

10. TIPOS DE ENSAYOS A REALIZAR EN UNA TESTIFICACIÓN HIDRÁULICA, PERDIDAS DE CARGA DEL SISTEMA Y RANGO DE MEDIDAS

10.1. Tipos de ensayos a realizar y configuraciones básicas

Influencia de los efectos de almacenamiento y Skin en los ensayos hidráulicos

Ensayos a caudal constante

Ensayos a presión constante

Ensayo de inyección en estado estacionario

Comparación entre los métodos de análisis de la conductividad hidráulica calculada para estado estacionario transitorio

Ensayos tipo "Slug"

Ensayos tipo "Pulse"

10.2. Protocolos de actuación

10.2.1. Ensayos de inyección

10.2.2. Ensayos tipo "pulse"/"slug"

10.3. Pérdidas de carga del sistema

Pérdidas de carga en el varillaje

Pérdidas de carga en la válvula coaxial de solenoide

Pérdidas de carga en el "packer" superior

Pérdidas de carga en el sistema de inyección de agua en superficie

Pérdidas de carga totales

10.4. Rango de medidas

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

10.- TIPOS DE ENSAYOS A REALIZAR EN UNA TESTIFICACIÓN HIDRÁULICA, PÉRDIDAS DE CARGA DEL SISTEMA Y RANGO DE MEDIDAS

El Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) ha diseñado un equipo de realización de ensayos hidrogeológicos en formaciones de baja permeabilidad constituido por dos unidades móviles encargadas de la realización de ensayos. Sus principales características son la autonomía y capacidad de acceso a zonas de topografía accidentada.

Con ellas se llevará a cabo el programa de testificación hidráulica en sondeos de hasta 1.200 m de profundidad. A continuación se detallan un total de siete métodos de ensayo y se realiza una evaluación de los mismos utilizando el mismo equipo con pequeñas modificaciones. El equipo ha sido ensayado en lo concerniente a la elasticidad de los "packers" y al cambio de volumen total en la sección de ensayo debido a la compresibilidad de los diferentes componentes.

Igualmente, y tras la comparación de los resultados obtenidos por las diferentes agencias que llevan a cabo programas similares, se recomiendan los métodos más apropiados para llevar a cabo una campaña de ensayos y programar investigaciones en rocas con un bajo rango de conductividades hidráulicas. Estos métodos serán revisados tras la obtención de datos que permitan un estudio comparado de la idoneidad de los diferentes tipos de ensayos y su aplicabilidad al caso español.

Los objetivos de la testificación hidráulica que se llevará a cabo en el programa propuesto son:

- Identificación y caracterización mediante obtención de parámetros hidráulicos del granito no fracturado.
- Identificación de zonas de fracturas permeables y caracterización de las mismas.
- Toma de muestras en zonas seleccionadas.

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

10.1.- Tipos de ensayos a realizar y configuraciones básicas

Un ensayo hidráulico consiste en la aplicación de una perturbación controlada a un acuífero. Dicha perturbación es, en la mayoría de las ocasiones, un bombeo hacia o desde el acuífero. Los efectos de dicha perturbación se observan en forma de cambios bien en el caudal bien en la presión del agua (nivel piezométrico), tanto en el tiempo como en el espacio. El pozo en el que se ha introducido la perturbación se suele denominar pozo activo. Cuando se miden únicamente los efectos de dicha perturbación en el pozo activo se habla de un ensayo en pozo único (single hole test). Cuando se realizan medidas en pozos de observación próximos se habla de ensayos de interferencia.

Mediante la testificación hidráulica se determinan fundamentalmente los parámetros hidráulicos de la formación, sus condiciones de contorno y su relación con el medio geológico circundante.

Una perturbación de valor constante introducida en un acuífero durante largo tiempo puede generar nuevas condiciones, en las que los efectos de la perturbación no varíen con el tiempo (steady state). En este caso se obtiene un estado denominado estacionario, mientras que el estado en el que los efectos de la perturbación varían con el tiempo se denomina transitorio (transient).

En la práctica se dice que el estado estacionario se obtiene cuando los cambios en el nivel piezométrico de las secciones ensayadas tanto en el pozo activo como en los piezómetros de observación son tan pequeños en el tiempo que pueden ser despreciados. Si se continúa con el ensayo hidráulico los niveles pueden cambiar aún en el tiempo, pero el gradiente hidráulico inducido no variará. En otras palabras, se ha obtenido un estado cuasi-estacionario (pseudo-steady state).

En el caso de acuíferos fracturados se emplea el término cuasi-estacionario para el flujo desde los bloques de la matriz hacia las fracturas. Este flujo ocurre en respuesta a la diferencia entre el nivel piezométrico medio en los bloques y en las fracturas. La variación espacial en los

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

gradientes hidráulicos de los bloques es generalmente ignorada y el flujo a través de las fracturas hacia el pozo se considera radial y transitorio.

Una roca fracturada es un medio generalmente complejo, heterogéneo y anisótropo. Para cuantificar e comportamiento del flujo de agua subterránea y estudiarlo matemáticamente se necesitan ciertas idealizaciones. Por ello, la mayoría de los modelos teóricos en rocas cristalinas se basan en la asunción de que la roca fracturada puede ser representada por un medio equivalente poroso y continuo, bien de porosidad simple bien de doble porosidad.

En un sistema real es el grado de interconexión entre las fracturas el que determina la conductividad hidráulica total (efectiva) de la roca.

El tamaño del volumen investigado durante la realización de un test hidráulico (radio de influencia) depende fundamentalmente de las propiedades hidrogeológicas de la roca y la duración del test. En lo posible, la duración del test debería ser seleccionada teniendo en cuenta a magnitud de los parámetros hidrogeológicos y la distribución de fracturas para obtener valores representativos de los mismos en un test particular (es decir, tiempos de ensayo mayores en secciones de baja permeabilidad). Idealmente, el volumen investigado debería ser lo suficientemente grande para ser tratado, de forma conjunta con sus inhomogeneidades, como un medio equivalente homogéneo y poroso con valores medios representativos de los parámetros hidrogeológicos del medio.

Un volumen elemental representativo (VER) de la masa de roca se define como el mínimo volumen de roca que debe ser investigado para conseguir valores estables y representativos de los parámetros hidráulicos. Si este volumen se incrementa, los parámetros calculados no deberían variar significativamente.

Una formación de doble porosidad se considera compuesta por dos medios porosos que interactúan con porosidad, tanto primaria como secundaria. La región de porosidad primaria está asociada con la matriz de la roca cuyas propiedades hidráulicas están generalmente controladas por procesos deposicionales. La región de porosidad secundaria consiste en un sistema de

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

fracturas cuyas propiedades hidráulicas son, generalmente, el resultado de procesos tectónicos y esfuerzos termales.

En general, la permeabilidad de los bloques de la matriz es baja y el sistema de fracturas, en cambio, presenta alta permeabilidad y transmisividad. La capacidad de almacenamiento de ambas regiones depende de la porosidad efectiva de cada región.

Las formaciones de doble porosidad pueden clasificarse en cuatro categorías diferentes (Strelsova, 1976). La primera categoría, un medio fracturado, consiste en una formación cuya región de porosidad primaria contiene la mayoría de la capacidad de almacenamiento, mientras que la región de porosidad secundaria aporta la capacidad de transmitir agua del medio.

El segundo modelo, un medio fracturado puro, representa un medio cuya matriz tiene una porosidad y una permeabilidad despreciables. Por tanto, la capacidad de almacenar y transmitir agua del medio son debidas enteramente a la red de fracturas.

El tercer grupo es un medio de doble porosidad propiamente dicho, en el cual la capacidad de almacenamiento de las regiones primarias y secundaria del medio tienen el mismo orden de magnitud, mientras que la transmisividad es debida al sistema de fracturas.

La última categoría es un medio heterogéneo en el que las fracturas se encuentran rellenas con un material cuya permeabilidad es inferior a la de la matriz.

La primera categoría se usa frecuentemente en la industria petrolífera para describir el comportamiento de la presión en reservorios porosos fracturados. En tales modelos, la capacidad de almacenamiento de la roca se encuentra asociada con la porosidad primaria (intergranular) de la matriz, mientras que la transmisividad (capacidad transmisiva) es debida casi por completo al sistema de fracturas. La porosidad efectiva de la matriz se considera mucho mayor que la porosidad efectiva del sistema de fracturas. El segundo y tercer modelos pueden ser considerados como casos particulares de éste.

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

Básicamente se utilizan tres tipos de ensayos hidráulicos para obtener los parámetros hidráulicos de formaciones de baja permeabilidad, y que implican la inyección o extracción de agua en la formación.

- Inyección o extracción de agua en o desde un sondeo a caudal constante registrándose los efectos por medio de la variación en el nivel piezométrico
- Inyección o extracción de agua en o desde un sondeo manteniendo constante la presión del agua (nivel piezométrico constante) y registrando los efectos por medio de la variación en el caudal de agua
- Recuperación de presión hasta alcanzar el nivel estático inicial en los dos anteriores.
- Inyección o extracción instantánea de un volumen limitado de agua en o desde un sondeo o someter una sección a un pulso (positivo o negativo de presión de duración finita y registrar la recuperación transitoria de presiones (pulse response tests)

Durante la realización de un ensayo de inyección o extracción a caudal constante se registra el cambio de presión o nivel de agua en el sondeo en función del tiempo. Un test de inyección se compone de una fase de inyección propiamente dicha y una fase de recuperación de la misma (fall-off) una vez finalizada la inyección.

En el segundo tipo de ensayos se mantiene constante la presión en la sección ensayada y se registra la cantidad de agua inyectada o extraída necesaria para mantener constante la presión. Cuando se extrae agua del sondeo el ensayo se denomina ensayo a nivel constante ("constant drawdown test"), mientras que cuando se inyecta agua el ensayo se denomina ensayo de inyección a nivel constante ("constant pressure injection test"). Una variante de este último tipo de ensayo consiste en asumir condiciones estacionaria durante la realización del ensayo.

Por último, los ensayos de respuesta a un pulso de presión, se basan en la respuesta a cualquier clase de cambio instantáneo en el nivel piezométrico de la sección a ensayar . Los ensayos de este tipo pueden dividirse en "pulse" y "slug". Durante la realización de un ensayo

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

"slug" se registran las variaciones del nivel piezométrico en el interior de la tubería en función del tiempo. En el caso de formaciones de muy baja permeabilidad una alternativa es la realización de pulse tests, cuya duración es sensiblemente menor debido a que el ensayo se realiza en condiciones totalmente confinadas.

Es por ello que el ensayo más representativo en principio y que afecta mayor volumen de roca es el de inyección, bien a caudal constante bien a nivel constante. Otros criterios a considerar en la selección del tipo de ensayo son la facilidad de operación, gran intervalo de rangos de medida y minimización de errores debida a los procedimientos de medida e instrumentación. Como criterio práctico debe citarse que los ensayos se realizan tras el inflado de "packers", operación que produce un aumento de presiones en la sección de ensayo seguido de la recuperación de las mismas. La magnitud y duración de estos efectos se utilizan para la determinación del tipo y duración del tipo de ensayo a realizar a continuación.

En todo caso es importante establecer procedimientos estandarizados de ensayo y análisis así como disponer de la flexibilidad necesaria para variar los procedimientos de modo que se ajusten a las condiciones reales de trabajo en campo.

Es el método usado comúnmente para la evaluación de las características de permeabilidad de rocas fracturadas. El grado de validez de la permeabilidad estimada por medio de un test de inyección viene determinada fundamentalmente de la exactitud de las medidas de presión y caudal.

- **Influencia de los efectos de almacenamiento y "skin" en los ensayos hidráulicos**

Los efectos de almacenamiento y "skin" (piel) pueden alterar la respuesta transitoria de presiones en el pozo activo durante la testificación hidráulica. El efecto piel refleja todos los factores que pueden afectar la interacción hidráulica entre el sondeo y la roca circundante. Estos factores incluyen, en general, alteración de la conductividad hidráulica de la formación en las proximidades del sondeo debida a la perforación, penetración parcial, desviación del sondeo y efectos de flujo turbulento. El efecto piel se encuentra normalmente presente en todos los ensayos

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

de testificación hidráulica, tanto durante el bombeo o inyección como durante la recuperación.

El efecto piel se caracteriza por el factor piel, que representa el área efectiva conectada al sondeo. En relación con el radio nominal del sondeo, el área puede ser incrementada, debido a fracturas naturales o inducidas que interseccionan el sondeo (efecto piel negativo), o reducida, debido al relleno parcial de las fracturas por los detritus de la perforación (efecto piel positivo).

En teoría, el efecto piel puede ser tratado de dos formas. En la primera de ellas, la piel se supone concentrada en una zona de espesor infinitesimal alrededor de la pared del sondeo, en la cual no tiene lugar almacenamiento de agua. Esta aproximación convierte el caso de efecto piel negativo en un caso puramente teórico. La otra aproximación considera una piel de espesor finito alrededor del sondeo. En esta zona, la conductividad hidráulica puede aumentar o disminuir en relación con la transmisividad real de la formación.

En este caso, el efecto piel puede ser calculado según Earlougher (1977):

$$\zeta = (K/K_s - 1) \ln r_s/r_w$$

K y K_s representan la conductividad hidráulica, mientras que r_s y r_w indican el radio de la zona afectada (piel) y el del sondeo, respectivamente. Si el factor piel es conocido, puede usarse la ecuación anterior para estimar K_s o r_s .

De acuerdo con Earlougher (1977), el factor piel puede variar entre -5 para un pozo fracturado hasta $+\infty$ para un pozo completamente obstruido.

El efecto de capacidad es debido al volumen de agua almacenado en el propio sondeo o en la sección aislada del sondeo. En condiciones normales sólo suceden en ensayos a caudal constante, cuando la presión cambia durante el transcurso del test, particularmente en formaciones de baja permeabilidad. En los ensayos a presión constante, la presión en el fondo del sondeo no varía, por lo que no se presenta dicho efecto. Sin embargo, durante la recuperación de presiones, los efectos de almacenamiento pueden influenciar la respuesta.

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

Dado que el agua es ligeramente compresible, el volumen de agua contenido en un sondeo o en una sección del mismo, variará con el tiempo en el caso de que la presión en el sondeo (sección) cambie debido a la inyección o extracción. En un test de bombeo a caudal constante (en un sondeo abierto), el caudal total bombeado, Q , al principio del test es obtenido en parte de la formación y en parte del agua almacenada en el sondeo. La contribución del agua de la formación, Q_f , aumenta durante el test hasta que constituye el caudal total obtenido. El tiempo en el que esto sucede, depende principalmente de la magnitud de la capacidad de almacenamiento, caracterizada por el coeficiente de almacenamiento, C . Cuanto más grande es el valor de C , más tiempo se tarda en conseguir que el flujo total provenga de la formación.

El coeficiente de almacenamiento se define como:

$$C = \Delta v / \Delta p$$

donde Δv e Δp representan el cambio en el volumen y en la presión de agua en el pozo activo (sección), respectivamente. En el sistema métrico C se expresa en m^3/P_a . El volumen de agua también puede variar debido a cambios de volumen en el equipo utilizado para la testificación hidráulica ("packers", tuberías, etc).

El coeficiente de almacenamiento adimensional, C_d , se define como:

$$C_d = C_{sg} / 2\pi S_s L_r^2$$

El coeficiente de almacenamiento para un ensayo en un pozo abierto, es normalmente entre 10^3 - 10^5 veces mayor que en un sistema confinado. En rocas de baja permeabilidad se evitan perturbaciones de larga duración si se ensayan secciones confinadas de un sondeo. Cuando la presión en el sondeo se mantiene constante durante el test (inyección a nivel constante), no se presentan, en general, los efectos de almacenamiento.

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

- **Ensayos a caudal constante**

En un test de bombeo (inyección) a caudal constante, el agua se bombea manteniendo constante el caudal de extracción proporcionado por el sondeo o por una sección aislada del mismo.

La ecuación diferencial que describe el flujo radial transitorio en un medio poroso (ecuación de la difusividad) puede ser expresada como:

$$\frac{\delta^2 (\Delta p)}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta (\Delta p)}{\delta r} = \frac{S_s}{K} \frac{\delta (\Delta p)}{\delta t} \quad (1)$$

K = Conductividad hidráulica

S_s = Coeficiente de almacenamiento específico en el pozo

Δ_p = Cambio de presión

r = Distancia radial

t = Tiempo

El cambio de nivel puede ser expresado como:

$$H = \frac{Q}{2\pi K l} (p_d(t_d) + \zeta) \quad (2)$$

donde: ζ = coeficiente de piel

$$p_d = 2\pi K l H / Q$$

$$t_d = K t / S_s r_w^2$$

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

La distancia adimensional se define como:

$$r_D = r / r_w$$

donde r es la distancia radial desde el pozo activo y r_w es el radio del sondeo. En el pozo activo $r = r_w$, así que $r_D = 1$.

Existen dos soluciones (exactas) de la función $p_D(t_D)$. La solución de Theis (integral exponencial) asume que el radio del pozo es infinitesimalmente pequeño ($r_D \rightarrow \infty$). La otra solución, denominada solución para radio finito (PDCI) asume que el pozo activo tiene un radio finito.

Si $t_D > 100$, la solución integral exponencial puede ser aproximada por medio de:

$$P_D = 1.151 (\log t_D + 0.351)$$

Sin embargo, cuando $t_D > 5$, la diferencia entre la solución integral exponencial y la aproximación logarítmica es únicamente del 2%. En formaciones de alta permeabilidad, la condición de $t_D > 100$ en el pozo activo se alcanza normalmente unos minutos después de comenzado el test. En cambio, en formaciones de baja permeabilidad, t_D puede ser inferior a 100 durante una parte sustancial del test.

Usando la aproximación logarítmica, la ecuación que describe la variación del nivel puede ser escrita en la siguiente forma:

$$H = \frac{1.15Q}{2\pi KL} \left[\log \frac{Kt}{r_w^2 S_s} + 0.351 + 0.869\xi \right] \quad (3)$$

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

De la ecuación anterior puede deducirse que la representación de H en función del tiempo es una línea recta en un gráfico semilogarítmico. La conductividad hidráulica de la sección ensayada puede calcularse como:

$$K = 0.183 Q / \Delta H L$$

donde ΔH representa el cambio de nivel durante un ciclo logarítmico de tiempo.

El efecto piel se obtiene de:

$$\xi = 1.15 \left[\frac{H_{1min}}{\Delta H} - \log \frac{K}{r^2_w S_s} - 2.13 \right] \quad (4)$$

H_{1min} representa el cambio de nivel para $t = 1$ min.

El radio de influencia r_i , durante el test puede estimarse en la práctica de la aproximación logarítmica de P_D .

$$r_i = \sqrt{\frac{2.25 K t}{S_s}} \quad (5)$$

Mediante la solución para radio finito de P_D se puede realizar un ajuste a curvas tipo. Para ello se representan en función del tiempo en un gráfico doble logarítmico. La conductividad hidráulica puede obtenerse de:

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

$$K = \frac{0.159Q}{H_m L} (P_d)_m \quad (6)$$

donde H_m es el valor obtenido de la curva de datos correspondiente al valor de $(P_d)_m$ de la curva tipo.

Como puede observarse, las curvas tipo son inicialmente líneas rectas de pendiente unidad en gráfico doble logarítmico. Durante este período, dominado por los efectos de almacenamiento, no se obtiene prácticamente agua de la formación.

Este período puede ser representado por factor piel infinito. El cambio de presión durante este período puede ser aproximado por:

$$P_D = t_D / c_D$$

Tras un período de transición, las curvas tipo de pendiente unidad convergen con las marcadas con $C_D = 0$. En este tiempo han casado los efectos de almacenamiento. La intersección representa aproximadamente el tiempo de inicio del flujo radial en el sistema y el principio de la recta semilogarítmica. Para obtener un único ajuste con estas curvas, el valor de C_D debe ser conocido a causa de la forma similar de las curvas tipo. Si C_D no es conocido, un ajuste único es imposible. En este caso, las curvas tipo pueden ser utilizadas únicamente como una herramienta de diagnóstico y para estimar el tiempo de inicio de la recta semilogarítmica.

Para tests de bombeo o inyección, el comienzo de la recta semilogarítmica es dado por la siguiente condición:

$$t_D \geq (60 + 3.5 \xi) C_D$$

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

- **Ensayos a presión constante**

Estado transitorio

Quando un sondeo (sección) se ensaya a nivel constante, no ocurren efectos de almacenamiento dado que la presión en el fondo del sondeo no varía con el tiempo. Sin embargo, la recuperación subsiguiente puede ser afectada de forma importante por los efectos de almacenamiento en pozo.

Fundamentos del método

La solución de la ecuación de la difusividad para el caso de presión constante, fue presentada por Van Everdingen y Hurst (1949) y Jacob y Lohman (1952). Uraiet y Raghavan (1980) incluyeron el efecto piel en esta solución. Consideraron la región afectada por el efecto piel como una zona anular concéntrica con el sondeo y con una conductividad hidráulica diferente (mayor o menor) que la conductividad de la formación.

El recíproco del caudal transitorio en el sondeo (sección) durante un test a presión constante, incluido el efecto piel, puede ser expresado como sigue:

$$\frac{1}{Q(t)} = \frac{1}{2\pi K L H_0} \left[\frac{1}{Q_d(t_d)} + \xi \right] \quad (7)$$

H_0 es la presión constante de inyección en el sondeo. La función caudal adimensional representa la solución teórica de Q_0 como función del tiempo adimensional, t_D .

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

$$Q_d = \frac{Q(t)}{2\pi KLH_0} \quad (8)$$

Dicha solución teórica puede utilizarse para el ajuste por curvas tipo en un diagrama doble logarítmico.

La variación de caudal $Q(t)$ se representa en función del tiempo.

La conductividad hidráulica puede ser calculada mediante:

$$K = \frac{0.159 Q(t)_m}{H_0 L Q_d(t_d)_m} \quad (9)$$

donde:

$Q(t)_m$ y $Q_d(t_d)_m$ son los caudales en el punto de ajuste de la curva de datos y de la curva tipo, respectivamente.

El caudal desciende rápidamente para $t_d < 1000$. A continuación, la pendiente es muy pequeña, y dado que el ajuste a curvas tipo requiere de una forma característica para obtener un único ajuste, este método sólo es apropiado para $t_d < 1000$.

- **Ensayo de inyección en estado estacionario**

El estado estacionario supone que el flujo de agua es constante en magnitud y dirección en todos los puntos del acuífero y que no cambia con el tiempo. Esta situación se presenta muy raras veces en la práctica. En el mejor de los casos puede conseguirse un flujo cuasi-estacionario durante un periodo limitado de tiempo.

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

Fundamentos del método

Bajo condiciones estacionarias el segundo término de la ecuación de la difusividad (1) es cero, ya que no cambia el nivel.

$$\frac{\delta^2 (\Delta p)}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta (\Delta p)}{\delta r} = \frac{S}{T} \frac{\delta (\Delta p)}{\delta t} \quad (10)$$

La solución en estado estacionario para una inyección (ó bombeo) en una sección confinada del pozo activo puede expresarse por:

$$K = \frac{Q}{\Delta H/L} \cdot C \quad (11)$$

donde:

- Q = Caudal en estado estacionario ($L^3 T^{-1}$)
- ΔH = Presión de inyección (L)
- L = Longitud del intervalo (L)
- C = Factor de forma adimensional función de los efectos de flujo

Se han propuesto diferentes factores de forma semiempíricos para el análisis de medios porosos (Hvorslev, 1951, Moye, 1967). Sin embargo, la diferencia entre ellos no es mayor del 30 % y las aplicabilidad de los mismos a medios fracturados, donde el flujo se realiza a través de una red desconocida de fracturas, tiene una aplicación limitada, por lo que la idoneidad de cada factor no está demostrada. Generalmente los dos factores de forma citados son los más utilizados.

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

- **Comparación entre los métodos de análisis de la conductividad hidráulica calculada para estado estacionario y transitorio**

En general la conductividad hidráulica es sobreestimada por métodos de análisis en estado estacionario (Doe and Remer, 1982). Sin embargo, los métodos de análisis que se basan en condiciones estacionarias son ampliamente utilizados debido a su simplicidad matemática y al hecho de que se obtiene una buena correspondencia con los métodos correspondientes basados en análisis transitorio. Dicho error es generalmente menor que un orden de magnitud y normalmente se corresponde con la conductividad hidráulica obtenida por métodos de análisis transitorio multiplicado por un factor comprendido entre dos y tres.

- **Ensayos tipo "Slug"**

Concebido inicialmente para formaciones de mayor permeabilidad por Cooper, Bredehoeft y Papadopoulos (1967), es aplicable a los medios de baja permeabilidad. El método proporciona el valor de la transmisividad T y del coeficiente de almacenamiento S, aunque este último valor es más indicativo que fiable. Las curvas de campo obtenidas se interpretan de acuerdo con la teoría de flujo radial transitorio en un medio poroso.

Fundamentos del método

Consideremos un sondeo en el que se ha aislado la sección a ensayar por medio de dos "packers" ("packers"). Supongamos que el sondeo es cargado instantáneamente con un volumen V de agua (suele considerarse una inyección como carga positiva y una extracción como carga negativa). El nivel de agua en el sondeo se desplaza a una altura $H_0 = V / \Pi r_c^2$ por encima o por debajo de su nivel inicial e inmediatamente comienza a retornar al mismo de acuerdo con una función del tiempo H(t). Mientras, el nivel en el acuífero varía conforme a una función h(r,t). La solución al problema se describe matemáticamente por:

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 h}{d^2 r^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} &= \frac{S}{T} \frac{dh}{dt} \\
 h(r_s + 0, t) &= H(t) \\
 h(\infty, t) &= 0 \\
 \frac{2\pi r_s T (dh(r_s + 0, t))}{dt} &= \pi r^2 \frac{dH(t)}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

En las figuras 6.1.3/1 a 6.1.3/4 se muestran ejemplos de curvas teóricas generadas en un "Slug" test para diferentes valores de transmisividad, coeficiente de almacenamiento y volúmenes de inyección.

- **Ensayos tipo "Pulse"**

Este tipo de ensayos se utiliza normalmente en formaciones de muy baja permeabilidad. En ellos la sección de ensayo no está en contacto con la atmósfera durante la realización del test. El tiempo necesario para la recuperación completa de presión en la sección de ensayo es muy largo tanto para "Pulse" tests como para "Slug" tests (Bredehoeft and Papadopoulos, 1980). Generalmente es suficiente con una recuperación del 50% de la presión inicial o como máximo un 80% para analizar ambos tipos de test.

Fundamentos del método

Una vez aislada la sección de ensayo se monitoriza la recuperación de presión tras el pulso en función del tiempo en una sección confinada. Así, en este caso, la recuperación del pulso se encuentra dominada por el coeficiente de almacenamiento de la sección confinada, que es varios órdenes de magnitud menor que el coeficiente de almacenamiento en el sondeo en contacto con la atmósfera. Por lo tanto, el tiempo requerido para la realización de "Pulse" tests es mucho menor que el requerido para un "slug" test.

Es de gran importancia la consecución de un equilibrio aproximado de presión en la sección a ensayar antes de la realización del test con objeto de eliminar las variaciones naturales

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

de presión tendentes a la estabilización. Igualmente es recomendable el uso de la **compresibilidad efectiva** (Neuzil, 1982) en los cálculos en vez de la compresibilidad del agua con objeto de tener en cuenta los efectos de compresibilidad del equipo durante la recuperación de presiones.

La solución al problema se describe matemáticamente por:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} &= \frac{S}{T} \frac{dh}{dt} \\
 h(r_s + 0, t) &= H(t) \\
 h(\infty, t) &= 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\frac{2\pi r_s T (dh (r_s + 0, t))}{dt} = V_w c_w \rho g \frac{dH(T)}{dt}$$

También es posible la interpretación de pulse tests en una sección confinada en formaciones de baja permeabilidad con **fracturas horizontales** (Wang et al, 1977). Mediante esta solución es posible la determinación de la conductividad hidráulica y la apertura de una sola fractura horizontal. Si existen monitorizaciones dilatadas en el tiempo puede investigarse también la geometría de la fractura. Se supone que la conductividad hidráulica y apertura de la fractura son constantes e independientes de la presión. No se considera efecto piel.

10.2.- Protocolos de actuación

10.2.1. Ensayos de inyección

- 1.- Comprobar si el equipo de profundidad funciona correctamente (transmisores, sistema de adquisición de datos, etc)
- 2.- Comprobar el Caliper para determinar si la nueva posición de los "packers" es aceptable. Si el espesor de la pared es superior a 5 mm considerar que la pared no es aceptable.

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

Buscar otra posición

- 3.- Descender el equipo de profundidad. Sujetar con cinta al varillaje los cables de 13 mm de inflado de "packers" y de señales
- 4.- Comprobar la inexistencia de fugas. Una indicación fiable puede ser obtenida realizando dicha comprobación en un intervalo de diez varillas. Si el valor mínimo de flujo a medir es de 1 ml debe establecerse un máximo de 0,2 ml para las fugas (aproximadamente un 20 % del valor mínimo a medir). Para ello se realiza una inyección (se presuriza) con la válvula cerrada y se observa si el flujo es cero
- 5.- Calibrar los "flowmeters" y medir la temperatura con un termómetro. Para la calibración del sensor debe obtenerse el valor de presión atmosférica (mediante un barómetro de precisión) y medir la respuesta del transmisor en el aire
- 6.- Comprobar el correcto funcionamiento de la válvula al introducirla en la sarta (abrir y cerrar dos o tres veces para comprobarlo)
- 7.- Probar las líneas de inflado. rellenar con agua para eliminar las burbujas de aire que puedan permanecer en el interior
- 8.- Realizar una inspección de las juntas tóricas para ver si están dañadas. Cambiar cada tres veces que se hayan introducido en un sondeo
- 9.- Medir el nivel de agua manualmente mediante una sonda
- 10.- Comprobar en este punto de nuevo la inexistencia de fugas. Para ello el flujo medido por los caudalímetros debe ser cero, es decir, no existen fugas en la válvula, juntas del varillaje u otras partes del sistema de inyección de agua)
- 11.- Inflar los "packers". La presión de inflado debe obtenerse mediante la suma de los valores de columna de agua y los obtenidos en la celda de presión para inflado a presión atmosférica. A menor límite inferior de medida es necesario un mayor tiempo de inflado
- 12.- Dejar estabilizarse el "packer" al menos quince minutos. Realizar medidas espaciadas unos diez segundos de dicha presión. Observar los valores en el ordenador por si sucede algo inusual. Con estos datos puede obtenerse una primera estimación de la permeabilidad
- 13.- En caso de utilizar trazadores, conocida la concentración y el tipo de trazador, introducir la cantidad adecuada en el tanque de agua y recircular para una buena mezcla

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

- 14.- Rellenar la sarta con agua y conectarla al sistema de inyección situado en superficie hasta la cabeza de inyección. Aplicar la presión de inyección en la sarta hasta la válvula de solenoide (máximo diez bares). Si se han realizado con anterioridad ensayos de algún tipo ("steady state injection") se dispone de una estimación aceptable del valor de T y de la presión requerida para la realización del ensayo
- 15.- Elaborar un protocolo indicando las piezas introducidas, tipo de sensores (número de serie, etc)
- 16.- Purgar el circuito (2-3 minutos). Recircular el agua (1-2- minutos)
- 17.- Tomar medidas (presión y caudal) cada segundo. Si es posible realizar las medidas a partir de cierto tiempo cada minuto por ejemplo
- 18.- Controlar el flujo por medio del ordenador
- 19.- Comprobar el flujo para asegurar que el caudalímetro del rango apropiado se encuentra seleccionado en el panel de flujo
- 20.- Realizar la inyección abriendo la válvula de solenoide. Mantener la inyección dos horas.
- 21.- Cerrar la válvula de solenoide
- 22.- Realizar la recuperación durante otras dos horas más o menos o hasta obtener una recuperación del 80 %
- 23.- Dejar abierta la válvula de las vasijas de presión en caso de que se esperen fluctuaciones de temperatura
- 24.- Desinflar los "packers" según el tiempo obtenido en la celda de presión (con el muelle)
- 25.- Determinar una nueva posición para los "packers". No es necesario asegurar un solape mínimo entre secciones. Anotar la profundidad de la sección de ensayo en un cuaderno o en una hoja de campo
- 26.- Una vez terminado el ensayo almacenar los datos en el disco duro y en un disquete
- 27.- Analizar los datos usando "workbench" con objeto de comprobar que la realización del test ha sido correcta

10.2.2. Ensayos tipo "pulse"/"slug"

- 1.- Comprobar si el equipo de profundidad funciona correctamente (transmisores, sistema de adquisición de datos, etc)

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

- 2.- Comprobar el Caliper para determinar si la nueva posición de los "packers" es aceptable. Si el espesor de la pared es superior a 5 mm considerar que la pared no es aceptable. Buscar otra posición
- 3.- Descender el equipo de profundidad. Sujetar con cinta al varillaje los cables de 13 mm de inflado de "packers" y de señales
- 4.- Comprobar la inexistencia de fugas. Una indicación fiable puede ser obtenida realizando dicha comprobación en un intervalo de diez varillas. Si el valor mínimo de flujo a medir es de 1 ml debe establecerse un máximo de 0,2 ml para las fugas (aproximadamente un 20 % del valor mínimo a medir). Para ello se realiza una inyección (se presuriza) con la válvula cerrada y se observa si el flujo es cero
- 5.- Calibrar los "flowmeters" y medir la temperatura con un termómetro. Para la calibración del sensor debe obtenerse el valor de presión atmosférica (mediante un barómetro de precisión) y medir la respuesta del transmisor en el aire
- 6.- Comprobar el correcto funcionamiento de la válvula al introducirla en la sarta (abrir y cerrar dos o tres veces para comprobarlo)
- 7.- Probar las líneas de inflado, rellenar con agua para eliminar las burbujas de aire que puedan permanecer en el interior
- 8.- Realizar una inspección de las juntas tóricas para ver si están dañadas. Cambiar cada tres veces que se hayan introducido en un sondeo
- 9.- Medir el nivel de agua manualmente mediante una sonda
- 10.- Comprobar en este punto de nuevo la inexistencia de fugas. Para ello el flujo medido por los caudalímetros debe ser cero, es decir, no existen fugas en la válvula de solenoide, juntas del varillaje u otras partes del sistema de inyección de agua)
- 11.- Inflar los "packers". La presión de inflado debe obtenerse mediante la suma de los valores de columna de agua y los obtenidos en la celda de presión para inflado a presión atmosférica. A menor límite inferior de medida es necesario un mayor tiempo de inflado
- 12.- Dejar estabilizarse el "packer" al menos quince minutos. Realizar medidas espaciadas unos diez segundos de dicha presión. Observar los valores en el ordenador por si sucede algo inusual. Con estos datos puede obtenerse una primera estimación de la permeabilidad

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

- 13.- Elaborar un protocolo indicando las piezas introducidas, tipo de sensores (número de serie, etc)
- 14.- Realizar el pulso abriendo la válvula de solenoide. Mantener la válvula abierta al menos dos segundos
- 15.- Medir el caudal inyectado rellenando la sarta con un volumen conocido o midiendo con el hidronivel
- 16.- Cerrar la válvula de solenoide
- 17.- Realizar la recuperación hasta un 80 % aproximadamente y comparar con los datos del 50 % de recuperación
- 18.- Si la recuperación es muy rápida rellenar la sarta y ejecutar un "slug" test. Una duración media de un ensayo en estas condiciones puede ser de hora y media
- 19.- Realizar el registro de evolución de presiones en escala logarítmica si es posible
- 20.- Desinflar los "packers" según el tiempo obtenido en la celda de presión (con el muelle)
- 21.- Determinar una nueva posición para los "packers". No es necesario asegurar un solape mínimo entre secciones. Anotar la profundidad de la sección de ensayo en un cuaderno o en una hoja de campo
- 22.- Una vez terminado el ensayo almacenar los datos en el disco duro y en un disquete
- 23.- Analizar los datos usando "workbench" con objeto de comprobar que la realización del test ha sido correcta

10.3.- Pérdidas de carga del sistema

Partiendo de los valores para las pérdidas de carga dadas por el fabricante para cada uno de los elementos se ha realizado el cálculo de las pérdidas de carga totales.

- Pérdidas de carga en el varillaje

Cálculo teórico

Se ha realizado mediante la ecuación empírica de Hazen-Williams, que relaciona las pérdidas de energía por unidad de longitud con la velocidad del fluido.

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

$$V = 0,85 \cdot C \cdot e^{0,63} \cdot I^{0,54}, \text{ donde} \quad (14)$$

- V = Velocidad del agua a través del varillaje
- C = Constante de fricción, función del tipo de material. Para el aluminio tiene un valor de 150
- e = Espesor hidráulico medio, función del diámetro interior ($e = d/4 = 38 \text{ mm}/4 = 9,5 \text{ mm} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$)
- I = Pérdidas de energía por longitud unitaria de varillaje

Operando se obtiene la siguiente expresión :

$$I = \left(\frac{V}{0,85 \cdot C \cdot e^{0,63}} \right)^{\left(\frac{1}{0,54} \right)} = \frac{V^{1,85}}{(0,85 \cdot 150 \cdot 0,0095)^{1,85}} \quad (15)$$

Dado que el diámetro interior del varillaje diseñado por el ITGE es de 38 mm, para un caudal de inyección de 50 l/min las pérdidas de carga tienen un valor de 0,26 m por cada tramo de 100 m de longitud .

- **Pérdidas de carga en la válvula coaxial de solenoide**

Son de 3.5 bares para un caudal de 50 l/min.

- **Pérdidas de carga en el "packer" superior**

Teniendo en cuenta la reducción de diámetro, que varía desde los 40 mm de diámetro interior para el varillaje diseñado por el ITGE hasta los 23 mm de diámetro interior que tienen los

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

"packers" de Petrometallic que se utilizarán en los ensayos, se obtiene una pérdida de carga de 1 metro.

- **Pérdidas de carga en el sistema de inyección de agua en superficie**

Se refieren a las pérdidas de carga originadas en los caudalímetros de masa y en las válvulas que debe atravesar el agua en su recorrido hasta la cabeza de inyección. Como primer valor estimativo se considera una diferencia de presión entre la salida del tanque y el punto de entrada en el varillaje de 15 metros.

- **Pérdidas de carga totales**

| PERDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA | |
|--|-------------------------------------|
| PERDIDAS PARCIALES | 10 m |
| SISTEMA INYECCION | 10 m |
| VARILLAJE | 25 m |
| VALVULA | 35 m |
| "PACKER" SUPERIOR | 1 m |
| | TOTAL = 80 m columna de agua |

10.4.- Rango de medidas

Con objeto de conocer el rango de valores de permeabilidad entre los que puede operar un equipo determinado es necesario conocer tanto el límite inferior como el límite superior de medida. Para los ensayos citados en el apartado anterior dichos límites de medida dependen del equipo utilizado. En el caso de ensayos tipo "slug" test o "Pulse" test los límites de medida dependen directamente de la duración del test. El límite superior en este caso es función de la

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

duración mínima del test para conseguir una precisión de medida aceptable, mientras que el límite inferior se encuentra determinado por la duración máxima de test disponible.

Con objeto de obtener los límites de medida para el resto de los tests descritos a continuación deben calcularse las pérdidas de carga del sistema para cada uno de los elementos del sistema de inyección o extracción.

Límite Superior

Para el cálculo del límite superior se parte de las pérdidas de carga en el sistema de inyección y se realiza la estimación del máximo caudal de inyección, que en este caso es de 37 l/min, cantidad que se obtiene de la capacidad superior de los medidores de caudal máxico situados en el sistema de inyección.

$$K = \frac{Q}{HL} \Rightarrow T = \frac{Q}{H} \quad (16)$$

De ello se deduce que para un caudal de inyección de 37 l/min y una presión de inyección de 2 bares el valor que se obtiene es el siguiente :

$$T = \frac{37 \cdot 10^{-3} m^3/s}{20m \cdot 60} = 3,08 \cdot 10^{-5} m^2/s \quad (17)$$

Límite Inferior

Con objeto de calcular el límite inferior de medida de la instrumentación se procede de la siguiente manera.

| | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|

Cálculo de la variación de volumen de los "packers" con el tiempo

Con este ensayo se obtiene la variación de volumen que desplazan los "packers" seleccionados con el tiempo, es decir, se obtiene una indicación de cuando dejan de producirse los efectos de creeping o asentamiento de los "packers" en la sección de ensayo. El criterio para determinar dicho tiempo de sellado se basa en la capacidad de medición de flujo de los caudalímetros. Cuando el flujo desplazado en la sección de ensayo está por debajo de la capacidad de medida del caudalímetro de rango más bajo (D6), se da por finalizado el ensayo, ya que no se pueden apreciar variaciones posteriores de caudal.

Cálculo del porcentaje de error de la medida de los caudalímetros en función del caudal

Se realiza por medio de los valores proporcionados por el fabricante que permiten obtener la curva que relaciona el porcentaje de error en las medidas en función del caudal que es capaz de medir el instrumento.

Definición del error aceptable en la medida de flujo por los caudalímetros

Con la definición de este valor lo que se obtiene es un valor de flujo mínimo. Por ejemplo, para un valor de un 10 % aceptable como error en la medida se obtiene de la curva el valor correspondiente de flujo mínimo.

Obtención del tiempo de sellado de los "packers"

Una vez obtenido el flujo mínimo que se puede medir en los caudalímetros con el tanto por ciento de error seleccionado se compara con el flujo por unidad de tiempo que se produce en la sección de ensayo debido a los efectos de creeping.

Como valor que puede considerarse aceptable puede citarse un 20% del valor mínimo del flujo que pueden medir los caudalímetros. Con dicho valor lo único que queda por

| | | |
|----------------|------------------|-----------------|
| PROYECTO PUMOC | Referencia PUMIF | Fecha: 30/05/97 |
|----------------|------------------|-----------------|

comprobar es el tiempo de sellado que corresponde, para los "packers" seleccionados, a dicho flujo.

Cálculo del valor de la transmisividad

Se realiza según la siguiente fórmula:

$$T = \frac{Q}{H} = \frac{1ml/min}{20m} = \frac{10^{-6}m^3/min}{20m} = 8,33 \cdot 10^{-10}m^2/s$$

(18)

Como puede observarse el valor mínimo de la transmisividad medible es función de la presión de inyección. Por tanto, basta con aumentar dicha presión para obtener un límite inferior en la medida de transmisividad. No obstante, es necesario tener en cuenta que la presión de inyección puede originar microfracturación, por lo que es necesario mantener ésta en un valor que no sobrepase un límite que puede establecerse en torno a los seis bares.