

# Corrección por temperatura a la presión calculada en fluidos de emulsión inversa en los pozos de perforación

Emilio de la Torre Ramos<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> *Universidad Olmeca. Carretera Villahermosa-Macuspana, km 14, Dos Montes, Centro, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México, E-mail: seteingpet@hotmail.com*

## RESUMEN

La presión calculada en sistemas que utilizan fluidos de emulsión inversa en pozos petroleros no siempre coincide con las presiones reales observadas en el equipo de perforación. El propósito de este artículo es determinar las causas de esa disparidad y corregir las mismas; para cumplir con este propósito se seleccionaron diez pozos que utilizaban fluidos de emulsión inversa y se compararon las presiones calculadas con las observadas (medidas) en los equipos de perforación. Se analizaron los pozos con mayores diferencias para determinar las causas y obtener una expresión para eliminar dichas diferencias entre presiones calculadas y observadas, encontrándose que las causas de dichas diferencias se debían a variaciones de temperatura del fluido en los pozos y se obtuvo un factor de corrección por temperatura aplicable a las presiones calculadas para hacerlas consistentes con las reales observadas en el equipo de perforación.

**Palabra clave:** Fluidos de emulsión inversa, caídas de presión por fricción, flujo laminar y turbulento, temperatura a la salida del pozo y corrección por temperatura.

## ABSTRACT

The pressure calculated in systems that use reverse emulsion fluids in oil wells, it does not always match with the real pressure observed in the drill rig. The purpose of this article is to determine the causes of that disparity and correct them, to accomplish this objective ten wells were selected that used reverse emulsion fluids and were compared the pressures calculated with those observed (measured) in the drill rig. The wells with greater differences were analyzed to determine the causes and to be

able to obtain an expression to eliminate those differences between calculated and observed pressures finding that the causes of those differences were due to variations on fluid temperature in the wells and a correction factor for temperature applicable to the calculated pressures was obtained and make them consistent with the real ones observed in the drilling equipment.

**Keywords:** Invert emulsion fluid, friction pressure drop, laminar and turbulent fluid, outlet well temperature and correction by temperatura.

## RESUMO

A pressão calculada em sistemas que utilizam fluidos de emulsão inversa em poços de petróleo nem sempre coincide com as pressões reais observadas na plataforma de perfuração. O objetivo deste artigo é determinar as causas dessa disparidade e corrigi-las, para cumprir este objetivo, foram selecionados dez poços que utilizaram fluidos de emulsão inversa e as pressões calculadas foram comparadas com as observadas (medidas) no equipamento de perfuração. Os poços foram analisados com maiores diferenças para determinar as causas e obter uma expressão para eliminar as referidas diferenças entre as pressões calculadas e observadas, descobrindo que as causas das referidas diferenças foram devidas a variações da temperatura do fluido nos poços e um fator de correção por temperatura aplicável às pressões calculadas e tornando-as consistentes com o real observado no equipamento de perfuração.

**Palavras chaves:** Fluidos de emulsão inversa, quedas de pressão devido ao atrito, fluxo laminar e turbulento, temperatura na saída do poço e correção de temperatura.

## INTRODUCCIÓN

El cálculo de caídas de presión en los sistemas que utilizan lodos de emulsión inversa ha transitado por varios períodos en su historia, que van desde el correcto ajuste del modelo reológico idóneo para realizar cálculos precisos, hasta consideraciones de un estado estable para poder efectuar los cálculos de las caídas de presión que se ajusten al comportamiento real observado en los pozos petroleros. Actualmente es común que los cálculos hidráulicos de «algunos pozos» que utilizan lodos de emulsión inversa no se ajusten al comportamiento real observado en los mismos. El objetivo de este estudio es determinar las causas de esas diferencias entre lo calculado y lo observado y obtener una expresión que pueda aplicarse para corregir esas disparidades observadas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los fluidos o lodos de emulsión inversa se ajustan al comportamiento reológico del modelo ley de potencias, lo anterior fue demostrado por McMordie y otros (1974) y posteriormente comprobado por De la Torre (1987).

Por lo expuesto, las ecuaciones utilizadas para el cálculo de caídas de presión por fricción son las desarrolladas por Metzner y Reed (1955) para flujo laminar y las desarrolladas por Dodge y Metzner (1959) para flujo turbulento.

Metzner y Reed demostraron matemáticamente de manera rigurosa que para flujo laminar sus ecuaciones se ajustaban perfectamente a cualquier fluido que siguiera el comportamiento reológico del modelo ley de potencias y tal es el caso de los lodos de emulsión inversa. Por otro lado Dodge y Metzner demostraron que sus ecuaciones para flujo turbulento en el cálculo de caídas de presión por fricción para fluidos que siguen el comportamiento reológico del modelo ley de potencias se ajustaban con un rango de error de  $\pm 2.5\%$  como máximo, en base a pruebas de laboratorio efectuadas.

Pruebas de campo efectuadas por De la Torre documentadas y mostradas en su tesis de maestría en Ingeniería Petrolera demostraron que bajo condiciones de flujo permanente y estado estable los lodos de emulsión inversa se ajustaban al modelo ley de potencias y sus caídas de presión podían ser calculadas con la exactitud descrita, con las ecuaciones propuestas por Metzner y Reed en flujo laminar y Dodge y Metzner en flujo turbulento.

Asimismo determinó el efecto de la temperatura en el comportamiento reológico en ese tipo de fluidos e

hizo la observación que para pozos a más de 3 000 metros de profundidad, las condiciones de estado estable y flujo permanente sufrían una distorsión por efecto de la temperatura, por lo que las caídas de presión calculadas en pozos con mayores profundidades a la mencionada mostraban diferencias considerables con respecto a las reales. También documentó el hecho de que estas diferencias se incrementaban conforme la profundidad del pozo aumentaba, por lo que era necesario efectuar una corrección a las caídas de presión calculadas en pozos con profundidades mayores a los 3 000 metros, haciéndose más necesaria dicha corrección debajo de los 4 000 metros debido a la creciente disparidad entre las presiones calculadas y las reales (medidas en el equipo de perforación) en pozos con profundidades mayores a esta última profundidad mencionada.

Por otro lado Raymond (1956), elaboró un trabajo donde analiza el comportamiento de la temperatura del lodo en un pozo, colocó sensores de temperatura en el interior de la sarta de perforación y en el espacio anular de un pozo y midió la temperatura del lodo mientras circulaba, tanto en el fondo del pozo como a la salida del mismo (en la línea de flote), así como a lo largo del interior de la sarta de perforación y a lo largo de todo el espacio anular, circulando con un rango de gastos de 250 a 350 gal/min en el pozo a 10 000 pies de profundidad (3 048 metros) y a 20 000 pies de profundidad (6 080 metros), el pozo se encontraba en un área con un gradiente geotérmico de  $1.7\text{ }^{\circ}\text{F}/100\text{ pies}$ .

En el pozo a 10 000 pies de profundidad la diferencia de temperaturas ( $\Delta t$ ) entre la temperatura en el fondo del pozo y la temperatura a la salida fue de  $8\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) circulando lodo con un gasto de 250 gal/min, y a la misma profundidad circulando con un gasto de 350 gal/min la diferencia de temperaturas fue de  $3\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

En el pozo a 20 000 pies de profundidad la diferencia de temperaturas del lodo entre el fondo y a la salida circulando con un gasto de 250 gal/min fue de  $73\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $40.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y circulando con un gasto de 350 gal/min fue de  $48\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $26.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Estos resultados explican las causas de la diferencia de presiones calculadas versus las reales en los pozos analizados por De la Torre, ocurridas en pozos a profundidades mayores a 4 000 metros, haciendo evidente que la causa de la diferencia entre presión calculada y real es la diferencia de temperaturas entre la temperatura de salida del pozo, que es la temperatura a la cual se toman las muestras de lodo y se efectúan los análisis viscométricos para de-

terminar los parámetros reológicos del fluido y la temperatura del lodo en el fondo del pozo.

En este estudio se propone un factor para corregir el efecto temperatura, que deberá aplicársele a las presiones calculadas en pozos que utilizan lodos de emulsión inversa.

Para determinar la magnitud de las diferencias entre las presiones reales y las presiones medidas en un pozo, se seleccionaron 10 (diez) pozos de la zona sureste de México que perforaban utilizando lodo de emulsión inversa. En dichos pozos se determinó su geometría y se midieron las propiedades reológicas del lodo a la temperatura de salida del pozo (muestras tomadas en la línea de flote), asimismo se verificó la precisión de los manómetros utilizados para medir la presión en el sistema y asegurar mediciones verídicas.

El gradiente geotérmico «promedio» de la zona sureste de México según el Instituto Mexicano del Petróleo y Petróleos Mexicanos (1987) es de 2.1 °C/100 m (1.15 °F/100 pies) con una desviación máxima de +0.12 °C/100 m y una desviación mínima de -0.14 °C/100 m.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de las propiedades reológicas medidas a la temperatura de salida del pozo (línea de flote), así como de la caída de presión en la barrena de los diez pozos que fueron seleccionados se muestran en la tabla 1.

Las profundidades, tamaño de agujero, sus respectivos gastos y las presiones calculadas con los datos mostrados en la tabla 1, las presiones medidas en los pozos seleccionados, así como el porcentaje de error entre las presiones medidas y calculadas, se muestran en la tabla 2, en la cual los pozos con profundidades menores a 4 000 metros se marcan con negritas, ya que dichos pozos no se considerarán en el análisis para determinar un factor de corrección por temperatura.

En la tabla 2 es evidente cómo el porcentaje de error entre las presiones medidas y calculadas se incrementa conforme la profundidad del pozo aumenta. Asimismo se puede observar cómo los porcentajes de error mayores corresponden a pozos profundos, con gastos reducidos, comprobándose que tanto la profundidad como el gasto del pozo tienen una influencia considerable en el cálculo de las caídas de presión.

Esto es debido a que ambos parámetros (profundidad y gasto del pozo) afectan la diferencia entre la temperatura a la salida del pozo y en el fondo del mismo. Debido a lo anterior se propone una ecuación que considere tanto la profundidad como el gasto en el pozo para el cálculo del factor de corrección por temperatura, mismo que deberá aplicarse a las presiones calculadas con los parámetros reológicos del lodo medidos a la temperatura de salida del lodo en el pozo. La ecuación propuesta es del tipo:

| <b>POZO</b><br><b>Nombre y</b><br><b>No.</b> | <b>LODO</b><br><b>E.I.</b><br><b>Marca</b> | <b>DENSID.</b><br><b>(gr/c.c.)</b> | <b>VISC.</b><br><b>APARE.</b><br><b>(Cp)</b> | <b>VISC.</b><br><b>PLA.</b><br><b>(Cp)</b> | <b>PTO.</b><br><b>CED.</b><br><b>lb/100</b> | <b>TOBERAS</b><br><b>No. Y Dia.</b> | <b>PRESIÓN</b><br><b>BNA.</b><br><b>(PSI)</b> |
|--|--|------------------------------------|--|--|---|-------------------------------------|---|
| 1.Ocuap.201                                  | Perfoil                                    | 2.00                               | 75   | 55   | 40  | 3-16                                | 439   |
| 2.Palapa 1                                   | Perfoil                                    | 2.02                               | 105  | 88   | 34  | 3-16                                | 665   |
| 3.Arrastr.3D                                 | Perfoil                                    | 1.76                               | 72   | 55   | 34  | 3-16                                | 672   |
| 4.Luna 22                                    | Drilex                                     | 1.92                               | 61   | 57   | 8   | 3-16                                | 815   |
| 5.Iride 151                                  | Drilex                                     | 1.65                               | 46   | 42   | 8   | 3-16                                | 496   |
| 6.Tapan.201                                  | Perfoil                                    | 2.00                               | 110  | 100  | 20  | 3-16                                | 703   |
| 7.Luna 23                                    | Perfoil                                    | 1.62                               | 57   | 42   | 27  | 3-16                                | 91  |
| 8.Luna 4                                     | Perfoil                                    | 1.83                               | 68   | 52   | 32  | 3-30 (S/T)                          | 8   |
| 9.Caletón 1                                  | Perfoil                                    | 1.84                               | 105  | 89   | 32  | 3-18                                | 285   |
| 10.Luna 33                                   | Drilex                                     | 1.67                               | 80   | 62   | 36  | 2-14, 1-15                          | 355   |

Tabla 1. Condiciones reológicas de los lodos en diez pozos seleccionados para el estudio de caídas de presión.

| POZO<br>Nombre y<br>No. | LODO E.L.<br>Marca | AGUJERO<br>(Pulgadas) | GASTO<br>(Gal/min) | PROF.<br>(m) | PRESIÓN<br>MEDIDA<br>(PSI) | PRESIÓN<br>CALCULADA<br>(PSI) | ERROR<br>(%) |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|--------------|
| 1.Ocuap.201             | Perfoil            | 8.375                 | 316                | 5722         | 2485                       | 2769                          | 11.4         |
| 2.Palapa 1              | Perfoil            | 12                    | 387                | 4531         | 2556                       | 2761                          | 8.02         |
| 3.Arrastr.3D            | Perfoil            | 9.5                   | 417                | <b>3600</b>  | 2270                       | 2381                          | <b>4.88</b>  |
| 4.Luna 22               | Drilex             | 12                    | 440                | <b>3160</b>  | 2414                       | 2521                          | <b>4.43</b>  |
| 5.Iride 151             | Drilex             | 12.25                 | 370                | <b>2100</b>  | 1420                       | 1465                          | <b>3.16</b>  |
| 6.Tapan.201             | Perfoil            | 12                    | 400                | 5140         | 2840                       | 3193                          | 12.42        |
| 7.Luna 23               | Perfoil            | 5.875                 | 160                | 5612         | 2698                       | 3285                          | 21.75        |
| 8.Luna 4                | Perfoil            | 5.875                 | 155                | 5193         | 2584                       | 3140                          | 21.51        |
| 9.Caletón 1             | Perfoil            | 9.5                   | 336                | 6238         | 2414                       | 2742                          | 13.58        |
| 10.Luna 33              | Drilex             | 8.375                 | 250                | 5574         | 1562                       | 1794                          | 14.85        |

Tabla 2. Profundidades, gastos y presiones medidas y calculadas con su respectivo porcentaje de error.

$$F_{c_t} = \left(\frac{C}{Q}\right) * Prof. + 1 \quad (1)$$

Donde:

$F_{c_t}$  = Factor de corrección por temperatura.

C = Constante a determinarse en base a las mediciones efectuadas.

Q = Gasto del pozo en galones/minuto.

Prof. = Profundidad del pozo en metros.

La ecuación anterior corresponde a una familia de rectas que intersecta el eje de las “Y” en el valor = 1, lo anterior hace que cuando la profundidad del pozo sea igual a 0, el factor de corrección por temperatura sea igual a 1 y la pendiente de la recta estará determinada por los valores que tengan la profundidad y el gasto del pozo.

Ajustando el valor de la constante “C” en la ecuación anterior para calcular el factor de corrección por temperatura, con los datos de las presiones calculadas y ajustándolos a los valores de presiones medidas de la tabla 2, se llega a un valor de  $C = - 5.8 \times 10^{-3}$  o  $C = - 0.0058$ , por lo que el factor de corrección propuesto por temperatura será igual a:

$$F_{c_t} = \left[\left(\frac{-0.0058}{Q}\right) * Prof.\right] + 1 \quad (2)$$

Donde:

$F_{c_t}$  = Factor de corrección por temperatura propuesto.

Q = Gasto en el pozo en galones/minuto.

Prof. = Profundidad del pozo en metros.

El factor de corrección propuesto, obtenido con los datos de gasto y profundidad del pozo deberá multiplicarse a la presión calculada con los parámetros reológicos medidos a la temperatura de salida del pozo y el resultado obtenido será un valor que tendrá errores marginales con respecto a los valores reales, lo anterior podrá determinarse analizando los valores de la tabla 3, donde se comparan los valores medidos con los valores calculados afectados con el factor de corrección por temperatura propuesto, asimismo se podrá observar la diferencia entre presiones medidas y calculadas sin el factor de corrección de temperatura, dichos valores aparecen en las tablas 2 y 3, pudiéndose ver las magnitudes considerables de los errores, especialmente en pozos profundos con bajos gastos.

La media o promedio del error entre las presiones medidas y las calculadas aplicando el factor de corrección por temperatura propuesto en los diez pozos analizados es de  $\bar{E} = -1.36$  psi y la media o promedio del porcentaje del error es de  $\% \bar{E} = -0.012 \%$ , como se indica en la tabla 3, asimismo la desviación estándar (S) del error y porcentaje de error respectivamente fueron las siguientes:  $S = 49.22$  psi y  $S = 1.78 \%$ .

El cálculo de presiones en el sistema hidráulico del pozo con un margen de error promedio de 1.36 psi y 0.012 % pueden considerarse como marginales, que no afectarán en nada el desarrollo del programa hidráulico del pozo y los máximos errores probabilísticos que se podrán alcanzarse utilizando este factor de corrección por temperatura serán los correspondientes a la

desviación estándar del error, que son 49.2 psi y 1.78 %, lo cual confirma que los errores que se tendrán en el cálculo de caídas de presión en el sistema con lodos de emulsión inversa, utilizando el factor de corrección por temperatura propuesto, serán errores marginales que no afectarán el desarrollo del programa hidráulico del pozo.

| POZO<br>Nombre y<br>No. | GASTO<br>(Gal/min) | PROF.<br>(m) | PRESIÓN<br>MEDIDA<br>(psi) | PRESIÓN<br>CALCULADA<br>sin Fc (psi) | PRESIÓN<br>CALCULADA<br>con Fc (psi) | ERROR<br>c/Fc (psi) | %ERROR<br>c/Fc (%) |
|-------------------------|--------------------|--------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------|
| 1.Ocuap.201             | 316                | 5722         | 2485                       | 2769                                 | 2478.18                              | 6.8                 | -0.275             |
| 2.Palapa 1              | 387                | 4531         | 2556                       | 2761                                 | 2573.51                              | -17.5               | 0.680              |
| 3.Arrastr.3D            | 417                | 3600         | 2270                       | 2381                                 | 2261.77                              | 8.2                 | -0.363             |
| 4.Luna 22               | 440                | 3160         | 2414                       | 2521                                 | 2415.98                              | -1.9                | 0.081              |
| 5.Iride 151             | 370                | 2100         | 1420                       | 1465                                 | 1416.77                              | 3.2                 | -0.227             |
| 6.Tapan.201             | 400                | 5140         | 2840                       | 3193                                 | 2955.02                              | -115                | 3.892              |
| 7.Luna 23               | 160                | 5612         | 2698                       | 3285                                 | 2616.71                              | 81.2                | -3.106             |
| 8.Luna 4                | 155                | 5193         | 2584                       | 3140                                 | 2529.83                              | 54.1                | -2.141             |
| 9.Caletón 1             | 336                | 6238         | 2414                       | 2742                                 | 2446.74                              | -32.7               | 1.338              |
| 10.Luna 33              | 250                | 5574         | 1562                       | 1794                                 | 1562                                 | 0                   | 0.000              |
| <b>Ē (PROM) =</b>       |                    |              |                            |                                      |                                      | <b>-1.36</b>        | <b>-0.012</b>      |

Tabla 3. Presiones medidas y calculadas utilizando el factor de corrección por temperatura propuesto (“Fc<sub>t</sub>”) con su respectivo error calculado en psi y en porcentaje.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El factor de corrección por temperatura propuesto con la ecuación número 2, podrá utilizarse en todos los pozos petroleros en la cuenca del Golfo de México y a menos que el gradiente geotérmico en el área específica de la perforación sea radicalmente diferente al promedio mencionado de la zona sureste de México, los cálculos de caídas de presión utilizando este factor de corrección en pozos con lodos de emulsión inversa, tendrán errores marginales o despreciables entre las presiones calculadas y las reales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- McMordie, W.C. y otros.** (1974). The Effect of Temperature and Pressure on the Viscosity of Oil Base Muds. Paper No. SPE-4947, Dallas, Texas. U. S. A.
- De la Torre Ramos, E.** (1987). Hidráulica de fluidos de emulsión inversa en perforación rotatoria. Tesis de maestría en Ingeniería Petrolera.

División de Estudios de Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Metzner, A.B. and Reed, J.C.** (1955). Flow of Non-Newtonian Fluids-Correlation of the Laminar, Transition and Turbulent- Flow Regions. A. I. Ch. E. Journal.
- Dodge, D.W. and Metzner, A.B.** (1959). Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems. A. I. Ch. E. Journal.
- Raymond, L.R.** (1969). Temperature Distribution in a Circulating Drilling Fluid. Paper No. SPE-2320, Austin, Texas.
- Instituto Mexicano del Petróleo y Petróleos Mexicanos,** (1978). Estudio y medición del gradiente geotérmico en diez diferentes campos de la zona sureste de México en el intervalo de 1 000 a 5 000 metros de profundidad. Villahermosa, Tabasco. México.