352 \text{ Gal/min} = 0.022183 \text{ m}^3/\text{s} = 1330.98 \text{ l/min.}$$

$$Q_s > Q \quad \therefore \quad Q = Q_s.$$

$$Q_m \angle Q_s \succ Q_l$$

$Q_s \succ Q_m$, de aquí que finalmente $Q = Q_l$.

$$Q_l \angle Q_s \quad \therefore \quad \Delta P_l = \Delta P_s$$

Las caídas de presión por fricción en todo el circuito excepto en la barrena, resultan igual al del caso A debido a que se maneja el mismo gasto:

$$\Delta P_c = 571.82 \text{ lb/pg}^2 = 3 \ 942 \ 509 \text{ Pa.}$$

$$\Delta P_e = \Delta P_l - \Delta P_c = 20 \ 000 \ 000 - 3 \ 942 \ 509 = 16 \ 057 \ 491 \text{ Pa} = 2 \ 329 \text{ lb/pg}^2.$$

De igual forma la caída de presión en la barrena, resulta ser igual a la obtenida en el caso A, por lo que se tiene:

Diámetro de c/u (tres) de las toberas: 8.94/32 pg.

7.4.4. Pérdidas de presión.

El cálculo se realiza de acuerdo al diagrama de flujo del párrafo 4.2.2., para las siguientes condiciones:

- Un gasto $Q = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s}$ (1101 l/min).
- Para tres toberas de 8.94/32 pg.

Debido a que $Re \angle Rec$, se utilizarán Ecs. para régimen laminar:

i) Pérdidas de presión en el interior de la T.P. y Lastrabarrenas.

$$\Delta P_i = \frac{128 \text{ l } Q \mu_P}{\pi D^4} + \frac{4 \zeta_0 \text{ l}}{D} \quad ; \quad (\text{Pa})$$

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \frac{128(3300)0.01834(0.02271)}{\pi(0.109)^4} + \frac{4(7.54)3300}{0.109} \\ &+ \frac{128(200)0.01834(0.02271)}{\pi(0.073)^4} + \frac{4(7.54)200}{0.073} \end{aligned}$$

$$\Delta P_i = 1\,309\,821.3 + 202\,143.13 = 1\,511\,964.4 \text{ Pa.}$$

ii) Pérdidas de presión en el espacio anular.

$$\Delta P_a = \frac{192 L Q \mu_p}{\pi (D_o - D_i) (D_o - D_i)^3} + \frac{4 \tau_o L}{D_o - D_i}; \text{ (Pa)}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_a = & \frac{192(200)0.01834(0.02271)}{(0.216-0.159)(0.216-0.159)^3} + \frac{4(7.54)200}{0.216-0.159} \\ & + \frac{192(800)0.01834(0.02271)}{(0.216+0.127)(0.216-0.127)^3} + \frac{4(7.54)800}{0.216-0.127} \\ & + \frac{192(2500)0.01834(0.02271)}{(0.217+0.127)(0.217-0.127)^3} + \frac{4(7.54)2500}{0.217-0.127} \end{aligned}$$

$$\Delta P_a = 179\,130.98 + 355\,316.94 + 1\,091\,537 = 1\,625\,984.9 \text{ Pa.}$$

iii) Pérdidas de presión en conexiones superficiales.

$$\Delta P_s = 5.335 \times 10^{-5} \rho^{0.8} Q^{1.8} \mu_p^{0.2}; \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

$$\Delta P_s = 5.335 \times 10^{-5} (10.014)^{0.8} (290.76)^{1.8} 22.71^{0.2}$$

$$\Delta P_s = 17.108 \text{ lb/pg}^2 = 117\,961 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_c = \Delta P_i + \Delta P_a + \Delta P_s = 3\,225\,910 \text{ Pa} = 472 \text{ lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_e = 16\,057\,491 \text{ Pa. (16.057 M Pa)}$$

$$\Delta P = \Delta P_e + \Delta P_c = 16\,057\,491 + 3\,225\,910 = 19\,313\,401 \text{ Pa. (19.313 M Pa).}$$

7.4.5. Cálculo de la densidad equivalente.

Las ecuaciones de la Tabla XVII se utilizan para su cálculo.

Para una velocidad de perforación $A_v = 10 \text{ m/h}$, y de acuerdo a las caídas de presión en el espacio anular $\Delta P_a = 1.625 \text{ M Pa (16.26 bar)}$, se tiene que:

$$\rho_d = \rho + \frac{\pi D F^2 A_v (2500 - \rho)}{4 Q}; \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$f_d = 1200 + \frac{\pi(0.216)^2 \cdot 2.777 \times 10^{-3} [2500 - 1200]}{4(0.01834)}$$

$$f_d = 1207.213 \text{ Kg/m}^3.$$

El cálculo se realiza para una profundidad de 3 500 m.

$$f^1 = f_d + \frac{\Delta p_a}{10L}; \text{ (Kg/m}^3 \text{)}$$

$$f^1 = 1207.213 + \frac{1\ 625\ 985}{10(3500)}$$

$$f^1 = 1254 \text{ Kg/m}^3 = 1.25 \text{ Kg/dm}^3.$$

7.4.6. Velocidad y tiempo de levantamiento de los recortes.

El cálculo se realiza de acuerdo al diagrama de flujo 2(párrafo 5.2.1.2).

Se considera un diámetro de recortes $\phi_p = 5 \text{ mm}$ y una densidad de 2500 Kg/m^3 (2.5 Kg/dm^3).

$$h = 2.3 \text{ mm (0.09055 pg)}$$

$$d = 6 \text{ mm}$$

a) Para el espacio anular entre el pozo y los lastrabarreras.

$$Q_c = \frac{321.49 \pi (D_o + D_i)}{f} \left(\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + \frac{7.54(D_o - D_i)^2 f}{7716}} \right); \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_c = \frac{321.49 \pi (0.216 + 0.159)}{1200} \left(0.02271 + \sqrt{(0.02271)^2 + \frac{7.54(0.216 - 0.159)^2 \cdot 1200}{7716}} \right)$$

$$Q_c = 0.02792 \text{ m}^3/\text{s} = 1675 \text{ l/min.}$$

$$Q < Q_c \quad (Q = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s}).$$

$$\mu_e = \mu_p + \frac{\pi 7.54 (D_o - D_i)^2 (D_o + D_i)}{48 Q}; \text{ (Pa.s)}$$

$$\mu_e = 0.02271 + \frac{\pi(7.54)(0.216-0.159)^2(0.216+0.159)}{48(0.01834)}$$

$$\mu_e = 0.055494 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\mu = \mu_e.$$

$$v_s = \frac{174.2(\rho_s - \rho)^{0.667} \rho_n}{\rho^{0.333} \mu^{0.333}}; \text{ (pie/min)}$$

$$v_s = \frac{174.2[20.86-10.014]^{0.667} 0.1968}{10.014^{0.333} 55.494^{0.333}}$$

$$v_s = 20.49 \text{ pie/min} = 0.1041 \text{ m/s}$$

$$\tau_s = 68.59 \sqrt{h(\rho_s - \rho)}; \text{ (Pa)}$$

$$\tau_s = 68.59 \sqrt{2.3 \times 10^{-3}(2.5-1.2)}$$

$$\tau_s = 3.75 \text{ Pa.}$$

$$\tau_s < \tau_o \text{ (}\tau_o = 7.54 \text{ Pa).}$$

$$\mu = \mu_e.$$

$$Re_B = \frac{v_s \phi_p \rho}{\mu}$$

$$Re_B = \frac{0.1041 (5 \times 10^{-3}) 1200}{0.055494}$$

$$Re_B = 11.255$$

$$Re_B < 300$$

$$FL = 1 + \frac{\phi_F}{Do-Di} = 1 + \frac{5 \times 10^{-3}}{0.216-0.159}$$

$$FL = 1.0877$$

$$V_s(\text{corr.}) = \frac{V_s}{FL}$$

$$V_s(\text{corr.}) = \frac{0.1041}{1.0877} = 0.0957 \text{ m/s} = 5.74 \text{ m/min} = 18.84 \text{ pie/min.}$$

$$V_b = \frac{Q}{A}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} (0.216^2 - 0.159^2) = 0.01678$$

$$V_b = \frac{0.01834}{0.01678} = 1.09 \text{ m/s} = 65.55 \text{ m/min.}$$

$$V_r = V_b - V_s = 65.55 - 5.74 = 59.81 \text{ m/min} = 196.23 \text{ pie/min.}$$

b) Para el espacio anular entre el pozo y la tubería de perforación..

$$Q_c = \frac{321.49\pi(D_o - D_i)}{f} \left(\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + \frac{7.54(D_o - D_i)^2 f}{7716}} \right) ; (\text{m}^3/\text{s})$$

$$Q_c = \frac{321.49\pi(0.216 - 0.127)}{1200} \left(0.02271 + \sqrt{0.02271^2 + \frac{7.54(0.216 - 0.127)^2 \cdot 1200}{7716}} \right)$$

$$Q_c = 0.03514 \text{ m}^3/\text{s} = 2108.45 \text{ l/min.}$$

$$Q < Q_c \quad (Q = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s})$$

$$\mu_e = \mu_p + \frac{\pi 7.54(D_o - D_i)^2 (D_o + D_i)}{48 Q} ; (\text{Pa}\cdot\text{s})$$

$$\mu_e = 0.02271 + \frac{\pi (7.54)(0.216 - 0.127)^2 (0.216 + 0.127)}{48(0.01834)}$$

$$\mu_e = 0.09581 \text{ Pa}\cdot\text{s.}$$

$$\mu = \mu_e$$

$$v_s = \frac{174.2(\rho_s - \rho)^{0.667} \rho_p}{\rho^{0.333} \mu^{0.333}} \quad ; \quad (\text{Pie}/\text{min})$$

$$v_s = \frac{174.2(20.85-10.014)^{0.667} \cdot 0.1968}{10.014^{0.333} \quad 95.81^{0.333}}$$

$$v_s = 17.084 \text{ pie}/\text{min} = 0.08678 \text{ m/s} = 5.21 \text{ m/min.}$$

$$\tau_s = 68.59 \sqrt{h(\rho_s - \rho)} \quad ; \quad (\text{Pa})$$

$$\tau_s = 68.59 \sqrt{2.3 \times 10^{-3} (2.5-1.2)}$$

$$\tau_s = 3.75 \text{ Pa.} \quad ; \quad \tau_s \ll \tau_o \quad (\tau_o = 7.54 \text{ Pa}).$$

$$\mu = \mu_e$$

$$Re_s = \frac{v_s \rho_p d_p}{\mu}$$

$$Re_s = \frac{0.08678(5 \times 10^{-3})1200}{0.09581}$$

$$Re_s = 5.435$$

$$Re_s \ll 300$$

$$FL = 1 + \frac{\rho_p}{\rho_o - \rho_i} = 1 + \frac{5 \times 10^{-3}}{0.216 - 0.127} = 1.05617$$

$$v_s(\text{corr}) = \frac{v_s}{FL}$$

$$v_s(\text{corr}) = \frac{0.08678}{1.05617} = 0.08216 \text{ m/s} = 4.930 \text{ m/min} = 16.174 \text{ pie}/\text{min.}$$

$$v_r = \frac{40}{\pi(D_o^2 - D_i^2)} - v_s \quad ; \quad (\text{m/s})$$

$$V_r = \frac{4(0.01834)}{\pi(0.216^2 - 0.127^2)} - 0.08216$$

$$V_r = 0.6828 \text{ m/s} = 40.96 \text{ m/min} = 134.40 \text{ pie/min.}$$

c) Para el espacio anular entre el pozo ademado y la tubería de perforación.

$$Q_c = \frac{321.49 \pi (D_o \cdot D_i)}{P} \left(\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + \frac{\zeta_o (D_o - D_i)^2 P}{7716}} \right); \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_c = \frac{321.49 \pi (0.217 + 0.127)}{1200} \left(0.02271 + \sqrt{0.02271^2 + \frac{7.54(0.217 - 0.127)^2 1200}{7716}} \right)$$

$$Q_c = 0.035548 \text{ m}^3/\text{s} = 563.45 \text{ Gal/min} = 2132.91 \text{ l/min.}$$

$$Q < Q_c \quad (Q = 0.01834 \text{ m}^3/\text{s}).$$

$$\mu_e = \mu_p + \frac{\pi \zeta_o (D_o - D_i)^2 (D_o \cdot D_i)}{48 Q}; \text{ (Pa.s)}$$

$$\mu_e = 0.02271 + \frac{\pi (7.54)(0.217 - 0.127)^2 (0.217 + 0.127)}{48 (0.01834)}$$

$$\mu_e = 0.09768 \text{ Pa.s.}$$

$$\mu = \mu_e$$

$$V_s = \frac{174.2 \left(\frac{P_s - P}{P} \right)^{0.667} v_p}{\mu^{0.333}}; \text{ (pie/min)}$$

$$V_s = \frac{174.2 (20.86 - 10.014)^{0.667} 0.1968}{10.014^{0.333} 97.68^{0.333}}$$

$$V_s = 16.97 \text{ pie/min} = 0.08623 \text{ m/s}$$

$$\zeta_s = 68.59 \sqrt{h \left(\frac{P_s - P}{P} \right)}; \text{ (Pa)}$$

$$\tau_s = 68.59 \cdot 2.3 \times 10^{-3} (2.5 - 1.2)$$

$$\tau_s = 3.75 \text{ Pa} ; \tau_s < \tau_o \quad (\tau_o = 7.54 \text{ Pa.})$$

$$\mu = \mu_e$$

$$Re_s = \frac{v_s \rho F}{\mu}$$

$$Re_s = \frac{0.0862(5 \times 10^{-3}) 1200}{0.09768}$$

$$Re_s = 5.2967$$

$$Re_s < 300$$

$$FL = 1 + \frac{\rho r}{\rho_o - \rho_1} = 1 + \frac{5 \times 10^{-3}}{0.217 - 0.127} = 1.0555$$

$$v_s(\text{corr}) = \frac{v_s}{FL}$$

$$v_s(\text{corr}) = \frac{0.0862}{1.0555} = 0.081696 \text{ m/s} = 16.08 \text{ pie/min.}$$

$$v_r = \frac{40}{\pi(D_o^2 - D_1^2)} - v_s \quad , \quad (\text{m/s})$$

$$v_r = \frac{4(0.01834)}{(0.217^2 - 0.127^2)} - 0.081696$$

$$v_r = 0.6725 \text{ m/s} = 40.35 \text{ m/min} = 132.39 \text{ pie/min.}$$

$$Tr_b = \frac{d}{v_b}$$

$$Tr_b = \frac{200}{65.55} + \frac{800}{45.90} + \frac{2500}{45.25}$$

$$Trb = 75.730 \text{ min}$$

$$Tr = \frac{d}{Vr}$$

$$Tr = \frac{200}{59.81} + \frac{800}{40.96} + \frac{2500}{40.35}$$

$$Tr = 84.83 \text{ min.}$$

7.4.7. Presiones de inercia y de surgencia o sondeo.

Se considera una sarta cerrada y una aceleración o desaceleración equivalente a la velocidad de introducción de la sarta (el tiempo requerido para introducir una longitud de 27 m es $T_g = 34$ s)

- a) Presión de surgencia o sondeo, para cuando se tiene la barrena en el fondo del pozo:

$$V_p = 27/34 = 0.7941 \text{ m/s}$$

i) Introducción o extracción.

De acuerdo al diagrama de flujo 1 (párrafo 5.1.4.) se tiene:

- Espacio anular formado entre pozo ademado y tubería de perforación.

$$V_{mf} = 1.5 V_p \left(\frac{D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} + 0.45 \right) ; \text{ (m/s)}$$

$$V_{mf} = 1.5(0.7941) \left(\frac{0.127^2}{0.217^2 - 0.127^2} + 0.45 \right)$$

$$V_{mf} = 1.1564 \text{ m/s}$$

$$V_c = \frac{1286}{(D_o - D_i)^2} \left(\mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + \frac{754(D_o - D_i)^2 f}{7716}} \right) ; \text{ (m/s)}$$

$$V_c = \frac{1286}{(0.217 - 0.127)^2 1200} \left(0.02271 + \sqrt{0.02271^2 + \frac{754(0.217 - 0.127)^2 1200}{7716}} \right)$$

$$V_c = 1.4619 \text{ m/s.}$$

$V_c > V_{mf}$, por consiguiente se selecciona ΔPa para flujo laminar.

$$V = V_{mf}$$

$$\Delta Pa = \frac{48LV \mu_P}{(D_o - D_i)^2} + \frac{4 \tau_o L}{D_o - D_i} ; \text{ (Pa)}$$

$$\Delta Pa = \frac{48(2500) 1.1564(0.02271)}{(0.217 - 0.127)^2} + \frac{4(7.54)2500}{0.217 - 0.127}$$

$$\Delta Pa = 1\ 226\ 842\ \text{Pa.}$$

* Espacio anular formado entre pozo y tubería de perforación.

$$V_{mf} = 1.5(0.7941) \left(\frac{0.127^2}{0.216^2 - 0.127^2} + 45 \right)$$

$$V_{mf} = 1.165\ \text{m/s}$$

$$V_c = \frac{1286}{(0.216 - 0.127)1200} \left(0.02271 + \sqrt{0.02271^2 + \frac{754(0.216 - 0.127)^2 1200}{7716}} \right)$$

$$V_c = 1.4657$$

$V_c > V_{mf}$, por consiguiente se selecciona ΔPa para flujo laminar.

$$\Delta Pa = \frac{48(800)1.165(0.02271)}{(0.216 - 0.127)^2} + \frac{4(7.54)800}{0.216 - 0.127}$$

$$\Delta Pa = 399\ 362\ \text{Pa.}$$

* Espacio anular formado entre pozo y lastrabarrenas.

$$V_{mf} = 1.5(0.7941) \left(\frac{0.159^2}{0.216^2 - 0.159^2} + 0.45 \right)$$

$$V_{mf} = 1.945 \text{ m/s}$$

$$V_c = \frac{1286}{(0.216-0.159)1200} \left(0.02271 + \sqrt{0.02271^2 + \frac{754(0.216-0.159)^2 1200}{7716}} \right)$$

$$V_c = 1.6635$$

$V_c < V_{mf}$, por consiguiente se selecciona ΔP_a para flujo turbulento.

$$V = V_{mf}$$

$$\Delta P_a = \frac{0.1275 L \rho^{0.8} v^{1.8} \mu_p^{0.2}}{(D_o - D_i)^{1.2}} ; \text{ (Pa)}$$

$$\Delta P_a = \frac{0.1275(200)1200^{0.8} (1.945)^{1.8} 0.02271^{0.2}}{(0.216-0.159)^{1.2}}$$

$$\Delta P_a = 358\ 207 \text{ Pa.}$$

$$\Delta P_a \text{ total} = 1\ 226\ 842 + 399\ 362 + 358\ 207 = 1\ 984\ 411 \text{ Pa.}$$

$$\Delta P_a \text{ total} = P_r = \pm 1.984 \text{ MPa} = \pm 19.84 \text{ bar.}$$

ii) Inercial (Tabla XVI, ecuación no. 2).

$$\text{Se considera } Q_p = V_p = 0.7941$$

* Espacio anular formado entre pozo ademado y tubería de perforación.

$$\Delta P_f = \frac{L f D_i^2 Q_p}{D_o^2 - D_i^2} ; \text{ (Pa)}$$

$$\Delta P_f = \frac{2500(1200) 0.127^2 (0.7941)}{0.217^2 - 0.127^2}$$

$$\Delta P_f = 1\ 241\ 089 \text{ Pa}$$

* Espacio anular formado entre pozo y tubería de perforación.

$$\Delta P_f = \frac{800(1200) 0.127^2 (0.7941)}{0.216^2 - 0.127^2}$$

$$\Delta P_f = 402\,782 \text{ Pa.}$$

• Espacio anular formado entre pozo y lastrabarreras.

$$\Delta P_f = \frac{200(1200)0.159^2 (0.7941)}{0.216^2 - 0.159^2}$$

$$\Delta P_f = 225\,411 \text{ Pa.}$$

$$\Delta P_f \text{ total} = 1\,241\,089 + 402\,782 + 225\,411 = 1869\,282 \text{ Pa.}$$

$$\Delta P_f \text{ total} = 1.87 \text{ MPa} = 18.70 \text{ bar.}$$

b) Densidad equivalente originada por el movimiento de la tubería.

$$\rho^1 = \rho + \frac{\Delta P}{10L} \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$\rho^1 = 1200 \pm \frac{1\,984\,411}{10 (3500)}$$

$$\rho^1 = 1200 \pm 56.70 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{EPMD (+)} = 1\,256.7 \text{ Kg/m}^3 \quad (1.257 \text{ Kg/dm}^3)$$

$$\text{EPMD (-)} = 1\,143.3 \text{ Kg/m}^3 \quad (1.143 \text{ Kg/dm}^3).$$

c) Densidad equivalente inercial.

$$\rho^1 = 1200 \pm \frac{1\,869\,282}{10 (3500)}$$

$$\rho^1 = 1200 \pm 53.41 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{EIPMD (+)} = 1253 \text{ Kg/m}^3 \quad (1.253 \text{ Kg/dm}^3)$$

$$\text{EIPMD (-)} = 1147 \text{ Kg/m}^3 \quad (1.147 \text{ Kg/dm}^3)$$

7.4.8. Presión de surgencia para el rompimiento del gel.

Aplicando la ecuación no. 1 de la Tabla XVI y considerando un $S_t = 47.9$

Pa, se tiene:

$$Pr = \frac{4 S_t L}{Do-Di} ; \text{ (Pa)}$$

* Espacio anular formado entre pozo ademado y tubería de perforación.

$$Pr = \frac{4 (47.9) 2500}{0.217-0.127}$$

$$Pr = 5\ 322\ 222 \text{ Pa.}$$

* Espacio anular formado entre pozo y tubería de perforación.

$$Pr = \frac{4 (47.9) 800}{0.216-0.127}$$

$$Pr = 1\ 722\ 247 \text{ Pa}$$

* Espacio anular formado entre pozo y lastrabarreras.

$$Pr = \frac{4 (47.9) 200}{0.216-0.159}$$

$$Pr = 672\ 281 \text{ Pa.}$$

$$Pr \text{ total} = 7\ 716\ 750 \text{ Pa} = 7.716 \text{ MPa} = 77.16 \text{ bar.}$$

7.5. Desarrollo explícito del ejemplo no. 2.

7.5.1. Selección del modelo y determinación de los parámetros reológicos.

A. Selección del modelo

$$r = \frac{P \sum x y - \sum x \sum y}{\sqrt{(P \sum x^2 - (\sum x)^2) (P \sum y^2 - (\sum y)^2)}}$$

$x_1 = 1020 \text{ s}^{-1}$	$y_1 = 60 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$
$x_2 = 510 \text{ s}^{-1}$	$y_2 = 38 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$
$x_3 = 340 \text{ s}^{-1}$	$y_3 = 28 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$
$x_4 = \underline{170} \text{ s}^{-1}$	$y_4 = \underline{18} \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$
$\sum x = 2040$	$\sum y = 144$

$$r = \frac{4(1020(60)+510(38)+340(28)+170(18)) - (1020+510+340+170)(60+38+28+18)}{\sqrt{(4(1020^2+510^2+340^2+170^2) - (1020+510+340+170)^2)(4(60^2+38^2+28^2+18^2) - (60+38+28+18)^2)}}$$

$r = 0.99645$, desviación para el modelo de Bingham.

Considerando los logaritmos de las lecturas se obtiene el siguiente resultado:

$x_1 = \text{Log } 1020 \text{ s}^{-1}$	$y_1 = \text{Log } 60 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$
$x_2 = \text{Log } 510 \text{ s}^{-1}$	$y_2 = \text{Log } 38 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$
$x_3 = \text{Log } 340 \text{ s}^{-1}$	$y_3 = \text{Log } 28 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$
$x_4 = \text{Log } \underline{170} \text{ s}^{-1}$	$y_4 = \text{Log } \underline{18} \text{ lb}/100 \text{ pie}^2$
$\sum \text{Log } x = 10.4780098$	$\sum \text{Log } y = 6.06036$

$$r = \frac{64.361569 - 63.501047}{\sqrt{(111.0636 - 109.79054)(37.310054 - 36.728029)}}$$

$r = 0.999693$, desviación para el modelo ley de Potencia.

∴ El modelo seleccionado es el modelo ley de Potencia.

B. Determinación de los parámetros reológicos.

$$n = \frac{\sum \text{Log } \theta \sum \text{Log } \dot{\gamma} - P \sum (\text{Log } \theta \cdot \text{Log } \dot{\gamma})}{(\sum \text{Log } \dot{\gamma})^2 - P \sum (\text{Log } \dot{\gamma})^2} ; \text{ (adim)}$$

$$n = \frac{6.06036(10.4780098) - 64.361569}{109.79054 - 111.0636}$$

$$n = 0.6753 = 0.68$$

$$\text{LogK} = \frac{\sum (\text{Log } \theta \cdot \text{Log } \dot{\gamma}) \sum \text{Log } \dot{\gamma} - \sum \text{Log } \theta \sum (\text{Log } \dot{\gamma})^2}{(\sum \text{Log } \dot{\gamma})^2 - P \sum (\text{Log } \dot{\gamma})^2} ; \text{ (lb. s}^n\text{/100. pie}^2\text{)}$$

$$\text{LogK} = \frac{16.090392 (10.4780098) - 6.06036(27.7659)}{109.79054 - 111.0636}$$

$$\text{LogK} = -0.2544422$$

$$K = 0.56 \text{ lb. s}^n\text{/100 pie}^2 = 0.2682 \text{ Pa. s}^n$$

7.5.2. Determinación del gasto máximo para un número de Reynolds de 1100.

El cálculo se efectúa utilizando las ecuaciones de la sección 4.1. Este se determina en el espacio anular formado entre los lastrabarras y el pozo.

$$\text{Rec} = 2031.6 - 1370 n$$

$$V_c = \left(\frac{(2031.6 - 1370 n) K}{12(0.8165) \rho} \right)^{\frac{1}{2-n}} \left(\frac{8n + 4}{(D_o - D_i)n} \right)^{\frac{n}{2-n}} ; \text{ (m/s)}$$

$$V_c = \left(\frac{(2031.6 - 1370(0.68)) 0.2682}{12(0.8165)1200} \right)^{\frac{1}{2-0.68}} \left(\frac{8(0.68) + 4}{(0.216 - 0.159)0.68} \right)^{\frac{0.68}{2-0.68}}$$

$$V_c = 1.0398 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (0.216^2 - 0.159^2)$$

$$A = 0.0167878 \text{ m}^2$$

$$Q_c = V_c A = 1.0398 (0.0167878) = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_c = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s} = 1047 \text{ l/min} = 01$$

7.5.3. Programa hidráulico.

El cálculo se realiza para una profundidad de 3500 m. Se considera flujo turbulento en la determinación de las pérdidas por presión.

A. Criterio de la máxima potencia en la barrena.

De acuerdo al diagrama de flujo 4 (sección 6.7.), se tiene:

Considerando una $\eta_m = 0.80$ y $\eta_v = 0.90$, se obtiene que:

$$\bar{P}_{h\max} = \bar{P}_m \eta_m \eta_v = 883 (0.80) 0.90 = 635.76 \text{ KW}$$

$$\bar{P}_{hl} = 0.75 \bar{P}_{h\max} = 0.75 (635.76) = 476.82 \text{ KW} = 639.4156 \text{ HP.}$$

$$Q_s = \frac{\bar{P}_{hl}}{P_s} = \frac{476.820 \text{ W}}{20\,000\,000 \text{ Pa}} = 0.023841 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_s = 1430.46 \text{ l/min.}$$

$$J = 0.35$$

$K_c = 0.215728$ (ver inciso B, de este mismo párrafo).

$$Q = \left(\frac{J \cdot P_s}{K_c} \right)^{1/1.8} \quad (\text{Gal/min})$$

$$Q = \left(\frac{0.35 (2901)}{0.0215728} \right)^{1/1.8}$$

$$Q = 394.41 \text{ Gal/min} = 0.02488 \text{ m}^3/\text{s} = 1493 \text{ l/min.}$$

Determinación del gasto mínimo.

$$V_{\min} = 0.417 \text{ a } 0.5 \text{ m/s.}$$

$V_{\min} = 0.5 \text{ m/s}$, ocurre entre pozo sin ademe y lastrabarrenas.

$$Q_{\min} = V_{\min} A = 0.5 (0.0167878) = 0.0083939 \text{ m}^3/\text{s.}$$

$$Q_{\min} = 0.00839 \text{ m}^3/\text{s} = 133 \text{ Gal/min} = 504 \text{ l/min.}$$

$Q > Q_s$; $Q_s > Q_m$; $Q_s > Q_l$. se tiene que:

$$Q = Q_l$$

$$Q = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s} = 277 \text{ Gal/min} = 1047 \text{ l/min.}$$

$$\Delta P_l = P_s = 20\,000\,000 \text{ Pa} = 2901 \text{ lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_c = \Delta P_l + \Delta P_a + \Delta P_s$$

$$\Delta P_l = \frac{32(\text{Log}n + 2.5) \rho^2 Q^2 L}{50 \pi^2 D^5} \left(\frac{\pi^2 D^4 K \left(\frac{Q}{\pi D^3} \frac{24n + 8}{n} \right)^n}{128 Q^2} \right) \frac{1.4 - \text{Log}n}{7} ; (\text{Pa})$$

$$\Delta P_l = \frac{32(\text{Log } 0.68 + 2.5) 1200 (0.01745)^2 3300}{50 \pi^2 (0.109)^5} \left(\frac{\pi^2 (0.109)^4 0.2682 \left(\frac{0.01745}{\pi (0.109)^3} \frac{24(0.68) + 8}{0.68} \right)^{0.68}}{128 (0.01745)^2 1200} \right) \frac{1.4 - \text{Log } 0.68}{7}$$

$$+ \frac{32(\text{Log } 0.68 + 2.5) 1200 (0.01745)^2 200}{50 \pi^2 (0.073)^5} \left(\frac{\pi^2 (0.073)^4 0.2682 \left(\frac{0.01745}{\pi (0.073)^3} \frac{24(0.68) + 8}{0.68} \right)^{0.68}}{128 (0.01745)^2 1200} \right) \frac{1.4 - \text{Log } 0.68}{7}$$

$$\Delta P_l = 1841\,704 + 694\,769 = 2\,536\,473 \text{ Pa.}$$

$$\Delta Pa = \frac{32 (\log n + 2.5) \rho Q^2 L}{50 (0.8165) \pi^2 (D_o + D_i)^2 (D_o - D_i)^3}$$

$$\left(\frac{\pi^2 (D_o + D_i)^2 (D_o - D_i)^2 k \left(\frac{0}{\pi (D_o + D_i) (D_o - D_i)^2} \frac{32n + 16}{n} \right)^n}{192 (0.8165) Q^2 \rho} \right)^{\frac{1.4 - \log n}{7}} \text{ (Pa)}$$

* Espacio anular formado entre pozo ademado y tubería de perforación.

$$\Delta Pa = \frac{32 (\log 0.68 + 2.5) 1200 (0.01745)^2 2500}{50 (0.8165) \pi^2 (0.217 + 0.127)^2 (0.217 - 0.127)^3}$$

$$\left(\frac{\pi^2 (0.217 + 0.127)^2 (0.217 - 0.127)^2 0.2682 \left(\frac{0.01745}{\pi (0.217 + 0.127) (0.217 - 0.127)^2} \frac{32(0.68) + 16}{0.68} \right)^{0.68}}{192 (0.8165) (0.01745)^2 1200} \right)^{\frac{1.4 - \log 0.68}{7}}$$

$$\Delta Pa = 425 569 \text{ Pa} = 62 \text{ lb/pg}^2$$

* Espacio anular formado entre pozo y tubería de perforación.

$$\Delta Pa = \frac{32 (\log 0.68 + 2.5) 1200 (0.01745)^2 800}{50 (0.8165) \pi^2 (0.216 + 0.127)^2 (0.216 - 0.127)^3}$$

$$\left(\frac{\pi^2 (0.216 + 0.127)^2 (0.216 - 0.127)^2 0.2682 \left(\frac{0.01745}{\pi (0.216 + 0.127) (0.216 - 0.127)^2} \frac{32(0.68) + 16}{0.68} \right)^{0.68}}{192 (0.8165) (0.01745)^2 1200} \right)^{\frac{1.4 - \log 0.68}{7}}$$

$$\Delta Pa = 141 298 \text{ Pa} = 20.5 \text{ lb/pg}^2.$$

* Espacio anular formado entre pozo y lastrabarrenas.

$$\Delta P_a = \frac{32(\text{Log } 0.68+2.5)1200(0.01745)^2 200}{50(0.8165) \pi^2(0.216+0.159)^2(0.216-0.159)^3}$$

$$\left(\frac{\pi^2(0.216+0.159)^2(0.216-0.159)^2 0.222 \left(\frac{0.01745}{\pi(0.216+0.159)(0.216-0.159)^2} \frac{32(0.68)+16}{0.68} \right)^{0.68}}{192(0.8165)(1200)0.01745^2} \right) \frac{1.4-\text{Log } 0.68}{7}$$

$$\Delta P_a = 108359 \text{ Pa} = 15.72 \text{ lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_a (\text{total}) = 675 226 \text{ Pa} = 98 \text{ lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_s = 5.584 \times 10^{-5} (\text{Log } n + 2.5) f Q^2 \left(\frac{4.118 K \left(\frac{Q}{3.878} \frac{3n+1}{n} \right)^n}{Q^2 f} \right) \frac{1.4-\text{Log } n}{7} \quad ; \quad (\text{lb/pg}^2)$$

Para un equipo superficial Tipo III:

$$\Delta P_s = 5.584 \times 10^{-5} (\text{Log } 0.68+2.5) 10.014(277)^2 \left(\frac{4.118(0.56) \left(\frac{277}{3.878} \frac{3(0.68)+1}{0.68} \right)^{0.68}}{(277)^2(10.014)} \right) \frac{1.4-\text{Log } 0.68}{7}$$

$$\Delta P_s = 13.96 \text{ lb/pg}^2 = 96 270 \text{ Pa}.$$

$$\Delta P_c = 2 536 473 + 675 226 + 96 270$$

$$\Delta P_c = 3 307 969 \text{ Pa} = 480 \text{ lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_e = \Delta P_i - \Delta P_c$$

$$\Delta P_e = 20 000 000 - 3 307 969$$

$$\Delta P_e = 16 692 031 \text{ Pa} = 2 421 \text{ lb/pg}^2.$$

Cálculo del área de toberas.

$$A = \frac{Q}{C_e} \sqrt{\frac{P}{1.975 P_e}} \quad ; \quad (\text{m}^2)$$

$$A = \frac{0.01745}{0.95} \sqrt{\frac{1200}{1.975(16\ 692\ 031)}}$$

$$A = 1.108215\ m^2 = 0.171773\ pg^2.$$

$$A = 3 \frac{\pi}{4} D^2 \therefore D = \sqrt{\frac{4A}{3\pi}} ; (pg)$$

$$D = \sqrt{\frac{4(0.171773)}{3\pi}}$$

$$D = 0.2700\ pg = 0.006859\ m = 8.64/32\ pg.$$

El diámetro de c/u (tres) de las toberas es de 8.64/32 pg.

B. Criterio del máximo impacto hidráulico.

De acuerdo al diagrama de flujo 5 (sección 6.7), se tiene:

$$\bar{P}h1 = 476.82\ KW = 639.4156\ HP.$$

$$Qs = 0.023841\ m^3/s = 1430.46\ l/min.$$

$$Qm = 0.0083939\ m^3/s = 503.63\ l/min.$$

$$Ql = 0.01745\ m^3/s = 1047\ l/min.$$

$$J = 0.52$$

$$\mu_p = 300 \frac{\sum \theta \sum N - P \sum (\theta N)}{(\sum N)^2 - P \sum N^2} ; (cp)$$

$$\mu_p = 300 \frac{144(1200) - 4(54800)}{1\ 440\ 000 - 4(500\ 000)}$$

$$\mu_p = 24.86\ cp = 0.02485\ Pa.s$$

$$Kc = f^{0.8} \mu_p^{0.2} \left(\sum \left(\frac{L}{10141\ D^{4.8}} \right) + c + \sum \left(\frac{L}{7952(D_0+D_1)^{1.8}(D_0-D_1)^3} \right) \right)$$

$$K_c = 10.014^{0.8} (24.86)^{0.2} \left(\frac{10\ 827}{10141(4.28)^{4.8}} + \frac{656}{10141(2.875)^{4.8}} + 5.335 \times 10^{-5} \right. \\ + \frac{656}{7952(8.5+6.25)^{1.8} (8.5-6.25)^3} + \frac{2625}{7952(8.5+5)^{1.8} (8.5-5)^3} \\ \left. + \frac{8\ 202}{7952(8.54+5)^{1.8} (8.54-5)^3} \right)$$

$$K_c = 0.0215728$$

$$Q = \left(\frac{J\ P_B}{K_c} \right)^{1/1.8} \quad ; \quad (\text{Gal/min})$$

$$Q = \left(\frac{0.52(2901)}{0.0215728} \right)^{1/1.8}$$

$$Q = 491.43 \text{ Gal/min} = 0.0310 \text{ m}^3/\text{s} = 1860 \text{ l/min.}$$

Como $Q > Q_s$, nuevamente se calcula mediante:

$$Q = 8.834 \left(\frac{P_{h1}}{K_c} \right)^{1/2.8} \quad (\text{Gal/min})$$

$$Q = 8.834 \left(\frac{639.41}{0.0215728} \right)^{1/2.8}$$

$$Q = 349.34 \text{ Gal/min} = 0.02204 \text{ m}^3/\text{s} = 1322 \text{ l/min.}$$

$$Q_s > Q \quad \therefore \quad Q = Q_s.$$

Ahora bien dado que no se cumple $Q_m \angle Q \angle Q_1$, se tiene que:

$$Q > Q_m \quad \therefore \quad \text{finalmente } Q = Q_1.$$

$$Q = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s} = 277 \text{ Gal/min} = 1047 \text{ l/min.}$$

Debido a que $Q \angle Q_s$, también se tiene $\Delta P_1 = P_B = 2901 \text{ lb}/\text{pg}^2$.

$$\Delta P_c = \Delta P_i + \Delta P_a + \Delta P_s.$$

Las caídas de presión por fricción en todo el circuito, excepto en la barrera, resultan igual al del caso A., debido a que se maneja el mismo gasto:

$$\Delta P_c = 3307\ 969\ \text{Pa} = 480\ \text{lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_e = \Delta P_i - \Delta P_c = 20\ 000\ 000 - 3307969 = 16\ 692\ 031\ \text{Pa} = 2421\ \text{lb/pg}^2.$$

Debido a que la caída de presión en la barrera, resultó ser igual al del caso A., se tiene que:

El diámetro de c/u (tres) de las toberas es de 8.64/32 pg.

7.5.4. Pérdidas de presión.

El cálculo se realiza de acuerdo al diagrama de flujo del párrafo 4.2.2., para las siguientes condiciones:

- a) Para un gasto $Q = 0.01745\ \text{m}^3/\text{s}$ (1047 l/min).
- b) Para tres toberas de 8.64/32 pg.

Debido a que $Re \ll Re_c$, se utilizarán Ecs. para régimen laminar:

i) Pérdidas de presión en el interior de la T.P. y Lastrabarreras.

$$\Delta P_i = \frac{4\ K_L}{D} \left(\frac{Q}{\pi D^3} \frac{24n+8}{n} \right)^n, \text{ (Pa)}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \frac{4(0.2682)3300}{0.109} \left(\frac{0.01745}{\pi(0.109)^3} \frac{24(0.68) + 8}{0.68} \right)^{0.68} \\ &+ \frac{4(0.2682)200}{0.073} \left(\frac{0.01745}{(0.073)^3} \frac{24(0.68) + 8}{0.68} \right)^{0.68} \end{aligned}$$

$$\Delta P_i = 995\ 324 + 204\ 059 = 1\ 199\ 383\ \text{Pa} = 174\ \text{lb/pg}^2.$$

ii) Pérdidas de presión en el espacio anular.

$$\Delta P_a = \frac{4 K L}{D_o - D_i} \left(\frac{Q}{\pi (D_o + D_i) (D_o - D_i)^2} \frac{32n + 16}{n} \right)^n \quad (\text{Pa})$$

$$\Delta P_a = \frac{4(0.2682)2500}{(0.217-0.127)} \left(\frac{0.01745}{\pi(0.217+0.127)(0.217-0.127)^2} \frac{32(0.68) + 16}{0.68} \right)^{0.68}$$

$$+ \frac{4(0.2682)800}{(0.216-0.127)} \left(\frac{0.01745}{\pi(0.216+0.127)(0.216-0.127)^2} \frac{32(0.68) + 16}{0.68} \right)^{0.68}$$

$$+ \frac{4(0.2682)200}{(0.216-0.159)} \left(\frac{.01745}{\pi(0.216+0.159)(0.216-0.159)^2} \frac{32(0.68) + 16}{0.68} \right)^{0.68}$$

$$\Delta P_a = 731\,512 + 240\,815 + 162\,173 = 1\,134\,500 \text{ Pa} = 165 \text{ lb/pg}^2.$$

iii) Pérdidas de presión en conexiones superficiales.

Para un equipo superficial Tipo III:

$$\Delta P_s = 13.96 \text{ lb/pg}^2 = 96\,270 \text{ lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_c = \Delta P_i + \Delta P_a + \Delta P_s$$

$$\Delta P_c = 1\,199\,383 + 1134\,500 + 96\,270 = 2\,430\,153 \text{ Pa} = 353 \text{ lb/pg}^2.$$

$$\Delta P_e = 16\,692\,031 \text{ Pa} \quad (16.692 \text{ MPa}).$$

$$\Delta P = \Delta P_e + \Delta P_c = 16\,692\,031 + 2\,430\,153 = 19\,122\,184 \text{ Pa} \quad (19.122 \text{ M Pa}).$$

7.5.5. Cálculo de la densidad equivalente.

Las ecuaciones de la Tabla XVII se utilizan para su cálculo.

Para una velocidad de perforación $A_v = 10 \text{ m/h}$, y de acuerdo a las caídas de presión en el espacio anular $\Delta P_a = 1\,134\,500 \text{ Pa} = 1.134 \text{ MPa} (11.34 \text{ bar})$, se tiene que:

$$P_d = P + \frac{\pi D_r^2 A_v (2500 - P)}{4 Q}; \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$P_d = 1200 + \frac{\pi (0.216)^2 2.777 \times 10^{-3} (2500 - 1200)}{4(0.01745)}$$

$$P_d = 1\,207.6 \text{ Kg/m}^3.$$

El cálculo se realiza para una profundidad de 3500 m.

$$P^1 = P_d + \frac{\Delta P_a}{10L}; \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$P^1 = 1\,207.6 + \frac{1\,134\,500}{10(3500)}$$

$$P^1 = 1\,240 \text{ Kg/m}^3 \quad (1.24 \text{ Kg/dm}^3)$$

7.5.6. Velocidad y tiempo de levantamiento de los recortes.

El cálculo se realiza de acuerdo al diagrama de flujo 2 (párrafo 5.2.1.2).

Se considera un diámetro de recortes $\varphi_r = 5 \text{ mm}$ ($h = 2.3 \text{ mm}$ y $d = 6 \text{ mm}$) y una densidad de 2500 Kg/m^3 (2.5 Kg/dm^3).

a) Para el espacio anular entre el pozo y los lastrabarrenas.

$$Q_c = \left(\frac{\pi^2 (3470-1370n)(D_o+D_i)^2 (D_o-D_i)^2 K}{12(16)(0.8165) \rho} \right)^{\frac{1}{2-n}} \left(\frac{32n+16}{\pi(D_o+D_i)(D_o-D_i)^2 n} \right)^{\frac{n}{2-n}} ; (\text{m}^3/\text{s})$$

$$Q_c = \left(\frac{\pi^2 (3470-1370(0.68)) (0.216+0.159)^2 (0.216-0.159)^2 0.2682}{12(16)(0.8165)1200} \right)^{\frac{1}{2-0.68}} \left(\frac{32(0.68)+16}{\pi(0.216+0.159)(0.216-0.159)^2 0.68} \right)^{\frac{0.68}{2-0.68}}$$

$$Q_c = 0.03289 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_c > Q \quad (Q = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s}).$$

$$\mu_e = K \left(\frac{48 Q}{\pi(D_o-D_i)^2 (D_o+D_i)} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1} ; (\text{Pa.s})$$

$$\mu_e = 0.2682 \left(\frac{48(0.01745)}{\pi(0.216-0.159)^2 (0.216+0.159)} \frac{2(0.68)+1}{3(0.68)} \right)^{0.68-1}$$

$$\mu_e = 0.04564 \text{ Pa.s} = 45.64 \text{ cp}$$

$$\mu = \mu_e$$

$$V_s = \frac{174.2 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{0.667} \varphi_p}{\rho^{0.333} \mu^{0.333}} ; (\text{pie}/\text{min})$$

$$V_s = \frac{174.2(20.86-10.014)^{0.667} 0.1968}{10.014^{0.333} (45.64)^{0.333}}$$

$$V_s = 21.87 \text{ pie/min} = 6.665 \text{ m/min} = 0.1111 \text{ m/s.}$$

$$\tau_s = 7.9 \sqrt{h (P_s - P)} \quad ; \quad (\text{lb}/100 \text{ pie}^2)$$

$$\tau_s = 7.9 \sqrt{0.09055 (20.86 - 10.014)}$$

$$\tau_s = 7.829 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2 = 3.75 \text{ Pa.}$$

$$\mu_e' = \frac{\tau_s}{\left(\frac{V_s}{K}\right)} \quad ; \quad (\text{Pa}\cdot\text{s})$$

$$\mu_e' = \frac{3.75}{\left(\frac{3.75}{0.2682}\right)} \quad ; \quad 1/0.68$$

$$\mu_e' = 0.0775 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 77.5 \text{ cp.}$$

$$\mu_e' > \mu_e \quad (\mu_e = 0.04564 \text{ Pa}\cdot\text{s}).$$

$$\mu = \mu_e$$

$$Re_s = \frac{V_s \phi P}{\mu}$$

$$Re_s = \frac{0.1111(5 \times 10^{-3})1200}{0.04564} = 14.61$$

$$Re_s < 300$$

$$FL = 1 + \frac{\phi P}{D_o - D_i}$$

$$FL = 1 + \frac{5 \times 10^{-3}}{0.216 - 0.159} = 1.0877$$

$$V_s (\text{corr.}) = \frac{V_s}{FL}$$

$$V_s (\text{corr.}) = \frac{0.1111}{1.0877} = 0.10214 \text{ m/s} = 6.13 \text{ m/min} = 20.11 \text{ pie/min.}$$

$$V_r = \frac{4Q}{\pi(D_o^2 - D_i^2)} - V_s \quad ; \quad (\text{m/s})$$

$$V_r = \frac{4(0.01745)}{\pi(0.216^2 - 0.159^2)} - 0.10214$$

$$V_r = 0.9373 \text{ m/s} = 56.23 \text{ m/min} = 185 \text{ pie/min.}$$

b) Para el espacio anular entre el pozo y la tubería de perforación.

$$Q_c = \frac{\pi(3470-1370)(0.68)}{12(16)(0.8165)1200} \left(\frac{0.216+0.127}{0.216-0.127} \right)^2 \frac{0.2682}{2-0.68} ; \quad \frac{1}{2-0.68}$$

$$\left(\frac{32(0.68)+16}{\pi(0.216+0.127)(0.216-0.127)^2} \right) \frac{0.68}{2-0.68}$$

$$Q_c = 0.03734 \text{ m}^3/\text{s} = 592 \text{ Gal/min.}$$

$$Q_c > Q \quad (Q = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s}).$$

$$\mu_e = K \left(\frac{48Q}{\pi(D_o - D_i)^2(D_o + D_i)} \right)^{\frac{2n+1}{3n}} \quad ; \quad (\text{Pa.s})$$

$$\mu_e = 0.2682 \left(\frac{48(0.01745)}{\pi(0.216-0.127)^2(0.216+0.127)} \right)^{\frac{2(0.68)+1}{3(0.68)}}$$

$$\mu_e = 0.05899 \text{ Pa.s.}$$

$$\mu = \mu_e$$

$$V_s = \frac{174.2 \left(\frac{P_s - P}{\rho} \right)^{0.667}}{\rho^{0.333} \mu^{0.333}} \quad ; \quad (\text{pie/min})$$

$$V_s = \frac{174.2(20.86-10.014)^{0.667}}{10.014^{0.333} (58.99)^{0.333}} \frac{0.1968}{0.333}$$

$$V_s = 20 \text{ pie/min} = 0.10199 \text{ m/s.}$$

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

$$\tau_{es} = 7.9 \sqrt{h (\rho_s - \rho)} \quad ; \quad (\text{lb}/100 \text{ pie}^2)$$

$$\tau_{es} = 7.9 \sqrt{0.09055 (20.86 - 10.014)}$$

$$\tau_{es} = 7.829 \text{ lb}/100 \text{ pie}^2 = 3.75 \text{ Pa.}$$

$$\mu_e' = \frac{\tau_{es}}{\left(\frac{\tau_{es}}{K}\right)^{1/n}} \quad ; \quad (\text{Pa.s})$$

$$\mu_e' = \frac{3.75}{\left(\frac{3.75}{0.2682}\right)^{1/0.68}} = 0.0775 \text{ Pa.s} = 77.5 \text{ cp.}$$

$$\mu_e' > \mu_e \quad (\mu_e = 0.05899 \text{ Pa.s}).$$

$$\mu = \mu_e$$

$$\text{Re}_B = \frac{V_s \phi_P \rho}{\mu}$$

$$\text{Re}_B = \frac{0.10199 (5 \times 10^{-3}) 1200}{0.05899} = 10.37$$

$$\text{Re}_B < 300$$

$$\text{FL} = 1 + \frac{\phi_P}{D_o - D_1}$$

$$\text{FL} = 1 + \frac{5 \times 10^{-3}}{0.216 - 0.127} = 1.0561$$

$$V_s (\text{corr.}) = \frac{V_s}{\text{FL}} = \frac{0.10199}{1.0561} = 0.9656 \text{ m/s} = 5.79 \text{ m/min} = 19 \text{ pie/min.}$$

$$V_r = \frac{4Q}{\pi(D_o^2 - D_1^2)} - V_s \quad ; \quad (\text{m/s})$$

$$V_r = \frac{4(0.01745)}{\pi(0.216^2 - 0.127^2)} - 0.9656$$

$$V_r = 0.63125 \text{ m/s} = 38 \text{ m/min} = 124 \text{ pie/min.}$$

- c) Para el espacio anular formado entre el pozo adernado y la tubería de perforación.

$$Q_c = \frac{\pi^2 (3470 - 1370)(0.68) (0.217 + 0.127)^2 (0.217 - 0.127)^2 0.2682}{12(16)(0.8165)1200} \frac{1}{2-0.68}$$

$$\left(\frac{32(0.68) + 16}{\pi(0.217 + 0.127)(0.217 - 0.127)^2 0.68} \right) \frac{0.68}{2-0.68}$$

$$Q_c = 0.03765 \text{ m}^3/\text{s} = 597 \text{ Gal/min.}$$

$$Q_c > Q \quad (Q = 0.01745 \text{ m}^3/\text{s}).$$

$$\mu_e = K \left(\frac{48Q}{\pi(D_o - D_i)^2(D_o + D_i)} \frac{2n + 1}{3n} \right)^{n-1}; \quad (\text{Pa}\cdot\text{s})$$

$$\mu_e = 0.2682 \left(\frac{48(0.01745)}{\pi(0.217 - 0.127)^2(0.217 + 0.127)} \frac{2(0.68) + 1}{3(0.68)} \right)^{0.68-1}$$

$$\mu_e = 0.05947 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 59.47 \text{ cp.}$$

$$\mu = \mu_e.$$

$$V_B = \frac{174.2 \left(\frac{P_B - P}{\rho} \right)^{0.667} \theta_P}{\rho^{0.333} \mu^{0.333}}; \quad (\text{pie/min})$$

$$V_B = \frac{174.2(20.86 - 10.014)^{0.667} 0.1968}{10.014^{0.333} (59.47)^{0.333}}$$

$$V_B = 20 \text{ pie/min} = 0.10172 \text{ m/s}$$

$$\tau_B = 7.9 \sqrt{h \left(\frac{P_B - P}{\rho} \right)}; \quad (\text{lb/100 pie}^2)$$

$$\tau_B = 7.9 \sqrt{0.09055 (20.86 - 10.014)} = 7.829 \text{ lb/100 pie}^2 = 3.75 \text{ Pa.}$$

$$\mu_e' = \frac{\tau_B}{\left(\frac{\tau_B}{K} \right)^{1/n}}; \quad (\text{Pa}\cdot\text{s})$$

$$\mu_e = \frac{3.75}{\left(\frac{3.75}{0.2682}\right)^{1/0.68}} = 0.0775 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 77.5 \text{ cp.}$$

$$\mu_e > \mu_e \quad (\mu_e = 0.05947 \text{ Pa}\cdot\text{s}).$$

$$\mu = \mu_e.$$

$$Re_B = \frac{V_s \phi_p \rho}{\mu}$$

$$Re_B = \frac{0.10172 (5 \times 10^{-3}) 1200}{0.05947} = 10.26$$

$$Re_B < 300$$

$$FL = 1 + \frac{\phi_p}{D_o - D_i}$$

$$FL = 1 + \frac{5 \times 10^{-3}}{0.217 - 0.127} = 1.0555$$

$$V_s (\text{corr.}) = \frac{V_s}{FL} = \frac{0.10172}{1.0555} = 0.09636 \text{ m/s} = 5.78 \text{ m/min} = 19 \text{ pie/min.}$$

$$V_r = \frac{4Q}{\pi(D_o^2 - D_i^2)} - V_s \quad ; \quad (\text{m/s}).$$

$$V_r = \frac{4(0.01745)}{\pi(0.217^2 - 0.127^2)} - 0.09636$$

$$V_r = 0.62127 \text{ m/s} = 37 \text{ m/min} = 122 \text{ pie/min.}$$

$$Tr_b = \frac{d}{V_b}$$

$$Tr_b = \frac{200}{62.36} + \frac{800}{43.67} + \frac{2500}{43.05} = 79.59 \text{ min.}$$

$$Tr = \frac{d}{V_r}$$

$$Tr = \frac{200}{56.23} + \frac{800}{37.87} + \frac{2500}{37.27} = 91.75 \text{ min.}$$

7.5.7. Presiones de inercia y de surgencia o sondeo.

Se considera una sarta cerrada y una aceleración o desaceleración equivalente a la velocidad de introducción de la sarta (el tiempo requerido para introducir una longitud de 27 m es $T_g = 40$ s).

$$V_p = 27/40 = 0.675 \text{ m/s.}$$

- a) Presión de surgencia o sondeo, para cuando se tiene la barrena en el fondo del pozo:

1) Introducción o extracción.

De acuerdo al diagrama de flujo 1 (párrafo 5.1.4.) se tiene:

* Espacio anular formado entre pozo ademado y tubería de perforación.

$$V_{mf} = 1.5 V_p \left(\frac{D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} + 0.45 \right) \quad ; \quad (\text{m/s})$$

$$V_{mf} = 1.5 (0.675) \left(\frac{0.127^2}{0.217^2 - 0.127^2} + 0.45 \right)$$

$$V_{mf} = 0.983 \text{ m/s.}$$

$$V_c = \left(\frac{(3470 - 1370n) K}{12(0.8165) P} \right)^{\frac{1}{2-n}} \left(\frac{8n + 4}{(D_o - D_i) n} \right)^{\frac{n}{2-n}} \quad ; \quad (\text{m/s})$$

$$V_c = \left(\frac{(3470 - 1370(0.68))0.2682}{12(0.8165)1200} \right)^{\frac{1}{2-0.68}} \left(\frac{8(0.68) + 4}{(0.217 - 0.127)0.68} \right)^{\frac{0.68}{2-0.68}}$$

$$V_c = 0.1155 (13.4049) = 1.548 \text{ m/s.}$$

$$V_{mf} < V_c$$

$$V = V_{mf}.$$

$$\Delta P_{sa} = \frac{4 K L}{D_o - D_i} \left(\frac{V}{D_o - D_i} \frac{8n + 4}{n} \right)^n \quad ; \quad (\text{Pa})$$

$$\Delta P_a = \frac{4(0.2682) 2500}{(0.217-0.127)} \left(\frac{0.993}{0.217-0.127} \frac{8(0.68) + 4}{0.68} \right)^{0.68}$$

$$\Delta P_a = 906\ 030\ \text{Pa} = 131.41\ \text{lb/pg}^2.$$

* Espacio anular formado entre pozo y tubería de perforación.

$$V_{mf} = 1.5 (0.675) \left(\frac{0.127^2}{0.216^2 - 0.127^2} + 0.45 \right)$$

$$V_{mf} = 0.99058\ \text{m/s.}$$

$$V_c = \left(\frac{(3470-1370(0.68))0.2682}{12(0.8165)1200} \right) \frac{1}{2-0.68} \left(\frac{8(0.68) + 4}{(0.216-0.127)0.68} \right) \frac{0.68}{2-0.68}$$

$$V_c = 0.1155 (13.4823) = 1.557\ \text{m/s.}$$

$$V_{mf} < V_c$$

$$\Delta P_a = \frac{4(0.2682)800}{(0.216-0.127)} \left(\frac{0.99058}{0.216-0.127} \frac{8(0.68) + 4}{0.68} \right)^{0.68}$$

$$\Delta P_a = 296\ 971\ \text{Pa} = 43\ \text{lb/pg}^2.$$

*Espacio anular formado entre pozo y lastrabarrenas.

$$V_{mf} = 1.5(0.675) \left(\frac{0.159^2}{0.216^2 - 0.159^2} + 0.45 \right)$$

$$V_{mf} = 1.653\ \text{m/s.}$$

$$V_c = \left(\frac{(3470-1370(0.68))0.2682}{12(0.8165) 1200} \right) \frac{1}{2-0.68} \left(\frac{8(0.68) + 4}{(0.216-0.159)0.68} \right) \frac{0.68}{2-0.68}$$

$$V_c = 1.959\ \text{m/s}$$

$$V_{mf} < V_c$$

$$\Delta P_a = \frac{4(0.2682) 200}{(0.216-0.159)} \left(\frac{1.653}{0.216-0.159} \frac{8(0.68) + 4}{0.68} \right)^{0.68}$$

$$\Delta P_a = 222\ 321\ \text{Pa} = 32.24\ \text{lb}/\text{pg}^2.$$

$$\Delta P_a (\text{total}) = 906\ 030 + 296\ 971 + 222\ 321 = 1\ 425\ 322\ \text{Pa}.$$

$$\Delta P_a (\text{total}) = P_r = \pm 1.425\ \text{MPa} = \pm 14.25\ \text{bar}.$$

ii) Inercial (Tabla XVI, ecuación no. 2).

$$\text{Se considera } Q_P = V_P = 0.675\ \text{m/s}.$$

* Espacio anular formado entre pozo ademado y tubería de perforación.

$$\Delta P_f = \frac{L \rho D_1^2 Q_P^2}{D_o^2 - D_1^2} \quad ; \quad (\text{Pa})$$

$$\Delta P_f = \frac{2500(1200)0.127^2 (0.675)}{0.217^2 - 0.127^2}$$

$$\Delta P_f = 1054\ 949\ \text{Pa}.$$

* Espacio anular formado entre pozo y tubería de perforación.

$$\Delta P_f = \frac{800(1200)0.127^2 (0.675)}{0.216^2 - 0.127^2}$$

$$\Delta P_f = 342\ 372\ \text{Pa}.$$

* Espacio anular formado entre pozo y lastrabarreras.

$$\Delta P_f = \frac{200(1200)0.159^2 (0.675)}{0.216^2 - 0.159^2}$$

$$\Delta P_f = 191\ 603\ \text{Pa}.$$

$$\Delta P_f (\text{total}) = 1054\ 949 + 342\ 372 + 191\ 603 = 1\ 588\ 924\ \text{Pa}.$$

$$\Delta P_f (\text{total}) = 1.588\ \text{MPa} = 15.88\ \text{bar}.$$

b) Densidad equivalente originada por el movimiento de la tubería.

$$\rho' = \rho + \frac{\Delta P_a}{10L} \quad ; \quad (\text{Kg}/\text{m}^3)$$

$$\rho' = 1200 \pm \frac{1\ 425\ 322}{10(3500)}$$

$$\rho' = 1200 \pm 40.72 \text{ Kg/m}^3.$$

$$\text{EPMD (+)} = 1240.72 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.24 Kg/dm}^3\text{)}.$$

$$\text{EPMD (-)} = 1159.3 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.159 Kg/dm}^3\text{)}.$$

c) Densidad equivalente inercial.

$$\rho' = 1200 \pm \frac{1\ 588\ 924}{10(3500)}$$

$$\rho' = 1200 \pm 53.41 \text{ Kg/m}^3.$$

$$\text{EIPMD (+)} = 1245 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.245 Kg/dm}^3\text{)}.$$

$$\text{EIPMD (-)} = 1155 \text{ Kg/m}^3 \text{ (1.155 Kg/dm}^3\text{)}.$$

7.5.8. Presión de surgencia para el rompimiento del gel.

Aplicando la ecuación no. 1 de la Tabla XVI y considerando un $R_t = 47.9$, se tiene:

$$Pr = \frac{4 R_t L}{D_o - D_i} \text{ (Pa)}$$

* Espacio anular formado entre pozo ademado y tubería de perforación.

$$Pr = \frac{4(47.9) 2500}{0.217 - 0.127} = 5\ 322\ 222 \text{ Pa.}$$

* Espacio anular formado entre pozo y tubería de perforación.

$$Pr = \frac{4(47.9) 800}{0.216 - 0.127} = 1\ 722\ 247 \text{ Pa.}$$

* Espacio anular formado entre pozo y Lastrabarreras.

$$Pr = \frac{4(47.9) 200}{0.216 - 0.159} = 672\ 281 \text{ Pa.}$$

$$Pr \text{ (total)} = 5\ 322\ 222 + 1\ 722\ 247 + 672\ 281 = 7\ 716\ 750 \text{ Pa.}$$

$$Pr \text{ (total)} = 7.716 \text{ MPa} = 77.16 \text{ bar.}$$

7.6. Conclusiones y recomendaciones.

El cálculo hidráulico, desde luego es una de las determinaciones más importantes durante la perforación de un pozo, debido a que una correcta selección del diámetro de las toberas y del gasto manejado en superficie para cada intervalo programado a perforar, nos proporcionará buenos resultados en el avance de la perforación (velocidad de perforación) y por consiguiente coadyuvará a reducir los costos de la perforación.

Un diseño apropiado implica una mejor racionalización de la energía disponible en superficie, es decir una distribución óptima de las pérdidas por presión para todo el circuito que recorre el fluido de perforación. Además se logra una adecuada remoción de los recortes sin provocar daño por erosión a las paredes del pozo.

Dado que el sistema hidráulico es el fluido dentro del pozo, ya sea en condiciones dinámicas o estáticas, es importante caracterizar el comportamiento del mismo debido a que todos los cálculos se basan en dicha caracterización.

Los fluidos utilizados en perforación se clasifican como fluidos no-Newtonianos. En esta clasificación están comprendidos los modelos matemáticos planteados por los fluidos de Bingham y ley de potencia, los cuales de una manera aproximada representan el comportamiento de los fluidos de perforación. La selección entre uno u otro depende del grado de aproximación que presente el fluido usado.

Los parámetros característicos son la viscosidad plástica y el punto de cedencia para los fluidos de Bingham; el índice de consistencia y el índice de comportamiento de flujo para los fluidos ley de potencia.

Finalmente de los ejemplos presentados en este trabajo se puede afirmar que:

* El modelo de Bingham es más sencillo de aplicar, comparándolo con el modelo ley de potencia.

* No obstante la pequeña diferencia existente en las lecturas del viscosímetro Fann para ambos ejemplos, se puede señalar que los dos modelos proporcionan resultados muy similares.