

I  
622.3381  
S43L

# LECTURAS SOBRE LODOS DE PERFORACIÓN

Miguel Angel Sierra Baena  
I. P.; M.S. en Ciencia y Técnica del Carbón;  
M.S. en Educación, con Énfasis en Docencia Universitaria.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
Sede Medellín

FACULTAD DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERALES

# LECTURAS SOBRE LODOS DE PERFORACIÓN

*Con respeto y aprecio,  
Para el profesor Oscar Fleury S.*



**Miguel Angel Sierra Baena**

I. P.; M.S. en Ciencia y Técnica del Carbón;  
M.S. en Educación, con Enfoque en Docencia Universitaria.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

Sede Medellín

**FACULTAD DE MINAS**

DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERALES



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDILLIN  
DEPTO. DE BIBLIOTECAS  
BIBLIOTECA "EFE" GOMEZ

Medellin, 2000

0

UNAL-Medellin



Preparación Editorial: Miguel Angel Sierra Baena  
Herbert Alonso Ramírez F.

Impresión: Ecográficas Ltda.

Número de Ejemplares: 150

Portada y Fotografías  
de secciones: Adaptación y Modificación de Revistas JPT y SPEDE

Impreso en Medellín, Colombia, Enero del 2000

**Permitida su reproducción exclusivamente para fines académicos,  
citando la fuente y el autor**

022.3381  
S43L

*"Siempre hay seres humanos detrás  
de nuestras acciones"*

*Fernando González*

*Ich liebe Dich  
für immer.*



*A mis estudiantes de la  
Facultad de Minas; a los profesores  
de esta Dependencia.*

*A mi madre, quien  
me enseñó las primeras lecturas.*

*A Lucía y a Miguel Alejandro,  
quienes mejor han soportado mis lecturas.*

*A DIVAMI, con quien empiezan las lecturas de este siglo,  
iluminándolas con sus significados.*

## TABLA DE CONTENIDO

p.

LISTADO DE FIGURAS .....	vii
LISTADO DE TABLAS .....	viii
LISTADO DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	ix
PRESENTACIÓN .....	15
1. DEFINICIÓN Y FUNCIONES PRINCIPALES DE UN LODO DE PERFORACIÓN .....	17
2. PRUEBAS FUNDAMENTALES EN LODOS DE PERFORACIÓN .....	23
2.1. Peso del Lodo (densidad) .....	25
2.2. Viscosidad y fuerza gel .....	28
2.3. Filtrado y torta .....	32
2.4. Agua, aceite y sólidos .....	39
2.5. Contenido de arena .....	43
2.6. Capacidad de azul de metileno .....	44
2.7. Alcalinidad .....	47
3. COMPOSICIÓN DE LOS PRINCIPALES LODOS DE PERFORACIÓN .....	51
4. CLASIFICACIÓN, SEGÚN COMPOSICIÓN, DE LOS PRINCIPALES LODOS DE PERFORACIÓN .....	57
4.1. Lodos no dispersos. ....	59
4.2. Lodos cálcicos. ....	60
4.3. Lodos dispersos. ....	60
4.4. Lodos bajos en sólidos. ....	62
4.5. Lodos saturados con sal. ....	63
4.6. Lodos cuya fase continua es aceite. ....	64
4.7. Lodos con materiales poliméricos. ....	65
4.8. Lodos cuya fase continua es "material sintético (producido por síntesis química)" .....	65
4.9. Últimos lodos propuestos como alternativa a los fluidos neumáticos .....	66
5. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS PRINCIPALES LODOS DE PERFORACIÓN .....	67

5.1.	Lodos de perforación y políticas ambientales en el mundo .....	69
5.2.	Los materiales poliméricos y su importancia en las operaciones de perforación. Lodos base agua y materiales poliméricos contra lodos cuya fase continua es aceite.....	73
5.3.	La importancia de la reducción de los volúmenes de desechos .....	76
6.	INTRODUCCIÓN AL TRABAJO CON MODELOS REOLÓGICOS Y SU APLICACIÓN EN LA PERFORACIÓN DE POZOS .....	79
6.1.	Leyes básicas de flujo de fluidos .....	81
6.2.	Regímenes de flujo .....	85
6.3.	Clasificación de fluidos .....	86
6.3.1.	Fluidos Newtonianos y no Newtonianos .....	86
6.3.2.	Modelos reológicos para lodos de perforación .....	88
6.4.	Flujo de líquidos Newtonianos en tuberías .....	95
6.5.	Flujo de líquidos Newtonianos en el anular .....	99
6.6.	Flujo en tuberías de fluidos plásticos tipo Bingham.....	105
6.7.	Flujo anular de fluidos plásticos tipo Bingham .....	112
6.8.	Hidráulica de la perforación rotatoria .....	115
	REFERENCIAS .....	123

## LISTADO DE FIGURAS

FIGURA.	p
1. Tipos de fluidos de perforación .....	20
2. Formato API para informe del lodo .....	26
3. Balanza convencional de lodo y su estuche .....	27
4. Balanza de lodo, tamaño boisillo .....	27
5. Embudo Marsh y su taza graduada .....	29
6. Algunos tipos de viscosímetros rotacionales aprobados por API .....	32
7. Filtro-prensa para pruebas a temperatura y presión bajas: a) unidades simples; b) unidad múltiple .....	34
8. Filtro prensa para pruebas a temperatura y presión altas: a) con fuente separada de presurización con CO <sub>2</sub> ; b) Con presurización dual mediante N <sub>2</sub> .....	36
9. Retorta: a) patrón; b) con termostato .....	40
10. Arenímetro .....	44
11. Punto final de la titulación en la prueba "capacidad de azul de metileno" .....	46
12. Procedimiento para la prueba de supervivencia de camarones tipo Mysidopsis Bahía .....	70
13. Ejemplo de un sistema para control de sólidos con circulación cerrada .....	77
14. Sistema general de flujo .....	82
15. Cizalladura horizontal de un fluido .....	87
16. Curva de consistencia de un fluido newtoniano .....	87
17. Curvas de consistencia para fluidos pseudoplásticos(a) y dilatantes (b) .....	88
18. Curva de consistencia para un fluido de Bingham .....	90
19. Gráfica doblemente logarítmica para fluidos que sigan la ley potencial de Ostwald-deWaele .....	91
20. Curvas de consistencia para modelos: A. Bingham, B. Ostwald-deWaele, C. Robertson-Stiff, D. Herschel-Bulkley, E. Newtoniano. ....	93



21. Curvas de consistencia para lodos preparados con bentonita (20.6 g/l) y varias concentraciones de CMC .....	93
22. Comparación de modelos reológicos con curva de consistencia experimental de un lodo cuya fase continua es aceite .....	94
23. Perfil de velocidad para flujo laminar en tuberías de sección circular .....	96
24. Perfil de velocidad para flujo turbulento en tuberías de sección circular .....	96
25. Factor de fricción de Fanning para tuberías de acero limpias .....	98
26. Longitudes equivalentes de válvulas y accesorios .....	100
27. Coeficiente para flujo anular .....	102
28. Perfil de esfuerzo para flujo laminar en tuberías de sección circular .....	105
29. Flujo rectilíneo entre láminas paralelas y fijas .....	112

## LISTADO DE TABLAS

TABLA	p.
1. Contrapresión mínima recomendada para determinación de filtrado y costra a temperatura y presión altas .....	35
2. Concentraciones, en mg/l, de iones en el lodo .....	49
3. Grados de toxicidad .....	69
4. Algunos aditivos tóxicos y sus sustitutos .....	73
5. Características reológicas de los fluidos .....	88
6. Pérdidas de presión, por fricción, en conexiones de superficie .....	119

## LISTADO DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

$\alpha$	: Parámetro adimensional de la geometría anular, definido como $di/do$
$\gamma$	: Rata de cizalladura
$\mu$	: Viscosidad, lbm/(pie-seg)
$\mu_a$	: Viscosidad aparente
$\mu_c$	: Viscosidad de Casson
$\mu_N$	: Viscosidad absoluta
$\mu_p$	: Viscosidad plástica
$\rho$	: Densidad, lbm/pies <sup>3</sup>
$\rho_o$	: Densidad de aceite
$\rho_b$	: Densidad de material densificante
$\rho_f$	: Densidad de filtrado
$\rho_{lg}$	: Densidad de sólidos de baja gravedad
$\tau$	: Esfuerzo de cizalladura
$\tau_o$	: Esfuerzo de cedencia
$\tau_y$	: Punto de cedencia
A	: Area seccional de flujo, pulgadas <sup>2</sup>
(A)	: Area seccional de flujo, pies <sup>2</sup>
AIME	: The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers.
API	: American Petroleum Institute
$A_R$	: Constante del modelo de Robertson-Stiff
B	: Constante del modelo de Robertson-Stiff
Ba	: Bario
bbl	: Barril(es)
C	: Constante del modelo de Robertson-Stiff
c	: Constante
°C	: Grados centígrados
CEC	: Capacidad total de intercambio de cationes

$C_L$	: Coeficiente de Lamb, definido como $(1 - \alpha^2) \left( 1 + \alpha^2 - \frac{1 - \alpha^2}{\ln \frac{1}{\alpha}} \right)$
cm	: Centímetro(s)
CMC	: Carboximetilcelulosa
CO <sub>2</sub>	: Dióxido de carbono
cP	: Centipoises
$C_s$	: Coeficiente anular aproximado, definido como $(1 - \alpha)^3 (1 + \alpha) / 1.5$
$c_s$	: Concentración de cloruros
D	: Diámetro, pies
d	: Diámetro, pulgadas
de	: Diámetro equivalente, definido como 4R
D.F.	: Distrito Federal
di	: Diámetro externo de la tubería interna, pulgadas
do	: Diámetro interno de la tubería externa, pulgadas
e	: Factor de eficiencia
E	: Rugosidad absoluta, pulgadas
E/d	: Rugosidad relativa
ECOPETROL	: Empresa Colombiana de Petróleos
EPA	: U.S. Environmental Protection Agency
°F	: Grados Fahrenheit
Fe	: Hierro
$f_F$	: Factor de fricción de Fanning, adimensional
$F_w$	: Fracción de agua en el lodo
G	: Gravedad específica
g	: Gramo(s)
gal	: Galón(es)
$g_c$	: Factor de conversión, 32.17 lbm-pie/(lbf-seg <sup>2</sup> )
H <sub>2</sub> S	: Acido Sulhídrico
HEC	: Hidroxi-etil-celulosa
IADC	: International Association of Drilling Contractors

ICP	: Instituto Colombiano del Petróleo
I. P.	: Ingeniero de Petróleos
JPT	: Journal of Petroleum Technology
K	: Índice de consistencia
$K_0, K_1$	: Constantes del modelo de Casson
Kg	: Kilogramo(s)
kPa	: Kilopascales
(L)	: Longitud, pies
L	: Longitud, millas
l	: Litros
lbf	: Libras fuerza
lbm	: Libras-masa
$L_e$	: Longitud equivalente, millas
lpc	: Libra-fuerza/pulgada cuadrada
lpc <sub>a</sub>	: Libra-fuerza/pulgada cuadrada, absoluta
m.	: Metros
meq	: Miliequivalentes
$M_f$	: Alcalinidad, del filtrado, al anaranjado de metilo
mg	: Miligramos
ml	: Mililitros
mm	: Milímetro(s)
M.S.	: Maestro en Ciencias
MWD	: Measurement-while-drilling
N	: Normal
n	: Índice de comportamiento del flujo
No.	: Número
$N_2$	: Nitrógeno
NPDES	: National Pollution Discharge Elimination System
$N_R$	: Número de Reynolds, adimensional
$N_{Ra}$	: Número de Reynolds en el anular, adimensional

$N_{Re}$	: Número de Reynolds equivalente, adimensional
$O_2$	: Oxígeno
Op.cit.	: Obra citada
$P$	: Pérdida de presión, debidas a fricción, por unidad de longitud, lpc/milla
p.	: Página
Pa	: Pascales
Pb	: Plomo
p.e.	: Por ejemplo
$P_f$	: Alcalinidad, del filtrado, a la fenolftaleína
$\Delta p_f$	: Pérdidas de presión por fricción, lbf/pie <sup>2</sup> o lbf/pulgada <sup>2</sup>
$p^H$	: Potencial de Hidrógeno
$P_m$	: Alcalinidad, del lodo, a la fenolftaleína
pp.	: Páginas
Ppm	: Partes por millón
$P_f$	: Alcalinidad, del filtrado, a la fenolftaleína
pulg.	: Pulgada
$(\dot{q})$	: Rata volumétrica, pies <sup>3</sup> /segundo
$\dot{q}$	: Rata volumétrica, galones/minuto
R	: Radio hidráulico
r	: Radio correspondiente a la capa de fluido considerada
rpm	: Revoluciones por minuto
$r_w$	: Radio interno de una tubería de sección circular
SAPP	: Pirofosfato ácido de Sodio
seg.	: Segundos
SHMP	: Hexametafosfato de Sodio
SPE	: Society of Petroleum Engineers of AIME
SPEDC	: SPE Drilling and Completion
SPEDE	: SPE Drilling Engineering
SPEJ	: SPE Journal