

# CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PRESIONES EN LAS PRUEBAS DE ABSORCIÓN DE AGUA TIPO LUGEON

Ciro A. Arévalo Ortiz <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Golder Associates Perú S.A. [carevalo@golder.com.pe](mailto:carevalo@golder.com.pe)

## RESUMEN

Las pruebas de absorción de agua tipo Lugeon son frecuentes en los estudios de obras hidráulicas que involucran a macizos de roca. Su aplicación requiere el conocimiento de las presiones que intervienen en la prueba, la resistencia del macizo y su respuesta a las presiones de agua inducidas por la construcción de una obra hidráulica en particular. Estos temas normalmente no son abordados en la ejecución de este tipo de pruebas. En este documento se exponen las consideraciones y recomendaciones concernientes a estos puntos.

## INTRODUCCIÓN

En el Perú, la información disponible para conocer los antecedentes de este tipo de pruebas es muy escasa. La casi totalidad de los registros y otros documentos históricos relacionados a ellas no están en los archivos de las instituciones del estado que tuvieron a su cargo los proyectos hidráulicos de gran envergadura.

De la escasa información que se dispone, se diferencian dos etapas en la práctica de las pruebas tipo Lugeon, con el punto de quiebre a mediados de la década de 1980, años en que las publicaciones de Houlby (1976) y de la ABGE (1975) tuvieron amplia difusión, y condujeron a los procedimientos que actualmente siguen mayoritariamente nuestros ingenieros, cuya particularidad es que las presiones de prueba se establecen tomando en consideración la carga litostática que actúa sobre el bulbo de prueba (Arévalo, 1992). Antes de que se adoptara este criterio, las presiones eran definidas en valores fijos, como 2, 5 y 10 Kg/cm<sup>2</sup>, independientemente de la profundidad en que se ejecutara la prueba.

Los procedimientos vigentes tienen como premisa que la presión máxima del ensayo no debe sobrepasar la presión litostática sobre el tramo de prueba a manera de evitar su fracturamiento (hidrofracturamiento). Sin embargo, la resistencia del medio ensayado no sólo depende de la carga de roca, sino también de la resistencia a la tracción inherente del macizo. De otro lado, la determinación de las presiones de ensayo en ningún caso toma en cuenta las presiones solicitadas por el proyecto, hecho que conduce a que los parámetros obtenidos de las pruebas no guarden relación con la respuesta que tendrá el medio cuando las obras entren en operación.

Palabras claves: prueba tipo Lugeon, presión efectiva, presión manométrica, pérdida de carga, presión hidrostática, carga litostática, hidrofracturamiento, macizo de roca.

## LAS PRUEBAS DE ABSORCIÓN DE AGUA TIPO LUGEON

Las pruebas tipo Lugeon se ejecutan inyectando agua a un tramo corto del taladro de perforación, confinándolo con obturadores simples o dobles. En el desarrollo de la prueba se registra el caudal que ingresa a las discontinuidades de la roca en el tramo obturado a una presión predeterminada y constante. A este efecto, el agua es impulsada con una bomba desde una fuente y conducida al tramo de ensayo mediante una tubería con su frente de descarga en el interior del bulbo de ensayo. Durante la prueba se procura mantener estables el gasto de agua y la presión. El caudal se determina mediante lecturas en un hidrómetro a intervalos de tiempo regulares, usualmente 10 lecturas, verificándose a la vez que la presión preconcebida se mantiene estable mediante lecturas continuas en un manómetro instalado en el sistema de conducción. Es usual aplicar tres niveles de presión para una misma prueba, en cinco etapas, en ciclos ascendente y descendente.

La unidad Lugeon se define como el gasto de 1 litro de agua en un metro del tramo de ensayo a una presión efectiva de 10 Kg/cm<sup>2</sup>, y su equivalencia en términos de permeabilidad es  $1.3 \times 10^{-5}$  cm/s.

Las absorciones registradas en cada uno de los cinco niveles de presión que intervienen en una prueba son representadas en gráficas de barras o en un sistema cartesiano. Mediante estas gráficas se interpreta la respuesta de las discontinuidades al flujo del agua y el comportamiento de los rellenos de éstas durante el ensayo (Arévalo, C., 1992).

### **LAS PRESIONES EN LA PRUEBA Y LA PRESIÓN EFECTIVA**

Los caudales y la longitud del tramo de ensayo no entrañan mayores incertidumbres en la prueba. La primera resulta de las lecturas del hidrómetro a intervalos de tiempo regulares mientras que la segunda es la longitud entre la base del obturador y el fondo del taladro, o de la longitud que media entre los obturadores en un packer doble. Con la presión no sucede lo mismo. Establecer la presión del agua que actúa en el bulbo de ensayo mientras es inyectada requiere el conocimiento de las diferentes presiones que actúan en el sistema.

La presión que actúa en el bulbo de ensayo se conoce como **Presión Efectiva ( $P_E$ )** y se define como la suma algebraica de las **Presión Manométrica ( $P_M$ )**, la **Presión Hidrostática ( $A_H$ )** y las **Pérdidas de Carga ( $A_P$ )** tomando como referencia el punto en que se registra la presión manométrica.

$$P_E = P_M + A_H - A_P$$

La Presión Manométrica ( $P_M$ ) se mide con un manómetro instalado delante del hidrómetro, y registra la presión en el sistema de conducción en ese punto. La Presión Hidrostática ( $A_H$ ) corresponde a la carga de la columna de agua entre el manómetro y el nivel freático, o entre el manómetro y la mitad del tramo ensayo en ausencia de agua subterránea.

La Pérdida de Carga ( $A_P$ ) se origina en la disminución de la velocidad del agua por las rugosidades en la pared interna de la línea de conducción (pérdida de carga distribuida), y en la contracción del flujo en los cambios de dirección y en las reducciones de diámetro en la línea de conducción. No obstante que la pérdida de carga incide significativamente en la Presión Efectiva cuando el gasto de agua en la prueba es grande, en gran parte de los proyectos es ignorado, y en pocos otros son estimados a partir de ábacos o de ecuaciones, que no resuelven convenientemente el problema. La Pérdida de Carga es inherente a cada equipo de prueba en particular, y antes de empezar un programa de investigaciones debiera someterse a pruebas in situ que permitan conocerlas. Estas se llevan a cabo en términos de caudales para las pérdidas de carga concentradas y de caudales y longitudes para las pérdidas de carga distribuidas, para un mismo diámetro de la tubería de conducción. Las pérdidas de carga usualmente son significativas para caudales que superan los 60 l/min, y se colige fácilmente que ignorarlas incide en la determinación de la Presión Efectiva de la prueba y en los cálculos subsiguientes.

### **CONSIDERACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PRESIÓN MÁXIMA DE LA PRUEBA EN TERMINOS DE RESISTENCIA**

Es usual en nuestro medio que las presiones de las pruebas tipo Lugeón se fijen tomando como base la simplificación de multiplicar la profundidad del bulbo de ensayo por 0.2 y 0.25, dependiendo que se trate de macizos meteorizados y fracturados o en buen estado de conservación, respectivamente, y resultan de considerar pesos específicos de 2 y 2.5 Tn/m<sup>3</sup>. Esta simplificación permite estimar adecuadamente la **Presión Litostática ( $P_L$ )** sobre el tramo de prueba cuando no se ha alcanzado el nivel freático. Cuando esto último ocurre, la presión litostática dependerá también de la subpresión hidrostática.

Para cualquier condición, la Presión Litostática ( $P_L$ ) en el bulbo de ensayo, es (Figura 1):

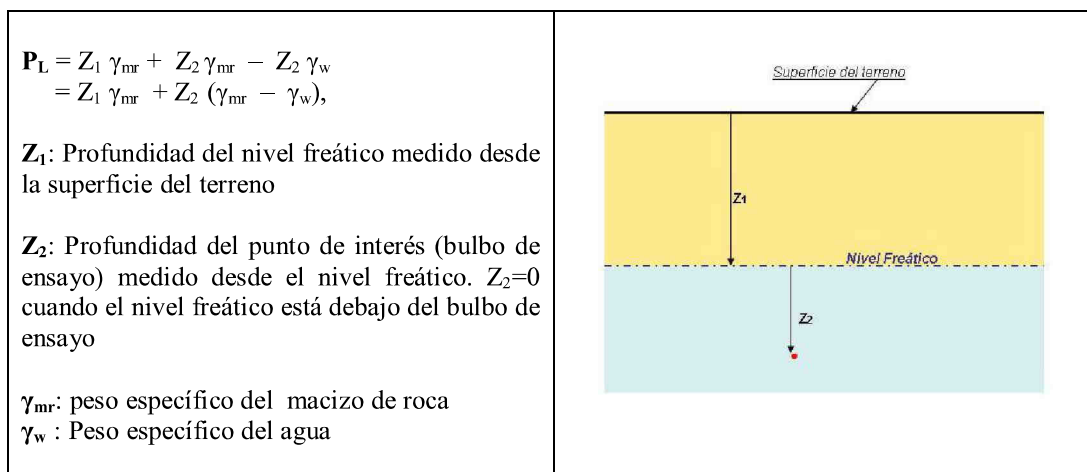


Figura 1. Presiones naturales sobre el bulbo de ensayo

De esta manera, en el tramo sumergido el peso específico se afecta en una unidad, de modo que los factores simplificados para tramos sumergidos resultan ser 0.1 y 0.15, en lugar de 0.2 y 0.25. De otro lado, muchas de estas pruebas se practican en tramos donde el basamento tiene una cobertura de suelo significativa. En este caso, y particularmente cuando el bulbo de ensayo esté cerca al contacto suelo – roca, los factores que se recomiendan son 0.05 por metro de profundidad para el intervalo de suelo bajo el nivel freático y 0.15 para el tramo no sumergido.

Además de la Presión Litostática, la **Resistencia a la Tracción del Macizo (T<sub>rm</sub>)** se contrapone a la presión del agua que actúa en bulbo de ensayo. Esta resistencia se puede estimar sin necesidad de otra información que la que proporcionan los testigos de perforación, siguiendo los criterios de falla de Hoek – Brown expuesto por Hoek, Carranza-Torres y Corckum (2002), y recurriendo al **Índice de Resistencia Geológico -GSI** (Hoek, 2007), que relaciona los aspectos estructurales que afectan a la masa rocosa respecto a la roca intacta, cuya determinación depende sobretodo de una buena caracterización geotécnica de los testigos de perforación. Con una buena caracterización del tramo de ensayo, y utilizando programas de cómputo de libre disponibilidad en Internet, como es el RocLab (Rocscience, 2002), fácilmente se determina el valor de este parámetro.

En la práctica, es suficiente estimar la resistencia a la tracción del tipo o los tipos litológicos interceptados por las perforaciones en tres rangos de calidad de macizo, bueno, regular y malo, por ejemplo con GSI de 80, 50 y 20, y que las resistencias a la tracción respectivas estén disponibles para que el ingeniero pueda definir la Presión Efectiva máxima mientras se ejecuta la perforación. Usualmente, un proyecto comprende a un reducido número de tipos litológicos, y muchos de ellos comprenden a un solo tipo de calidad de roca, de modo que los datos requeridos son reducidos.

Entonces, una vez definidas convenientemente la Presión Litostática (**P<sub>L</sub>**) y la Resistencia a la Tracción del Macizo (**T<sub>rm</sub>**) en el tramo de ensayo, la **Presión Efectiva Máxima en Términos de Resistencia (PER<sub>max</sub>)** no debiera exceder a la suma de ellas, para prevenir el fracturamiento del macizo en torno al tramo de ensayo (hidrofracturamiento).

El hecho de que las pruebas se vengán realizando tomando en cuenta únicamente la carga litostática como fundamento para establecer las presiones de prueba conlleva a que éstas se hagan con presiones más bajas que las que realmente soporta el macizo. De igual forma, las inyecciones de cemento y de otros productos practicados con presiones de rechazo que toman únicamente este criterio restringen la posibilidad de lograr mayores niveles de penetrabilidad de los materiales que se logran con presiones mayores a las que usualmente se vienen utilizando, sin disturbar la masa de roca, redundando de esta manera en una mayor eficiencia y economía en el tratamiento geotécnico del medio.

## LA PRESIÓN MÁXIMA DE PRUEBA EN TERMINOS DE RESISTENCIA Y LA PRESIÓN DE TRABAJO SOLICITADA POR LAS OBRAS HIDRÁULICAS

Los proyectos hidráulicos, como las presa por ejemplo, modifican las condiciones hidrostáticas en el terreno de fundación. En este caso, el almacenamiento de agua incrementa la carga hidráulica sobre el

macizo, y se requiere conocer anticipadamente cuál será su comportamiento hidráulico bajo esta condición para determinar las pérdidas por filtración, la progresión de éstas y el tratamiento que requiera, de ser el caso.

Actualmente las pruebas de absorción de agua no toman en consideración el comportamiento del macizo en estas condiciones, puesto que las presiones son definidas únicamente bajo la premisa de no exceder la carga litostática, y, evidentemente, raramente se tiene una prueba en un tramo en particular que reproduzca las presiones hidráulicas solicitadas una vez construida la obra, que permita conocer tempranamente la respuesta del macizo en estas condiciones.

El siguiente gráfico (Figura 2) ilustra los conceptos de Presión Efectiva Máxima en Términos de Resistencia ( $PER_{max}$ ) y las Presión de Trabajo ( $P_{th}$ ) del macizo impuesta por la carga hidráulica debido a la construcción de una presa, de donde se puede concluir que, si  $PER_{max}$  es mayor que  $P_{th}$  hay necesidad de efectuar la prueba en dos tiempos. La primera con la Presión Efectiva Máxima ( $PE_{max}$ ) igual a la Presión de Trabajo ( $P_{th}$ ) y la segunda con la  $PE_{max}$  igual a la Presión Efectiva Máxima en Términos de Resistencia ( $PER_{max}$ ). Para el caso en que  $P_{th}$  supere a  $PER_{max}$ , el primer tiempo de la prueba debe considerar esta última presión para la  $PE_{max}$ , y en el segundo tiempo se debe procurar, en una sola etapa, alcanzar la Presión de Trabajo ( $P_{th}$ ), aún con el riesgo de inducir al fracturamiento del macizo de roca en el tramo de prueba. Un registro consistente de presiones de rotura del macizo será de gran utilidad, sobre todo para preestablecer las presiones máximas de inyección que no disturben la masa de roca, en caso el macizo requiera de tratamiento con este método.

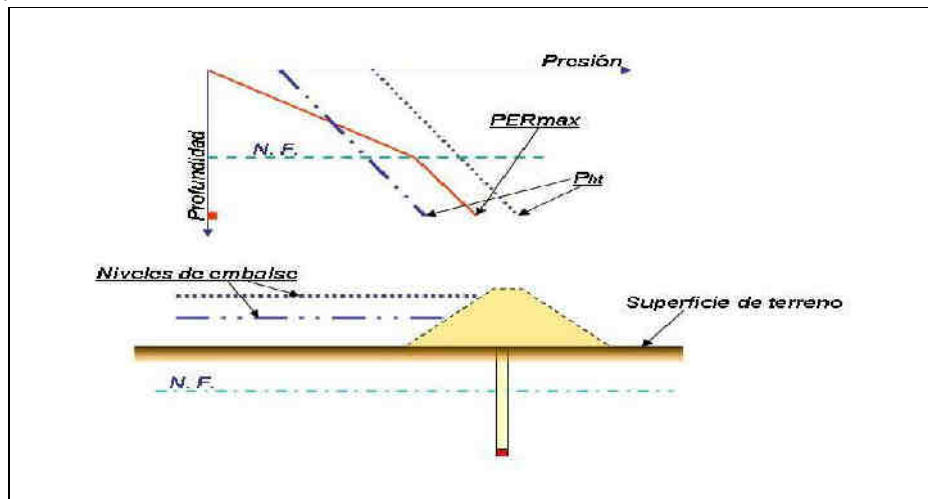


Figura 2. Relación entre presión máxima en términos de resistencia y de trabajo

Cabe indicar que al igual que las diferentes alturas de embalse intervienen en la relación  $PER_{max} - P_{th}$ , que se ilustra en el gráfico anterior, también la profundidad del bulbo de ensayo guarda un vínculo estrecho con en esta relación. Lo aconsejable es establecer las relaciones considerando el nivel máximo del embalse como una constante y la profundidad del bulbo de ensayo como variable. Además, estos criterios pueden ser aplicados bajo las mismas consideraciones a los túneles hidráulicos.

### PRESIONES PROPUESTAS PARA LAS PRUEBAS DE ABSORCIÓN DE AGUA TIPO LUGEON

Las presiones para una prueba tipo Lugeon debieran abarcar como mínimo 5 etapas de presión. La primera, con una presión manométrica mínima, como  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$ , la segunda con la mitad de la  $PE_{max}$ , la tercera hasta lograr la  $PE_{max}$ , la cuarta, mitad de la  $PE_{max}$  y la última con  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$ .

La  $PE_{max}$  debe definirse de acuerdo de acuerdo a los criterios señalados en el acápite anterior, y la prueba debiera considerar dos ciclos, dependiendo de la relación que hay entre  $PER_{max}$  y  $P_{th}$ .

Cuando  $PER_{max}$  es mayor que  $P_{th}$ , el primer ciclo de la prueba debe efectuarse con la  $PE_{max}$  igual a  $P_{th}$ , con las cinco etapas antes indicadas, y enseguida el segundo ciclo con la  $PE_{max}$  igual a la  $PER_{max}$ ,

también con cinco etapas de presión. En el caso contrario, cuando  $PER_{max}$  es menor que  $P_{th}$ , en el primer ciclo debe ejecutarse las cinco etapas de presión con la  $PE_{max}$  igual a la  $PER_{max}$ , y en el segundo ciclo con dos tres etapas de presión: Las del inicio y fin con  $0.1 \text{ Kg/cm}^2$ , y la intermedia hasta llegar a  $P_{th}$  o hasta que se registre el hidrofracturamiento.

El mayor número de las etapas en una prueba implicaría incrementar el tiempo y el costo de cada una de ellas. Estas limitaciones pueden salvarse reduciendo el número de lecturas del gasto de agua en cada etapa de presión a cinco lecturas cada minuto en lugar de las 10 que actualmente se toman. La experiencia de numerosas pruebas demuestra que este recorte en el tiempo en las lecturas no tiene implicancia en los resultados mientras que se mantenga una desviación menor que el 10 % de las cinco lecturas respecto al promedio de ellas. En el siguiente gráfico se muestra las curvas típicas para los dos ciclos de prueba sugeridos (Figura 3).

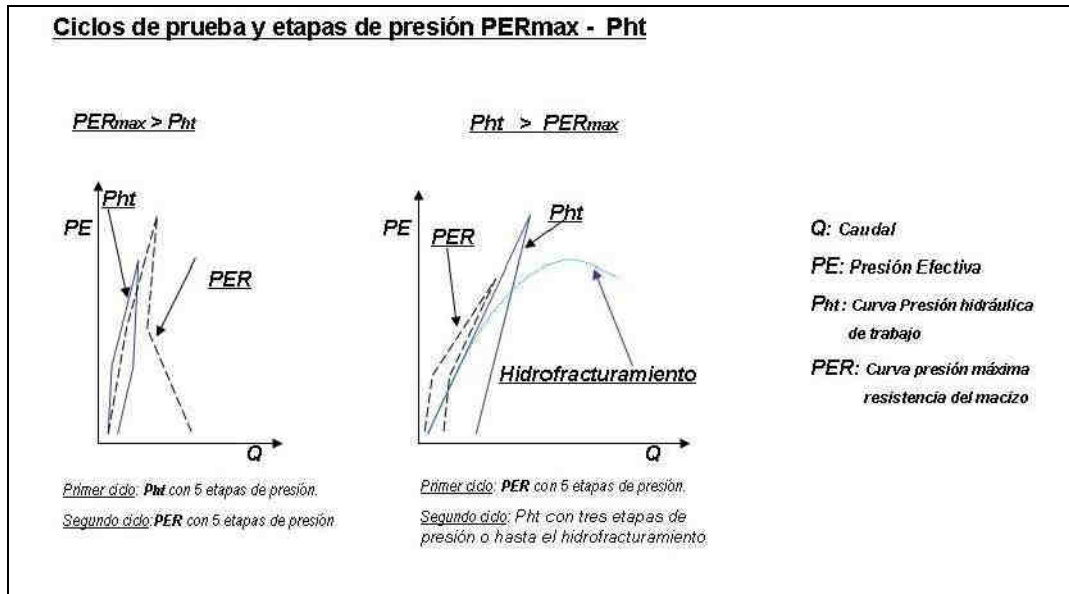


Figura 3. Curvas Q-PE para diferentes relaciones de  $PER_{max} - P_{th}$

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las pérdidas de carga en el sistema de conducción de las pruebas tipo Lugeon usualmente son ignoradas por los ingenieros, y raramente son resueltas con ábacos o ecuaciones para su estimación. A este respecto, lo recomendable son los ensayos de pérdida de carga in situ del sistema de conducción que será utilizado en las pruebas.
- No tomar en cuenta la contribución de la resistencia inherente del macizo en la determinación de la presión máxima de la prueba, da lugar a que las presiones de prueba que se vienen aplicando actualmente sean menores a las que soportaría el tramo de ensayo sin que la masa de roca llegue a fracturarse (hidrofracturamiento). La presión máxima de la prueba en términos de resistencia debe considerar la carga litostática efectiva sobre el bulbo de ensayo y la resistencia a la tracción de la masa rocosa en ese intervalo.
- Las pruebas tipo Lugeon no toman en consideración la presión hidrostática debido a las obras, y en ocasiones, bajo los procedimientos actuales, los ensayos se ejecutan con presiones muy elevadas, con las consecuencias que conllevan en la evaluación hidrogeotécnica del proyecto. En ese sentido, los ensayos de prueba tipo Lugeon debieran considerar este concepto.
- Para incorporar los criterios de resistencia del macizo y la presión hidráulica de trabajo, se requiere dos ciclos de prueba, y cada ciclo debe ser analizado independientemente, bajo los criterios que actualmente se bien utilizando. La permeabilidad equivalente de la prueba debe obtenerse del primer ciclo de prueba, puesto que corresponde al estado original del medio ensayado.

- La presión que produce el hidrofracturamiento es un dato de suma importancia, y como tal no debe ser tomado como un error en el procedimiento de prueba. Contar con un registro de las presiones de hidrofracturamiento para diferentes profundidades es de suma utilidad para las inyecciones de lechada de cemento y de otros productos en el mejoramiento de la calidad geotécnica del terreno.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Houlsby A.C., 1976. Routine Interpretation of the Lugeon Water Test. Engng. Geol. Vol. 9 – p. 303 -313.
- Dos Santos, A., Fernandes, R., Ferreira, J., 1975. Ensaio de Perda D'água Sob Pressao – Directrices. Associazo Brasileira de Geologia de Engenharia, Bol. 02.
- Arévalo, C., 1992, La Perforación Diamantina en la Exploración Geotécnica de Macizos de Rocosos. Seminario Taller de Mecánica de Suelos y Exploración Geotécnica – CISMID-UNI. P.27-37.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto. P. 267-273.
- Rocscience, 2002. RocLab User's Manual. Rocscience Inc. P. 7 – 14.
- Hoek, E. 2007. Practical Rock Engineering. Rocscience Inc. Cap. 11, p.11 – 17.