

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE LA HIDRÁULICA DE POZOS

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se estudiarán los efectos combinados de las presiones que interactúan en un pozo, durante el control de cualquier fluido ajeno al pozo. Para ilustrar al lector cual es la forma de aplicar el concepto de la presión a condiciones dinámicas durante el control de pozos con entrada de gas, en este capítulo se mostrará como es el efecto de la presión en el pozo por efectos hidráulicos, gravitacionales y con entrada de gas al sistema y su impacto en la presión de fractura.

Para lo siguiente partimos de la siguiente suposición:

$$\Delta P \text{ Hidráulica} + \Delta P \text{ Gravitacional} + \text{Entrada de Gas} < \text{Presión de Formación}$$

Las consideraciones para el desarrollo de este análisis, requieren plantear las siguientes consideraciones:

- Pozo vertical.
- Efectos de caídas de presión en el agujero se consideran homogéneas.
- Entrada de gas metano.
- Fluido de control incompresible.
- Flujo laminar ascendente en tubos circulares concéntricos.
- Sarta de perforación sin movimientos recíprocos.

#### 3.2 MODELOS REOLÓGICOS<sup>1,2</sup>

Los modelos reológicos, figura 3-1, ayudan a predecir el comportamiento de los fluidos sobre una amplia escala de velocidades de corte.

---

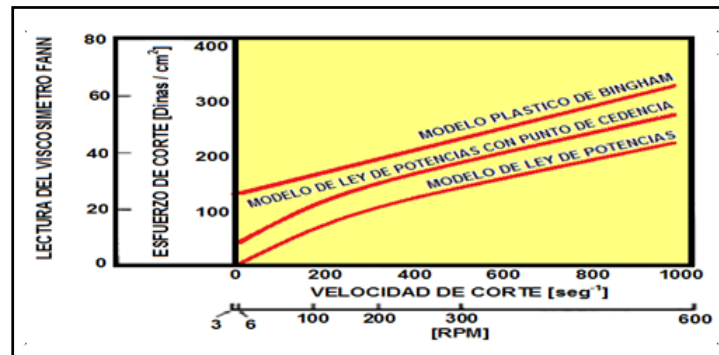


Figura 3-1. Comportamiento de los modelos reológicos.

La mayoría de los fluidos de perforación son fluidos pseudoplásticos no-newtonianos. El modelo de ley de potencias con punto de cedencia es el que mejor caracteriza a los fluidos de perforación.

La elección del modelo depende del comportamiento gráfico que tenga el fluido de perforación.

Al tener la sarta estática, sin presentar rotación ni movimientos recíprocos, los métodos más comunes para estas consideraciones son los siguientes:

- Modelo de Bingham.
- Modelo de Ley de Potencias.
- Modelo de Ley de Potencias con Punto de Cedencia.

### 3.2.1 MODELO DE BINGHAM

El modelo de Bingham describe el flujo por medio de la ecuación:

$$\tau = \tau_Y + (\mu_P \times \gamma) \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$\mu_P = \theta_{600} - \theta_{300} \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$\tau_Y = PC = \theta_{300} - \mu_P \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

- $\tau$ : Esfuerzo de corte, [lb / 100pies<sup>2</sup>]
- $\tau_y$ : Esfuerzo de corte a la velocidad de corte más baja, [lb/100pies<sup>2</sup>]
- $\mu_p$ : Viscosidad plástica, [cP]
- $\gamma$ : Velocidad de corte [seg<sup>-1</sup>]
- $\theta_{600}$ : Lectura del viscosímetro Fann a 600 [rpm]
- $\theta_{300}$ : Lectura del viscosímetro Fann a 300 [rpm]

### 3.2.2 MODELO DE LEY DE POTENCIAS

Las ecuaciones generales para calcular el esfuerzo de corte, el índice de consistencia y el índice de flujo son:

$$\tau = K \times \gamma^n \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$K = \frac{510 \times \theta_{300}}{511^n} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$n = 3.32 \times \log \left( \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right) \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde:

- $\tau$ : Esfuerzo de corte, [lb/100pies<sup>2</sup>]
- K: Índice de consistencia, [cP]
- $\gamma$ : Velocidad de corte [seg<sup>-1</sup>]
- n: Índice de flujo, [Adimensional]
- $\theta_{300}$ : Lectura del viscosímetro Fann a 300 [rpm]
- $\theta_{600}$ : Lectura del viscosímetro Fann a 600 [rpm]

### 3.2.3 MODELO DE LEY DE POTENCIAS CON PUNTO DE CEDENCIA

Debido a que la mayoría de los fluidos de perforación presentan esfuerzo cortante, este modelo describe el comportamiento reológico de los lodos de perforación con mayor exactitud que ningún otro modelo.

$$\tau = (K \times \gamma^n) + \tau_y \quad \text{Ec. 3.7}$$

$$n = 3.32 \times \log \left( \frac{\theta_{600} - \theta_0}{\theta_{300} - \theta_0} \right) \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$K = \frac{510 \times (\theta_{300} - \theta_0)}{511^n} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde:

- $\tau$ : Esfuerzo de corte, [lb/100pies<sup>2</sup>]
- $\tau_Y$ : Esfuerzo de corte a la velocidad de corte más baja, [lb/100pies<sup>2</sup>]
- K: Índice de consistencia, [cP]
- $\gamma$ : Velocidad de corte [seg<sup>-1</sup>]
- n: Índice de flujo, [Adimensional]
- $\theta_{300}$ : Lectura del viscosímetro Fann a 300 [rpm]
- $\theta_{600}$ : Lectura del viscosímetro Fann a 600 [rpm]

### EJERCICIO 3.1

En un laboratorio de fluidos de perforación se analizó con un viscosímetro Fann el lodo con el cual se estaba perforando y se registraron los siguientes datos:

N [rpm]	$\theta$
3	6
6	8
100	20
200	30
300	46
600	80

Tabla 3-1. Datos del viscosímetro Fann.

- a) Determinar el modelo reológico
- b) Elaborar una gráfica con sus resultados

### SOLUCIÓN

Para determinar el modelo reológico, primero, convertiremos las unidades de la tabla 3-1.

$$\tau = 5.1109 \times \theta = 5.1109 \times \theta_3 = 30.665 \text{ [dinas / cm}^2\text{]}$$

$$\gamma = 1.703 \times N = 1.703 \times 3 = 5.109 \text{ [seg}^{-1}\text{]}$$

$\gamma$ [seg-1]	$\tau$ [Dinas / cm2]
5.109	30.665
10.218	40.887
170.300	102.218
340.600	153.327
510.900	253.101
1021.800	405.872

Tabla 3-2. Resultados de la conversión de unidades.

El siguiente paso es, realizar una grafica con los datos obtenidos y observar cual es el comportamiento del fluido de perforación. De esta manera podemos determinar cuál es el modelo reológico que debemos aplicar para dicho fluido.

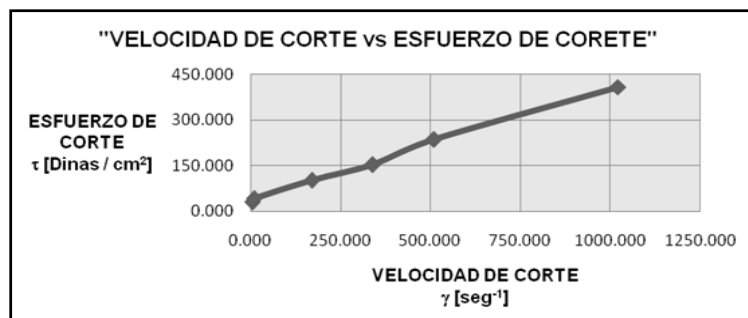


Figura 3-2. Grafica de los resultados de la conversión de unidades.

Al observar el comportamiento grafico del fluido de perforación, podemos determinar que el modelo reológico es:

**“MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM”**

Una vez que conocemos el comportamiento reológico del fluido de perforación, aplicamos el modelo a nuestros datos.

$$\mu_P = \theta_{600} - \theta_{300} = 80 - 46 = 34 \text{ [cP]}$$

$$\tau_Y = PC = \theta_{300} - \mu_P = 46 - 34 = 12 \text{ [lb/100pies}^2\text{]}$$

$$\tau = \tau_Y + (\mu_P \times \gamma) = 12 + (34 \times 5.109) = 185.706 \text{ [lb / 100 pies}^2\text{]}$$

$\tau$ [lb/100pies <sup>2</sup> ]
185.706
359.412
5802.200
11592.400
17382.600
34753.200

Tabla 3-3. Resultados del modelo plástico de Bingham.

Finalmente realizamos un grafica con los datos obtenidos, figura 3-3.

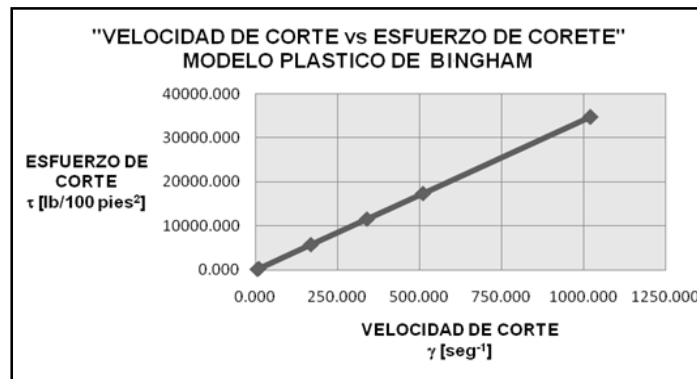


Figura 3-3. Resultados del modelo plástico de Bingham.

### 3.3 CAÍDAS DE PRESIÓN EN UN SISTEMA

La caída de presión,  $\Delta P$ , es proporcional al gasto del flujo y a diversos términos relacionados con la geometría de un sistema dado y con las propiedades de los fluidos. Aspectos geométricos como el diámetro y la longitud. Propiedades de los fluidos como la densidad.

En un sistema de circulación de fluido de perforación las caídas o pérdidas de presión,  $\Delta P$ , se manifiestan desde la descarga de la bomba hasta la línea de flote. En la práctica se tienen cuatro elementos en los cuales se consideran las pérdidas de presión en el sistema, estos son:

- Equipo superficial.
- Interior de tuberías.
- A través de las toberas de la barrena.
- Espacio anular.

Las pérdidas de presión dependen principalmente de las propiedades reológicas del lodo, la geometría del agujero y los diámetros de la sarta de perforación.<sup>3</sup>

### 3.3.1 CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN<sup>4,5</sup>

Todos los programas o simuladores de hidráulica empiezan calculando las caídas de presión en las diferentes partes del sistema circulatorio. Las caídas de presión en:

- Las conexiones superficiales.
- Dentro y alrededor de la tubería.
- Dentro y alrededor de los lastra barrenas.
- En la barrena.

A estas caídas de presión, excepto la caída de presión en la barrena, se les conoce como presiones parasitas,  $P_p$ .

Sea un sistema de circulación de un pozo, figura 3-4.

Para dicho sistema, considerar un gasto,  $Q$ , de un fluido de perforación dado y una potencia de la bomba igual al producto del gasto,  $Q$ , y la presión de la bomba,  $P_b$ . La caída de presión,  $\Delta P$ , por fricción del sistema se obtiene de la siguiente forma, figura 3-5:

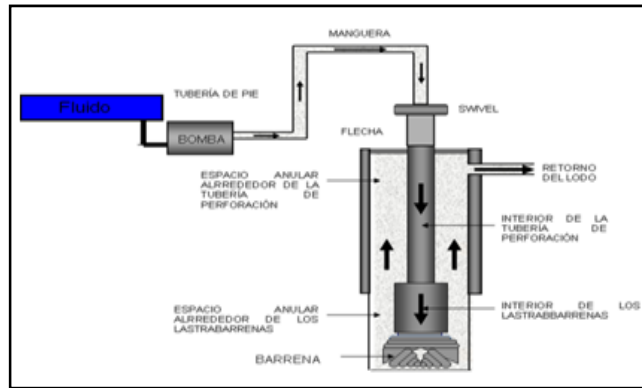


Figura 3-4. Sistema de circulación de un pozo.

$$\Delta P_b = \Delta P_s + \Delta P_{TP} + \Delta P_{LB} + \Delta P_{Bna} + \Delta P_{EA} \tag{Ec. 3.10a}$$

Al ordenar la ecuación anterior de la siguiente manera, podemos observar las llamadas “presiones parasitas”,  $\Delta P_P$ , estas se encuentran a la derecha de la caída de presión en la barrena.

$$\Delta P_b = \Delta P_{Bna} + (\Delta P_s + \Delta P_{TP} + \Delta P_{LB} + \Delta P_{EA}) \tag{Ec. 3.10b}$$

Por lo tanto podemos transcribir la ecuación de la siguiente manera:

$$P_b = \Delta P_{Bna} + \Delta P_C \tag{Ec. 3.10c}$$

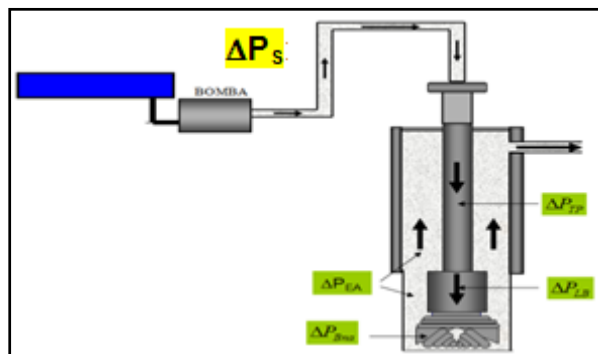


Figura 3-5. Caídas de presión de un sistema.

Donde:

- $P_S$ : Presión superficial de bombeo, [psi]



- $\Delta P_S$ : Caída de presión por fricción en las conexiones superficiales, [psi]
- $\Delta P_{TP}$ : Caída de presión por fricción en el interior de la tubería de perforación, [psi]
- $\Delta P_{LB}$ : Caída de presión por fricción en el interior de la lastra barrena, [psi]
- $\Delta P_{Bna}$ : Caídas de presión por fricción en el interior de la barrena, [psi]
- $\Delta P_{EA}$ : Caídas de presión por fricción en el espacio anular, [psi]
- $\Delta P_p$ : Caídas de presión por fricción parasitas, [psi]

Para  $\Delta P_{EA}$  se consideran, entre otros, los siguientes espacios:

- Espacio anular entre el agujero y los lastra barrena,  $\Delta P_{EA(AG\_LB)}$
- Espacio anular entre el agujero y la tubería de perforación,  $\Delta P_{EA(AG\_TP)}$
- Espacio anular entre la tubería de perforación y la tubería de revestimiento,  $\Delta P_{EA(TR\_TP)}$

Por lo tanto, la caída de presión por fricción en el espacio anular se obtiene de la siguiente forma:

$$\Delta P_{EA} = \Delta P_{EA(AG\_LB)} + \Delta P_{EA(AG\_TP)} + \Delta P_{EA(TR\_TP)} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Al obtener las caídas de presión por fricción durante las operaciones de cementación y perforación, podemos determinar algunos parámetros como son:

- La densidad equivalente de circulación, DEC.
- El programa hidráulico del pozo.
- Presiones superficiales y de fondo, en las operaciones de control de pozos.

Durante las operaciones de bombeo se pueden obtener dos regímenes de flujo:

- Flujo laminar.
- Flujo turbulento.

El régimen de flujo lo obtendremos a partir del número de Reynolds.

A altas velocidades de corte, las caídas de presión dependen de tres principales factores:

- Geometría.
- Velocidad.
- Densidad.

### 3.3.1.1 CAÍDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN EN LAS CONEXIONES SUPERFICIALES

Las conexiones superficiales consideradas en el análisis de las caídas de presión son la tubería de pie (Stand Pipe), la manguera (Hose), el cuello de ganso, el tubo lavador de la unión giratoria (Swivel), y la flecha.

Generalmente estas caídas de presión por fricción se determinan considerando una constante, E, que representa una longitud y diámetro equivalente de la tubería de perforación. Esta constante se determina de acuerdo con cualquiera de las combinaciones del equipo superficial. En la tabla 3-4, se muestran cuatro combinaciones de equipo superficial y cada uno de ellos con su respectiva constante.

Después de haber seleccionado el valor de la constante, E, según el caso de conexiones superficiales del equipo. La Caída de Presión por Fricción en la superficie se determinara a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta P_s = 5.4595 \times E \times \rho_f^{0.8} \times Q^{1.8} \times \mu_p^{0.2} \quad \text{Ec. 3.12}$$

CASO	TUBERIA DE PIE		MANGUERA		UNION GIRATORIA		FLECHA		CONSTANTE
	L [m]	Di [pg]	L [m]	Di [pg]	L [m]	Di [pg]	L [m]	Di [pg]	E [A dimensional]
1	12.192	3.0	13.716	2.0	6.096	2.0	12.192	2.25	0.000250
2	12.192	3.5	16.764	2.5	7.62	2.5	12.192	3.25	0.000096
3	13.716	4.0	16.764	3.0	7.62	2.5	12.192	3.25	0.000053
4	13.716	4.0	16.764	3.0	9.144	3.0	12.192	4.00	0.000042

Tabla 3-4. Diámetro y longitud equivalente.

Donde:

- $\Delta P_S$ : Caída de presión por fricción en el equipo superficial, [psi]
- E: Constante superficial, [Adimensional]
- $\rho_f$ : Densidad del fluido de perforación, [gr / cm<sup>3</sup>]
- Q: Gasto de operación, [gpm]
- $\mu_p$ : Viscosidad plástica, [cP]

### 3.3.1.2 CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN EN EL INTERIOR DE LAS TUBERÍAS

Las siguientes ecuaciones aplican para:

- $\Delta P_{TP}$ : Caídas de presión por fricción al interior de la tubería de perforación.
- $\Delta P_{HW}$ : Caídas de presión por fricción al interior de la tubería pesada o heavy weight.
- $\Delta P_{DC}$ : Caídas de presión por fricción al interior de los lastra barrenas o drill collar.

$$v_T = 24.5098 \times \frac{Q}{Di^2} \quad \text{Ec. 3.13}$$

#### MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM

$$N_{Re} = 129.0755 \times \left( \frac{\rho_f \times v_T \times Di}{\mu_p} \right) \quad \text{Ec. 3.14}$$

$$N_{He} = 309614.34 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_y \times Di^2}{\mu_p^2} \right) \quad \text{Ec. 3.15}$$

Si  $N_{Re} < N_{CRe}$ ; Flujo laminar

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{v_T \times \mu_p}{27432 \times Di^2} + \frac{\tau_y}{68.58 \times Di} \quad \text{Ec. 3.16}$$

Si  $N_{Re} > N_{CRe}$ ; Flujo turbulento

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{f \times \rho_f \times v_T^2}{3392.2668 \times Di} \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$f = \left( \frac{0.079}{N_{Re}^{0.25}} \right) \quad \text{Ec. 3.18}$$

### MODELO DE LEY DE POTENCIAS

$$N_{Re} = \frac{743575.14 \times \rho_f \times \left( \frac{v_T}{60} \right)^{2-n}}{K} \times \left( \frac{0.0416 \times Di}{3 + \frac{1}{n}} \right)^n \quad \text{Ec. 3.19}$$

Si  $N_{Re} < N_{CRe}$ ; Flujo laminar

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{K \times \left( \frac{v_T}{60} \right)^n \times \left( \frac{3 + \frac{1}{n}}{0.0416} \right)^n}{43891.2 \times Di^{1+n}} \quad \text{Ec. 3.20}$$

Si  $N_{Re} > N_{CRe}$ ; Flujo turbulento

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{f \times \rho_f \times v_T^2}{3392.2668 \times Di} \quad \text{Ec. 3.21}$$

### MODELO DE LEY DE POTENCIAS CON PUNTO DE CEDENCIA

$$N_{Re} = \frac{\rho_f \times v_T^2}{2.474 \times \theta} \quad \text{Ec. 3.22}$$

$$\theta = \theta_0 + (K \times R^n) \quad \text{Ec. 3.23}$$

$$R = 0.939 \times \left( \frac{G \times v_T}{Di} \right) \quad \text{Ec. 3.24}$$

$$G = \left( \frac{(3 \times n) + 1}{4 \times n} \right) \times 8.13 \times n \times 0.123^{1/n} \quad \text{Ec. 3.25}$$

Si  $N_{Re} < 2100$ ; Flujo laminar

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{\theta}{85.6921 \times D_i} \quad \text{Ec. 3.26}$$

Si  $N_{Re} < 3200$ ; Flujo turbulento

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{f \times \rho_f \times v_T^2}{3392.2668 \times D_i} \quad \text{Ec. 3.27}$$

Donde:

- $N_{Re}$ : Número de Reynolds, [Adimensional]
- $N_{CRe}$ : Número de crítico de Reynolds, [Adimensional]
- $N_{He}$ : Número de Hedstrom, [Adimensional]
- $\rho_f$ : Densidad del fluido, [gr / cm<sup>3</sup>]
- $v_T$ : Velocidad en el interior de la tubería, [pies / min]
- $D_i$ : Diámetro interior de la tubería, [pg]
- $\mu_p$ : Viscosidad plástica, [cP]
- $Q$ : Gasto de operación, [gpm]
- $\frac{\Delta P_f}{\Delta L}$ : Caída de presión por fricción, [psi / m]
- $\tau_Y$ : Esfuerzo de corte a la velocidad de corte más baja, [lb / 100 pies<sup>2</sup>]
- $f$ : Factor de fricción, [Adimensional]
- $K$ : Índice de consistencia, [cP]
- $n$ : Índice de flujo, [Adimensional]
- $\theta$ : Lectura del viscosímetro Fann equivalente
- $\theta_0$ : Lectura del viscosímetro Fann a 0 [rpm]
- $R$ : Velocidad de rotación equivalente
- $G$ : Factor geométrico

### 3.3.1.3 CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN EN EL INTERIOR DE LA BARRENA

$$\Delta P_{Bna} = \frac{Q^2 \times \rho_f}{1303 \times A_t^2} \quad \text{Ec. 3.28}$$

$$A_t = \frac{\pi}{4} \times \left( n \times \left( \frac{D_i}{32} \right)^2 \right) \quad \text{Ec. 3.29}$$

Donde:

- $\Delta P_{Bna}$ : Caída de presión en la barrena, [psi]
- Q: Gasto de operación, [gpm]
- $\rho_f$ : Densidad del fluido en las toberas de la barrena, [gr/cm<sup>3</sup>]
- $A_t$ : Área de las toberas de la barrena, [pg<sup>2</sup>]
- n: Número de toberas
- $D_i$ : Diámetro interior de la tobera, [pg]

### 3.3.1.4 CAÍDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN EN EL ESPACIO ANULAR

Las siguientes ecuaciones aplican para:

- $\Delta P_{EA(Ag\_DC)}$ : Caídas de presión por fricción en el espacio anular, entre el agujero y los lastra barrenas.
- $\Delta P_{EA(Ag\_HW)}$ : Caídas de presión por fricción en el espacio anular, entre el agujero y la tubería pesada.
- $\Delta P_{EA(Ag\_TP)}$ : Caídas de presión por fricción en el espacio anular, entre el agujero y la tubería de perforación.
- $\Delta P_{EA(TR\_TP)}$ : Caídas de presión por fricción en el espacio anular, entre la tubería de revestimiento y la tubería de perforación.

$$v_{EA} = 24.5098 \times \frac{Q}{(D_2^2 - D_1^2)} \quad \text{Ec. 3.30}$$

### MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM

$$N_{Re} = 105.2911 \times \left( \frac{\rho_f \times v_{EA} \times (D_2 - D_1)}{\mu_p} \right) \quad \text{Ec. 3.31}$$

$$N_{He} = 206131.38 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_y \times (D_2 - D_1)^2}{\mu_p^2} \right) \quad \text{Ec. 3.32}$$

Si  $N_{Re} < N_{CRe}$ ; Flujo laminar

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{v_{EA} \times \mu_p}{18288 \times (D_2 - D_1)^2} + \frac{\tau_Y}{60.96 \times (D_2 - D_1)} \quad \text{Ec. 3.33}$$

Si  $N_{Re} > N_{CRe}$ ; Flujo turbulento

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \left( \frac{f \times \rho_f \times v_{EA}^2}{2774.2957 \times (D_2 - D_1)} \right) \quad \text{Ec. 3.34}$$

MODELO DE LEY DE POTENCIAS

$$N_{Re} = \frac{9096486 \times \rho_f \times \left(\frac{v_{EA}}{60}\right)^{2-n}}{K} \times \left( \frac{0.0208 \times (D_2 - D_1)}{2 + \frac{1}{n}} \right)^n \quad \text{Ec. 3.35}$$

Si  $N_{Re} < N_{CRe}$ ; Flujo laminar

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{K \times \left(\frac{v_{EA}}{60}\right)^n \times \left(\frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208}\right)^n}{43891.2 \times (D_2 - D_1)^{1+n}} \quad \text{Ec. 3.36}$$

Si  $N_{Re} > N_{CRe}$ ; Flujo turbulento

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{f \times \rho_f \times v_{EA}^2}{2774.2957 \times (D_2 - D_1)} \quad \text{Ec. 3.37}$$

MODELO DE LEY DE POTENCIAS CON PUNTO DE CEDENCIA

$$R = 0.939 \times \left( \frac{G \times v_{EA}}{D_2 - D_1} \right) \quad \text{Ec. 3.38}$$

$$G = \left( \frac{[(3-c) \times n] + 1}{(4-c) \times n} \right) \times \left( 1 + \frac{c}{2} \right) \times 8.13 \times n \times 0.123^{1/n} \quad \text{Ec. 3.39}$$

$$c = 1 - (1 - \alpha^X)^{1/X} \quad \text{Ec. 3.40}$$

$$\alpha = \frac{D_1}{D_2} \quad \text{Ec. 3.41}$$

$$X = 0.37 \times n^{-0.14} \quad \text{Ec. 3.42}$$

Si  $N_{Re} < 2100$ ; Flujo laminar

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{\theta}{85.6921 \times (D_2 - D_1)} \quad \text{Ec.3.43}$$

Si  $N_{Re} > 3200$ ; Flujo turbulento

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \frac{f \times \rho_f \times v_{EA}^2}{2774.2957 \times (D_2 - D_1)} \quad \text{Ec. 3.44}$$

Donde:

- $N_{Re}$ : Número de Reynolds, [Adimensional]
- $N_{CRe}$ : Número crítico de Reynolds, [Adimensional]
- $N_{He}$ : Número de Hedstrom, [Adimensional]
- $\rho_f$ : Densidad del fluido, [gr / cm<sup>3</sup>]
- $v_T$ : Velocidad en el interior de la tubería, [pies / min]
- $v_{EA}$ : Velocidad en el espacio anular, [pies / min]
- $D_i$ : Diámetro interior de la tubería, [pg]
- $\mu_p$ : Viscosidad plástica, [cP]
- $Q$ : Gasto de operación, [gpm]
- $\frac{\Delta P_f}{\Delta L}$ : Caída de presión por fricción, [psi / m]
- $\tau_Y$ : Esfuerzo de corte a la velocidad de corte más baja, [lb / 100 pies<sup>2</sup>]
- $f$ : Factor de fricción, [Adimensional]
- $K$ : Índice de consistencia, [cP]
- $n$ : Índice de flujo, [Adimensional]



- $\theta$ : Lectura del viscosímetro Fann equivalente
- R: Velocidad de rotación equivalente
- G: Factor geométrico
- $D_2$ : Diámetro mayor en el espacio anular, [pg]
- $D_1$ : Diámetro menor en el espacio anular, [pg]

EJERCICIO 3.2

Considerando los resultados obtenidos en el ejercicio 3.1 y el caso 3 de la tabla 3-4, calcular las caídas de presión por fricción en cada una de las secciones del sistema de circulación. Se cuenta con la siguiente información:

TABLA DE DATOS	
DATOS DEL FLUIDO DE PERFORACION	$\rho_f = 2.0 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$
DATOS DE OPERACIÓN	$Q = 500 \text{ [rpm]}$ $P_b = 3000 \text{ [psi]}$
DATOS DE LA BARRENA	$D_{bna} = 12.25 \text{ [pg]}$ Toberas: 1 - 14/32 [pg] 6 - 13/32 [pg]
DATOS DE LA SARTA DE PERFORACION	DC 8x3 [pg] 98 [m] HW 5x3 [pg] 108 [m] TP 5", $D_{TR} = 4.276 \text{ [pg]}$

Tabla 3-5. Tabla de datos.

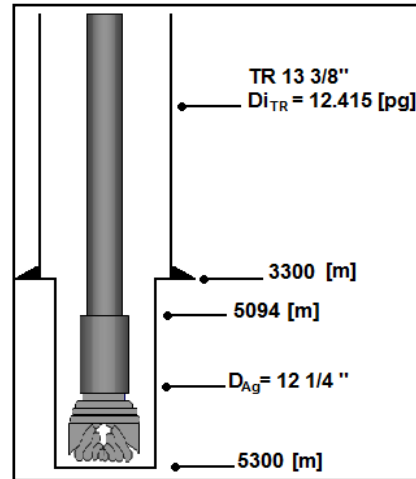


Figura 3-6. Estado mecánico.

SOLUCIÓN

Sabemos que se trata de un fluido que se comporta similar al modelo plástico de Bingham.

Calculamos la caída de presión en el equipo superficial

$$\Delta P_s = 5.4595 \times E \times \rho_f^{0.8} \times Q^{1.8} \times \mu_p^{0.2} = 5.4595 \times 0.000053 \times 2^{0.8} \times 500^{1.8} \times 34^{0.2} = 73.5689 \text{ [psi]}$$

Calculamos la caída de presión en el interior de la tubería de perforación

$$v_{TP} = 24.5098 \times \frac{Q}{Di_{TP}^2} = 24.5098 \times \frac{500}{4.276^2} = 670.2462 \text{ [pies / min]}$$

$$N_{Re} = 129.0755 \times \left( \frac{\rho_f \times v_{TP} \times Di_{TP}}{\mu_p} \right) = 129.0755 \times \left( \frac{2 \times 670.2462 \times 4.276}{34} \right) = 21760.4038$$

$$N_{He} = 309614.34 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_y \times Di_{TP}^2}{\mu_p^2} \right) = 309614.34 \times \left( \frac{2 \times 12 \times 4.276^2}{34^2} \right) = 117530.3063$$

De la figura D-1;  $N_{CRe} = 7000$

$N_{Re} > N_{CRe}$ . Por lo tanto se trata de flujo turbulento.

$$f = \left( \frac{0.079}{N_{Re}^{0.25}} \right) = \left( \frac{0.079}{21760.4038^{0.25}} \right) = 0.0065$$

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta L_{TP}} = \frac{f \times \rho_f \times v_{TP}^2}{3392.2668 \times Di_{TP}} = \frac{0.0065 \times 2 \times 670.2462^2}{3392.2668 \times 4.276} = 0.4026 \text{ [psi / m]}$$

$$\Delta P_{TP} = \Delta L_{TP} \times 0.4026 = 5094 \times 0.4026 = 2050.8444 \text{ [psi]}$$

Calculamos la caída de presión en el interior de la tubería pesada.

$$v_{HW} = 24.5098 \times \frac{Q}{Di_{HW}^2} = 24.5098 \times \frac{500}{3^2} = 1361.6555 \text{ [pies / min]}$$

$$N_{Re} = 129.0755 \times \left( \frac{\rho_f \times v_{HW} \times Di}{\mu_p} \right) = 129.0755 \times \left( \frac{2 \times 1361.6555 \times 3}{34} \right) = 31015.8290$$

$$N_{He} = 309614.34 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_y \times Di_{HW}^2}{\mu_p^2} \right) = 309614.34 \times \left( \frac{2 \times 12 \times 3^2}{34^2} \right) = 57851.8143$$

De la figura D-1;  $N_{CRe} = 5750$

$N_{Re} > N_{CRe}$ . Por lo tanto se trata de flujo turbulento.

$$f = \left( \frac{0.079}{N_{Re}^{0.25}} \right) = \left( \frac{0.079}{31015.8290^{0.25}} \right) = 0.0059$$

$$\frac{\Delta P_{HW}}{\Delta L_{HW}} = \frac{f \times \rho_f \times v_{HW}^2}{3392.2668 \times Di_{HW}} = \frac{0.0059 \times 2 \times 1361.6555^2}{3392.2668 \times 3} = 2.1498 \text{ [psi / m]}$$

$$\Delta P_{HW} = \Delta L_{HW} \times 2.1498 = 108 \times 2.1498 = 232.1784 \text{ [psi]}$$

Calculamos la caída de presión en los lastra barrenas.

$$v_{DC} = 24.5098 \times \frac{Q}{Di_{DC}^2} = 24.5098 \times \frac{500}{3^2} = 1361.6555 \text{ [pies / min]}$$

$$N_{Re} = 129.0755 \times \left( \frac{\rho_f \times v_{DC} \times Di_{DC}}{\mu_p} \right) = 129.0755 \times \left( \frac{2 \times 1361.6555 \times 3}{34} \right) = 31015.8290$$

$$N_{He} = 309614.34 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_v \times Di_{DC}^2}{\mu_p^2} \right) = 309614.34 \times \left( \frac{2 \times 12 \times 3^2}{34^2} \right) = 57851.8143$$

De la figura D-1;  $N_{CRe} = 5750$

$N_{Re} > N_{CRe}$ . Por lo tanto se trata de flujo turbulento.

$$f = \left( \frac{0.079}{N_{Re}^{0.25}} \right) = \left( \frac{0.079}{31015.8290^{0.25}} \right) = 0.0059$$

$$\frac{\Delta P_{DC}}{\Delta L_{DC}} = \frac{f \times \rho_f \times v_{DC}^2}{3392.2668 \times Di_{DC}} = \frac{0.0059 \times 2 \times 1361.6555^2}{3392.2668 \times 3} = 2.1498 \text{ [psi / m]}$$

$$\Delta P_{DC} = \Delta L_{DC} \times 2.1498 = 98 \times 2.1498 = 210.6804 \text{ [psi]}$$

Calculamos la caída de presión en la barrena.

$$A_t = \frac{\pi}{4} \times \left( n \times \left( \frac{Di_t}{32} \right)^2 \right) = \frac{\pi}{4} \left[ \left( 1 \times \left( \frac{14}{32} \right)^2 \right) + \left( 6 \times \left( \frac{13}{32} \right)^2 \right) \right] = 0.9280 \text{ [pg}^2\text{]}$$

$$\Delta P_{Bna} = \frac{Q^2 \times \rho_f}{1303 \times A_t^2} = \frac{500^2 \times 2}{1303 \times 0.9280^2} = 445.5840 \text{ [psi]}$$

Calculamos las caídas de presión en el espacio anular.

ENTRE EL AGUJERO Y LOS LASTRA BARRENA

$$v_{EA(AG\_DC)} = 24.5098 \times \frac{Q}{(Di_{AG}^2 - De_{DC}^2)} = 24.5098 \times \frac{500}{(12.250^2 - 8^2)} = 142.3953 \text{ [pies / min]}$$

$$N_{Re} = 105.2911 \times \left( \frac{\rho_f \times v_{EA(AG\_DC)} \times (D_{AG} - D_{DC})}{\mu_p} \right) = 105.2911 \times \left( \frac{2 \times 142.3953 \times (12.25 - 8)}{34} \right) = 3748.2394$$

$$N_{He} = 206131 \cdot 38 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_y \times (D_{AG} - D_{DC})^2}{\mu_p^2} \right) = 206131 \cdot 38 \times \left( \frac{2 \times 12 \times (12.25 - 8)^2}{34^2} \right) = 77299 \cdot 2675$$

De la figura D-1;  $N_{CRe} = 6000$

$N_{Re} < N_{CRe}$ . Por lo tanto se trata de flujo laminar.

$$\frac{\Delta P_{EA(AG-DC)}}{\Delta L_{DC}} = \frac{v_{EA(AG-DC)} \times \mu_p}{18288 \times (D_{AG} - D_{DC})^2} + \frac{\tau_y}{60.96 \times (D_{AG} - D_{DC})} = \frac{142.3953 \times 34}{18288 \times (12.25 - 8)^2} + \frac{12}{60.96 \times (12.25 - 8)} = 0.0609 \text{ [psi/m]}$$

$$\Delta P_{EA(AG-DC)} = \Delta L_{DC} \times 0.0609 = 98 \times 0.0609 = 5.9682 \text{ [psi]}$$

### ENTRE EL AGUJERO Y LA TUBERÍA PESADA

$$v_{EA(AG-HW)} = 24.5098 \times \left( \frac{Q}{(Di_{AG}^2 - De_{HW}^2)} \right) = 24.5098 \times \left( \frac{500}{(12.250^2 - 5^2)} \right) = 97.9902 \text{ [pies / min]}$$

$$N_{Re} = 105.2911 \times \left( \frac{\rho_f \times v_{EA(AG-HW)} \times (D_{AG} - D_{HW})}{\mu_p} \right) = 105.2911 \times \left( \frac{2 \times 97.9902 \times (12.25 - 5)}{34} \right) = 4400.1085$$

$$N_{He} = 206131 \cdot 38 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_y \times (D_{AG} - D_{HW})^2}{\mu_p^2} \right) = 206131 \cdot 38 \times \left( \frac{2 \times 12 \times (12.25 - 5)^2}{34^2} \right) = 224943 \cdot 5431$$

De la figura D-1;  $N_{CRe} = 9000$

$N_{Re} < N_{CRe}$ . Por lo tanto se trata de flujo laminar.

$$\frac{\Delta P_{EA(AG-HW)}}{\Delta L_{HW}} = \frac{v_{EA(AG-HW)} \times \mu_p}{18288 \times (D_{AG} - D_{HW})^2} + \frac{\tau_y}{60.96 \times (D_{AG} - D_{HW})} = \frac{97.9902 \times 34}{18288 \times (12.25 - 5)^2} + \frac{12}{60.96 \times (12.25 - 5)} = 0.0306 \text{ [psi/m]}$$

$$\Delta P_{EA(AG-HW)} = \Delta L_{HW} \times 0.0306 = 108 \times 0.0306 = 3.3048 \text{ [psi]}$$

### ENTRE EL AGUJERO Y LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

$$v_{EA(AG-TP)} = 24.5098 \times \left( \frac{Q}{(Di_{AG}^2 - De_{TP}^2)} \right) = 24.5098 \times \left( \frac{500}{(12.250^2 - 5^2)} \right) = 97.9902 \text{ [pies / min]}$$

$$N_{Re} = 105.2911 \times \left( \frac{\rho_f \times v_{EA(AG-TP)} \times (D_{AG} - D_{TP})}{\mu_p} \right) = 105.2911 \times \left( \frac{2 \times 97.9902 \times (12.25 - 5)}{34} \right) = 4400.1085$$

$$N_{He} = 206131 \cdot 38 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_y \times (D_{AG} - D_{TP})^2}{\mu_p^2} \right) = 206131 \cdot 38 \times \left( \frac{2 \times 12 \times (12.25 - 5)^2}{34^2} \right) = 224943 \cdot 5431$$

De la figura D-1;  $N_{CRe} = 9000$

$N_{Re} < N_{CRe}$ . Por lo tanto se trata de flujo laminar.

$$\frac{\Delta P_{EA(AG\_TP)}}{\Delta L_{EA(AG\_TP)}} = \frac{v_{EA(AG\_TP)} \times \mu_p}{18288 \times (D_{AG} - D_{TP})^2} + \frac{\tau_y}{60.96 \times (D_{AG} - D_{TP})} = \frac{97.9902 \times 34}{18288 \times (12.25 - 5)^2} + \frac{12}{60.96 \times (12.25 - 5)} = 0.0306 [\text{psi} / \text{m}]$$

$$\Delta P_{EA(AG\_TP)} = \Delta L_{TP} \times 0.0306 = (5094. - 3300) \times 0.0306 = 54.8964 [\text{psi}]$$

ENTRE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO Y LA TUBERÍA DE PERFORACIÓN

$$v_{EA(TR\_TP)} = 24.5098 \times \left( \frac{Q}{(D_{iTR}^2 - D_{eTP}^2)} \right) = 24.5098 \times \left( \frac{500}{(12.415^2 - 5^2)} \right) = 94.9019 [\text{pies} / \text{min}]$$

$$N_{Re} = 105.2911 \times \left( \frac{\rho_f \times v_{EA(TR\_TP)} \times (D_{TR} - D_{TP})}{\mu_p} \right) = 105.2911 \times \left( \frac{2 \times 94.9019 \times (12.415 - 5)}{34} \right) = 4358.4172$$

$$N_{He} = 206131.38 \times \left( \frac{\rho_f \times \tau_y \times (D_{TR} - D_{TP})^2}{\mu_p^2} \right) = 206131.38 \times \left( \frac{2 \times 12 \times (12.415 - 5)^2}{34^2} \right) = 235298.8633$$

De la figura D-1;  $N_{CRe} = 9000$

$N_{Re} < N_{CRe}$ . Por lo tanto se trata de flujo laminar.

$$\frac{\Delta P_{EA(TR\_TP)}}{\Delta L_{EA(TR\_TP)}} = \frac{v_{EA(TR\_TP)} \times \mu_p}{18288 \times (D_{TR} - D_{TP})^2} + \frac{\tau_y}{60.96 \times (D_{TR} - D_{TP})} = \frac{94.9019 \times 34}{18288 \times (12.415 - 5)^2} + \frac{12}{60.96 \times (12.415 - 5)} = 0.0297 [\text{psi} / \text{m}]$$

$$\Delta P_{EA(TR\_TP)} = \Delta L_{TP} \times 0.0306 = 3300 \times 0.0297 = 98.01 [\text{psi}]$$

Por lo tanto las caídas de presión quedan de la siguiente forma, figura 3-7:

$$\Delta P_S = 73.5689 [\text{psi}]$$

$$\Delta P_{TP} = 2050.8444 [\text{psi}]$$

$$\Delta P_{HW} = 232.1784 [\text{psi}]$$

$$\Delta P_{DC} = 210.6804 [\text{psi}]$$

$$\Delta P_{Bna} = 445.5840 [\text{psi}]$$

$$\Delta P_{EA} = 5.9682 + 3.3048 + 54.8964 + 98.01 = 162.1794 [\text{psi}]$$

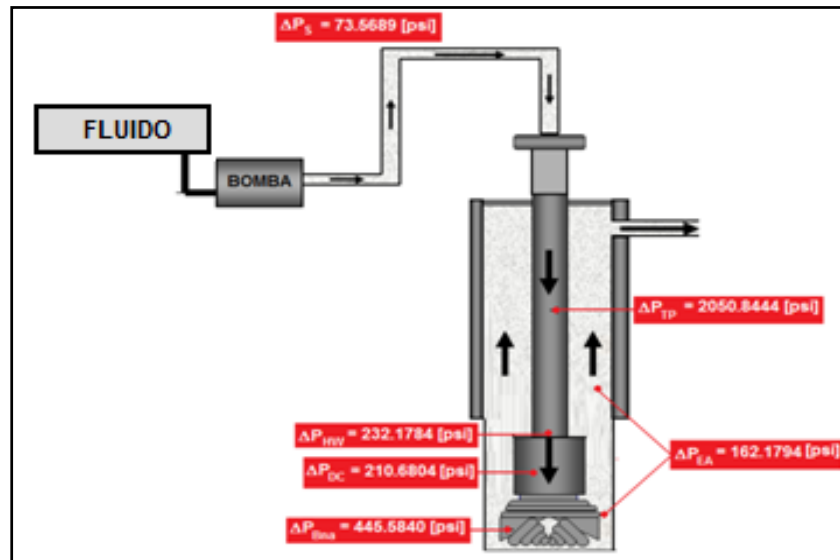


Figura 3-7. Caídas de presión por fricción, ejercicio 3.2.

### 3.4 DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACIÓN

La densidad equivalente de circulación, es la verdadera densidad que está siendo ejercida sobre las paredes del pozo y está calculada en base a los cambios que sufre el fluido por efectos de presión y temperatura.

Densidad equivalente de circulación, DEC. En operaciones de campo la densidad equivalente de circulación la debe ser referenciada a una profundidad específica del pozo. Se puede definir como la densidad efectiva que combina la densidad actual del fluido de perforación y las caídas de presión en el espacio anular.

El incremento de presión en el fondo de un pozo es producido cuando es circulado un fluido de perforación. Debido a la fricción que se presenta en el espacio anular cuando se bombea el fluido de perforación, en el fondo del pozo se genera un ligero pero significativo incremento de presión. Este incremento de presión se puede identificar tomando lectura de la presión del fondo del pozo antes de ser bombeado el fluido de perforación,  $P_1$ , y en el momento en que está siendo circulado el fluido de perforación,  $P_2$ . Al comparar estas lecturas podremos notar que  $P_2 > P_1$ .

En la siguiente figura podemos observar el comportamiento de la densidad equivalente de circulación con y sin recorte, desde la superficie y hasta el fondo del pozo, figura 3-8.

En el fondo del pozo existen incrementos significativos en la densidad equivalente de circulación, DEC.

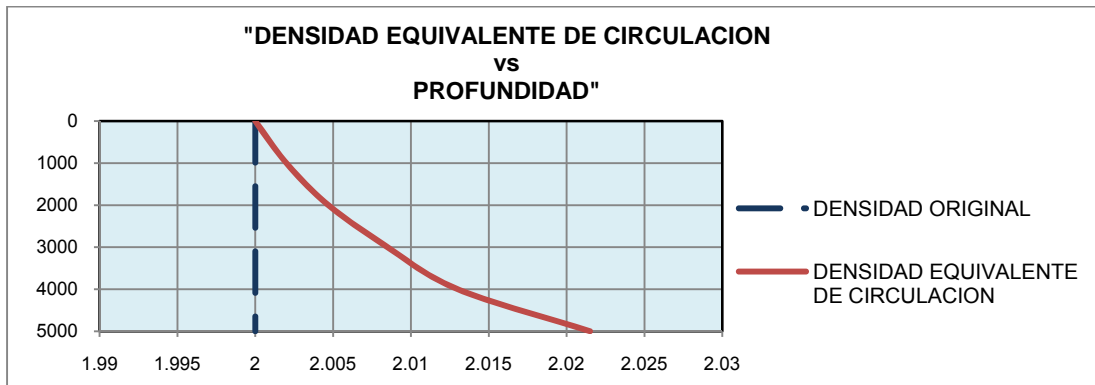


Figura 3-8. Densidad equivalente de circulación vs Profundidad.

### 3.4.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACIÓN<sup>6</sup>

La densidad equivalente de circulación, DEC, la podemos obtener de la siguiente forma:

$$DEC = \rho_f + \frac{0.704 \times \Delta P_{EA}}{H} \quad \text{Ec. 3.45}$$

Donde:

- $\rho_f$ : Densidad del fluido en el espacio anular, [gr/cm<sup>3</sup>]
- $\Delta P_{EA}$ : Caída de presión por fricción en el espacio anular, [psi]
- H: Profundidad vertical, [m]
- DEC: Densidad equivalente de circulación, [gr/cm<sup>3</sup>]

### EJERCICIO 3.3

Considerando los datos y resultados del ejercicio 2.2, calcular la densidad equivalente de circulación en el fondo del pozo.

## SOLUCIÓN

Densidad Equivalente de Circulación en el fondo del pozo:

$$DEC = 2.0 + \frac{0.704 \times 162 \cdot 1794}{5300} = 2.0215 \text{ [gr / cm}^3\text{]}$$

### 3.5 ANÁLISIS DE PRESIÓN POR ENTRADA DE GAS<sup>7, 8</sup>

La relación básica del comportamiento del gas se expresa de la siguiente forma:

$$P \cdot V = z \cdot n \cdot R \cdot T \quad \text{Ec. 3.46}$$

Donde:

- P: Presión, [psi]
- V: Volumen, [pies<sup>3</sup>]
- z: Factor de compresibilidad
- n: Número de moles
- R: Factor de conversión de unidades
- T: Temperatura, [°R]

Con el fin de estudiar el gas en condiciones diversas, la relación general, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{z_1 \cdot T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{z_2 \cdot T_2} \quad \text{Ec. 3.47}$$

Donde:

- 1: Indica condiciones en cualquier punto
- 2: Indica condiciones un punto diferente del punto 1

Al omitir los cambios de temperatura y el factor de compresibilidad, la ecuación es simplificada y queda de la siguiente forma:



$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Ec. 3.48

En un lenguaje simple, la ecuación anterior indica que el producto de la presión y el volumen de un gas es constante. La importancia de la expansión de gas en el control de pozos es ilustrado en el siguiente ejercicio.

## EJERCICIO 3.4

Considerando la figura 3-9 y las condiciones del ejercicio 3.2, a demás:

- El pozo se encuentra cerrado.
  - Un pie cubico de gas ha entrado al pozo.
  - El gas entra en el fondo del agujero, punto 1.
- a) Determinar la presión de la burbuja de gas en el punto 1.
- b) Suponiendo que un pie cubico de gas migra a la superficie en un pozo cerrado, punto 2, con un volumen constante de un pie cubico, determinar la presión en la superficie, la presión a 3300 [m] y la presión a 5300 [m].

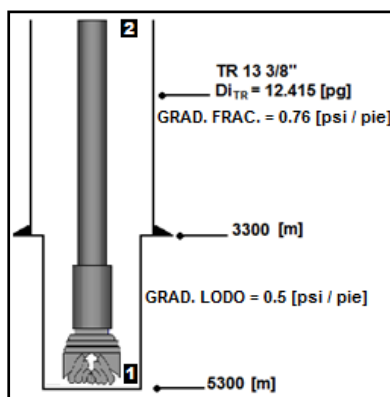


Figura 3-9. Estado mecánico.

## SOLUCIÓN

- a) La presión del gas,  $P_1$ , en el punto 1, que es el fondo del agujero, se determina multiplicando el gradiente del lodo por la profundidad del pozo.

$$P_1 = \rho_m \times \text{Prof} \quad \text{Ec. 3.49}$$

Donde:

- $P_1$ : Presión del gas en el punto 1, [psi]
- $\rho_m$ : Gradiente del lodo, [psi / pie]
- Prof: Profundidad del pozo, [m]

$$P_1 = \rho_m \times \text{Prof} = 0.5 \times (5300 \times 3.28) = 8692 \text{ [psi]}$$

$$\therefore P_1 = 8692 \text{ [psi]}$$

b) Presión en el punto 2, en superficie.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

$$8692 \times 1 = P_2 \times 1$$

$$\therefore P_2 = 8692 \text{ [psi]}$$

Presión en el punto 2, a 3300 [m].

$$P_{3300 \text{ [m]}} = P_2 + (\rho_m \times \text{Prof}) = 8692 + [0.5 \times (3300 \times 3.28)]$$

$$P_{3300 \text{ [m]}} = 14104 \text{ [psi]}$$

$$\therefore P_{3300 \text{ [m]}} = 14104 \text{ [psi]}$$

Presión en el fondo del agujero.

$$P_{5300 \text{ [m]}} = P_1 + (\rho_m \times \text{Prof}) = 8692 + [0.5 \times (5300 \times 3.28)]$$

$$P_{5300 \text{ [m]}} = 17384 \text{ [psi]}$$

$$\therefore P_{5300 \text{ [m]}} = 17384 \text{ [psi]}$$

El objetivo de circular el influjo de gas, es llevarlo a la superficie, permitiendo que el gas se expanda para evitar la fractura del pozo. Al mismo tiempo, existe la necesidad de mantener la presión hidrostática total en la parte inferior del agujero sobre la presión del yacimiento para evitar algún brote adicional de fluidos de la formación.

## EJERCICIO 3.5

Se cuenta con un pozo con las siguientes consideraciones:

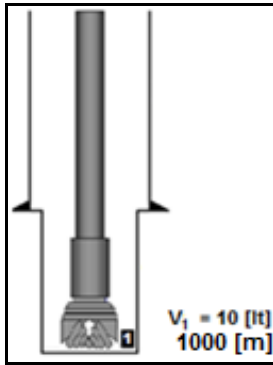


Figura 3-10. Estado mecánico.

Datos:

- Fluido invasor: Etano
- $\rho_f = 2$  [gr / cm<sup>3</sup>]
- $T_{yac} = 200$  [°F]
- $T_{sup} = 60$  [°F]

Calcular la longitud del fluido invasor en superficie.

## SOLUCIÓN

Conociendo que:

$$P = \frac{\rho \times g \times h}{g_c} \times (6.94 \times 10^{-3}) \quad \text{Ec. 3.50}$$

Donde:

- P: Presión, [psi]
- $\rho$ : Densidad, [lb<sub>m</sub> / ft<sup>3</sup>]
- g: Gravedad, [ft / seg<sup>2</sup>]
- h: Altura, [ft]
- $g_c$ : Constante de gravedad = 32.2 [lb<sub>m</sub>·ft / lb<sub>f</sub>·seg<sup>2</sup>]

Aplicando la ecuación anterior y considerando 9.81 [m / seg<sup>2</sup>] como el valor de la gravedad, obtenemos la presión del fluido invasor:

Conversion de unidades:

$$- \rho = 2 \text{ [gr / cm}^3\text{]} \times 62.428 = 124.856 \text{ [lb}_m\text{ / ft}^3\text{]}$$

- $h = 1000 \text{ [m]} \times 3.28 = 3280 \text{ [ft]}$
- $g = 9.81 \text{ [m / seg}^2\text{]} \times 3.28 = 32.17 \text{ [ft / seg}^2\text{]}$

$$\therefore P = \frac{124.856 \times 32.17 \times 3280}{32.2} \times (6.94 \times 10^{-3}) = 2839.47 \text{ [psi]}$$

$$T \text{ [}^\circ\text{R]} = ^\circ\text{F} + 460$$

Ec. 3.51

$$T_{\text{yac}} = 200 + 460 = 660 \text{ [}^\circ\text{R]}$$

$$T_{\text{sup}} = 60 + 460 = 520 \text{ [}^\circ\text{R]}$$

Despejando n de la ecuación 3.46, tenemos lo siguiente:

$$n = \frac{P \times V}{Z \times R \times T}$$

Considerando:

- $R = 10.732 \text{ [psi} \cdot \text{ft}^3 / \text{lb} \cdot \text{mol} \cdot ^\circ\text{R]}$
- De la figura D-5,  $Z = 0.85$
- $V = 10 \text{ [lt]} \times 0.03531 = 0.3531 \text{ [ft}^3\text{]}$

$$\therefore n = \frac{2839.47 \times 0.3531}{0.85 \times 10.732 \times 660} = 0.166 \text{ [lb} \cdot \text{mol]}$$

Calcular la longitud del fluido invasor.

Considerar la presión atmosférica y los siguientes diámetros de la tubería:

- $DI_{\text{TR}} = 12.415 \text{ [pg]}$
- $DE_{\text{TP}} = 5 \text{ [pg]}$

$$\text{CAP} = 0.5067 \times (DI_{\text{TR}}^2 - DE_{\text{TP}}^2)$$

Ec. 3.52

Donde:

- CAP: Capacidad, [lt / m]

- $DI_{TR}$ : Diámetro interior de la TR, [pg]
- $DE_{TP}$ : Diámetro interior de la TP, [pg]

$$\therefore CAP = 0.5067 \times (12.415^2 - 5^2) = 65.4312 \text{ [lt / m]}$$

Despejando V de la ecuación 3.46, obtenemos lo siguiente:

$$V = \frac{n \times Z \times R \times T}{P}$$

Para  $P=14.68$  [psi] y  $T=60$  [°F],  $Z=1.0$  (Figura D-5)

$$\therefore V = \frac{0.166 \times 1.0 \times 10.732 \times 520}{14.68} = 63.105 \text{ [ft}^3\text{]}$$

$$V = 63.105 \text{ [ft}^3\text{]} \times 28.31685 = 1786.93 \text{ [lt]}$$

Por lo tanto:

$$L = \frac{V}{CAP} \text{ --- Ec. 3.53}$$

Donde:

- L: Longitud, [m]
- CAP: Capacidad, [lt / m]
- V: Volumen, [lt]

$$L = \frac{1786.93}{63.105} = \mathbf{28.3167 \text{ [m]}}$$

### 3.6 ANÁLISIS DE LA PRESIÓN DE SUAVEO Y SURGENCIA

Durante las operaciones de perforación de pozos es necesario sacar la herramienta del fondo del pozo para luego, nuevamente, volver a meter la herramienta con un nuevo arreglo. Esta operación de sacar y meter la sarta de perforación se puede convertir en una

operación de mucho riesgo para el pozo y el equipo de perforación, así como también para las condiciones en las que se encuentre el fluido de perforación en ese momento.

### 3.6.1 EFECTO DE SUAVEO Y SURGENCIA<sup>9</sup>

#### EFECTO DE SUAVEO

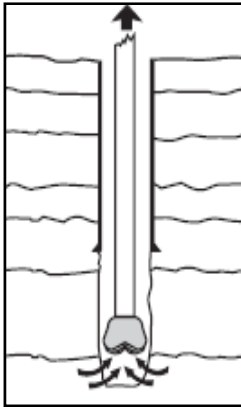


Figura 3-10. Efecto de suaveo.

Al levantar la sarta de perforación de forma rápida, se puede generar la entrada de fluidos al pozo desde la formación pudiendo causar lo que se conoce como descontrol de pozo; esto es mucho más crítico si al momento de levantar la sarta de perforación las herramientas contienen sólidos, el fluido de perforación es de alta densidad y viscosidad, etc. Es decir, al levantar la sarta en esta situación se estaría haciendo un efecto pistón al pozo provocando la entrada de fluidos. Esto es lo que se conoce como “Efecto de Suaveo”, figura 3-10.

El efecto de suaveo es provocado al levantar la sarta de perforación y provoca una variación de presión en el fondo del pozo.

Al levantar la sarta siempre se presenta alguna variación de presión en el fondo del pozo. Las caídas de presión al levantar la sarta son causadas por la fricción que hay entre el fluido de perforación y la barrena. El efecto de suaveo puede generar efectos drásticos sobre la presión en el fondo del pozo.

#### EFECTO DE SURGENCIA

Cuando se está metiendo la herramienta de perforación de forma rápida se puede causar una sobre presión en el fondo del pozo, la situación se complica aun mas si el pozo contiene un fluido de perforación pesado y viscosidad, la causa final es una pérdida de fluido de perforación hacia la formación; esto es lo que conoce como “Efecto de Surgencia”, figura 3-11.

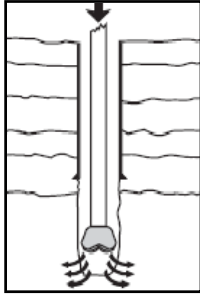


Figura 3-11. Efecto de surgencia.

El efecto de surgencia provoca incrementos de presión en el fondo del pozo, dicho efecto puede ser provocado debido a las altas velocidades con las que se opera la barrena en el agujero. Este efecto provoca pérdidas de fluido de perforación. Por lo tanto, es recomendable llevar un control adecuado del volumen de desplazamiento.

### FACTORES QUE AFECTAN EL EFECTO DE SUAVEO Y SURGENCIA

- Velocidad con la que se baja o sube la sarta de perforación.
- Propiedades de fluido de perforación.
- Viscosidad.
- Geometría del agujero.

#### 3.6.2 PRESIÓN DE SUAVEO Y DE SURGENCIA<sup>10</sup>

Durante las operaciones de perforación de pozos es necesario levantar y bajar la sarta de perforación, esto provoca incrementos y caídas de presión.

Las caídas de presión debido al levantamiento de la tubería son conocidas como “Presión de Suaveo”. Los incrementos de presión provocadas al bajar la tubería al pozo son conocidas como “Presión de Surgencia”.

Al bajar la tubería hacia el pozo, el fluido de perforación debe moverse hacia la superficie para salir de la región donde entro el nuevo volumen. Del mismo modo, al levantar la tubería los fluidos de perforación se mueven hacia el fondo del pozo.

El patrón de flujo de los fluidos puede ser laminar o turbulento, esto depende de la viscosidad del fluido que se desplaza en la tubería.

Tradicionalmente, las presiones de suaveo y surgencia se han calculado utilizando un modelo basado en que las presiones son causadas por tres principales efectos:

- Viscosidad del fluido de perforación que se mueve en la tubería.
- Las fuerzas inerciales del fluido de perforación cuando la velocidad de la tubería es cambiada.
- Rompimiento gel del fluido de perforación.

Por lo tanto, los factores que determinan la magnitud de las presiones de suaveo y surgencia son:

- Espacio anular.
- Viscosidad del fluido de perforación.
- Esfuerzo gel del fluido de perforación.
- Velocidad con la que se baja o sube la tubería.
- Longitud de la tubería.
- Aceleración y desaceleración de la tubería.

Para el cálculo de la presión de suaveo y surgencia se asume que el sistema está cerrado. Si la tubería se encuentra en el fondo se asume que el sistema está abierto, por lo tanto se reducirá el fluido de perforación tanto en el interior de la tubería como fuera de la tubería, esto hace sumamente complejo el cálculo si no se cuenta con una herramienta iterativa (software).

Para tubería con sistema cerrado, la velocidad promedio del fluido de perforación en el espacio anular ( $v_{EA}$ ) depende de la velocidad del fluido dentro de la tubería y se calcula de la siguiente forma:

$$v_{EA} = \left( \frac{D_1^2}{D_2^2 - D_1^2} \right) \times v_T \quad \text{Ec. 3.54}$$

Para sistemas uniformes y abiertos:



$$v_{EA} = \left( \frac{(3 \times D^4) \times (4 \times D_1^4) \times (D_2 - D_1)^2}{(6 \times D^4) - (4 \times (D_2 - D_1)^2 \times (D_2^2 - D_1^2))} \right) \times v_T \quad \text{Ec. 3.55}$$

Donde:

- $v_{EA}$ : Velocidad promedio en el espacio anular, [pies / min]
- $v_T$ : Velocidad promedio en la tubería, [pies / min]
- $D$ : Diámetro interior de la tubería, [pg]
- $D_2$ : Diámetro mayor en el espacio anular, [pg]
- $D_1$ : Diámetro menor en el espacio anular, [pg]

El flujo del fluido de perforación en el espacio anular es menos eficaz cuando la tubería se está moviendo, Esta eficiencia de reducción de flujo se describe mediante la constante k. La constante puede ser determinada con la figura D-3, a partir de una relación del diámetro mayor y menor en el espacio anular.

$$\alpha = \frac{D_1}{D_2} \quad \text{Ec. 3.56}$$

Donde:

- $\alpha$ : Relación de diámetros del espacio anular, [Adimensional]
- $D_2$ : Diámetro mayor en el espacio anular, [pg]
- $D_1$ : Diámetro menor en el espacio anular, [pg]

Una vez que se obtiene dicha constante, podemos calcular la velocidad efectiva de flujo como se muestra a continuación:

$$v = v_{EA} + (k \times v_T) \quad \text{Ec. 3.57}$$

Donde:

- $v$ : Velocidad efectiva de flujo, [pies / min]
- $v_{EA}$ : Velocidad promedio en el espacio anular, [pies / min]
- $v_T$ : Velocidad promedio en la tubería, [pies / min]
- $k$ : Constante de eficiencia de flujo, [Adimensional]

### 3.6.3 PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA PRESIÓN DE SUAVEO Y SURGENCIA<sup>11</sup>

- Calcular la velocidad del fluido al interior de la tubería.
- Calcular la velocidad en el espacio anular.
- Calcular la relación de diámetros del espacio anular.
- Determinar el valor de la constante de eficiencia de flujo.
- Calcular la velocidad efectiva de flujo.
- Calcular la presión de suaveo o surgencia.

#### - FLUJO LAMINAR

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu_p \times v}{18288 \times (D_2 - D_1)^2} + \frac{\tau_y}{60 \cdot 96 \times (D_2 - D_1)} \quad \text{Ec. 3.58}$$

#### - FLUJO TURBULENTO

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\rho_f^{0.75} \times v^{1.75} \times \mu_p^{0.25}}{11241 \cdot 4496 \times (D_2 - D_1)^{1.25}} \quad \text{Ec. 3.59}$$

Donde:

- $\rho_f$ : Densidad del fluido, [gr / cm<sup>3</sup>]
- v: Velocidad efectiva de flujo, [pies / min]
- $\mu_p$ : Viscosidad plástica, [cP]
- $\frac{\Delta P_f}{L}$ : Caída de presión por fricción, [psi / m]
- $\tau_y$ : Esfuerzo de corte a la velocidad de corte más baja, [lb / 100 pies<sup>2</sup>]
- f: Factor de fricción, [Adimensional]
- $D_2$ : Diámetro mayor en el espacio anular, [pg]
- $D_1$ : Diámetro menor en el espacio anular, [pg]

### 3.7 LÍMITES MÁXIMOS DE PRESIÓN DENTRO DEL POZO<sup>12</sup>

Para realizar los cálculos y controlar un pozo cuando ocurre un brote, es necesario disponer de ciertos parámetros relacionados con el equipo y las operaciones normales de un pozo. Por lo que se debe recabar y conservar esta información en la libreta del

perforador y en el reporte diario de perforación, para utilizarlas en el momento en que ocurra una contingencia. Puesto que los brotes no son predecibles, estos datos deben actualizarse a medida que las condiciones del equipo y del pozo cambien.

Los parámetros necesarios son:

- a) Máxima presión permisible en el espacio anular por conexiones superficiales de control y tuberías de revestimiento.
- b) Máxima presión permisible en el espacio anular por resistencia al fracturamiento de la formación expuesta.

### **3.7.1 PRESIONES MÁXIMAS PERMISIBLES**

La presión de trabajo de las conexiones superficiales de control del pozo deberá ser mayor a las máximas presiones esperadas. Esta presión deberá ser mayor que la:

- Resistencia a la presión interna de la tubería de revestimiento.
- Presión máxima anticipada.
- La presión de fractura de la formación referida a la zapata de la tubería de revestimiento.

Respecto al uso de las tablas de tubería de revestimiento en cuanto a los valores de presión interna se recomienda, por seguridad, utilizar solamente el 80% del valor nominal.

### **3.7.2 MÁXIMA PRESIÓN PERMISIBLE EN EL ESPACIO ANULAR POR CONEXIONES SUPERFICIALES DE CONTROL Y TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO**

Los elementos individuales pueden exceder, pero no ser menores, a la presión de trabajo del sistema. Esta presión debe ser mayor que:

- La resistencia a la presión interna de la tubería de revestimiento.

- La presión máxima anticipada.
- La presión de fractura de la formación en la zapata de la tubería de revestimiento.

## EJERCICIO 3.5

Consideremos la tubería de revestimiento del ejercicio 3.2, la cual cuenta con las siguientes características.

TUBERIA DE REVESTIMIENTO		
DIAMETROS	EXTERIOR [pg]	13 3/8
	INTERIOR [pg]	12.415
PESO [lb / pie]		68
GRADO DE ACERO		P110
RESISTENCIA A LA PRESION INTERNA [psi]		6910

**Tabla 3-6. Datos de la tubería de revestimiento.**

Considerando el factor de seguridad de 0.80, el cual se considera siempre para tuberías en buenas condiciones, la resistencia a la presión interna será:

$$P_i = P_i \times 0.8 = 6910 \times 0.8 = 5528 \text{ [psi]}$$

La máxima presión permisible en el espacio anular es igual a la menor presión permisible entre la presión nominal de las conexiones superficiales y la resistencia a la presión interna de la tubería de revestimiento con su margen de seguridad.

Presión nominal de conexiones superficiales = 6000 [psi]

Resistencia a la presión interna de TR 13 3/8" = 5528 [psi]

De lo anterior, se observa que la máxima presión permisible en el espacio anular es de 5528 [psi]. Por lo que, en ningún caso se debe exceder dicha presión, ya que se tendría el riesgo de provocar un descontrol total.

En este caso, utilizamos un factor de seguridad de 0.8. Sin embargo, las condiciones de desgaste o deterioro de la tubería de revestimiento son directamente proporcionales al tiempo de perforación y obligan a disminuir el valor de dicho factor.

### **3.7.3 MÁXIMA PRESIÓN PERMISIBLE EN EL ESPACIO ANULAR POR RESISTENCIA AL FRACTURAMIENTO DE LA FORMACIÓN EXPUESTA**

Otro parámetro importante en el control de pozos cuando ocurre un brote es la presión correspondiente a la resistencia de fracturamiento de la formación expuesta, esta se puede obtener con métodos analíticos o por pruebas prácticas.

Dentro de los métodos se encuentran:

- Los que utilizan las medidas obtenidas a través de registros geofísicos.
- Por medio de ecuaciones desarrolladas por varios autores (Hubbert-Willis, Matthews-Kelly, Eaton, Christmas, etc.).

A partir de esta información se determina el gradiente de fractura y, por lo tanto, la resistencia al fracturamiento de la formación.

Las pruebas prácticas o de campo determinan con mayor confiabilidad el gradiente mínimo de fractura.

A partir de estos métodos, se podrá conocer la máxima presión permisible en el espacio anular, para evitar una pérdida de circulación y, en consecuencia, un descontrol subterráneo.

#### **EJERCICIO 3.6**

Considerando el ejercicio 3.2. Se tiene una tubería de revestimiento de 13 3/8", la cual se cementó a una profundidad de 3300 [m]. Al realizar una prueba de goteo, se aportó una densidad equivalente a la presión de goteo de 2.15 [gr/cm<sup>3</sup>].

Para calcular la máxima presión permisible en el espacio anular, si se tiene en el pozo una densidad de 2.0 [gr/cm<sup>3</sup>], se utiliza la siguiente ecuación:

$$PMP_{TR} = 14.22 \times ((G_F - G_L) \times P_Z) \quad \text{Ec. 3.60}$$

Donde:

- PMP<sub>TR</sub>: Presión máxima permisible en la tubería de revestimiento, [psi]
- G<sub>F</sub>: Gradiente de fractura, [kg/cm<sup>2</sup> / m]
- G<sub>L</sub>: Gradiente de lodo, [kg/cm<sup>2</sup> / m]
- P<sub>Z</sub>: Profundidad de la zapata [m]

Al utilizar esta ecuación obtenemos lo siguiente:

$$PMP_{TR} = 14.22 \times ((G_F - G_L) \times P_Z) = 14.22 \times ((0.215 - 0.2) \times 3300) = 703.89 [psi]$$

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. López Valdez Israel, **Apuntes de Ingeniería de Pozos**, 2008-2.
2. Enterprise Oil. **Well Control Manual**. 2001, October, revision.
3. Ferreira Christian, SPE, Serrano Mario, SPE. Baroid Drilling Fluids. **Hidráulica Avanzada de Perforación**. HALLIBURTON.
4. Enterprise Oil. **Well Control Manual**. 2001, October, revision.
5. Bourgoyne Jr. Adam T., Millheim Keith K., Chenevert Martin E., Young Jr F. S. **Applied Drilling Engineering**. Society of Petroleum Engineers.
6. Baker Ron. **Practical Well Control, Fourth Edition**. The University of Texas.
7. McCain, Jr. William. **The Properties of Petroleum Fluids, Second Edition**. Penn Well Publishing Company.
8. Grace Robert D. With contributions by Cudd Bob, Carden Richard S. and Shursen Jerald L. **Blowout and Well Control Handbook**. Gulg Profesional Publishing, 2003.
9. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos**, Well Cap.
10. Baker Ron. **Practical Well Control, Fourth Edition**. The University of Texas.
11. Enterprise Oil. **Well Control Manual**. 2001, October, revision.
12. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos**, Well Cap.