

### **3. EXPLORACIÓN DE LA CIMENTACIÓN.**

Para verificar la estratigrafía y permeabilidad del depósito de aluvión en el cauce y bajo la cortina de la presa, se efectuaron en una primera etapa dos sondeos exploratorios con pruebas de permeabilidad y una prueba de geosísmica del tipo Down-Hole que se describe más adelante. Estos sondeos corresponden a los barrenos para inyecciones de la pantalla impermeable de la Línea A denominados AL-6 y AL-9. El primero se llevó hasta una profundidad de 25 m bajo la rasante de la superficie de la losa de concreto de cimentación de la cortina, que se encuentra a la elevación. 1577.50 msnm, mientras que el sondeo AL-9 se perforó hasta 50 m de profundidad.

En una segunda etapa con la finalidad de detectar con la mayor precisión el contacto entre el depósito de aluvión y la roca consolidada de la Fm. Tlayécac, todos los barrenos de la línea A, y en algunos de la línea B, se efectuaron con recuperación de muestras y núcleos de roca. En la figura. 9 se muestra la localización en planta de los barrenos de la pantalla impermeable.

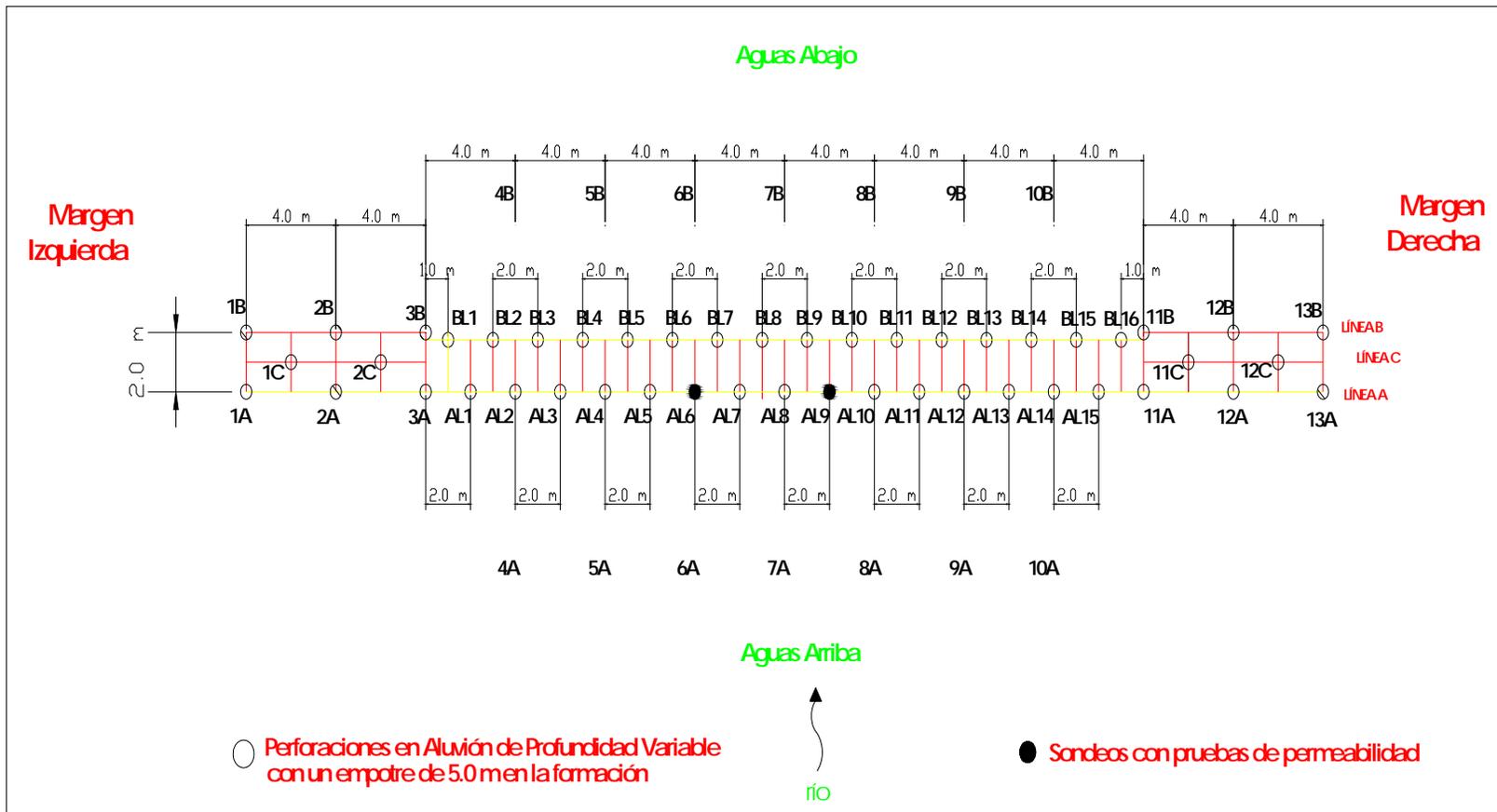


Figura 9. Localización en planta de los barrenos de las líneas A y B de la pantalla impermeable de la P.A. Socavones

Los dos primeros sondeos se perforaron en la línea AL, de aguas arriba, empleando perforación con máquina rotatoria con agua como fluido de perforación y barril doble giratorio NXL de 150 cm de longitud y broca de diamante de diámetro NQ, empleando ademe metálico recuperable de diámetro NW para estabilizar la perforación en la zona del aluvión. En la fig.14 se muestra la posición de los sondeos efectuados, como se anotó antes, todos los barrenos de la línea A y varios de la línea B terminaron convirtiéndose en sondeos exploratorios debido a la necesidad de tener bien localizado el contacto entre el aluvión y la roca de la Fm. Tlayécac para fines de la ejecución de la pantalla de inyecciones.

# Sondeos Exploratorios del Subsuelo

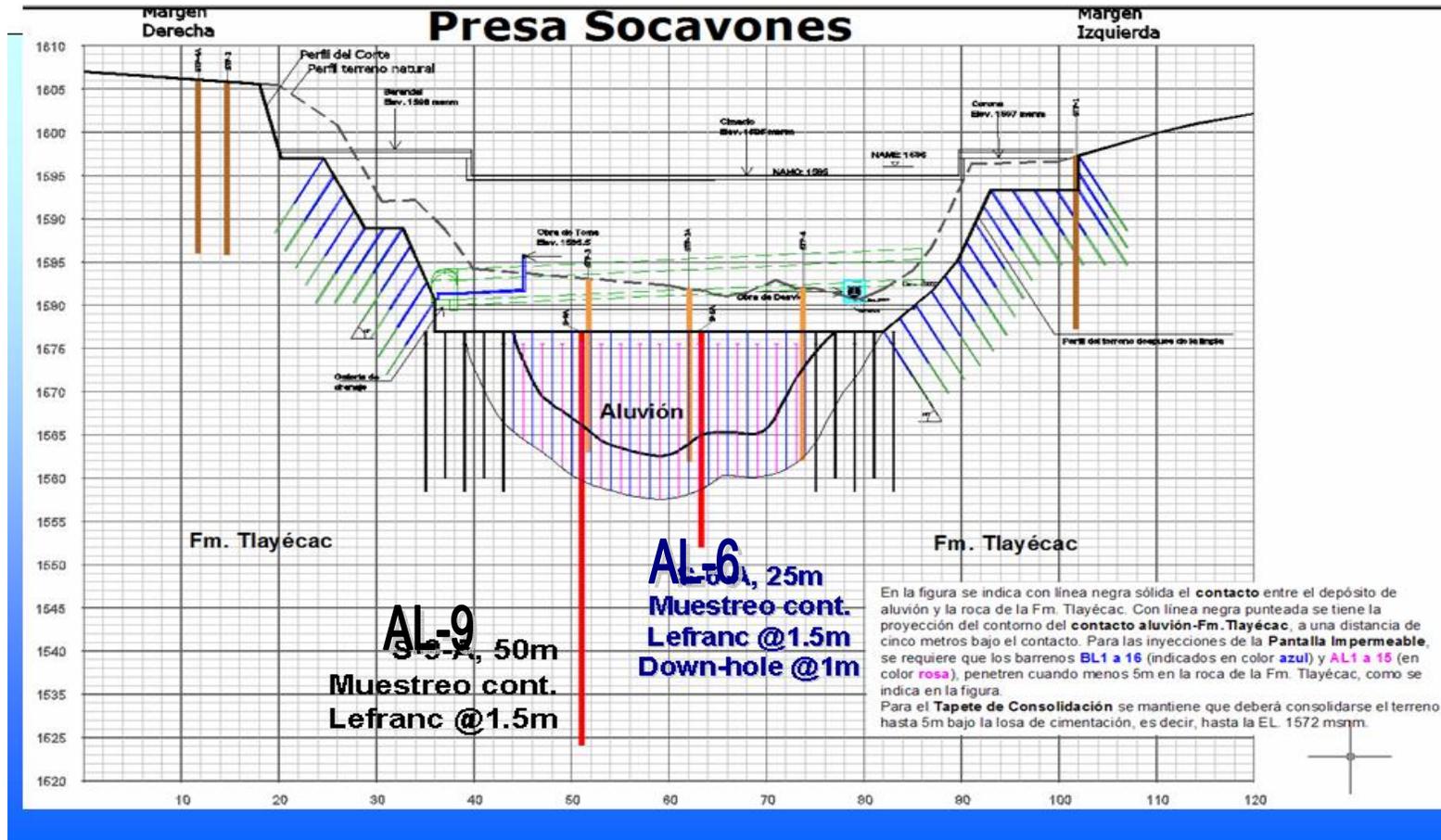


Figura 10. Posición de los sondeos exploratorios de estudios especiales complementarios (AL-6) y (AL-9), así como de los barrenos de inyección de la pantalla impermeable.

Todos los sondeos efectuados con recuperación de núcleos de roca, se perforaron hasta una profundidad tal que se tuviera la certeza de haber penetrado por lo menos de 5 a 10 m en la roca bajo el aluvión, o bien, hasta la profundidad máxima de exploración de 50 m que correspondió al sondeo AL-9, que aunque el contacto con la Fm. Tlayécac apareció a una profundidad de 11.5 m de profundidad, en forma de una brecha soldada en una matriz vítrea, el sondeo se profundizó para asegurar la continuidad de la Fm. Tlayécac, explorando hasta más de 2.5 veces la altura total de la cortina. En estos sondeos se realizaron pruebas de permeabilidad de tipo Lefranc de tipo Carga Constante<sup>10</sup>, conforme avanzaba la perforación y en tramos de 1.0 a 1.5 m de longitud en la parte del aluvión, y de 5.0 m. en la Fm. Tlayécac.

En las siguientes páginas se muestran fotografías de algunas de las muestras obtenidas de los sondeos (AL-6) y (AL-9). Los núcleos de boleó o brecha volcánica en muy contadas ocasiones se lograron recuperar con la matriz que constituye el material de empaque de la Fm. Tlayécac. Esto se explica por la acción de desintegración que sobre la roca poco o parcialmente consolidada de la Fm. Tlayécac ejercen tanto el fluido de perforación como la acción mecánica de la herramienta (barril NXL y broca NQ). Sin embargo, en todos los barrenos o sondeos, se detectó la brecha soldada con matriz vítrea, que en general señaló el contacto entre el aluvión y la Fm. Tlayécac.

---

<sup>10</sup> Manual de Mecánica de Suelos de la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos, edición 1970 complementado por el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.



**Fotografía 1. Sondeo (AL-6): el bolígrafo está sobre un núcleo de brecha soldada humedecido. Se aprecia cómo continúan núcleos de la misma brecha soldada, y sobreyacen a un núcleo de la Fm. Tlayécac con mismo material que aflora en las laderas.**



**Fotografía 2. Sondeo AL-9: el bolígrafo está sobre un núcleo de brecha soldada humedecido. Se aprecia cómo continúan núcleos de la misma brecha soldada, y como en el AL-6, continúan núcleos de la Fm. Tlayécac del mismo material que aflora en las laderas.**

### 3.1 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD.

En el caso del Sondeo AL-6, perforado a 25 m de profundidad y localizado al centro del cauce y ligeramente hacia la margen izquierda, se realizaron 12 pruebas de permeabilidad tipo Lefranc en tramos de 1.50 m de longitud hasta una profundidad de 13.50 m y de 5.0 m de longitud a partir de los 13.5 m hasta 25.0 m correspondiente al fondo del sondeo. Con estas pruebas se tuvo muy buena información de la permeabilidad del depósito de aluvión.

La profundidad del contacto aluvión-Formación Tlayécac, en este sondeo se ubicó aproximadamente a 10.5 m, de acuerdo con las observaciones realizadas en las muestras recuperadas. Los valores de permeabilidad obtenidos en el sondeo AL-6 se muestran en el cuadro 1.

<b>Pruebas de Permeabilidad Sondeo AL-6</b>				
<b>Profundidad (m)</b>		<b>Prueba Lefranc</b>	<b>k (cm/s)</b>	
<b>de:</b>	<b>a:</b>			
1.5	3	CV	7.75E-04	aluvión
3	4.5	CV	1.26E-03	aluvión
6	7.5	CC	1.14E-03	aluvión
7.5	9	CC	4.74E-03	aluvión
9	10.5	CC	6.29E-03	aluvión
				contacto
9	10.5	CV	4.78E-03	Fm. Tlayécac
10.5	12	CC	4.79E-03	Fm. Tlayécac
10.5	12	CV	3.04E-03	Fm. Tlayécac
10.5	13.5	CC	1.68E-03	Fm. Tlayécac
13.5	18.5	CC	6.20E-04	Fm. Tlayécac
18.5	23.5	CC	4.49E-04	Fm. Tlayécac
23.5	25	CC	6.06E-04	Fm. Tlayécac

CV: Prueba con Carga Variable

CC: Prueba con Carga Constante

**Cuadro 1. Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad en el Sondeo AL-6, con pruebas Lefranc**

Como se observa en los resultados, el incremento de impermeabilidad se presenta aproximadamente abajo del contacto aluvión - formación. En cuanto a las pruebas de permeabilidad efectuadas en el Sondeo (AL-9), que se perforó hasta 47.90 m de profundidad y se localizó al centro del cauce, ligeramente hacia la margen derecha. Los valores de permeabilidad son similares.

Cabe destacar que se realizó una prueba de permeabilidad “global” en el sondeo, en el tramo de 12.0 a 25.0 m de profundidad donde ya se tenía a la Formación Tlayécac, con la finalidad de medir su permeabilidad promedio. La prueba se efectuó en tres ocasiones distintas, para medir y asegurar la reproducibilidad del valor del coeficiente de permeabilidad, obteniéndose el valor promedio de  $1 \times 10^{-5}$  cm/s considerándose como impermeable.

#### Prueba de Permeabilidad Tipo Lefranc.

La prueba de permeabilidad consiste en inyectar o extraer el agua de una perforación con una carga hidráulica relativamente pequeña, equivalente a la gravedad, determinada por la posición del brocal de la perforación, aunque existe la posibilidad de aprovechar el equipo Lefranc para modificar las condiciones y usar una carga hidráulica más importante, con ayuda de un inyector con obturadores se podría realizar una especie de prueba Lugeon, con presiones relativamente bajas, en función de la posición del tanque de suministro de agua con respecto a la parte media del tramo de prueba.

La prueba Lefranc modificada por Mandel y finalmente conocida también como prueba Lefranc – Mandel es especialmente indicada para medición de permeabilidad o conductividad hidráulica en depósitos de aluvión cuando existe un manto freático que satura el material a fin de contar con la hipótesis de saturación del depósito a ensayar, como es el caso en el sitio de la P. A: Socavones.

La prueba consiste en inyectar agua en una cavidad del terreno, de forma geométrica definida, situada debajo del nivel freático, con una carga pequeña

constante de agua. La medida del gasto de la carga que lo origina permite calcular el coeficiente de permeabilidad  $K$ , en la vecindad de la cavidad con una buena aproximación.

En tanto que la permeabilidad del aluvión sea mayor que, digamos,  $1 \times 10^{-4}$  cm/s ( $1 \times 10^{-6}$  m/s), como es el caso del cauce del Amatzinac, se utiliza la prueba Lefranc de carga constante por inyección de agua.

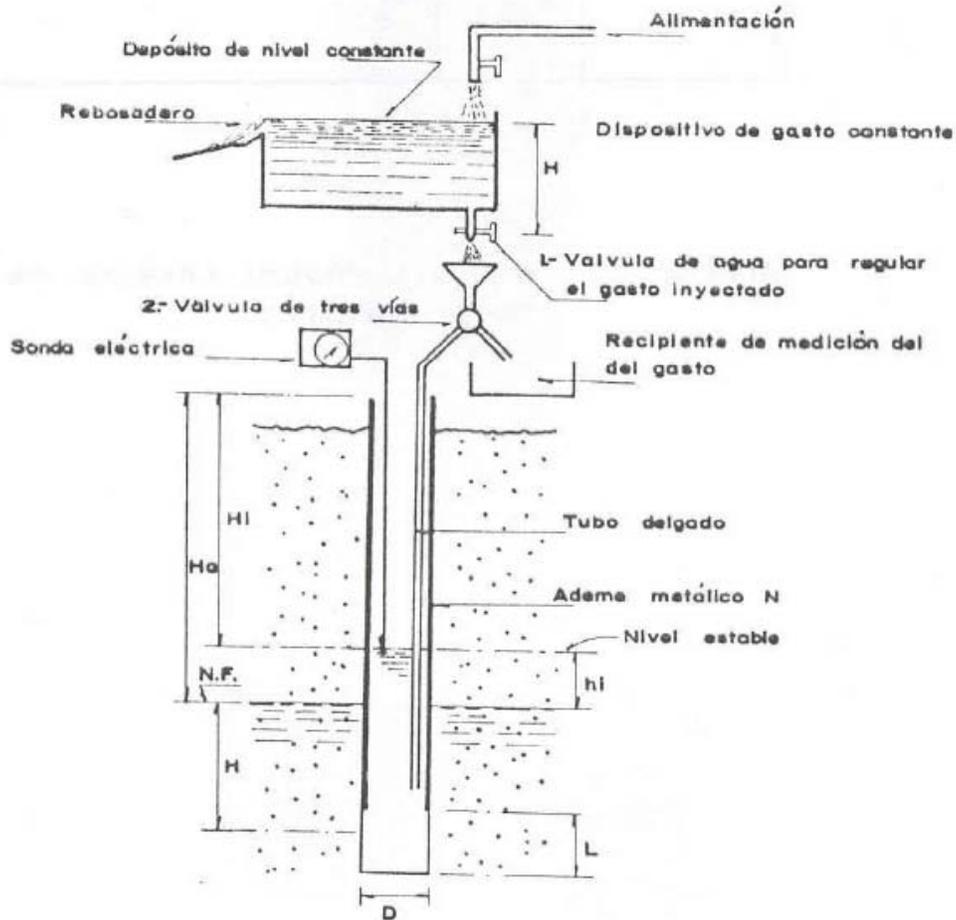
En caso de que la permeabilidad fuese menor que ese valor, como es el caso de la roca tobácea de la formación Tlayécac, la prueba Lefranc de carga variable, por inyección o extracción, sería preferible.

Se realizaron por cada tramo de prueba Lefranc en el sitio del cauce de la P.A. Socavones seis ensayos con seis gastos diferentes, cuatro con gastos ascendentes, y dos más con gasto descendente, de manera que al final de se obtuvo una gráfica de gastos  $q_i$  contra carga hidráulica  $h_i$ , que permitió determinar la permeabilidad del tramo de prueba.

Equipo:

- Tanque para suministro, con alimentación para mantener constante el nivel del agua en el tanque, de manera a establecer un gasto constante de agua. Equipado con tubería y bypass “Y” para medir el gasto mediante un dispositivo de tanque auxiliar con escalas para medición de gasto, y con posibilidad de utilizar probeta graduada para calibración de abertura de válvulas y medición del gasto. El tamaño del recipiente se debió calcular de acuerdo con el gasto que podría llegarse a suministrar durante cada prueba, suponiendo un valor de la permeabilidad y otros parámetros en las fórmulas correspondientes.
- Bomba para abastecer con agua el tanque para suministro, y mantener constante el nivel del agua en éste.
- Tubería de conducción tanque – barreno, con sus válvulas en bifurcaciones “Y”.

- Sonda eléctrica de precisión para medición del nivel del agua en el sondeo.
- Ademe metálico NW, o similar en el sondeo.
- Cono con válvula de tres vías.



#### Procedimiento Lefranc (Lefranc – Mendel ) Carga Constante:

- Se colocó el ademe metálico a una distancia "L" del fondo de la perforación de diámetro "D" o bien, el sistema de inyección con obturadores en el tubo de manguitos para verificación de efectividad y eficiencia de la inyección del aluvión en el subsuelo del cauce de la P.A. Socavones. El tramo de medición "L" será nula

si se desea medir la permeabilidad vertical, o idealmente de 40 cm si se desea la permeabilidad horizontal, aunque podría ser mayor, sin superar los 500 cm para tener permeabilidad “promedio” del aluvión. En el caso del sitio de Socavones, parece conveniente que el tramo sea de  $L= 50$  a 100 cm, en concordancia con la longitud de la longitud del tubo de manguitos para la inyección de construcción de la pantalla impermeable.

- Se establece previo a iniciar la prueba la profundidad del nivel de agua freática NAF, con respecto al brocal del ademe metálico, que servirá como el punto de referencia de todas las mediciones de longitudes o profundidades. A esta magnitud de profundidad del NAF se denominará como  $H_0$ , en metros.
- Se colocó dentro del barreno la tubería que viene desde el tanque de suministro, cuidando que quede bien por debajo del NAF para evitar turbulencia.
- Se realizó la medición del nivel del agua dentro del barreno, utilizando la sonda eléctrica, anotando la  $i$ -ésima lectura de la profundidad del agua dentro del barreno desde el brocal del ademe como  $H_i$ , en metros. Esto se hace de la forma siguiente:

1.- Se hace una primera lectura de la profundidad del agua en el barreno,  $H_i$ , en metros, simultáneamente con el tiempo  $t_i$ .

2.- Se repite cada 10 min. (diez minutos) se realiza una nueva lectura de la profundidad del agua en el barreno,  $H_i$ , en metros, simultáneamente con el tiempo  $t_i$ . Cuando entre dos lecturas espaciadas 10 min. no se observen cambios del nivel del agua  $H_i$ , es decir, que el nivel del agua dentro del barreno se encuentra estabilizado, en ese momento se esperan otros 10 min, para asegurarse de la

estabilización del flujo del agua en el barreno y se procede a medir el gasto correspondiente.

3.- Para medir el gasto  $q_i$  inyectado, estabilizado el nivel  $H_i$  en el barreno, se utiliza el bypass "Y" de la tubería del tanque de suministro, para hacer pasar el agua al recipiente de medición de gasto de volumen "V" conocido, midiendo el tiempo  $t_Q$  que tarda en llenarse dicho recipiente para conocer el gasto como  $q_i = V / t_Q$ .

- Se inició una nueva prueba modificando el gasto  $q_i$  lo cual se logra abriendo o cerrando la válvula de alimentación de la tubería desde el tanque de suministro. La prueba se realiza de la misma manera que como se indicó antes.

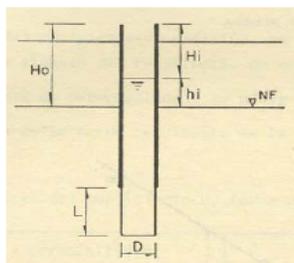
- Se realizaron por cada tramo de prueba Lefranc en el sitio de cauce de la P.A. Socavones seis ensayos con seis gastos diferentes, cuatro con gasto ascendente y dos más con gasto descendente, de manera que al final se obtuvo una gráfica de gastos  $q_i$  contra carga hidráulica  $h_i$ , que permite determinar la permeabilidad del tramo de prueba.

Interpretación:

- Dibujar gastos  $q_i$  en litros por segundo l/s contra carga hidráulica  $h_i$ , en metros m, y se emplean las siguientes fórmulas:

<b>Gasto ensayo "i":</b>	$q_i = V / t_Q$
<b>Carga hidráulica ensayo "i":</b>	$h_i = H_0 - H_i$
<b>Permeabilidad ensayo "i":</b>	$k = \frac{q_i}{(h_i C)} = \frac{m}{C}$

en donde:



- $h_i$  carga hidráulica h para el gasto  $q_i$ , en m.
- $H_0$  posición inicial del NAF, en m.
- $H_i$  posición estabilizada del agua para  $q_i$ , en m.
- $q_i$  gasto de la prueba "i", en  $m^3/s$
- $V$  volumen del recipiente de medición, en  $m^3$
- $t_Q$  tiempo de llenado del recipiente de medición, en segundos (s)
- $C$  coeficiente de forma, en m (cuadro 1)
- $k$  coeficiente de permeabilidad, en m/s
- $m$  pendiente de la recta en una gráfica  $h_i - q_i$

Relación $L / D$	Cavidad / Permeabilidad Local	Coefficiente $C$
0	Disco / Vertical	$C = 2.75 D$ (estrato uniforme) $C = 2.00 D$ (estrato impermeable sobre estrato permeable)
$0 \leq \frac{L}{D} \leq 1$	Esfera / Promedio	$C = 2\pi D \sqrt{\frac{L}{D} + 0.25}$
$1 \leq \frac{L}{D} \leq 4$	Elipsoide / Horizontal	$C = \frac{2\pi L}{\text{Log}_e \left[ \frac{L}{D} + \sqrt{\frac{L^2}{D^2} + 1} \right]}$

Prueba Lefranc de carga variable.

En el caso de la prueba Lefranc de carga variable, se realiza la lectura del nivel  $H_0$  del NAF estabilizado antes de iniciar la prueba. Luego, el barreno se llena de agua hasta el brocal y se realizan lecturas de la variación del nivel del agua  $H_i$  dentro del barreno con el tiempo  $t_i$ . En donde  $h_2$  y  $h_1$  son los niveles entre los tiempos  $t_2$  y  $t_1$ , de manera que se calculan varios pares de valores contiguos, i.e.  $(h_2, t_2)$  con  $(h_3, t_3)$ ; luego  $(h_3, t_3)$  con  $(h_4, t_4)$ ; etc., y al final se calcula la permeabilidad o conductividad hidráulica,  $k$ , como el promedio de los pares de lecturas contiguas. Los cálculos se realizan de la siguiente manera:

Carga hidráulica ensayo "i" de inyección:  $h_i = H_0 - H_i$

Carga hidráulica ensayo "i" de extracción o bombeo:  $h_i = H_i - H_0$

Permeabilidad ensayo "i": 
$$k = \frac{\pi D^2}{4C(t_2 - t_1)} \text{Log}_e \left( \frac{h_1}{h_2} \right)$$