

Fórmulas y Cálculos para la Perforación, Producción y Rehabilitación

**Todas las fórmulas que se necesitan para resolver
problemas de perforación y producción**

Norton J. Lapeyrouse

Tabla de Contenido

Prefacio	4
CAPÍTULO UNO FÓRMULAS BÁSICAS	1
Gradiente de Presión	1
Presión Hidrostática	2
Convertir la Presión en Peso de Lodo	3
Gravedad Específica (SG)	4
Densidad Circulante Equivalente (ECD), ppg	5
Peso de lodo máximo permitido por datos de la prueba de integridad de la formación (“leak-off test”)	5
Flujo de Salida de Bomba	5
Velocidad Anular (AV)	7
Fórmulas de Capacidad	9
Perforación de Control	15
Factor de Flotabilidad (“Buoyancy Factor – BF”)	15
Presión Hidrostática (HP) Disminución Al Retirar la Tubería del Hoyo	16
Pérdida de Sobreequilibrio Debido a Caída en Nivel de Lodo	18
Temperatura de la Formación (FT)	19
Caballos de Fuerza Hidráulica (HHP)	19
Cálculos para Tubería de Perforación / Cuellos de Perforación	20
Fórmulas de Reglas Generales	20
Presión de Bomba / Relación de Emboladas de la Bomba	21
Costo por Pie	22
Fórmulas para la Conversión de Temperatura	23
CAPÍTULO DOS CÁLCULOS BÁSICOS	25
Volúmenes y Emboladas	25
Cálculos para Tarrugas ("Slugs")	27
Capacidad del Acumulador – Volumen Utilizable Por Botella	30
Densidad en Masa de Ripios de Perforación (Utilizando Balanza para Lodo)	33
Diseño de la Sarta de Perforación (Limitaciones)	33
Cálculos de Toneladas-Millas (TM)	35
Cálculos para la Cementación	38
Cálculos para Cemento con Peso Agregado	43
Cálculos para el Número Requerido de Sacos de Cemento	44
Cálculos para el Número de Pies a Cementar	47
Colocar un Tapón de Cemento Balanceado	50
Presión Hidrostática Diferencial entre Cemento en Espacio Anular y Lodo Dentro de la Tubería de Revestimiento	53
Esfuerzos Hidráulicos Sobre la Tubería de Revestimiento	54
Profundidad de un Socavamiento	57
Retornos Perdidos – Pérdida de Sobreequilibrio	58
Cálculos para Tubo Pegado	59

Cálculos Requeridos para Píldoras de “Spotting”	62
Presión Requerida para Romper la Circulación.....	65
CAPÍTULO TRES FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	67
Aumentar la Densidad del Lodo	67
Dilución	70
Mezclar Fluidos de Diferentes Densidades.....	71
Cálculos para Lodo a Base de Aceite	72
Análisis de Sólidos.....	75
Fracciones de Sólidos	79
Dilución del Sistema de Lodo.....	79
Desplazamiento – Barriles de Agua/Lechada Requeridos.....	80
Evaluación del Hidrociclón.....	81
Evaluación de Centrífuga.....	82
CAPÍTULO CUATRO CONTROL DE PRESIÓN	85
Hojas de Matar y Cálculos Relacionados	85
Información Registrada Previamente.....	97
Análisis de Arremetida (“Kick”)	104
Análisis de Presión.....	114
Cálculos para la Introducción/Extracción de Tuberías a Presión (“Stripping /Snubbing”)....	116
Consideraciones Submarinas	120
Operaciones de Rehabilitación	127
CAPÍTULO CINCO CÁLCULOS DE INGENIERÍA	132
Selección de Boquillas para la Mecha – Hidráulica Optimizada.....	132
Análisis de la Hidráulica.....	136
Velocidad Anular Crítica y Caudal Crítico.....	139
Exponente “d”.....	140
Velocidad de Deslizamiento de Ripios.....	141
Presiones de Oleaje y Suaveo	145
Densidad de Circulación Equivalente (ECD)	151
Determinación del Gradiente de Fractura – Aplicación en la Superficie	154
Determinación del Gradiente de Fractura – Aplicaciones Submarinas	157
Cálculos para Perforación Direccional	160
Cálculo de la Desviación	162
Determinación de la Profundidad Vertical Verdadera (TVD).....	164
Ecuaciones y Cálculos Misceláneos	165
ANEXO A-1	170
ANEXO B	177

Prefacio

Durante la década de los 70 los organismos gubernamentales empezaron a requerir la certificación en control de presión para ciertos trabajadores que trabajan en campos petroleros costa afuera. Desde entonces, una vez al año los trabajadores de perforación, perforadores asistentes, toolpushers (perforador en jefe), superintendentes de taladro, gerentes de taladro, capataces de perforación y supervisores de perforación han tenido la obligación de asistir a un curso de control de pozos básico o de actualización. Actualmente muchas compañías petroleras también requieren que el personal de producción asistan estos cursos o cursos sobre la rehabilitación de pozos. Adicionalmente, muchos países requieren la certificación anual en el control de pozos. Muchas compañías petroleras y contratistas de perforación también exigen a su personal que asista a cursos regulares aun cuando el país anfitrión no lo requiera.

Muchas veces estos cursos presentan problemas para el trabajador petrolero que no ha tenido que aprender y utilizar fórmulas y cálculos desde que terminó su educación formal.

En mis cursos de perforación y control de pozos, intento presentar fórmulas y cálculos a mis alumnos en una manera que sea fácil de seguir y en un orden paso por paso. Intento presentarlos en la manera más clara posible para que los alumnos los entenderán y podrán realizar los ejemplos durante las pruebas y utilizar estas fórmulas al regresar al trabajo.

Desafortunadamente, no todos los alumnos copian las fórmulas y cálculos correctamente. Posteriormente cuando los necesiten en el trabajo, descubren que sus apuntes están desorganizados o incompletos o erróneos. Por esta razón he compilado este libro.

En ocasiones he escuchado historias de otros problemas en el campo. Un perforador me contó una vez que llevó consigo un maletín lleno de libros cada vez que iba hacer un turno de trabajo en la planchada. Un supervisor de perforación dijo que le resultaba difícil recordar las fórmulas y cálculos que no utilizaba regularmente. Por lo tanto llevaba dos grandes maletines de libros consigo para cada trabajo. Mi intención es que este libro reemplazará todos estos maletines pesados y que puede ser utilizado como una referencia útil en la unidad de perforación.

Durante casi 24 años he acumulado fórmulas y cálculos. Hace algún tiempo comencé a recolectar las fórmulas, gráficos, tablas, cálculos y procedimientos en una carpeta. Cuando investigaba fórmulas en mi biblioteca y encontraba fórmulas y cálculos que sabía que utilizaría en el futuro, los colocaría en la carpeta. Había acumulado una amplia variedad de datos que podía conseguir muy rápidamente.

Varios individuos han visto mi “libro de cálculos” y me han solicitado copias. Por consiguiente decidí compilar muchas de las fórmulas y cálculos utilizados con mayor frecuencia en un libro y ponerlo a la disposición de trabajadores de perforación en todas partes. El resultado es este libro.

Este libro deberá servir a un trabajador petrolero durante toda su carrera. Mientras que no contiene todas las fórmulas existentes, incluye las más comunes que se espera utilizar. Contiene todas las fórmulas y cálculos requeridos en todas las escuelas de control de pozos domésticas e internacionales.

Se ha diseñado este libro para brindar la mayor conveniencia. Ocupa muy poco espacio en un maletín. Está anillado para que se abra fácilmente sobre un escritorio. Se incluyen ejemplos para facilitar el uso de las fórmulas.

Este libro está dedicado a los miles de trabajadores petroleros que tienen que utilizar las fórmulas y cálculos diariamente o una ó dos veces al año y a quienes les resulta difícil recordarlos. Este libro le deberá facilitar su trabajo.

Norton J. Lapayrouse

CAPÍTULO UNO

FÓRMULAS BÁSICAS

Gradiente de Presión

Gradiente de Presión, psi/pie, utilizando el peso de lodo, ppg

$$\text{psi/pie} = \text{peso de lodo, ppg} \times 0,052$$

Ejemplo: 12,0 ppg fluido

$$\text{psi/pies} = 12,0 \text{ ppg} \times 0,052$$

$$\text{psi/pies} = 0,624$$

Gradiente de presión, psi/pie, utilizando el peso de lodo, lb/pie³

$$\text{psi/pie} = \text{peso de lodo, lb/pie}^3 \times 0,006944$$

Ejemplo: 100 lb/pie³ fluido

$$\text{psi/pie} = 100 \text{ lb/pie}^3 \times 0,006944$$

$$\text{psi/pie} = 0,6944$$

O

$$\text{psi/pie} = \text{peso de lodo, lb/pie}^3 \div 144$$

Ejemplo: 100 lb/pie³ fluido

$$\text{psi/pie} = 100 \text{ lb/pie}^3 \div 144$$

$$\text{psi/pie} = 0,6944$$

Gradiente de presión, psi/pie, utilizando el peso de lodo, gravedad específica (SG)

$$\text{psi/pie} = \text{peso de lodo, SG} \times 0,433$$

Ejemplo: 1,0 SG fluido

$$\text{psi/pie} = 1,0 \text{ SG} \times 0,433$$

$$\text{psi/pie} = 0,433$$

Convertir el gradiente de presión, psi/pie, al peso de lodo, ppg

$$\text{ppg} = \text{gradiente de presión, psi/pie} \div 0,052$$

Ejemplo: 0,4992 psi/pie

$$\text{ppg} = 0,4992 \text{ psi/pie} \div 0,052$$

$$\text{ppg} = 9,6$$

Convertir el gradiente de presión, psi/pie, al peso de lodo, lb/pie³

$$\text{lb/pie}^3 = \text{gradiente de presión, psi/pie} \div 0,006944$$

Ejemplo: 0,6944 psi/pie

$$\text{lb/pie}^3 = 0,6944 \text{ psi/pie} \div 0,006944$$

$$\text{lb/pie}^3 = 100$$

Convertir el gradiente de presión, psi/pie, al peso de lodo, SG

$$\text{SG} = \text{gradiente de presión, psi/pie} \div 0,433$$

Ejemplo: 0,433 psi/pie

$$\text{SG} = 0,433 \text{ psi/pie} \div 0,433$$

$$\text{SG} = 1,0$$

Presión Hidrostática

Presión hidrostática utilizando ppg y pies como unidades de medición

$$\text{Presión hidrostática} = \text{peso de lodo, ppg} \times 0,052 \times \text{profundidad vertical verdadera (TVD) pies}$$

Ejemplo: peso de lodo = 13,5 ppg profundidad vertical verdadera
= 12.000 pies

$$\text{Presión hidrostática} = 13,5 \text{ ppg} \times 0,052 \times 12.000 \text{ pies}$$

$$\text{Presión hidrostática} = 8424 \text{ psi}$$

Presión hidrostática, psi, utilizando gradiente de presión, psi/pies

$$\text{Presión hidrostática} = \text{psi/pies} \times \text{profundidad vertical verdadera, pies}$$

Ejemplo: gradiente de presión = 0,624 psi/pie
profundidad vertical verdadera = 8500 pies

$$\text{Presión hidrostática} = 0,624 \text{ psi/pie} \times 8500 \text{ pies}$$

Presión hidrostática = 5304 psi

Presión hidrostática, psi, utilizando peso de lodo, lb/pie³

Presión hidrostática = peso de lodo, lb/pie³ x 0,006944 x TVD, pie

Ejemplo: peso de lodo = 90 lb/pie³
 profundidad vertical verdadera = 7500 pies

Presión hidrostática = 90 lb/pie³ x 0,006944 x 7500 pies

Presión hidrostática = 4687 psi

Presión hidrostática, psi, utilizando metros como unidad de profundidad

Presión hidrostática = peso de lodo, ppg x 0,052 x TVD, m x 3,281

Ejemplo: peso de lodo = 12,2 ppg
 profundidad vertical verdadera = 3700 metros

Presión hidrostática = 12,2 ppg x 0,052 x 3700 x 3,281

Presión hidrostática = 7.701 psi

Convertir la Presión en Peso de Lodo

Convertir presión, psi, en peso de lodo, ppg utilizando pies como la unidad de medición

peso de lodo, ppg = presión, psi ÷ 0,052 ÷ TVD, pies

Ejemplo: presión = 2600 psi
 profundidad vertical verdadera (TVD) = 5000 pies

lodo, ppg = 2600 psi ÷ 0,052 ÷ 5000 pies

lodo = 10,0 ppg

Convertir presión, psi, en peso de lodo, ppg utilizando metros como la unidad de medición

peso de lodo, ppg = presión, psi ÷ 0,052 ÷ TVD, pies ÷ 3,281

Ejemplo: presión = 3583 psi
 profundidad vertical verdadera (TVD) = 2000 metros

peso de lodo, ppg = 3583 psi ÷ 0,052 ÷ 2000 m ÷ 3,281

peso de lodo = 10,5 ppg

Gravedad Específica (SG)

Gravedad específica utilizando peso de lodo, ppg

Gravedad específica = peso de lodo, ppg \div 8,33

Ejemplo: 15,0 ppg fluido

Gravedad específica = 15,0 ppg \div 8,33

Gravedad específica = 1,8

Gravedad específica utilizando gradiente de presión, psi/pie

Gravedad específica = gradiente de presión, psi/pie \div 0,433

Ejemplo: gradiente de presión = 0,624 psi/pie

Gravedad específica = 0,624 psi/pie \div 0,433

Gravedad específica = 1,44

Gravedad específica utilizando peso de lodo, lb/pie³

Gravedad específica = peso de lodo, lb/pie³ \div 62,4

Ejemplo: peso de lodo = 120 lb/ pie³

Gravedad específica = 120 lb/ pie³ \div 62,4

Gravedad específica = 1,92

Convertir la gravedad específica al peso de lodo, ppg

Peso de lodo, ppg = gravedad específica x 8,33

Ejemplo: gravedad específica = 1,80

peso de lodo, ppg = 1,80 x 8,33

peso de lodo = 15,0 ppg

Convertir gravedad específica al gradiente de presión, psi/pie

psi/pie = gravedad específica x 0,433

Ejemplo: gravedad específica = 1,44

psi/pie = 1,44 x 0,433

psi/pie = 0,624

Convertir gravedad específica al peso de lodo, lb/pie³

$$\text{lb/pie}^3 = \text{gravedad específica} \times 62,4$$

Ejemplo: gravedad específica = 1,92

$$\text{lb/pie}^3 = 1,92 \times 62,4$$

$$\text{lb/pie}^3 = 120$$

Densidad Circulante Equivalente (ECD), ppg

$$\text{ECD, ppg} = \left[\begin{array}{c} \text{pérdida de} \\ \text{presión} \\ \text{anular, psi} \end{array} \right] \div 0,052 \div \text{TVD, pie} + \left[\begin{array}{c} \text{peso de lodo} \\ \text{en uso, ppg} \end{array} \right]$$

Ejemplo: pérdida de presión anular = 200 psi
 profundidad vertical verdadera = 10000 pies
 peso de lodo = 9,6 ppg

$$\text{ECD, ppg} = 200 \text{ psi} \div 0,052 \div 10.000 \text{ pies} + 9,6 \text{ ppg}$$

$$\text{ECD} = 10,0 \text{ ppg}$$

Peso de lodo máximo permitido por datos de la prueba de integridad de la formación (“leak-off test”)

$$\text{ppg} = \left[\begin{array}{c} \text{presión de} \\ \text{“leak off”} \end{array} \right] \div 0,052 \div \left[\begin{array}{c} \text{TVD de la zapata de} \\ \text{cementación de la tubería} \\ \text{de revestimiento} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{peso de lodo,} \\ \text{ppg} \end{array} \right]$$

Ejemplo: presión de prueba de integridad de la formación = 1140 psi
 TVD de la zapata de cementación de la tub. de rev. = 4000 pie
 peso de lodo = 10,0 ppg

$$\text{ppg} = 1140 \text{ psi} \div 0,052 \div 4000 \text{ pies} + 10,0 \text{ ppg}$$

$$\text{ppg} = 15,48$$

Flujo de Salida de Bomba

Bomba Triple

Fórmula 1

$$\text{Flujo de salida, bls/embolada} = 0,000243 \times \left[\begin{array}{c} \text{diámetro de} \\ \text{camisa, pulg.} \end{array} \right]^2 \times \left[\begin{array}{c} \text{longitud de} \\ \text{embolada, pulg} \end{array} \right]$$

Ejemplo: Determinar el flujo de salida de bomba, bls/emb., al 100% de eficiencia para una bomba triple de 7 pulg por 12 pulg

$$\text{Flujo de salida de la bomba @ 100\%} = 0,000243 \times 7^2 \times 12$$

$$\text{Flujo de salida de la bomba @ 100\%} = 0,142884 \text{ bls/emb.}$$

Ajustar el flujo de salida de la bomba para una eficiencia de 95%:

$$\text{Equivalente decimal} = 95 \div 100 = 0,95$$

$$\text{Flujo de salida de la bomba @ 95\%} = 0,142884 \text{ bls/emb} \times 0,95$$

$$\text{Flujo de salida de la bomba @ 95\%} = 0,13574 \text{ bl/emb}$$

Formula 2

$$\text{Flujo de salida de bomba, gpm} = [3 (D^2 \times 0,7854) S] 0,00411 \times \text{SPM}$$

donde: D = diámetro de la camisa, pulgadas

S = longitud de la embolada, pulgadas

SPM = emboladas por minuto

Ejemplo: Determinar el flujo de salida, gpm para una bomba triple de 7 pulg por 12 pulg a 80 emboladas por minuto

$$\text{Flujo de salida, gpm} = [3 (7^2 \times 0,7854) 12] 0,00411 \times 80$$

$$\text{Flujo de salida, gpm} = 1385,4456 \times 0,00411 \times 80$$

$$\text{Flujo de salida} = 455,5 \text{ gpm}$$

Bomba Duplex (o Doble)

Fórmula 1

$$0,000324 \times \left[\begin{array}{l} \text{diámetro de} \\ \text{camisa, pulg.} \end{array} \right]^2 \times \left[\begin{array}{l} \text{longitud de} \\ \text{embolada, pulg} \end{array} \right] = \text{_____ bl/emb}$$

$$-0,000162 \times \left[\begin{array}{l} \text{diámetro de} \\ \text{vástago, pulg.} \end{array} \right]^2 \times \left[\begin{array}{l} \text{longitud de} \\ \text{embolada, pulg} \end{array} \right] = \text{_____ bl/emb}$$

Ejemplo: Determinar el flujo de salida, bl/emb. de una bomba duplex de 5 ½" x 14" a una eficiencia del 100%. Diámetro del vástago = 2,0 pulg.

$$0,000324 \times 5,5^2 \times 14 = 0,137214 \text{ bl/emb}$$

$$-0,000162 \times 2,02 \times 14 = \underline{0,009072} \text{ bl/emb}$$

$$\text{flujo de salida @ 100\% efic.} = 0,128142 \text{ bl/emb}$$

Ajustar flujo de salida para una eficiencia del 85%:

$$\text{Equivalente decimal} = 85 \div 100 = 0,85$$

$$\text{flujo de salida @ 85\% efic.} = 0,128142 \text{ bl/emb} \times 0,85$$

flujo de salida @ 85% efic. = 0,10892 bl/emb

Fórmula 2

Flujo de salida, bl/emb = $0,000162 \times S [2 (D)^2 - d^2]$

donde: S = longitud de embolada, pulg.

D = diámetro de la camisa, pulg.

d = diámetro del vástago, pulg.

Ejemplo: Determinar el flujo de salida, bl/emb. de una bomba duplex de 5 ½" x 14" @ una eficiencia del 100%. Diámetro del vástago – 2,0 pulg.

Flujo de salida @ 100% = $0,000162 \times 14 \times [2 (5,5)^2 - 2^2]$

Flujo de salida @ 100% = $0,000162 \times 14 \times 56,5$

Flujo de salida @ 100% = 0,128142 bl/emb

Ajustar flujo de salida de la bomba para una eficiencia del 85%

Flujo de salida @ 85% = 0,128142 bl/emb x 0,85

Flujo de salida @ 85% = 0,10892 bl/emb.

Velocidad Anular (AV)

Fórmula 1

Velocidad anular = flujo de salida de bomba, bl/min ÷ capacidad anular, bl/pie

Ejemplo: flujo de salida de bomba = 12,6 bl/min
capacidad anular = 0,1261 bl/pie

Velocidad anular = 12,6 bl/min ÷ 0,1261 bl/pie

Velocidad anular = 99,92 pie/min

Fórmula 2

Velocidad anular, pie/min = $\frac{24,5 \times Q}{Dh^2 - Dp^2}$

donde Q = tasa de circulación, gpm

Dh = diámetro interno de tubería de revestimiento u hoyo, pulg.

Dp = diámetro externo de tubería, tub. de producción o cuellos, pulg.

Ejemplo: flujo de salida de bomba = 530 gpm
tamaño del hoyo = 12 ¼ pulg.
diámetro externo de tubería = 4 ½"

Velocidad anular = $\frac{24,5 \times 530}{12,25^2 - 4,5^2}$

$$\text{Velocidad anular} = \frac{12.985}{129,8125}$$

$$\text{Velocidad anular} = 100 \text{ pie/min}$$

Fórmula 3

$$\text{Velocidad anular, pie/min} = \frac{\text{Flujo de salida de bomba, bl/min} \times 1029,4}{Dh^2 - Dp^2}$$

Ejemplo: flujo de salida de bomba = 12,6 bl/min
 tamaño del hoyo = 12 ¼ pulg.
 diámetro externo de tubería = 4 ½"

$$\text{Velocidad anular, pie/min} = \frac{12,6, \text{ bl/min} \times 1029,4}{12,25^2 - 4,5^2}$$

$$\text{Velocidad anular, pie/min} = \frac{12970,44}{129,8125}$$

$$\text{Velocidad anular} = 99,92 \text{ pie/min}$$

Velocidad anular (AV), pie/seg.

$$\text{Velocidad anular, pie/seg.} = \frac{17,16 \times \text{Flujo de salida de bomba, bl/min}}{Dh^2 - Dp^2}$$

Ejemplo: flujo de salida de bomba = 12,6 bl/min
 tamaño del hoyo = 12 ¼ pulg.
 diámetro externo de tubería = 4 ½"

$$\text{Velocidad anular, pie/seg.} = \frac{17,16 \times 12,6, \text{ bl/min}}{12,25^2 - 4,5^2}$$

$$\text{Velocidad anular, pie/seg.} = \frac{216,216}{129,8125}$$

$$\text{Velocidad anular} = 1,6656 \text{ pie/seg.}$$

Flujo de salida de bomba, gpm, requerida para una velocidad anular deseada, pie/min

$$\text{Flujo de salida de bomba, gpm} = \frac{AV, \text{ pie/min} (Dh^2 - Dp^2)}{24,5}$$

donde: AV = velocidad anular deseada, pie/min

Dh = diámetro interno de tubería de revestimiento o tamaño del hoyo, pulg.

Dp = diámetro externo de tubería, tub. de producción o cuellos, pulg.

Ejemplo: velocidad anular deseada = 120 pie/min

tamaño del hoyo = 12 ¼ pulg

diámetro externo de tubería = 4 ½ pulg.

$$\text{Flujo de salida de bomba, gpm} = \frac{120 (12,25^2 - 4,5^2)}{24,5}$$

$$\text{Flujo de salida de bomba, gpm} = \frac{120 \times 129,8125}{24,5}$$

$$\text{Flujo de salida de bomba, gpm} = \frac{15577,5}{24,5}$$

$$\text{Flujo de salida de bomba} = 635,8 \text{ gpm}$$

Emboladas por minuto (SPM) requeridas para una velocidad anular determinada

$$\text{Emboladas por minuto (SPM)} = \frac{\text{Velocidad anular, pie/min} \times \text{capacidad anular, bl/pie}}{\text{Flujo de salida de bomba, bl/emb}}$$

Ejemplo: velocidad anular = 120 pie/min
 capacidad anular = 0,1261 bl/pie
 Dh = 12 ¼ pulg
 Dp = 4 ½ pulg
 flujo de salida de bomba = 0,136 bl/emb.

$$\text{Emboladas por minuto (SPM)} = \frac{120 \text{ pie/min} \times 0,1261 \text{ bl/pie}}{0,136 \text{ bl/emb}}$$

$$\text{Emboladas por minuto (SPM)} = \frac{15,132}{0,136}$$

$$\text{Emboladas por minuto} = 111,3$$

Fórmulas de Capacidad

Capacidad anular entre tubería de revestimiento u hoyo y tubería de perforación, tubería de producción o tubería de revestimiento

$$\text{a) Capacidad anular, bl/pie} = \frac{Dh^2 - Dp^2}{1029,4}$$

Ejemplo: Tamaño del hoyo (Dh) = 12 ¼ pulg
 Diámetro externo de tubería de perforación (Dp) = 5,0 pulg

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{12,25^2 - 5,0^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = 0,12149 \text{ bl/pie}$$

$$\text{b) Capacidad anular, bl/pie} = \frac{1029,4}{(Dh^2 - Dp^2)}$$

Ejemplo: Tamaño del hoyo (Dh) = 12 ¼ pulg
 Diámetro externo de tubería de perforación (Dp) = 5,0 pulg

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{1029,4}{(12,25^2 - 5,0^2)}$$

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = 8,23 \text{ pie/bl}$$

$$c) \text{ Capacidad anular, gal/pie} = \frac{Dh^2 - Dp^2}{24,51}$$

$$\text{Ejemplo: Tamaño del hoyo (Dh)} = 12 \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

$$\text{Diámetro externo de tubería de perforación (Dp)} = 5,0 \text{ pulg}$$

$$\text{Capacidad anular, gal/pie} = \frac{12,25^2 - 5,0^2}{24,51}$$

$$\text{Capacidad anular, gal/pie} = 5,1 \text{ gal/pie}$$

$$d) \text{ Capacidad anular, pie/gal} = \frac{24,51}{(Dh^2 - Dp^2)}$$

$$\text{Ejemplo: Tamaño del hoyo (Dh)} = 12 \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

$$\text{Diámetro externo de tubería de perforación (Dp)} = 5,0 \text{ pulg}$$

$$\text{Capacidad anular, pie/gal} = \frac{24,51}{(12,25^2 - 5,0^2)}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,19598 \text{ pie/gal}$$

$$e) \text{ Capacidad anular, pie}^3/\text{pie lineal} = \frac{Dh^2 - Dp^2}{183,35}$$

$$\text{Ejemplo: Tamaño del hoyo (Dh)} = 12 \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

$$\text{Diámetro externo de tubería de perforación (Dp)} = 5,0 \text{ pulg}$$

$$\text{Capacidad anular, pie}^3/\text{pie lineal} = \frac{12,25^2 - 5,0^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,682097 \text{ pie}^3/\text{pie lineal}$$

$$f) \text{ Capacidad anular, pie lineal/pie}^3 = \frac{183,35}{(Dh^2 - Dp^2)}$$

$$\text{Ejemplo: Tamaño del hoyo (Dh)} = 12 \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

$$\text{Diámetro externo de tubería de perforación (Dp)} = 5,0 \text{ pulg}$$

$$\text{Capacidad anular, pie lineal/pie}^3 = \frac{183,35}{12,25^2 - 5,0^2}$$

$$\text{Capacidad anular} = 1,466 \text{ pie lineal/pie}^3$$

Capacidad anular entre tubería de revestimiento y múltiples sargas de tubería

a) Capacidad anular entre tubería de revestimiento y múltiples sargas de tubería, bl/pie:

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{Dh^2 - [(T_1)^2 + (T_2)^2]}{1029,4}$$

Ejemplo: Utilizando dos sargas de tubería del mismo tamaño:

Dh = tubería de revestimiento – 7,0 pulg – 29 lb/pie

T₁ = tubería N° 1 – 2-3/8 pulg

T₂ = tubería N° 2 – 2-3/8 pulg

Diám. Intern. (ID) = 6,184 pulg

Diám. Extern. (OD) = 2,375 pulg

Diám. Extern. (OD) = 2,375 pulg

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{6,184^2 (2,375^2 + 2,375^2)}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{38,24 - 11,28}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,02619 \text{ bl/pie}$$

b) Capacidad anular entre tubería de revestimiento y múltiples sargas de tubería, pie/bl:

$$\text{Capacidad anular, pie/bl} = \frac{1029,4}{Dh^2 - [(T_1)^2 + (T_2)^2]}$$

Ejemplo: Utilizando dos sargas de tubería del mismo tamaño:

Dh = tubería de revestimiento – 7,0 pulg – 29 lb/pie	Diám. Intern. (ID) = 6,184 pulg
T ₁ = tubería N° 1 – 2-3/8 pulg	Diám. Extern. (OD) = 2,375 pulg
T ₂ = tubería N° 2 – 2-3/8 pulg	Diám. Extern. (OD) = 2,375 pulg

$$\text{Capacidad anular, pie/bl} = \frac{1029,4}{6,184^2 (2,375^2 + 2,375^2)}$$

$$\text{Capacidad anular, pie/bl} = \frac{1029,4}{38,24 - 11,28}$$

$$\text{Capacidad anular} = 38,1816 \text{ pie/bl}$$

c) Capacidad anular entre tubería de revestimiento y múltiples sargas de tubería, gal/pie:

$$\text{Capacidad anular, gal/pie} = \frac{Dh^2 - [(T_1)^2 + (T_2)^2]}{24,51}$$

Ejemplo: Utilizando dos sargas de tubería de distintos tamaños:

Dh = tubería de revestimiento – 7,0 pulg – 29 lb/pie	Diám. Intern. (ID) = 6,184 pulg
T ₁ = tubería N° 1 – 2-3/8 pulg	Diám. Extern. (OD) = 2,375 pulg
T ₂ = tubería N° 2 – 3 ½ pulg	Diám. Extern. (OD) = 3,5 pulg

$$\text{Capacidad anular, gal/pie} = \frac{6,184^2 (2,375^2 + 3,5^2)}{24,51}$$

$$\text{Capacidad anular, gal/pie} = \frac{38,24 - 17,89}{24,51}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,8302733 \text{ gal/pie}$$

d) Capacidad anular entre tubería de revestimiento y múltiples sargas de tubería, pie/gal:

$$\text{Capacidad anular, pie/gal} = \frac{24,51}{Dh^2 - [(T_1)^2 + (T_2)^2]}$$

Ejemplo: Utilizando dos sartas de tubería del mismo tamaño:

Dh = tubería de revestimiento – 7,0 pulg – 29 lb/pie	Diám. Intern. (ID) = 6,184 pulg
T ₁ = tubería N° 1 – 2-3/8 pulg	Diám. Extern. (OD) = 2,375 pulg
T ₂ = tubería N° 2 – 3 ½ pulg	Diám. Extern. (OD) = 3,5 pulg

$$\text{Capacidad anular, pie/gal} = \frac{24,51}{6,184^2 (2,375^2 + 3,5^2)}$$

$$\text{Capacidad anular, pie/gal} = \frac{24,51}{38,24 - 17,89}$$

$$\text{Capacidad anular} = 1,2044226 \text{ pie/gal}$$

e) Capacidad anular entre tubería de revestimiento y múltiples sartas de tubería, pie³/pie lineal:

$$\text{Capacidad anular, pie}^3/\text{pie lineal} = \frac{Dh^2 - [(T_1)^2 + (T_2)^2]}{183,35}$$

Ejemplo: Utilizando tres sartas de tubería:

Dh = tubería de revestimiento – 9-5/8 pulg – 47 lb/pie	Diám. Intern. (ID) = 8,681 pulg
T ₁ = tubería N° 1 – 3 ½ pulg	Diám. Extern. (OD) = 3,5 pulg
T ₂ = tubería N° 2 – 3 ½ pulg	Diám. Extern. (OD) = 3,5 pulg
T ₃ = tubería N° 3 – 3 ½ pulg	Diám. Extern. (OD) = 3,5 pulg

$$\text{Capacidad anular, pie}^3/\text{pie lineal} = \frac{6,184^2 (3,5^2 + 3,5^2 + 3,5^2)}{183,35}$$

$$\text{Capacidad anular, pie}^3/\text{pie lineal} = \frac{75,359 - 36,75}{183,35}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,2105795 \text{ pie}^3/\text{pie lineal}$$

f) Capacidad anular entre tubería de revestimiento y múltiples sartas de tubería, pie lineal/pie³:

$$\text{Capacidad anular, pie lineal/pie}^3 = \frac{183,35}{Dh^2 - [(T_1)^2 + (T_2)^2]}$$

Ejemplo: Utilizando tres sartas de tubería del mismo tamaño:

Dh = tubería de revestimiento – 9-5/8 pulg – 47 lb/pie	Diám. Intern. (ID) = 8,681 pulg
T ₁ = tubería N° 1 – 3 ½ pulg	Diám. Extern. (OD) = 3,5 pulg
T ₂ = tubería N° 2 – 3 ½ pulg	Diám. Extern. (OD) = 3,5 pulg
T ₃ = tubería N° 3 – 3 ½ pulg	Diám. Extern. (OD) = 3,5 pulg

$$\text{Capacidad anular, pie lineal/pie}^3 = \frac{183,35}{6,184^2 (3,5^2 + 3,5^2 + 3,5^2)}$$

$$\text{Capacidad anular, pie lineal/pie}^3 = \frac{183,35}{75,359 - 36,75}$$

$$\text{Capacidad anular} = 4,7487993 \text{ pie lineal/pie}^3$$

Capacidad de tubulares y hoyo abierto: tubería de perforación, cuello de perforación, tubería de producción, tubería de revestimiento, hoyo y cualquier objeto cilíndrico

$$\text{a) Capacidad, bl/pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg}^2}{1029,4}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad, bl/pie, de un hoyo de 12 ¼ pulg:

$$\text{Capacidad, bl/pie} = \frac{12,25^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad} = 0,1457766 \text{ bl/pie}$$

$$\text{b) Capacidad, pie/bl} = \frac{1029,4}{\text{Dh}^2}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad, pie/bl, de un hoyo de 12 ¼ pulg:

$$\text{Capacidad, pie/bl} = \frac{1029,4}{12,25^2}$$

$$\text{Capacidad} = 6,8598 \text{ pie/bl}$$

$$\text{c) Capacidad, gal/pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg}^2}{24,51}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad, gal/pie, de un hoyo de 8 ½ pulg:

$$\text{Capacidad, gal/pie} = \frac{8,5^2}{24,51}$$

$$\text{Capacidad} = 2,9477764 \text{ gal/pie}$$

$$\text{d) Capacidad, pie/gal} = \frac{24,51}{\text{ID, in}^2}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad, pie/gal, de un hoyo de 8 ½ pulg:

$$\text{Capacidad, pie/gal} = \frac{24,51}{8,5^2}$$

$$\text{Capacidad} = 0,3392 \text{ pie/gal}$$

$$\text{e) Capacidad, pie}^3/\text{pie lineal} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg}^2}{183,35}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad, pie³/pie lineal, de un hoyo de 6,0 pulg:

$$\text{Capacidad, pie}^3/\text{pie lineal} = \frac{6,0^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad} = 20,1963 \text{ pie}^3/\text{pie lineal}$$

$$f) \text{ Capacidad, pie lineal}/\text{pie}^3 = \frac{183,35}{\text{ID, in}^2}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad, pie lineal/pie³, de un hoyo de 6,0 pulg:

$$\text{Capacidad, pie lineal}/\text{pie}^3 = \frac{183,35}{6,0^2}$$

$$\text{Capacidad} = 5,09305 \text{ pie lineal}/\text{pie}^3$$

Cantidad de ripios generados por pie de hoyo perforado

a) BARRILES de ripios generados por pie de hoyo perforado:

$$\text{Barriles} = \frac{\text{Dh}^2}{1029,4} (1 - \% \text{ porosidad})$$

Ejemplo: Determinar el número de barriles de ripios generados por un pie de un hoyo de 12 ¼ pulg. perforado con una porosidad de 20% (0,20):

$$\text{Barriles} = \frac{12,25^2}{1029,4} (1 - 0,20)$$

$$\text{Barriles} = 0,1457766 \times 0,80$$

$$\text{Barriles} = 0,1166213$$

b) PIES CÚBICOS de ripios generados por pie de hoyo perforado:

$$\text{Pies cúbicos} = \frac{\text{Dh}^2}{144} \times 0,7854 (1 - \% \text{ porosidad})$$

Ejemplo: Determinar los pies cúbicos de ripios generados por un pie de un hoyo de 12 ¼ pulg. perforado con una porosidad de 20% (0,20):

$$\text{Pies cúbicos} = \frac{12,25^2}{144} \times 0,7854 (1 - 0,20)$$

$$\text{Pies cúbicos} = \frac{150,0626}{144} \times 0,7854 \times 0,80$$

$$\text{Pies cúbicos} = 0,6547727$$

c) Total de sólidos generados:

$$W_{cg} = 350 \text{ Ch} \times L (1 - P) \text{ SG}$$

donde W_{cg} = sólidos generados, libras
 Ch = capacidad del hoyo, bl/pie
 L = pies perforados, pies
 SG = gravedad específica de los ripios
 P = porosidad, %

Ejemplo: Determinar el número total de libras de sólidos generados en la perforación de 100 pies de hoyo de 12 ¼ pulg (0,1458 bl/pie). Gravedad específica de los ripios = 2,40 g/cm. Porosidad = 20%.

$$W_{cg} = 350 \times 0,1458 \times 100 (1 - 0,20) \times 2,4$$

$$W_{cg} = 9797,26 \text{ libras}$$

Perforación de Control

Tasa de perforación máxima (MDR), pie/hora, al perforar hoyos con diámetros grandes (14 ¾ pulg. y más grande)

$$\text{MDR, pie/hora} = \frac{67 \times \left(\begin{array}{c} \text{peso de lodo} \\ \text{entrante, ppg} \end{array} - \begin{array}{c} \text{peso de lodo} \\ \text{saliente, ppg} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{circulación, gpm} \end{array} \right)}{Dh^2}$$

Ejemplo: Determinar la MDR, pie/hora, necesaria para mantener el peso del lodo saliente en 9,7 ppg en la línea de flujo:

Datos: Peso de lodo entrante = 9,0 ppg
 Tasa de circulación = 530 gpm
 Tamaño del hoyo = 17 ½ pulg

$$\text{MDR, pie/hora} = \frac{67 (9,7 - 9,0) 530}{17,5^2}$$

$$\text{MDR, pie/hora} = \frac{67 \times 0,7 \times 530}{306,25}$$

$$\text{MDR, pie/hora} = \frac{24.857}{306,25}$$

$$\text{MDR} = 81,16 \text{ pie/hora}$$

Factor de Flotabilidad ("Buoyancy Factor – BF")

Factor de Flotabilidad utilizando peso de lodo, ppg

$$\text{Factor de flotabilidad} = \frac{65,5 - \text{peso de lodo, ppg}}{65,5}$$

Ejemplo: Determinar el factor de flotabilidad para un fluido con un peso de 15,0 ppg:

$$\text{Factor de flotabilidad} = \frac{65,5 - 15,0}{65,5}$$

$$\text{Factor de flotabilidad} = 0,77099$$

Factor de Flotabilidad utilizando peso de lodo, lb/pie³

$$\text{Factor de flotabilidad} = \frac{489 - \text{peso de lodo, lb/pie}^3}{489}$$

Ejemplo: Determinar el factor de flotabilidad para un fluido con un peso de 120 lb/pie³:

$$\text{Factor de flotabilidad} = \frac{489 - 120}{489}$$

$$\text{Factor de flotabilidad} = 0,7546$$

**Presión Hidrostática (HP)
Disminución Al Retirar la Tubería del Hoyo**

Al retirar tubería SECA

Paso 1

$$\text{Barriles desplazados} = \text{número de haces retirado} \times \text{longitud promedio por haz, pies} \times \text{desplazamiento de la tubería, bl/pie}$$

Paso 2

$$\text{Disminución en presión hidrostática (HP), psi} = \left(\frac{\text{barriles desplazados}}{\left(\begin{array}{l} \text{capacidad de tubería de revestimiento, bl/pie} \\ \text{desplazamiento de la tubería, bl/pie} \end{array} \right)} \right) \times 0,052 \times \text{peso de lodo, ppg}$$

Ejemplo: Determinar la disminución de la presión hidrostática al retirar tubería SECA del hoyo:

Número de haces retirado	= 5
Longitud promedio por haz	= 92 pies
Desplazamiento de la tubería	= 0,0075 bl/pie
Capacidad de tubería de revestimiento	= 0,0773 bl/pie
Peso del lodo	= 11,5 ppg

Paso 1

$$\text{Barriles desplazados} = 5 \text{ haces} \times 92 \text{ pie/haz} \times 0,0075 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Barriles} = 3,45$$

desplazados

Paso 2

$$\text{Disminución en presión hidrostática (HP), psi} = \frac{3,45 \text{ barriles}}{0,0773 \text{ bl/pie} - 0,0075 \text{ bl/pie}} \times 0,052 \times 11,5 \text{ ppg}$$

$$\text{Disminución en presión hidrostática (HP), psi} = \frac{3,45 \text{ barriles}}{0,0698} \times 0,052 \times 11,5 \text{ ppg}$$

$$\text{Disminución en presión hidrostática (HP), psi} = 29,56 \text{ psi}$$

Al retirar tubería HÚMEDA

Paso 1

$$\text{Barriles desplazados} = \text{número de haces retirado} \times \text{longitud promedio por haz, pies} \times \left(\begin{array}{c} \text{desplazamiento de la tubería, bl/pie} \\ + \\ \text{capacidad de la tubería, bl/pie} \end{array} \right)$$

Paso 2

$$\text{Disminución en presión hidrostática (HP), psi} = \frac{\text{barriles desplazados}}{\left(\begin{array}{c} \text{capacidad de tubería de revestimiento, bl/pie} \\ - \\ \left(\begin{array}{c} \text{desplazamiento de la tubería, bl/pie} \\ + \\ \text{capacidad de la tubería, bl/pie} \end{array} \right) \end{array} \right)} \times 0,052 \times \text{peso de lodo, ppg}$$

Ejemplo: Determinar la disminución de la presión hidrostática al retirar tubería SECA del hoyo:

- Número de haces retirado = 5
- Longitud promedio por haz = 92 pies
- Desplazamiento de la tubería = 0,0075 bl/pie
- Capacidad de la tubería = 0,01776 bl/pie
- Capacidad de tubería de revestimiento = 0,0773 bl/pie
- Peso del lodo = 11,5 ppg

Paso 1

$$\left(\quad \quad \quad \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Barriles desplazados} &= 5 \text{ haces} \times 92 \text{ pie/haz} \times \\ &\quad 0,0075 \text{ bl/pie} \\ &\quad + \\ &\quad 0,01776 \text{ bl/pie} \end{aligned}$$

$$\text{Barriles desplazados} = 11,6196 \text{ psi}$$

Paso 2

$$\begin{aligned} \text{Disminución en presión hidrostática (HP), psi} &= \frac{11,6196 \text{ barriles}}{\left(0,0773 \text{ bl/pie} \right) - \left(\begin{array}{c} 0,0075 \text{ bl/pie} \\ + \\ 0,01776 \text{ bl/pie} \end{array} \right)} \times 0,052 \times 11,5 \text{ ppg} \end{aligned}$$

$$\text{Barriles desplazados} = \frac{11,6196}{0,05204} \times 0,052 \times 11,5 \text{ ppg}$$

$$\text{Barriles desplazados} = 133,52 \text{ psi}$$

Pérdida de Sobreequilibrio Debido a Caída en Nivel de Lodo

Pies de tubería retirada EN SECO para perder sobreequilibrio

$$\text{Pies} = \frac{\text{sobreequilibrio, psi (capacidad de tub. de rev – desplazamiento de tub., bl/pie)}}{\text{peso de lodo, ppg} \times 0,052 \times \text{desplazamiento de tubería, bl/pie}}$$

Ejemplo: Determinar los PIES de tubería SECA que se debe retirar para perder el sobreequilibrio utilizando los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de sobreequilibrio} &= 150 \text{ psi} \\ \text{Capacidad de tubería de revestimiento} &= 0,0773 \text{ bl/pie} \\ \text{Desplazamiento de la tubería} &= 0,0075 \text{ bl/pie} \\ \text{Peso del lodo} &= 11,5 \text{ ppg} \end{aligned}$$

$$\text{Pies} = \frac{150 \text{ psi} (0,0773 - 0,0075)}{11,5 \text{ ppg} \times 0,052 \times 0,0075}$$

$$\text{Pies} = \frac{10,47}{0,004485}$$

$$\text{Pies} = 2334$$

Pies de tubería retirada HÚMEDA para perder sobreequilibrio

$$\text{Pies} = \frac{\text{sobreequilibrio, psi (capacidad de tub. de rev – capacidad de tub. - desplazamiento de tub)}}{\text{peso de lodo, ppg} \times 0,052 \times (\text{capacidad de tub.} + \text{desplazamiento de tubería, bl/pie})}$$

Ejemplo: Determinar los PIES de tubería HÚMEDA que se debe retirar para perder el sobreequilibrio utilizando los siguientes datos:

Cantidad de sobreequilibrio	= 150 psi
Capacidad de tubería de revestimiento	= 0,0773 bl/pie
Capacidad de la tubería	= 0,07446 bl/pie
Desplazamiento de la tubería	= 0,0075 bl/pie
Peso del lodo	= 11,5 ppg

$$\text{Pies} = \frac{150 \text{ psi} (0,0773 - 0,01776 - 0,0075 \text{ bl/pie})}{11.5 \text{ ppg} \times 0,052 (0,0075 + 0,0075 \text{ bl/pie})}$$

$$\text{Pies} = \frac{150 \text{ psi} \times 0,05204}{11.5 \text{ ppg} \times 0,052 \times 0,02526}$$

$$\text{Pies} = \frac{7,806}{0,0151054}$$

$$\text{Pies} = 516,8$$

Temperatura de la Formación (FT)

$$\text{Temperatura de la Formación, } ^\circ\text{F} = \left[\begin{array}{l} \text{temperatura ambiental} \\ \text{en superficie, } ^\circ\text{F} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{aumento de temperatura} \\ ^\circ\text{F por pie de profundidad} \\ \times \text{TVD, pie} \end{array} \right]$$

Ejemplo: Si el aumento de temperatura en un área específica es 0,012°F/pie de profundidad y la temperatura ambiental en la superficie es 70°F, determinar la temperatura estimada de la formación a una profundidad vertical verdadera (TVD) de 15.000 pies:

$$\text{Temperatura de la Formación, } ^\circ\text{F} = 70^\circ\text{F} + (0,012^\circ\text{F/pie} \times 15.000 \text{ pie})$$

$$\text{Temperatura de la Formación, } ^\circ\text{F} = 70^\circ\text{F} + 180^\circ\text{F}$$

$$\text{Temperatura de la Formación} = 250^\circ\text{F} \text{ (temperatura estimada de la formación)}$$

Caballos de Fuerza Hidráulica (HHP)

$$\text{HHP} = \frac{P \times Q}{1714}$$

donde HHP = caballos de fuerza hidráulica

P = presión circulante, psi

Q = tasa de circulación, gpm

Ejemplo: presión circulante = 2950 psi
tasa de circulación = 520 gpm

$$\text{HHP} = \frac{2950 \times 520}{1714}$$

$$\text{HHP} = \frac{1.534.000}{1714}$$

$$\text{HHP} = 894,98$$

Cálculos para Tubería de Perforación / Cuellos de Perforación

Se puede calcular las capacidades, bl/pie, desplazamiento, bl/pie, y peso, lb/pie, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\text{Capacidad, bl/pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID) pulg.}^2}{1029,4}$$

$$\text{Desplazamiento, bl/pie} = \frac{\text{Diámetro externo (OD) pulg.}^2 - \text{Diámetro interno (ID) pulg.}^2}{1029,4}$$

$$\text{Peso, lb/pie} = \text{desplazamiento, bl/pie} \times 2747 \text{ lb/bl}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad, bl/pie desplazamiento, bl/pie, y peso, lb/pie, para los siguientes datos:

$$\text{Cuello de perforación – Diámetro externo (OD)} = 8,0 \text{ pulg}$$

$$\text{Cuello de perforación – Diámetro interno (ID)} = 2 \frac{13}{16} \text{ pulg.}$$

Convertir 13/16 al equivalente decimal:

$$13 \div 16 = 0,8125$$

$$\text{a) Capacidad, bl/pie} = \frac{2,8125^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad} = 0,007684 \text{ bl/pie}$$

$$\text{b) Desplazamiento, bl/pie} = \frac{8,0^2 - 2,8125^2}{1029,4}$$

$$\text{Desplazamiento, bl/pie} = \frac{56.089844}{1029,4}$$

$$\text{Desplazamiento, bl/pie} = 0,0544879 \text{ bl/pie}$$

$$\text{c) Peso, lb/pie} = 0,0544879 \text{ bl/pie} \times 2747 \text{ lb/bl}$$

$$\text{Peso} = 149,678 \text{ lb/pie}$$

Fórmulas de Reglas Generales

Se puede estimar el peso, lb/pie para CUELLOS DE PERFORACIÓN REGULARES utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Peso, lb/pie} = (\text{Diámetro externo, pulg.}^2 - \text{Diámetro interno, pulg.}^2) 2,66$$

Ejemplo: Cuellos de perforación regulares

$$\begin{aligned}
 \text{Diámetro externo (OD) del cuello de perforación} &= 8,0 \text{ pulg.} \\
 \text{Diámetro interno (ID) del cuello de perforación} &= 2-13/16 \text{ pulg.} \\
 \text{Equivalente decimal} &= 2,8125 \text{ pulg.} \\
 \text{Peso, lb/pie} &= (8,0^2 - 2,8125^2) 2,66 \\
 \text{Peso, lb/pie} &= 56,089844 \times 2,66 \\
 \text{Peso} &= 149,19898 \text{ lb/pie}
 \end{aligned}$$

Se puede estimar el peso, lb/pie para CUELLOS DE PERFORACIÓN ESPIRALES utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Peso, lb/pie} = (\text{Diámetro externo, pulg.}^2 - \text{Diámetro interno, pulg.}^2) 2,56$$

Ejemplo: Cuellos de perforación regulares

$$\begin{aligned}
 \text{Diámetro externo (OD) del cuello de perforación} &= 8,0 \text{ pulg.} \\
 \text{Diámetro interno (ID) del cuello de perforación} &= 2-13/16 \text{ pulg.} \\
 \text{Equivalente decimal} &= 2,8125 \text{ pulg.} \\
 \text{Peso, lb/pie} &= (8,0^2 - 2,8125^2) 2,56 \\
 \text{Peso, lb/pie} &= 56,089844 \times 2,56 \\
 \text{Peso} &= 143,59 \text{ lb/pie}
 \end{aligned}$$

Presión de Bomba / Relación de Emboladas de la Bomba

Fórmula Básica

$$\text{Nueva presión circulante, psi} = \text{presión circulante actual, psi} \times \left(\frac{\text{nueva tasa de bomba, emb/min}}{\text{tasa de bomba anterior, emb/min}} \right)^2$$

Ejemplo: Determinar la nueva presión circulante, psi, utilizando los siguientes datos:

$$\begin{aligned}
 \text{Presión circulante actual} &= 1800 \text{ psi} \\
 \text{Tasa de bomba anterior} &= 60 \text{ emb/min} \\
 \text{Tasa de bomba nuevo} &= 30 \text{ emb/min}
 \end{aligned}$$

$$\text{Nueva presión circulante, psi} = 1800 \text{ psi} \left(\frac{30 \text{ emb/min}}{60 \text{ emb/min}} \right)^2$$

$$\text{Nueva presión circulante, psi} = 1800 \text{ psi} \times 0,25$$

$$\text{Nueva presión circulante} = 450 \text{ psi}$$

Determinación del factor exacto en la ecuación anterior

La fórmula anterior es una estimación debido a que el factor “²” representa un número redondeado. Para determinar el factor preciso, se debe obtener dos lecturas de presión a tasas de bomba distintas y utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Factor} = \frac{\text{logaritmo (presión 1} \div \text{presión 2)}}{\text{logaritmo (tasa de bomba 1} \div \text{tasa de bomba 2)}}$$

Ejemplo: Presión 1 = 2500 psi @ 315 gpm
Presión 2 = 450 psi @ 120 gpm

$$\text{Factor} = \frac{\text{logaritmo (2500 psi} \div \text{450 psi)}}{\text{logaritmo (315 gpm} \div \text{120 gpm)}}$$

$$\text{Factor} = \frac{\text{logaritmo (5,5555556)}}{\text{logaritmo (2,625)}}$$

$$\text{Factor} = 1,7768$$

Ejemplo: El mismo ejemplo anterior pero con el factor exacto:

$$\text{Nueva presión circulante, psi} = 1800 \text{ psi} \left(\frac{30 \text{ emb/min}}{60 \text{ emb/min}} \right)^{1,7768}$$

$$\text{Nueva presión circulante, psi} = 1800 \text{ psi} \times 0,2918299$$

$$\text{Nueva presión circulante} = 525 \text{ psi}$$

Costo por Pie

$$C_T = \frac{B + C_R(t + T)}{F}$$

Ejemplo: Determinar el costo de perforación (C_T), dólares por pie utilizando los siguientes datos:

Costo de la mecha (B)	= \$ 2500
Costo del taladro (CR)	= \$ 900/hora
Tiempo de rotación (t)	= 65 horas
Tiempo de viaje, ida y vuelta (T)	= 6 horas
(para profundidad – 10000 pies)	
Pies por mecha (F)	= 1300 pies

$$C_T = \frac{2500 + 900 (65 + 6)}{1300}$$

$$C_T = \frac{66400}{1300}$$

$$C_T = \$ 51,08 \text{ por pie}$$

Fórmulas para la Conversión de Temperatura

Convertir temperatura, ° Fahrenheit (F) a ° Centígrado o ° Celso (C)

$$^{\circ}\text{C} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32) \cdot 5}{9} \quad \text{O} \quad ^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{F} - 32 \times 0,5556$$

Ejemplo: Convertir 95°F a °C:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{(95 - 32) \cdot 5}{9} \quad \text{O} \quad ^{\circ}\text{C} = 95 - 32 \times 0,5556$$

$$^{\circ}\text{C} = 35 \quad \text{O} \quad ^{\circ}\text{C} = 35$$

Convertir temperatura ° Centígrado o ° Celso (C) a ° Fahrenheit (F)

$$^{\circ}\text{F} = \frac{(^{\circ}\text{C} \times 9)}{5} + 32 \quad \text{O} \quad ^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times 1,8 + 32$$

Ejemplo: Convertir 24°C a °F:

$$^{\circ}\text{F} = \frac{(24 \times 9)}{5} + 32 \quad \text{O} \quad ^{\circ}\text{F} = 24 \times 1,8 + 32$$

$$^{\circ}\text{F} = 75,2 \quad \text{O} \quad ^{\circ}\text{F} = 75,2$$

Convertir temperatura, ° Centígrado, Celso (C) a ° Kelvin (K)

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,16$$

Ejemplo: Convertir 35°C a °K:

$$^{\circ}\text{K} = 35 + 273,16$$

$$^{\circ}\text{K} = 308,16$$

Convertir temperatura, ° Fahrenheit (F) a ° Rankine (R)

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,69$$

Ejemplo: Convertir 260 °F a °R:

$$^{\circ}\text{R} = 260 + 459,69$$

$$^{\circ}\text{R} = 719,69$$

Fórmulas generales para la conversión de temperatura

a) Convertir °F a °C

$$^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{F} - 30 \div 2$$

Ejemplo: Convertir 95°F a °C:

$$^{\circ}\text{C} = 95 - 30 \div 2$$

$$^{\circ}\text{C} = 32,5$$

b) Convertir $^{\circ}\text{C}$ a $^{\circ}\text{F}$

$$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times \frac{9}{5} + 32$$

Ejemplo: Convertir 24°C a $^{\circ}\text{F}$:

$$^{\circ}\text{F} = 24 \times \frac{9}{5} + 32$$

$$^{\circ}\text{F} = 75,2$$

CAPÍTULO DOS

CÁLCULOS BÁSICOS

Volúmenes y Emboladas

Volumen de la sarta de perforación, barriles

$$\text{Barriles} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg.}^2}{1029,4} \times \text{longitud de tubería, pies}$$

Volumen anular, barriles

$$\text{Barriles} = \frac{\text{Dh, pulg.}^2 - \text{Dp, pulg.}^2}{1029,4}$$

Emboladas para desplazar: sarta de perforación, espacio anular y circulación total desde el kelly al colador vibratorio (“shale shaker”)

Emboladas = barriles ÷ flujo de salida de la bomba, bl/emb.

Ejemplo: Determinar los volúmenes y emboladas para los siguientes:

Tubería de perforación – 5,0 pulg – 19,5 lb/pie

Diámetro interno	= 4,276 pulg.
Longitud	= 9400 pies

Cuellos de perforación – Diámetro externo (OD) 8,0 pulg

Diámetro interno	= 3 pulg.
Longitud	= 600 pies

Tubería de revestimiento – 13-3/8 pulg – 54,5 lb/pie

Diámetro interno	= 12,615 pulg.
Longitud	= 4500 pies

Datos de la bomba – 7 pulg por 12 pulg, triplex

Eficiencia	= 95%
Flujo de salida	= 0,136 @ 95%

Tamaño del hoyo = 12 ¼ pulg.

Volumen de la sarta de perforación

- a) Volumen de la tubería de perforación, bl:

$$\text{Barriles} = \frac{4,276^2}{1029,4} \times 9400 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 0,01776 \times 9400 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 166,94$$

- b) Volumen del cuello de perforación, bl:

$$\text{Barriles} = \frac{3,0^2}{1029,4} \times 600 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 0,0087 \times 600 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 5,24$$

- c) Volumen total de la sarta de perforación:

$$\text{Volumen total de la sarta de perforación, bl} = 166,94 \text{ bl} + 5,24 \text{ bl}$$

$$\text{Volumen total de la sarta de perforación} = 172,18 \text{ bl}$$

Volumen anular

- a) Cuello de perforación/hoyo abierto:

$$\text{Barriles} = \frac{12,25^2 - 8,0^2}{1029,4} \times 600 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 0,0836 \times 600 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 50,16$$

- b) Tubería de perforación/hoyo abierto:

$$\text{Barriles} = \frac{12,25^2 - 5,0^2}{1029,4} \times 4900 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 0,12149 \times 4900 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 595,3$$

- c) Tubería de perforación/hoyo entubado:

$$\text{Barriles} = \frac{12,615^2 - 5,0^2}{1029,4} \times 4500 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 0,130307 \times 4500 \text{ pies}$$

$$\text{Barriles} = 586,38$$

- d) Volumen anular total:

$$\text{Volumen anular total} = 50,16 + 595,3 + 586,38$$

$$\text{Volumen anular total} = 1231,84 \text{ barriles}$$

Emboladas

a) Emboladas desde la superficie hasta la mecha:

Emboladas = volumen de la sarta de perforación, bl ÷ flujo de salida de la bomba, bl/emb

Emboladas desde la superficie hasta la mecha = $172,16 \text{ bl} \div 0,136 \text{ bl/emb}$.

Emboladas desde la superficie hasta la mecha = 1266

b) Desde la mecha hasta la superficie (o emboladas desde el fondo):

Emboladas = volumen anular, bl ÷ flujo de salida de la bomba, bl/emb

Emboladas desde la mecha hasta la superficie = $1231,84 \text{ bl} \div 0,136 \text{ bl/emb}$

Emboladas desde la mecha hasta la superficie = 9058

c) Total de emboladas requeridas para bombear desde el kelly hasta el colador vibratorio ("shaker"):

Emboladas = vol. de sarta de perforación, bl + vol. anular, bl ÷ flujo de salida de bomba, bl/emb

Total de emboladas = $(172,16 + 1231,84) \div 0,136$

Total de emboladas = $1404 \div 0,136$

Total de emboladas = 10.324

Cálculos para Tarrugas ("Slugs")**Barriles de slug requeridos para una longitud deseada de tubería seca****Paso 1**

Presión hidrostática requerida para lograr caída deseada dentro de la tubería de perforación:

Presión hidrostática, psi = peso de lodo, ppg x 0,052 x pies de tubería seca

Paso 2

Diferencia en gradiente de presión entre el peso del slug y peso de lodo:

psi/pie = (peso de slug, ppg – peso de lodo, ppg) x 0,052

Paso 3

Longitud de slug en tubería de perforación:

Longitud de slug, pie = presión, psi ÷ diferencia en gradiente de presión, psi/pie

Paso 4

Volumen de slug, barriles:

Vol. de slug, bl = longitud de slug, pie x capacidad de tubería de perforación, bl/pie

Ejemplo: Determinar los barriles de slug requeridos para los siguientes parámetros:

Longitud de tubería seca deseada (2 haces)	= 184 pie
Peso de lodo	= 12,2 ppg
Peso de slug	= 13,2 ppg
Capacidad de la tubería de perforación 4 ½ pulg – 16,6 lb/pie	= 0,01422 bl/pie

Paso 1

Presión hidrostática requerida:

$$\text{Presión hidrostática, psi} = 12,2 \text{ ppg} \times 0,052 \times 184 \text{ pie}$$

$$\text{Presión hidrostática} = 117 \text{ psi}$$

Paso 2

Diferencia en gradiente de presión, psi/pie:

$$\text{psi/pie} = (13,2 \text{ ppg} - 12,2 \text{ ppg}) \times 0,052$$

$$\text{psi/pie} = 0,052$$

Paso 3

Longitud de slug en tubería de perforación, pie:

$$\text{Longitud de slug, pie} = 117 \text{ psi} \div 0,052$$

$$\text{Longitud de slug} = 2250 \text{ pie}$$

Paso 4

Volumen de slug, bl:

$$\text{Vol. de slug, bl} = 2250 \text{ pie} \times 0,01422 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Vol. de slug} = 32,0 \text{ bl}$$

Peso de slug requerido para una longitud de tubería seca deseada con un volumen de slug fijo

Paso 1

Longitud de slug en tubería seca, pie:

$$\text{Longitud de slug, pie} = \text{vol. de slug, bl} \div \text{capacidad de tubería de perforación, bl/pie}$$

Paso 2

Presión hidrostática requerida para lograr caída deseada dentro de la tubería de perforación:

$$\text{Presión hidrostática, psi} = \text{peso de lodo, ppg} \times 0,052 \times \text{pie de tubería seca}$$

Paso 3

Peso de slug, ppg:

$$\text{Peso de slug, ppg} = \text{presión hidrostática, psi} \div 0,052 \div \text{longitud de slug, pie} + \text{peso de lodo, ppg}$$

Ejemplo: Determinar el peso de slug requerido para los siguientes parámetros:

Longitud de tubería seca deseada (2 haces)	= 184 pie
Peso de lodo	= 12,2 ppg
Volumen de slug	= 25 bl
Capacidad de la tubería de perforación 4 ½ pulg – 16,6 lb/pie	= 0,01422 bl/pie

Paso 1

Longitud de slug en tubería de perforación, pies:

Longitud de slug, pie = $25 \text{ bl} \div 0,01422 \text{ bl/pie}$

Longitud de slug = 1758 pie

Paso 2

Presión hidrostática requerida:

Presión hidrostática, psi = $12,2 \text{ ppg} \times 0,052 \times 184 \text{ pie}$

Presión hidrostática = 117 psi

Paso 3

Peso de slug, ppg:

Peso de slug, ppg = $117 \text{ psi} \div 0,052 \div 1758 \text{ pies} + 12,2 \text{ ppg}$

Peso de slug, ppg = $1,3 \text{ ppg} + 12,2 \text{ ppg}$

Peso de slug = 13,5 ppg

Volumen, altura y presión ganados debido al slug:

a) Aumento del volumen de presa del lodo después de bombear el slug, debido a tubos en U:

Vol., bl = pies de tubería seca x capacidad de tubería de perforación, bl/pie

b) Altura, pie, que slug ocuparía en espacio anular:

Altura, pie = volumen del espacio anular, pie/bl x volumen de slug, bl

c) Presión hidrostática ganada en espacio anular debido al slug:

Presión hidrostática, psi = $\frac{\text{altura de slug en espacio anular, pie}}{\text{volumen de slug, bl}} \times \text{diferencia en gradiente, psi/pie, entre peso de slug y peso de lodo}$

Ejemplo:

Pies de tubería seca (2 haces)	= 184 pies
Volumen del slug	= 32,4 bl
Peso del slug	= 13,2 ppg
Peso del lodo	= 12,2 ppg
Capacidad de tubería de perforación 4 ½ pulg - 16,6 lb/pie	= 0,01422 bl/pie
Volumen del espacio anular (8 ½ pulg. por 4 ½ pulg)	= 19,8 pie/bl

a) Aumento en volumen de presa del lodo después de bombear el slug debido a tubo en U:

Vol., bl = $184 \text{ pie} \times 0,01422 \text{ bl/pie}$

$$\text{Vol.} = 2,62 \text{ bl}$$

b) Altura, pies, que slug ocuparía en el espacio anular:

$$\text{Altura, pie} = 19,8 \text{ pie/bl} \times 32,4 \text{ bl}$$

$$\text{Altura} = 641,5 \text{ pie}$$

c) Presión hidrostática ganada en espacio anular debido al slug:

$$\text{Presión hidrostática, psi} = 641,5 \text{ pie} (13,2 - 12,2) \times 0,052$$

$$\text{Presión hidrostática, psi} = 641,5 \text{ pie} \times 0,052$$

$$\text{Presión hidrostática} = 33,4 \text{ psi}$$

Capacidad del Acumulador – Volumen Utilizable Por Botella

Volumen Utilizable Por Botella

NOTA: Se utilizarán los siguientes parámetros como guía:

Volumen por botella	= 10 gal
Presión de pre-carga	= 100 psi
Presión mínima que permanece después de la activación	= 1200 psi
Gradiente de presión del fluido hidráulico	= 0,445 psi/pie
Presión máxima	= 3000 psi

Se ajustará y utilizará la Ley de Boyle para gases ideales en la siguiente manera:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Aplicación en la Superficie

Paso 1

Determinar el fluido hidráulico necesario para aumentar la presión desde la presión de pre-carga hasta la presión mínima:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$1000 \text{ psi} \times 10 \text{ gal} = 1200 \text{ psi} \times V_2$$

$$\frac{10.000}{1200} = V_2$$

$V_2 = 8,33$ El nitrógeno ha sido comprimido desde 10,0 gal a 8,33 gal.

$10,0 - 8,33 = 1,67$ gal de fluido hidráulico por botella

NOTA: Esto representa el fluido hidráulico muerto. La presión no debe caer por debajo de este valor mínimo.

Paso 2

Determinar el fluido hidráulico necesario para aumentar la presión desde la presión de pre-carga hasta la presión máxima:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$1000 \text{ psi} \times 10 \text{ gal} = 3000 \text{ psi} \times V_2$$

$$\frac{10.000}{3000} = V_2$$

$V_2 = 3,33$ El nitrógeno ha sido comprimido desde 10,0 gal a 3,33 gal.

$$10,0 - 3,33 = 6,67 \text{ gal de fluido hidráulico por botella}$$

Paso 3

Determinar el volumen utilizable por botella:

$$\text{Vol. utilizable /botella} = \text{Total de fluido hidráulico / botella} - \text{Fluido hidráulico muerto / botella}$$

$$\text{Vol. utilizable /botella} = 6,67 - 1,67$$

$$\text{Vol. utilizable /botella} = 5,0 \text{ galones}$$

Aplicación Submarina

En aplicaciones submarinas la presión hidrostática ejercida por el fluido hidrostático debe ser compensada en los cálculos:

Ejemplo: Los mismos parámetros que se utilizaron en las aplicaciones en la superficie:

$$\text{Profundidad de agua} = 1000 \text{ pies}$$

$$\text{Presión hidrostática del fluido hidráulico} = 445 \text{ psi}$$

Paso 1

Ajustar todas las presiones para la presión hidrostática del fluido hidráulico:

$$\text{Presión de pre-carga} = 1000 \text{ psi} + 445 \text{ psi} = 1445 \text{ psi}$$

$$\text{Presión mínima} = 1200 \text{ psi} + 445 \text{ psi} = 1645 \text{ psi}$$

$$\text{Presión máxima} = 3000 \text{ psi} + 445 \text{ psi} = 3445 \text{ psi}$$

Paso 2

Determinar el fluido hidráulico necesario para aumentar la presión desde la presión de pre-carga hasta la presión mínima:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$1445 \text{ psi} \times 10 \text{ gal} = 1645 \text{ psi} \times V_2$$

$$\frac{14450}{1645} = V_2$$

$$V_2 = 8,78 \text{ gal}$$

$$10,0 - 8,78 = 1,22 \text{ gal de fluido hidráulico muerto por botella}$$

Paso 3

Determinar el fluido hidráulico necesario para aumentar la presión desde la presión de pre-carga hasta la presión máxima:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$1445 \text{ psi} \times 10 \text{ gal} = 3445 \text{ psi} \times V_2$$

$$\frac{14450}{3445} = V_2$$

$$V_2 = 4,19 \text{ gal}$$

$$10,0 - 4,19 = 5,81 \text{ gal de fluido hidráulico por botella}$$

Paso 3

Determinar el volumen utilizable por botella:

$$\text{Vol. utilizable} = \text{Total de fluido} - \text{Fluido hidráulico}$$

$$\text{/botella} = \text{hidráulico / botella} - \text{muerto / botella}$$

$$\text{Vol. utilizable} = 5,81 - 1,22$$

$$\text{/botella}$$

$$\text{Vol. utilizable} = 4,49 \text{ galones}$$

$$\text{/botella}$$

Presión de Pre-Carga del Acumulador

El siguiente es un método para medir la presión de pre-carga promedia del acumulador al operar la unidad con las bombas de carga apagadas:

$$P, \text{ psi} = \frac{\text{vol. removido, bl}}{\text{vol. total del acumulador, bl}} \times \left(\frac{P_f \times P_s}{P_s - P_f} \right)$$

donde P = presión de pre-carga promedia, psi

Pf = presión final del acumulador, psi

Ps = presión inicial del acumulador, psi

Ejemplo: Determinar la presión de pre-carga promedia utilizando los siguientes datos:

$$\text{Presión inicial del acumulador (Ps)} = 3000 \text{ psi}$$

$$\text{Presión final del acumulador (Pf)} = 2200 \text{ psi}$$

$$\text{Volumen de fluido removido} = 20 \text{ gal}$$

$$\text{Volumen total del acumulador} = 180 \text{ gal}$$

$$P, \text{ psi} = \frac{20}{180} \times \left(\frac{2200 \times 3000}{3000 - 2200} \right)$$

$$P, \text{ psi} = 0,1111 \times \left[\frac{6.600.000}{800} \right]$$

$$P, \text{ psi} = 0,1111 \times 8250$$

$$P = 917 \text{ psi}$$

Densidad en Masa de Ripios de Perforación (Utilizando Balanza para Lodo)

Procedimiento:

1. Los ripios deben ser lavados para remover el lodo. En caso de lodo a base de aceite, se puede utilizar diesel en lugar de agua.
2. Ajustar la balanza para lodo a 8,33 ppg.
3. Llenar la balanza para lodo con ripios hasta lograr un equilibrio con la tapa puesta.
4. Remover la tapa, llenar el tazón con agua (ripios incluidos), colocar tapa de nuevo y secar la parte externa de la balanza para lodo.
5. Mover el contrapeso para obtener nuevo equilibrio.

Se calcula la gravedad específica de los ripios en la siguiente manera:

$$SG = \frac{1}{2 - (0,12 \times R_w)}$$

donde SG = gravedad específica de los ripios – densidad en masa
 R_w = peso resultante con ripios más agua, ppg

Ejemplo: R_w = 13,8 ppg. Determinar la densidad en masa de los ripios:

$$SG = \frac{1}{2 - (0,12 \times 13,8)}$$

$$SG = \frac{1}{0,344}$$

$$SG = 2,91$$

Diseño de la Sarta de Perforación (Limitaciones)

Se determinarán los siguientes parámetros:

Longitud del conjunto de fondo (BHA) necesaria para un peso sobre la mecha (WOB) deseado.

Pies de tubería de perforación que se pueden utilizar con un conjunto de fondo específico (BHA).

1. Longitud del conjunto de fondo necesaria para un peso sobre la mecha deseado:

$$\text{Longitud, pie} = \frac{\text{WOB} \times f}{\text{Wdc} \times \text{BF}}$$

donde WOB = peso deseado a utilizar durante la perforación
 f = factor de seguridad para colocar punto neutral en cuellos de perforación
 Wdc = peso del cuello de perforación, lb/pie
 BF = factor de flotabilidad

Ejemplo: WOB deseado durante la perforación = 50.000 lb
 Factor de seguridad = 15%
 Peso del lodo = 12,0 ppg
 Peso del cuello de perforación = 147 lb/pie
 Diámetro externo (OD) = 8 pulg – Diámetro interno (ID) = 3 pulg.

Solución: a) Factor de Flotabilidad (BF):

$$\text{BF} = \frac{65,5 - 12,0 \text{ ppg}}{65,5}$$

$$\text{BF} = 0,8168$$

b) Longitud de conjunto de fondo necesaria:

$$\text{Longitud, pie} = \frac{50.000 \times 1,15}{147 \times 0,8168}$$

$$\text{Longitud, pie} = \frac{57.500}{120,0696}$$

$$\text{Longitud} = 479 \text{ pies}$$

2. Pies de tubería de perforación que se pueden utilizar con un conjunto de fondo específico (BHA)

NOTA: Obtener la resistencia a la tracción de tubería nueva del manual de cementación u otra fuente.

a) Determinar el factor de flotabilidad (BF):

$$\text{BF} = \frac{65,5 - \text{peso del lodo, ppg}}{65,5}$$

b) Determinar la máxima longitud de tubería que se puede correr en el hoyo con un conjunto de fondo específico:

$$\text{Longitud}_{\text{max}} = \frac{[(T \times f) - \text{MOP} - \text{Wbha}] \times \text{BF}}{\text{Wdp}}$$

donde T = resistencia a la tracción, lb de la tubería nueva
 f = factor de seguridad para corregir tubería nueva a tubería No. 2
 MOP = margen de “overpull”
 Wbha = Peso del BHA en el aire, lb/pie

Wdp = peso de la tubería de perforación en el aire, lb/pie, incluyendo la rosca de unión de tubería vástago (“tool joint”)
 BF = factor de flotabilidad

- c) Determinar la profundidad total que se puede alcanzar con un conjunto de fondo específico:

Profundidad total, pie = longitud_{max} + longitud del BHA

Ejemplo: Tubería de perforación (5,0 pulg) = 21,87 lb/pie – Grado G
 Resistencia a la tracción = 554.000 lb
 Peso del BHA en el aire = 50.000 lb
 Longitud del BHA = 500 pies
 “Overpull” deseado = 100.000 lb
 Peso del lodo = 13,5 ppg
 Factor de seguridad = 10%

- a) Factor de flotabilidad:

$$BF = \frac{65,5 - 13,5}{65,5}$$

$$BF = 0,7939$$

- b) Longitud máxima de tubería de perforación que se puede correr en el hoyo:

$$\text{Longitud}_{\text{max}} = \frac{[(554.000 \times 0,90) - 100.000 - 50.000] \times 0,7939}{21,87}$$

$$\text{Longitud}_{\text{max}} = \frac{276,754}{21,87}$$

$$\text{Longitud}_{\text{max}} = 12.655 \text{ pies}$$

- c) Profundidad total que se puede alcanzar con este BHA y esta tubería de perforación:

Profundidad total, pies = 12.655 pie + 500 pie

Profundidad total = 13.155 pie

Cálculos de Toneladas-Millas (TM)

Se deberá calcular y registrar todo tipo de servicio de toneladas-millas para obtener una imagen verdadera del servicio total recibido de la línea de perforación rotativa. Estos incluyen:

1. Toneladas-millas de viajes ida y vuelta
2. Toneladas-millas de perforación o “conexión”
3. Toneladas-millas de toma de núcleos
4. Toneladas-millas por asentar tubería de revestimiento
5. Toneladas-millas de viajes cortos

Toneladas-millas de viajes ida y vuelta (RT_{TM})

$$RT_{TM} = \frac{W_p \times D \times (L_p + D) + (2 \times D) (2 \times W_b + W_c)}{5280 \times 2000}$$

donde RT_{TM} = toneladas-millas de viajes ida y vuelta

W_p = peso sostenido por flotación de la tubería de perforación, lb/pie

D = profundidad del hoyo, pie

L_p = longitud de una haz de tubería de perforación, (ave), pie

W_b = peso del ensamblaje del bloque viajero, lb

W_c = peso sostenido por flotación de los cuellos de perforación en el lodo menos el peso sostenido por flotación de la misma longitud de tubería de perforación, lb

2000 = número de libras en una tonelada

5280 = número de pies en una milla

Ejemplo: Toneladas-millas de viaje ida y vuelta

Peso de lodo	= 9,6 ppg
Profundidad medida	= 4000 pies
Peso de la tubería de perforación	= 13,3 lb/pie
Peso del cuello de perforación	= 83 lb/pie
Longitud del cuello de perforación	= 300 pies
Ensamblaje del bloque viajero	= 15.000 lb
Longitud promedia de una haz	= 60 pies (doble)

Solución: a) Factor de flotabilidad:

$$BF = 65,5 - 9,6 \text{ ppg} \div 65,5$$

$$BF = 0,8534$$

b) Peso sostenido por flotación de la tubería de perforación en lodo, lb/pie (W_p):

$$W_p = 65,5 - 9,6 \text{ ppg} \div 65,5$$

$$W_p = 11,35 \text{ lb/pie}$$

c) Peso sostenido por flotación de cuellos de perforación en lodo menos el peso sostenido por flotación de la misma longitud de tubería de perforación, lb (W_c):

$$W_c = (300 \times 83 \times 0,8534) - (300 \times 13,3 \times 0,8534)$$

$$W_c = 21.250 - 3.405$$

$$W_c = 17.845 \text{ lb}$$

$$\text{Toneladas-millas de viaje ida y vuelta} = \frac{11,35 \times 4000 \times (60 + 4000) + (2 \times 4000) \times (2 \times 15000 + 17845)}{5280 \times 2000}$$

$$RT_{TM} = \frac{11,35 \times 4000 \times 4060 + 8000 \times (30000 + 17845)}{5280 \times 2000}$$

$$RT_{TM} = \frac{11,35 \times 4000 \times 4060 + 8000 \times 47845}{10.560.000}$$

$$RT_{TM} = \frac{1,8432 \text{ 08} + 3,8276 \text{ 08}}{10.560.000}$$

$$RT_{TM} = 53,7$$

Toneladas-millas de perforación o “conexión”

Las toneladas-millas de trabajo realizado en las operaciones de perforación se expresa en términos del trabajo realizado para hacer los viajes ida y vuelta. Estas son las toneladas-millas de trabajo real para perforar la longitud de un tramo de tubería de perforación (usualmente aproximadamente 30 pies) mas recoger la tubería, conectarla y comenzar a perforar el siguiente tramo.

Para determinar las toneladas-millas de conexión o perforación, tomar 3 veces (las toneladas-millas para el viaje ida y vuelta actual menos las toneladas-millas para el viaje ida y vuelta anterior):

$$Td = 3(T_2 - T_1)$$

donde Td = toneladas millas de perforación o “conexión”
 T₂ = toneladas-millas para un viaje ida y vuelta – profundidad en la cual se detuvo la perforación antes de retirarse del hoyo
 T₁ = toneladas-millas para un viaje ida y vuelta – profundidad en la cual se inició la perforación

Ejemplo: Toneladas-millas para viaje @ 4600 pies = 64,6
 Toneladas-millas para viaje @ 4000 pies = 53,7

$$Td = 3 \times (64,6 - 53,7)$$

$$Td = 3 \times 10,9$$

$$Td = 32,7 \text{ toneladas-millas}$$

Toneladas-millas durante operaciones para tomar núcleos

Las toneladas-millas de trabajo realizado durante operaciones para tomar núcleos, igual como en las operaciones de perforación, se expresa en términos de trabajo realizado para hacer viajes ida y vuelta.

Para determinar las toneladas-millas durante operaciones para tomar núcleos, tomar 2 veces las toneladas-millas para un viaje ida y vuelta a la profundidad donde se detuvo la operación para tomar núcleos menos las toneladas-millas para un viaje ida y vuelta a la profundidad donde se inició la toma de núcleos:

$$Tc = 2 (T_4 - T_3)$$

donde Tc = toneladas millas durante la operación para tomar núcleos
 T₄ = toneladas-millas para un viaje ida y vuelta – profundidad donde se detuvo la operación para tomar núcleos
 T₃ = toneladas millas para un viaje ida y vuelta – profundidad donde se inició la operación para tomar núcleos después de entrar en el hoyo

Toneladas-millas para asentar tubería de revestimiento

Los cálculos de las toneladas-millas para la operación de asentar tubería de revestimiento deberán ser determinados igual como la tubería de perforación, pero utilizando el peso sostenido por flotación de la tubería de revestimiento, y multiplicando el resultado por 0,5 debido a que asentar la tubería de revestimiento es una operación de una sola vía (½ viaje ida y vuelta). Se puede determinar las toneladas-millas para asentar tubería de revestimiento mediante la siguiente fórmula:

$$T_c = \frac{W_p \times D \times (L_{cs} + D) + D \times W_b}{5280 \times 2000} \times 0,5$$

donde T_c = toneladas-millas para asentar tubería de revestimiento
 W_p = peso sostenido por flotación de tubería de revestimiento, lb/pie
 L_{cs} = longitud de un junta de tubería de revestimiento, pie
 W_b = peso del ensamblaje del bloque viajero

Toneladas-millas al realizar un viaje corto

Las toneladas-millas de trabajo realizado en operaciones de viajes cortos, igual como operaciones de perforación y tomar núcleos, se expresan en términos de viajes ida y vuelta. El análisis muestra que las toneladas-millas de trabajo realizado para hacer un viaje corto son iguales a la diferencia en las toneladas-millas para las dos profundidades bajo consideración.

$$T_{st} = T_6 - T_5$$

donde T_{st} = toneladas-millas para viaje corto
 T_6 = toneladas-millas para un viaje ida y vuelta a la mayor profundidad, la profundidad de la mecha antes de iniciar el viaje corto
 T_5 = toneladas-millas para un viaje ida y vuelta a la menor profundidad, la profundidad hasta la cual se retira la mecha

Cálculos para la Cementación

Cálculos para aditivos de cemento

a) Peso de aditivo por saco de cemento:

$$\text{Peso, lb} = \text{porcentaje de aditivo} \times 94 \text{ lb/saco}$$

b) Requerimiento total de agua, gal/saco, de cemento:

$$\text{Agua, gal/saco} = \frac{\text{Requerimiento de agua del cemento, gal/saco}}{\text{SG del cemento}} + \frac{\text{Requerimiento de agua del aditivo, gal/saco}}{\text{SG del aditivo}}$$

c) Volumen de lechada, gal/saco:

$$\text{Vol., gal/saco} = \frac{94 \text{ lb}}{\text{SG del cemento} \times 8,33 \text{ lb/gal}} + \frac{\text{peso de aditivo, lb}}{\text{SG del cemento} \times 8,33 \text{ lb/gal}} + \text{vol. de agua, gal}$$

d) Rendimiento de la lechada, pie³/saco:

$$\text{Rendimiento, pie}^3/\text{saco} = \frac{\text{volumen de lechada, gal/saco}}{7,48 \text{ gal/pie}^3}$$

e) Densidad de la lechada, lb/gal:

$$\text{Densidad, lb/gal} = \frac{94 + \text{peso de aditivo} + (8,33 \times \text{vol. de agua/saco})}{\text{vol. de lechada, gal/saco}}$$

Ejemplo: Cemento clase A más 4% de bentonita utilizando agua normal:

Determinar los siguientes parámetros:

Cantidad de bentonita a agregar
 Requerimientos totales de agua
 Rendimiento de la lechada
 Peso de la lechada

1) Peso del aditivo:

$$\text{Peso, lb/saco} = 0,04 \times 94 \text{ lb/saco}$$

$$\text{Peso} = 3,76 \text{ lb/saco}$$

2) Requerimiento total de agua:

$$\text{Agua} = 5,1 \text{ (cemento)} + 2,6 \text{ (bentonita)}$$

$$\text{Agua} = 7,7 \text{ gal/saco de cemento}$$

3) Volumen de la lechada:

$$\text{Vol., gal/saco} = \frac{94}{3,14 \times 8,33} + \frac{3,76}{3,14 \times 8,33} + 7,7$$

$$\text{Vol., gal/saco} = 3,5938 + 0,1703 + 7,7$$

$$\text{Vol.} = 11,46 \text{ gal/saco}$$

4) Rendimiento de la lechada, pie³/saco:

$$\text{Rendimiento, pie}^3/\text{saco} = 11,46 \text{ gal/saco} \div 7,48 \text{ gal/pie}^3$$

$$\text{Rendimiento} = 1,53 \text{ pie}^3/\text{saco}$$

5) Densidad de la lechada, lb/gal:

$$\text{Densidad, lb/gal} = \frac{94 + 3,76 + (8,33 \times 7,7)}{11,46}$$

$$\text{Densidad, lb/gal} = \frac{161,90}{11,46}$$

$$\text{Densidad, lb/gal} = 14,13 \text{ lb/gal}$$

Requerimientos de agua

a) Peso de materiales, lb/saco:

$$\text{Peso, lb/saco} = 94 + (8,33 \times \text{vol. de agua, gal}) + (\% \text{ de aditivo} \times 94)$$

b) Volumen de lechada, gal/saco:

$$\text{Vol., gal/saco} = \frac{94 \text{ lb}}{\text{SG} \times 8,33 \text{ lb/gal}} + \frac{\text{peso de aditivo, lb}}{\text{SG} \times 8,33 \text{ lb/gal}} + \text{vol. de agua, gal}$$

c) Requerimiento de agua utilizando ecuación de balance de materiales:

$$D_1 V_1 = D_2 V_2$$

Ejemplo: Cemento de clase H más 6% de bentonita mezclado a 14,0 lb/gal. Gravedad específica de bentonita = 2,65.

Determinar los siguientes parámetros:

Requerimiento de bentonita, lb/saco

Requerimiento de agua, gal/saco

Rendimiento de la lechada, pie³/saco

Verificar peso de la lechada, lb/gal

1) Peso de los materiales, lb/saco:

$$\text{Peso, lb/saco} = 94 + (0,06 \times 94) + (8,33 \times "y")$$

$$\text{Peso, lb/saco} = 94 + 5,64 + 8,33 "y"$$

$$\text{Peso} = 99,64 + 8,33 "y"$$

2) Volumen de la lechada, gal/saco:

$$\text{Vol., gal/saco} = \frac{94}{3,14 \times 8,33} + \frac{5,64}{2,65 \times 8,33} + "y"$$

$$\text{Vol., gal/saco} = 3,6 + 0,26 + "y"$$

$$\text{Vol., gal/saco} = 3,86 + "y"$$

3) Requerimiento de agua utilizando la ecuación de balance de materiales:

$$99,64 + 8,33"y" = (3,86 + "y") \times 14,0$$

$$99,64 + 8,33"y" = 54,04 + 14,0 "y"$$

$$99,64 - 54,04 = 14,0 "y" - 8,33 "y"$$

$$45,6 = 5,67 "y"$$

$$45,6 \div 5,67 = "y"$$

$$8,0 = "y" \text{ Por lo tanto, el requerimiento de agua} = 8,0 \text{ gal/saco de cemento}$$

4) Rendimiento de la lechada, pie³/saco:

$$\text{Rendimiento, pie}^3/\text{saco} = \frac{3,6 + 0,26 + 8,0}{7,48}$$

$$\text{Rendimiento, pie}^3/\text{saco} = \frac{11,86}{7,48}$$

$$\text{Rendimiento} = 1,59 \text{ pie}^3/\text{saco}$$

5) Verificar la densidad de la lechada, lb/gal:

$$\text{Densidad, lb/gal} = \frac{94 + 5,64 + (8,33 \times 8,0)}{11,86}$$

$$\text{Densidad, lb/gal} = \frac{166,28}{11,86}$$

$$\text{Densidad, lb/gal} = 14,0 \text{ lb/gal}$$

Cálculos para aditivos de cemento en el campo

Cuando la bentonita deba ser hidratada previamente, se calcula la cantidad de bentonita a agregar basándose en la cantidad total del agua de mezcla utilizada:

Programa de cementación: 240 sacos de cemento; densidad de la lechada = 13,8 ppg; 8,6 gal/saco de agua para mezclar; 1,5% bentonita que debe ser hidratada previamente:

a) Volumen de agua para mezclar, gal:

$$\text{Volumen} = 240 \text{ sacos} \times 8,6 \text{ gal/saco}$$

$$\text{Volumen} = 2064 \text{ gal}$$

b) Peso total, lb, de agua para mezclar:

$$\text{Peso} = 2064 \text{ gal} \times 8,33 \text{ lb/gal}$$

$$\text{Peso} = 17.193 \text{ lb}$$

c) Requerimiento de bentonita, lb:

$$\text{Bentonita} = 17.193 \text{ lb} \times 0,015\%$$

$$\text{Bentonita} = 257,89 \text{ lb}$$

Se calculan otros aditivos basándose en el peso del cemento:

Programa de cementación: 240 sacos de cemento; 0,5% Halad; 0,40% CFR-2:

a) Peso del cemento:

$$\text{Peso} = 240 \text{ sacos} \times 94 \text{ lb/saco}$$

$$\text{Peso} = 22.560 \text{ lb}$$

b) Halad = 0,5%

$$\text{Halad} = 22.560 \text{ lb} \times 0,005$$

$$\text{Halad} = 112,8 \text{ lb}$$

c) CFR-2 = 0,40%

$$\text{CFR-2} = 22.560 \text{ lb} \times 0,0004$$

$$\text{CFR-2} = 90,24 \text{ lb}$$

Tabla 2-1
Requerimientos de Agua y Gravedad Específica de Aditivos de Cemento Comunes

Material	Requerimiento de Agua gal/94 lb/saco	Gravedad Específica
Cemento de Clase API		
Clase A y B	5,2	3,14
Clase C	6,3	3,14
Clase D y E	4,3	3,14
Clase G	5,0	3,14
Clase H	4,3 – 5,2	3,14
Cemento Chem Comp	6,3	3,14
Attapulgite	1,3/2% en cemento	2,89
Cement Fondu	4,5	3,23
Lumnite Cement	4,5	3,20
Trinity Lite-weight Cement	9,7	2,80
Bentonite	1,3/2% en cemento	2,65
Polvo de Carbonato de Calcio	0	1,96
Cloruro de calcio	0	1,96
Cal-Seal (Gypsum Cement)	4,5	2,70
CFR-1	0	1,63
CFR-2	0	1,30
D-Air-1	0	1,35
D-Air-2	0	1,005
Diacel A	0	2,62
Diacel D	3,3-7,4/10% en cemento	2,10
Diacel LWL	0 (hasta 0,7%) 0,8:1/1% en cemento	1,36
Gilsonite	2/50-lb/pie ³	1,07
Halad-9	0 (hasta 5%) 0,4-0,5 más del 5%	1,22
Halad 14	0	1,31
HR-4	0	1,56
HR-5	0	1,41
HR-7	0	1,30
HR-12	0	1,22
HR-15	0	1,57
Cal hidratada	14,4	2,20
Hidromite	2,282	2,15
Carbonato de Hierro	0	3,70
LA-2 Latex	0,8	1,10
NF-D	0	1,30
Perlite regular	4/8 lb/pie ³	2,20
Perlite 6	6/38 lb/pie ³	-
Pozmix A	4,6 – 5	2,46
Sal (NaCl)	0	2,17

Tabla 2-1 (Cont.)

Material	Requerimiento de Agua gal/94 lb/saco	Gravedad Específica
Sand Ottawa	0	2,63
Silica flour	1,6/35% en cemento	2,63
Sílice gruesa	0	2,63
Spacer perse	0	1,32
Mezcla espaciadora (líquido)	0	0,932
Tuf Additive No. 1	0	1,23
Tuf Additive No. 2	0	0,88
Tuf Plug	0	1,28

Cálculos para Cemento con Peso Agregado

Cantidad de aditivo de alta densidad por cada saco de cemento para obtener una densidad requerida de lechada de cemento

$$x = \frac{\left[\frac{Wt \times 11,207983}{SGc} \right] + (Wt \times CW) - 94 - (8,33 \times CW)}{\left[1 + \frac{AW}{100} \right] - \left[\frac{Wt}{Sga \times 8,33} \right] - \left[Wt + \frac{AW}{100} \right]}$$

donde x = aditivo requerido, libras por saco de cemento
 Wt = densidad de lechada requerida, lb/gal
 SGc = gravedad específica del cemento
 CW = requerimiento de agua del cemento
 AW = requerimiento de agua del aditivo
 Sga = gravedad específica del aditivo

Aditivo	Requerimiento de Agua gal/94 lb/saco	Gravedad Específica
Hematite	0,34	5,02
Ilmenite	0	4,67
Barite	2,5	4,23
Arena	0	2,63
Cementos de API		
Clase A y B	5,2	3,14
Clase C	6,3	3,14
Clase D, E, F, H	4,3	3,14
Clase G	5,0	3,14

Ejemplo: Determinar qué cantidad de hematite, lb/saco de cemento, se requeriría para aumentar la densidad de Cemento Clase H a 17,5 lb/gal:

Requerimiento de agua del cemento = 4,3 gal/saco
 Requerimiento de agua del aditivo (Hematite) = 0,34 gal/saco

Gravedad específica del cemento	= 3,14
Gravedad específica del aditivo (Hematite)	= 5,02

Solución:

$$x = \frac{\left[\frac{17,5 \times 11,207983}{3,14} \right] + (17,5 \times 4,3) - 94 - (8,33 \times 4,3)}{\left[1 + \frac{0,34}{100} \right] - \left[\frac{17,5}{5,02 \times 8,33} \right] - \left[17,5 + \frac{0,34}{100} \right]}$$

$$x = \frac{62,4649 + 75,25 - 94 - 35,819}{1,0034 - 0,418494 - 0,0595}$$

$$x = \frac{7,8959}{0,525406}$$

x = 15,1 lb de hematite por saco de cemento utilizado

Cálculos para el Número Requerido de Sacos de Cemento

Si se conoce el número de pies a cementar, utilizar el siguiente procedimiento:

Paso 1

Determinar las siguientes capacidades:

a) Capacidad anular, pies³/pie:

$$\text{Capacidad anular, pies}^3/\text{pie} = \frac{Dh, \text{ pulg.}^2 - Dp, \text{ pulg.}^2}{183,35}$$

b) Capacidad de la tubería de revestimiento, pies³/pie:

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, pies}^3/\text{pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg.}^2}{183,35}$$

c) Capacidad de la tubería de revestimiento, bl/pie:

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, bl/pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg.}^2}{1029,4}$$

Paso 2

Determinar el número requerido de sacos de cemento LEAD o FILLER:

$$\text{Sacos requeridos} = \text{pies a cementar} \times \text{Capacidad anular, pie}^3/\text{pie} \times \text{exceso} \div \text{Rendimiento, pie}^3/\text{saco de cemento LEAD}$$

Paso 3

Determinar el número requerido de sacos de cemento TAIL o NEAT:

$$\text{Sacos requeridos para espacio anular} = \text{pies a cementar} \times \text{Capacidad anular, pie}^3/\text{pie} \times \text{exceso} \div \text{Rendimiento, pie}^3/\text{saco de cemento TAIL}$$

$$\text{Sacos requeridos para tub. de revest.} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de pies entre cuello y zapata flotadora} \times \text{Capacidad de tub. de revest., pie}^3/\text{pie} \times \text{exceso}}{\text{Rendimiento, pie}^3/\text{saco de cemento TAIL}}$$

Número total de sacos de cemento TAIL requeridos:

Sacos = sacos requeridos en espacio anular + sacos requeridos en tubería de revestimiento

Paso 4

Determinar la capacidad de la tubería de revestimiento hasta el cuello flotador:

$$\text{Capacidad de tub. de revest. bl} = \text{Capacidad de tub. de revest, bl/pie} \times \text{Pies de tub. de revest. hasta el cuello flotador}$$

Paso 5

Determinar el número de emboladas requerido para bombear el obturador:

Emboladas = capacidad de tub. de revest., bl ÷ flujo de salida de la bomba, bl/emb.

Ejemplo: Determinar los siguientes parámetros utilizando los datos presentados a continuación:

1. ¿Cuántos sacos de cemento LEAD serán requeridos?
2. ¿Cuántos sacos de cemento TAIL serán requeridos?
3. Cuántos barriles de lodo serán requeridos para colocar el obturador?
4. ¿Cuántas emboladas serán requeridas para colocar el obturador superior?

Datos: Profundidad de asentimiento de tubería de revestimiento	= 3000 pies
Tamaño del hoyo	= 17 ½ pulg
Tubería de revestimiento – 54,5 lb/pie	= 13-3/8 pulg.
Diámetro interno de tubería de revestimiento	= 12,615 pulg
Cuello flotador (número de pies por encima de zapata)	= 44 pies
Bomba (5 ½ pulg x 14 pulg. duplex @ 90% eficiencia)	= 0,112 bl/emb.

Programa de cemento: Cemento LEAD (13,8 lb/gal)	= 2000 pies
rendimiento de lechada	= 1,59 pie ³ /saco
Cemento TAIL (15,8 lb/gal)	= 1000 pies
rendimiento de lechada	= 1,15 pie ³ /saco
Volumen en exceso	= 50%

Paso 1

Determinar las siguientes capacidades:

a) Capacidad anular, pies³/pie:

$$\text{Capacidad anular, pies}^3/\text{pie} = \frac{17,5^2 - 13,375^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad anular, pies}^3/\text{pie} = \frac{127,35938}{183,35}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,6946 \text{ pies}^3/\text{pie}$$

b) Capacidad de la tubería de revestimiento, pies^3/pie :

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, } \text{pies}^3/\text{pie} = \frac{12,615^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, } \text{pies}^3/\text{pie} = \frac{159,13823}{183,35}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento} = 0,8679 \text{ pies}^3/\text{pie}$$

c) Capacidad de la tubería de revestimiento, bl/pie :

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, } \text{bl}/\text{pie} = \frac{12,615^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, } \text{bl}/\text{pie} = \frac{159,13823}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento} = 0,1545 \text{ bl}/\text{pie}$$

Paso 2

Determinar el número requerido de sacos de cemento LEAD o FILLER:

$$\text{Sacos requeridos} = 2000 \text{ pie} \times 0,6946 \text{ pies}^3/\text{pie} \times 1,50 \div 1,59 \text{ pies}^3/\text{saco}$$

$$\text{Sacos requeridos} = 1311$$

Paso 3

Determinar el número requerido de sacos de cemento TAIL o NEAT:

$$\text{Sacos requeridos para espacio anular} = 1000 \text{ pies} \times 0,6946 \text{ pies}^3/\text{pie} \times 1,50 \div 1,15 \text{ pies}^3/\text{saco}$$

$$\text{Sacos requeridos para espacio anular} = 906$$

$$\text{Sacos requeridos para tubería de revestimiento} = 44 \text{ pie} \times 0,8679 \text{ pies}^3/\text{pie} \div 1,15 \text{ pies}^3/\text{saco}$$

$$\text{Sacos requeridos para tubería de revestimiento} = 33$$

Número total requerido de sacos de cemento TAIL:

$$\text{Sacos} = 906 + 33$$

$$\text{Sacos} = 939$$

Paso 4

Determinar los barriles de lodo requeridos para colocar el obturador superior:

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, bl} = (3000 \text{ pie} - 44 \text{ pie}) \times 0,1545 \text{ bl}/\text{pie}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento} = 456,7 \text{ bl}$$

Paso 5

Determinar el número de emboladas requerido para colocar el obturador superior:

$$\text{Emboladas} = 456,7 \text{ bl} \div 0,112 \text{ bl}/\text{emb.}$$

Emboladas = 4078

Cálculos para el Número de Pies a Cementar

Si se conoce el número de sacos de cemento, utilizar el siguiente procedimiento:

Paso 1

Determinar las siguientes capacidades:

a) Capacidad anular, pies³/pie:

$$\text{Capacidad anular, pies}^3/\text{pie} = \frac{D_h, \text{ pulg.}^2 - D_p, \text{ pulg.}^2}{183,35}$$

b) Capacidad de la tubería de revestimiento, pies³/pie:

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, pies}^3/\text{pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg.}^2}{183,35}$$

Paso 2Determinar el volumen de lechada, pie³:

$$\text{Vol. de lechada, pie}^3 = \text{número de sacos de cemento a utilizar} \times \text{rendimiento de lechada, pie}^3/\text{saco}$$

Paso 3Determinar la cantidad de cemento, pie³, que se debe dejar en la tubería de revestimiento:

$$\text{Cemento en tub. de revest, pie}^3 = \text{pies de tub. de revest.} - \text{prof. de asent. de herram. de cementación, pie} \times \text{capacidad de tub. de revest., pie}^3/\text{pie}$$

Paso 4

Determinar la altura de cemento en el espacio anular – pies de cemento:

$$\text{Pies} = \frac{\text{vol. de lechada, pie}^3}{\text{capacidad de tubería de revestimiento, pie}^3} + \text{capacidad anular, pie}^3/\text{pie} \div \text{exceso}$$

Paso 5

Determinar la profundidad del tope del cemento en el espacio anular:

$$\text{Profundidad, pie} = \text{profundidad de asentamiento de tubería de revestimiento, pie} - \text{pies de cemento en espacio anular}$$

Paso 6

Determinar el número de barriles de lodo requeridos para desplazar el cemento:

$$\text{Barriles} = \frac{\text{pies de tubería de perforación} \times \text{capacidad de tubería de perforación, bl/pie}}$$

Paso 7

Determinar el número de emboladas requeridas para desplazar el cemento:

$$\text{Emboladas} = \frac{\text{barriles requeridos para desplazar cemento}}{\text{flujo de salida de bomba, bl/emb.}}$$

Ejemplo: Determinar los siguientes parámetros utilizando los datos presentados a continuación:

1. Altura, pies, de cemento en el espacio anular
2. Cantidad, pie³, de cemento en la tubería de revestimiento
3. Profundidad, pie, del tope del cemento en el espacio anular
4. Número de barriles de lodo requeridos para desplazar el cemento
5. Número de emboladas requeridas para desplazar el cemento

Datos: Profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento	= 3000 pies
Tamaño del hoyo	= 17 ½ pulg.
Tubería de revestimiento – 54,5 lb/pie	13 3/8 pulg
Diámetro interno de tubería de revestimiento	= 12,615 pulg.
Tubería de perforación (5,0 pulg. – 19,5 lb/pie)	= 0,01776 bl/pie
Bomba (7 pulg. por 12 pulg. triplex @ 95% de eficiencia)	= 0,136 bl/emb.
Herramienta de cementación (número de pie por encima de la zapata)	= 100 pies

Programa de cementación: Cemento NEAT	= 500 sacos
Rendimiento de lechada	= 1,15 pie ³ /saco
Volumen del exceso	= 50%

Paso 1

Determinar las siguientes capacidades:

- a) Capacidad anular entre tubería de revestimiento y hoyo, pies³/pie:

$$\text{Capacidad anular, pies}^3/\text{pie} = \frac{17,5^2 - 13,375^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad anular, pies}^3/\text{pie} = \frac{127,35938}{183,35}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,6946 \text{ pies}^3/\text{pie}$$

- b) Capacidad de la tubería de revestimiento, pies³/pie:

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, pies}^3/\text{pie} = \frac{12,615^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento, pies}^3/\text{pie} = \frac{159,13823}{183,35}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de revestimiento} = 0,8679 \text{ pies}^3/\text{pie}$$

Paso 2

Determinar el volumen de lechada, pie³:

$$\begin{aligned}\text{Vol. de lechada, pie}^3 &= 500 \text{ sacos} \times 1,15 \text{ pie}^3/\text{saco} \\ \text{Vol. de lechada} &= 575 \text{ pie}^3\end{aligned}$$

Paso 3

Determinar la cantidad de cemento, pie³, que se debe dejar en la tubería de revestimiento:

$$\begin{aligned}\text{Cemento en tubería de revestimiento, pie}^3 &= (3000 \text{ pies} - 2900 \text{ pies}) \times 0,8679 \text{ pie}^3/\text{pie} \\ \text{Cemento en tubería de revestimiento} &= 86,79 \text{ pie}^3\end{aligned}$$

Paso 4

Determinar la altura de cemento en el espacio anular – pies de cemento:

$$\begin{aligned}\text{Pies} &= (575 \text{ pie}^3 - 86,79 \text{ pie}^3) \div 0,6946 \text{ pie}^3/\text{pie} \div 1,50 \\ \text{Pies} &= 468,58\end{aligned}$$

Paso 5

Determinar la profundidad del tope del cemento en el espacio anular:

$$\begin{aligned}\text{Profundidad, pie} &= 3000 \text{ pie} - 468,58 \text{ pie} \\ \text{Profundidad, pie} &= 2531,42 \text{ pies}\end{aligned}$$

Paso 6

Determinar el número de barriles de lodo requeridos para desplazar el cemento:

$$\begin{aligned}\text{Barriles} &= 2900 \text{ pie} \times 0,01776 \text{ bl/pie} \\ \text{Barriles} &= 51,5 \text{ pies}\end{aligned}$$

Paso 7

Determinar el número de emboladas requeridas para desplazar el cemento:

$$\begin{aligned}\text{Emboladas} &= 51,5 \text{ bl} \div 0,136 \text{ bl/emb} \\ \text{Emboladas} &= 379\end{aligned}$$

Colocar un Tapón de Cemento Balanceado

Paso 1

Determinar las siguientes capacidades:

- a) Capacidad anular, pie³/pie, entre tubería y hoyo:

$$\text{Capacidad anular, pie}^3/\text{pie} = \frac{D_h, \text{ pulg.}^2 - D_p, \text{ pulg.}^2}{183,35}$$

- b) Capacidad anular, pie/bl, entre tubería y hoyo:

$$\text{Capacidad anular, pie/bl} = \frac{1029,4}{D_h, \text{ pulg.}^2 - D_p, \text{ pulg.}^2}$$

- c) Capacidad del hoyo o de la tubería de revestimiento, pie³/pie:

$$\text{Capacidad del hoyo o de la tubería de revestimiento, pie}^3/\text{pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg.}^2}{183,35}$$

- d) Capacidad de la tubería de perforación o de revestimiento, pie³/pie:

$$\text{Capacidad de la tubería de perf. o de revest., pie}^3/\text{pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg.}^2}{183,35}$$

- e) Capacidad de la tubería de perforación o de revestimiento, bl/pie:

$$\text{Capacidad de la tubería de perf. o de revest., bl/pie} = \frac{\text{Diámetro interno (ID), pulg.}^2}{1029,4}$$

Paso 2

Determinar el número requerido de SACOS de cemento para una longitud determinada de tapón O determinar la longitud en PIES del tapón para un número determinado de sacos de cemento:

- a) Determinar el número de SACOS de cemento requerido para una longitud determinada de tapón:

$$\text{Sacos de cemento} = \frac{\text{longitud del tapón, pie} \times \text{capacidad del hoyo o tub. de revest, pie}^3/\text{pie} \times \text{exceso} \div \text{rendimiento de la lechada, pie}^3/\text{saco}}$$

NOTA: Si no se va a utilizar ningún exceso, se debe omitir el paso con el exceso.

O

- b) Determinar el número de PIES para un número determinado de sacos de cemento:

$$\text{Pies} = \frac{\text{Sacos de cemento} \times \text{rendimiento de la lechada, pie}^3/\text{saco} \div \text{capacidad del hoyo o tub. de revest, pie}^3/\text{pie} \div \text{exceso}}$$

NOTA: Si no se va a utilizar ningún exceso, se debe omitir el paso con el exceso

Paso 3

Determinar el volumen de espaciador (generalmente agua), bl, que se debe bombear detrás de la lechada para balancear el tapón:

$$\text{Vol. del espaciador, bl} = \frac{\text{capacidad anular, pie}^3/\text{bl}}{\text{exceso}} \times \frac{\text{vol. del espaciador por delante, bl}}{\text{capacidad de la tubería, bl/pie}}$$

NOTA: Si no se va a utilizar ningún exceso, se debe omitir el paso con el exceso

Paso 4

Determinar la longitud del tapón, pie, antes de retirar la tubería:

$$\text{Longitud del tapón, pie} = \frac{\text{Sacos de cemento} \times \text{rendimiento de la lechada, pie}^3/\text{saco}}{\text{capacidad anular, pie}^3/\text{pie}} \times \text{exceso} + \text{capacidad de la tubería, bl/pie}$$

NOTA: Si no se va a utilizar ningún exceso, se debe omitir el paso con el exceso

Paso 5

Determinar el volumen de fluido, bl, requerido para colocar el tapón:

$$\text{Vol., bl} = \frac{\text{longitud de tubería, pie} - \text{longitud del tapón, pie}}{\text{capacidad de la tubería, bl/pie}} \times \text{vol. del espaciador detrás de lechada, bl}$$

Ejemplo 1: Se va a colocar un tapón de 300 pie a una profundidad de 5000 pies. El tamaño del hoyo abierto es 8 ½ pulg y la tubería de perforación es de 3 ½ pulg – 13,3 lb/pie; diámetro interno (ID) – 2,764 pulg. Se va a bombear diez barriles de agua por delante de la lechada. Utilizar un rendimiento de la lechada de 1,15 pie³/saco. Utilizar el 25% como el volumen de lechada en exceso:

Determinar los siguientes parámetros:

1. Número de sacos de cemento requerido
2. Volumen de agua a bombear detrás de la lechada para balancear el tapón
3. Longitud del tapón antes de retirar la tubería
4. Cantidad de lodo requerido para colocar el tapón más el espaciador detrás del tapón

Paso 1

Determinar las siguientes capacidades:

- a) Capacidad anular, pie³/pie, entre tubería y hoyo:

$$\text{Capacidad anular, pie}^3/\text{pie} = \frac{8,5^2 - 3,5^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,3272 \text{ pie}^3/\text{pie}$$

- b) Capacidad anular, pie/bl, entre tubería y hoyo:

$$\text{Capacidad anular, pie/bl} = \frac{1029,4}{8,5^2 - 3,5^2}$$

$$\text{Capacidad anular} = 17,1569 \text{ pie/bl}$$

c) Capacidad del hoyo, pies³/pie:

$$\text{Capacidad del hoyo, pies}^3/\text{pie} = \frac{8,5^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad del hoyo} = 0,3941 \text{ pies}^3/\text{pie}$$

d) Capacidad de la tubería de perforación, bl/pie:

$$\text{Capacidad de la tubería de perforación, bl/pie} = \frac{2,764^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de perforación} = 0,00742 \text{ bl/pie}$$

e) Capacidad de la tubería de perforación, pies³/pie:

$$\text{Capacidad de la tubería de perforación, pies}^3/\text{pie} = \frac{2,764^2}{183,35}$$

$$\text{Capacidad de la tubería de perforación} = 0,0417 \text{ pies}^3/\text{pie}$$

Paso 2

Determinar el número requerido de SACOS de cemento:

$$\text{Sacos de cemento} = 300 \text{ pies} \times 0,3941 \text{ pie}^3/\text{pie} \times 1,25 \div 1,15 \text{ pie}^3/\text{saco}$$

$$\text{Sacos de cemento} = 129$$

Paso 3

Determinar el volumen de espaciador (agua), bl, que se debe bombear detrás de la lechada para balancear el tapón:

$$\text{Vol. del espaciador, bl} = 17,1569 \text{ pie}^3/\text{bl} \div 1,25 \times 10 \text{ bl} \times 0,00742 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Vol. del espaciador} = 1,018 \text{ bl}$$

Paso 4

Determinar la longitud del tapón, pie, antes de retirar la tubería:

$$\text{Longitud del tapón, pie} = \left(\frac{129}{\text{sacos}} \times \frac{1,15}{\text{pie}^3/\text{saco}} \right) \div \left(\frac{0,3272}{\text{pie}^3/\text{pie}} \times 1,25 + \frac{0,0417}{\text{bl/pie}} \right)$$

$$\text{Longitud del tapón, pie} = 148,35 \text{ pie}^3 \div 0,4507 \text{ pie}^3/\text{pie}$$

$$\text{Longitud del tapón} = 329 \text{ pies}$$

Paso 5

Determinar el volumen de fluido, bl, requerido para colocar el tapón:

$$\text{Vol., bl} = [(5000 \text{ pies} - 329 \text{ pies}) \times 0,00742 \text{ bl/pies}] - 1,0 \text{ bl}$$

$$\text{Vol., bl} = 34,66 \text{ bl} - 1,0 \text{ bl}$$

$$\text{Vol.} = 33,6 \text{ bl}$$

Ejemplo 2: Determinar el número de PIES de tapón para un número determinado de SACOS de cemento.

Se utilizará un tapón de cemento con 100 sacos de cemento en un hoyo de 8 ½ pulgadas. Utilizar 1,15 pie³/saco para el rendimiento de la lechada de cemento. La capacidad del hoyo de 8 ½ pulg. = 0,3841 pie³/pie. Utilizar 50% como el volumen de lechada en exceso.

$$\text{Pies} = 100 \text{ sacos} \times 1,15 \text{ pie}^3/\text{saco} \div 0,3941 \text{ pie}^3/\text{pie} \div 1,50$$

$$\text{Pies} = 194,5$$

Presión Hidrostática Diferencial entre Cemento en Espacio Anular y Lodo Dentro de la Tubería de Revestimiento

1. Determinar la presión hidrostática ejercida por el cemento y cualquier lodo que permanece en el espacio anular.
2. Determinar la presión hidrostática ejercida por el lodo y cemento que permanecen en la tubería de revestimiento.
3. Determinar la presión diferencial.

Ejemplo: Tubería de revestimiento de 9-5/8 pulg. – 43,5 lb/pie en hoyo de 12 ¼ pulg.

$$\text{Profundidad del pozo} = 8000 \text{ pies}$$

Programa de cementación:

$$\text{Lechada de LEAD} \quad 2000 \text{ pies} = 13,8 \text{ lb/gal}$$

$$\text{Lechada de TAIL} \quad 1000 \text{ pies} = 15,8 \text{ lb/gal}$$

$$\text{Peso del lodo} = 10,0 \text{ lb/gal}$$

$$\text{Cuello flotador (No. de pies por encima de la zapata)} = 44 \text{ pies}$$

Determinar la presión hidrostática total del cemento y lodo en el espacio anular

a) Presión hidrostática del lodo en espacio anular:

$$\text{Presión hidrostática, psi} = 10,0 \text{ lb/gal} \times 0,052 \times 5000 \text{ pies}$$

$$\text{Presión hidrostática} = 2600 \text{ psi}$$

b) Presión hidrostática del cemento de LEAD:

Presión hidrostática, psi = 13,8 lb/gal x 0,052 x 2000 pies

Presión hidrostática = 1435 psi

c) Presión hidrostática del cemento de TAIL:

Presión hidrostática, psi = 15,8 lb/gal x 0,052 x 1000 pies

Presión hidrostática = 822 psi

d) Presión hidrostática total en espacio anular:

psi = 2600 psi + 1435 psi + 822 psi

psi = 4857

Determinar la presión total dentro de la tubería de revestimiento

e) Presión ejercida por el lodo:

Presión hidrostática, psi = 10,0 lb/gal x 0,052 x (8000 pie – 44 pie)

Presión hidrostática = 4137 psi

f) Presión ejercida por el cemento:

Presión hidrostática, psi = 15,8 lb/gal x 0,052 x 44 pie

Presión hidrostática = 36 psi

g) Presión total dentro de la tubería de revestimiento:

psi = 4137 psi + 36 psi

psi = 4173

Presión diferencial

$P_D = 4857 \text{ psi} - 4173 \text{ psi}$

$P_D = 684 \text{ psi}$

Esfuerzos Hidráulicos Sobre la Tubería de Revestimiento

Estos cálculos determinará si la tubería de revestimiento se moverá hacia arriba como consecuencia de los esfuerzos hidráulicos durante la cementación.

Determinar la diferencia en el gradiente de presión, psi/pie, entre el cemento y el lodo

psi/pie = (peso del cemento, ppg – peso del lodo, ppg) x 0,052

Determinar la presión diferencial (DP) entre el cemento y lodo

Presión diferencial, psi = $\frac{\text{diferencia en gradientes de presión, psi/pie}}{\text{de presión, psi/pie}} \times \text{longitud de la tubería de revestimiento, pie}$

Determinar el área, pulgadas cuadradas, por debajo de la zapata

Área, pulgadas cuadradas = diámetro de tubería de revestimiento, pulg. ² x 0,7854

Determinar el Esfuerzo Hacia Arriba (F), lb. Esto es el peso, esfuerzo total que actúa en la parte inferior de la zapata.

Esfuerzo, lb = área, pulg. cuad. x presión diferencial entre cemento y lodo, psi

Determinar el Esfuerzo Hacia Abajo (W), lb. Esto es el peso de la tubería de revestimiento.

Peso, lb = peso de tubería de revestimiento, lb/pie x longitud, pie x factor de flotabilidad

Determinar la diferencia en esfuerzos, lb

Esfuerzo diferencial, lb = esfuerzo hacia arriba, lb – esfuerzo hacia abajo, lb

Presión requerida para equilibrar los esfuerzos para que la tubería de revestimiento no se mueva hacia arriba por los esfuerzos hidráulicos

psi = esfuerzo, lb ÷ área, pulg. cuad.

Incremento en peso de lodo para equilibrar la presión

Peso de lodo, ppg = $\frac{\text{presión requerida para equilibrar esfuerzos, psi}}{0,052} \div \text{longitud de tubería de revestimiento, pie}$

Nuevo peso del lodo, ppg

Peso del lodo, ppg = incremento en peso del lodo, ppg ÷ peso del lodo, ppg

Verificar los esfuerzos con el nuevo peso del lodo

- psi/pie = (peso del cemento, ppg – peso del lodo, ppg) x 0,052
- psi = diferencia en gradientes de presión, psi/pie x longitud de tubería de revestimiento, pie
- Esfuerzo hacia arriba, lb = presión, psi x área, pulg. cuad.
- Diferencia en esfuerzos, lb = esfuerzos hacia arriba, lb – esfuerzos hacia abajo, lb

Ejemplo:

Tamaño de tubería de revestimiento	= 13 3/8 pulg, 54 lb/pie
Peso del cemento	= 15,8 ppg
Peso del lodo	= 8,8 ppg
Factor de flotabilidad	= 0,8656
Profundidad del pozo	= 164 pies (50 m)

Determinar la diferencia en el gradiente de presión, psi/pie, entre el cemento y el lodo

psi/pie = (15,8 – 8,8) x 0,52

$$\text{psi/pie} = 0,364$$

Determinar la presión diferencial entre el cemento y el lodo

$$\text{psi} = 0,364 \text{ psi/pie} \times 164 \text{ pie}$$

$$\text{psi} = 60$$

Determinar el área, pulgadas cuadradas, por debajo de la zapata

$$\text{área, pulgadas cuadradas} = 13,375^2 \times 0,7854$$

$$\text{área} = 140,5 \text{ pulg. cuad.}$$

Determinar el esfuerzo hacia arriba. Esto es el esfuerzo total que actúa en la parte inferior de la zapata

$$\text{Esfuerzo, lb} = 140,5 \text{ pulg. cuad.} \times 60 \text{ psi}$$

$$\text{Esfuerzo} = 8340 \text{ lb}$$

Determinar el esfuerzo hacia abajo. Esto es el peso de la tubería de revestimiento

$$\text{Peso, lb} = 54,5 \text{ lb/pie} \times 164 \text{ pie} \times 0,8656$$

$$\text{Peso} = 7737 \text{ lb}$$

Determinar la diferencia en esfuerzo, lb

$$\text{Esfuerzo diferencial, lb} = \text{esfuerzo hacia abajo, lb} - \text{esfuerzo hacia arriba, lb}$$

$$\text{Esfuerzo diferencial, lb} = 7737 \text{ lb} - 8430 \text{ lb}$$

$$\text{Esfuerzo diferencial} = - 693 \text{ lb}$$

Por consiguiente, a menos que la tubería de revestimiento esté amarrada o pegada, posiblemente podría moverse hacia arriba por los esfuerzos hidráulicos.

Presión requerida para equilibrar los esfuerzos para evitar que la tubería de revestimiento se mueva hacia arriba por los esfuerzos hidráulicos

$$\text{psi} = 693 \text{ lb} \div 140,5 \text{ pulg. cuad.}$$

$$\text{psi} = 4,9$$

Incremento en el peso del lodo para equilibrar la presión

$$\text{Peso del lodo, ppg} = 4,9 \text{ psi} \div 0,052 \div 164 \text{ pies}$$

$$\text{Peso del lodo} = 0,57 \text{ ppg}$$

Nuevo peso del lodo, ppg

$$\text{Nuevo peso del lodo, ppg} = 8,8 \text{ ppg} + 0,6 \text{ ppg}$$

$$\text{Nuevo peso del lodo} = 9,4 \text{ ppg}$$

Verificar los esfuerzos con el nuevo peso de lodo

$$\begin{aligned} \text{a) } \text{psi/pie} &= (15,8 - 9,4) \times 0,052 \\ \text{psi/pie} &= 0,3328 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } \text{psi} &= 0,3328 \text{ psi/pie} \times 164 \text{ pie} \\ &= 54,58 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } \text{Esfuerzo hacia arriba, lb} &= 54,58 \text{ psi} \times 140,5 \text{ pulg. cuad.} \\ \text{Esfuerzo hacia arriba} &= 7668 \text{ lb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{d) } \text{Esfuerzo diferencial, lb} &= \text{esfuerzo hacia abajo, lb} - \text{esfuerzo hacia arriba, lb} \\ \text{Esfuerzo diferencial, lb} &= 7737 \text{ lb} - 7668 \text{ lb} \\ \text{Esfuerzo diferencial} &= 69 \text{ lb} \end{aligned}$$

Profundidad de un Socavamiento

Método 1

Bombear cal blanda u otro material para taponar por la tubería de perforación y observar cuántas emboladas se requieren antes de que la presión de la bomba se aumente.

$$\text{Profundidad del socavamiento, pie} = \frac{\text{Emboladas requeridas} \times \text{flujo de salida de la bomba, bl/emb.}}{\text{capacidad de la tubería de perforación, bl/pie}}$$

$$\begin{aligned} \text{Ejemplo: Tubería de perforación} &= 3 \frac{1}{2} \text{ pulg.} - 13,3 \text{ lb/pie} \\ \text{capacidad} &= 0,00742 \text{ bl/pie} \\ \text{Flujo de salida de la bomba} &= 0,112 \text{ bl/emb (5 } \frac{1}{2} \text{ pulg. por 14 pulg. duplex @ 90\%} \\ &\quad \text{de eficiencia)} \end{aligned}$$

NOTA: Se observó un incremento en la presión después de 360 emboladas.

$$\text{Profundidad de socavamiento, pie} = 360 \text{ emb} \times 0,112 \text{ bl/emb} \div 0,00742 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Profundidad de socavamiento} = 5434 \text{ pies}$$

Método 2

Bombear algún material que pasará a través del socavamiento, hacia arriba por el espacio anular y a través del colador vibratorio (“shale shaker”). Este material debe ser del tipo que podría ser

fácilmente observado al pasar por el colador vibratorio. Ejemplos: carburo, almidón de maíz, abalorios de vidrio, pintura, etc.

$$\text{Profundidad del socavamiento, pie} = \text{Emboladas requeridas} \times \text{flujo de salida de la bomba, bl/emb.} \div \left(\begin{array}{c} \text{capacidad de la tubería} \\ \text{de perforación, bl/pie} \\ + \\ \text{capacidad anular,} \\ \text{bl/pie} \end{array} \right)$$

Ejemplo: Tubería de perforación = 3 ½ pulg. – 13,3 lb/pie
 capacidad = 0,00742 bl/pie
 Flujo de salida de la bomba = 0,112 bl/emb (5 ½ pulg. por 14 pulg. duplex @ 90% de eficiencia)

Espacio anular
 tamaño del hoyo = 8 ½ pulg.
 capacidad = 0,0583 bl/pie (8 ½ pulg. x 3 ½ pulg.)

NOTA: Se observó que el material bombeado por la tubería de perforación pasó por el colador vibratorio después de 2680 emboladas.

Capacidad de la tubería de perforación más capacidad anular:

$$0,00742 \text{ bl/pie} + 0,0583 \text{ bl/pie} = 0,0657 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Profundidad del socavamiento, pie} = 2680 \text{ emb.} \times 0,112 \text{ bl/emb.} \div 0,0657 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Profundidad del socavamiento} = 4569 \text{ pies}$$

Retornos Perdidos – Pérdida de Sobreequilibrio

Número de pies de agua en el espacio anular

Pies = agua agregada, bl ÷ capacidad anular, bl/pie

Reducción en la presión de fondo (BHP)

$$\text{Reducción en la presión de fondo, psi} = \left(\begin{array}{c} \text{peso de} \\ \text{lodo, ppg} \end{array} - \begin{array}{c} \text{peso de} \\ \text{agua, ppg} \end{array} \right) \times 0,052 \times \left(\begin{array}{c} \text{pies de agua} \\ \text{agregada} \end{array} \right)$$

Peso del lodo equivalente a profundidad total (TD)

$$\text{Peso de lodo equivalente, ppg} = \text{peso del lodo, ppg} - \left(\begin{array}{c} \text{reducción en presión} \\ \text{de fondo, psi} \end{array} \div 0,052 \div \text{TVD, pie} \right)$$

Ejemplo: Peso de lodo = 12,5 ppg
 Peso del agua = 8,33 ppg
 TVD = 10.000 pies
 Capacidad anular = 0,1279 bl/pie (12 ¼ pulg x 5,0 pulg.)

Número de pies de agua en el espacio anular

$$\text{Pies} = 150 \text{ bl} \div 0,1279 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Pies} = 1173$$

Disminución en la presión de fondo (BHP)

$$\text{Disminución en presión de fondo, psi} = (12,5 \text{ ppg} - 8,33 \text{ ppg}) \times 0,052 \times 1173 \text{ pie}$$

$$\text{Disminución en presión de fondo} = 254 \text{ psi}$$

Peso de lodo equivalente a profundidad total (TD)

$$\text{Peso de lodo equivalente, ppg} = 12,5 - (254 \text{ psi} \div 0,052 \div 10.000 \text{ pies})$$

$$\text{Peso de lodo equivalente} = 12,0 \text{ ppg}$$

Cálculos para Tubo Pegado**Determinar los pies de tubo libre y el constante del punto libre****Método 1**

La profundidad a que el tubo está pegado y el número de pies de tubo libre pueden ser estimados utilizando la tabla de estiramiento del tubo presentada a continuación y la siguiente fórmula.

Tabla 2-2
Tabla de Estiramiento del Tubo

Diám. Int. pulg.	Peso Nominal lb/pie	Diám. Int. pulg.	Área de Pared pulg. cuad.	Constante de Estiramiento pulg/1000 lb/1000 pie	Constante del Punto Libre
2-3/8	4,85	1,995	1,304	0,30675	3260,0
	6,65	1,815	1,843	0,21704	4607,7
2-7/8	6,85	2,241	1,812	0,22075	4530,0
	10,40	2,151	2,858	0,13996	7145,0
3-1/2	9,50	2,992	2,590	0,15444	6575,0
	13,30	1,764	3,621	0,11047	9052,5
	15,50	2,602	4,304	0,09294	10760,0
4,0	11,85	3,476	3,077	0,13000	7692,5
	14,00	3,340	3,805	0,10512	9512,5
4-1/2	13,75	3,958	3,600	0,11111	9000,0
	16,60	3,826	4,407	0,09076	11017,5
	18,10	3,754	4,836	0,08271	12090,0
	20,00	3,640	5,498	0,07275	13745,0
5,0	16,25	4,408	4,374	0,09145	10935,0

19,50 4,276 5,275 0,07583 13187,5

Tabla 2-2 (Cont.)

Diám. Int. pulg.	Peso Nominal lb/pie	Diám. Int. pulg.	Área de Pared pulg. cuad.	Constante de Estiramiento pulg/1000 lb/1000 pie	Constante del Punto Libre
5-1/2	21,90	4,778	5,828	0,06863	14570,0
	24,70	4,670	6,630	0,06033	16575,0
6-5/8	25,20	5,965	6,526	0,06129	16315,0

$$\text{Pies de tubo libre} = \frac{\text{estiramiento, pulg.} \times \text{constante del punto libre}}{\text{esfuerzo de tracción en miles de libras}}$$

Ejemplo: Tubería de perforación de 3 ½ pulg, 13,30 lb/pie
20 pulg. de estiramiento con un esfuerzo de tracción de 35.000 lb

De la tabla de estiramiento de tubo:

Constante del punto libre = 9052,5 para tubería de 3 ½ pulg, 13,30 lb/pie

$$\text{Pies de tubo libre} = \frac{20 \text{ pulg.} \times 9052,5}{35}$$

$$\text{Pies de tubo libre} = 5173 \text{ pie}$$

Determinar el constante del punto libre (FPC)

Se puede determinar el constante del punto libre para cualquier tipo de tubería de perforación de acero si se conocen el diámetro externo, pulg., y diámetro interno, pulg.:

$$\text{Constante del punto libre} = A_s \times 25000$$

donde A_s = área transversal de la pared del tubo, pulg. cuad.

Ejemplo 1: De la tabla de estiramiento de la tubería de perforación:
Tubería de perforación de 4 ½ pulg., 16,6 lb/pie – Diámetro interno = 3,826 pulg.

$$\text{Constante del punto libre} = (4,5^2 - 3,826^2 \times 0,7854) \times 2500$$

$$\text{Constante del punto libre} = 4,407 \times 2500$$

$$\text{Constante del punto libre} = 11.017,5$$

Ejemplo 2: Determinar el constante del punto libre y la profundidad a que el tubo está pegado utilizando los siguientes datos:

Tubería de producción de 2-3/8 pulg – 6,5 lb/pie – Diámetro interno = 2,441 pulg
un estiramiento de 25 pulg. con 20.000 lb de esfuerzo de tracción

a) Determinar el constante del punto libre:

$$\text{Constante del punto libre} = (2,875^2 - 2,441^2 \times 0,7854) \times 2500$$

$$\text{Constante del punto libre} = 1,820 \times 2500$$

Constante del punto libre = 4530

b) Determinar la profundidad del tubo pegado:

$$\text{Pies de tubería libre} = \frac{25 \text{ pulg.} \times 4530}{20}$$

Pies de tubería libre = 5663 pies

Método 2

$$\text{Tubería libre, pies} = \frac{735.294 \times e \times Wdp}{\text{tracción diferencial, lb}}$$

donde e = estiramiento de la tubería, pulg.

Wdp = peso de la tubería de perforación, lb/pie (extremo liso)

Peso del extremo liso, lb/pie, es el peso de la tubería de perforación excluyendo las roscas de unión de tubería vástago:

$$\text{Peso, lb/pie} = 2,67 \times \text{diámetro externo de la tubería, pulg.}^2 - \text{diámetro interno de la tubería, pulg.}^2$$

Ejemplo: Determinar los pies de tubería libre utilizando los siguientes datos:
 Tubería de perforación de 5,0 pulg.; diámetro interno – 4,276 pulg.; 19,5 lb/pies
 Estiramiento diferencial de la tubería = 24 pulg.
 Tracción diferencial para obtener el estiramiento = 30.000 lb

$$\text{Peso, lb/pie} = 2,67 \times (5,0^2 - 4,276^2)$$

$$\text{Peso} = 17,93 \text{ lb/pie}$$

$$\text{Tubería libre, pies} = \frac{735.294 \times 24 \times 17,93}{30.000}$$

$$\text{Tubería libre, pies} = 10.547 \text{ pies}$$

Determinar la altura, pie, de fluido “spotting” sin peso agregado que equilibrará la presión de la formación en el espacio anular:

a) Determinar la diferencia en el gradiente de presión, psi/pie, entre el peso del lodo y el fluido “spotting”:

$$\text{psi/pie} = (\text{peso de lodo, ppg} - \text{peso del fluido “spotting”, ppg}) \times 0,052$$

b) Determinar la altura, pie, de fluido “spotting” sin peso agregado que equilibrará la presión de la formación en el espacio anular:

$$\text{Altura, pie} = \frac{\text{cantidad de sobreequilibrio, psi}}{\text{diferencia en gradiente de presión, psi/pie}}$$

Ejemplo: Utilizar los siguientes datos para determinar la altura, pie, del fluido “spotting” que equilibrará la presión de la formación en el espacio anular:

Data: Peso del lodo	= 11,2 ppg
Peso del fluido “spotting”	= 7,0 ppg
Cantidad de sobreequilibrio	= 225,0 psi

a) Diferencia en gradiente de presión, psi/pie:

$$\text{psi/pie} = (11,2 \text{ ppg} - 7,0 \text{ ppg}) \times 0,052$$

$$\text{psi/pie} = 0,2184$$

b) Determinar la altura, pie, del fluido “spotting” sin peso agregado que equilibrará la presión de la formación en el espacio anular:

$$\text{Altura, pie} = 225 \text{ psi} \div 0,2184 \text{ psi/pie}$$

$$\text{Altura} = 1030 \text{ pie}$$

Por consiguiente: Se debe utilizar menos de 1030 pie de fluido “spotting” para mantener un factor de seguridad para evitar una arremetida de presión o reventón.

Cálculos Requeridos para Píldoras de “Spotting”

Se determinarán los siguientes parámetros:

a) Barriles de fluido “spotting” (píldora) requeridos

b) Emboladas requeridas para colocar la píldora

Paso 1

Determinar la capacidad anular, bl/pie, para la tubería de perforación y cuellos de perforación en el espacio anular:

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{D_h, \text{ pulg.}^2 - D_p, \text{ pulg.}^2}{1029,4}$$

Paso 2

Determinar el volumen de píldora requerido en el espacio anular:

$$\text{Vol., bl} = \text{capacidad anular, bl/pie} \times \text{longitud del tramo, pie} \times \text{factor de socavamiento}$$

Paso 3

Determinar el volumen total, bl, del fluido “spotting” (píldora) requerido:

Barriles = barriles requeridos en el espacio anular más barriles que se dejarán en la sarta de perforación

Paso 4

Determinar capacidad de la sarta de perforación, bl:

$$\text{Barriles} = \text{capacidad de la tubería de perforación/cuellos de perforación, bl/pie} \times \text{longitud, pie}$$

Paso 5

Determinar las emboladas requeridas para bombear la píldora:

Emboladas = vol. de la píldora, bl ÷ flujo de salida de la bomba, bl/emb.

Paso 6

Determinar el número de barriles requeridos para seguir la píldora:

Barriles = $\frac{\text{vol. de la sarta de perforación, bl}}{\text{vol. restante en sarta de perforación, bl}}$

Paso 7

Determinar las emboladas requeridas para seguir la píldora:

Emboladas = $\frac{\text{bl requeridos para seguir la píldora}}{\text{flujo de salida de la bomba, bl/emb}}$ + emboladas requeridas para desplazar sistema en superficie

Paso 8

Total de emboladas requeridas para colocar la píldora:

Total de emboladas = emboladas requeridas para bombear la píldora + emboladas requeridas para seguir la píldora

Ejemplo: Los cuellos de perforación están pegados diferencialmente. Utilizar los siguientes datos para colocar una píldora a base de aceite alrededor de los cuellos de perforación más 200 pies (opcional) por encima de los cuellos. Se debe dejar 24 bl en la sarta de perforación:

Datos: Profundidad del pozo	= 10.000 pies
Diámetro del hoyo	= 8 ½ pulg
Factor de socavamiento	= 20%
Tubería de perforación	= 5,0 pulg – 19,5 lb/pie
capacidad	= 0,01776 bl/pie
longitud	= 9400 pies
Cuellos de perforación	= 6 ½ pulg. diámetro externo x 2 ½ pulg. diámetro interno
capacidad	= 0,0061 bl/pie
longitud	= 600 pies
Flujo de salida de la bomba	= 0,117 bl/emb.

Emboladas requeridas para desplazar el sistema en la superficie desde el tanque de succión hasta la tubería de perforación = 80 emb.

Paso 1

Capacidad anular alrededor de la tubería de perforación y cuellos de perforación:

a) Capacidad anular alrededor de los cuellos de perforación:

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{8,5^2 - 6,5^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,02914 \text{ bl/pie}$$

b) Capacidad anular alrededor de la tubería de perforación:

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{8,5^2 - 5,0^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad anular} = 0,0459 \text{ bl/pie}$$

Paso 2

Determinar el volumen total de píldora requerida en el espacio anular:

a) Volumen enfrente de cuellos de perforación:

$$\text{Vol., bl} = 0,02914 \text{ bl/pie} \times 600 \text{ pie} \times 1,20$$

$$\text{Vol.} = 21,0 \text{ bl}$$

b) Volumen enfrente de la tubería de perforación:

$$\text{Vol., bl} = 0,0459 \text{ bl/pie} \times 200 \text{ pie} \times 120$$

$$\text{Vol.} = 11,0 \text{ bl}$$

c) Volumen total, bl, requerido en espacio anular:

$$\text{Vol., bl} = 21,0 \text{ bl} + 11,0 \text{ bl}$$

$$\text{Vol.} = 32,0 \text{ bl}$$

Paso 3

Número total de bl de fluido “spotting” (píldora) requerido:

$$\text{Barriles} = 32,0 \text{ bl (espacio anular)} + 24,0 \text{ bl (tubería de perforación)}$$

$$\text{Barriles} = 56 \text{ bl}$$

Paso 4

Determinar la capacidad de la sarta de perforación:

a) Capacidad del cuello de perforación, bl:

$$\text{Capacidad, bl} = 0,0062 \text{ bl/pie} \times 600 \text{ pie}$$

$$\text{Capacidad} = 3,72 \text{ bl}$$

b) Capacidad de la tubería de perforación, bl:

$$\text{Capacidad, bl} = 0,01776 \text{ bl/pie} \times 9400 \text{ pie}$$

$$\text{Capacidad} = 166,94 \text{ bl}$$

c) Capacidad total de la sarta de perforación:

$$\text{Capacidad, bl} = 3,72 \text{ bl} + 166,94 \text{ bl}$$

$$\text{Capacidad} = 170,6 \text{ bl}$$

Paso 5

Determinar las emboladas requeridas para bombear la píldora:

$$\text{Emboladas} = 56 \text{ bl} \div 0,117 \text{ bl/emb.}$$

$$\text{Emboladas} = 479$$

Paso 6

Determinar bl requeridos para seguir la píldora:

$$\text{Barriles} = 170,6 \text{ bl} - 24 \text{ bl}$$

$$\text{Barriles} = 146,6$$

Paso 7

Determinar las emboladas requeridas para seguir la píldora:

$$\text{Emboladas} = 146,6 \text{ bl} \div 0,117 \text{ bl/emb} + 80 \text{ emb}$$

$$\text{Emboladas} = 1333$$

Paso 8

Determinar las emboladas requeridas para colocar la píldora:

$$\text{Total de emboladas} = 479 + 1333$$

$$\text{Total de emboladas} = 1812$$

Presión Requerida para Romper la Circulación

Presión requerida para superar el esfuerzo gel del lodo dentro de la sarta de perforación

$$\text{Pgs} = (y \div 300 \div d) L$$

donde Pgs = presión requerida para superar el esfuerzo gel, psi

y = 10 min de esfuerzo gel del fluido de perforación, lb/100 pies cuadrados

d = diámetro interno de la tubería de perforación, pulgadas
 L = longitud de la sarta de perforación, pies

Ejemplo:

y = 10 lb/100 pies cuad.

d = 4,276 pulgadas

L = 12.000 pies

Pgs = $(10 \div 300 \div 4,276) \times 12.000$ pies

Pgs = $0,007795 \times 12.000$ pies

Pgs = 93,5 psi

Por consiguiente, se requeriría aproximadamente 94 psi para romper la circulación.

Presión requerida para superar el esfuerzo gel del lodo dentro del espacio anular

$Pgs = y \div [300 (Dh, \text{ pulg.} - Dp, \text{ pulg.})] \times L$

donde Pgs = presión requerida para superar el esfuerzo gel, psi

L = longitud de la sarta de perforación, pies

y = 10 min de esfuerzo gel del fluido de perforación, lb/100 pies cuadrados

Dh = diámetro del hoyo, pulgadas

Dp = diámetro de la tubería, pulgadas

Ejemplo: L = 12.000 pies

y = 10 lb/100 pies cuad.

Dh = 12 ¼ pulgadas

Dp = 5,0 pulgadas

Pgs = $10 \div [300 \times (12,25 - 5,0)] \times 12.000$ pie

Pgs = $10 \div 2175 \times 12.000$ pie

Pgs = 55,2 psi

Por consiguiente, se requeriría aproximadamente 55 psi para romper la circulación.

Referencias

API Specification for Oil-Well Cements and Cement Additives, American Petroleum Institute, New York, N.Y., 1972.

Chenevert, Martin E. y Reuven Hollo, *TI-59 Drilling Engineering Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1981.

Crammer Jr., John L., *Basic Drilling Engineering Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1983.

Drilling Manual, International Association of Drilling Contractors, Houston, Texas, 1982.

Murchison, Bill, *Murchison Drilling Schools Operations Drilling Technology and Well Control Manual*, Albuquerque, New Mexico.

Oil-Well Cements and Cement Additives, API Specification 10A, Diciembre de 1979.

CAPÍTULO TRES

FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Aumentar la Densidad del Lodo

**Aumento del peso del lodo, ppg, con barita
(gravedad específica promedia de barita – 4,2)**

$$\text{Barita, sacos/100 bl} = \frac{1470 (W_2 - W_1)}{35 - W_2}$$

Ejemplo: Determinar el número de sacos de barita requeridos para aumentar la densidad de 100 bl de lodo de 12,0 ppg (W_1) a 14,0 ppg (W_2):

$$\text{Barita, sacos/100 bl} = \frac{1470 (14,0 - 12,0)}{35 - 14,0}$$

$$\text{Barita, sacos/100 bl} = \frac{2940}{21,0}$$

$$\text{Barita} = 140 \text{ sacos/100 bl}$$

Aumento del volumen, bl, debido al incremento en el peso del lodo con barita

$$\text{Aumento del volumen, por 100/bl} = \frac{100 (W_2 - W_1)}{35 - W_2}$$

Ejemplo: Determinar el aumento del volumen al incrementar la densidad de 12,0 ppg (W_1) a 14,0 ppg (W_2):

$$\text{Aumento del volumen, por 100/bl} = \frac{100 (14,0 - 12,0)}{35 - 14,0}$$

$$\text{Aumento del volumen, por 100/bl} = \frac{200}{21}$$

$$\text{Aumento del volumen} = 9,52 \text{ bl por 100 bl}$$

Volumen inicial, bl, del peso de lodo original requerido para lograr un volumen final determinado del peso de lodo deseado con barita

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{V_F (35 - W_2)}{35 - W_1}$$

Ejemplo: Determinar el volumen inicial, bl, de lodo de 12,0 ppg (W_1) requerido para lograr 100 bl (V_F) de lodo de 14,0 ppg (W_2) con barita:

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{100 (35 - 14,0)}{35 - 12,0}$$

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{2100}{23}$$

$$\text{Volumen inicial} = 91,3 \text{ bl}$$

Aumento del peso de lodo con carbonato de calcio (gravedad específica – 2,7)

NOTA: El máximo peso de lodo práctico que se puede lograr con carbonato de calcio es 14,0 ppg.

$$\text{Sacos/100 bl} = \frac{945 (W_2 - W_1)}{22,5 - W_2}$$

Ejemplo: Determinar el número de sacos de carbonato de calcio/100 bl requeridos para aumentar la densidad de 12,0 ppg (W_1) a 13,0 ppg (W_2):

$$\text{Sacos/100 bl} = \frac{945 (13,0 - 12,0)}{22,5 - 13,0}$$

$$\text{Sacos/100 bl} = \frac{945}{9,5}$$

$$\text{Sacos/100 bl} = 99,5$$

Aumento del volumen, bl, debido al incremento en el peso de lodo con carbonato de calcio

$$\text{Aumento de volumen, por100/bl} = \frac{100 (W_2 - W_1)}{22,5 - W_2}$$

Ejemplo: Determinar el aumento de volumen, bl/100 bl, al incrementar la densidad de 12,0 ppg (W_1) a 13,0 ppg (W_2):

$$\text{Aumento de volumen, por100/bl} = \frac{100 (13,0 - 12,0)}{22,5 - 13,0}$$

$$\text{Aumento de volumen, por100/bl} = \frac{100}{9,5}$$

$$\text{Aumento de volumen} = 10,53 \text{ bl por 100 bl}$$

Volumen inicial, bl, del peso de lodo original requerido para obtener un volumen final predeterminado del peso de lodo deseado con carbonato de calcio

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{V_F (22,5 - W_2)}{22,5 - W_1}$$

Ejemplo: Determinar el volumen inicial, bl, de lodo de 12,0 ppg (W_1) requerido para lograr 100 bl (V_F) de lodo de 13,0 ppg (W_2) con carbonato de calcio:

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{100 (22,5 - 13,0)}{22,5 - 12,0}$$

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{950}{10,5}$$

$$\text{Volumen inicial} = 90,5 \text{ bl}$$

Aumento del peso de lodo con hematita (gravedad específica – 4,8)

$$\text{Hematita, sacos/100 bl} = \frac{1680 (W_2 - W_1)}{40 - W_2}$$

Ejemplo: Determinar la cantidad de hematita, sacos/100 bl requeridos para aumentar la densidad de 100 bl de 12,0 ppg (W_1) a 14,0 ppg (W_2):

$$\text{Hematita, sacos/100 bl} = \frac{1680 (14,0 - 12,0)}{40 - 14,0}$$

$$\text{Hematita, sacos/100 bl} = \frac{3360}{26}$$

$$\text{Hematita,} = 129,2 \text{ sacos/100 bl}$$

Aumento del volumen, bl, debido al incremento en el peso de lodo con hematita

$$\text{Aumento de volumen, por 100/bl} = \frac{100 (W_2 - W_1)}{40 - W_2}$$

Ejemplo: Determinar el aumento de volumen, bl/100 bl, al incrementar la densidad de 12,0 ppg (W_1) a 14,0 ppg (W_2):

$$\text{Aumento de volumen, por 100/bl} = \frac{100 (14,0 - 12,0)}{40 - 14,0}$$

$$\text{Aumento de volumen, por 100/bl} = \frac{200}{26}$$

$$\text{Aumento de volumen} = 7,7 \text{ bl por 100 bl}$$

Volumen inicial, bl, del peso de lodo original requerido para obtener un volumen final predeterminado del peso de lodo deseado con hematita

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{V_F (40 - W_2)}{40 - W_1}$$

Ejemplo: Determinar el volumen inicial, bl, de lodo de 12,0 ppg (W_1) requerido para lograr 100 bl (V_F) de lodo de 14,0 ppg (W_2) con carbonato de calcio:

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{100 (40 - 14,0)}{40 - 12,0}$$

$$\text{Volumen inicial, bl} = \frac{2600}{28}$$

$$\text{Volumen inicial} = 92,9 \text{ bl}$$

Dilución

Reducción del peso de lodo con agua

$$\text{Agua, bl} = \frac{V_1 (W_1 - W_2)}{W_2 - D_W}$$

Ejemplo: Determinar el número de barriles de agua con un peso de 8,33 ppg (D_W) requeridos para reducir 100 bl (V_1) de lodo de 14,0 ppg (W_1) a 12,0 ppg (W_2):

$$\text{Agua, bl} = \frac{100 (14,0 - 12,0)}{12,0 - 8,33}$$

$$\text{Agua, bl} = \frac{200}{3,67}$$

$$\text{Agua} = 54,5 \text{ bl}$$

Reducción del peso de lodo con diesel

$$\text{Diesel, bl} = \frac{V_1 (W_1 - W_2)}{W_2 - D_W}$$

Ejemplo: Determinar el número de barriles de diesel con un peso de 7,0 ppg (D_W) requeridos para reducir 100 bl (V_1) de lodo de 14,0 ppg (W_1) a 12,0 ppg (W_2):

$$\text{Diesel, bl} = \frac{100 (14,0 - 12,0)}{12,0 - 7,0}$$

$$\text{Diesel, bl} = \frac{200}{5,0}$$

$$\text{Diesel} = 40 \text{ bl}$$

Mezclar Fluidos de Diferentes Densidades

$$\text{Fórmula: } (V_1 D_1) + (V_2 D_2) = V_F D_F$$

donde V_1 = volumen del fluido 1 (bl, gal, etc.)
 D_1 = densidad del fluido 1 (ppg, lb/pie³)
 V_2 = volumen del fluido 2 (bl, gal, etc.)
 D_2 = densidad del fluido 2 (ppg, lb/pie³)
 V_F = volumen de la mezcla final de fluidos
 D_F = densidad de la mezcla final de fluidos

Ejemplo 1: Se aplica un límite en el volumen deseado:

Determinar el volumen de lodo de 11,0 ppg y lodo de 14,0 ppg requerido para obtener 300 bl de lodo de 11,5 ppg:

Dado: 400 bl de lodo de 11,0 ppg a mano, y
 400 bl de lodo de 14,0 ppg a mano

Solución: Si V_1 = bl de lodo de 11,0 ppg
 V_2 = bl de lodo de 14,0 ppg

entonces a) $V_1 + V_2 = 300 \text{ bl}$
 b) $(11,0)V_1 + (14,0)V_2 = (11,5)(300)$

Multiplicar Ecuación A por la densidad del peso de lodo más bajo ($D_1 = 11,0 \text{ ppg}$) y sustraer el resultado de Ecuación B.

$$\begin{array}{r} \text{b) } (11,0)(V_1) + (14,0)(V_2) = 3450 \\ - \text{a) } (11,0)(V_1) + (11,0)(V_2) = 3300 \\ \hline 0 \qquad (3,0)(V_2) = 150 \\ 3 V_2 = 150 \end{array}$$

$$V_2 = \frac{150}{3}$$

$$V_2 = 50$$

Por consiguiente: $V_2 = 50 \text{ bl de lodo de } 14,0 \text{ ppg}$
 $V_1 + V_2 = 300 \text{ bl}$
 $V_1 = 300 - 50$
 $V_1 = 250 \text{ bl de lodo de } 11,0 \text{ ppg}$

Verificar: $V_1 = 250 \text{ bl}$
 $D_1 = 11,0 \text{ ppg}$
 $V_2 = 50 \text{ bl}$
 $D_2 = 14,0 \text{ ppg}$

$$\begin{aligned}
 V_F &= 300 \text{ bl} \\
 D_F &= \text{Densidad final, ppg} \\
 (50)(14,0) + (250)(11,0) &= 300D_F \\
 700 + 2750 &= 300D_F \\
 3450 &= 300D_F \\
 3450 \div 300 &= D_F \\
 11,5 \text{ ppg} &= D_F
 \end{aligned}$$

Ejemplo 2: No se aplicará ningún límite en el volumen:

Determinar la densidad y volumen al mezclar los siguientes dos lodos:

Dado: 400 bl de lodo de 11,0 ppg, y
400 bl de lodo de 14,0 ppg

Solución: Si V_1 = bl de lodo de 11,0 ppg
 D_1 = densidad de lodo de 11,0 ppg
 V_2 = bl de lodo de 14,0 ppg
 D_2 = densidad de lodo de 14,0 ppg
 V_F = volumen final, bl
 D_F = densidad final, ppg

Fórmula: $(V_1 D_1) + (V_2 D_2) = V_F D_F$

$$\begin{aligned}
 (400)(11,0) + (200)(14,0) &= 800D_F \\
 4400 + 2800 &= 800D_F \\
 7200 &= 800D_F \\
 7200 \div 800 &= D_F \\
 9,0 \text{ ppg} &= D_F
 \end{aligned}$$

Por consiguiente: volumen final = 800 bl
densidad final = 9,0 ppg

Cálculos para Lodo a Base de Aceite

Densidad de mezcla de petróleo-agua utilizada

$$(V_1)(D_1) + (V_2)(D_2) = (V_1 + V_2)D_F$$

Ejemplo: Si la relación aceite-agua es 75/25 (75% aceite, V_1 , y 25% agua, V_2), existe el siguiente balance de materiales:

NOTA: El peso de diesel, $D_1 = 7,0$ ppg
El peso de agua, $D_2 = 8,33$ ppg

$$\begin{aligned}
 (0,75)(7,0) + (0,25)(8,33) &= (0,75) + (0,25) \\
 5,25 + 2,0825 &= 1,0 D_F \\
 7,33 &= D_F
 \end{aligned}$$

Por consiguiente: la densidad de la mezcla de aceite/agua = 7,33 ppg

Volumen inicial del líquido (aceite más agua) requerido para preparar un volumen deseado de lodo

$$SV = \frac{35 - W_2}{35 - W_1} \times DV$$

donde SV = volumen inicial, bl

W_1 = densidad inicial de la mezcla de aceite/agua, ppg

W_2 = densidad deseada, ppg

DV = volumen deseado, bl

Ejemplo: $W_1 = 7,33$ ppg (relación aceite-agua = 75/25)

W_2 = densidad deseada, ppg

$D_v = 100$ bl

Solución:

$$SV = \frac{35 - 16}{35 - 7,33} \times 100$$

$$SV = \frac{19}{27,67} \times 100$$

$$SV = 0,68666 \times 100$$

$$SV = 68,7 \text{ bl}$$

Relación agua/aceite utilizando datos de retorta

Obtener el porcentaje por volumen de aceite y porcentaje por volumen utilizando el análisis de retorta o análisis de lodo. Utilizando los datos obtenidos, se calcula la relación aceite-agua en la siguiente manera:

$$a) \quad \begin{array}{l} \% \text{ aceite en} \\ \text{fase líquida} \end{array} = \frac{\% \text{ por vol. de aceite}}{\% \text{ por vol. de aceite} + \% \text{ por vol. de agua}} \times 100$$

$$b) \quad \begin{array}{l} \% \text{ agua en} \\ \text{fase líquida} \end{array} = \frac{\% \text{ por vol. de agua}}{\% \text{ por vol. de aceite} + \% \text{ por vol. de agua}} \times 100$$

c) Resultado: Se expresa la relación aceite-agua como el por ciento de aceite y el por ciento de agua.

Ejemplo: Análisis de retorta: % por volumen de aceite = 51

% por volumen de agua = 17

% por volumen de sólidos = 32

Solución: a) % de aceite en fase líquida = $\frac{51}{51 + 17} \times 100$

% de aceite en fase líquida = 75

b) % de agua en fase líquida = $\frac{17}{51 + 17} \times 100$

% de agua en fase líquida = 25

- c) Resultado: Por consiguiente, se expresa la relación aceite - agua como 75/25; 75% aceite y 25% agua.

Cambiar la relación aceite – agua

NOTA: Si se desea aumentar la relación aceite - agua, se debe agregar aceite; si se desea reducirla, se debe agregar agua.

Análisis de retorta: % por volumen de aceite = 51
 % por volumen de agua = 17
 % por volumen de sólidos = 32

La relación aceite – agua es 75/25.

Ejemplo 1: Aumentar la relación de aceite - agua a 80/20:

En 100 bl de este lodo, hay 68 bl de líquido (aceite más agua). Para aumentar la relación aceite – agua es necesario agregar aceite. El volumen líquido total será aumentado por el volumen del aceite agregado pero el volumen de agua no cambiará. Ahora los 17 bl de agua en el lodo representan el 25% del volumen líquido pero solamente representarán el 20% del nuevo volumen líquido.

Por consiguiente: Si x = volumen líquido final

$$\begin{aligned} \text{entonces} \quad 0,20 x &= 17 \\ x &= 17 \div 0,20 \\ x &= 85 \text{ bl} \end{aligned}$$

El nuevo volumen líquido = 85 bl

Barriles de aceite a agregar:

Aceite, bl = nuevo volumen líquido – volumen líquido original

Aceite, bl = 85 – 68

Aceite = 17 bl de aceite para cada 100 bl de lodo

Verificar los cálculos. Si se agrega la cantidad calculada de líquido, ¿qué será la relación aceite – agua resultante?

$$\% \text{ aceite en fase líquida} = \frac{\text{vol. original de aceite} + \text{nuevo vol. de aceite}}{\text{vol. líquido original} + \text{nuevo vol. líquido}} \times 100$$

$$\% \text{ aceite en fase líquida} = \frac{51 + 17}{68 + 17} \times 100$$

$$\% \text{ aceite en fase líquida} = 80$$

% de agua sería: $100 - 80 = 20$

Por consiguiente: La nueva relación aceite – agua sería 80/20

Ejemplo 2: Cambiar la relación aceite – agua a 70/30:

Igual como en el Ejemplo 1, hay 68 bl de líquido en 100 bl de este lodo. Sin embargo, en este caso se agregará agua y el volumen de aceite permanecerá constante. Los 51 bl de aceite representa el 75% del volumen líquido original y el 70% del volumen final:

Por consiguiente: Si x = volumen líquido final

$$\begin{aligned} \text{entonces} \quad 0,70 x &= 51 \\ x &= 51 \div 0,70 \\ x &= 73 \text{ bl} \end{aligned}$$

El nuevo volumen líquido = 73 bl

No. de barriles de agua a agregar:

Agua, bl = nuevo vol. líquido – vol. líquido original

$$\text{Agua, bl} = 73 - 68$$

Agua = 5 bl de agua para cada 100 bl de lodo

Verificar los cálculos. Si se agrega la cantidad calculada de agua, ¿qué será la relación aceite – agua resultante?

$$\% \text{ agua en fase líquida} = \frac{17 + 5}{68 + 5} \times 100$$

$$\% \text{ agua en fase líquida} = 30$$

$$\% \text{ aceite en fase líquida} = 100 - 30 = 70$$

Por consiguiente, la nueva relación aceite – agua sería 70/30.

Análisis de Sólidos

Cálculos para el análisis de sólidos

NOTA: Se realizan los Pasos 1 al 4 en lodos con altos contenidos de sal. Para lodos con un bajo contenido de cloruro se debe comenzar con el Paso 5.

Paso 1

Porcentaje por volumen de agua salada (SW)

$$\text{SW} = (5,88 \times 10^{-8}) \times [(\text{ppm Cl})^{1,2} + 1] \times \% \text{ por vol. de agua}$$

Paso 2

Porcentaje por volumen de sólidos suspendidos (SS)

$$\text{SS} = 100 - \% \text{ por vol. de aceite} - \% \text{ por vol. de SW}$$

Paso 3

Gravedad específica promedio del agua salada (ASG_{sw})

$$\text{ASG}_{sw} = (\text{ppm Cl})^{0,95} \times (1,94 \times 10^{-6}) + 1$$

Paso 4

Gravedad específica promedia de sólidos (ASG)

$$ASG = \frac{(12 \times MW) - (\% \text{ por vol. de SW} \times ASG_{sw}) - (0,84 \times \% \text{ por vol. de aceite})}{SS}$$

Paso 5

Gravedad específica promedia de sólidos (ASG)

$$ASG = \frac{(12 \times MW) - \% \text{ por vol. de agua} - \% \text{ por vol. de aceite}}{\% \text{ por vol. de sólidos}}$$

Paso 6

Porcentaje por volumen de sólidos de baja gravedad (LGS)

$$LGS = \frac{\% \text{ por volumen de sólidos} \times (4,2 - ASG)}{1,6}$$

Paso 7

Porcentaje por volumen de barita

Barita, % por vol. = % por vol. de sólidos - % por vol. de LGS

Paso 8

Libras por barril de barita

Barita, lb/bl = % por vol. de barita x 14,71

Paso 9

Determinación de bentonita

Si se CONOCE la capacidad para el intercambio de cationes (CEC)/prueba de azul de metileno:

$$a) \text{ Bentonita, lb/bl} = \frac{1}{1 - \left[\frac{S}{65} \right]} \times \left[M - 9 \times \frac{S}{65} \right] \times \% \text{ por vol. de LGS}$$

donde S = CEC de arcilla

M = CEC del lodo

b) Bentonita, % por vol.:

$$\text{Bent., \% por vol.} = \text{bentonita, lb/bl} \div 9,1$$

Si se DESCONOCE la capacidad para el intercambio de cationes (CEC)/prueba de azul de metileno:

$$a) \text{ Bentonita, \% por vol.} = \frac{M - \% \text{ por volumen de LGS}}{8}$$

donde M = CEC del lodo

b) Bentonita, lb/bl = bentonita, % por vol. x 9,1

Paso 10

Sólidos perforados, % por volumen

Sólidos perforados, % por volumen = LGS, % por vol. – bent, % por vol.

Paso 11

Sólidos perforados, lb/bl

Sólidos perforados, lb/bl = sólidos perforados, % por vol. x 9,1

<i>Ejemplo:</i>	Peso del lodo	= 16,0 ppg
	Cloruros	= 73.000 ppm
	CEC del lodo	= 30 lb/bl
	CEC de arcilla	= 7 lb/bl
	Análisis de Retorta:	
	agua	= 57,0 % por volumen
	aceite	= 7,5 % por volumen
	sólidos	= 35,5 % por volumen

1. Porcentaje por volumen de agua salada (SW):

$$SW = [(5,88 \times 10^{-8})(73.000)^{1,2} + 1] \times 57$$

$$SW = [(5,88^{-8} \times 685468,39) + 1] \times 57$$

$$SW = (0,0403055 + 1) \times 57$$

$$SW = 59,2974 \text{ por ciento por volumen}$$

2. Porcentaje por volumen de sólidos suspendidos (SS)

$$SS = 100 - 7,5 - 59,2974$$

$$SS = 33,2026 \text{ por ciento por volumen}$$

3. Gravedad específica promedia de agua salada (ASG_{sw})

$$ASG_{sw} = [(73.000)^{0,95} (1,94 \times 10^{-6})] + 1$$

$$ASG_{sw} = (41.701,984 \times 1,94^{-6}) + 1$$

$$ASG_{sw} = 0,0809018 + 1$$

$$ASG_{sw} = 1,0809$$

4. Gravedad específica promedia de sólidos (ASG)

$$ASG = \frac{(12 \times 16) - (59,2974 \times 1,0809) - (0,84 \times 7,5)}{33,2026}$$

$$\text{ASG} = \frac{121,60544}{33,2026}$$

$$\text{ASG} = 3,6625$$

5. Dado que el ejemplo incluye un alto contenido de cloruros, se omite el Paso 5.

6. Porcentaje por volumen de sólidos de baja gravedad (LGS)

$$\text{LGS} = \frac{33,2026 \times (4,2 - 3,6625)}{1,6}$$

$$\text{LGS} = 11,154 \text{ por ciento por volumen}$$

7. Por ciento por volumen de barita

$$\text{Barita, \% por volumen} = 33,2026 - 11,154$$

$$\text{Barita} = 22,0486 \% \text{ por volumen}$$

8. Barita, lb/bl

$$\text{Barita, lb/bl} = 22,0486 \times 14,71$$

$$\text{Barita} = 324,3349 \text{ lb/bl}$$

9. Determinación de bentonita

$$\text{a) Bentonita, lb/bl} = \frac{1}{1 - \left(\frac{7}{65}\right)} \times 30 - 9 \times \frac{7}{65} \times 11,154$$

$$\text{Bentonita, lb/bl} = 1,1206897 \times 2,2615385 \times 11,154$$

$$\text{Bentonita, lb/bl} = 28,26865 \text{ lb/bl}$$

b) Bentonita, % por volumen

$$\text{Bentonita, \% por volumen} = 28,2696 \div 9,1$$

$$\text{Bentonita} = 3,10655 \% \text{ por volumen}$$

10. Sólidos perforados, por ciento por volumen

$$\text{Sólidos perforados, \% por volumen} = 11,154 - 3,10655$$

$$\text{Sólidos perforados} = 8,047 \% \text{ por volumen}$$

11. Sólidos perforados, libras por barril

Sólidos perforados, lb/bl = $8,047 \times 9,1$

Sólidos perforados = $73,2277$ lb/bl

Fracciones de Sólidos

Fracciones de sólidos máximas recomendadas

$$SF = (2,917 \times MW) - 14,17$$

Sólidos de baja gravedad (LGS) máximos recomendados

$$LGS = \left\{ \frac{SF}{100} - [0,3125 \times \left(\frac{MW}{8,33} - 1 \right)] \right\} \times 200$$

donde SF = fracciones de sólidos máximas recomendadas, % por volumen

MW = peso del lodo, ppg

LGS = sólidos de baja gravedad máximos recomendados, % por volumen

Ejemplo: Peso del lodo = $14,0$ ppg

Determinar: Sólidos máximos recomendados, % por volumen

Fracción de sólidos de baja gravedad, % por volumen

Fracciones de sólidos máximas recomendadas (SF), % por volumen

$$SF = (2,917 \times 14,0) - 14,17$$

$$SF = 40,838 - 14,17$$

$$SF = 26,67 \text{ \% por volumen}$$

Sólidos de baja gravedad (LGS), % por volumen:

$$LGS = \left\{ \frac{26,67}{100} - [0,3125 \times \left(\frac{14,0}{8,33} - 1 \right)] \right\} \times 200$$

$$LGS = 0,2667 - (0,3125 \times 0,6807) \times 200$$

$$LGS = (0,2667 - 0,2127) \times 200$$

$$LGS = 0,054 \times 200$$

$$LGS = 10,8 \text{ \% por volumen}$$

Dilución del Sistema de Lodo

$$V_{wm} = \frac{V_m (F_{ct} - F_{cop})}{F_{cop} - F_{ca}}$$

donde V_{wm} = barriles de agua o lodo de dilución requeridos

V_m = barriles de lodo en sistema de circulación

Fct = por ciento de sólidos de baja gravedad en sistema

Fcop = por ciento de sólidos de baja gravedad óptimos totales deseados

Fca = por ciento de sólidos de baja gravedad (bentonita y/o químicos agregados)

Ejemplo: 1000 bl de lodo en sistema. LGS total = 6%. Reducir los sólidos al 4%. Diluir con agua.

$$V_{wm} = \frac{1000 (6 - 2)}{4}$$

$$V_{wm} = \frac{2000}{4}$$

$$V_{wm} = 500 \text{ bl}$$

Si se realiza la dilución con una lechada de bentonita del 2% el total sería:

$$V_{wm} = \frac{1000 (6 - 4)}{4 - 2}$$

$$V_{wm} = \frac{2000}{2}$$

$$V_{wm} = 1000 \text{ bl}$$

Desplazamiento – Barriles de Agua/Lechada Requeridos

$$V_{wm} = \frac{V_m (F_{ct} - F_{cop})}{F_{ct} - F_{ca}}$$

donde V_{wm} = barriles de lodo que será utilizados para perforar (“jetted”) y agua o lechada que se debe agregar para mantener un volumen constante de circulación.

Ejemplo: 1000 bl en sistema de lodo. LGS total = 6%. Reducir los sólidos al 4%:

$$V_{wm} = \frac{1000 (6 - 4)}{6}$$

$$V_{wm} = \frac{2000}{6}$$

$$V_{wm} = 333 \text{ bl}$$

Si se realiza el desplazamiento agregando una lechada de bentonita del 2%, el volumen total sería:

$$V_{wm} = \frac{1000 (6 - 4)}{6 - 2}$$

$$V_{wm} = \frac{2000}{4}$$

$$V_{wm} = 500 \text{ bl}$$

Evaluación del Hidrociclón

Determinar la masa de sólidos (para un lodo sin peso agregado) y el volumen de agua eliminado por un cono de un hidrociclón (desarenador o eliminador de lodo):

Volumen de fracción de sólidos (SF):

$$SF = \frac{MW - 8,22}{13,37}$$

Gasto másico de sólidos (MS):

$$MS = 19.530 \times SF \times \frac{V}{T}$$

Gasto volumétrico de agua (WR)

$$WR = 900 (1 - SF) \frac{V}{T}$$

donde SF = porcentaje de fracciones de sólidos
 MW = densidad promedio del lodo eliminado, ppg
 MS = gasto másico de sólidos eliminados por un cono de un hidrociclón, lb/hora
 V = volumen de muestra de lechada recolectada, cuartillos
 T = tiempo tomado para recolectar muestra de lechada, segundos
 WR = volumen de agua expulsada por un cono de un hidrociclón, gal/hora

Ejemplo: Peso promedio de muestra de lechada recolectada = 16 ppg
 Muestra recolectada en 45 segundos
 Volumen de lechada en muestra recolectada = 2 cuartillos

a) Volumen de fracciones de sólidos:

$$SF = \frac{16,0 - 8,22}{13,37}$$

$$SF = 0,5737$$

b) Gasto másico de sólidos:

$$MS = 19.530 \times 0,5737 \times \frac{2}{45}$$

$$MS = 11.204,36 \times 0,0444$$

$$MS = 497,97 \text{ lb/hora}$$

c) Gasto volumétrico de agua:

$$WR = 900 (1 - 0,5737) \frac{2}{45}$$

$$WR = 900 \times 0,4263 \times 0,0444$$

$$WR = 17,0 \text{ gal/hora}$$

Evaluación de Centrífuga

a) Volumen de lodo del subdesbordamiento (“underflow”):

$$QU = \frac{[QM \times (MW - PO)] - [QW \times (PO - PW)]}{PU - POE}$$

b) Fracción de lodo viejo en subdesbordamiento:

$$FU = \frac{35 - PU}{35 - MW + \left(\frac{QW}{QM}\right) \times (35 - PW)}$$

c) Gasto másico de arcilla:

$$QC = \frac{CC \times [QM - (QU \times FU)]}{42}$$

d) Gasto másico de aditivos:

$$QD = \frac{CC \times [QM - (QU \times FU)]}{42}$$

e) Caudal de agua hacia la presa de mezclar:

$$QP = \frac{[QM \times (35 - MW)] - [QU \times (35 - PU)] - (0,6129 \times QC) - (0,6129 \times QD)}{35 - PW}$$

f) Gasto másico para barita de API:

$$QB = QM - QU - QP - \frac{QC}{21,7} - \frac{QD}{21,7} \times 35$$

donde MW = densidad del lodo hacia la centrífuga, ppg
 QM = volumen de lodo hacia la centrífuga, gal/min
 PW = densidad de agua de dilución, ppg
 QW = volumen de agua de dilución, gal/min
 PU = densidad del lodo del subdesbordamiento, ppg
 PO = densidad del lodo de desbordamiento, ppg
 CC = contenido de arcilla en lodo, lb/bl
 CD = contenido de aditivos en lodo, lb/bl
 QU = volumen de lodo de subdesbordamiento, gal/min
 FU = fracción de lodo viejo en subdesbordamiento
 QC = gasto másico de arcilla, lb/min
 QD = gasto másico de aditivos, lb/min
 QP = caudal de agua hacia la presa de mezclar, gal/min
 QB = gasto másico de barita de API, lb/min

<i>Ejemplo:</i>	Densidad de lodo hacia la centrífuga (MW)	= 16,2 ppg
	Volumen de lodo hacia la centrífuga (QM)	= 16,5 gal/min
	Densidad del agua de dilución (PW)	= 8,34 ppg
	Volumen del agua de dilución (QW)	= 10,5 gal/min
	Densidad de lodo de subdesbordamiento (PU)	= 23,4 ppg
	Densidad de lodo de desbordamiento (PO)	= 9,3 ppg

Contenido de arcilla del lodo (CC)	= 22,5 lb/bl
Contenido de aditivos del lodo (CD)	= 6 lb/bl

Determinar: Caudal del subdesbordamiento
 Fracción de volumen del lodo viejo en subdesbordamiento
 Gasto másico de arcilla hacia la presa de mezclar
 Gasto másico de aditivos hacia la presa de mezclar
 Caudal de agua hacia la presa de mezclar
 Gasto másico de barita de API hacia presa de mezclar

a) Volumen de lodo de subdesbordamiento:

$$QU = \frac{[16,5 \times (16,2 - 9,3)] - [10,5 \times (9,3 - 8,34)]}{23,4 - 9,3}$$

$$QU = \frac{113,85 - 10,08}{14,1}$$

$$QU = 7,4 \text{ gal/min}$$

b) Fracción del volumen del lodo viejo en subdesbordamiento:

$$FU = \frac{35 - 23,4}{35 - 16,2 + \left[\frac{10,5}{16,5} \times (35 - 8,34) \right]}$$

$$FU = \frac{11,6}{18,8 + (0,63636 \times 26,66)}$$

$$FU = 0,324\%$$

c) Gasto másico de arcilla hacia la presa de mezclar, lb/min:

$$QC = \frac{22,5 \times [16,5 - (7,4 \times 0,324)]}{42}$$

$$QC = \frac{22,5 \times 14,1}{42}$$

$$QC = 7,55 \text{ lb/min}$$

d) Gasto másico de aditivos hacia presa de mezclar, lb/min:

$$QD = \frac{6 \times [16,5 - (7,4 \times 0,324)]}{42}$$

$$QD = \frac{6 \times 14,1}{42}$$

$$QD = 2,01 \text{ lb/min}$$

e) Caudal de agua hacia presa de mezclar, gal/min:

$$QP = \frac{[16,5 \times (35 - 16,2)] - [7,4 \times (35 - 23,4)] - (0,6129 \times 7,55) - (0,6129 \times 2)}{35 - 8,34}$$

$$QP = \frac{310,2 - 85,84 - 4,627 - 1,226}{26,66}$$

f) Gasto másico de barita de API hacia presa de mezclar, lb/min:

$$QB = 16,5 - 7,4 - 8,20 - \frac{7,55}{21,7} - \frac{2,01}{21,7} \times 35$$

$$QB = 16,5 - 7,4 - 8,20 - 0,348 - 0,0926 \times 35$$

$$QB = 0,4594 \times 35$$

$$QB = 16,079 \text{ lb/min}$$

Referencias

Chenevert, Martin E. y Reuven Hollo, *TI-59 Drilling Engineering Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1981.

Crammer Jr., John L., *Basic Drilling Engineering Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1983.

Manual of Drilling Fluids Technology, Baroid Division, N.L. Petroleum Services, Houston, Texas, 1979.

Mud Facts Engineering Handbook, Milchem Incorporated, Houston, Texas, 1984

CAPÍTULO CUATRO

CONTROL DE PRESIÓN

Hojas de Matar y Cálculos Relacionados

Hoja de Matar Normal

Datos Registrados Previamente

Peso del lodo original (OMW) _____ ppg
Profundidad medida (MD) _____ pies
Presión de la tasa de matar (KRP) _____ psi @ _____ emb/min
Presión de la tasa de matar (KRP) _____ psi @ _____ emb/min

Volumen de la Sarta de Perforación

Capacidad de la tubería de perforación
_____ bl/pie x U _____ longitud, pies = _____ bl

Capacidad de la tubería de perforación
_____ bl/pie x U _____ longitud, pies = _____ bl

Capacidad de la tubería de perforación
_____ bl/pie x U _____ longitud, pies = _____ bl

Volumen total de la sarta de perforación _____ bl

Volumen Anular

Cuello de perforación / hoyo abierto
Capacidad _____ bl/pie _____ longitud, pies = _____ bl

Cuello de perforación / hoyo abierto
Capacidad _____ bl/pie _____ longitud, pies = _____ bl

Cuello de perforación / hoyo abierto
Capacidad _____ bl/pie _____ longitud, pies = _____ bl

Barriles totales en hoyo abierto _____ bl

Volumen Anular Total _____ bl

Datos de la Bomba

Flujo de salida de la bomba _____ bl/emb @ _____ % eficiencia

Emboladas desde la superficie hasta la mecha:

Volumen de la Sarta de Perforación _____ bl ÷ _____ flujo de salida de bomba, bl/emb = _____ emb.

Emboladas desde la mecha hasta la zapata de cementación de la tubería de revestimiento:

Volumen de la Sarta de Perforación _____ bl ÷ _____ flujo de salida de bomba, bl/emb = _____ emb.

Emboladas desde la mecha hasta la superficie:

$$\text{Volumen de la Sarta de Perforación} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{bl} \div \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{flujo de salida de bomba, bl/emb} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{emb.}$$

Presión estática máxima permitida en la tubería de revestimiento:

Prueba de integridad de la formación (“leak-off”) $\underline{\hspace{2cm}}$, psi utilizando un peso de lodo de $\underline{\hspace{2cm}}$ ppg @ profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento de $\underline{\hspace{2cm}}$ TVD

Datos de Arremetida:

SIDPP $\underline{\hspace{2cm}}$ psi
 SICP $\underline{\hspace{2cm}}$ psi
 Aumento en volumen de presa (“pit gain”) $\underline{\hspace{2cm}}$ bl
 Profundidad vertical verdadera (TVD) $\underline{\hspace{2cm}}$ pies

Cálculos

Lodo con peso para matar (KWM)

$$= \text{SIDPP} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi} \div 0,052 \div \text{TVD} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{pies} + \text{OMW} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{ppg}$$

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad \text{ppg}$$

Presión Circulante Inicial (ICP)

$$= \text{SIDPP} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi} + \text{KRP} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi}$$

Presión Circulante Final

$$= \text{KWM} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{ppg} \times \text{KRP} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi} \div \text{OMW} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{ppg}$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi}$$

Psi/embolada

$$\text{ICP} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi} - \text{FCP} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi} \div \text{emboladas hasta la mecha} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{psi/emb.}$$

Tabla de Presiones

Emboladas	Presión	Presión Circulante Inicial
0		
Emboladas hasta la mecha		Presión Circulante Final

Ejemplo: Utilice los siguientes datos para llenar una hoja de matar:

- Datos: Peso del lodo original = 9,6 ppg
- Profundidad medida = 10.525 pie
- Presión de la tasa de matar @ 50 emb/min = 1000 psi
- Presión de la tasa de matar @ 30 emb/min = 600 psi
- Sarta de perforación:
 - capacidad de tubería de perforación de 5,0 pulg – 19,5 lb/pie = 0,01776 bl/pie
 - HWDP de 5,0 pulg – 49,3 lb/pie
 - capacidad = 0,00883 bl/pie
 - longitud = 240 pies
 - cuellos de perforación de 8,0 pulg OD – 3,0 pulg ID
 - capacidad = 0,0087 bl/pie
 - longitud = 360 pie
- Espacio anular:
 - tamaño del hoyo = 12 ¼ pulg.
 - capacidad de cuello de perforación/hoyo abierto = 0,0836 bl/pie
 - capacidad de tubería de perforación/hoyo abierto = 0,1215 bl/pie
 - capacidad de tubería de perforación/tubería de revestimiento = 0,1303 bl/pie
- Bomba de lodo (7 pulg x 12 pulg, triplex @ 95% eficiencia) = 0,136 bl/emb
- Prueba de integridad de la formación (“leak-off”) con lodo de 9,0 ppg = 1130 psi
- Profundidad de asentamiento de tubería de revestimiento = 4000 pies
- Presión estática (“shut-in pressure”) de la tubería de perforación = 480 psi

Presión estática de la tubería de revestimiento = 600 psi
 Profundidad vertical verdadera = 10.000 pie

Cálculos**Volumen de la sarta de perforación:**

Capacidad de la tubería de perforación
 $0,01776 \text{ bl/pie} \times 9925 \text{ pie} = 176,27 \text{ bl}$

Capacidad de HWDP
 $0,00883 \text{ bl/pie} \times 240 \text{ pies} = 2,12 \text{ bl}$

Capacidad del cuello de perforación
 $0,0087 \text{ bl/pie} \times 360 \text{ pie} = 3,13 \text{ bl}$

Volumen total de la sarta de perforación = 181,5 bl

Volumen anular:

Cuello de perforación/hoyo abierto
 $0,0835 \text{ bl/pie} \times 360 \text{ pie} = 30,1 \text{ bl}$

Tubería de perforación/hoyo abierto
 $0,1215 \text{ bl/pie} \times 6165 \text{ pie} = 749,05 \text{ bl}$

Tubería de perforación/tubería de revestimiento
 $0,1303 \text{ bl/pie} \times 4000 \text{ pie} = 521,2 \text{ bl}$

Volumen anular total = 1300,35 bl

Emboladas hasta la mecha:

Volumen de la sarta de perforación $181,5 \text{ bl} \div 0,136 \text{ bl/emb.}$

Emboladas hasta la mecha = 1335 emb.

Emboladas desde la mecha hasta la tubería de revestimiento

Volumen del hoyo abierto = $779,15 \text{ bl} \div 0,136 \text{ bl/emb.}$

Emboladas desde la mecha hasta la tubería de revestimiento = 5729 emb.

Emboladas hasta la superficie:

Volumen anular = $1300,35 \text{ bl} \div 0,136 \text{ bl/emb.}$

Emboladas hasta la superficie = 9561 emb.

Lodo con peso para matar (KWM)

$480 \text{ ppg} \div 0,052 \div 10.000 \text{ pie} + 9,6 \text{ ppg} = 10,5 \text{ ppg}$

Presión circulante inicial (ICP)

$480 \text{ psi} + 1000 \text{ psi} = 1480 \text{ psi}$

Presión circulante final (FCP)

$10,5 \text{ ppg} \times 1000 \text{ psi} \div 9,6 \text{ ppg} = 1094 \text{ psi}$

Tabla de Presiones

Emboladas hasta la mecha = $1335 \div 10 = 133,5$

Por consiguiente, las emboladas se incrementarán por 133,5 en cada línea:

Tabla de Presiones

	Emboladas	Presión
	0	
133,5 redondeado	134	
133,5 + 133,5 =	267	
+ 133,5 =	401	
+ 133,5 =	534	
+ 133,5 =	668	
+ 133,5 =	801	
+ 133,5 =	935	
+ 133,5 =	1068	
+ 133,5 =	1202	
+ 133,5 =	1335	

Presión

ICP (1480) psi – FCP (1094) $\div 10 = 38,6$ psi

Por consiguiente, la presión será reducida en 38,6 psi por cada línea.

Tabla de Presiones

	Emboladas	Presión	
	0	1480	< ICP
1480 – 38,6 =		1441	
– 38,6 =		1403	
– 38,6 =		1364	
– 38,6 =		1326	
– 38,6 =		1287	
– 38,6 =		1248	
– 38,6 =		1210	
– 38,6 =		1171	
– 38,6 =		113	
– 38,6 =		1094	< FCP

Margen de Viaje (TM)

TM = Punto de deformación ÷ 11,7 (Dh, pulg. – Dp, pulg.)

Ejemplo: Punto de deformación = 10 lb/100 pies cúbicos; Dh = 8,5 pulg.; Dp = 4,5 pulg.

TM = 10 ÷ 11,7(8,5 – 4,5)

TM = 0,2 ppg

Determinar psi/emb.

psi/emb. = $\frac{\text{ICP} - \text{FCP}}{\text{emboladas hasta la mecha}}$

Ejemplo: Utilizando la hoja de matar anterior, ajustar la tabla de presiones para que muestre incrementos que sean fáciles de leer en manómetros.

Por ejemplo: 50 psi

Datos: Presión circulante inicial = 1480 psi

Presión circulante final = 1094 psi

Emboladas hasta la mecha = 1335 psi

psi/emb. = $\frac{1480 - 1094}{1335}$

psi/emb. = 0,2891

La columna de presiones de la tabla será como se muestra a continuación:

Emboladas	Presión
0	1480
	1450
	1400
	1350
	1300
	1250
	1200
	1150
	1100
	1094

Ajustar las emboladas como sea necesario:

Para la fila 2: ¿Cuántas emboladas serán requeridas para reducir la presión desde 1480 psi hasta 1450 psi?

$$1480 \text{ psi} - 1450 \text{ psi} = 30 \text{ psi}$$

$$30 \text{ psi} \div 0,2891 \text{ psi/emb.} = 104 \text{ emboladas}$$

Para las filas 3 a 7: ¿Cuántas emboladas serán requeridas para reducir la presión por incrementos de 50 psi?

$$50 \text{ psi} \div 0,2891 \text{ psi/emb.} = 173$$

Por consiguiente, la nueva tabla de presiones será la siguiente:

Tabla de Presiones

	Emboladas	Presión
104	0	1480
104 + 173 =	104	1450
+ 173 =	277	1400
+ 173 =	450	1350
+ 173 =	623	1300
+ 173 =	796	1250
+ 173 =	969	1200
+ 173 =	1142	1150
+ 173 =	1315	1100
	1335	1094

Hoja de Matar con una Sarta Telescopiada

$$\text{psi @ emboladas} \quad \text{_____} = \text{ICP} - \left\{ \left[\begin{array}{c} \text{DPL} \\ \text{DSL} \end{array} \right] \times (\text{ICP} - \text{FCP}) \right\}$$

Nota: Cuando se experimente una arremitida (“kick”) con una *sarta telescopiada* en el hoyo, se debe calcular presiones interinas para a) la longitud de la tubería de perforación grande (DPL) y b) la longitud de la tubería de perforación grande más la longitud de la tubería de perforación pequeña.

<i>Ejemplo:</i>	Tubería de Perforación 1: 5,0 pulg – 19,5 lb/pie	
	capacidad	= 0,01776 bl/ pie
	longitud	= 7000 pies
	Tubería de Perforación 2: 3 ½ pulg – 13,3 lb/pie	
	capacidad	= 0,0074 bl/ pie
	longitud	= 6000 pies
	Cuellos de perforación: 4 ½ pulg – OD x 1 ½” ID	
	capacidad	= 0,0022 bl/ pie
	longitud	= 2000 pies
	Flujo de salida de la bomba	= 0,117 bl/emb.

Paso 1

Determinar las emboladas:

$$7000 \text{ pies} \times 0,01776 \text{ bl/pie} \div 0,117 \text{ bl/emb} = 1063$$

$$6000 \text{ pies} \times 0,00742 \text{ bl/pie} \div 0,117 \text{ bl/emb} = 381$$

$$2000 \text{ pies} \times 0,0022 \text{ bl/pie} \div 0,117 \text{ bl/emb} = 38$$

Total de emboladas = 1482

Datos de la hoja de matar

Presión circulante inicial en tubería de perforación (ICP) = 1780 psi

Presión circulante final en tubería de perforación (FCP) = 1067 psi

Paso 2

Determinar la presión interina para la tubería de perforación de 5,0 pulg a 1063 emboladas:

$$\begin{aligned} \text{psi @ 1063} \\ \text{emboladas} &= 1780 - \left\{ \frac{7000}{15000} \right\} \times (1780 - 1067) \\ &= 1780 - (0,4666 \times 713) \\ &= 1780 - 333 \\ &= 1447 \text{ psi} \end{aligned}$$

Paso 3

Determinar la presión interina para la tubería de perforación de 5,0 pulg más la de 3 ½ pulg (1063 + 381) = 1444 emboladas:

$$\begin{aligned} \text{psi @ 1444} \\ \text{emboladas} &= 1780 - \left(\frac{13000}{15000} \right) \times (1780 - 1067) \\ &= 1780 - (0,86666 \times 713) \\ &= 1780 - 618 \\ &= 1162 \text{ psi} \end{aligned}$$

Paso 4

Trazar los datos gráficamente:

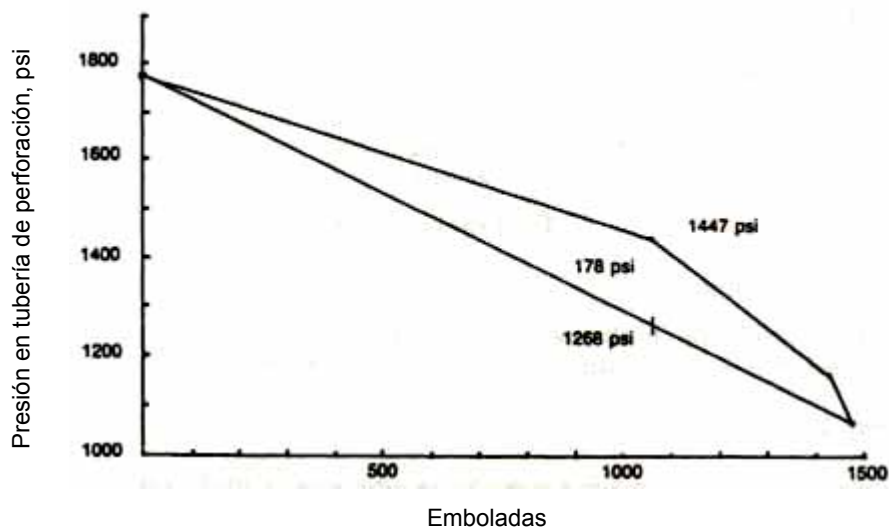


Figura 4-1. Datos de la hoja de matar

Nota: Después de bombear 1062 emboladas, si se hubiera trazado una línea recta, el pozo habría sido subbalanceado por 178 psi.

Hoja de Matar para un Pozo Altamente Desviado

Cuando se experimente una arremetida (“kick”) en un pozo altamente desviado la presión circulante puede ser excesiva cuando el lodo del peso de matar alcance el punto inicial de la desviación (“kick-off point – KOP). Si la presión es excesiva se debe dividir el programa de presiones en dos secciones: 1) desde la superficie hasta el KOP; y 2) desde el KOP hasta la profundidad total (TD). Se utilizan los siguientes cálculos:

Determinar las emboladas desde la superficie hasta KOP:

$$\text{Emboladas} = \frac{\text{capacidad de tubería de perforación, bl/pie} \times \text{profundidad medida hasta KOP, pies}}{\text{flujo de salida de la bomba, bl/emb.}}$$

Determinar las emboladas desde KOP hasta TD:

$$\text{Emboladas} = \frac{\text{capacidad de tubería de perforación, bl/pie} \times \text{profundidad medida hasta TD, pies}}{\text{flujo de salida de la bomba, bl/emb.}}$$

Lodo con peso de matar (KWM):

$$\text{KWM} = \text{SIDPP} \div 0,052 \div \text{TVD} + \text{OMW}$$

Presión circulante inicial (ICP):

$$\text{ICP} = \text{SIDPP} + \text{KRP}$$

Presión circulante final (FCP):

$$\text{FCP} = \text{KWM} \times \text{KRP} \div \text{OMW}$$

Aumento en la presión hidrostática desde la superficie hasta KOP:

$$\text{psi} = (\text{FCP} - \text{KRP}) \times \text{MD @ KOP} \div \text{MD @ TD}$$

Presión circulante (CP) cuando KWM alcance KOP:

$$\text{CP @ KOP} = \text{ICP} - \text{incremento en HP hasta KOP} + \text{incremento en presión de fricción, psi}$$

Nota: Ahora compare esta presión circulante con el valor obtenido utilizando una hoja de matar regular.

<i>Ejemplo:</i>	Peso de lodo original (OMW)	= 9,6 ppg
	Profundidad medida (MD)	= 15.000 pies
	Profundidad medida @ KOP	= 5000 pies
	Profundidad vertical verdadera (TVD) @ KOP	= 5000 pies
	Presión para matar (KRP) @ 30 emb/min	= 600 psi
	Flujo de salida de la bomba	= 0,136 bl/emb.
	Capacidad de la tubería de perforación	= 0,01776 bl/pie
	Presión estática en tubería de perforación (SIDPP)	= 800 psi
	Profundidad vertical verdadera (TVD)	= 10.000 pies

Solución:

Emboladas desde la superficie hasta KOP:

$$\begin{aligned} \text{Emboladas} &= 0,01776 \text{ bl/pie} \times 5000 \text{ pie} \div 0,136 \text{ bl/emb} \\ \text{Emboladas} &= 653 \end{aligned}$$

Emboladas desde KOP hasta TD:

$$\begin{aligned} \text{Emboladas} &= 0,01776 \text{ bl/pie} \times 10.000 \text{ pies} \div 0,136 \text{ bl/emb} \\ \text{Emboladas} &= 1306 \end{aligned}$$

Emboladas totales desde la superficie hasta la mecha:

$$\begin{aligned} \text{Emboladas desde la superficie hasta la mecha} &= 653 + 1306 \\ \text{Emboladas desde la superficie hasta la mecha} &= 1959 \end{aligned}$$

Lodo con peso de matar (KWM):

$$\begin{aligned} \text{KWM} &= 800 \text{ psi} \div 0,052 \div 10.000 \text{ pie} + 9,6 \text{ ppg} \\ \text{KWM} &= 11,1 \text{ ppg} \end{aligned}$$

Presión circulante inicial (ICP):

$$\begin{aligned} \text{ICP} &= 800 \text{ psi} + 600 \text{ psi} \\ \text{ICP} &= 1400 \text{ psi} \end{aligned}$$

Presión circulante final (FCP):

$$\begin{aligned} \text{FCP} &= 11,1 \text{ ppg} \times 600 \text{ psi} \div 9,6 \text{ ppg} \\ \text{FCP} &= 694 \text{ psi} \end{aligned}$$

Aumento en presión hidrostática (HPi) desde la superficie hasta KOP:

$$\begin{aligned} \text{HPi} &= (11,1 - 9,6) \times 0,052 \times 5000 \\ \text{HPi} &= 390 \text{ psi} \end{aligned}$$

Aumento en presión de fricción (FP) hasta TD:

$$\begin{aligned} \text{FP} &= (694 - 600) \times 5000 \div 15.000 \\ \text{FP} &= 31 \text{ psi} \end{aligned}$$

Presión circulante (CP) cuando KWM alcance KOP:

$$\begin{aligned} \text{CP} &= 1400 - 390 + 31 \\ \text{CP} &= 1041 \text{ psi} \end{aligned}$$

Compare esta presión circulante con el valor obtenido al utilizar una hoja de matar regular:

$$\begin{aligned} \text{psi/emb} &= 1400 - 694 \div 1959 \\ \text{psi/emb} &= 0,36 \\ 0,36 \text{ psi/emb} \times 653 \text{ emboladas} &= 235 \text{ psi} \\ 1400 - 235 &= 1165 \text{ psi} \end{aligned}$$

Utilizando una hoja de matar regular, la presión en la tubería de perforación sería 1165 psi. La tabla de presiones ajustada tendría 1041 en el manómetro de la tubería de perforación, lo que representa una diferencia de 124 psi en la presión la cual sería observada también en el lado del espacio anular (tubería de revestimiento). Se recomienda que si la diferencia en la presión en KOP sea 100 psi o más, se deberá utilizar la tabla de presiones ajustada para minimizar la probabilidad de perder circulación.

El gráfico presentado a continuación muestra la diferencia:

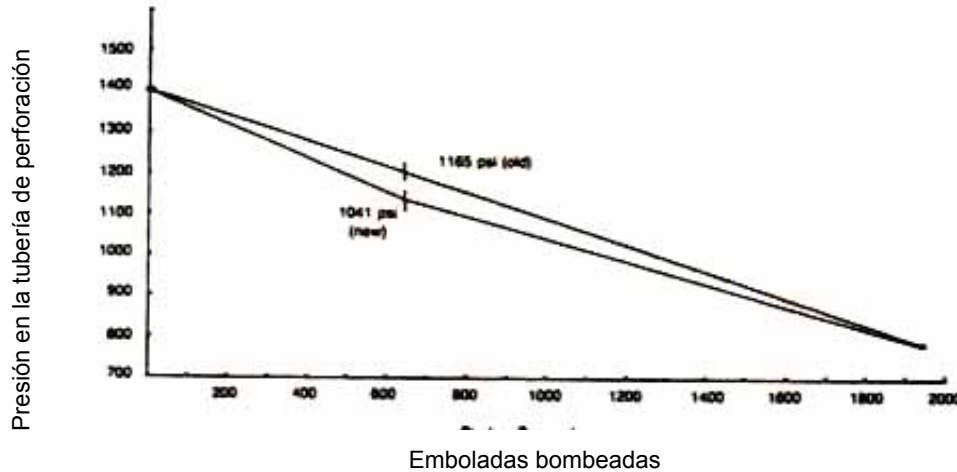


Figura 4-2. Tabla de presiones ajustada

Información Registrada Previamente

Presión Máxima Esperada en la Superficie

Se utilizan dos métodos comunes para determinar la presión máxima esperada en la superficie:

Método 1: Se utiliza cuando se supone que la presión de formación máxima esta en TD:

Paso 1

Determinar la máxima presión de formación (FPmax):

$$FP_{max} = \left(\begin{array}{l} \text{peso de lodo máximo} \\ \text{que será utilizado, ppg} \end{array} + \begin{array}{l} \text{factor de} \\ \text{seguridad, ppg} \end{array} \right) \times 0,052 \times \left(\begin{array}{l} \text{profundidad} \\ \text{total, pies} \end{array} \right)$$

Suponiendo que el 100% del lodo se sopla fuera del hoyo, determinar la presión hidrostática en el hoyo:

Nota: En ocasiones se utiliza el 70% a 80% soplado fuera del hoyo en vez del 100%.

HPgas = gradiente de gas, psi/pie x profundidad total, pie

Paso 3

Determinar la presión máxima esperada en la superficie (MASP):

$$MASP = FP_{max} - HP_{gas}$$

Ejemplo:

Profundidad propuesta para la herramienta	= 12.000 pies
Peso de lodo máximo a ser utilizado para perforar el pozo	= 12,0 ppg
Factor de seguridad	= 4,0 ppg
Gradiente de gas	= 0,12 psi/pie

Suponer que el 100% del lodo es soplado fuera del hoyo.

Paso 1

$$FP_{\max} = (12,0 + 4,0) \times 0,052 \times 12.000 \text{ pies}$$

$$FP_{\max} = 9984 \text{ psi}$$

Paso 2

$$HP_{\text{gas}} = 0,12 \times 12.000 \text{ pies}$$

$$HP_{\text{gas}} = 1440 \text{ psi}$$

Paso 3

$$MASP = 9984$$

$$MASP = 8544 \text{ psi}$$

Método 2: Se utiliza cuando se supone que la presión máxima en el hoyo se alcanza cuando la formación en la zapata se fractura.

Paso 1

Determinar la presión de fractura, psi:

$$\text{Presión de fractura, psi} = \left[\begin{array}{l} \text{gradiente de fractura} \\ \text{estimado, ppg} \end{array} + \begin{array}{l} \text{factor de} \\ \text{seguridad, ppg} \end{array} \right] \times 0,052 \times \left[\begin{array}{l} \text{TVD de zapata de cement.} \\ \text{de tub. de rev., pies} \end{array} \right]$$

Nota: Se agrega un factor de seguridad para asegurar que se fracture la formación antes de exceder la presión nominal de la válvula impiderreventones.

Paso 2

Determinar la presión hidrostática del gas en el hoyo (HP_{gas}):

$$HP_{\text{gas}} = \text{gradiente de gas, psi/pie} \times \text{TVD de zapata de cementación de la tubería de revestimiento, pies}$$

Paso 3

Determinar la máxima presión esperada en la superficie (MASP), psi:

<i>Ejemplo:</i> Profundidad propuesta para asentar tubería de revestimiento	= 4000 pies
Gradiente de fractura estimado	= 14,2 ppg
Factor de seguridad	= 1,0 ppg
Gradiente de gas	= 0,12 psi/pie

Suponer que el 100% del lodo se sopla fuera del hoyo.

Paso 1

$$\text{Presión de fractura, psi} = (14,2 + 1,0) \times 0,052 \times 4000 \text{ pie}$$

$$\text{Presión de fractura, psi} = 3162$$

Paso 2

$$HP_{\text{gas}} = 0,12 \times 4000 \text{ pies}$$

$$HP_{\text{gas}} = 480 \text{ psi}$$

Paso 3

$$\text{MASP} = 3162 - 480$$

$$\text{MASP} = 2682 \text{ psi}$$

Determinar el Tamaño de Líneas Desviadoras

Determinar el diámetro interno de la línea desviadora, pulgadas, igual al área entre el diámetro interno de la tubería de revestimiento y el diámetro externo de la tubería de perforación en uso:

$$\text{Diámetro interno de la línea desviadora, pulgadas} = \sqrt{Dh^2 - Dp^2}$$

Ejemplo:

Tubería de revestimiento – 13-3/8 pulg. – J-55 – 61 lb/pie ID = 12,515 pulg.

Tubería de perforación – 19,5 lb/pie OD = 5,0 pulg

Determinar el diámetro interno de la línea desviadora que será igual al área entre la tubería de revestimiento y tubería de perforación:

$$\text{Diámetro interno de la línea desviadora, pulgadas} = \sqrt{12,515^2 - 5,0^2}$$

Diámetro interno de la línea desviadora 11,47 pulg

Pruebas de Presión de la Formación

Dos métodos para realizar la prueba:

- Prueba del peso de lodo equivalente
- Prueba de integridad de la formación (“leak-off”)

Precauciones a tomar antes de realizar la prueba:

1. Circular y acondicionar el lodo para asegurar que el peso de lodo esté consistente a través de todo el sistema.
2. Cambiar el manómetro (si es posible) a uno con incrementos menores para poder tomar mediciones más precisas.
3. Encerrar el pozo.
4. Comenzar a bombear a una tasa muy lenta – ¼ a ½ bl/min.
5. Monitorear la presión, el tiempo y barriles bombeados.
6. Algunas operadoras pueden tener procedimientos diferentes para realizar esta prueba que podrían incluir:
 - a) Aumentar la presión en incrementos de 100 psi, esperando durante unos minutos y luego aumentar en otros 100 psi, y continuar así hasta alcanzar el peso de lodo equivalente o lograr “leak-off”.

- b) Algunas operadoras prefieren no bombear contra un sistema cerrado. Prefieren a circular a través del estrangulador y aumentar la contrapresión cerrando lentamente el estrangulador. En este método se deberá calcular la pérdida de la presión anular y agregarla a los resultados de la prueba de presión.

Hacer la prueba hasta el peso de lodo equivalente:

1. Se utiliza este método principalmente en pozos de desarrollo cuando se conoce el peso de lodo máximo que se utilizará para perforar el próximo intervalo del hoyo.
2. Determinar el peso de lodo equivalente de prueba, ppg. Generalmente se utilizan dos métodos:

Método 1: Agregar un valor al peso de lodo máximo que se requiere para perforar el intervalo.

Ejemplo: Peso de lodo máximo necesario para perforar el próximo intervalo = 11,5 ppg
más factor de seguridad = 1,0 ppg

$$\text{Peso de lodo equivalente de prueba, ppg} = \left(\begin{array}{l} \text{peso de lodo} \\ \text{máximo, ppg} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{factor de} \\ \text{seguridad, ppg} \end{array} \right)$$

$$\text{Peso de lodo equivalente de prueba, ppg} = 11,5 \text{ ppg} + 1,0 \text{ ppg}$$

$$\text{Peso de lodo equivalente de prueba, ppg} = 12,5 \text{ ppg}$$

Método 2: Sustraer un valor del gradiente de fractura estimado para la profundidad de la zapata de cementación de la tubería de revestimiento.

$$\text{Peso de lodo equivalente de prueba, ppg} = \left(\begin{array}{l} \text{gradiente de fractura} \\ \text{estimado, ppg} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{factor de} \\ \text{seguridad, ppg} \end{array} \right)$$

Ejemplo: Gradiente de fractura de formación estimado = 14,2 ppg. Factor de seguridad = 1,0 ppg.

$$\text{Peso de lodo equivalente de prueba, ppg} = 14,2 \text{ ppg} - 1,0 \text{ ppg}$$

Determinar la presión en la superficie que se utilizará:

$$\text{Presión en la superficie, psi} = \left(\begin{array}{l} \text{peso de lodo} \\ \text{equivalente de} \\ \text{prueba, ppg} \end{array} - \begin{array}{l} \text{peso de lodo} \\ \text{en uso, ppg} \end{array} \right) \times 0,052 \times \left(\begin{array}{l} \text{TVD de asentamiento de} \\ \text{tubería de revestimiento, pies} \end{array} \right)$$

Ejemplo:

$$\text{Peso de lodo} = 9,2 \text{ ppg}$$

$$\text{TVD de zapata de cementación de la tubería de revestimiento} = 4000 \text{ pies}$$

$$\text{Peso de lodo equivalente de prueba} = 13,2 \text{ ppg}$$

$$\text{Solución: Presión en la superficie} = (13,2 - 9,2) \times 0,052 \times 4000 \text{ pies}$$

$$\text{Presión en la superficie} = 832 \text{ psi}$$

Prueba de Integridad de la Formación (“leak-off”):

1. Se utiliza esta prueba principalmente en pozos exploratorios o cuando se desconozca la fractura real.
2. Determinar el gradiente de fractura estimado utilizando una Tabla de Gradientes de Fractura.
3. Determinar la presión de “leak-off” estimada.

$$\text{Presión de "leak-off" estimada, psi} = \left(\text{gradiente de fractura estimado} - \text{peso de lodo en uso, ppg} \right) \times 0,052 \times \left(\text{TVD de zapata de cementación de la tubería de revestimiento, pies} \right)$$

Ejemplo: Peso de lodo = 9,6 ppg
 TVD de zapata de cementación de la tubería de revestimiento = 4000 pies
 Gradiente de fractura estimado = 14,4 ppg

Solución: Presión de “leak-off” estimada, psi = (14,4 – 9,6) x 0,052 x 4000 pies
 = 4,8 x 0,05 x 4000

Presión de “leak-off” estimada, psi = 998 psi

Cálculo del Peso de Lodo Máximo Permitido utilizando los Datos de la Prueba de Integridad de Formación (“Leak-Off Test”)

$$\text{Peso de lodo máximo permitido, ppg} = \left(\text{presión de "leak-off", psi} \right) \div 0,052 \div \left(\text{TVD de zapata de cementación de la tubería de revestimiento, pies} \right) + \left(\text{peso de lodo en uso, ppg} \right)$$

Ejemplo: Determinar el peso de lodo permitido, ppg, utilizando los siguientes datos:

Presión “leak-off” = 1040 psi
 TVD de zapata de cementación de la tubería de revestimiento, pies = 4000 pies
 Peso de lodo en uso = 10,0 ppg

Peso de lodo máximo permitido, ppg = 1040 ÷ 0,052 ÷ 4000 + 10,0

Peso de lodo máximo permitido, ppg = 15,0 ppg

Presión Estática Máxima Permitida de la Tubería de Revestimiento (Maximum Allowable Shut-in Casing Pressure - MASICP)

$$\text{MASICP} = \left(\text{peso de lodo máximo permitido, ppg} - \text{peso de lodo en uso, ppg} \right) \times 0,052 \times \left(\text{TVD de zapata de cementación de la tubería de revestimiento, pies} \right)$$

Ejemplo: Determinar la presión estática máxima permitida de la tubería de revestimiento utilizando los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \text{Peso de lodo máximo permitido} &= 15 \text{ ppg} \\ \text{Peso de lodo en uso} &= 12,2 \text{ ppg} \\ \text{TVD de la zapata de cementación de la tubería de revestimiento} &= 4000 \text{ pies} \\ \text{MASICP} &= (15,0 - 12,2) \times 0,052 \times 4000 \text{ pies} \\ \text{MASICP} &= 582 \text{ psi} \end{aligned}$$

Factor de Tolerancia de Arremetida (“Kick Tolerance Factor” – KTF)

$$\text{KTF} = \left(\frac{\text{TVD de zapata de cement. de la tub. de rev., pies}}{\text{profundidad del pozo TVD, pies}} \right) \times \left(\frac{\text{peso de lodo máximo permitido, ppg}}{\text{peso de lodo en uso, ppg}} \right)$$

Ejemplo: Determinar el factor de tolerancia de arremetida (KTF) utilizando los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \text{Peso de lodo máximo permitido} &= 14,2 \text{ ppg} \\ &\text{(obtenido de la prueba de integridad de la formación – “leak-off”)} \\ \text{Peso de lodo en uso} &= 10,0 \text{ ppg} \\ \text{TVD de la zapata de cementación de la tubería de revestimiento} &= 4000 \text{ pies} \\ \text{Profundidad del pozo TVD} &= 10.000 \text{ pies} \\ \text{KTF} &= (4000 \text{ pies} \div 10.000 \text{ pies}) \times (14,2 \text{ ppg} - 10,0 \text{ ppg}) \\ \text{KTF} &= 1,68 \text{ ppg} \end{aligned}$$

Máxima Presión en la Superficie utilizando los Datos de Tolerancia de Arremetida

$$\text{Máxima presión en la superficie} = \text{factor de tolerancia de arremetida, ppg} \times 0,052 \times \text{TVD, pies}$$

Ejemplo: Determinar la máxima presión en la superficie, psi, utilizando los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \text{Máxima presión en la superficie} &= 1,68 \text{ ppg} \times 0,052 \times 10.000 \text{ pies} \\ \text{Máxima presión en la superficie} &= 874 \text{ psi} \end{aligned}$$

Máxima Presión en la Formación (FP) que se puede controlar al encerrar un pozo

$$\text{FP Máxima, psi} = \text{factor de tolerancia de arremetida, ppg} + \text{peso de lodo en uso, ppg} \times 0,052 \times \text{TVD, pies}$$

Ejemplo: Determinar la máxima presión en la formación (FP) que se puede controlar al encerrar un pozo utilizando los siguientes datos:

Datos: Factor de tolerancia de arremetida = 1,68 ppg
 Peso de lodo = 10,0 ppg
 Profundidad vertical verdadera (TVD) = 10.000 pies

FP Máxima, psi = $(1,68 \text{ ppg} + 10,0 \text{ ppg}) \times 0,052 \times 10.000 \text{ pies}$
 FP Máxima, psi = 6074 psi

Máxima Altura de Influjo Posible para Igualar la Máxima Presión Estática Permitida de la Tubería de Revestimiento (MASICP)

Altura de
 influjo, pies = MASICP, psi \div $\left[\begin{array}{l} \text{gradiente del peso de} \\ \text{lodo en uso, psi/pie} \end{array} - \begin{array}{l} \text{gradiente del} \\ \text{influjo, psi/pies} \end{array} \right]$

Ejemplo: Determinar la altura de influjo, pies, necesaria para igualar la máxima presión estática permitida de la tubería de revestimiento (MASICP) utilizando los siguientes datos:

Datos: Máxima presión estática permitida de la tubería de revestimiento = 874 psi
 Gradiente de lodo (10,0 ppg x 0,052) = 0,52 psi/pie
 Gradiente del influjo = 0,12 psi/pie

Altura de influjo = $874 \text{ psi} \div (0,052 \text{ psi/pie} - 0,12 \text{ psi/pie})$
 Altura de influjo = 2185 pies

Influjo Máximo, barriles, para igualar Máxima Presión Estática Permitida de la Tubería de Revestimiento (MASICP)

Ejemplo:

Máxima Altura de Influjo para igualar MASICP = 2185 pies
 (del ejemplo anterior)
 Capacidad anular – cuellos de perforación/hoyo abierto = 0,0836 bl/pie
 (12 ¼ pulg x 8,0 pulg)
 Longitud del cuello de perforación = 500 pies
 Capacidad anular – tubería de perforación / hoyo abierto = 0,1215 bl/pie

Paso 1

Determinar el número de barriles enfrente de cuellos de perforación:

Barriles = $0,0836 \text{ bl/pie} \times 500 \text{ pies}$
 Barriles = 41,8

Paso 2

Determinar el número de barriles enfrente de la tubería de perforación:

Altura de influjo, pie, enfrente de tubería de perforación:

pies = $2185 \text{ pies} - 500 \text{ pies}$
 pies = 1685 pies

Barriles enfrente de tubería de perforación:

Barriles = 1685 pies x 0,1215 bl/pie
 Barriles = 204,7

Paso 3

Determinar el flujo máximo, bl, para igualar la máxima presión estática permitida de la tubería de revestimiento:

Influjo máximo = 41,8 bl + 204,7 bl
 Influjo máximo = 246,5 bl

Ajustar la Máxima Presión Estática Permitida de la Tubería de Revestimiento para un Aumento en el Peso de Lodo

$$\text{MASICP} = P_L - [D \times (\text{peso de lodo}_2 - \text{peso de lodo}_1)] 0,052$$

donde MASICP = máxima presión estática permitida de la tubería de revestimiento (espacio anular), psi

P_L = presión “leak-off”, psi

D = profundidad vertical verdadera hasta zapata de cementación de la tubería de revestimiento, pies

Peso de lodo₂ = nuevo peso de lodo, ppg

Peso de lodo₁ = peso de lodo original, ppg

Ejemplo: La presión “leak-off” en la profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento (TVD) de 4000 pies, era 1040 psi con 10,0 ppg en uso. Determinar la máxima presión estática permitida de la tubería de revestimiento con un peso de lodo de 12,5 ppg:

$$\text{MASICP} = 1040 \text{ psi} - [4000 \times (12,5 - 10,0) 0,052]$$

$$\text{MASICP} = 1040 \text{ psi} - 520$$

$$\text{MASICP} = 520 \text{ psi}$$

Análisis de Arremetida (“Kick”)

Presión en la Formación (FP) con el Pozo Encerrado por una Arremetida

$$\text{FP, psi} = \text{SIDPP, psi} + (\text{peso de lodo, ppg} \times 0,052 \times \text{TVD, pies})$$

Ejemplo: Determinar la presión en la formación utilizando los siguientes datos:

Presión estática de la tubería de perforación = 500 psi

Peso del lodo en tubería de perforación = 9,6 ppg

Profundidad vertical verdadera = 10.000 pies

$$\text{FP, psi} = 500 \text{ psi} + (9,6 \text{ ppg} \times 0,052 \times 10.000 \text{ pies})$$

$$\text{FP, psi} = 500 \text{ psi} + 4992 \text{ psi}$$

$$\text{FP} = 5492 \text{ psi}$$

Presión de Fondo (BHP) con el Pozo Encerrado por una Arremetida

$$\text{BHP, psi} = \text{SIDPP, psi} + (\text{peso de lodo, ppg} \times 0,052 \times \text{TVD, pies})$$

Ejemplo: Determinar la presión de fondo (BHP) con el pozo encerrado por una arremetida:

Presión estática de la tubería de perforación	= 500 psi
Peso de lodo en la tubería de perforación	= 9,6 ppg
Profundidad vertical verdadera	10.000 pies

$$\text{BHP, psi} = 500 \text{ psi} + (9,6 \text{ ppg} \times 0,052 \times 10.000 \text{ pies})$$

$$\text{BHP, psi} = 500 \text{ psi} + 4992 \text{ psi}$$

$$\text{BHP} = 5492 \text{ psi}$$

Presión Estática en Tubería de Perforación (SIDPP)

$$\text{SIDPP, psi} = \text{presión en la formación, psi} - (\text{peso de lodo, ppg} \times 0,052 \times \text{TVD, pies})$$

Ejemplo: Determinar la presión estática de la tubería de perforación utilizando los siguientes datos:

Presión en la formación	= 12.480 psi
Peso del lodo en la tubería de perforación	= 15,0 ppg
Profundidad verdadera vertical	= 15.000 pies

$$\text{SIDPP, psi} = 12.480 \text{ psi} - (15,0 \text{ ppg} \times 0,052 \times 15.000 \text{ pies})$$

$$\text{SIDPP, psi} = 12.480 \text{ psi} - 11.700 \text{ psi}$$

$$\text{SIDPP} = 780 \text{ psi}$$

Presión Estática de la Tubería de Revestimiento (SICP)

$$\text{SICP} = \text{presión en la formación, psi} - \text{HP del lodo en espacio anular, psi} + \text{HP del influjo en espacio anular, psi}$$

Ejemplo: Determinar la presión estática de la tubería de revestimiento utilizando los siguientes datos:

Presión en la formación	= 12.480 psi
Peso del lodo en el espacio anular	= 15,0 ppg
Pies de lodo en el espacio anular	= 14.600 pies
Gradiente del influjo	= 0,12 psi/pie
Pies de influjo en el espacio anular	= 400 pies

$$\text{SICP, psi} = 12.480 - [(15,0 \times 0,052 \times 14.600) + (0,12 \times 400)]$$

$$\text{SICP, psi} = 12.480 - 11.388 + 48$$

$$\text{SICP} = 1044 \text{ psi}$$

Altura, pies, del Influjo

$$\text{Altura de influjo, pies} = \text{aumento en volumen de presa, bl} \div \text{capacidad anular, bl/pie}$$

Ejemplo: Determinar la altura, pies, del influjo utilizando los siguientes datos:

Aumento en volumen de presa	= 20 bl
Capacidad anular – DC/OH	= 0,02914 bl/pies
(Dh = 8,5 pulg. – Dp = 6,5)	

$$\begin{aligned} \text{Altura del influjo, pies} &= 20 \text{ bl} \div 0,02914 \text{ bl/pies} \\ \text{Altura del influjo} &= 686 \text{ pies} \end{aligned}$$

Ejemplo 2: Determinar la altura, pies, del influjo utilizando los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \text{Aumento en volumen de presa} &= 20 \text{ bl} \\ \text{Tamaño del hoyo} &= 8,5 \text{ pulg.} \\ \text{Diámetro externo del cuello de perforación} &= 6,5 \text{ pulg.} \\ \text{Longitud del cuello de perforación} &= 450 \text{ pies} \\ \text{Diámetro externo de la tubería de perforación} &= 5,0 \text{ pulg.} \end{aligned}$$

Determinar la capacidad anular, bl/pies, para DC/OH:

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{8,5^2 - 6,5^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = 0,02914 \text{ bl/pie}$$

Determinar el número de barriles enfrente de los cuellos de perforación:

$$\text{Barriles} = \text{longitud de los cuellos} \times \text{capacidad anular}$$

$$\text{Barriles} = 450 \text{ pies} \times 0,02914 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Barriles} = 13,1$$

Determinar la capacidad anular, bl/pie, enfrente de la tubería de perforación:

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = \frac{8,5^2 - 5,0^2}{1029,4}$$

$$\text{Capacidad anular, bl/pie} = 0,0459 \text{ bl/pie}$$

Determinar los barriles de influjo enfrente de la tubería de perforación:

$$\text{Barriles} = \text{aumento en volumen de la presa, bl} - \text{barriles enfrente los cuellos de perforación}$$

$$\text{Barriles} = 20 \text{ bl} - 13,1 \text{ bl}$$

$$\text{Barriles} = 6,9$$

Determinar la altura del influjo enfrente de la tubería de perforación:

$$\text{Altura, pie} = 6,9 \text{ bl} \div 0,0459 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Altura} = 150 \text{ pie}$$

Determinar la altura total del influjo:

$$\text{Altura, pie} = 450 \text{ pies} + 150 \text{ pies}$$

$$\text{Altura} = 600 \text{ pies}$$

Tipo Estimado de Influjos

$$\text{Peso del influjo, ppg} = \text{peso de lodo, ppg} - \left(\frac{\text{SICP} - \text{SIDPP}}{\text{altura de influjo, pies} \times 0,052} \right)$$

por consiguiente: 1 – 3 ppg = arremetida de gas

4 – 6 ppg = arremetida de petróleo o combinación

7 – 9 ppg = arremetida de salmuera

Ejemplo: Determinar el tipo de influjo utilizando los siguientes datos:

Presión estática de la tubería de revestimiento	= 1044 psi
Presión estática de la tubería de perforación	= 780 psi
Altura del influjo	= 400 pies
Peso de lodo	= 15,0 ppg

$$\text{Peso del influjo, ppg} = 15,0 \text{ ppg} - \frac{1044 - 780}{400 \times 0,052}$$

$$\text{ppg} = 15,0 \text{ ppg} - \frac{264}{20,8}$$

$$\text{Peso del influjo} = 2,31 \text{ ppg}$$

Por consiguiente, probablemente el influjo sea “gas”.

Migración de Gas en un Pozo Encerrado

Estimar la tasa de migración de gas, pies/hora:

$$V_g = 12e^{(-0,37)(\text{peso de lodo, ppg})}$$

V_g = tasa de migración de gas, pies/hora

Ejemplo: Determinar la tasa *estimada* de migración de gas utilizando un peso de lodo de 11,0 ppg:

$$V_g = 12e^{(-0,37)(11,0 \text{ ppg})}$$

$$V_g = 12e^{(-4,07)}$$

$$V_g = 0,205 \text{ pie/seg.}$$

$$V_g = 0,205 \text{ pie/seg.} \times 60 \text{ seg./min}$$

$$V_g = 12,3 \text{ pie/min} \times 60 \text{ min/hora}$$

$$V_g = 738 \text{ pie/hora}$$

Determinar la tasa *real* de migración de gas después de haber encerrado un pozo por una arremitada:

$$\text{Tasa de migración de gas, pie/hora} = \left(\begin{array}{l} \text{aumento en presión en tubería} \\ \text{de revestimiento, psi/hora} \end{array} \right) \div \left(\begin{array}{l} \text{gradiente de presión del peso de} \\ \text{lodo en uso, psi/pie} \end{array} \right)$$

Ejemplo: Determinar la tasa de migración de gas utilizando los siguientes datos:

Presión estática estabilizada de la tubería de revestimiento	= 500 psi
SICP después de una hora	= 700 psi
Peso de lodo	= 12,0 ppg
Gradiente de presión para lodo de	= 0,624 psi/hora

$$\text{Tasa de migración de gas, pie/hora} = 200 \text{ psi/hora} \div 0,624 \text{ psi/pie}$$

$$\text{Tasa de migración de gas} = 320,5 \text{ pie/hora}$$

Reducción en la Presión Hidrostática a TD Causada por Lodo Cortado por Lodo**Método 1:**

$$\text{Reducción en HP} = \frac{100 \left(\begin{array}{l} \text{peso del lodo no} \\ \text{cortado, ppg} \end{array} - \begin{array}{l} \text{peso del lodo cortado} \\ \text{por gas, ppg} \end{array} \right)}{\text{Peso del lodo cortado por gas, ppg}}$$

Ejemplo: Determinar la reducción en la presión hidrostática causada por lodo cortado por gas utilizando los siguientes datos:

Peso de lodo no cortado = 18,0 ppg

Peso de lodo cortado por gas = 9,0 ppg

$$\text{Reducción en HP, psi} = \frac{100 \times (18,0 - 9,0 \text{ ppg})}{9,0 \text{ ppg}}$$

$$\text{Reducción en HP, psi} = 100 \text{ psi}$$

Método 2:

$$P = (MG \div C) V$$

donde P = reducción en presión de fondo, psi

MG = gradiente de lodo, psi/pie

C = volumen anular, bl/pie

V = aumento en volumen de presa, bl

Ejemplo: MG = 0,624 psi/pie

C = 0,0459 bl/pie (Dh = 8,5 pulg.; Dp = 5,0 pulg.)

V = 20 bl

Solución: P = (0,624 psi/pie ÷ 0,0459 bl/pie) 20

P = 13,59 x 20

P = 271,9 psi

Máxima Presión en la Superficie por Arremetida de Gas en un Lodo a Base de Agua

$$\text{MSPgk} = 4 \sqrt{\frac{PxVxKWM}{C}}$$

donde MSPgk = Máxima presión en la superficie que resulta de una arremetida de gas en un lodo a base de agua

P = presión en la formación, psi

V = aumento en volumen original de la presa, bl

KWM = lodo de peso para matar, ppg

Ejemplo: P = 12.480 psi

V = 20 bl

C = 0,050 bl/pie (8,5 pulg. x 4,5 pulg.)

KWM = 16,0 ppg

Solución:

$$\begin{aligned} \text{MSPgk} &= 4 \sqrt{\frac{12.480 \times 20 \times 0,0505}{16,0}} \\ &= 4 \sqrt{787,8} \\ &= 4 \times 28,068 \end{aligned}$$

$$\text{MSPgk} = 112,3 \text{ bl}$$

Presiones Máximas al Circular una Arremetida hacia afuera (Ecuaciones de Moore)

Se utilizarán las siguientes ecuaciones:

1. Determinar la presión en la formación, psi:

$$P_b = \text{SIDP} + (\text{peso de lodo, ppg} \times 0,052 \times \text{TVD, pie})$$

2. Determinar la altura del influjo, pies:

$$h_i = \text{aumento en volumen de la presa, bl} \div \text{capacidad anular, bl/pie}$$

3. Determinar la presión ejercida por el influjo, psi:

$$P_i = P_b - [P_m (D - X) + \text{SICP}]$$

4. Determinar el gradiente del influjo, psi/pie:

$$C_i = P_i \div h_i$$

5. Determinar la temperatura, °R, en la profundidad de interés:

$$T_{di} = 70^\circ\text{F} + (0,012 \text{ }^\circ\text{F/pie} \times D_i) + 460$$

6. Determinar A para lodo sin peso agregado:

$$A = P_b - [P_m (D - X) - P_i]$$

7. Determinar la presión en la profundidad de interés:

$$P_{di} = \frac{A}{2} + \left[\frac{A^2}{4} + \frac{p_m P_b Z_{di} T^\circ R_{di} h_i}{Z_b T_b} \right]^{1/2}$$

8. Determinar el lodo con peso de matar, ppg:

$$K_{WM}, \text{ ppg} = \text{SIDPP} \div 0,052 \div \text{TVD, pie} + \text{OMW, ppg}$$

9. Determinar el gradiente del lodo con peso de matar, psi/pie:

$$p_{KWM} = K_{WM}, \text{ ppg} \times 0,052$$

10. Determinar los PIES que estarán ocupados por el volumen de la sarta de perforación en el espacio anular:

$$D_i = \text{vol. de la sarta de perforación, bl} \div \text{capacidad anular, bl/pie}$$

11. Determinar A para lodo con peso agregado:

$$A = P_b - [p_m (D - X) - P_i] + [D_i (p_{KWM} - p_m)]$$

Ejemplo: Condiciones supuestas:

Profundidad del pozo	= 10.000 pies
Tubería de revestimiento superficial	= 9-5/8 pulg. @ 2500 pies
Diámetro interno de la tubería de revestimiento	= 8,921 pulg.
capacidad	= 0,077 bl/pie
Tamaño del hoyo	= 8,5 pulg.
Tubería de perforación	= 4,5 pulg. – 16,6 lb/pie
Diámetro externo del cuello de perforación	= 6 ¼ pulg.
longitud	= 625 pies
Peso de lodo	= 9,6 ppg
Gradiente de fractura @ 2500 pies	= 0,73 psi/pie (14,04 ppg)

Volúmenes de lodo:

Hoyo de 8 ½ pulg.	0,07 bl/pie
Hoyo de 8 ½ pulg x tubería de perforación de 4 ½ pulg.	= 0,05 bl/pie
Hoyo de 8 ½ pulg x cuellos de perforación de 6 ¼ pulg.	= 0,032 bl/pie
Tubería de revestimiento de 8,921 x tubería de perforación de 4 ½ pulg.	= 0,057 bl/pie
Capacidad de la tubería de perforación	= 0,014 bl/pie
Capacidad de los cuellos de perforación	= 0,007 bl/pie
Factor de supercompresibilidad (Z)	= 1,0

Ocurre una arremetida en el pozo y se registran los siguientes datos:

SIDP	= 260 psi
SICP	= 500 psi
Aumento en volumen de la presa	= 20 bl

Determinar los siguientes parámetros:

Presión máxima en la zapata utilizando el método del perforador

Presión máxima en la superficie con el método del perforador

Presión máxima en la zapata utilizando método de “wait and weight” (esperar y agregar peso)

Presión máxima en la superficie con el método de “wait and weight”

Presión máxima en la zapata utilizando el método del perforador

1. Determinar la presión en la formación:

$$P_b = 260 \text{ psi} + (9.6 \text{ ppg} \times 0,052 \times 10.000 \text{ pies})$$

$$P_b = 5252 \text{ psi}$$

2. Determinar la altura del influjo en TD:

$$h_i = 20 \text{ bl} \div 0,032 \text{ bl/pie}$$

$$h_i = 625 \text{ pies}$$

3. Determinar presión ejercida por influjo en TD:

$$P_i = 5252 \text{ psi} - [0,4992 \text{ psi/pie} (10.000 - 625) + 500]$$

$$P_i = 5252 \text{ psi} - [4680 \text{ psi} + 500]$$

$$P_i = 5252 \text{ psi} - 5180$$

$$P_i = 72 \text{ psi}$$

4. Determinar el gradiente de influjo en TD:

$$C_i = 72 \text{ psi} \div 625 \text{ pie}$$

$$C_i = 0,1152 \text{ psi/pie}$$

5. Determinar la altura y presión del influjo alrededor de la tubería de perforación:

$$h = 20 \text{ bl} \div 0,05 \text{ bl/pie}$$

$$h = 400 \text{ pies}$$

$$P_i = 0,1152 \text{ psi/pie} \times 400 \text{ pie}$$

$$P_i = 46 \text{ psi}$$

6. Determinar T °R en TD y en la zapata:

$$T \text{ °R @ } 10.000 \text{ pies} = 70 + (0,012 \times 10.000) + 460$$

$$= 70 + 120 + 460$$

$$T \text{ °R @ } 10.000 \text{ pies} = 650$$

$$T \text{ °R @ } 2.500 \text{ pies} = 70 + (0,012 \times 2500) + 460$$

$$= 70 + 30 + 460$$

$$T \text{ °R @ } 2.500 \text{ pies} = 560$$

7. Determinar A:

$$A = 5252 \text{ psi} - [0,4992 (10.000 - 2.500) + 46]$$

$$A = 5252 \text{ psi} - (3744 - 46)$$

$$A = 1462$$

8. Determinar la máxima presión en la zapata utilizando el método del perforador:

$$P_{2500} = \frac{1462}{2} + \frac{1462^2}{4} + \frac{(0,4992)(5252)(1)(560)(400)}{(1)(650)}^{1/2}$$

$$= 731 + (534361 + 903512)^{1/2}$$

$$= 731 + 1199$$

$$P_{2500} = 1930 \text{ psi}$$

Determinar la máxima presión en la superficie utilizando el método del perforador:

1. Determinar A:

$$A = 5252 - [0,4992 (10.000) + 46]$$

$$A = 5252 - (4992 + 46)$$

$$A = 214 \text{ psi}$$

2. Determinar la máxima presión en la superficie utilizando el método del perforador:

$$\begin{aligned}
 P_s &= \frac{214}{2} + \frac{214^2}{4} + \frac{(0,4992)(5252)(530)(400)}{(650)}^{1/2} \\
 &= 107 + (11449 + 855109)^{1/2} \\
 &= 107 + 931 \\
 P_s &= 1038 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Determinar la máxima presión en la zapata utilizando el método de “wait and weight” (esperar y agregar peso):

1. Determinar el lodo con el peso de matar (“kill weight mud” – KWM):

$$\begin{aligned}
 \text{KWM, ppg} &= 260 \text{ psi} \div 0,052 \div 10.000 \text{ pies} + 9,6 \text{ ppg} \\
 \text{KWM, ppg} &= 10,1 \text{ ppg}
 \end{aligned}$$

2. Determinar el gradiente (pm), psi/pie para KWM:

$$\begin{aligned}
 \text{pm} &= 10,1 \text{ ppg} \times 0,052 \\
 \text{pm} &= 0,5252 \text{ psi/pie}
 \end{aligned}$$

3. Determinar el volumen interno de la sarta de perforación:

$$\begin{aligned}
 \text{Vol. de la tubería de perforación} &= 0,014 \text{ bl/pie} \times 9375 \text{ pie} = 131,25 \text{ bl} \\
 \text{Vol. del cuello de perforación} &= 0,007 \text{ bl/pie} \times 625 \text{ pie} = 4,375 \text{ bl} \\
 \text{Vol. total de la sarta de perforación} &= 135,825 \text{ bl}
 \end{aligned}$$

4. Determinar los PIES que ocupa el volumen de la sarta de perforación en el espacio anular:

$$\begin{aligned}
 D_i &= 135,625 \text{ bl} \div 0,05 \text{ bl/pie} \\
 D_i &= 2712,5
 \end{aligned}$$

5. Determinar A:

$$\begin{aligned}
 A &= 5252 - [(0,5252 (10.000 - 2500) - 46) + (2715,2 (0,5252 - 0,4992))] \\
 A &= 5252 - (3939 - 46) + 70,6 \\
 A &= 1337,5
 \end{aligned}$$

6. Determinar la máxima presión en la zapata utilizando el método “wait and weight” (esperar y agregar peso):

$$\begin{aligned}
 P_{2500} &= \frac{1337,5}{2} + \frac{1337,5^2}{4} + \frac{(0,5252)(5252)(1)(560)(400)}{(1)(650)}^{1/2} \\
 &= 668,75 + (447226 + 950569,98)^{1/2} \\
 &= 668,75 + 1182,28 \\
 P_{2500} &= 1851 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Determinar la máxima presión en la superficie utilizando el método de “wait and weight” (esperar y agregar peso):

1. Determinar A:

$$A = 5252 - [0,5252(10.000) - 46] + [2712,5 (0,5252 - 0,4992)]$$

$$A = 5252 - (5252 - 46) + 70,525$$

$$A = 24,5$$

2. Determinar la máxima presión en la superficie utilizando el método de “wait and weight”:

$$P_s = \frac{24,5}{2} + \frac{24,5^2}{4} + \frac{(0,5252)(5252)(1)(560)(400)}{(1)(650)}^{1/2}$$

$$= 12,25 + (150,0625 + 95269,98)^{1/2}$$

$$= 12,2 + 975,049$$

$$P_s = 987 \text{ psi}$$

Nomenclatura:

A	= presión en la parte superior de la burbuja de gas, psi
Ci	= gradiente de influjo, psi/pie
D	= profundidad total, pies
Di	= pies en espacio anular ocupados por el volumen de la sarta de perforación
hi	= altura del influjo
MW	= peso de lodo, ppg
Pb	= presión en la formación, psi
Pdi	= presión en la profundidad de interés, psi
Ps	= presión en la superficie, psi
pKWM	= gradiente de presión del lodo con peso de matar, ppg
pm	= gradiente de presión del peso de lodo en uso, ppg
T°F	= temperatura, grados Fahrenheit, a la profundidad de interés
T°R	= temperatura, grados Rankine, a la profundidad de interés
SIDP	= presión estática de la tubería de perforación, psi
SICP	= presión estática de la tubería de revestimiento, psi
X	= profundidad de interés, pie
Zb	= factor de supercompresibilidad en TD
Zdi	= factor de supercompresibilidad en profundidad de interés

Flujo de Gas hacia el Hoyo

El flujo hacia el hoyo aumenta al aumentar la profundidad del hoyo a través de una arena de gas:

$$Q = 0,007 \times md \times Dp \times L \div u \times \ln(Re \div Rw) \times 1.440$$

donde Q = tasa de flujo, bl/min

md = permeabilidad, milidarcy

Dp = diferencial de presión, psi

L = longitud de sección abierta hacia el hoyo, pies

u = viscosidad del gas intruso, centipoise

Re = radio de drenaje, pies

Rw = radio del hoyo, pies

Ejemplo: md = 200 md
 Dp = 624 psi
 L = 20 pies
 u = 0,3 cp

$$\ln(\text{Re} \div \text{Rw}) = 2,0$$

$$Q = 0,007 \times 200 \times 624 \times 20 \div 0,3 \times 2,0 \times 1440$$

$$Q = 20 \text{ bl/min}$$

Por consiguiente: Si se requiere un mínimo para encerrar el pozo, ocurre un aumento en el volumen de la presa de 20 bl además del aumento en el nivel al perforar la sección de 20 pies.

Análisis de Presión

Ecuaciones para la Expansión de Gas

Leyes básicas sobre gas

$$P_1 V_1 \div T_1 = P_2 V_2 \div T_2$$

donde P₁ = presión en la formación, psi

P₂ = presión hidrostática en la superficie o a cualquier profundidad en el hoyo, psi

V₁ = aumento en volumen original de la presa, bl

V₂ = volumen de gas en la superficie o a cualquier profundidad de interés, bl

T₁ = temperatura del fluido de formación grados Rankine (°R = °F + 460)

T₂ = temperatura en la superficie o a cualquier profundidad de interés, grados Rankine

Ley básica sobre gas más factor de compresibilidad:

$$P_1 V_1 \div T_1 Z_1 = P_2 V_2 \div T_2 Z_2$$

donde Z₁ = factor de compresibilidad bajo presión en la formación, sin dimensiones

Z₂ = factor de compresibilidad en la superficie o a cualquier profundidad de interés, sin dimensiones

Ecuación abreviada para la expansión de gas:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

donde P₁ = presión en la formación, psi

P₂ = presión hidrostática más presión atmosférica (14,7 psi), psi

V₁ = aumento en volumen original de la presa, bl

V₂ = volumen de gas en superficie o a cualquier profundidad de interés, bl

Presión Hidrostática Ejercida por Cada Barril de Lodo en Tubería de Revestimiento

Con tubería en el hoyo:

$$\text{psi/bl} = \frac{1029,4}{D_h^2 - D_p^2} \times 0,052 \times \text{peso de lodo, ppg}$$

Ejemplo: Dh – tubería de revestimiento de 9-5/8 pulg. – 43,5 lb/pie = 8,755 pulg, ID
 Dp = 5,0 pulg. OD
 Peso de lodo = 10,5 ppg

$$\text{psi/bl} = \frac{1029,4}{8,755^2 - 5,0^2} \times 0,052 \times 10,5, \text{ ppg}$$

$$\text{psi/bl} = 19,93029 \times 0,052 \times 10,5 \text{ ppg}$$

$$\text{psi/bl} = 10,88$$

Sin tubería en el hoyo:

$$\text{psi/bl} = \frac{1029,4}{ID^2} \times 0,052 \times \text{peso de lodo, ppg}$$

Ejemplo: Dh – tubería de revestimiento de 9-5/8 pulg. – 43,5 lb/pie = 8,755 pulg, ID
 Peso de lodo = 10,5 ppg

$$\text{psi/bl} = \frac{1029,4}{8,755^2} \times 0,052 \times 10,5, \text{ ppg}$$

$$\text{psi/bl} = 13,429872 \times 0,052 \times 10,5 \text{ ppg}$$

$$\text{psi/bl} = 7,33$$

Presión en la Superficie Durante Pruebas de Formación

Determinar la presión en la formación:

$$\text{psi} = \text{peso de lodo equivalente a la presión en la formación, ppg} \times 0,052 \times \text{TVD, pies}$$

Determinar la presión hidrostática del petróleo:

$$\text{psi} = \text{gravedad específica del petróleo} \times 0,052 \times \text{TVD, pies}$$

Determinar la presión en la superficie:

$$\text{Presión en la superficie, psi} = \text{presión en la formación, psi} - \text{presión hidrostática del petróleo, psi}$$

Ejemplo: Arena que contiene petróleo a 12.500 pies con una presión en la formación equivalente a 13,5 ppg. Si la gravedad específica del petróleo es 0,5, ¿qué será la presión estática en la superficie durante una prueba de formación?

Determinar la presión en la formación, psi:

$$\text{FP, psi} = 13,5 \text{ ppg} \times 0,052 \times 12.500 \text{ pies}$$

$$\text{FP} = 8775 \text{ psi}$$

Determinar la presión hidrostática del petróleo:

$$\text{psi} = (0,5 \times 8,33) \times 0,052 \times 12.500 \text{ pies}$$

$$\text{psi} = 2707$$

Determinar la presión en la superficie:

$$\text{Presión en la superficie, psi} = 8775 \text{ psi} - 2707 \text{ psi}$$

$$\text{Presión en la superficie} = 6068 \text{ psi}$$

Cálculos para la Introducción/Extracción de Tuberías a Presión (“Stripping /Snubbing”)

Punto de Cambio de Tipo de Lodo (“Breakover Point”) Entre la Extracción e Introducción de Tubería a Presión

Ejemplo: Utilizar los siguientes datos para determinar el punto de cambio del tipo de lodo:

Datos: Peso de lodo	= 12,5 ppg
Cuellos de perforación (6 ¼ pulg. – 2-13/16 pulg.)	= 83 lb/pie
Longitud de los cuellos de perforación	= 276 pies
Tubería de perforación	= 5,0 pulg.
Peso de tubería de perforación	= 19,5 lb/pie
Presión estática de la tubería de revestimiento	= 2400 psi
Factor de flotabilidad	= 0,8092

Determinar la fuerza, lb, creada por la presión del hoyo sobre los cuellos de perforación de 6 ¼ pulg.:

$$\text{Fuerza, lb} = \left(\frac{\text{diámetro externo (OD) de tubería}}{\text{diámetro de perforación, pulg.}} \right)^2 \times 0,7854 \times \text{presión en hoyo, psi}$$

$$\text{Fuerza, lb} = 6,25^2 \times 0,7854 \times 2400 \text{ psi}$$

$$\text{Fuerza, lb} = 73.631 \text{ lb}$$

Determinar el peso, lb, de los cuellos de perforación:

$$\text{Peso, lb} = \text{peso de cuello de perforación, lb/pie} \times \text{longitud del cuello de perforación, pies} \times \text{factor de flotabilidad}$$

$$\text{Peso, lb} = 83 \text{ lb/pie} \times 276 \text{ pie} \times 0,8092$$

$$\text{Peso, lb} = 18,537 \text{ lb}$$

Peso adicional requerido de la tubería de perforación:

$$\text{Peso de tubería de perforación, lb} = \text{fuerza creada por presión en el hoyo, lb} - \text{peso del cuello de perforación, lb}$$

$$\text{Peso de tubería de perforación, lb} = 73.631 \text{ lb} - 18.537 \text{ lb}$$

$$\text{Peso de tubería de perforación, lb} = 55.294 \text{ lb}$$

Longitud de tubería de perforación requerida para alcanzar punto de cambio de tipo de lodo:

$$\text{Longitud de tubería de perforación, pies} = \left(\frac{\text{peso de tubería de perf. requerido, lb}}{\text{peso de tubería de perf., lb/pie}} \times \text{factor de flotabilidad} \right)$$

$$\text{Longitud de tubería de perforación, pies} = 55.094 \text{ lb} \div (19,5 \text{ lb/pie} \times 0,8092)$$

$$\text{Longitud de tubería de perforación, pies} = 3492 \text{ pie}$$

Longitud de sarta de perforación para alcanzar punto de cambio de tipo de lodo:

$$\text{Longitud de sarta de perforación, pies} = \text{longitud de cuello de perforación, lb} + \text{longitud de tubería de perforación, lb/pie}$$

$$\text{Longitud de sarta de perforación, pies} = 276 \text{ pies} + 3492 \text{ pies}$$

$$\text{Longitud de sarta de perforación, pies} = 3768 \text{ pies}$$

Mínima Presión en la Superficie Antes de Poder Extraer Tubería a Presión

$$\text{Mínima presión en la superficie, psi} = \frac{\text{peso de una haz de cuellos, lb}}{\text{área de cuellos de perforación, pulg.}^2}$$

$$\begin{aligned} \text{Ejemplo: Cuellos de perforación} - 8,0 \text{ pulg. OD} \times 3,0 \text{ pulg. ID} &= 147 \text{ lb/pie} \\ \text{Longitud de una haz} &= 92 \text{ pie} \end{aligned}$$

$$\text{Mínima presión en la superficie, psi} = (147 \text{ lb/pie} \times 92 \text{ pie}) \div (8^2 \times 0,7854)$$

$$\text{Mínima presión en la superficie, psi} = 13.524 \div 50,2656 \text{ pulg.}^2$$

$$\text{Mínima presión en la superficie, psi} = 269 \text{ psi}$$

Aumento en Altura que Resulta de Introducir Tubería en Influj

$$\text{Altura, pies} = \frac{L(\text{Cdp} + \text{Ddp})}{\text{Ca}}$$

donde L = longitud de tubería introducida, pies

Cdp = capacidad de tubería de perforación, cuellos de perforación o tubería de producción, bl/pie

Ddp = desplazamiento de tubería de perforación, cuellos de perforación o tubería de producción, bl/pie

Ca = capacidad anular

Ejemplo: Si se introducen 300 pies de tubería de perforación de 5,0 pulg.- 19,5 lb/pie a presión en un influjo en un hoyo de 12 ¼ pulg, determinar el aumento en la altura, pie:

Datos: Capacidad de la tubería de perforación = 0,01776 bl/pie
 Desplazamiento de la tubería de perforación = 0,00755 bl/pie
 Longitud de tubería de perforación introducida a presión = 300 pies
 Capacidad anular = 0,1215 bl/pie

$$\text{Solución: Altura, pies} = \frac{300 (0,01776 + 0,00755)}{0,1215}$$

$$\text{Altura, pies} = 62,5 \text{ pies}$$

Aumento en Presión en Tubería de Revestimiento debido a Introducir Tubería a Presión en Influjos

$$\text{psi} = \left(\begin{array}{l} \text{aumento en} \\ \text{altura, pie} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{l} \text{gradiente del} \\ \text{lodo, psi/pie} \end{array} - \begin{array}{l} \text{gradiente del} \\ \text{influjos, psi/pie} \end{array} \right)$$

Ejemplo: Aumento en altura = 62,5 pies
 Gradiente del lodo (12,5 ppg x 0,052) = 0,65 psi/pie
 Gradiente del influjo = 0,12 psi/pie

$$\text{psi} = 62,5 \text{ pie} \times (0,65 - 0,12)$$

$$\text{psi} = 33 \text{ psi}$$

Volumen de Lodo a Purgar para Mantener una Presión de Fondo Constante al Subirse una Burbuja de Gas

Con tubería en el hoyo:

$$V_{\text{mud}} = \frac{D_p \times C_a}{\text{gradiente de lodo, psi/pie}}$$

donde V_{mud} = volumen de lodo, bl, que se debe purgar para mantener una presión de fondo constante al subirse una burbuja de gas

D_p = incrementos de presión en que se permitirá a aumentar la presión en la tubería de revestimiento

C_a = capacidad anular, bl/pie

Ejemplo: Incrementos en la presión en la tubería de revestimiento = 100 psi
 Gradiente de lodo (13,5 ppg x 0,052) = 0,70
 Capacidad anular = 0,1215 bl/pie
 ($D_h = 12 \frac{1}{4}$ pulg.; $D_p = 5,0$ pulg.)

$$V_{\text{mud}} = \frac{100 \text{ psi} \times 0,1215 \text{ bl/pie}}{0,702 \text{ psi/pie}}$$

$$V_{\text{mud}} = 17,3 \text{ bl}$$

Sin tubería en el hoyo:

$$V_{\text{mud}} = \frac{D_p \times Ch}{\text{gradiente de lodo, psi/pie}}$$

donde Ch = tamaño del hoyo o diámetro interno de la tubería de revestimiento, pulg.

Ejemplo: Incrementos en la presión en la tubería de revestimiento = 100 psi
 Gradiente de lodo (13,5 ppg x 0,052) = 0,70
 Capacidad del hoyo (12 ¼ pulg.) = 0,1458 bl/pie

$$V_{\text{mud}} = \frac{100 \text{ psi} \times 0,1458 \text{ bl/pie}}{0,702 \text{ psi/pie}}$$

$$V_{\text{mud}} = 20,77 \text{ bl}$$

Máxima Presión Permitida en la Superficie (MASP) Dictada por la Formación

$$\text{MASP, psi} = \left[\begin{array}{l} \text{máximo peso del} \\ \text{lodo permitido, ppg} \end{array} - \begin{array}{l} \text{peso del lodo} \\ \text{en uso, ppg} \end{array} \right] 0,052 \times \begin{array}{l} \text{TVD de zapata de cement. de} \\ \text{la tub. de rev., pies} \end{array}$$

Ejemplo: Máximo peso del lodo permitido = 15,0 ppg
 (datos de la prueba “leak-off”)
 Peso de lodo = 12,0 ppg
 TVD de zapata de cementación de la tubería de revestimiento = 8000 pies

$$\text{MASP, psi} = (15,0 - 12,0) \times 0,052 \times 8000$$

$$\text{MASP} = 1248 \text{ psi}$$

Máxima Presión Permitida en la Superficie (MASP) Dictada por la Presión de Estallido de la Tubería de Revestimiento

$$\text{MASP} = \left(\begin{array}{l} \text{presión de} \\ \text{estallido de tub.} \\ \text{de revest., psi} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Factor de} \\ \text{seguridad} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{peso del} \\ \text{lodo en} \\ \text{uso, ppg} \end{array} - \begin{array}{l} \text{peso del lodo} \\ \text{fuera de tub.} \\ \text{de rev., ppg} \end{array} \right) \times 0,052 \times \left(\begin{array}{l} \text{TVD de} \\ \text{zapata de} \\ \text{cement. de} \\ \text{la tub. de} \\ \text{rev., pie} \end{array} \right)$$

Ejemplo: Tubería de revestimiento – 10 ¾ pulg. – 51 lb/pie N-80
 Presión de estallido de la tubería de revestimiento = 6070 psi
 Profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento = 8000 pies
 Peso del lodo detrás de la tubería de revestimiento = 9,4 ppg
 Peso del lodo en uso = 12,0 ppg
 Factor de seguridad para la tubería de revestimiento = 80%

$$\text{MASP} = (6070 \times 80\%) - [12,0 - 9,4] \times 0,052 \times 8000$$

$$\text{MASP} = 4856 - (2,6 \times 0,052 \times 8000)$$

$$\text{MASP} = 3774 \text{ psi}$$

Consideraciones Submarinas

Reducción en la Presión en Tubería de Revestimiento al Llevar el Pozo en el Estrangulador

Cuando se lleve el pozo en el estrangulador con un conjunto submarino, se debe permitir que la presión en la tubería de revestimiento (presión en el espacio anular) se reduce por la cantidad de pérdida de presión por la línea estranguladora (presión de fricción):

$$\text{Presión reducida en tubería de revestimiento, psi} = \left(\text{presión estática de tubería de revestimiento, psi} \right) - \left(\text{pérdida de presión de la línea estranguladora, psi} \right)$$

Ejemplo: Presión estática en tubería de revestimiento (espacio anular) (SICP) = 800 psi
Pérdida de presión por la línea estranguladora (CLPL) = 300 psi

$$\text{Presión reducida en tubería de revestimiento, psi} = 800 \text{ psi} - 300 \text{ psi}$$

$$\text{Presión reducida en tubería de revestimiento, psi} = 500 \text{ psi}$$

Tabla de Presiones para Llevar el Pozo en el Estrangulador

La relación entre la presión y las emboladas no es una línea recta. Al llevar el pozo en el estrangulador se debe utilizar la siguiente tabla para mantener una presión de fondo constante:

Tabla de Presiones

Línea 1: Reponer cuentaemboladas a "0"	=	0	
Línea 2: ½ tasa de emboladas = 50 x 0,5	=	25	
Línea 3: ¾ tasa de emboladas = 50 x 0,75	=	38	
Línea 4: 7/8 tasa de emboladas = 60 x 0,875	=	44	
Línea 5 Tasa para matar	=	50	

Lado de Emboladas:

Ejemplo: Tasa para matar = 50 emb./min.

Lado de Presión:

Ejemplo: Presión estática de la tubería de revestimiento (SICP) = 800 psi
Pérdida por la línea estranguladora (CLPL) = 300 psi

Dividir la pérdida por la línea estranguladora (CLPL) por 4 porque hay 4 pasos en la tabla:

$$\text{psi/línea} = \frac{(\text{CLPL}) 300 \text{ psi}}{4} = 75 \text{ psi}$$

Tabla de Presiones

Línea 1: Presión estática de tub. de rev. (SICP)	=		800
Línea 2: Sustraer 75 psi de la Línea 1	=		725
Línea 3: Sustraer 75 psi de la Línea 2	=		650
Línea 4: Sustraer 75 psi de la Línea 3	=		575
Línea 5 Presión en tub. de rev. reducida	=		500

Máximo Peso de Lodo Permitido, ppg, Conjunto Submarino derivado de los Datos de la Prueba “Leak-Off”

$$\text{Máximo peso de lodo permitido, ppg} = \left(\text{presión de prueba "leak-off", ppg} \right) \div 0,052 \div \left(\text{TVD, pies RKB a zapata de cement. de tub. de rev.} \right) + \left(\text{peso de lodo en uso, ppg} \right)$$

Ejemplo: Presión de la prueba “leak-off” = 800 psi
 TVD del buje de la mesa rotatoria hasta la zapata de cement. de la tub. de rev. = 4000 pies
 Peso del lodo en uso = 9,2 ppg

$$\text{Máximo peso de lodo permitido, ppg} = 800 \div 0,052 \div 4000 + 9,2$$

$$\text{Máximo peso de lodo permitido, ppg} = 13,0 \text{ ppg}$$

Máxima Presión Estática Permitida en Tubería de Revestimiento (Espacio Anular) (MASICP)

$$\text{MASICP} = \left(\text{máximo peso de lodo permitido, ppg} - \text{peso de lodo en uso, ppg} \right) \times 0,052 \times \left(\text{TVD, pies RKB a zapata de cement. de la tub. de rev.} \right)$$

Ejemplo: Máximo peso de lodo permitido = 13,3 ppg
 Peso de lodo en uso = 11,5 ppg
 TVD del buje de la mesa rotatoria hasta la zapata de cement. de la tub. de rev. = 4000 pies

$$\text{MASICP} = (13,3 \text{ ppg} - 11,5 \text{ ppg}) \times 0,052 \times 4000 \text{ pie}$$

$$\text{MASICP} = 374$$

Presión de Estallido de la Tubería de Revestimiento – Conjunto Submarino**Paso 1**

Determinar la presión límite interna de la tubería de revestimiento utilizando la sección “Dimensiones y Resistencias” del manual de servicio de la compañía de cementación.

Paso 2

Corregir la presión límite interna utilizando el factor de seguridad. Algunas operadoras utilizan el 80%, algunas 75% y otras el 70%.

Presión límite interna corregida, psi = presión límite interna , psi x factor de seguridad

Paso 3

Determinar la presión hidrostática (HP) del lodo en uso:

NOTA: La profundidad es desde el buje de la mesa rotatoria (RKB) hasta la línea de lodo e incluye el colchón de aire más la profundidad del agua.

HP, psi = peso de lodo en uso, ppg x 0,052 x TVD, pies desde RKB hasta línea de lodo

Paso 4

Determinar la presión hidrostática ejercida por el agua (HPsw):

HPsw, psi = peso del agua, ppg x 0,052 x profundidad del agua, pies

Paso 5

Determinar la presión de estallido de la tubería de revestimiento (CBP):

CBP = presión límite interna corregida, psi - HP de lodo en uso, psi + HP del agua, psi

Ejemplo: Determinar la presión de estallido de la tubería de revestimiento con un conjunto submarino utilizando los siguientes datos:

Datos: Peso de lodo	= 10,0 ppg
Peso del agua	= 8,7 ppg
Colchón de aire	= 50 pies
Profundidad del agua	= 1500 pies
Factor de corrección (seguridad)	= 80%

Paso 1

Determinar la presión límite interna de la tubería de revestimiento utilizando la sección “Dimensiones y Resistencias” del manual de servicio de la compañía de cementación.

Tubería de revestimiento de 9 – 5/8” – C-75, 53,5 lb/pie

Presión límite interna = 7430 psi

Paso 2

Corregir la presión límite interna utilizando el factor de seguridad:

Presión límite interna corregida, psi = 7430 psi x 0,80

Presión límite interna corregida, psi = 5944 psi

Paso 3

Determinar la presión hidrostática (HP) del lodo en uso:

$$\text{HP del lodo, psi} = 10,0 \text{ psi} \times 0,052 \times (50 \text{ pies} + 1500 \text{ pies})$$

$$\text{HP del lodo} = 806 \text{ psi}$$

Paso 4

Determinar la presión hidrostática ejercida por el agua (HPsw):

$$\text{HPsw, psi} = 8,7 \text{ ppg} \times 0,052 \times 1500 \text{ pies}$$

$$\text{HPsw} = 679 \text{ psi}$$

Paso 5

Determinar la presión de estallido de la tubería de revestimiento (CBP):

$$\text{Presión de estallido de la tubería de revestimiento, psi} = 5944 \text{ psi} - 806 \text{ psi} + 679 \text{ psi}$$

$$\text{Presión de estallido de la tubería de revestimiento, psi} = 5817$$

Calcular Pérdida de Presión por la Línea Estranguladora (CLPL), psi

$$\text{CLPL} = \frac{0,000061 \times \text{MW, ppg} \times \text{longitud, pie} \times \text{GPM}^{1,86}}{\text{Diámetro interno (ID) de línea estranguladora, pulg.}^{4,86}}$$

Ejemplo: Determinar la pérdida de presión por la línea estranguladora (CLPL), psi, utilizando los siguientes datos:

Datos:	Peso de lodo	= 14,0 ppg
	Longitud de la línea estranguladora	= 2000 pies
	Tasa de circulación	= 225 gpm
	Diámetro interno de la línea estranguladora	= 2,5 pulg.

$$\text{CLPL} = \frac{0,000061 \times 14,0 \text{ ppg} \times 2000 \text{ pies} \times 225^{1,86}}{2,5 \text{ pulg.}^{4,86}}$$

$$\text{CLPL} = \frac{40508,611}{85,899066}$$

$$\text{CLPL} = 471,58 \text{ psi}$$

Velocidad, pie/min, (V) a través de la línea estranguladora

$$V, \text{ pie/min} = \frac{24,5 \times \text{gpm}}{\text{ID, pulg.}^2}$$

Ejemplo: Determinar la velocidad, pie/min, a través de la línea estranguladora utilizando los siguientes datos:

$$V, \text{ pie/min} = \frac{24,5 \times 225}{2,5^2}$$

$$V = 882 \text{ pie/min}$$

Ajustar la Pérdida de Presión por la Línea Estranguladora debida a un mayor Peso de Lodo

$$\text{Nueva CLPL} = \frac{\text{mayor peso de lodo, ppg} \times \text{CLPL}}{\text{peso de lodo original, ppg}}$$

Ejemplo: Utilizar los siguientes datos para determinar la nueva pérdida estimada de presión por la línea estranguladora:

Datos:	Peso de lodo original	= 13,5 ppg
	Nuevo peso de lodo	= 15,0 ppg
	Pérdida de presión anterior por la línea estranguladora	= 300 psi

$$\text{Nueva CLPL} = \frac{15,0 \text{ ppg} \times 300 \text{ psi}}{13,5 \text{ ppg}}$$

$$\text{Nueva CLPL} = 333,33 \text{ psi}$$

Mínima Profundidad de Asentamiento del Tubo Conductor

Ejemplo: Utilizando los siguientes datos, determinar la mínima profundidad de asentamiento del tubo conductor por debajo del lecho marino:

Datos:	Profundidad del agua	= 450 pies
	Gradiente del agua	= 0,445 psi/pie
	Colchón de aire	= 60 pie
	Gradiente de fractura de la formación	= 0,68 psi/pie
	Máxima peso de lodo (que será utilizado para perforar este intervalo)	= 9,0 ppg

Paso 1

Determinar la presión de fractura de la formación:

$$\text{psi} = (450 \times 0,445) + (0,68 \times \text{"y"})$$

$$\text{psi} = 200,25 + 0,68 \text{"y"}$$

Paso 2

Determinar la presión hidrostática de la columna de lodo:

$$\text{psi} = 9,0 \text{ ppg} \times 0,052 \times (60 + 450 + \text{"y"})$$

$$\text{psi} = [9,0 \times 0,052 \times (60 + 450)] + (9,0 \times 0,052 \times \text{"y"})$$

$$\text{psi} = 238,68 + 0,468 \text{"y"}$$

Paso 3

Mínima profundidad de asentamiento del tubo conductor:

$$\begin{aligned} 20,25 + 0,68''y'' &= 238,68 + 468''y'' \\ 0,68''y'' - 0,468''y'' &= 238,68 - 200,25 \\ 0,212''y'' &= 38,43 \\ y'' &= \frac{38,43}{0,212} \end{aligned}$$

$$y'' = 181,3 \text{ pies}$$

Por consiguiente, la mínima profundidad de asentamiento del tubo conductor es 181,3 pies por debajo del lecho marino.

Máximo Peso de Lodo con Retornos Hacia la Planchada

Ejemplo: Determinar el máximo peso de lodo que se puede utilizar con retornos hacia la planchada utilizando los siguientes datos:

Datos:	Profundidades:	
	Colchón de aire	= 75 pies
	Profundidad del agua	= 600 pies
	Tubo conductor asentado a	= 1225 pies RKB
	Gradiente del agua	= 0,445 psi/pie
	Gradiente de fractura de la formación	= 0,58 psi/pie

Paso 1

Determinar la presión total en asiento de la tubería de revestimiento:

$$\text{psi} = [0,58 (1225 - 600 - 75)] + (0,445 \times 600)$$

$$\text{psi} = 319 + 267$$

$$\text{psi} = 586$$

Paso 2

Determinar el máximo peso de lodo:

$$\text{Máximo peso de lodo} = 586 \text{ psi} \div 0,052 \div 1225 \text{ pie}$$

$$\text{Máximo peso de lodo} = 9,2 \text{ ppg}$$

Reducción en Presión de Fondo si se Desconecta el Tubo Vertical

Ejemplo: Utilizar los siguientes datos para determinar la reducción en la presión de fondo si se desconecta el tubo vertical:

Datos:	Colchón de aire	= 75 pies
	Profundidad del agua	= 70 pies
	Gradiente del agua	= 0,445 psi/pie
	Profundidad del pozo	= 202 pies RKB
	Peso de lodo	= 9,0 ppg

Paso 1

Determinar la presión de fondo (BHP):

$$\text{BHP} = 9,0 \text{ ppg} \times 0,052 \times 2020 \text{ pies}$$

$$\text{BHP} = 945,4 \text{ psi}$$

Paso 2

Determinar la presión de fondo con el tubo vertical desconectado:

$$\text{BHP} = (0,445 \times 700) + [9,0 \times 0,052 \times (2020 - 700 - 75)]$$

$$\text{BHP} = 311,5 + 582,7$$

$$\text{BHP} = 894,2 \text{ psi}$$

Paso 3

Determinar la reducción en la presión de fondo:

$$\text{Reducción en BHP} = 945,4 \text{ psi} - 894,2 \text{ psi}$$

$$\text{Reducción en BHP} = 51,2$$

Presión de Fondo al Circular una Arremetida hacia afuera

Ejemplo: Utilizar los siguientes datos para determinar la presión de fondo al circular una arremetida hacia afuera:

Datos:	Profundidad total – RKB	= 13,500 pies
	Altura de la arremetida de gas en tubería de revestimiento	= 1200 pies
	Gradiente de gas	= 0,12 psi/pie
	Peso de lodo original	= 12,0 ppg
	Peso de lodo para matar	= 12,7 ppg
	Pérdida de presión en espacio anular	= 75 psi
	Pérdida de presión por línea estranguladora	220 psi
	Colchón de aire	= 75 pie
	Profundidad del agua	= 1500 pies
	Presión en espacio anular (tubería de revestimiento)	= 631 psi
	Lodo original en tubería de revestimiento por debajo del gas	= 5500 pies

Paso 1

Presión hidrostática en línea estranguladora:

$$\text{psi} = 12,0 \text{ ppg} \times 0,052 \times (1500 + 75)$$

$$\text{psi} = 982,8$$

Paso 2

Presión hidrostática ejercida por el influjo de gas:

$$\text{psi} = 0,12 \text{ psi/pie} \times 1200 \text{ pie}$$

$$\text{psi} = 144$$

Paso 3

Presión hidrostática del lodo original por debajo del influjo de gas:

$$\begin{aligned} \text{psi} &= 12,0 \text{ ppg} \times 0,052 \times 5500 \text{ pies} \\ \text{psi} &= 3432 \end{aligned}$$

Paso 4

Presión hidrostática del lodo con peso de matar:

$$\begin{aligned} \text{psi} &= 12,7 \text{ ppg} \times 0,052 \times (13.500 - 5500 - 1200 - 1500 - 75) \\ \text{psi} &= 12,7 \text{ ppg} \times 0,052 \times 5225 \\ \text{psi} &= 3450,59 \end{aligned}$$

Paso 5

Presión de fondo al circular una arremetida hacia afuera:

Presión en línea estranguladora	= 982,8	psi
Presión del influjo de gas	= 144	psi
Lodo original por debajo del gas en tubería de revestimiento	= 3432	psi
Lodo con peso de matar	= 3450,59	psi
Presión en espacio anular (tubería de revestimiento)	= 630	psi
Pérdida de presión por la línea estranguladora	= 200	psi
Pérdida de presión anular	<u>75</u>	psi
Presión de fondo al circular una arremetida hacia afuera	= 8914,4	psi

Operaciones de Rehabilitación

NOTA: Los siguientes procedimientos y cálculos se utilizan más comúnmente en operaciones de rehabilitación, sin embargo en ocasiones son utilizados en operaciones de perforación.

“Bullheading”

“Bullheading” es el término utilizado para describir el procedimiento de matar el pozo a través de forzar los fluidos de la formación de regreso en la formación mediante el bombeo de fluido con peso de matar por la tubería de producción y en algunos casos por la tubería de revestimiento.

El método “bullheading” de matar un pozo se utiliza principalmente en las siguientes situaciones:

- Tubería de producción en el pozo con un conjunto de obturador de empaque. No existe ninguna comunicación entre la tubería de producción y el espacio anular.
- Tubería de producción en el pozo, influjo en el espacio anular y por alguna razón, no se puede circular a través de la tubería de producción.
- No hay tubería de producción en el pozo. Hay influjo en la tubería de revestimiento. “Bullheading” es el método más sencillo, más rápido y más seguro para matar el pozo.

NOTA: También la tubería de producción podría estar muy alejada del fondo.

d) En operaciones de perforación, se ha utilizado el método de “bullheading” exitosamente en áreas donde exista la posible presencia de sulfuro de hidrógeno.

Ejemplos de cálculos que se utilizan en operaciones de “bullheading”:

Se harán los cálculos necesarios para matar el pozo mediante “bullheading” utilizando los siguientes datos. Los cálculos del ejemplo corresponden al caso “a)” anterior.

Datos: Profundidad del cañoneo	= 6480 pies
Gradiente de fractura	= 0,862 psi/pie
Gradiente de la presión de fractura	= 0,401 psi/pie
Presión hidrostática de la tubería de producción (THP)	= 326 psi
Presión estática de la tubería de producción	= 2000 psi
Tubería de producción	= 2-7/8 pulg. – 6,5 lb/pie
Capacidad de la tubería de producción	= 0,00579 bl/pie
Presión límite interna de la tubería de producción	= 7260 psi
Densidad del fluido de matar	= 8,4 ppg

NOTA: Determinar la mejor tasa de bomba a usar. La tasa de bomba debe exceder la tasa de migración de burbujas de gas hacia arriba en la tubería de producción. Se puede determinar la tasa de migración de burbujas de gas, pie/hora, en un pozo encerrado utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Tasa de migración de gas, pie/hora} = \left(\text{aumento en la presión por hora, psi} \right) \div \left(\text{gradiente del fluido de completación, psi/pie} \right)$$

Solución:

Calcular la máxima presión permitida en la tubería de producción (superficie) (MATP) para fractura de formación:

a) MATP, inicial, con influjo en la tubería de producción:

$$\text{MATP, inicial} = \left(\text{gradiente de fractura, psi/pie} \times \text{profundidad del cañoneo, pies} \right) - \left(\text{presión hidrostática de la tubería de producción, psi} \right)$$

$$\text{MATP, inicial} = (0,862 \text{ psi/pie} \times 6480 \text{ pie}) - 326 \text{ psi}$$

$$\text{MATP, inicial} = 5586 \text{ psi} - 326 \text{ psi}$$

$$\text{MATP, inicial} = 5260$$

b) MATP, final, con fluido de matar en tubería de producción:

$$\text{MATP, final} = \left(\text{gradiente de fractura, psi/pie} \times \text{profundidad del cañoneo, pies} \right) - \left(\text{presión hidrostática de la tubería de producción, psi} \right)$$

$$\text{MATP, final} = (0,862 \times 6480) - (8,4 \times 0,052 \times 6480)$$

$$\text{MATP, final} = 5586 \text{ psi} - 2830 \text{ psi}$$

$$\text{MATP, final} = 2756 \text{ psi}$$

Determinar capacidad de tubería de producción:

$$\text{Capacidad de tubería de producción, bl} = \left(\begin{array}{l} \text{longitud de tubería} \\ \text{de producción, pie} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{l} \text{capacidad de tubería} \\ \text{de producción, bl/pie} \end{array} \right)$$

$$\text{Capacidad de tubería de producción, bl} = 6480 \text{ pies} \times 0,00579 \text{ bl/pie}$$

$$\text{Capacidad de tubería de producción} = 37,5 \text{ bl}$$

Trazar estos valores como se muestra a continuación:

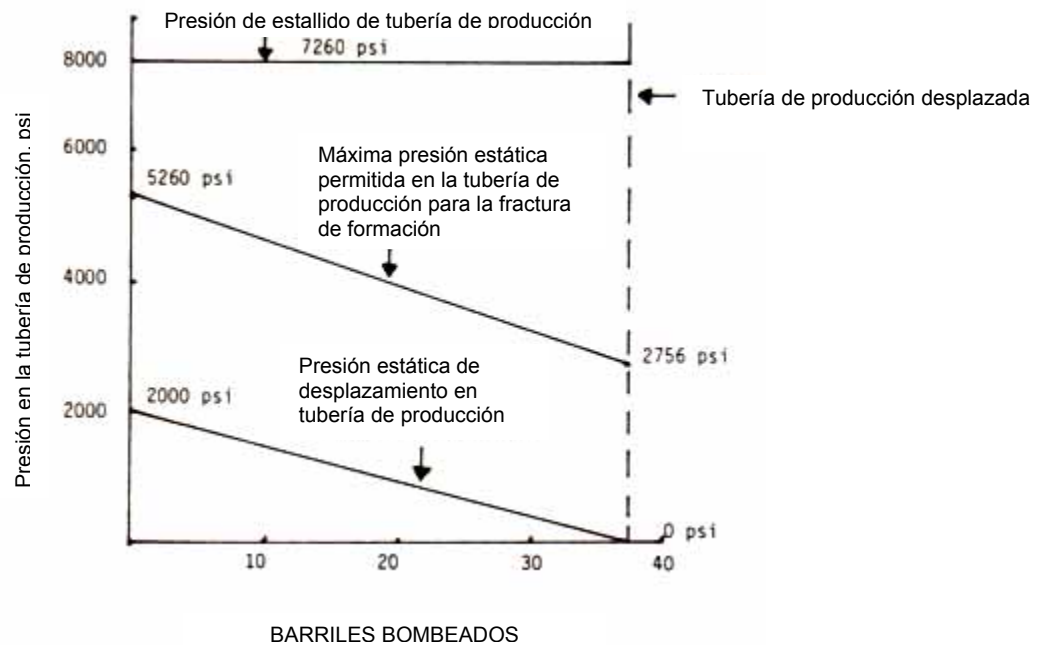


Figura 4-2. Perfil de presión en la tubería de producción

Lubricar y Purgar

El método “lubricar y purgar” implica alternar entre bombear un fluido de matar en la tubería de producción o en la tubería de revestimiento en caso que no haya tubería de producción en el pozo, permitir que el fluido de matar caiga y luego purgar un volumen de gas hasta que el fluido de matar alcance el estrangulador. Al bombear cada volumen de fluido de matar en la tubería de producción, la presión estática en la tubería de producción (SITP) deberá disminuir por un valor calculado hasta que el pozo esté matado.

Se utiliza este método frecuentemente por dos razones: 1) las presiones estáticas se aproximan la presión nominal de trabajo del cabezal o tubería de producción y la presión de bombeo dinámico podría exceder los límites, como en el caso de “bullheading”, y 2) para matar el pozo completamente o bajar la SITP a un valor al cual se puede utilizar otros métodos de matar con seguridad sin exceder los límites estipulados.

También se puede aplicar este método cuando el hoyo o cañoneo estén tapado, dejando el método de “bullheading” sin utilidad. En este caso, el pozo puede ser matado sin necesitar el uso de tubería de producción o introducir tubería de menor diámetro a presión.

Los usuarios deberán estar conscientes de que el método “lubricar y purgar” muchas veces requiere mucho tiempo, mientras otro método podrá matar el pozo más rápidamente. A continuación se presenta un ejemplo de un procedimiento “lubricar y purgar” para matar el pozo.

Ejemplo: Se ha programado una rehabilitación de un pozo en el cual la SITP se aproxima la presión de trabajo de los equipos del cabezal de pozo. Para minimizar la posibilidad de la falla de los equipos se utilizará el método “lubricar y purgar” para reducir la SITP a un nivel al cual se puede realizar “bullheading” de manera segura. Se utilizarán los siguientes datos para describir el procedimiento:

TVD	= 6500 pies
Profundidad del cañoneo	= 6450 pies
SITP	= 2830 psi
Tubería de producción	= 2-7/8 pulg. – 6,5 lb/pie – N-80
Capacidad de la tubería de producción	= 0,00579 bl/pie 172,76 pie/bl
Presión límite interna de la tubería de producción	= 10.570 psi
Presión de trabajo del cabezal de pozo	= 3000 psi
Densidad del fluido de matar	= 9,0 ppg

Cálculos:

Calcular la reducción esperada en la presión para cada barril de fluido de matar bombeado:

$\text{psi/bl} = \text{capacidad de tub. de prod., pie/bl} \times 0,052 \times \text{fluido con peso de matar, ppg}$

$\text{psi/bl} = 172,76 \text{ pie/bl} \times 0,052 \times 9,0 \text{ ppg}$

$\text{psi/bl} = 80,85$

Para cada barril bombeado, se reducirá la SICP por 80,85 psi.

Calcular la capacidad de la tubería de producción, bl, hasta el cañoneo:

$\text{bl} = \text{capacidad de la tubería de producción, bl/pie} \times \text{profundidad hasta el cañoneo, pie}$

$\text{bl} = 0,00579 \text{ bl/pie} \times 6450 \text{ pies}$

$\text{bl} = 37,3 \text{ bl}$

Procedimiento:

1. Vestir todos los equipos en la superficie incluyendo las bombas y líneas hasta el quemador de gas.
2. Registrar la SITP y SICP.
3. Abrir el estrangulador para permitir el escape de gas desde el pozo y momentáneamente reducir la SITP.
4. Cerrar el estrangulador y bombear salmuera de 9,0 ppm hasta que la presión en la tubería de producción alcance 2830 psi.

5. Esperar durante un tiempo para permitir que la salmuera caiga por la tubería de producción. Este periodo variará entre 15 minutos y 1 hora, dependiendo de la densidad del gas, presión y tamaño de la tubería de producción.
6. Abrir el estrangulador y purgar el gas hasta la salmuera de 9,0 ppg comience a escapar.
7. Cerrar el estrangulador y bombear salmuera de 9,0 ppg.
8. Continuar el proceso hasta lograr una presión de trabajo segura, de un bajo nivel.

Se requiere un cierto tiempo para que el fluido de matar caiga por la tubería de producción después de detener el bombeo. El tiempo de espera no es para permitir que caiga el fluido, sino para que el gas migre hacia arriba a través del fluido de matar. El gas migra a tasas entre 1000 y 2000 pie/hora. Por consiguiente, se requiere de un tiempo considerable para que el fluido caiga o migre a 6500 pies. Por lo tanto, después de bombear es importante esperar durante varios minutos antes de purgar el gas para evitar la purga del fluido de matar a través del estrangulador.

Referencias

- Adams, Neal, *Well Control Problems and Solutions*, PennWell Publishing Company, Tulsa, OK, 1980.
- Adams, Neal, *Workover Well Control*, PennWell Publishing Company, Tulsa, OK, 1984.
- Goldsmith, Riley, *Why Gas Cut Mud Is Not Always a Serious Problem*, *World Oil*, Oct. 1972.
- Grayson, Richard y Fred S. Mueller, *Pressure Drop Calculations For a Deviated Wellbore*, Well Control Trainers Roundtable, Abril de 1991.
- Petex, *Practical Well Control*, Petroleum Extension Service, University of Texas, Austin, Tx, 1982.
- Well Control Manual*, Baroid Division, N.L. Petroleum Services, Houston, Texas.
- Varias Escuelas/Cursos/Manuales de Control de Pozos
- NL Baroid, Houston Texas
 - USL Petroleum Training Service, Lafayette, LA.
 - Prentice & Records Enterprises, Inc., Lafayette, LA.
 - Milchem Well Control, Houston, Texas.
 - Petroleum Extension Service, University of Texas, Houston, Texas.
 - Aberdeen Well Control School, Gene Wilson, Aberdeen, Escocia

CAPÍTULO CINCO

CÁLCULOS DE INGENIERÍA

Selección de Boquillas para la Mecha – Hidráulica Optimizada

Estas series de fórmulas determinarán los tamaños correctos de los chorros cuando se optimice por el impacto de chorro o caballos de fuerza hidráulica y el caudal óptimo para dos ó tres boquillas.

1. Área de boquilla, pulgadas cuadradas:

$$\text{Área de boquilla, pulg.}^2 = \frac{N_1^2 + N_2^2 + N_3^2}{1303,8}$$

2. Pérdida de presión de la boquilla de la mecha, psi (Pb):

$$P_b = \frac{\text{Gpm}^2 \times \text{MW, ppg}}{10858 \times \text{área de boquilla, pulg.}^2}$$

3. Pérdidas totales de presión salvo la pérdida de presión por la boquilla de la mecha, psi (Pc):

$$P_{c1} \text{ y } P_{c2} = \text{presión circulante, psi} - \text{pérdida de presión por la boquilla de la mecha, psi}$$

4. Determinar la inclinación de la línea M:

$$M = \frac{\log(P_{c1} \div P_{c2})}{\log(Q_1 \div Q_2)}$$

5. Pérdidas óptimas de presión (Popt)

- a) Por fuerza de impacto:

$$P_{opt} = \frac{2}{M + 2} \times P_{max}$$

- b) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$P_{opt} = \frac{1}{M + 1} \times P_{max}$$

6. Caudal óptimo (Qopt):

- a) Por fuerza de impacto:

$$Q_{opt} = \left(\frac{P_{opt}}{P_{max}} \right)^{1-M} \times Q_1$$

- b) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$Q_{opt} = \frac{P_{opt}}{P_{max}}^{1-M} \times Q_1$$

7. Para determinar la presión en la mecha (Pb):

$$P_b = P_{\max} - P_{\text{opt}}$$

8. Para determinar el área de la boquilla, pulgadas cuadradas:

$$\text{Área de la boquilla, pulg. cuad.} = \sqrt{\frac{Q_{\text{opt}}^2 \times MW, \text{ ppg}}{10858 \times P_{\max}}}$$

9. Para determinar boquillas, 1/32 pulg., para tres boquillas:

$$\text{Boquillas} = \sqrt{\frac{\text{área.de.boquilla, pulg}^2}{3 \times 0,7854}} \times 32$$

10. Para determinar boquillas, 1/32 pulg., para dos boquillas:

$$\text{Boquillas} = \sqrt{\frac{\text{área.de.boquilla, pulg}^2}{2 \times 0,7854}} \times 32$$

Ejemplo: Optimizar la hidráulica de la mecha en un pozo con las siguientes características:

Seleccionar los tamaños de chorro apropiados por fuerza de impacto y caballos de fuerza hidráulica para dos y tres boquillas:

Datos: Peso de lodo	= 13,0 ppg
Tamaño de chorros	= 17-17-17
Máxima presión en la superficie	= 3000 psi
Presión de bomba 1	= 3000 psi
Tasa de bomba 1	= 420 gpm
Presión de bomba 2	= 1300 psi
Tasa de bomba 2	= 275 gpm

1. Área de boquilla, pulgadas cuadradas:

$$\text{Área de boquilla, pulg.}^2 = \frac{17^2 + 17^2 + 17^2}{1303,8}$$

$$\text{Área de boquilla, pulg.}^2 = 0,664979$$

2. Pérdida de presión de la boquilla de la mecha, psi (Pb):

$$P_{b1} = \frac{420^2 \times 13,0}{10858 \times 0,664979^2}$$

$$P_{b1} = 478 \text{ psi}$$

$$P_{b2} = \frac{275^2 \times 13,0}{10858 \times 0,664979^2}$$

$$P_{b2} = 205 \text{ psi}$$

3. Pérdidas totales de presión salvo la pérdida de presión por la boquilla de la mecha, psi (Pc):

$$P_{c1} = 3000 \text{ psi} - 478 \text{ psi}$$

$$P_{c1} = 2522 \text{ psi}$$

$$P_{c2} = 1300 \text{ psi} - 205 \text{ psi}$$

$$P_{c2} = 1095 \text{ psi}$$

4. Determinar la inclinación de la línea M:

$$M = \frac{\log (2522 \div 1095)}{\log (420 \div 275)}$$

$$M = \frac{0,3623309}{0,1839166}$$

$$M = 1,97$$

5. Pérdidas óptimas de presión (Popt)

- c) Por fuerza de impacto:

$$P_{opt} = \frac{2}{1,97 + 2} \times 3000$$

$$P_{opt} = 1511 \text{ psi}$$

- d) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$P_{opt} = \frac{1}{1,97 + 1} \times 3000$$

$$P_{opt} = 1010 \text{ psi}$$

6. Caudal óptimo (Qopt):

- c) Por fuerza de impacto:

$$Q_{opt} = \left(\frac{1511}{3000} \right)^{1-1,97} \times 420$$

$$Q_{opt} = 297 \text{ gpm}$$

- d) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$Q_{opt} = \left(\frac{1010}{3000} \right)^{1-1,97} \times 420$$

$$Q_{opt} = 242 \text{ gpm}$$

7. Para determinar la presión en la mecha (Pb):

- a) Por fuerza de impacto:

$$P_b = 3000 \text{ psi} - 1511 \text{ psi}$$

$$P_b = 1489$$

b) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$P_b = 3000 \text{ psi} - 1010 \text{ psi}$$

$$P_b = 1990 \text{ psi}$$

8. Para determinar el área de la boquilla, pulgadas cuadradas:

a) Por fuerza de impacto:

$$\text{Área de la boquilla, pulg. cuad.} = \sqrt{\frac{297^2 \times 13,0}{10858 \times 1489}}$$

$$\text{Área de la boquilla, pulg. cuad.} = \sqrt{0,070927}$$

$$\text{Área de la boquilla, pulg. cuad.} = 0,26632$$

b) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$\text{Área de la boquilla, pulg. cuad.} = \sqrt{\frac{242^2 \times 13,0}{10858 \times 1990}}$$

$$\text{Área de la boquilla, pulg. cuad.} = \sqrt{0,03523}$$

$$\text{Área de la boquilla, pulg. cuad.} = 0,1877$$

9. Para determinar boquillas, 1/32 pulg., para tres boquillas:

a) Por fuerza de impacto:

$$\text{Boquillas} = \sqrt{\frac{0,26632}{3 \times 0,7854}} \times 32$$

$$\text{Boquillas} = 10,76$$

b) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$\text{Boquillas} = \sqrt{\frac{0,1877}{3 \times 0,7854}} \times 32$$

$$\text{Boquillas} = 9,03$$

NOTA: Generalmente el tamaño de boquilla tendrá una fracción decimal. La fracción multiplicada por 3 determinará cuántas boquillas deberán ser más grandes de la calculada.

a) Por la fuerza de impacto:

$$0,76 \times 3 = 2,28 \text{ redondeado a } 2$$

$$\text{por consiguiente: } 1 \text{ chorro} = 10/32$$

$$2 \text{ chorros} = 11/32$$

b) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$0,03 \times 3 = 0,09 \text{ redondeado a } 0$$

$$\text{por consiguiente: } 3 \text{ chorros} = 9/32$$

10. Para determinar boquillas, 1/32 pulg., para dos boquillas:

a) Por la fuerza de impacto:

$$\text{Boquillas} = \sqrt{\frac{0,26632}{2 \times 0,7854}} \times 32$$

$$\text{Boquillas} = 13,18 \text{ pulg.}^2$$

b) Por caballos de fuerza hidráulica:

$$\text{Boquillas} = \sqrt{\frac{0,1877}{2 \times 0,7854}} \times 32$$

$$\text{Boquillas} = 11,06 \text{ pulg.}^2$$

Análisis de la Hidráulica

Esta serie de cálculos está diseñada para analizar de manera rápida y precisa los varios parámetros de la hidráulica de la mecha.

1. Velocidad anular, pie/min (AV):

$$AV = \frac{24,5 \times Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

2. Pérdida de presión por boquilla de chorro, psi (Pb):

$$Pb = \frac{156,5 \times Q^2 \times MW}{[(N1)^2 + (N2)^2 + (N3)^2]^2}$$

3. Caballos de fuerza hidráulica disponibles en el sistema (Sys HHP):

$$\text{Sys HHP} = \frac{\text{superficie, psi} \times Q}{1714}$$

4. Caballos de fuerza hidráulica en la mecha (HHPb):

$$\text{HHPb} = \frac{Q \times Pb}{1714}$$

5. Caballos de fuerza hidráulica por cada pulgada cuadrada del diámetro de la mecha:

$$\text{HHPb/pulg. cuad.} = \frac{\text{HHPb} \times 1,27}{\text{tamaño de la mecha}^2}$$

6. Porcentaje de pérdida de presión en la mecha (%psib):

$$\%psib = \frac{Pb}{\text{superficie, psi}} \times 100$$

7. Velocidad de chorro, pie/seg. (Vn):

$$V_n = \frac{417,2 \times Q}{(N_1)^2 + (N_2)^2 + (N_3)^2}$$

8. Fuerza de impacto, lb, en la mecha (IF):

$$IF = \frac{(MW) (V_n) (Q)}{1930}$$

9. Fuerza de impacto por pulgada cuadrada del área de mecha (IF/pulg. cuad.):

$$IF/\text{pulg. cuad.} = \frac{IF \times 1,27}{\text{tamaño de mecha}^2}$$

Nomenclatura:

AV	=	velocidad anular, pie/min
Q	=	tasa de circulación, gpm
Dh	=	diámetro del hoyo, pulg.
Dp	=	diámetro externo de tubería o cuello, pulg.
MW	=	peso de lodo, ppg
N ₁ ;N ₂ ;N ₃	=	tamaños de boquillas de chorro, 1/32 pulg.
Pb	=	pérdida de presión por la boquilla de chorro, psi
HHP	=	caballos de fuerza hidráulica en la mecha
Vn	=	velocidad de chorro, pie/seg.
IF	=	fuerza de impacto, lb
IF/pulg. ²	=	fuerza de impacto lb/pulg. ² del diámetro de la mecha.

<i>Ejemplo:</i>	Peso de lodo	= 12,0 ppg
	Tasa de circulación	= 520 gpm
	Tamaño de boquilla 1	= 12/32 pulg.
	Tamaño de boquilla 2	= 12/32 pulg.
	Tamaño de boquilla 3	= 12/32 pulg.
	Tamaño del hoyo	= 12 ¼ pulg.
	Diámetro externo de tubería de perforación	= 5,0 pulg.
	Presión en la superficie	= 3000 psi

1. Velocidad anular, pie/min (AV):

$$AV = \frac{24,5 \times 520}{12,25^2 - 5,0^2}$$

$$AV = \frac{12740}{125,0625}$$

$$AV = 102 \text{ pie/min}$$

2. Pérdida de presión por boquilla de chorro, psi (Pb):

$$P_b = \frac{156,5 \times 520^2 \times 12,0}{(12^2 + 12^2 + 12^2)^2}$$

$$P_b = 2721 \text{ psi}$$

3. Caballos de fuerza hidráulica disponibles en el sistema (Sys HHP):

$$\text{Sys HHP} = \frac{3000 \times 520}{1714}$$

$$\text{Sys HHP} = 910$$

4. Caballos de fuerza hidráulica en la mecha (HHPb):

$$\text{HHPb} = \frac{2721 \times 520}{1714}$$

$$\text{HHPb} = 826$$

5. Caballos de fuerza hidráulica por cada pulgada cuadrada del diámetro de la mecha:

$$\text{HHPb/pulg. cuad.} = \frac{826 \times 1,27}{12,25^2}$$

$$\text{HHPb/pulg. cuad.} = 6,99$$

6. Porcentaje de pérdida de presión en la mecha (%psib):

$$\%psib = \frac{2721}{3000} \times 100$$

$$\%psib = 90,7$$

7. Velocidad de chorro, pie/seg. (Vn):

$$V_n = \frac{417,2 \times 520}{12^2 + 12^2 + 12^2}$$

$$V_n = \frac{216944}{432}$$

$$V_n = 502 \text{ pie/seg.}$$

8. Fuerza de impacto, lb, en la mecha (IF):

$$\text{IF} = \frac{12,0 \times 502 \times 520}{1930}$$

$$\text{IF} = 1623$$

9. Fuerza de impacto por pulgada cuadrada del área de mecha (IF/pulg. cuad.):

$$\text{IF/pulg. cuad.} = \frac{1623 \times 1,27}{12,25^2}$$

$$\text{IF/pulg. cuad.} = 13,7$$

Velocidad Anular Crítica y Caudal Crítico

1. Determinar n:

$$n = 3,32 \log \frac{\theta 600}{\theta 300}$$

2. Determinar K:

$$K = \frac{\theta 600}{1022^n}$$

3. Determinar x:

$$x = \frac{81600 (Kp) (n)^{0,387}}{(Dh - Dp)^n MW}$$

4. Determinar la velocidad anular crítica:

$$Avc = (x)^{1+2-n}$$

5. Determinar caudal crítico:

$$GPMc = \frac{Avc (Dh^2 - Dp^2)}{24,5}$$

Nomenclatura:

n	=	sin dimensiones
K	=	sin dimensiones
x	=	sin dimensiones
θ600	=	lectura de 600 en viscosímetro
θ300	=	lectura de 300 en viscosímetro
Dh	=	diámetro del hoyo, pulg.
Dp	=	diámetro externo de tubería o cuello, pulg.
MW	=	peso de lodo, ppg
AVc	=	velocidad anular crítica, pie/min
GPMc	=	caudal crítico, gpm

<i>Ejemplo:</i>	Peso de lodo	= 14,0 ppg
	θ600	= 64
	θ300	= 37
	Diámetro del hoyo	= 8,5 pulg.
	Diámetro externo de la tubería	= 7,0 pulg

1. Determinar n:

$$n = 3,32 \log \frac{64}{37}$$

$$n = 0,79$$

2. Determinar K:

$$K = \frac{64}{1022^{0,79}}$$

$$K = 0,2684$$

3. Determinar x:

$$x = \frac{81600 (0,2684) (0,79)^{0,387}}{(8,5 - 7)0,79 \times 14,0}$$

$$x = \frac{19967,413}{19,2859}$$

$$x = 1035$$

4. Determinar la velocidad anular crítica:

$$A_{vc} = (1035)^{1 \div (2 - 0,79)}$$

$$A_{vc} = (1035)^{0,8264}$$

$$A_{vc} = 310 \text{ pie/min}$$

5. Determinar caudal crítico:

$$\text{GPMc} = \frac{310 (8,5^2 - 7,0^2)}{24,5}$$

$$\text{GPMc} = 294 \text{ gpm}$$

Exponente "d"

El exponente "d" se deriva de la ecuación de perforación general:

$$R \div N = a (W^d \div D)$$

donde R = tasa de penetración

N = velocidad rotatoria, rpm

a = un constante, sin dimensiones

W = peso sobre la mecha, lb

d = exponente en ecuación de perforación general, sin dimensiones

Ecuación del exponente "d":

$$"d" = \log (R \div 60N) \div \log (12W \div 1000D)$$

donde d = exponente d, sin dimensiones

R = tasa de penetración, pie/hora

N = velocidad rotatoria, rpm

W = peso sobre la mecha, 1.000 lb

D = tamaño de la mecha, pulg.

Ejemplo: R = 30 pie/hora

N = 120 rpm

$$W = 35.000 \text{ lb}$$

$$D = 8,5 \text{ pulg.}$$

$$\text{Solución: } d = \log [30 \div (60 \times 120)] \div \log [(12 \times 35) \div (1000 \times 8,5)]$$

$$d = \log (30 \div 7200) \div \log (420 \div 8500)$$

$$d = \log 0,0042 \div \log 0,0494$$

$$d = -2,377 \div -1,306$$

$$d = 1,82$$

Exponente “d” corregido:

El exponente “d” es afectado por variaciones en el peso de lodo por lo tanto es necesario hacer modificaciones para corregirlo por cambios en el peso de lodo:

$$d_c = d (MW_1 \div MW_2)$$

donde d_c = exponente “d” corregido

MW_1 = peso de lodo normal – 9,0 ppg

MW_2 = peso de lodo real, ppg

$$\text{Ejemplo: } d = 1,64$$

$$MW_1 = 9,0 \text{ ppg}$$

$$MW_2 = 12,7 \text{ ppg}$$

$$\text{Solución: } d_c = 1,64 (9,0 \div 12,7)$$

$$d_c = 1,64 \times 0,71$$

$$d_c = 1,16$$

Velocidad de Deslizamiento de Ripios

Los siguientes cálculos resultan en la velocidad de deslizamiento de un ripio de un tamaño y peso específico en un fluido determinado. También se calculan la velocidad anular y velocidad de subida neta de ripios.

Método 1

Velocidad anular (AV), pie/min:

$$AV = \frac{24,5 \times Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

Velocidad de deslizamiento de ripios (V_s), pie/min:

$$V_s = 0,45 \left(\frac{PV}{(MW)(Dp)} \right) \left\{ \sqrt[3]{ \frac{36.800}{\left(\frac{PV}{(MW)(Dp)} \right)^2} \times (Dp) \left(\frac{DenP}{MW} - 1 \right) + 1^{-1} } \right\}$$

donde V_s = velocidad de deslizamiento, pie/min

PV = viscosidad plástica, cps

MW = peso de lodo, ppg

D_p = diámetro de partícula, pulg.
 $DenP$ = densidad de partícula, ppg

Ejemplo: Utilizar los siguientes datos para determinar la velocidad anular, pie/min; la velocidad de deslizamiento de ripios, pie/min; y la velocidad de subida neta de los ripios.

Datos: Peso de lodo	= 11,0 ppg
Viscosidad plástica	= 13 cps
Diámetro de partícula	= 0,25 pulg.
Densidad de partícula	= 22 ppg
Caudal	= 520 gpm
Diámetro del hoyo	= 12 ¼ pulg.
Diámetro externo de la tubería de perforación	= 5,0 pulg.

Velocidad anular (AV), pie/min:

$$AV = \frac{24,5 \times 520}{12,25^2 - 5,0^2}$$

Velocidad de deslizamiento de ripios (V_s), pie/min:

$$V_s = 0,45 \left(\frac{13}{11 \times 0,25} \right) \left\{ \sqrt{\frac{36.800}{\left(\frac{13}{11 \times 0,25} \right)^2} \times 0,25 \left(\frac{22}{11} - 1 \right) + 1^{-1}} \right\}$$

$$V_s = 0,45 [4,727] \sqrt{\frac{36.800}{(4,727)^2} \times 0,25 \times 1 + 1^{-1}}$$

$$V_s = 2,12715 (\sqrt{412,68639} - 1)$$

$$V_s = 2,12715 \times 19,3146$$

$$V_s = 41,085 \text{ pie/min}$$

Velocidad de subida neta de ripios:

$$\text{Velocidad anular} = 102 \text{ pie/min}$$

$$\text{Velocidad de deslizamiento de ripios} = - 41 \text{ pie/min}$$

$$\text{Velocidad de subida neta de ripios} = \frac{102 - 41}{1} = 61 \text{ pie/min}$$

Método 2

1. Determinar n:

$$n = 3,32 \log \frac{\theta 600}{\theta 300}$$

2. Determinar K:

$$K = \frac{\theta 600}{511^n}$$

3. Determinar la velocidad anular (v), pie/min:

$$v = \frac{24,5 \times Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

4. Determinar viscosidad (μ):

$$\mu = \left(\frac{2,4}{Dh - Dp} \times \frac{2n + 1}{3n} \right)^n \times \left[\frac{200K (Dh - Dp)}{v} \right]$$

5. Velocidad de deslizamiento (V_s), pie/min:

$$V_s = \frac{(DensP - MW)^{0,667} \times 175 \times DiaP}{MW^{0,333} \times \mu^{0,333}}$$

Nomenclatura:

n	= sin dimensiones
K	= sin dimensiones
$\theta 600$	= lectura de viscosímetro a 600
$\theta 300$	= lectura de viscosímetro a 300
Q	= tasa de circulación, gpm
Dh	= diámetro del hoyo, pulg.
Dp	= diámetro externo de la tubería o cuello, pulg.
v	= velocidad anular, pie/min
μ	= viscosidad del lodo, cps
DensP	= densidad de ripio, ppg
DiaP	= diámetro de ripio, pulg.

Ejemplo: Utilizar los siguientes datos para determinar la velocidad anular, velocidad de deslizamiento de ripios y la velocidad de subida neta de ripios:

Datos: Peso de lodo	= 11,0 ppg
Viscosidad plástica	= 13 cps
Punto de deformación	= 10 lb/100 pies cuadrados
Diámetro de partícula	= 0,25 pulg.
Densidad de partícula	= 22,0 ppg
Diámetro del hoyo	= 12,25 pulg.
Diámetro externo de tubería de perforación	= 5,0 pulg.
Tasa de circulación	= 520 gpm

1. Determinar n:

$$n = 3,32 \log \frac{36}{23}$$

$$n = 0,64599$$

2. Determinar K:

$$K = \frac{23}{511^{0,64599}}$$

$$K = 0,4094$$

3. Determinar la velocidad anular (v), pie/min:

$$v = \frac{24,5 \times 520}{12,25^2 - 5,0^2}$$

$$v = \frac{12.740}{125,06}$$

$$v = 102 \text{ pie/min}$$

4. Determinar viscosidad (μ):

$$\mu = \left(\frac{2,4}{12,25 - 5,0} \times \frac{2(0,64599) + 1}{3(0,64599)} \right)^{0,64599} \times \left(\frac{200 \times 0,4094 \times (12,25 - 5)}{102} \right)$$

$$\mu = \left(\frac{244,8}{7,25} \times \frac{2,292}{1,938} \right)^{0,64599} \times \frac{593,63}{102}$$

$$\mu = (33,76 \times 1,1827)^{0,64599} \times 5,82$$

$$\mu = 10,82 \times 5,82$$

$$\mu = 63 \text{ cps}$$

5. Velocidad de deslizamiento (Vs), pie/min:

$$V_s = \frac{(22 - 11)^{0,667} \times 175 \times 0,25}{11^{0,333} \times 63^{0,333}}$$

$$V_s = \frac{4,95 \times 175 \times 0,25}{2,222 \times 3,97}$$

$$V_s = \frac{216,56}{8,82}$$

$$V_s = 24,55 \text{ pie/min}$$

6. Determinar la velocidad de subida neta de ripios, pies/min:

$$\text{Velocidad anular} = 102 \text{ pie/min}$$

$$\text{Velocidad de deslizamiento de ripios} = -24,55 \text{ pie/min}$$

$$\text{Velocidad de subida neta de ripios} = \frac{102 - 24,55}{1} = 77,45 \text{ pie/min}$$

Presiones de Oleaje y Suaveo

Método 1

1. Determinar n:

$$n = 3,32 \log \frac{\theta 600}{\theta 300}$$

2. Determinar K:

$$K = \frac{\theta 600}{511^n}$$

3. Determinar la velocidad (v), pie/min:

Para flujo taponado:

$$v = 0,45 + \left(\frac{Dp^2}{Dh^2 - Dp^2} \right) Vp$$

Para tubería abierta:

$$v = 0,45 + \left(\frac{Dp^2}{Dh^2 - Dp^2 + Di^2} \right) Vp$$

4. Máxima velocidad de la tubería:

$$Vm = 1,5 \times v$$

5. Determinar las pérdidas de presión (Ps):

$$Ps = \left(\frac{2,4 Vm}{Dh - Dp} \times \frac{2n + 1}{3n} \right)^n \times \frac{KL}{300 (Dh - Dp)}$$

Nomenclatura:

n = sin dimensiones

K = sin dimensiones

$\theta 600$ = lectura de viscosímetro a 600

$\theta 300$ = lectura de viscosímetro a 300

v = velocidad del fluido, pie/min

Vp = velocidad de la tubería, pie/min

Vm = máxima velocidad de la tubería, pie/min

Ps = pérdida de presión, psi

L = longitud de la tubería, pie

Dh = diámetro del hoyo, pulg.

Dp = diámetro externo de la tubería de perforación o cuello de perforación, pulg.

Di = diámetro interno de la tubería de perforación o cuello de perforación, pulg.

Ejemplo 1: Determinar la presión de oleaje para tubería taponada:

Datos: Profundidad del pozo = 15.000 pies

Tamaño del hoyo = 7-7/8 pulg.

Diámetro externo de la tubería de perforación	= 4 ½ pulg.
Diámetro interno de la tubería de perforación	= 3,82 pulg.
Cuello de perforación = diámetro externo de 6 ¼ pulg. – diámetro interno de 2 ¾ pulg.	
Longitud del cuello de perforación	= 700 pies
Peso de lodo	= 15,0 ppg
Lecturas del viscosímetro:	
θ600	= 140
θ300	= 80
Velocidad promedio de corrida de tubería	= 270 pie/min

1. Determinar n:

$$n = 3,32 \log \frac{140}{80}$$

$$n = 0,8069$$

2. Determinar K:

$$K = \frac{80}{511^{0,8069}}$$

$$K = 0,522$$

3. Determinar la velocidad (v), pie/min:

$$v = 0,45 + \left[\frac{(4,5)^2}{7,875^2 - 4,5^2} \right] 270$$

$$v = (0,45 + 0,4848) 270$$

$$v = 252 \text{ pie/min}$$

4. Máxima velocidad de la tubería:

$$V_m = 1,5 \times 252$$

$$V_m = 378 \text{ pie/min}$$

5. Determinar las pérdidas de presión (Ps):

$$P_s = \left[\frac{2,4 \times 378}{7,875 - 4,5} \times \frac{2(0,8069) + 1}{3(0,8069)} \right]^{0,8069} \times \frac{(0,522)(14300)}{300(7,875 - 4,5)}$$

$$P_s = (268,8 \times 1,1789)^{0,8069} \times \frac{7464,6}{1012,5}$$

$$P_s = 97,098 \times 7,37$$

$$P_s = 716 \text{ psi de presión de oleaje}$$

Por consiguiente se agrega esta presión a la presión hidrostática del lodo en el hoyo.

Sin embargo, si se desea la presión de suaveo se sustraería esta presión de la presión hidrostática.

Ejemplo: Determinar la presión de oleaje para tubería abierta:

1. Determinar la velocidad (v), pie/min:

$$v = 0,45 + \left[\frac{4,5^2 - 3,82^2}{7,875^2 - 4,5^2 + 3,82^2} \right] 270$$

$$v = \left[0,45 + \frac{5,66}{56,4} \right] 270$$

$$v = (0,45 + 0,100) 270$$

$$v = 149 \text{ pie/min}$$

2. Máxima velocidad de la tubería:

$$V_m = 1,5 \times 149$$

$$V_m = 224 \text{ pie/min}$$

3. Determinar las pérdidas de presión (Ps):

$$P_s = \left[\frac{2,4 \times 224}{7,875 - 4,5} \times \frac{2(0,8069) + 1}{3(0,8069)} \right]^{0,8069} \times \frac{(0,522)(14300)}{300(7,875 - 4,5)}$$

$$P_s = (159,29 \times 1,1789)^{0,8069} \times \frac{7464,6}{1012,5}$$

$$P_s = 63,66 \times 7,37$$

$$P_s = 469 \text{ psi de presión de oleaje}$$

Por consiguiente se agrega esta presión a la presión hidrostática del lodo en el hoyo.

Sin embargo, si se desea la presión de suaveo se sustraería esta presión de la presión hidrostática del lodo en el hoyo.

Método 2

Presiones de oleaje y suaveo

Suponer: 1) Tubería taponada

2) Flujo laminar alrededor de la tubería de perforación

3) Flujo turbulento alrededor de los cuellos de perforación

Estos cálculos resumen el procedimientos y cálculos necesarios para determinar el aumento o reducción en el peso de lodo equivalente (presión de fondo) debido a los oleajes de presión causados por sacar o bajar tubería. Estos cálculos suponen que el extremo de la tubería esté taponado (como en el caso de bajar tubería de revestimiento con una zapata flotadora o tubería de perforación con la mecha y boquillas de chorro colocadas) y no con el extremo abierto.

A. Presión de oleaje alrededor de la tubería de perforación:

1. Velocidad estimada del fluido anular (v) alrededor de la tubería de perforación:

$$v = 0,45 + \left[\frac{D_p^2}{D_h^2 - D_p^2} \right] V_p$$

2. Velocidad máxima de la tubería (Vm):

$$V_m = v \times 1,5$$

3. Calcular n:

$$n = 3,32 \log \frac{0600}{0300}$$

4. Determinar K:

$$K = \frac{0600}{511^n}$$

5. Calcular la tasa de corte (Ym) del lodo moviendo alrededor de la tubería:

$$Y_m = \frac{2,4 \times V_m}{D_h - D_p}$$

6. Calcular los esfuerzos cortantes (T) del lodo moviendo alrededor de la tubería:

$$T = K (Y_m)^n$$

7. Calcular la reducción en presión (Ps) para el intervalo:

$$P_s = \frac{3,33 T}{D_h - D_p} \times \frac{L}{1000}$$

- B. Presión de oleaje alrededor de los cuellos de perforación:

1. Velocidad estimada del fluido anular (v) alrededor de la tubería de perforación:

$$v = 0,45 + \left[\frac{D_p^2}{D_h^2 - D_p^2} \right] V_p$$

2. Velocidad máxima de la tubería (Vm):

$$V_m = v \times 1,5$$

3. Convertir la velocidad equivalente del lodo debido al movimiento de la tubería al caudal equivalente (Q):

$$Q = \frac{V_m [(D_h)^2 - (D_p)^2]}{24,5}$$

4. Calcular la pérdida de presión para cada intervalo (Ps):

$$P_s = \frac{0,000077 \times MW^{0,8} \times Q^{1,8} \times PV^{0,2} \times L}{(D_h - D_p)^3 \times (D_h + D_p)^{1,8}}$$

- C. Presiones de oleaje totales convertidas en peso de lodo:

Presiones de oleaje (o suaveo) totales:

$$\text{psi} = P_s (\text{tubería de perforación}) + P_s (\text{cuellos de perforación})$$

D. Si se desea la presión de oleaje:

$$SP, \text{ ppg} = Ps \div 0,052 \div TVD, \text{ pies} \text{ “+” MW, ppg}$$

E. Si se desea la presión de suaveo:

$$SP, \text{ ppg} = Ps \div 0,052 \div TVD, \text{ pies} \text{ “-” MW, ppg}$$

Ejemplo: Determinar las presiones de oleaje y suaveo para los datos presentados a continuación:

Datos: Peso de lodo	= 15,0 ppg
Viscosidad plástica	= 60 cps
Punto de deformación	= 20 lb/100 pulg. ²
Diámetro del hoyo	= 7-7/8 pulg
Diámetro externo de la tubería de perforación	= 4 ½ pulg.
Longitud de la tubería de perforación	= 14.300 pies
Diámetro externo del cuello de perforación	= 6 ¼ pulg.
Longitud del cuello de perforación	= 700 pies
Velocidad de correr la tubería	= 270 pie/min

A. Alrededor de la tubería de perforación:

1. Calcular la velocidad del fluido anular (v) alrededor de la tubería de perforación:

$$v = 0,45 + \left[\frac{(4,5)^2}{7,875^2 - 4,5^2} \right] 270$$

$$v = [0,45 + 0,4848] 270$$

$$v = 253 \text{ pie/min}$$

2. Calcular la velocidad máxima de la tubería (Vm):

$$Vm = 253 \times 1,5$$

$$Vm = 379 \text{ pie/min}$$

NOTA: Determinar n y K utilizando la viscosidad plástica (PV) y punto de deformación (YP) en la siguiente forma:

$$PV + YP = \text{lectura a } \theta 300$$

$$\text{lectura a } \theta 300 + PV = \text{lectura a } \theta 600$$

$$\textit{Ejemplo:} \quad PV = 60$$

$$YP = 20$$

$$60 + 20 = 80 \text{ (lectura a } \theta 300)$$

$$80 + 60 = 140 \text{ (lectura a } \theta 600)$$

3. Calcular n:

$$n = 3,32 \log \frac{\theta 140}{\theta 80}$$

$$n = 0,8969$$

4. Calcular K:

$$K = \frac{80}{511^{0,8069}}$$

$$K = 0,522$$

5. Calcular la tasa de corte (Ym) del lodo moviendo alrededor de la tubería:

$$Ym = \frac{2,4 \times 379}{(7,875 - 4,5)}$$

$$Ym = 269,5$$

6. Calcular los esfuerzos cortantes (T) del lodo moviendo alrededor de la tubería:

$$T = 0,522 (269,5)^{0,8069}$$

$$T = 0,522 \times 91,457$$

$$T = 47,74$$

7. Calcular la reducción en presión (Ps) para el intervalo:

$$Ps = \frac{3,33 (47,7)}{(7,875 - 4,5)} \times \frac{14.300}{1000}$$

$$Ps = 47,064 \times 14,3$$

$$Ps = 673 \text{ psi}$$

B. Alrededor de los cuellos de perforación:

1. Calcular la velocidad estimada del fluido anular (v) alrededor de la tubería de perforación:

$$v = 0,45 + \left[\frac{6,25^2}{7,875^2 - 6,25^2} \right] 270$$

$$v = (0,45 + 1,70) 270$$

$$v = 581 \text{ pie/min}$$

2. Calcular la velocidad máxima de la tubería (Vm):

$$Vm = 581 \times 1,5$$

$$Vm = 871,54 \text{ pie/min}$$

3. Convertir la velocidad equivalente del lodo debido al movimiento de la tubería al caudal equivalente (Q):

$$Q = \frac{871,54 (7,875^2 - 6,25^2)}{24,5}$$

$$Q = \frac{20004,567}{24,5}$$

$$Q = 816,5$$

4. Calcular la pérdida de presión para cada intervalo (Ps):

$$Ps = \frac{0,000077 \times 15^{0,8} \times 816^{1,8} \times 60^{0,2} \times 700}{(7,875 - 6,25)^3 \times (7,875 + 6,25)^{1,8}}$$

$$Ps = \frac{185837,9}{504,126}$$

$$Ps = 368,6 \text{ psi}$$

C. Presiones de oleaje totales convertidas en peso de lodo:

$$\text{psi} = 672,9 \text{ psi} + 368,6 \text{ psi}$$

$$\text{psi} = 1041,5 \text{ psi}$$

D. Presión convertida a peso de lodo, ppg:

$$\text{ppg} = 1041,5 \text{ psi} \div 0,052 \div 15.000 \text{ pies}$$

$$\text{ppg} = 1,34$$

E. Si se desea la presión de oleaje:

$$\text{Presión de oleaje, ppg} = 15,0 \text{ ppg} + 1,34 \text{ ppg}$$

$$\text{Presión de oleaje} = 15,34 \text{ ppg}$$

F. Si se desea la presión de suaveo:

$$\text{Presión de suaveo, ppg} = 15,0 \text{ ppg} - 1,34 \text{ ppg}$$

$$\text{Presión de suaveo} = 13,66 \text{ ppg}$$

Densidad de Circulación Equivalente (ECD)

1. Calcular n:

$$n = 3,32 \log \frac{0600}{0300}$$

2. Determinar K:

$$K = \frac{0600}{511^n}$$

3. Determinar la velocidad anular (v), pie/min:

$$v = \frac{24,5 \times Q}{Dh^2 - Dp^2}$$

4. Determinar la velocidad crítica (Vc), pie/min:

$$v = \left[\frac{3,878 \times 10^4 \times K}{MW} \right]^{\frac{1}{2-n}} \times \left[\frac{2,4}{Dh - Dp} \times \frac{2n + 1}{3n} \right]^{\frac{n}{2-n}}$$

5. Pérdida de presión para flujo laminar (Ps), psi:

$$Ps = \left[\frac{2,4v}{Dh - Dp} \times \frac{2n + 1}{3n} \right]^n \times \frac{KL}{300 (Dh - Dp)}$$

6. Pérdida de presión para flujo turbulento (Ps), psi:

$$Ps = \frac{7,7 \times 10^{-5} \times MW^{0,8} \times Q^{1,8} \times PV^{0,2} \times L}{(Dh - Dp)^3 \times (Dh + Dp)^{1,8}}$$

7. Determinar la densidad circulante equivalente (ECD), ppg:

$$ECD, \text{ ppg} = Ps \div 0,052 \div TVD, \text{ pie} + OMW, \text{ ppg}$$

Ejemplo: Calcular la densidad circulante equivalente (ECD), ppg:

Datos: Peso de lodo	= 12,5 ppg
Viscosidad plástica	= 24 cps
Punto de deformación	= 12 lb/100 pie ²
Tasa de circulación	= 400 gpm
Diámetro del hoyo	= 8,5 pulg.
Diámetro externo de la tubería de perforación	= 5,0 pulg.
Longitud de la tubería de perforación	= 11.300 pies
Diámetro externo del cuello de perforación	= 6,5 pulg.
Longitud de la tubería de perforación	= 700 pies
Profundidad vertical verdadera	= 12.000 pies

NOTA: Si se desconoce las lecturas del viscosímetro a $\theta 600$ y $\theta 300$, se las podrían obtener de la viscosidad plástica (PV) y punto de deformación (YP) en la siguiente manera:

$$24 + 12 = 36 \quad \text{Por consiguiente la lectura a } \theta 300 \text{ es } 36.$$

$$36 + 24 = 60 \quad \text{Por consiguiente la lectura a } \theta 600 \text{ es } 60.$$

1. Calcular n:

$$n = 3,32 \log \frac{60}{36}$$

$$n = 0,7365$$

2. Determinar K:

$$K = \frac{36}{511^{0,7365}}$$

$$K = 0,3644$$

3. a) Determinar la velocidad anular (v), pie/min, alrededor de la tubería de perforación:

$$v = \frac{24,5 \times 400}{8,5^2 - 5,0^2}$$

$$v = 207 \text{ pie/min}$$

b) Determinar la velocidad anular (v), pie/min, alrededor de los cuellos de perforación:

$$v = \frac{24,5 \times 400}{8,5^2 - 6,5^2}$$

$$v = 327 \text{ pie/min}$$

4. a) Determinar la velocidad crítica (V_c), pie/min, alrededor de la tubería de perforación:

$$V_c = \left[\frac{3,878 \times 10^4 \times 0,3644}{12,5} \right]^{\frac{1}{2-0,7365}} \times \left[\frac{2,4}{8,5-5} \times \frac{2(0,7365)+1}{3(0,7365)} \right]^{\frac{0,7365}{2-0,7365}}$$

$$V_c = (1130,5)^{0,791} \times (0,76749)^{0,5829}$$

$$V_c = 260 \times 0,857$$

$$V_c = 223 \text{ pie/min}$$

- b) Determinar la velocidad crítica (V_c), pie/min, alrededor de los cuellos de perforación:

$$V_c = \left[\frac{3,878 \times 10^4 \times 0,3644}{12,5} \right]^{\frac{1}{2-0,7365}} \times \left[\frac{2,4}{8,5-6,5} \times \frac{2(0,7365)+1}{3(0,7365)} \right]^{\frac{0,7365}{2-0,7365}}$$

$$V_c = (1130,5)^{0,791} \times (1,343)^{0,5829}$$

$$V_c = 260 \times 1,18756$$

$$V_c = 309 \text{ pie/min}$$

Por consiguiente:

Tubería de perforación: 207 pie/min (v) es menor de 223 pie/min (V_c), flujo laminar, por lo tanto se debe utilizar la Ecuación 5 para calcular la pérdida de presión.

Cuellos de perforación: 327 pie/min (v) es mayor de 309 pie/min (V_c), flujo turbulento, por lo tanto se debe utilizar la Ecuación 6 para calcular la pérdida de presión.

5. Pérdida de presión para flujo laminar (P_s), psi:

$$P_s = \left[\frac{2,4 \times 207}{8,5-5,0} \times \frac{2(0,7365)+1}{3(0,7365)} \right]^{0,7365} \times \frac{0,344 \times 11.300}{300(8,5-5,0)}$$

$$P_s = (141,9 \times 1,11926)^{0,7365} \times 3,9216$$

$$P_s = 41,78 \times 3,9216$$

$$P_s = 163,8 \text{ psi}$$

6. Pérdida de presión enfrente de cuellos de perforación:

$$P_s = \frac{7,7 \times 10^{-5} \times 12,5^{0,8} \times 400^{1,8} \times 24^{0,2} \times 700}{(8,5-6,5)^3 \times (8,5+6,5)^{1,8}}$$

$$P_s = \frac{37056,7}{8 \times 130,9}$$

$$P_s = 35,4 \text{ psi}$$

Pérdida de presión totales:

$$\text{psi} = 163,8 \text{ psi} + 35,4 \text{ psi}$$

$$\text{psi} = 199,2 \text{ psi}$$

7. Determinar la densidad circulante equivalente (ECD), ppg:

$$\text{ECD, ppg} = 199,2 \div 0,052 \div 12.000 \text{ pies} + 12,5 \text{ ppg}$$

$$\text{ECD} = 12,82 \text{ ppg}$$

Determinación del Gradiente de Fractura – Aplicación en la Superficie

Método 1: Método de Matthews y Kelly

$$F = P/D + K_i \sigma/D$$

donde F = gradiente de fractura, psi/pie

P = presión de poro de la formación, psi

σ = esfuerzos de matriz en punto de interés, psi

D = profundidad en el punto de interés, TVD, pies

K_i = coeficiente de esfuerzos de matriz, sin dimensiones

Procedimiento:

1. Obtener la presión de poro de la formación, P, de registros eléctricos, mediciones de densidad o del personal de registros de lodo.
2. Suponer una presión de sobrecarga (S) de 1,0 psi/pie y calcular σ de la siguiente manera:

$$\sigma = S - P$$

3. Determinar la profundidad para determinar K_i utilizando:

$$D = \frac{\sigma}{0,535}$$

4. Utilizando el gráfico de Coeficientes de Esfuerzos de Matriz, determinar Ki:

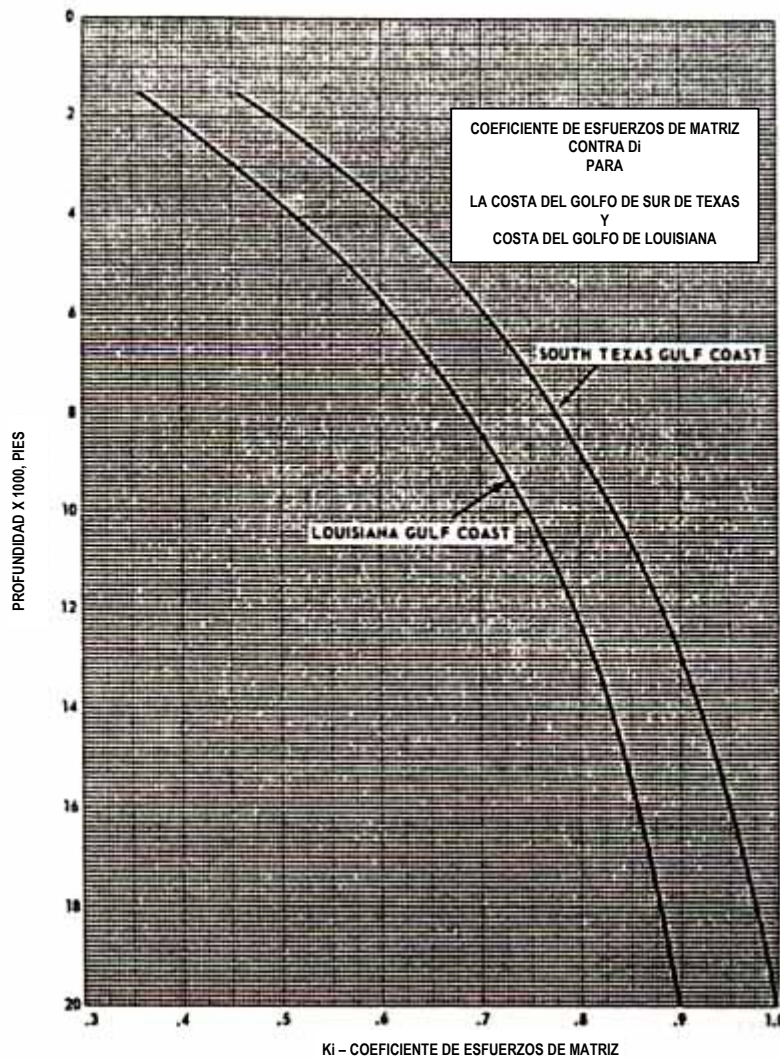


Figura 5-1. Gráfico de Coeficientes de Esfuerzos de Matriz

5. Determinar el gradiente de fractura (F), psi/pie:

$$F = \frac{P}{D} + K_i \times \frac{\sigma}{D}$$

6. Determinar la presión de fractura, psi:

$$F, \text{ psi} = F \times D$$

7. Determinar la máxima densidad de lodo, ppg:

$$\text{MW, ppg} = \frac{F}{0,052}$$

Ejemplo: Profundidad del asentamiento de la tubería de revestimiento = 12.000 pie
 Presión de poro de la formación = 12,0 ppg
 (Costa del Golfo de Louisiana)

1. $P = 12,0 \text{ ppg} \times 0,052 \times 12.000 \text{ pies}$
 $P = 7488 \text{ psi}$
2. $\sigma = 12.000 \text{ psi} - 7488 \text{ psi}$
 $\sigma = 4512 \text{ psi}$
3. $D = \frac{4512 \text{ psi}}{0,535}$
4. Utilizando el gráfico = $K_i = 0,79 \text{ psi/pie}$
5. $F = \frac{7488}{12.000} + 0,79 \times \frac{4512}{12.000}$
 $F = 0,624 \text{ psi/pie} + 0,297 \text{ psi/pie}$
 $F = 0,92 \text{ psi/pie}$
6. Presión de fractura, $\text{psi} = 0,92 \text{ psi/pie} \times 12.000 \text{ pie}$
 Presión de fractura = 11.040 psi
7. Máxima densidad de lodo, $\text{ppg} = \frac{0,92 \text{ psi/pie}}{0,052}$
 Máxima densidad de lodo = 17,69 ppg

Método 2: Método de Ben Eaton

$$F = \left[\frac{S}{D} - \frac{P_f}{D} \right] \times \left[\frac{y}{1-y} \right] + \left[\frac{P_f}{D} \right]$$

donde S/D = gradiente de sobrecarga, psi/pie

P_f/D = gradiente de presión de la formación a la profundidad de interés, psi/pie

y = relación de Poisson

Procedimiento:

1. Obtener el gradiente de sobrecarga del “Gráfico de Gradiente de Esfuerzos de Sobrecarga”.
2. Obtener el gradiente de presión de formación de los registros eléctricos, mediciones de densidad o por las operaciones de registros.
3. Obtener la relación de Poisson utilizando el “Gráfico de la Relación de Poisson”.
4. Determinar el gradiente de fractura utilizando la ecuación anterior.
5. Determinar la presión de fractura, psi:
 $\text{psi} = F \times D$
6. Determinar la máxima densidad de lodo, ppg

$$\text{ppg} = \frac{F}{0,052}$$

Ejemplo: Profundidad del asentamiento de la tubería de revestimiento = 12.000 pie
 Presión de poro de la formación = 12,0 ppg

1. Determinar S/D utilizando el gráfico = profundidad = 12.000 pies

S/D) 0,96 psi/pie

2. $P_f/D = 12,0 \text{ ppg} \times 0,052 = 0,624 \text{ psi/pie}$

3. Relación de Poisson utilizando el gráfico = 0,47 psi/pie

4. Determinar el gradiente de fractura:

$$F = (0,96 - 0,6243) \frac{0,47}{1 - 0,47} + 0,624$$

$$F = 0,336 \times 0,88679 + 0,624$$

$$F = 0,29796 + 0,624$$

$$F = 0,92 \text{ psi/pie}$$

5. Determinar la presión de fractura:

$$\text{psi} = 0,92 \text{ psi/pie} \times 12.000 \text{ pie}$$

$$\text{psi} = 11.040$$

6. Determinar la máxima densidad de lodo:

$$\text{ppg} = \frac{0,92 \text{ psi/pie}}{0,052}$$

Determinación del Gradiente de Fractura – Aplicaciones Submarinas

En operaciones de perforación costa afuera es necesario corregir el gradiente de fractura calculado por el efecto de la profundidad de agua y altura de la línea de flujo (colchón de aire) por encima del nivel del mar. Se puede utilizar el siguiente procedimiento:

Ejemplo: Colchón de aire = 100 pies
 Densidad del agua de mar = 8,9 ppg
 Profundidad de agua = 2000 pies
 Pies de tubería de revestimiento por debajo de la línea de lodo = 4000 pies

Procedimiento:

1. Convertir el agua al área equivalente en tierra, pies:

- a) Determinar la presión hidrostática del agua (HPsw):

$$\text{HPsw} = 8,9 \text{ ppg} \times 0,052 \times 2000 \text{ pies}$$

HP_{sw} = 926 psi

- b) Utilizando el Gráfico de Esfuerzos de Sobrecarga de Eaton para determinar el gradiente de esfuerzos de sobrecarga desde el nivel del mar hasta la profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento:

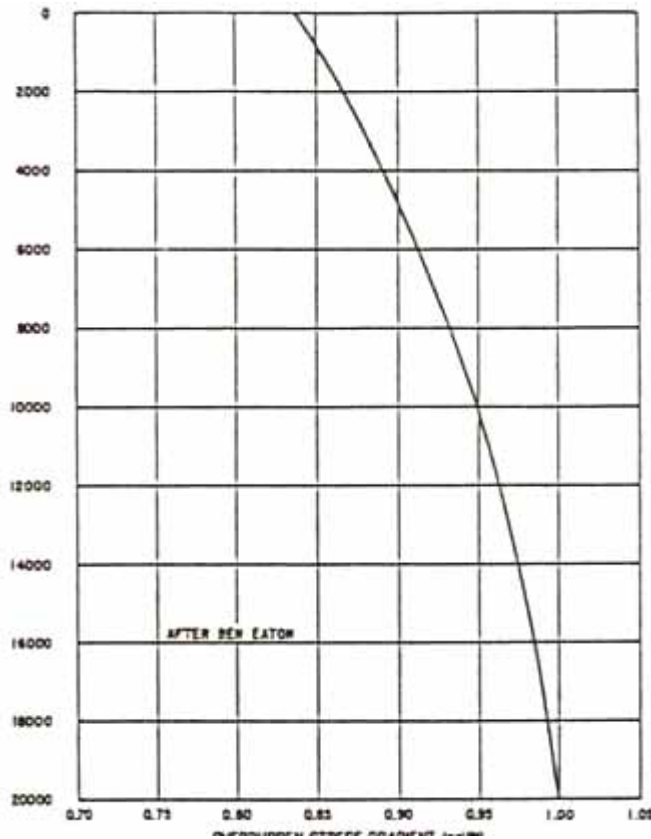
Del gráfico: Ubicar 6000 pies en el lado izquierdo y donde corta la curva, leer el gradiente de sobrecarga en la parte inferior del gráfico.

Gradiente de esfuerzos de sobrecarga = 0,92 psi/pie

- c) Determinar el área equivalente en tierra, pies:

$$\text{Pies equivalentes} = \frac{926 \text{ psi}}{0,92 \text{ psi/pie}}$$

Pies equivalentes = 1006



GRADIENTE DE ESFUERZOS DE SOBRECARGA (psi/pie)
 Gradiente de esfuerzos de sobrecarga para todas las cuencas depositadas continuas compactadas normalmente

Figura 5-2. Gráfico de esfuerzos de sobrecarga de Eaton

2. Determinar la profundidad para la determinación del gradiente de fractura:

Profundidad, pies = 4000 pies + 1006 pies

Profundidad = 5006 pies

- Utilizar el Gráfico de Fractura de Eaton para determinar el gradiente de fractura a una profundidad de 5006 pies:

Utilizando el gráfico: Ubicarse a la profundidad de 5006 pies en el punto donde corta la línea de 9,0 ppg y luego procederse hacia arriba y leer el gradiente de fractura en la parte superior del gráfico:

Gradiente de fractura: 14,7 ppg.

- Determinar la presión de fractura:

$$\text{psi} = 14,7 \text{ ppg} \times 0,052 \times 5006 \text{ pies}$$

$$\text{psi} = 3827$$

- Convertir el gradiente de fractura en relación con la línea de flujo:

$$F_c = 3827 \text{ psi} \div 0,052 \div 6100 \text{ pies}$$

$$F_c = 12,06 \text{ ppg}$$

donde F_c es el gradiente de fractura, corregido por la profundidad de agua y colchón de aire.

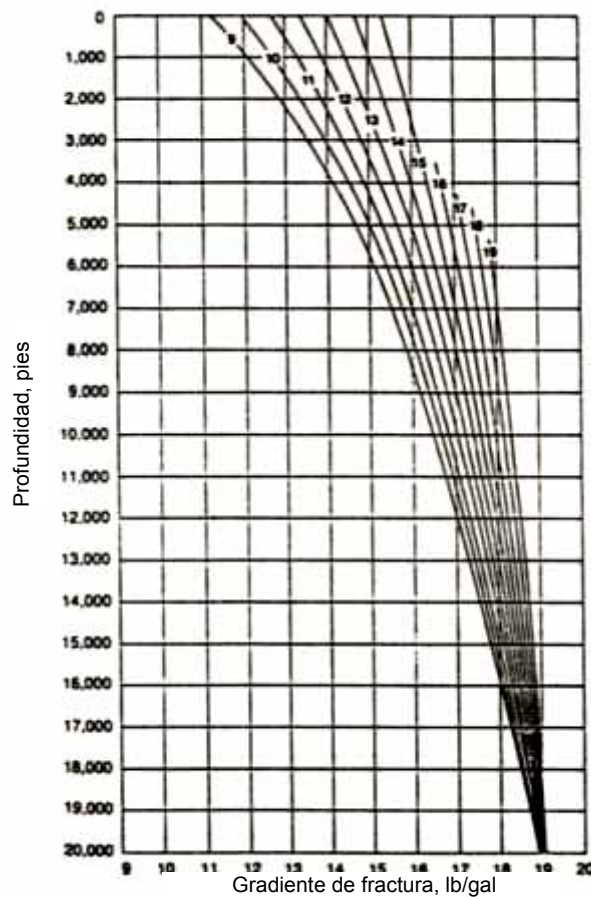


Figura 5-3. Gráfico del gradiente de fractura de Eaton

Cálculos para Perforación Direccional

A continuación se presentan los dos métodos utilizados con mayor frecuencia para calcular los levantamientos direccionales:

1. Método de Promediar los Ángulos:

$$\text{Norte} = \text{MD} \times \sin \frac{(I_1 + I_2)}{2} \times \cos \frac{(A_1 + A_2)}{2}$$

$$\text{Este} = \text{MD} \times \sin \frac{(I_1 + I_2)}{2} \times \sin \frac{(A_1 + A_2)}{2}$$

$$\text{Vert} = \text{MD} \times \cos \frac{(I_1 + I_2)}{2}$$

2. Método de Radio de Curvatura

$$\text{Norte} = \frac{\text{MD} (\cos I_1 - \cos I_2)(\sin A_2 - \sin A_1)}{(I_2 - I_1)(A_2 - A_1)}$$

$$\text{Este} = \frac{\text{MD} (\cos I_1 - \cos I_2)(\cos A_2 - \cos A_1)}{(I_2 - I_1)(A_2 - A_1)}$$

$$\text{Vert} = \frac{\text{MD} (\sin I_1 - \sin I_2)}{(I_2 - I_1)}$$

donde MD = longitud de tramo entre levantamientos en profundidad medida, pie

I_1, I_2 = inclinación (ángulo) en levantamientos superior e inferior, grados

A_1, A_2 = dirección en levantamientos superior e inferior

Ejemplo: Utilizar el Método de Promediar Ángulos y el Método de Radio de Curvatura para calcular los siguientes levantamientos:

	Levantamiento 1	Levantamiento 2
Profundidad, pies	7482	7782
Inclinación, grados	4	8
Azimut, grados	10	35

Método de Promediar de Ángulos:

$$\text{Norte} = 300 \times \sin \frac{(4 + 8)}{2} \times \cos \frac{(10 + 35)}{2}$$

$$300 \times \sin (6) \times \cos (22,5)$$

$$300 \times 0,104528 \times 0,923879$$

$$\text{Norte} = 28,97 \text{ pies}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Este} &= 300 \times \sin \frac{(4+8)}{2} \times \sin \frac{(10+35)}{2} \\
 &= 300 \times \sin (6) \times \sin (22,5) \\
 &= 300 \times 0,104528 \times 0,38268 \\
 \text{Este} &= 12,0 \text{ pies}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Vert} &= 300 \times \cos \frac{(4+8)}{2} \\
 &= 300 \times \cos (6) \\
 &= 300 \times 0,99452 \\
 \text{Vert} &= 298,35 \text{ pies}
 \end{aligned}$$

Método de Radio de Curvatura:

$$\begin{aligned}
 \text{Norte} &= \frac{300 (\cos 4 - \cos 8)(\sin 35 - \sin 10)}{(8-4)(35-10)} \\
 &= \frac{300 (0,99756 - 0,990268)(0,57357 - 0,173648)}{4 \times 25} \\
 &= \frac{0,874629}{100} \\
 &= 0,008746 \times 57,3^2 \\
 \text{Norte} &= 28,56 \text{ pies}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Este} &= \frac{300 (\cos 4 - \cos 8)(\cos 10 - \cos 35)}{(8-4)(35-10)} \\
 &= \frac{300 (\cos 4 - \cos 8)(\cos 10 - \cos 35)}{(8-4)(35-10)} \\
 &= \frac{300 (0,99756 - 0,99026)(0,9848 - 0,81915)}{4 \times 25} \\
 &= \frac{300 (0,0073) (0,16565)}{100} \\
 &= 0,0036277 \times 57,3^2 \\
 \text{Este} &= 11,91 \text{ pies}
 \end{aligned}$$

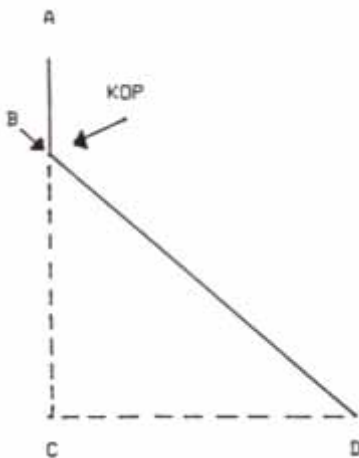
$$\text{Vert} = \frac{300 (\sin 8 - \sin 4)}{(8-4)}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{300 (0,13917 - 0,069756)}{4} \\
 &= \frac{300 \times (0,069414)}{4} \\
 &= 5,20605 \times 57,3 \\
 \text{Vert} &= 298,3 \text{ pies}
 \end{aligned}$$

Cálculo de la Desviación

Se define desviación como la salida del hoyo del vertical medida mediante la distancia horizontal desde la mesa rotatoria hasta el objetivo. La cantidad de desviación es una función del ángulo de inclinación y la profundidad del hoyo.

El siguiente diagrama muestra cómo se determina la desviación:



Datos:

- AB = distancia desde la localización en la superficie hasta el punto inicial (KOP)
- BC = distancia desde el KOP hasta la profundidad vertical verdadera (TVD)
- BD = distancia desde el KOP hasta el fondo del hoyo (MD)
- CD = desviación del hoyo desde el vertical
- AC = profundidad vertical verdadera
- AD = profundidad medida

Figura 5-4. Desviación

Para calcular la desviación (CD), pies:

$$\text{CD, pie} = \sin I \times \text{BD}$$

Ejemplo: El punto inicial (KOP) se encuentra a una distancia de 2000 pies desde la superficie. MD es 8000 pies. El ángulo del hoyo (inclinación) es 20 grados. Por consiguiente la distancia desde KOP hasta MD = 6000 pies (BD):

$$\begin{aligned}
 \text{CD, pie} &= \sin 20 \times 6000 \text{ pies} \\
 &= 0,342 \times 6000 \text{ pies} \\
 \text{CD} &= 2052 \text{ pies}
 \end{aligned}$$

Según este cálculo la profundidad medida (MD) se encuentra a 2052 pies desde el vertical.

Cálculo de la Severidad de Dobleces Pata de Perro

Método 1

Generalmente se presenta la severidad de dobleces pata de perro (DLS) en grados/100 pies. La siguiente fórmula arroja la severidad de doblez pata de perro en grados/100 pies y está basada en el Método de Radio de Curvatura:

$$DLS = \{\cos^{-1}[(\cos I1 \times \cos I2) + (\sin I1 \times \sin I2) \times \cos (A2 - A1)]\} \times \frac{100}{CL}$$

Para cálculos métricas se debe sustituir $\times \frac{30}{CL}$

donde DLS = severidad de doblez pata de perro, grados/100 pies
 CL = longitud del tramo, distancia entre puntos de levantamiento, pies
 I1, I2 = inclinación (ángulo) en levantamientos superior e inferior, pies
 A1, A2 = dirección en los levantamientos superior e inferior, grados
 ^ Azimut = cambio en azimut entre levantamientos, grados

Ejemplo:

	Levantamiento 1	Levantamiento 2
Profundidad, pies	4231	4262
Inclinación, grados	13,5	14,7
Azimut, grados	N 10 E	N 19 E

$$DLS = \{\cos^{-1}[(\cos 13,5 \times \cos 14,7) + (\sin 13,5 \times \sin 14,7) \times \cos (19 - 10)]\} \times \frac{100}{31}$$

$$DLS = \{\cos^{-1}[(0,9723699 \times 0,9672677) + (0,2334453 \times 0,2537579) \times \cos (0,9876883)]\} \times \frac{100}{31}$$

$$DLS = \{\cos^{-1}[(0,940542) + (0,0585092)]\} \times \frac{100}{31}$$

$$DLS = 2,4960847 \times \frac{100}{31}$$

$$DLS = 8,051886 \text{ grados/100 pies}$$

Método 2

Este método de calcular severidad de doblez pata de perro se basa en el método tangencial:

$$DLS = \frac{100}{L[(\sin I1 \times \sin I2)(\sin A1 \times \sin A2 + \cos A1 \times \cos A2) + \cos I1 \times \cos I2]}$$

donde DLS = severidad de doblez pata de perro, grados/100 pies
 L = longitud del tramo, pies
 I1, I2 = inclinación (ángulo) en levantamientos superior e inferior, grados
 A1, A2 = dirección en levantamientos superior e inferior, grados

Ejemplo:

	Levantamiento 1	Levantamiento 2
Profundidad, pies	4231	4262
Inclinación, grados	13,5	14,7
Azimut, grados	N 10 E	N 19 E

$$DLS = \frac{100}{L[(\sin 13,5 \times \sin 14,7)(\sin 10 \times \sin 19 + \cos 10 \times \cos 19) + \cos 13,5 \times \cos 14,7]}$$

$$DLS = \frac{100}{30,969}$$

$$DLS = 3,229 \text{ grados/100 pies}$$

Peso Disponible Sobre la Mecha en Pozos Direccionales

Un pozo perforado direccionalmente requiere que se haga una corrección en el peso total del cuello de perforación dado que solamente una parte del peso total estará disponible a la mecha:

$$P = W \times \cos I$$

donde P = peso parcial disponible para la mecha
 Cos = coseno
 I = grados de inclinación (ángulo)
 W = peso total de los cuellos

Ejemplo: W = 45.000 lb
 I = 25 grados

$$P = 45.000 \times \cos 25$$

$$P = 45.000 \times 0,9063$$

$$P = 40.784 \text{ lb}$$

Por consiguiente, el peso disponible sobre la mecha es 40.784 lb.

Determinación de la Profundidad Vertical Verdadera (TVD)

A continuación se presenta un método sencillo para corregir por la profundidad vertical verdadera (TVD) en pozos direccionales. Este cálculo proporcionará la TVD aproximada del intervalo correspondiente al intervalo medido y por lo general es lo suficientemente preciso para cualquier cálculo de presión. Durante el próximo levantamiento se debe corregir la TVD para que corresponda a la profundidad vertical verdadera calculada por el perforador direccional:

$$\text{TVD}_2 = \cos I \times \text{CL} + \text{TVD}_1$$

donde TVD_2 = nueva profundidad vertical verdadera, pies

cos = coseno

CL = longitud del tramo – número de pies desde el último levantamiento

TVD_1 = última profundidad vertical verdadera, pies

Ejemplo: TVD (último levantamiento) = 8500 pies
 Ángulo de desviación = 40 grados
 Longitud del tramo = 30 pies

Solución: $\text{TVD}_2 = \cos 40 \times 30 \text{ pies} + 8500 \text{ pies}$

$$\text{TVD}_2 = 0,766 \times 30 \text{ pies} + 8500 \text{ pies}$$

$$\text{TVD}_2 = 22,98 \text{ pies} + 8500 \text{ pies}$$

$$\text{TVD}_2 = 8522,98 \text{ pies}$$

Ecuaciones y Cálculos Misceláneos

Pérdidas de Presión por los Equipos en la Superficie (SEpl)

$$\text{SEpl} = C \times \text{MW} \times \left(\frac{Q}{100} \right)^{1,86}$$

donde SEpl = pérdida de presión por el equipo en la superficie, psi

C = factor de fricción por el tipo de equipo en la superficie

W = peso de lodo, ppg

Q = tasa de circulación, gpm

Tipo de Equipo en la Superficie	C
1	1,0
2	0,36
3	0,22
4	0,15

Ejemplo: Tipo de equipo en la superficie = 3
 C = 0,22
 Peso de lodo = 11,8 ppg
 Tasa de circulación = 350 gpm

$$\text{SEpl} = 0,22 \times 11,8 \times \left(\frac{350}{100} \right)^{1,86}$$

$$\text{SEpl} = 2,596 \times (3,5)^{1,86}$$

$$\text{SEpl} = 2,596 \times 10,279372$$

$$\text{SEpl} = 26,69 \text{ psi}$$

Pérdidas de Presión por la Tubería de Perforación

$$P = \frac{0,000061 \times MW \times L \times Q^{1,86}}{d^{4,86}}$$

donde P = pérdidas por la tubería de perforación, psi
 MW = peso de lodo, ppg
 L = longitud de la tubería, pies
 Q = tasa de circulación, gpm
 d = diámetro interno, pulg.

Ejemplo: Peso de lodo = 10,9 ppg
 Longitud de tubería = 6500 pies
 Tasa de circulación = 350 gpm
 Diámetro interno de la tubería de perforación = 4,276 pulg.

$$P = \frac{0,000061 \times 10,9 \times 6500 \times (350)^{1,86}}{4,276^{4,86}}$$

$$P = \frac{4,32185 \times 53946,909}{1166,3884}$$

$$P = 199,89 \text{ psi}$$

Pérdidas de Presión Anular

$$P = \frac{(1,4327 \times 10^{-7}) \times MW \times L \times V^2}{D_h - D_p}$$

donde P = pérdidas de presión anular, psi
 MW = peso de lodo, ppg
 L = longitud, pie
 V = velocidad anular, pie/min
 Dh = diámetro interno del hoyo o de la tubería de revestimiento, pulg.
 Dp = diámetro externo de la tubería de perforación o del cuello de perforación, pulg.

Ejemplo: Peso de lodo = 12,5 ppg
 Longitud = 6500 pie
 Tasa de circulación = 350 gpm
 Tamaño del hoyo = 8,5 pulg
 Diámetro externo de la tubería de perforación = 5,0 pulg.

Determinar la velocidad anular, pie/min:

$$v = \frac{24,5 \times 350}{8,5^2 - 5,0^2}$$

$$v = \frac{8575}{47,25}$$

$$v = 181 \text{ pie/min}$$

Determinar las pérdidas de presión anular, psi:

$$P = \frac{(1,4327 \times 10^{-7}) \times 12,5 \times 6500 \times 181^2}{8,5 - 5,0}$$

$$P = \frac{381,36}{3,5}$$

$$P = 108,96 \text{ psi}$$

Pérdida de Presión a Través de Accesorios de Tubería Comunes

$$P = \frac{K \times MW \times Q^2}{12.031 \times A^2}$$

donde P = pérdida de presión a través de accesorios de tubería comunes

K = coeficiente de pérdida (ver tabla abajo)

MW = peso del fluido, ppg

Q = tasa de circulación, gpm

A = área de la tubería, pulg.²

Lista de Coeficientes de Pérdida (K)

K = 0,42 para un codo de 45 grados

K = 0,90 para un codo de 90 grados

K = 1,80 para un T

K = 2,20 para codo de 180 grados

K = 0,19 para válvula de compuerta abierta

K = 0,85 para válvula de mariposa abierta

Ejemplo: K = 0,90 para codo de 90 grados

MW = 8,33 ppg (agua)

Q = 100 gpm

A = 12,5664 pulg.² (tubería con diámetro interno de 4,0 pulg.)

$$P = \frac{0,90 \times 8,33 \times 100^2}{12.031 \times 12,5664^2}$$

$$P = \frac{74970}{1899868,3}$$

$$P = 0,03946 \text{ psi}$$

Caudal Mínimo para Mechas PDC

Caudal mínimo, gpm = 12,72 x diámetro de la mecha, pulg.^{1,47}

Ejemplo: Determinar el caudal mínimo para una mecha PDC de 12 ¼ pulg.:

Caudal mínimo, gpm = $12,72 \times 12,25^{1,47}$
 Caudal mínimo, gpm = $12,72 \times 39,77$
 Caudal mínimo = 505,87 gpm

RPM Crítico: RPM para Evitar Vibración Excesiva (con una precisión aproximada hasta el 15%)

$$\text{RPM Crítico} = \frac{33055}{L, \text{ pie}^2} \times \sqrt{OD, \text{ pulg}^2 + ID, \text{ pulg}^2}$$

Ejemplo: L = longitud de una junta de tubería de perforación = 31 pies
 OD= diámetro externo de la tubería de perforación = 5,0 pulg.
 ID = diámetro interno de la tubería de perforación = 4,276 pulg.

$$\text{RPM Crítico} = \frac{33055}{31^2} \times \sqrt{5,0^2 + 4,276^2}$$

$$\text{RPM Crítico} = \frac{33055}{961} \times \sqrt{43,284}$$

$$\text{RPM Crítico} = 34,3965 \times 6,579$$

$$\text{RPM Crítico} = 226,296$$

NOTA: Como regla general para tubería de perforación de 5,0 pulg, no se debe exceder un RPM de 200 a cualquier profundidad.

Referencias

-
- Adams, Neal y Tommy Charrier, *Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1985.
- Chenevert, Martin E., y Reuven Hollo, *TI59 Drilling Engineering Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1981.
- Christman, Stan A., "Offshore Fracture Gradientes," *JPT*, Agosto de 1973.
- Craig, J. T. y B. V. Randall, "Directional Survey Calculations," *Petroleum Engineer*, Marzo de 1976.
- Crammer Jr., John L., *Basic Drilling Engineering Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1982.
- Eaton, B.A., "Fracture Gradiente Prediction and Its Application in Oilfield Operations," *JPT*, Octubre de 1969.
- Jordan, J. R. y O. J. Shirley, "Application of Drilling Performance Data to Overpressure Detection," *JPT*, Noviembre de 1966.
- Kendal, W. A. y W. C. Goins, "Design and Operations of Jet Bit Programs for Maximum Hydraulic Horsepower, Impact Force, or Jet Velocity", Transactions of AIME, 1960.
- Matthews, W. R. y J. Kelly, "How to Predict Formation Pressure and Fracture Gradient," *Oil and Gas Journal*, 20 de febrero de 1967.

Moore, P. L., *Drilling Practices Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1974.

Mud Facts Engineering Handbook, Milchem Incorporated, Houston, Texas, 1984.

Rehm, B. y R. McClendon, "Measurement of Formation Pressure from Drilling Data," SPE Paper 3601, AIME Annual Fall Meeting, New Orleans, LA., 1971.

Scott, Kenneth F., "A New Practical Approach to Rotary Drilling Hydraulics," SPE Paper No. 3530, New Orleans, LA., 1971.

ANEXO A-1

Tabla A-1
CAPACIDAD Y DESPLAZAMIENTO DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN
(Sistema inglés)

Tamaño OD pulg.	Tamaño ID pulg.	PESO lb/pie	CAPACIDAD bl/pie	DESPLAZAMIENTO bl/pie
2-3/8	1,815	6,65	0,00320	0,00279
2-7/8	2,150	10,40	0,00449	0,00354
3-1/2	2,764	13,30	0,00742	0,00448
3-1/2	2,602	15,50	0,00658	0,00532
4	3,340	14,00	0,01084	0,00471
4-1/2	3,826	16,60	0,01422	0,00545
4-1/2	3,640	20,00	0,01287	0,00680
5	4,276	19,50	0,01766	0,00652
5	4,214	20,50	0,01730	0,00704
5-1/2	4,778	21,90	0,02218	0,00721
5-1/2	4,670	24,70	0,02119	0,00820
5-9/16	4,859	22,20	0,02294	0,00712
6-5/8	5,9625	25,20	0,03456	0,00807

Tabla A-2
TUBERÍA DE PERFORACIÓN EXTRA PESADA (“HEAVY WEIGHT”) Y
DESPLAZAMIENTO

Tamaño OD pulg.	Tamaño ID pulg.	PESO lb/pie	CAPACIDAD bl/pie	DESPLAZAMIENTO bl/pie
3-1/2	2,0625	25,3	0,00421	0,00921
4	2,25625	29,7	0,00645	0,01082
4-1/2	2,75	41,0	0,00743	0,01493
5	3,0	49,3	0,00883	0,01796

Se puede determinar capacidades, bl/pie, desplazamientos, bl/pie, y peso, lb/pie, adicionales utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Capacidad, bl/pie} = \frac{\text{ID, pulg.}^2}{1029,4}$$

$$\text{Desplazamiento, bl/pie} = \frac{\text{Dh, pulg.} - \text{Dp, pulg.}^2}{1029,4}$$

Peso, lb/pie = desplazamiento, bl/pie x 2747 lb/bl

Tabla A-3
CAPACIDAD Y DESPLAZAMIENTO DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN
(Sistema métrico)

Tamaño OD pulg.	Tamaño ID pulg.	PESO lb/pie	CAPACIDAD litros/pie	DESPLAZAMIENTO litros/pie
2-3/8	1,815	6,65	1,67	1,19
2-7/8	2,150	10,40	2,34	1,85
3-1/2	2,764	13,30	3,87	2,34
3-1/2	2,602	15,50	3,43	2,78
4	3,340	14,00	5,65	2,45
4-1/2	3,826	16,60	7,42	2,84
4-1/2	3,640	20,00	6,71	3,55
5	4,276	19,50	9,27	3,40
5	4,214	20,50	9,00	3,67
5-1/2	4,778	21,90	11,57	3,76
5-1/2	4,670	24,70	11,05	4,28
5-9/16	4,859	22,20	11,96	3,72
6-5/8	5,9625	25,20	18,03	4,21

Determinación de Capacidad de Tanque

Tanques Rectangulares con Fondos Planos

lado



extremo



$$\text{Volumen, bl} = \frac{\text{longitud, pie} \times \text{ancho, pie} \times \text{profundidad, pie}}{5,61}$$

Ejemplo 1: Determinar la capacidad total de un tanque rectangular con un fondo plano utilizando los siguientes datos:

Longitud = 30 pies

Ancho = 10 pies

Profundidad = 8 pies

$$\text{Volumen, bl} = \frac{30 \text{ pies} \times 10 \text{ pies} \times 8 \text{ pies}}{5,61}$$

$$\text{Volumen, bl} = \frac{2400}{5,61}$$

$$\text{Volumen, bl} = 427,84 \text{ bl}$$

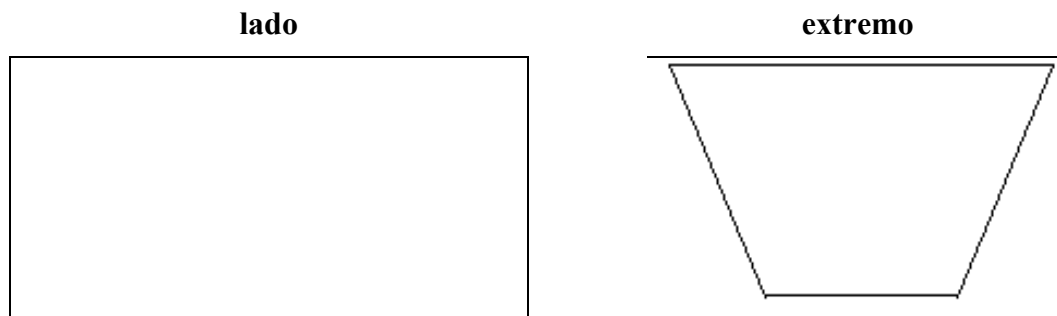
Ejemplo 2: Determinar la capacidad del mismo tanque con solamente 5-1/2 pies de fluido:

$$\text{Volumen, bl} = \frac{30 \text{ pies} \times 10 \text{ pies} \times 5,5 \text{ pies}}{5,61}$$

$$\text{Volumen, bl} = \frac{1650}{5,61}$$

$$\text{Volumen, bl} = 294,12 \text{ bl}$$

Tanques Rectangulares con Lados Inclinados:



$$\text{Volumen, bl} = \frac{\text{longitud, pie} \times [\text{profundidad, pie} (\text{ancho}_1 + \text{ancho}_2)]}{5,61}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad total del tanque utilizando los siguientes datos:

Longitud	= 30 pies
Ancho ₁ (parte superior)	= 10 pies
Ancho ₂ (parte inferior)	= 6 pies
Profundidad	= 8 pies

Tabla A-4
CAPACIDAD Y DESPLAZAMIENTO DE CUELLOS DE PERFORACIÓN

O.D	ID Capacidad	1 ½"	1 ¾"	2"	2 ¼"	2 ½"	2 ¾"	3"	3 ¼"	3 ½"	3 ¾"	4"	4 ¼"
		0,0022	0,0030	0,0039	0,0049	0,0061	0,0073	0,0087	0,0103	0,0119	0,0137	0,0155	0,0175
4"	#/pie Desp.	36,7 0,0133	34,5 0,0125	32,0 0,0116	29,2 0,0106								
4 ¼"	#/pie Desp.	42,2 0,153	40,0 0,0145	37,5 0,0136	34,7 0,0126								
4 ½"	#/pie Desp.	48,1 0,0175	45,9 0,0167	43,4 0,0158	40,6 0,0148								
4 ¾"	#/pie Desp.	54,3 0,0197	52,1 0,0189	49,5 0,0180	46,8 0,0170	13,6 0,0159							
5"	#/pie Desp.	60,8 0,0221	58,6 0,0213	56,3 0,0214	53,3 0,0194	50,1 0,0182							
5 ¼"	#/pie Desp.	67,6 0,0246	65,4 0,0238	62,9 0,0229	60,1 0,0219	56,9 0,0207	53,4 0,0194						
5 ½"	#/pie Desp.	74,8 0,0272	72,6 0,0264	70,5 0,0255	67,3 0,0245	64,1 0,0233	60,6 0,0221	56,8 0,0207					
5 ¾"	#/pie Desp.	82,3 0,299	80,1 0,0291	77,6 0,0282	74,8 0,0272	71,6 0,0261	68,1 0,0248	64,3 0,0234					
6"	#/pie Desp.	90,1 0,0328	87,9 0,0320	85,4 0,0311	82,6 0,0301	79,4 0,0289	75,9 0,0276	72,1 0,0262	67,9 0,0247	63,4 0,0231			
6 ¼"	#/pie Desp.	98,0 0,0356	95,8 0,0349	93,3 0,0339	90,5 0,0329	87,3 0,0318	83,8 0,0305	80,0 0,0291	75,8 0,0276	71,3 0,0259			
6 ½"	#/pie Desp.	107,0 0,0389	104,8 0,0381	102,3 0,0372	99,5 0,0362	96,3 0,0350	92,8 0,0338	89,0 0,0324	84,8 0,0308	80,3 0,0292			
6 ¾"	#/pie Desp.	116,0 0,0422	113,8 0,0414	111,3 0,0405	108,5 0,0395	105,3 0,0383	101,8 0,0370	98,0 0,0356	93,8 0,0341	89,3 0,0325			
7"	#/pie Desp.	125,0 0,0455	122,8 0,0447	120,3 0,0438	117,5 0,0427	114,3 0,0416	110,8 0,0403	107,0 0,0389	102,8 0,374	98,3 0,0358	93,4 0,0340	88,3 0,0321	
7 ¼"	#/pie Desp.	134,0 0,0487	131,8 0,0479	129,3 0,0470	126,5 0,0460	123,3 0,0449	119,8 0,0436	116,0 0,0422	111,8 0,0407	107,3 0,0390	102,4 0,0372	97,3 0,0354	
7 ½"	#/pie Desp.	144,0 0,0524	141,8 0,0516	139,3 0,0507	136,5 0,0497	133,3 0,0485	129,8 0,0472	126,0 0,0458	121,8 0,0443	117,3 0,0427	112,4 0,0409	107,3 0,0390	
7 ¾"	#/pie Desp.	154,0 0,0560	151,8 0,0552	149,3 0,0543	146,5 0,0533	143,3 0,0521	139,8 0,0509	136,0 0,0495	131,8 0,0479	127,3 0,0463	122,4 0,0445	117,3 0,0427	
8"	#/pie Desp.	165,0 0,0600	162,8 0,0592	160,3 0,0583	157,5 0,0573	154,3 0,0561	150,8 0,0549	147,0 0,0535	142,8 0,0520	138,3 0,0503	133,4 0,0485	123,3 0,0467	122,8 0,0447
8 ¼"	#/pie Desp.	176 0,0640	173,8 0,632	171,3 0,0623	168,5 0,0613	165,3 0,0601	161,8 0,0589	158,0 0,0575	153,8 0,0560	149,3 0,0543	144,4 0,0525	139,3 0,0507	133,8 0,0487
8 ½"	#/pie Desp.	187,0 0,0680	184,8 0,0612	182,3 0,0663	179,5 0,0653	176,3 0,0641	172,8 0,0629	169,0 0,0615	164,8 0,0600	160,3 0,0583	155,4 0,0565	150,3 0,0547	144,8 0,0527
8 ¾"	#/pie Desp.	199,0 0,0724	196,8 0,0716	194,3 0,0707	191,5 0,0697	188,3 0,0685	184,8 0,0672	181,0 0,0658	176,8 0,0643	172,3 0,0627	167,4 0,0609	162,3 0,0590	156,8 0,0570
9"	#/pie Desp.	210,2 0,0765	208,0 0,0757	205,6 0,0748	202,7 0,0738	199,6 0,0726	196,0 0,0714	192,2 0,0700	188,0 0,0685	183,5 0,0668	178,7 0,0651	173,5 0,0632	168,0 0,0612
10"	#/pie Desp.	260,9 0,0950	258,8 0,0942	256,3 0,0933	253,4 0,0923	250,3 0,0911	246,8 0,0898	242,9 0,0884	238,8 0,0869	234,3 0,0853	229,4 0,0835	224,2 0,0816	118,7 0,0796

$$\text{Volumen, bl} = \frac{30 \text{ pie} \times [8 \text{ pie} \times (10 \text{ pie} + 6 \text{ pie})]}{5,62}$$

$$\text{Volumen, bl} = \frac{30 \text{ pie} \times 128}{5,62}$$

$$\text{Volumen} = 683,3 \text{ bl}$$

Tanques Cilíndricos Circulares



lado



$$\text{Volumen, bl} = \frac{3,14 \times r^2 \times \text{altura, pies}}{5,61}$$

Ejemplo: Determinar la capacidad total de un tanque cilíndrico con las siguientes dimensiones:

Altura = 15 pies

Diámetro = 10 pies

NOTA: El radio (r) es la mitad del diámetro.

$$r = \frac{10}{2} = 5$$

$$\text{Volumen, bl} = \frac{3,14 \times 5 \text{ pies}^2 \times 15, \text{ pies}}{5,61}$$

$$\text{Volumen, bl} = \frac{1177,5}{5,61}$$

$$\text{Volumen, bl} = 209,89 \text{ bl}$$

Tanque Cilíndrico Ahusado



a) Volumen de la sección cilíndrica (V_c):

$$V_c = 0,1781 \times 3,14 \times r_c^2 \times h_c$$

b) Volumen de la sección ahusada (V_t):

$$V_t = 0,059 \times 3,14 \times h_t \times (r_c^2 + r_b^2 + r_b r_c)$$

donde V_c = volumen de la sección cilíndrica, bl

r_c = radio de la sección cilíndrica, pie

h_c = altura de la sección cilíndrica, pie

V_t = volumen de la sección ahusada, bl

h_t = altura de la sección ahusada, pie

r_b = radio en el fondo, pie

Ejemplo: Determinar el volumen total de un tanque cilíndrico con las siguientes dimensiones:

Altura de la sección cilíndrica = 5,0 pies

Radio de la sección cilíndrica = 6,0 pies

Altura de la sección ahusada = 10,0 pies

Radio en el fondo = 1,0 pie

Solución:

a) Volumen de la sección cilíndrica (V_c):

$$V_c = 0,1781 \times 3,14 \times 6,0^2 \times 5,0$$

$$V_c = 100,66 \text{ bl}$$

b) Volumen de la sección ahusada (V_t):

$$V_t = 0,059 \times 3,14 \times 10 \text{ pies} \times (6^2 + 1^2 + 1 \times 6)$$

$$V_t = 1,8526 (36 + 1 + 6)$$

$$V_t = 1,8526 \times 43$$

$$V_t = 79,66 \text{ bl}$$

c) Volumen total:

$$\text{bl} = 100,66 \text{ bl} + 79,66 \text{ bl}$$

$$\text{bl} = 180,32$$

Tanque Cilíndrico Horizontal

a) Capacidad total del tanque:

$$\text{Volumen, bl} = \frac{3,14 \times r^2 \times L (7,48)}{42}$$

b) Volumen parcial:

$$\text{Vol., pie}^3 = L \left\{ 0,017453 \times r^2 \times \cos^{-1} \left(\frac{r-h}{r} \right) - \sqrt{2hr-h^2} (r-h) \right\}$$

Ejemplo 1: Determinar el volumen total del siguiente tanque:

Longitud = 30 pies

Radio = 4 pies

c) Capacidad total del tanque:

$$\text{Volumen, bl} = \frac{3,14 \times 4^2 \times 30 \times 7,48}{48}$$

$$\text{Volumen, bl} = \frac{11273,856}{48}$$

$$\text{Volumen} = 234,87 \text{ bl}$$

Ejemplo 2: Determinar el volumen si hay solamente 2 pies de fluido en este tanque ($h = 2$ pies)

$$\begin{aligned} \text{Vol., pie}^3 &= 30 \left\{ 0,017453 \times 4^2 \times \cos^{-1} \left(\frac{4-2}{4} \right) - \sqrt{2 \times 2 \times 4 - 2^2} (4-2) \right\} \\ \text{Vol., pie}^3 &= 30 [0,279248 \times \cos^{-1}(0,5) - \sqrt{12} \times (2)] \\ &= \\ \text{Vol., pie}^3 &= 30 (0,279248 \times 60 - 3,464 \times 2) \\ &= \\ \text{Vol., pie}^3 &= 30 \times 9,827 \\ &= \\ \text{Vol.} &= 294 \text{ pie}^3 \\ &= \end{aligned}$$

Para convertir el volumen, pie^3 , a barriles, multiplicar por 0,1781.

Para convertir el volumen, pie^3 , a galones, multiplicar por 7,4805.

Por consiguiente, 2 pies de fluido en este tanque resultaría en:

$$\text{Volumen, bl} = 294 \text{ pies}^3 \times 0,1781$$

$$\text{Volumen} = 52,36 \text{ bl}$$

NOTA: Este se aplica solamente hasta que el tanque esté medio lleno ($r - h$). Después se debe calcular el volumen total del tanque y sustraer el espacio vacío. Se puede calcular el espacio vacío utilizando $h =$ altura del espacio vacío.

ANEXO B

Factores de Conversión

PARA CONVERTIR DE	A	MULTIPLICAR POR
Área		
Pulgadas cuadradas	Centímetros cuadrados	6,45
Pulgadas cuadradas	Milímetros cuadrados	645,2
Centímetros cuadrados	Pulgadas cuadradas	0,155
Milímetros cuadrados	Pulgadas cuadradas	$1,55 \times 10^{-3}$
Tasa de Circulación		
Barriles/min	Galones/min	42,0
Pies cúbicos/min	Metros cúbicos/seg.	$4,72 \times 10^{-4}$
Pies cúbicos/min	Galones/min	7,48
Pies cúbicos/min	Litros/min	28,32
Metros cúbicos/seg.	Galones/min	15850
Metros cúbicos/seg.	Pies cúbicos/min	2118
Metros cúbicos/seg.	Litros/min	60000
Galones/min	Barriles/min	0,0238
Galones/min	Pies cúbicos/min	0,134
Galones/min	Litros/min	3,79
Galones/min	Metros cúbicos/seg.	$6,309 \times 10^{-5}$
Litros/min	Metros cúbicos/seg.	$1,667 \times 10^{-5}$
Litros/min	Pies cúbicos/min	0,0353
Litros/min	Galones/min	0,264
Fuerza de Impacto		
Libras	Dynes	$4,45 \times 10^5$
Libras	Kilogramos	0,454
Libras	Newtons	4,448
Dynes	Libras	$2,25 \times 10^{-6}$
Kilogramos	Libras	2,20
Newtons	Libras	0,2248
Longitud		
Pies	Metros	0,305
Pulgadas	Milímetros	25,40
Pulgadas	Centímetros	2,54
Centímetros	Pulgadas	0,394
Milímetros	Pulgadas	0,03937

PARA CONVERTIR DE	A	MULTIPLICAR POR
Metros	Pies	3,281
Peso de Lodo		
Libras/galón	Libras/pie cúbico	7,48
Libras/galón	Gravedad específica	0,120
Libras/galón	Gramos/centímetro cúbico	0,1198
Gramos/centímetro cúbico	Libras/galón	8,347
Libras/pie cúbico	Libras/galón	0,134
Gravedad específica	Libras/galón	8,34
Potencia		
Caballos de fuerza	Caballos de fuerza (métricos)	1,014
Caballos de fuerza	Kilovatios	0,746
Caballos de fuerza	Libras-pié/seg.	550
Caballos de fuerza (métricos)	Caballos de fuerza	0,986
Caballos de fuerza (métricos)	Libras-pié/seg.	542,5
Kilovatios	Caballos de fuerza	1,341
Libras-pié/seg.	Caballos de fuerza	0,00181
Presión		
Atmósferas	Libras/pulgadas cuadradas (psi)	14,696
Atmósferas	Kgs/centímetro cuadrado	1,033
Atmósferas	Pascal	1,013 x 10 ⁵
Kilogramos/centímetros cuad.	Atmósferas	0,9678
Kilogramos/centímetros cuad.	Libras/pulgadas cuadradas (psi)	14,223
Kilogramos/centímetros cuad.	Atmósferas	0,9678
Libras/pulgadas cuadradas (psi)	Atmósferas	0,0680
Libras/pulgadas cuadradas (psi)	Kilogramos/centímetros cuad.	0,0703
Libras/pulgadas cuadradas (psi)	Pascal	6,894 x 10 ³
Velocidad		
Pies/seg.	Metros/seg.	0,305
Pies/min.	Metros/seg.	5,08 x 10 ⁻³
Metros/seg.	Pies/min	196,8
Metros/seg.	Pies/seg.	3,28
Volumen		
Barriles	Galones	42
Centímetros cúbicos	Pies cúbicos	3,531 x 10 ⁻⁵
Centímetros cúbicos	Pulgadas cúbicas	0,06102
Centímetros cúbicos	Metros cúbicos	10 ⁻⁶

PARA CONVERTIR DE	A	MULTIPLICAR POR
Centímetros cúbicos	Galones	$2,642 \times 10^{-4}$
Centímetros cúbicos	Litros	0,001
Pies cúbicos	Centímetros cúbicos	28320
Pies cúbicos	Pulgadas cúbicas	1728
Pies cúbicos	Metros cúbicos	0,02832
Pies cúbicos	Galones	7,48
Pies cúbicos	Litros	28,32
Pulgadas cúbicas	Centímetros cúbicos	16,39
Pulgadas cúbicas	Pies cúbicos	$5,787 \times 10^{-4}$
Pulgadas cúbicas	Metros cúbicos	$1,639 \times 10^{-5}$
Pulgadas cúbicas	Galones	$4,329 \times 10^{-3}$
Pulgadas cúbicas	Litros	0,01639
Metros cúbicos	Centímetros cúbicos	10^6
Metros cúbicos	Pies cúbicos	35,31
Metros cúbicos	Galones	254,2
Galones	Barriles	0,0238
Galones	Centímetros cúbicos	3785
Galones	Pies cúbicos	0,1337
Galones	Pulgadas cúbicas	231
Galones	Metros cúbicos	$3,785 \times 10^{-3}$
Galones	Litros	3,785
Peso		
Libras	Toneladas (métricas)	$4,535 \times 10^{-4}$
Toneladas (métricas)	Libras	2205
Toneladas (métricas)	Kilogramos	1000