

Análisis y diagnóstico de las pruebas durante la perforación del pozo H-43 de Los Humeros, Pue.

Marcela E. Sánchez Luviano y Marco A. Torres Rodríguez

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Correo:

marco.torres@cfe.gob.mx

Resumen

Las pruebas realizadas durante la perforación del pozo H-43 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., consistieron en dos series de registros de presión-temperatura, a 1250 m y 2200 m de profundidad, una prueba de pérdida de agua, una prueba de fracturamiento térmico de la formación y un registro presión-temperatura posterior a la prueba de fracturamiento. El pozo H-43 se construyó entre agosto de 2007 y enero de 2008 a una profundidad total de 2200 m sin presentarse pérdidas de fluido de perforación. El análisis de los perfiles de presión-temperatura antes del fracturamiento permitió calcular una aceptación de la formación de 1,39 t/h, lo cual indicaba una escasa permeabilidad. Las temperaturas estabilizadas calculadas fueron de 228° C a 1250 m y de 383° C a 2200 m de profundidad, esta última ubicaba al fluido del yacimiento en la región supercrítica, lo cual podría ser una condición para la ocurrencia de fenómenos de corrosión. Durante la prueba de fracturamiento térmico, en las tres etapas de inyección la presión se incrementó a un máximo de 107,6 kg/cm² en los primeros 10 minutos, para después abatirse. Esa presión máxima es la presión de apertura de las fracturas, lo que aunado al choque térmico mejoró la permeabilidad secundaria de la formación. De acuerdo con los resultados de la prueba de fracturamiento térmico, se logró inducir una mejora en la permeabilidad secundaria de la matriz, debido a que la conductividad de la formación calculada ($K_h = 3558,9$ md-m) resulta mayor que el promedio de los pozos aledaños. El factor de daño es positivo ($S = 3,9$) indicando que aun cuando los resultados del fracturamiento fueron positivos, todavía existe daño en la formación debido posiblemente a la presencia de lodo de perforación y de materiales producto de la misma. Se localizaron dos intervalos convectivos importantes. El primero se encuentra de 1550 a 1900 m de profundidad y el segundo de 2050 a 2200 m. Debido a la condiciones térmicas que podrían propiciar fenómenos de corrosión, el pozo se terminó en agujero descubierto de 1250 a 2200 m de profundidad.

1. Antecedentes

El pozo H-43 se localiza en la zona norte del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. (Figura 1). Sus coordenadas UTM se presentan en la Tabla 1.

X	Y	Z	Profundidad (m)
661 240	2 178 060	2 780 m	2200

Tabla 1. Coordenadas del Pozo H-43

Los trabajos de perforación iniciaron el 26 de agosto de 2007 y concluyeron el 18 de enero de 2008. La T.R. de 244,475 mm (9 5/8 pulg) de diámetro se instaló a 1244,51 m de profundidad, quedando en

agujero descubierto de 215,9 mm (8 ½ pulg) hasta 2200 m. En la Figura 2 se muestra el esquema de terminación.

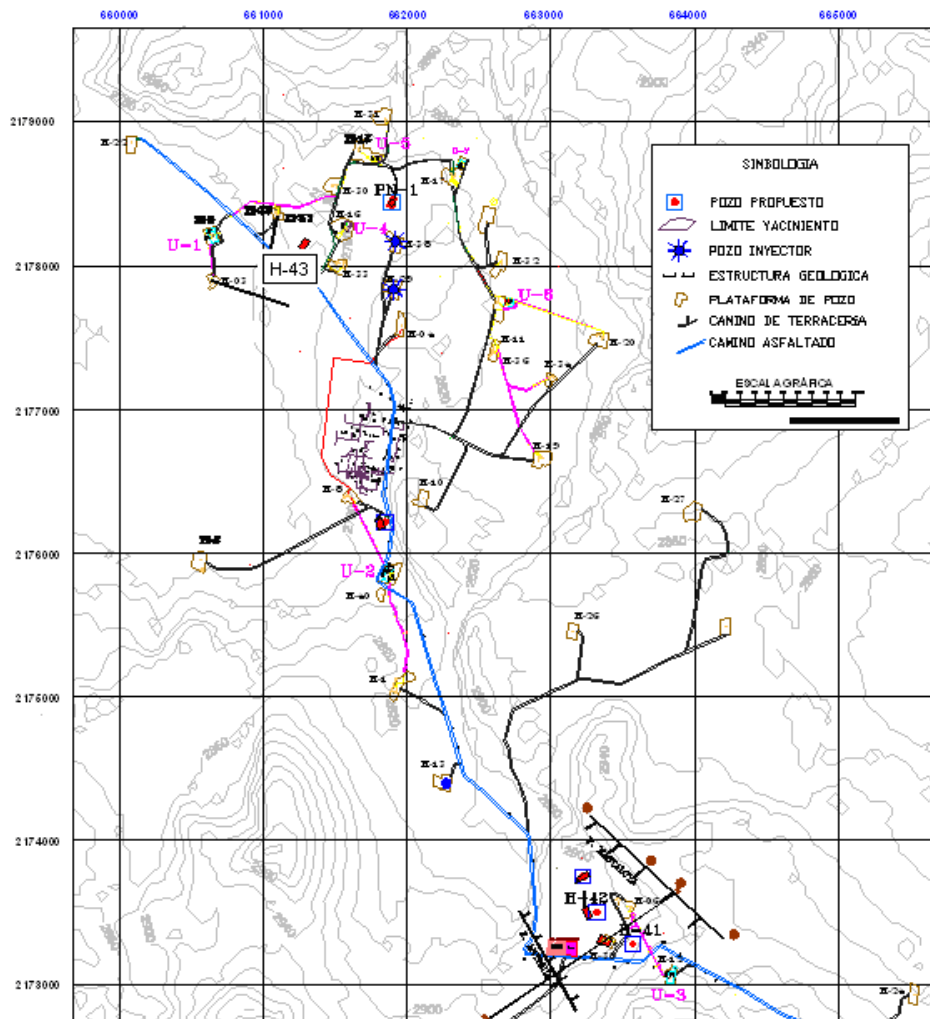


Figura 1.- Localización del pozo H-43.

2. Pruebas realizadas en el pozo H-43

Se realizaron pruebas a la profundidad de 1250 m, después de perforar en agujero de 234,95 mm (12 ¼ pulg) de diámetro; y a la profundidad total de 2200 m, después de perforar en agujero de 215,9 m (8 ½ pulg). Las pruebas consistieron en:

2.1 A la profundidad de 1250 m

- Una serie de registros de Presión–Temperatura con 6, 12, 18 y 24 horas de reposo con el objetivo de calcular la temperatura estabilizada. Se utilizaron instrumentos mecánicos Kuster.

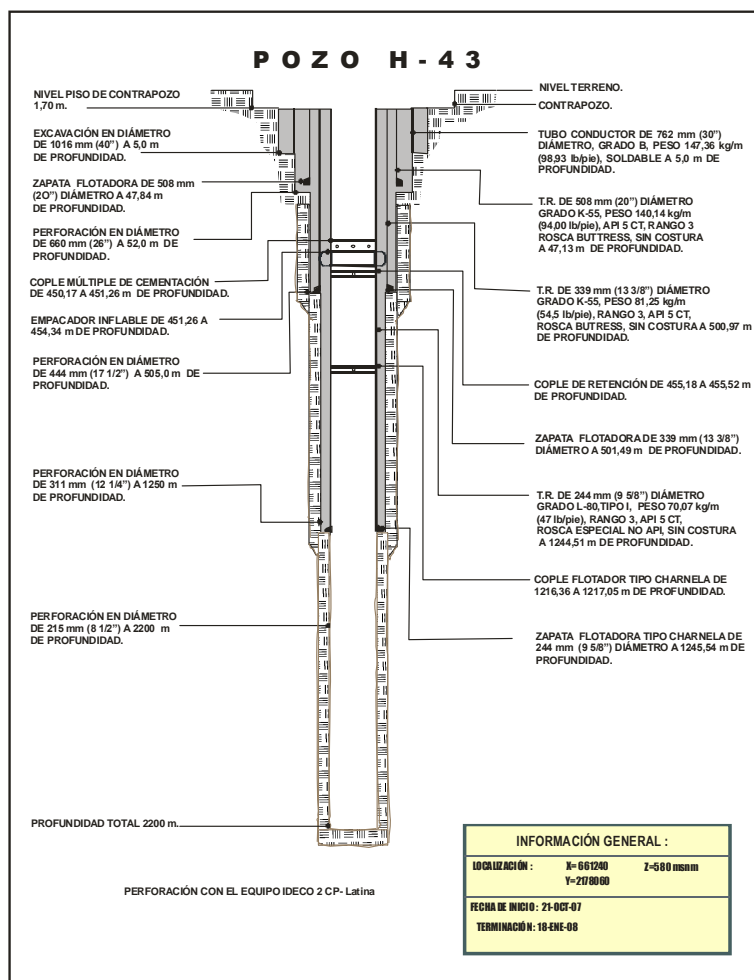


Figura 2.- Terminación del pozo H-43

2.2 A la profundidad de 2200 m.

- Una serie de registros de Presión – Temperatura con 6, 12, 18 y 24 horas de reposo, con el objetivo de caracterizar termodinámicamente el intervalo 1250-2200 m e identificar la presencia de zonas permeables. Se utilizaron instrumentos mecánicos Kuster
- Una prueba de pérdida de agua inyectando 60,0 t/h de agua, con el objetivo de identificar con mayor confiabilidad las zonas principales de aceptación. Se utilizaron instrumentos mecánicos Kuster.
- Fracturamiento térmico del pozo, que consistió en tres pruebas de inyección-recuperación, utilizando en cada etapa de inyección diferentes flujos de agua a 20° C, con el objetivo de provocar un choque térmico en la matriz de roca e inducir permeabilidad secundaria. Se utilizaron instrumentos mecánicos Kuster.
- Un registro presión-temperatura después de la prueba de fracturamiento térmico para evaluar los resultados de ésta.

3. Análisis de las pruebas

3.1 Serie de registros de presión-temperatura

3.1.1 A 125 m de profundidad.

Los registros se realizaron en agujero descubierto. La serie consistió en cuatro perfiles presión-temperatura con 6, 12, 18 y 24 horas de reposo, cada uno. Hasta esta profundidad no se presentaron pérdidas de circulación. En la Figura 3 se muestran los perfiles de presión y temperatura. El nivel estático con 6 horas de reposo se localizó a 41 m de profundidad, y con 24 horas disminuyó a 150 m, lo que nos indica que la formación estaba aceptando fluido. En los perfiles de temperatura se observan dos zonas permeables: una entre 500-600 m y otra a 1000-1200 m de profundidad.

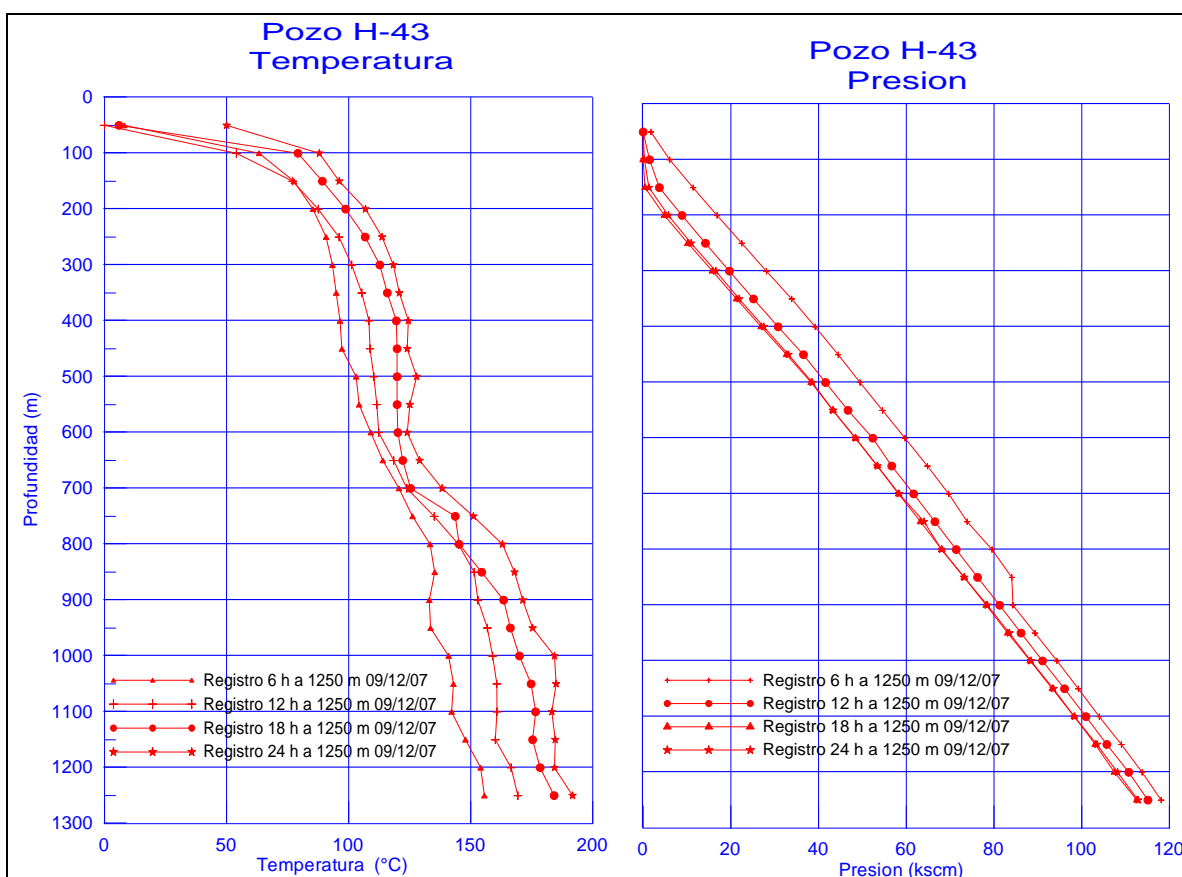


Figura 3. Perfiles presión-temperatura en el pozo H-43 a 1250 m.

A partir de los perfiles de temperatura se calculó la temperatura estabilizada, siendo de 228° C a 1250 m (Tabla 2 y Figura 4).

3.1.2 A la profundidad de 2200 m.

Durante la perforación en diámetro de 215,9 mm (8 ½ pulg), no se presentaron pérdidas de circulación del fluido de perforación, sin embargo al tratarse de un yacimiento de baja permeabilidad, es posible

que los fluidos de perforación enmascaren las zonas permeables, por lo que se realizaron los registros con la finalidad de identificar la posible presencia de estas zonas y además para evaluar termodinámicamente el intervalo en agujero descubierto.

Tiempo perforación 1247-1250 = 0.75 h		Tiempo de circulación = 10 h	
NUMERO DE PERFIL	TIEMPO DE REPOSO (h)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE HORNER (adimensional)
T1	6	155.6	0.298
T2	12	169.35	0.263
T3	18	184.17	0.188
T4	24	191.74	0.151

Tabla 2. Tiempo de Horner para el cálculo de la temperatura estabilizada a la profundidad de 1250 m.

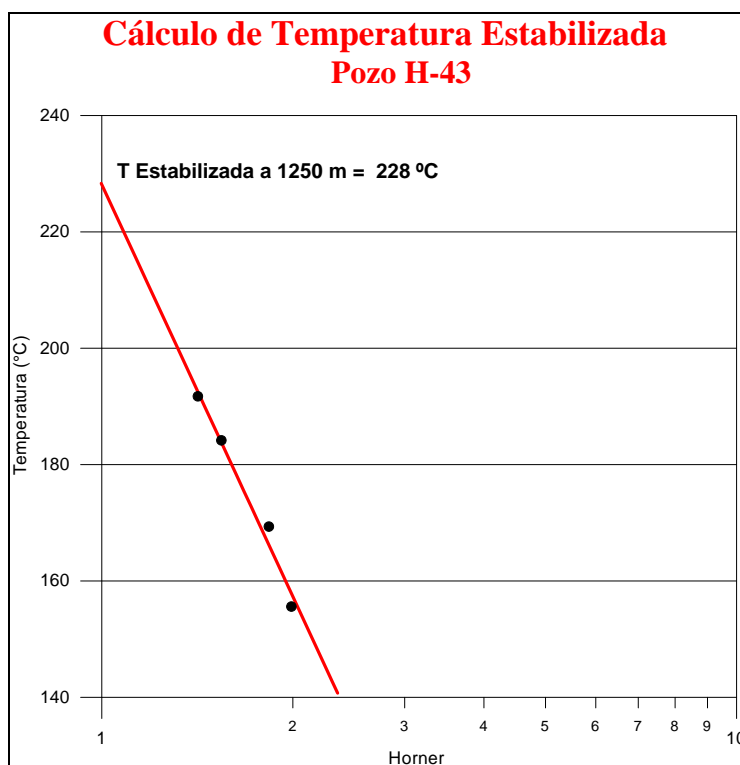


Figura 4.- Gráfico semilog para el cálculo de la temperatura estabilizada a 1250 m.

La serie consistió en cuatro perfiles presión-temperatura con 6, 12, 18 y 24 horas de reposo, cada uno (Figura 5). Fueron realizados en agujero descubierto.

En los perfiles de presión se observa que el nivel estático varió desde 50 m, con 12 horas de reposo, hasta 250 m, con 24 h de reposo. Considerando la geometría del pozo (Diámetro interno = 0,2204 m), y el abatimiento de 200 m en 12 horas, se calculó que la formación estuvo aceptando durante los registros 1,39 t/h, lo que indica que la formación presencia baja permeabilidad, aún cuando en los perfiles de temperatura no es posible identificar confiablemente el intervalo donde está aceptando.

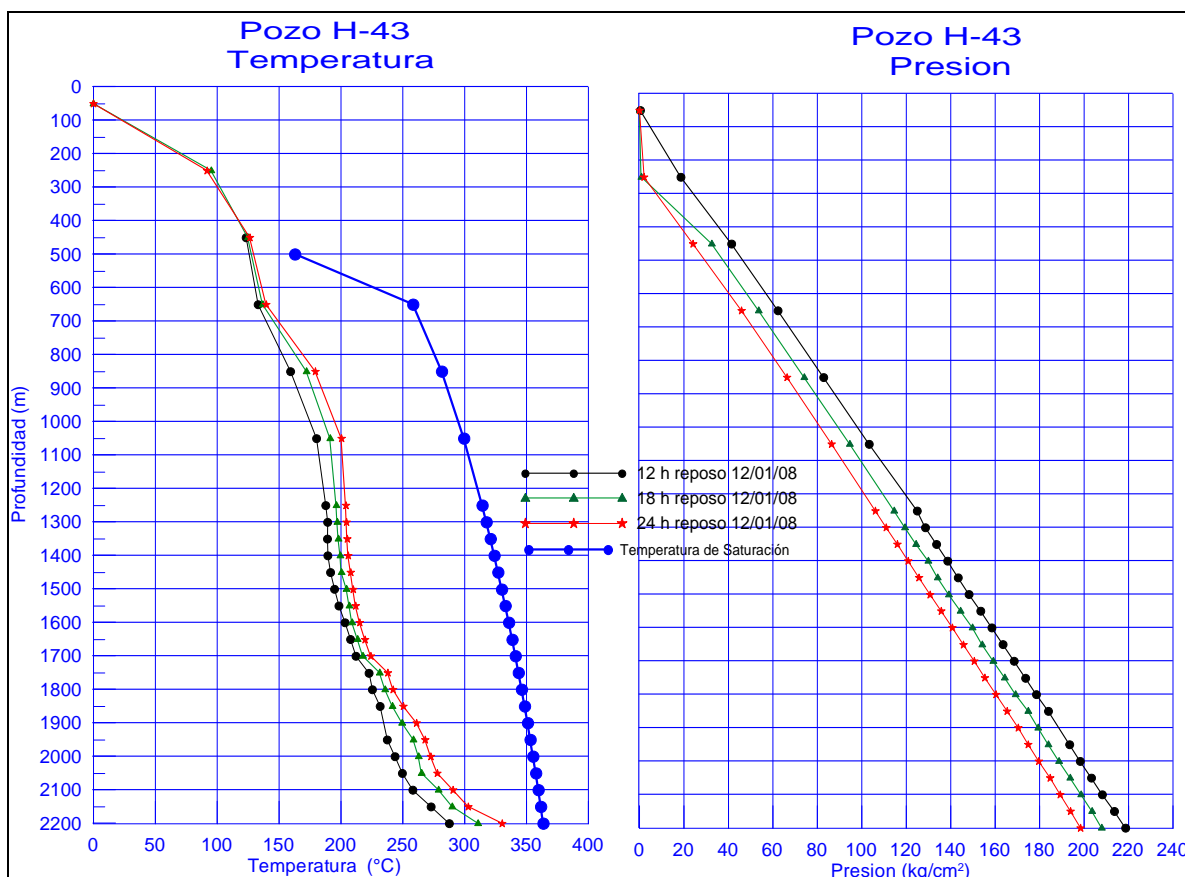


Figura 5.- Perfiles presión-temperatura en el pozo H-43 a 2200 m.

La temperatura estabilizada a 2200 m de profundidad es de 383° C (Tabla 3 y Figura 6), que está por arriba del punto crítico del agua (374.15° C). Con esta temperatura calculada y la presión medida a 2200 m, el fluido se localiza termodinámicamente en la región supercrítica (Figura 7).

Tiempo perforación 2197-2200 = 0.75 h		Tiempo de circulación = 8.15 h	
NUMERO DE PERFIL	TIEMPO DE REPOSO (h)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE HORNER (adimensional)
T2	6	272,04	2.48
T3	12	287,63	1.74
T4	18	310,85	1.49
T5	24	330,33	1.37

Tabla 3. Tiempo de Horner para el cálculo de la temperatura de equilibrio de la formación a la profundidad de 2200 m.

3.2 Prueba de pérdida de agua

Antes de realizar la prueba se llevó a cabo el lavado del pozo en dos etapas:

- Etapa 1: Se bajó tubería inyectando agua geotérmica por etapas, hasta llegar al fondo del pozo. Durante esta actividad se presentó una pérdida parcial del fluido de $60 \text{ m}^3/\text{h}$.

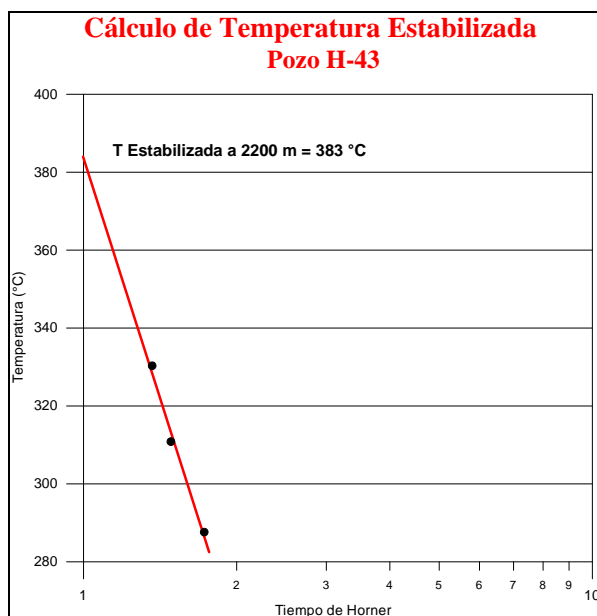


Figura 6.- Gráfico semilog para el cálculo de la temperatura estabilizada a 2200 m.

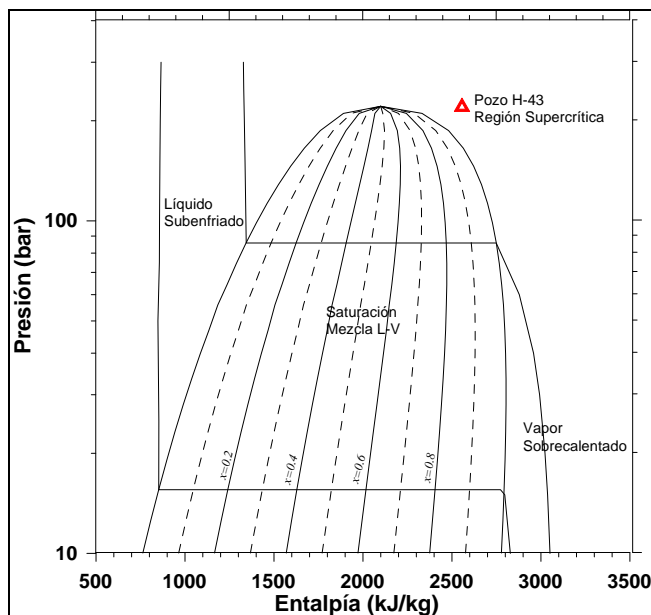


Figura 7.- Gráfico presión-entalpía para el agua y ubicación del fluido de pozo H-43.

- Etapa 2: A la profundidad de 1224,7 m se inyectaron 150 m^3 de una solución de agua-lignito con una concentración $1,0 \text{ Kg}/0,159 \text{ m}^3$, de la siguiente manera:
 - Inyección de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ durante 30 minutos sin que se manifestara presión en el cabezal.

- Se incrementó el gasto a $75 \text{ m}^3/\text{h}$ alcanzando una presión máxima en el cabezal de $24,6 \text{ kg/cm}^2$ (350 psig).
- Se incrementó nuevamente el gasto a $90 \text{ m}^3/\text{h}$, registrando una presión máxima en el cabezal de $36,9 \text{ kg/cm}^2$ (525 psig).

Finalizado el lavado, se procedió a la prueba de pérdida de agua:

- Se bajó tubería de perforación de $4 \frac{1}{2}$ " de diámetro hasta 22,48 m, para conectar el lubricador y equipo superficial de registros.
- Se inyectó agua por el espacio anular durante 1,5 horas, a razón de $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Después se bajó la sonda con dos elementos de temperatura y uno de presión hasta 1250 m, comenzando a registrar desde esa profundidad y hasta el fondo cada 50 m.
- Al llegar a la profundidad total del pozo, se continuó con el registro ascendente. Las estaciones descendentes y ascendentes fueron las mismas. El gasto de agua inyectado en el pozo se mantuvo constante durante toda la prueba. No se manifestó presión en el cabezal.

Al finalizar la prueba se continuó inyectando $90 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua durante 20 minutos, sin observarse presión en el cabezal.

En la Figura 8 se muestran los perfiles de presión y temperatura registrados durante la prueba. Se identificaron dos puntos de aceptación de agua: uno a 1400 m y otro a 1850 m de profundidad.

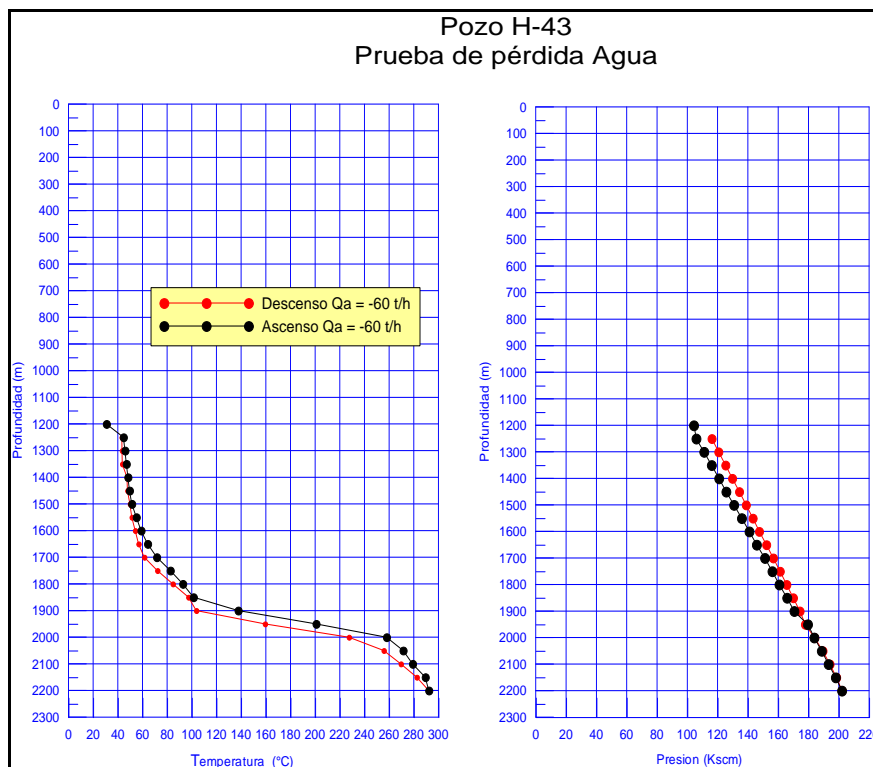


Figura 8.- Perfiles de temperatura y presión durante la prueba de pérdida de agua.

3.3 Fracturamiento térmico del pozo

El fracturamiento térmico de la matriz consistió en tres pruebas de inyección-recuperación, inyectando diferentes gastos en cada una de ellas. La sonda, dos instrumentos de presión, se estacionó a 1250 m de profundidad. En la figura 9 se presenta el comportamiento de la presión de fondo durante toda la prueba.

El desarrollo de la prueba se describe a continuación:

- Inyección No 1. Se inició inyectando un gasto de 105 m³/h durante 1,5 horas, después se incrementó a 120 m³/h hasta completar las 3 horas de inyección. Durante esta etapa, no se manifestó presión en el cabezal. La etapa de recuperación No.1 tuvo una duración de 11.25 horas.

Durante la inyección de 105 m³/h, la presión de fondo se incrementó hasta 107,4 kg/cm² durante los primeros 10 minutos y después disminuyó hasta 99,4 kg/cm². Con la inyección de 120 m³, la presión se incrementó a 100,4 kg/cm², 10 minutos después de modificar este gasto, y después disminuyó a 97,9 kg/cm² después de 1,5 horas. En la etapa de recuperación No.1, después de 11,25 horas, la presión disminuyó hasta 78,4 kg/cm².

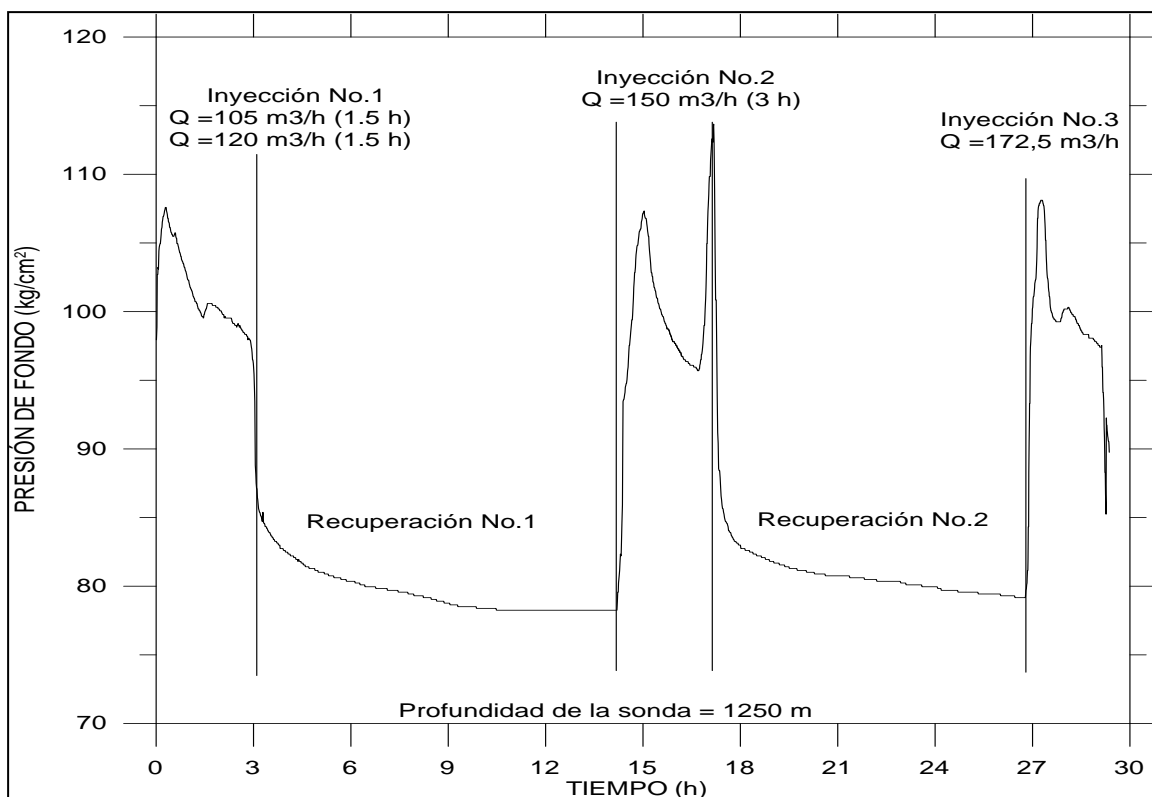


Figura 9.- Prueba de fracturamiento térmico de la matriz

- Inyección No. 2. Se inyectó un gasto de 150 m³/h durante tres horas. No se manifestó presión en el cabezal. Durante la inyección la presión máxima fue de 107,2 kg/cm², similar al de la inyección No.1, para disminuir hasta 95,8 kg/cm² y al final incrementarse a 111,7 kg/cm² en menos de 5 minutos (el gasto de inyección se mantuvo constante), por lo que se infiere que

hubo una ligera obturación de las zonas permeables. La etapa de recuperación No.2 tuvo una duración de 8 horas, disminuyendo la presión hasta 79,4 kg/cm².

- Inyección No. 3. Se inyectó un gasto de 172,5 m³/h. No se manifestó presión en el cabezal. La presión máxima fue de 108,4 kg/cm², el mismo efecto se observó con la presión respecto a las anteriores inyecciones de agua, disminuyendo la presión después de 10 minutos de inyección. La etapa de recuperación No.3 duró 10 horas, sin registrarse completamente debido a una falla en el registrador de la sonda

Como se observa en la Figura 9, en las tres etapas de inyección la presión se incrementó a un máximo en los primeros 10 min de iniciada la inyección y después se abatió debido a que se alcanzó la presión de apertura de las fracturas ocasionando mejoría en la permeabilidad secundaria producto del fracturamiento de la matriz.

Debido a la alta dispersión de los datos solamente se logró analizar con confiabilidad la etapa de recuperación No.2. En el diagnóstico log-log utilizando la presión y la derivada de la presión (Figura 10) se identificó el comportamiento de flujo pseudo-radial ($m = 0$) entre 0.8 y 1.35 horas.

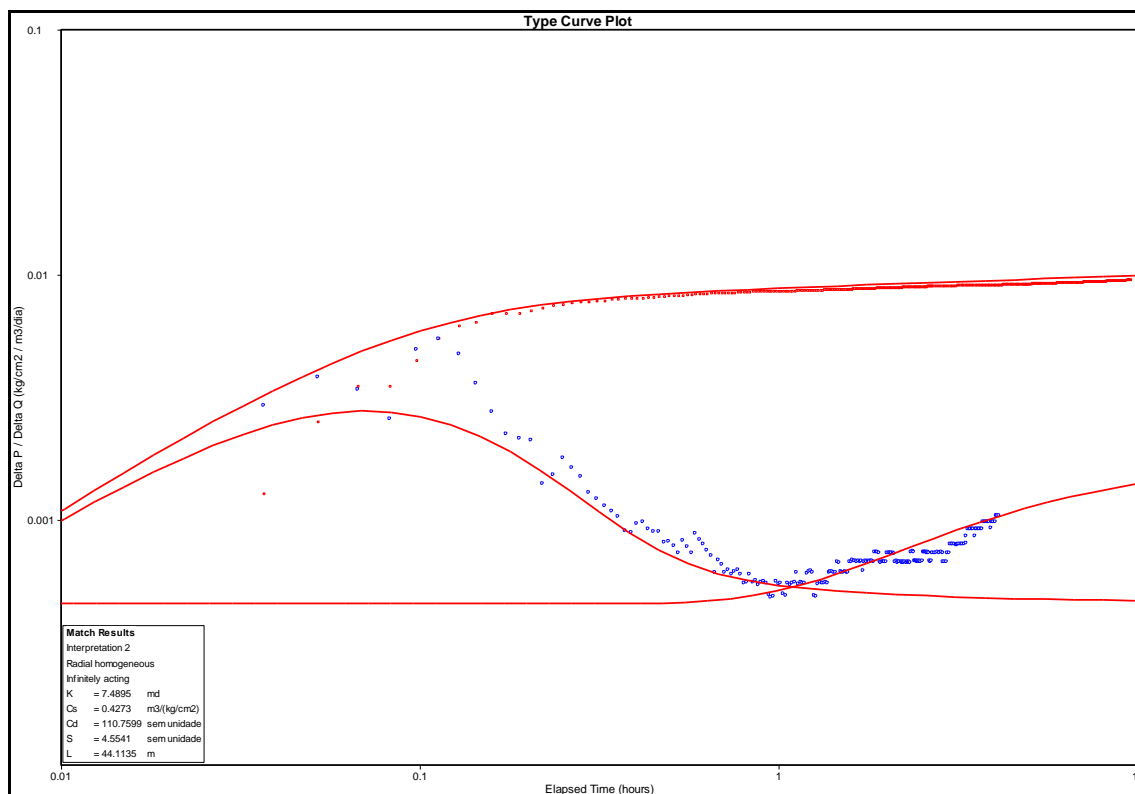


Figura 10.- Gráfica Log-Log de la prueba de fracturamiento, de la segunda etapa de recuperación.

Aplicando el análisis especializado con la técnica semilog de Horner a los datos que corresponden a la geometría pseudo-radial, donde se calcularon los parámetros:

$$\begin{aligned}
 Kh &= 3558.9 \text{ md-m} \\
 S &= 3.9
 \end{aligned}$$

$$P^* = 80.05 \text{ kg/cm}^2$$

Al aplicar la técnica de curvas tipo, los datos de la presión y la derivada se ajustan a la curva tipo de Bourdet, modelo de flujo radial homogéneo actuando infinitamente. Los parámetros calculados son:

$$\begin{aligned} K_h &= 3774.75 \text{ md-m} \\ S &= 4.55 \end{aligned}$$

Los valores obtenidos entre ambas técnicas son similares lo que proporciona un buen grado de confiabilidad de los resultados. La conductividad de la formación (kh) es alto comparado con el promedio de los pozos aledaños (486 md-m). El factor de daño (S) es positivo indicando daño en la formación, seguramente por la presencia de lodo de perforación y material producto de la misma.

3.3.1 Registro presión-temperatura después de la prueba de fracturamiento térmico

Después de la prueba de fracturamiento térmico se realizó un registro presión-temperatura con la finalidad de confirmar los intervalos convectivos. En la Figura 11 se muestran los perfiles correspondientes.

El nivel estático se localiza a 450 m de profundidad y se identifican dos intervalos convectivos importantes:

- El primer intervalo se encuentra de 1550 a 1900 m.
- El segundo de 2050 a 2200 m de profundidad.

Con una presión media de yacimiento a 1725 m de profundidad, de 120 kg/cm^2 .

Comparando este perfil de presión con el obtenido con 24 horas de reposo, antes de las pruebas (Figura 6), se observa que el nivel estático bajo de 250 a 450 m, lo que indica que hubo pérdida de fluido hacia la formación a causa de una mejora de la permeabilidad, como consecuencia de la prueba de fracturamiento térmico realizada en el pozo.

Al término de los registros de presión-temperatura, se realizaron dos registros de calibración, con la finalidad de verificar el estado mecánico del pozo, una con globo de 127 mm (5") a la profundidad de 2200 m y otra con globo de 203 mm (8") hasta la profundidad de 1250 m, bajando libre en ambos casos.

4. Conclusiones

- Durante los trabajos de perforación no se presentaron pérdidas de fluido de perforación. Sin embargo en los perfiles presión-temperatura realizados antes del fracturamiento se calculó que el pozo aceptaba 1.39 t/h, lo cual indicaba la presencia de escasa permeabilidad.

- Las temperaturas estabilizadas calculadas son: 228° C a 1250 m y 383° C a 2200 m de profundidad. Esta última indica que el fluido se encuentra en la región supercrítica, lo cual podría ser una condición para la presencia de fenómenos de corrosión.

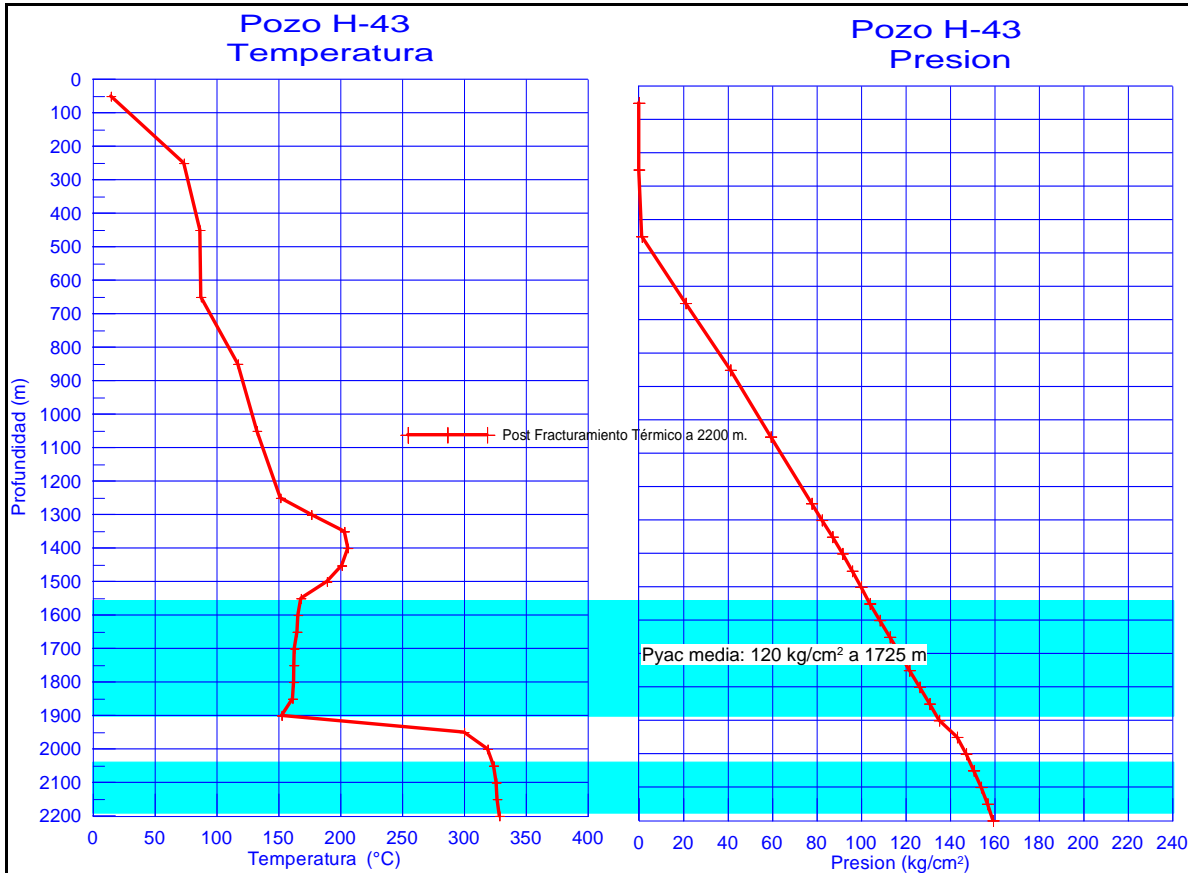


Figura 11.- Perfiles de temperatura y presión después del fracturamiento térmico.

- Durante la prueba de fracturamiento térmico, en las tres etapas de inyección, la presión se incrementó a un máximo (107.6 kg/cm²) en los primeros 10 min de iniciada la inyección, para después abatirse. Esta presión máxima es la presión de apertura de las fracturas, que aunado al choque térmico ocasionó mejoría en la permeabilidad secundaria de la formación.
- Los resultados de la prueba de fracturamiento térmico indican que se logró inducir una mejoría en la permeabilidad secundaria de la matriz, debido a que la conductividad de la formación calculada ($Kh = 3558.9$ md-m) es mayor que el promedio de los pozos aledaños.
- El factor de daño es positivo ($S = 3.9$) indicando que aun cuando los resultados del fracturamiento fueron positivos todavía hay daño en la formación debido a la presencia de lodo de perforación y material producto de la misma, lo cual se eliminará en cuanto el pozo sea puesto en producción.
- Se localizaron dos intervalos convectivos importantes.
 - El primer intervalo se encuentra de 1550 a 1900 m.

- El segundo de 2050 a 2200 m de profundidad.
- Debido a la posible presencia de fluidos ácidos el pozo se terminó en agujero descubierto de 1250 a 2200 m de profundidad.