

5. TRATAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN.

El tratamiento de una cimentación mediante inyecciones se refiere a la serie de actividades que se requieren realizar para preparar el área en donde se desplantará la presa. Esas actividades dependen por un lado de las condiciones geológicas del sitio y por el otro, del tipo de cortina que se construirá. El objetivo principal de un tratamiento de cimentación es el de tratar de lograr una superficie de apoyo estable, de baja deformabilidad e impermeable con el objeto de poder garantizar la seguridad y funcionalidad de la obra. Antes de ello es necesario comprobar si el terreno de la zona en estudio es inyectable o no. Para esto se aplican diversos criterios. Frecuentemente se evalúa mediante pruebas de permeabilidad la inyectabilidad de un terreno según la magnitud de los valores de absorción tipo Lefranc; sin embargo hay que tomar en cuenta, que las suspensiones de cemento poseen propiedades reológicas totalmente distintas que las del agua. Esto explica por qué generalmente no existe una correlación entre la cantidad del agua absorbida durante la prueba y las cantidades de cemento inyectadas.

Además, es importante tener un conocimiento de la geometría de los posibles conductos de flujo, ya que mientras las juntas con apertura grande pueden inyectarse bien, las juntas medianas solamente pueden ser inyectadas parcialmente y las muy cerradas nunca se podrán inyectar con un cemento normal, aún cuando las cantidades de inyección resulten elevadas. Otro factor que influye de manera importante en la inyectabilidad es la presión de inyectado.

Existe una relación entre la presión requerida para que pueda penetrar una mezcla de cemento en una junta y su abertura: cuanto menor es la abertura de la junta, tanto mayor debe ser la presión de inyección, para que la suspensión pueda penetrar una distancia suficiente desde la perforación.

5.1 EXCAVACION Y PREPARACIÓN EN LA CIMENTACIÓN DE LA PRESA.

Para el desplante de la cortina inicialmente se llevó a cabo una limpieza general de la superficie del terreno dentro de las trazas exteriores de la presa, removiendo todo el material suelto, alterado y parte del aluvión del cauce. A fin de alcanzar la formación geológica sana se excavó una trinchera en el aluvión hasta la elevación 1577 msnm, en la que el ancho de la plantilla se fijó en razón de la traza del material; los taludes de esta trinchera se excavaron de acuerdo a la estabilidad del terreno. Encima de ésta superficie se colocó la losa de cimentación de concreto con un espesor de 0.5 m, para lograr una superficie uniforme de contacto. A partir de la superficie de esta capa de concreto se efectuaron las perforaciones de barrenación para el inyectado de la pantalla impermeable.



Fotografía 9. Desplante de la cortina.

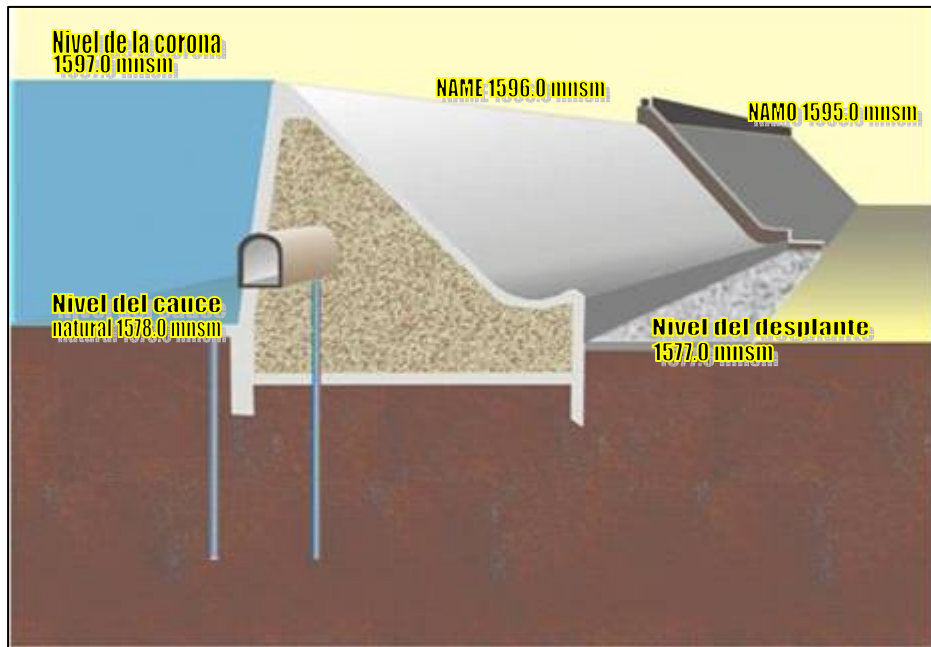


Figura 22. Sección transversal de la presa.

5.2 PANTALLA IMPERMEABLE.

La construcción de una pantalla de inyectado parte de la suposición, de que durante el inyectado se forma un volumen de afectación cilíndrico alrededor de cada perforación. Cuando se colocan las perforaciones en serie a lo largo de una línea a una separación constante de tal forma de que se traslapen sus cilindros de influencia, se espera lograr un cuerpo tabular, que representa la pantalla de inyecciones, donde el terreno tiene una permeabilidad menor que el terreno original.

Para formar la pantalla impermeable en el depósito de aluvión inicialmente el número de líneas de inyección era (3 ejecutadas aguas arriba, desde la losa de desplante y 1 desde la galería de la presa), como solución final se decidió inyectar solo 2 líneas ejecutadas desde la losa de desplante a la elevación 1577.5 msnm, con separación sistemática entre barrenos de 2.0 m horizontalmente y desfasando los barrenos entre líneas para obtener una distribución en tresbolillo. La separación entre las líneas A (aguas arriba) y B (aguas abajo) fué de 1.75 m. El objeto de este arreglo fue el de concentrar la inyección en dos planos de pantalla constituidos por barrenos más cercanos. La distribución de barrenos se representa de manera esquemática en la figura 23.

La profundidad de los barrenos fué la misma que la del contacto aluvión-formación Tlayécac, más 1.0 o 2.0 m penetrando en esta última. Por lo anterior, la profundidad de los barrenos fue variable y no constante. Por la naturaleza del depósito, se tuvo que emplear la técnica de inyección por medio manguitos. Esta técnica permitió además reinyectar algunos tramos de la pantalla. La mezcla de inyección empleada fue del tipo estable y fluida para su fácil manejo y penetración. La inyección de la lechada cemento-agua-aditivos se realizó introduciendo al terreno un volumen de 0.6 m^3 de lechada por metro de barreno, en este caso, al inyectar un tramo, la presión de inyección se fue incrementando gradualmente

hasta alcanzar solo la necesaria para introducir al terreno este volumen de mezcla. El volumen de inyección en el contacto aluvión-formación fue de 1.0 m^3 por metro de barreno. Se inyectaron los barrenos de una misma línea en dos etapas, la primera (Etapa I) con separación a cada 4.0 m y la segunda (Etapa II) a cada 2.0 m . Se inyectaron primero los barrenos de la línea A, localizada aguas arriba.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los barrenos de exploración y durante la inyección de los primeros tramos de la pantalla en el aluvión, se decidió que el volumen antes anotado se podría disminuir o incrementar.

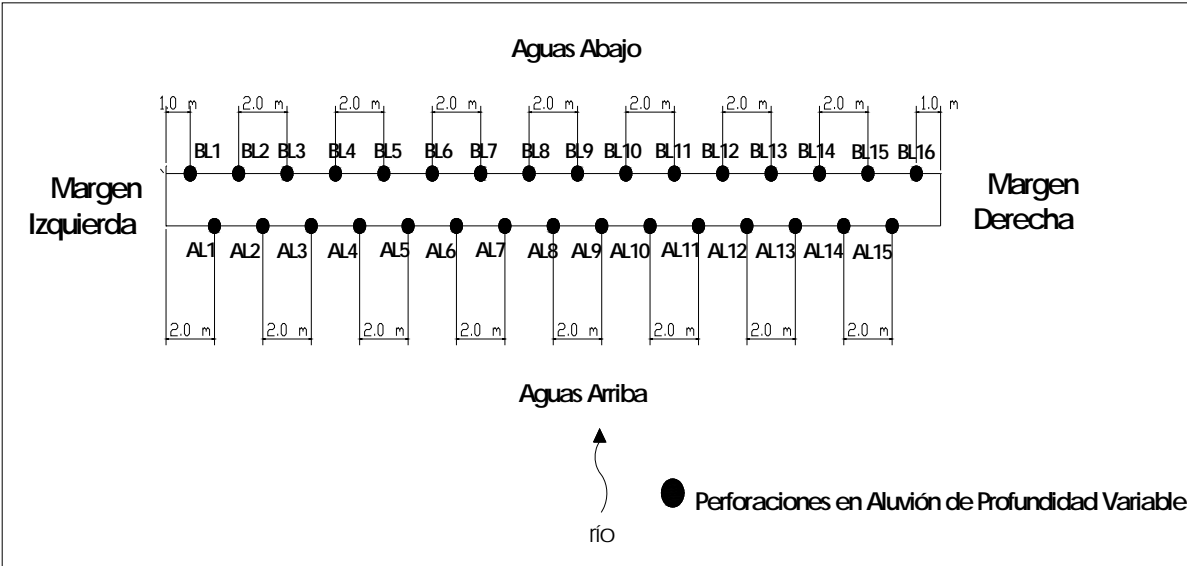


Figura 23. Pantalla Impermeable

5.3 PROCEDIMIENTO DE INYECCION Y TÉCNICA MANGUITOS.

El procedimiento de inyección mediante la utilización del tubo manguito¹² (patentado por la Sociedad SOLÉTANCHE), es el siguiente:

- a) Este tipo de dispositivo es muy versátil para dar tratamiento a suelos inestables por la diversidad en su granulometría.
- b) Consiste en un tubo de pvc de ½ a 2 pulgada de diámetro el cual tiene 4 perforaciones distribuidas a 90° en una misma sección y separadas a cada 50 cm de distancia entre secciones a lo largo del tubo. Cada grupo de agujeros está cubierto por un manguito o banda de hule que actúa como válvula, de tal manera que la mezcla de inyección puede salir del tubo pero no entrar en él.
- c) La perforación del barreno se realiza introduciendo un tubo de ademe provisional hasta la profundidad total dentro del aluvión.
- d) Mientras se retira el ademe provisional de la perforación se rellena el espacio anular que queda entre el terreno y el tubo de manguitos con una “vaina”, utilizando una lechada estable de cemento en proporción 2.5:1 (agua:cemento) adicionada con un 20% de bentonita hidratada en peso del cemento.
- e) Durante la inyección del terreno se rompe la vaina utilizando la propia mezcla de inyección a presión, aislando un tramo del tubo de manguitos por medio de dos obturadores opuestos, en el tramo aislado queda una sección de perforaciones, figura 24.
- f) Se introduce la lechada al terreno por medio de una bomba de inyección que permite aplicar la presión especificada y la necesaria.

¹² Inyección de Suelos de Henri Cambefort. Barcelona 1968.

- g) El tratamiento avanza por medio de progresiones ascendentes a cada 50 cm. el tratamiento de inyección puede repetirse en el mismo tramo varias ocasiones, ya que la tubería de inyección y el sistema de obturadores permite limpiar constantemente la tubería de inyección. Figura 25

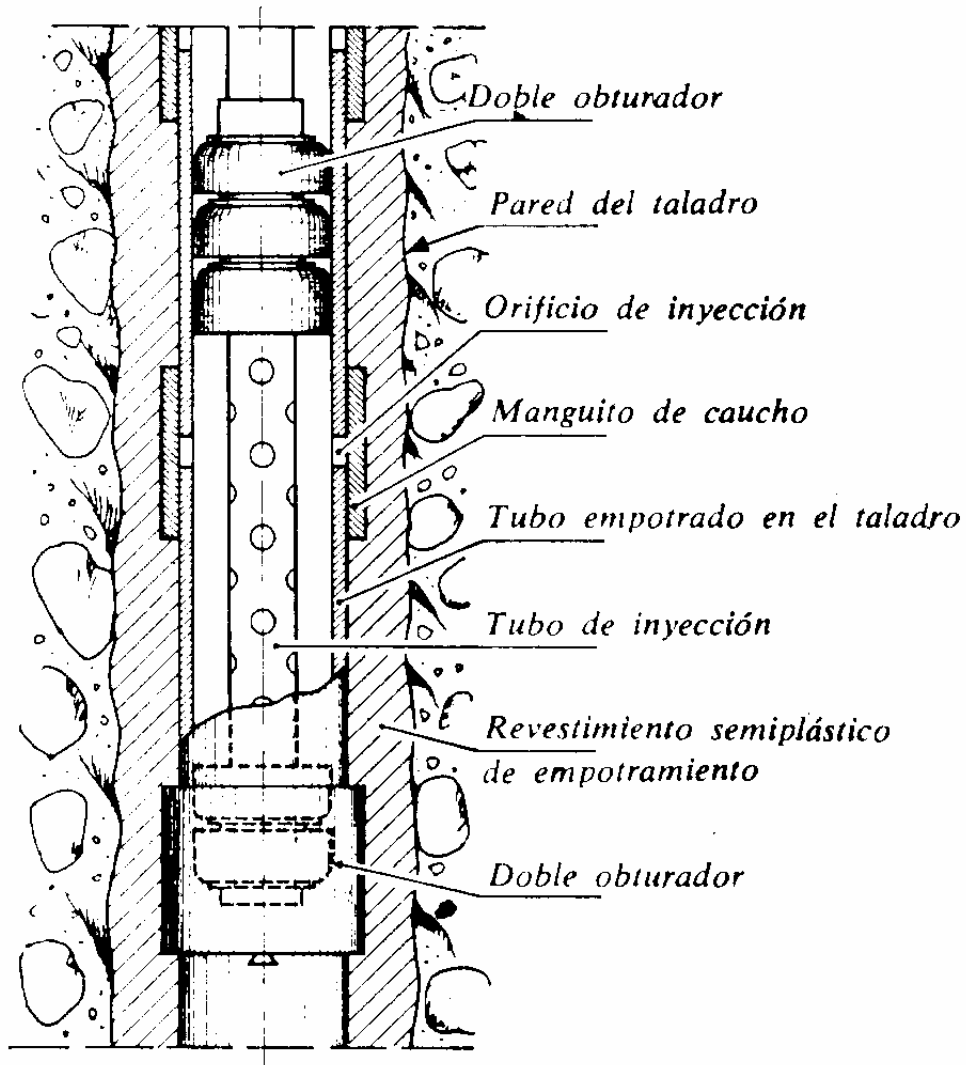


Figura. 24 (según H. Cambefort 1968): Esquema del Doble obturador

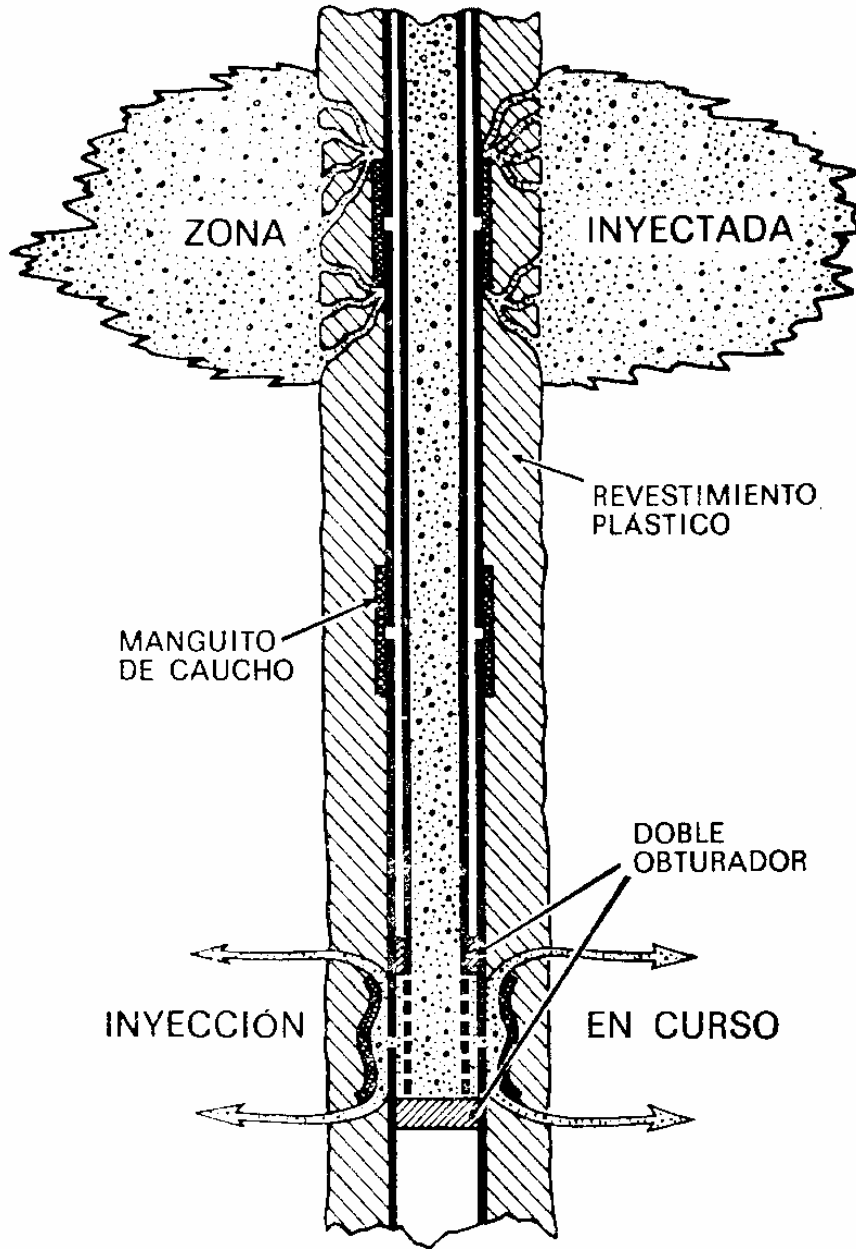
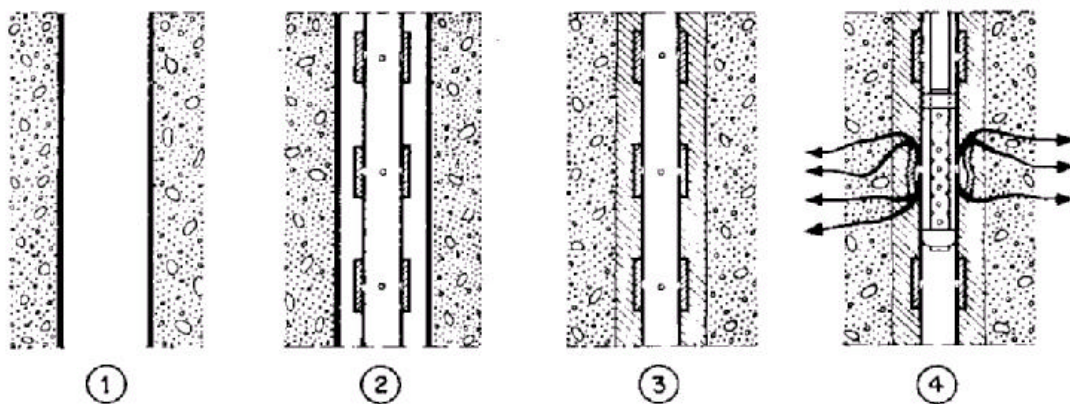


Figura. 25 (según H. Cambefort 1968): Esquema del sistema de inyección con Tubo Manguito

Gracias a este dispositivo, la inyección puede comenzarse por el tramo que se desee. Suele tener interés comenzar por los tramos donde el terreno es más

permeable, una vez obturados éstos, la mezcla que se inyecte en las capas más próximas y de granulometría más fina no podrá aprovechar los niveles permeables para progresar hacia delante. Si durante el reconocimiento previo a la inyección se ha comprobado la existencia de capas de granulometría claramente diferente, con este procedimiento es fácil adaptar la mezcla a la granulometría de la capa. Por ejemplo, se podrá inyectar una lechada de arcilla-cemento en las formaciones más gruesas y gel de sílice en las arenas finas que no pueden inyectarse con arcilla-cemento.

En resumen, este método permite realizar una inyección correcta y relativamente económica en suelos granulares e incluso a gran profundidad, y además permite volver sobre cualquier punto de la pantalla para finalizar una impermeabilización si en la primera fase fue insuficiente o bien no se terminó de inyectar.

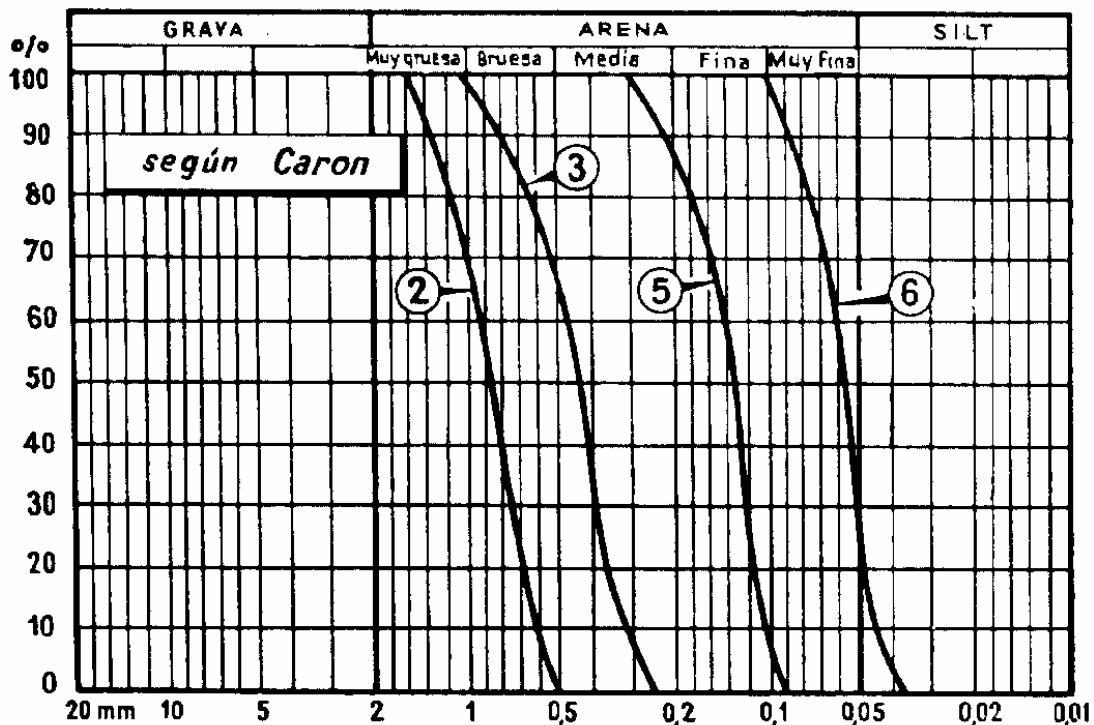


- 1 – Perforación y encamisado
- 2 – Colocación del tubo manguito
- 3 – Colocación de la vaina entre el tubo manguito y la camisa
- 4 – Inyección por tramos entre el doble obturador

**Figura. 26 (según Foundation Engineering, 1991):
Secuencia de ejecución de la inyección utilizando el sistema del Tubo Manguito**

5.4 DISEÑO DE LA MEZCLA.

Es importante precisar la composición de lechada que se puede inyectar en cada tipo de aluvión. Existe una relación entre las dimensiones de los granos del mortero y el medio a inyectar para que sea posible la inyección, al menos por impregnación y rotura. Debe aplicarse un criterio de inyectabilidad que permita relacionar el tamaño de las partículas del material a inyectar con el tamaño de las partículas que conforman la mezcla de inyección. Numerosos investigadores han tratado de determinar esta relación, haciendo penetrar la mezcla en “esqueletos” de granulometría diferente, colocados en tubos rígidos, como si fuera un ensayo de permeabilidad. Se ha elegido como criterio de inyectabilidad la granulometría del medio respecto a la de la mezcla, pero un medio de granulometría determinada puede tener huecos de dimensiones más o menos grandes según el grado de compactación. Por lo tanto este criterio no resulta satisfactorio, y además, el ensayo de inyección no es totalmente representativo porque no toma en cuenta la elasticidad natural del terreno inyectado. Sin embargo, este criterio da una idea de las posibilidades de cada clase de mezcla de inyección. Figura 27.



- 2- arcilla-cemento
- 3- arcilla
- 5- gel de sílice
- 6- emulsión de betún-resina

Figura. 27 (según H. Cambefort, 1968):
Límites de permeabilidad de los morteros basados en la granulometría del terreno.

Para la selección de la mezcla de inyección se revisaron las siguientes etapas de prueba en laboratorio:

Para definir la mezcla a emplear en el tratamiento de la cimentación de la presa, como primera etapa se determinaron las propiedades físicas (fluidez, densidad, sedimentación) para las mezclas relación agua - cemento (A/C) sin aditivos, con el objetivo de seleccionar la mezcla más estable (sin aditivos) y con fluidez. Bajo este contexto la mezcla más apegada a este concepto fue la de relación A/C=1.0 (ver tabla I).

Como segunda etapa utilizaron varios fluidizantes, con el objetivo de definir el

aditivo más eficiente para el tipo de cemento utilizado (Moctezuma tipo con Blaind entre 3900 y 4100 cm²/g según información proporcionada por el proveedor) y las características del agua del sitio (libre de materia orgánica).

Se selecciono el fluidizante Dispersil 7000 NL¹³ adicionado en diferentes proporciones (según recomendación del proveedor, desde 4.0 a 14.0 g/kg de cemento). Bajo este contexto se definen las características de las mezclas A/C con fluidizante variable, las cuales se resumen en la tabla II.

Tabla I. Resultados de la mezclas sin aditivos.

| A/C | 0.8 | 0.9 | 1.0 | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|--|--|
| AGUA = | 1.5 | 1.5 | 1.5 | litros | |
| CEMENTO = | 1.875 | 1.667 | 1.5 | kg | |
| Vol. Mezcla | 2.35 | 2.26 | 2.18 | litros | |
| Fluidez | 62.35 | 40.31 | 36.28 | segundos | |
| Densidad | 1.59 | 1.54 | 1.505 | g/cm ³ | |
| Sedimentación qu 7 días | 6.9 | 14.2 | 17.6 | % | |
| qu 28 días | | | | kg/cm ² kg/cm ² | |
| Temperaturas | | | | | |
| agua inicial | 25.9 | 25.9 | 28.0 | °C | |
| lechada inicial | 28.5 | 30.3 | 31.2 | °C | |
| lechada final | 33.2 | 33.7 | 31.9 | °C | |
| Alturas en probeta | | | | | |
| altura inicial | 36.7 | 36.0 | 36.7 | cm | |
| Δh | 2.54 | 5.1 | 5.5 | cm | |

las lecturas Δh fueron a los 120 minutos de colocada la lechada en la probeta.

| CALIBRACION DEL EQUIPO CON AGUA | | | | | |
|---------------------------------|-------|--|--|-------------------|--|
| Fluidez | 25.56 | | | segundos | |
| Densidad | 1.00 | | | g/cm ³ | |
| Temp. de agua | 21.9 | | | °C | |

NOTA: el volumen de la cápsula de la balanza de lodos es de 132 ml.

¹³ Sealcret de México S.A. de C.V. (Aditivos para Concreto)

Tabla II. Resultados de mezclas con A/C =1.0 y fluidizante a diferentes proporciones

| A/C | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
| AGUA = | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | litros |
| CEMENTO = | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | kg |
| Fluidizante (Dispersil 7000 NL) = | 6.0 | 9.0 | 12.0 | 15.0 | 18.0 | 21.0 | cm ³ |
| Vol. Mezcla | | | | | | | litros |
| Fluidizante (Dispersil 7000 NL) = | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | cm ³ /kg cem. |
| Fluidez | 33.62 | 32.5 | 33.66 | 31.25 | 32.37 | 32.84 | segundos |
| Densidad | 1.512 | 1.508 | 1.5 | 1.503 | 1.497 | 1.500 | g/cm ³ |
| Sedimentación | 20.2 | 15.0 | 15.7 | 10.1 | 9.5 | 6.1 | % |
| qu 7 días | | | | | | | kg/cm ² |
| qu 28 días | | | | | | | kg/cm ² |
| Temperaturas | | | | | | | |
| agua inicial | 21.7 | 22.6 | 22.8 | 23.2 | 20.6 | 20.8 | °C |
| lechada inicial | 25.5 | 26 | 26.3 | 26.7 | 22.9 | 23.0 | °C |
| lechada final | 28.4 | 19.1 | 29.3 | 29.8 | 25.3 | 25.6 | °C |
| Alturas en probeta | | | | | | | |
| altura inicial | 37.2 | 36.7 | 35.0 | 36.0 | 37.2 | 36.7 | cm |
| Δh | 7.5 | 5.5 | 5.5 | 3.85 | 3.55 | 2.25 | cm |

las lecturas Δh fueron a los 120 minutos de colocada la lechada en la probeta.

| CALIBRACION DEL EQUIPO CON AGUA | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|--|--|--|--|--|-------------------|
| Fluidez | 25.56 | | | | | | segundos |
| Densidad | 1.00 | | | | | | g/cm ³ |
| Temp. de agua | 21.9 | | | | | | °C |

NOTA: el volumen de la cápsula de la balanza de lodos es de 132 ml.

El δ del Dispersil 7000 NL es de 1.195 g / cm³

El diámetro del orificio inferior del cono Marsh es de 0.44 cm,

En la tabla III se puede observar que la mezcla A/C=1.0 y una cantidad de Dispersil 7000 NL de 14.0 cm³/kg de cemento (21 cm³ para 1.5 kg de cemento de la dosificación propuesta ó 1.67% respecto al peso del cemento, definiendo una densidad del Dispersil 7000 NL de 1.195 g/cm³), se tiene una fluidez de 32.84 segundos (dentro de lo solicitado por diseño de 30 a 34 segundos) y una sedimentación de 6.10% (mayor que 5% de diseño como máximo).

Una vez que se seleccionó la mezcla señalada arriba, por proporcionar la fluidez

de diseño y muy buena estabilidad, se procedió a mejorar su estabilidad adicionando un estabilizador de volumen (Expansil) en diferentes porcentajes 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 % respecto al peso de cemento, esto con el objetivo de valorar el comportamiento de la mezcla con ambos aditivos y poder definir la mezcla de diseño. En la tabla III se muestran los resultados correspondientes, éstos se pueden resumir como sigue: la mezcla con relación A/C=1.0 con Dispersil 7000 NL (fluidizante) de 14.0 cm³/kg de cemento y 1% de estabilizador de volumen (Expansil)¹⁴ respecto al peso de cemento presenta una fluidez de 32.81 segundos (dentro de lo recomendado) y una sedimentación de 4.4% (menor a 5%), es decir, que se cumplen con los parámetros de diseño de la mezcla.

Como complemento se valoró el comportamiento de la fluidez en el tiempo, obteniendo los siguientes resultados: la fluidez de la mezcla se incrementó a 33.97 segundos desde los 15.0 a los 45 minutos, después de este tiempo y hasta los 120 minutos se alcanzó una fluidez de 34.56 segundos, considerándose éste último aceptable.

¹⁴ Sealcret de México S.A. de C.V. (Aditivos para Concreto)

Tabla III. Resultado de mezclas A/C=1.0, Dispersil 7000 NL de 14cm³/kg de cemento y 1% de Expansil.

| A/C | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | | Determinación de la | | |
|-----------------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|--------------------------|------------------------|--------------|-------|
| AGUA = | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | litros | Fluidez a min. después | | |
| CEMENTO = | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | kg | mezcla 2 | | |
| Fluidizante (Dispersil 7000 NL) = | 21 | 21 | 21 | 21.0 | 21 | cm ³ | mezcla 4 | | |
| Fluidizante (Dispersil 7000 NL) = | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | cm ³ /kg cem. | | | |
| Expansil (recomendado en %) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | % respecto cemento | | | |
| Expansil a emplearse | 7.50 | 15.00 | 22.50 | 30.00 | 37.50 | gr | min. | | |
| Fluidez | 30.57 | 32.81 | 32.22 | 32.5 | 31.75 | segundos | 15 | 33.97 | 34.75 |
| Densidad | 1.505 | 1.500 | 1.503 | 1.508 | 1.503 | g/cm ³ | 30 | 33.97 | 34.75 |
| Sedimentación | 5.2 | 4.4 | 1.6 + | 7.4 + | 10.5 + | % | 45 | 33.97 | 34.75 |
| qu 7 días | | | | | | kg/cm ² | 60 | 34.56 | 34.75 |
| qu 28 días | | | | | | kg/cm ² | 120 | 34.56 | 39.16 |
| Temperaturas | | | | | | | min. | temperaturas | |
| agua inicial | 20.8 | 21.2 | 20.6 | 22.6 | 21.0 | °C | 15 | 25.0 | 24.7 |
| lechada inicial | 23.6 | 24.4 | 23.9 | 24.5 | 24.1 | °C | 30 | 25.0 | 24.6 |
| lechada final | 26.2 | 26.3 | 26.4 | 26.7 | 26.7 | °C | 45 | 24.7 | 24.1 |
| Alturas en probeta | | | | | | | 60 | 24.4 | 23.8 |
| altura inicial | 37.2 | 36.0 | 36.7 | 37.2 | 35 | cm | 120 | 23.3 | 22.8 |
| Δh | 1.95 | 1.6 | 0.6 + | 2.75 + | 3.7 + | cm | | | |
| Nivel agua arriba del aforo | 1.15 + | 2.6 + | 3.6 + | 5.4 + | 6.4 + | cm | | | |

las lecturas Δh fueron a los 120 minutos de colocada la lechada en la probeta.

| CALIBRACION DEL EQUIPO CON AGUA | | | | | |
|---------------------------------|--|-------|--|--|-------------------|
| Fluidez | | 25.56 | | | segundos |
| Densidad | | 1.00 | | | g/cm ³ |
| Temp. de agua | | 21.9 | | | °C |

NOTA: el volumen de la cápsula de la balanza de lodos es de 132 ml.

Finalmente a la mezcla definida hasta esta etapa (que cumple con los requerimientos de diseño), se le adicionó silicato de sodio grado 43 en diferentes porcentajes (aditivo que permite acelerar el fraguado de la mezcla), ya que se requirió inyectar esta mezcla en la zona de contacto entre la formación y los depósitos de aluvión. El objetivo de esta etapa fué la de valorar la influencia del silicato de sodio en las características físicas de la mezcla inicial y en el tiempo. En la tabla IV se presentan los resultados correspondientes. Con estos resultados

se concluye que la mezcla que mantiene de manera razonable las características de diseño, es la mezcla con el 1% de silicato de sodio, es decir, que la fluidez después de los 15 minutos de fabricada la mezcla, se incrementa a 35.26 segundos y alcanza un valor de 38.50 segundos a los 120 minutos (2 horas).

Tabla IV. Resultados con A/C=1.0, Dispersil 7000 NL de 14cm³/kg de cemento, 1% de Expansil y Silicato de Sodio variable.

MEZCLAS AGUA CEMENTO CON FLUIDIZANTE (DISPERSIL 7000 NL) Y EXPANSIL

| | Mezcla 2 | Mezcla 2-1 | Mezcla 2-2 | Mezcla 2-3 | Mezcla 2-4 | |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------------------|
| A/C | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | |
| AGUA = | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | litros |
| CEMENTO = | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | kg |
| Fluidizante (Dispersil 7000 NL) = | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | cm ³ /kg cem. |
| Fluidizante (Dispersil 7000 NL) = | 21 | 21 | 21 | 21.0 | 21 | cm ³ |
| Expansil (recomendado en %) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | g/kg de cem. |
| Expansil a emplearse | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | gr |
| Silicato 43° (recomendado en %) | 0.50 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | g/kg de cem. |
| Silicato 43° a emplearse | | 15.00 | 30.00 | 45.00 | 60.00 | g |
| Fluidez | 34.43 | 32.72 | 32.9 | 42.5 | 39.03 | segundos |
| Densidad | 1.5 | 1.493 | 1.5 | 1.497 | 1.5 | g/cm ³ |
| Sedimentación | 5.9 | 4.1 | 6.0 + | 4.4 + | 8.1 + | % |
| qu 7 días | 19.7 | 33.34 | 15.1 | 25.63 | 25.02 | kg/cm ² |
| qu 28 días | 78.88 | 77.77 | 51.29 | 68.99 | 88.33 | kg/cm ² |
| No de Probeta | 1,2,3,4 | 5,6,7,8 | 9,10,11,12 | 13,14,15,16 | 17,18,19,20 | |
| Temperaturas | | | | | | |
| agua inicial | 22.0 | 22.1 | 21.8 | 21.8 | 22.2 | °C |
| lechada inicial | 24.7 | 24.8 | 25.2 | 25.1 | 25.0 | °C |
| lechada final | 26.3 | 25.0 | 25.0 | 24.5 | 24.4 | °C |
| Alturas en probeta | | | | | | |
| altura inicial | 37.2 | 36.7 | 35.0 | 37.2 | 36 | cm |
| Δh | 2.2 | 1.5 | 2.1 + | 1.65 + | 2.9 + | cm |
| Nivel agua arriba del aforo | 1.05 + | 2.0 + | 3.7 + | 3.6 + | 3.8 + | cm |

las lecturas Δh fueron a los 120 minutos de colocada la lechada en la probeta.

CALIBRACION DEL EQUIPO CON AGUA

| | | | | | | |
|---------------|-------|-------------------|--|--|--|--|
| Fluidez | 25.56 | segundos | | | | |
| Densidad | 1.00 | g/cm ³ | | | | |
| Temp. de agua | 21.9 | °C | | | | |

NOTA: el volumen de la cápsula de la balanza de lodos es de 132 ml.

El signo positivo indica que la mezcla se dilata o se expande, ya que el nivel del agua de referencia se ubica arriba del inicial.

5.5 RESULTADOS DE INYECCIÓN.

La inyección se realizó introduciendo al terreno un volumen de 0.6 m^3 de la mezcla estable seleccionada por metro de barreno, en este caso, al inyectar un tramo, la presión de inyección se incrementó gradualmente hasta alcanzar solo la necesaria para introducir al terreno el volumen especificado. Durante la inyección del tramo más cercano a la superficie, los primeros 3.0 m de cada barreno, se tomó un especial cuidado para evitar agrietamientos de la mampostería o en la losa de desplante.

Se inyectaron los barrenos de una misma línea en dos etapas, la primera (Etapa I) con separación a cada 4.0 m y la segunda (Etapa II) a cada 2.0 m. Se inyectaron primero los barrenos de la línea AL localizada aguas arriba y posteriormente los barrenos de la línea BL. Durante la inyección de la línea BL, el procedimiento fue similar al anterior, (introducir un volumen de 0.6 m^3 de lechada por metro de barreno), excepto que la presión de inyección se limitó a 5 kg/cm^2 , cuando se alcanzaba esta presión se suspendía la inyección.

El criterio para la evaluación del tratamiento fue el de la permeabilidad residual. Para esto, se realizaron uno o dos barrenos de prueba al final de la inyección, localizados en el centro de las dos líneas AL y BL y en ellos se realizaron pruebas de permeabilidad tipo Lefranc en tramos de 5.0 m de longitud.

Se consideró satisfactorio el tratamiento cuando la permeabilidad residual obtenida estaba en el rango de 10^{-4} y 10^{-5} cm/s , similar a la que muestra la formación Tlayécac. Se debió tener especial cuidado de medir la permeabilidad en el contacto aluvión con la roca formación Tlayécac.

Línea “AL” (aguas arriba). Tabla V

Como ya se mencionó, quedó ubicada sobre el eje de la cortina, en esta línea se inyectaron 15 barrenos, las presiones empleadas para la inyección de lechada, quedaron registradas en el plano anexo (perfil de inyección línea AL). Debido a que las absorciones de lechada fueron muy variables se ilustran los resultados por tramos de 0.50 m, los volúmenes en m³ y presiones en kg/cm² para cada progresión y por etapas de inyección.

| Barreno | Longitud del barreno [m] | Volumen de Inyección [m ³] | Presión de Inyección [kg/cm ²] |
|----------------|--------------------------|--|--|
| AL - 1 | 7.5 | 1.53 | 3 |
| AL - 2 | 10.0 | 1.67 | 5 |
| AL - 3 | 12.0 | 1.20 | 1 |
| AL - 4 | 13.0 | 2.00 | 5 |
| AL - 5 | 14.0 | 3.75 | 3 |
| AL - 6 | 15.0 | 0.98 | 7 |
| AL - 7 | 16.5 | 3.63 | 5 |
| AL - 8 | 17.5 | 2.50 | 6 |
| AL - 9 | 18.5 | 1.67 | 20 |
| AL - 10 | 16.5 | 0.30 | 12 |
| AL - 11 | 15.5 | 1.49 | 7 |
| AL - 12 | 15.5 | 2.40 | 5 |
| AL - 13 | 13.0 | 2.24 | 10 |
| AL - 14 | 10.0 | 1.36 | 5 |
| AL - 15 | 9.0 | 0.14 | 12 |
| promedio gral. | 13.6 | 1.79 | 7.07 |

Tabla V. Resumen Línea AL

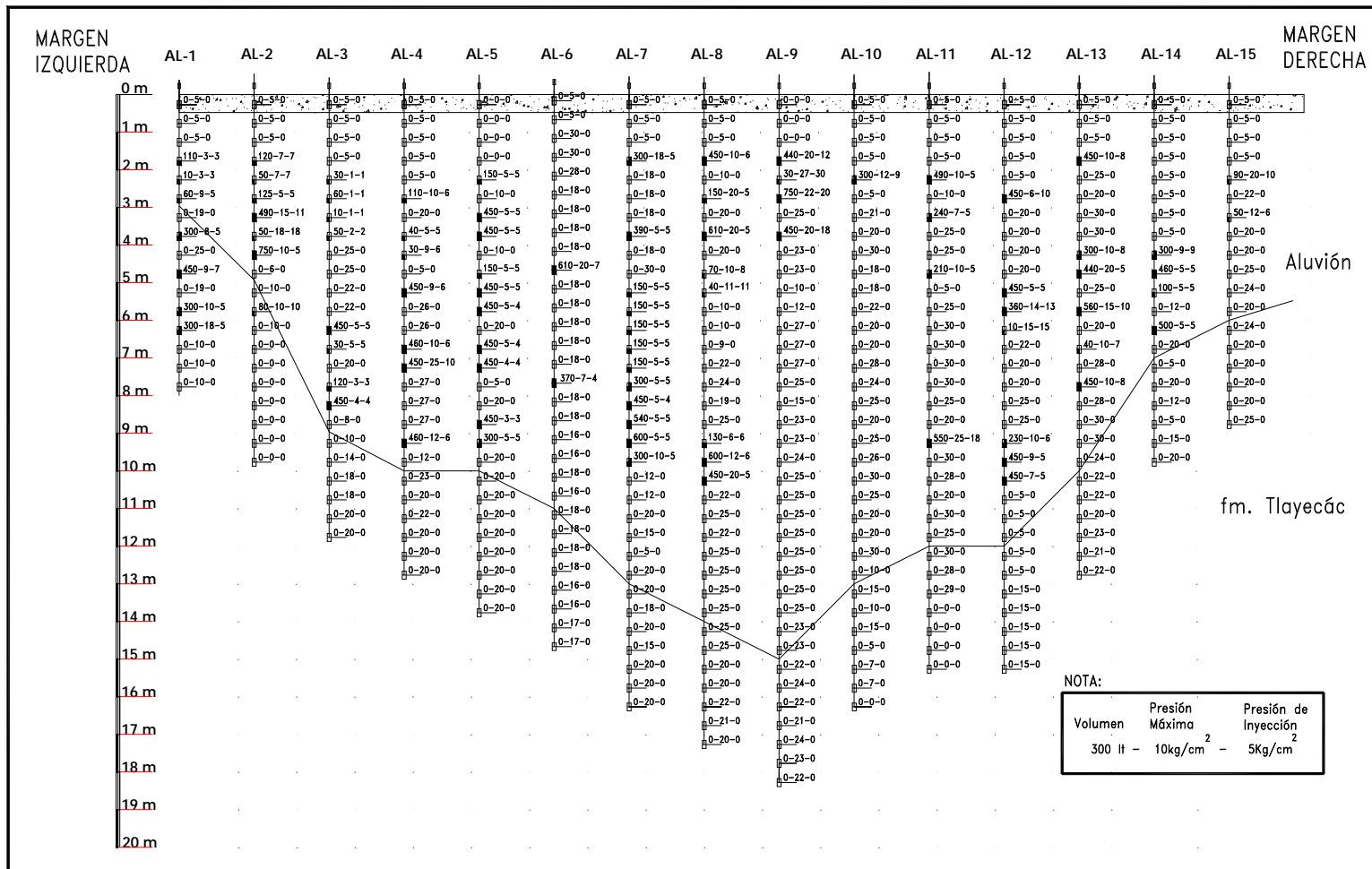


Figura 28. Perfil de inyección en la Línea AL de la Pantalla Impermeable.

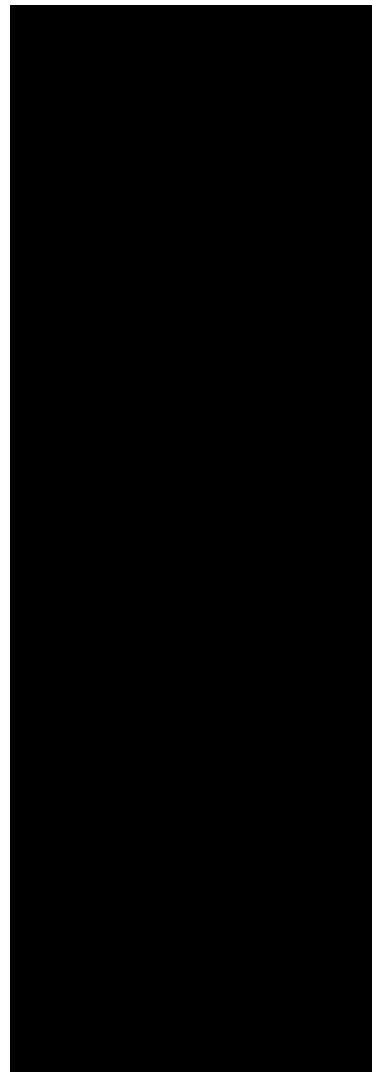
Se observa en general, que en la zona superior de los barrenos de la línea AL, el consumo de lechada fue nulo, la presión primero rompió la vaina, con presiones de bronqueo de unos 5 kg/cm², y después la presión podía aumentar sin consumo significativo de lechada. Lo mismo sucedió en los tramos más profundos, por ejemplo en el barreno AL-4, en la superficie no tomaron lechada los primeros cuatro tramos (bajo la losa de concreto), se tiene un tramo donde el suelo tomó 110 l/m, y después, en el siguiente tramo el barreno AL-4 el suelo no tomó lechada aunque la presión fue de hasta 28 kg/cm², cuando las presiones de bronqueo son del orden de 5 kg/cm² en general; y luego vienen dos tramos en donde el barreno AL-4 sí tomó lechada: 30 y 40 l/m, respectivamente. Lo anterior indica la heterogeneidad del depósito con presencia de estratos delgados o simplemente arenas finas relleno los huecos entre los fragmentos de grava y boleos de roca. En la tabla VI del AL-1 a AL-15 se describen los volúmenes de obra ejecutados para cada uno de los barrenos de la línea AL.

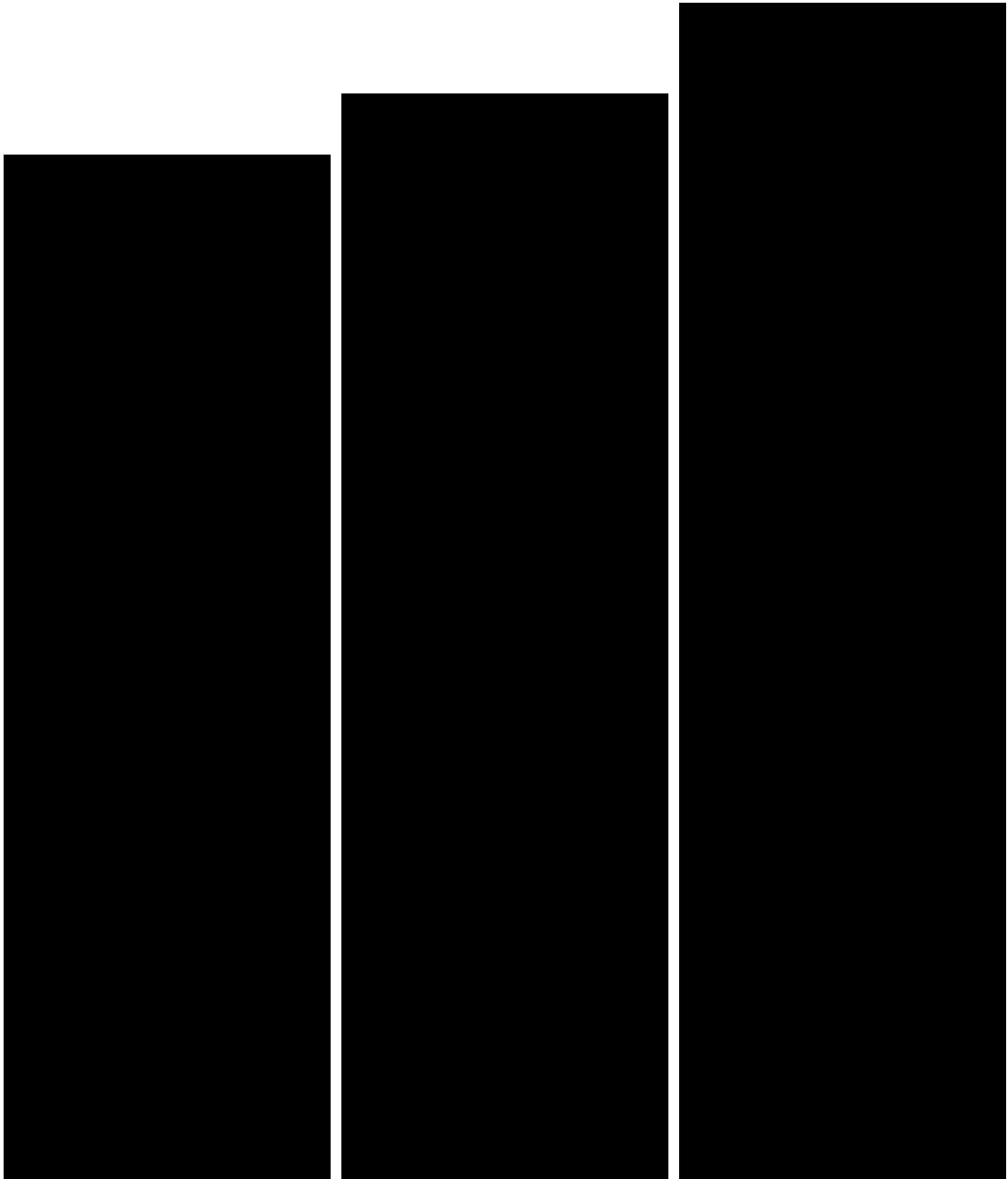
| AL-1 | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Longitud [m] | Volumen [m ³] | Presión Máx. [kg/cm ²] | Presión Mín. [kg/cm ²] |
| 0.50 | 0 | 5 | 0 |
| 1.00 | 0 | 5 | 0 |
| 1.50 | 0 | 5 | 0 |
| 2.00 | 0.11 | 3 | 3 |
| 2.50 | 0.01 | 3 | 3 |
| 3.00 | 0.06 | 9 | 5 |
| 3.50 | 0 | 19 | 0 |
| 4.00 | 0.30 | 8 | 5 |
| 4.50 | 0 | 25 | 0 |
| 5.00 | 0.45 | 9 | 7 |
| 5.50 | 0.30 | 19 | 0 |
| 6.00 | 0.30 | 10 | 5 |
| 6.50 | 0.30 | 18 | 5 |
| 7.00 | 0 | 10 | 0 |
| 7.50 | 0 | 10 | 0 |
| | | promedio | |
| volumen total | 1.83 | 10.53 | 2.20 |

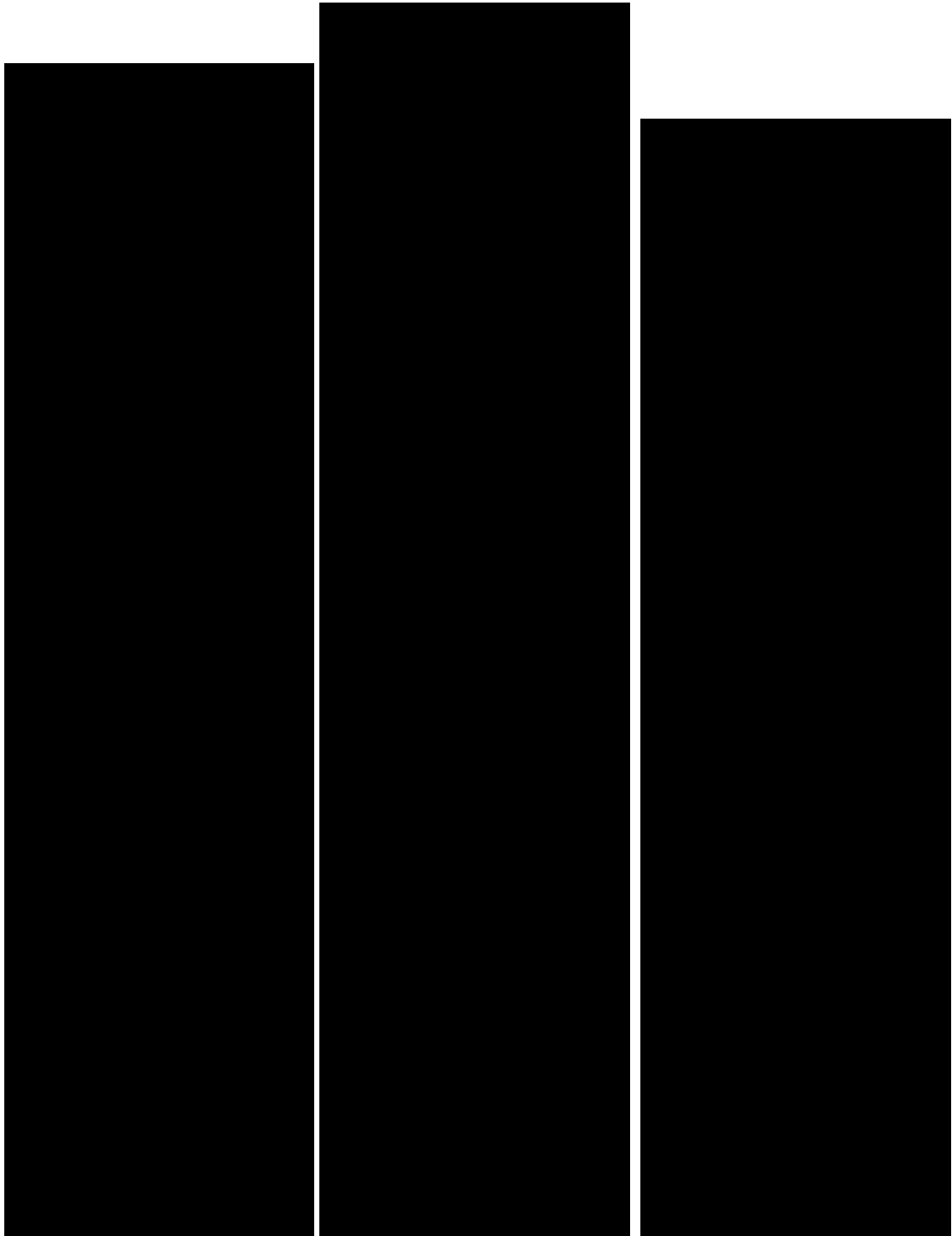
Tabla VI. Consumo por barrenos de la línea AL

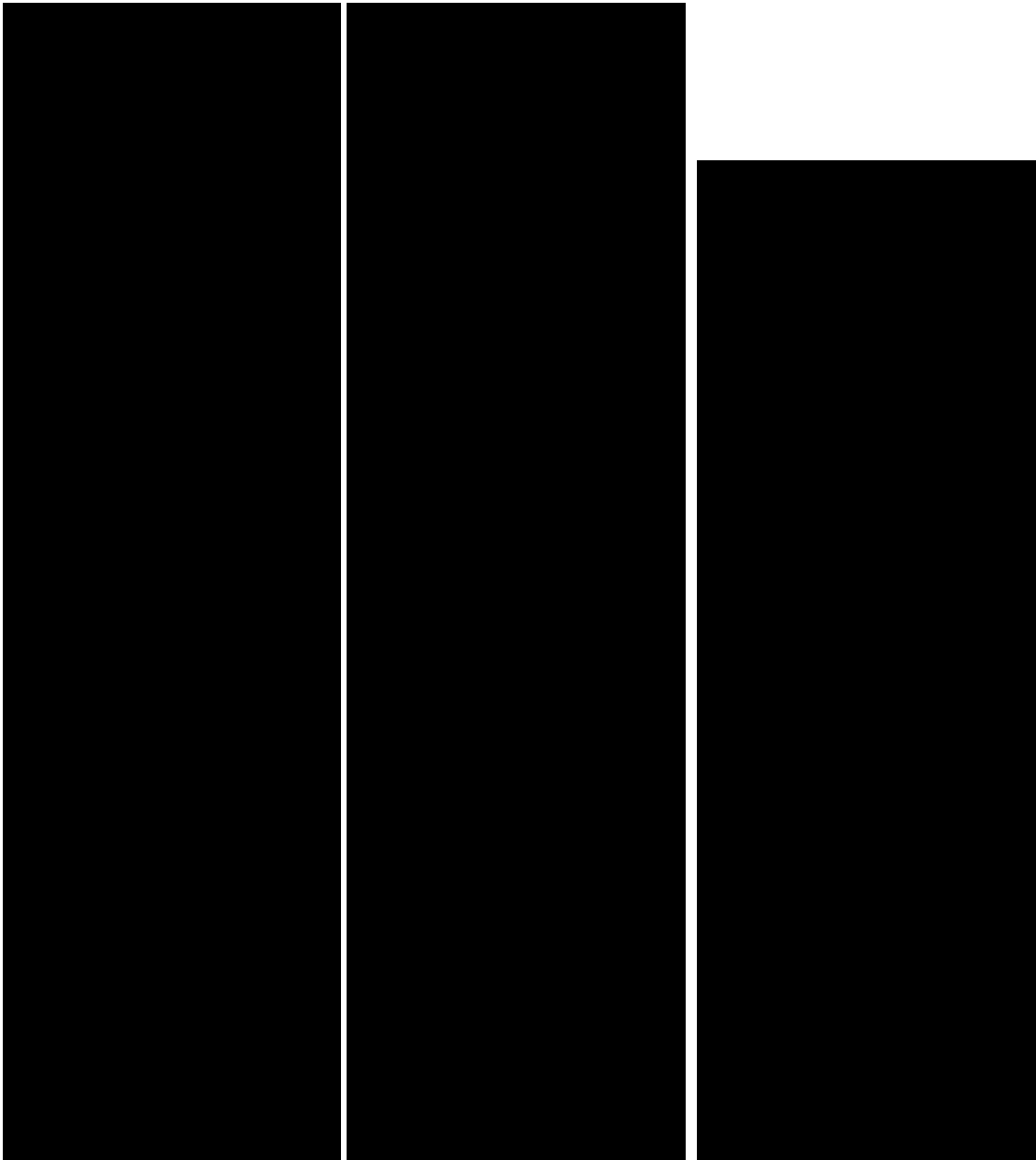
| AL-2 | | | |
|--------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Longitud [m] | Volumen [m ³] | Max. [kg/cm ²] | Min. [kg/cm ²] |
| 0.5 | 0 | 5 | 0 |
| 1 | 0 | 5 | 0 |
| 1.5 | 0 | 5 | 0 |
| 2 | 0.12 | 7 | 7 |
| 2.5 | 0.05 | 7 | 7 |
| 3 | 0.125 | 5 | 5 |
| 3.5 | 0.49 | 15 | 11 |
| 4 | 0.05 | 18 | 18 |
| 4.5 | 0.75 | 10 | 5 |
| 5 | 0 | 6 | 0 |
| 5.5 | 0 | 10 | 0 |
| 6 | 0.08 | 10 | 10 |
| 6.5 | 0 | 10 | 10 |
| 7 | 0 | 0 | 0 |
| 7.5 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 |
| 8.5 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 |
| 9.5 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 |
| | | promedio | |
| total | 1.67 | 5.65 | 3.65 |

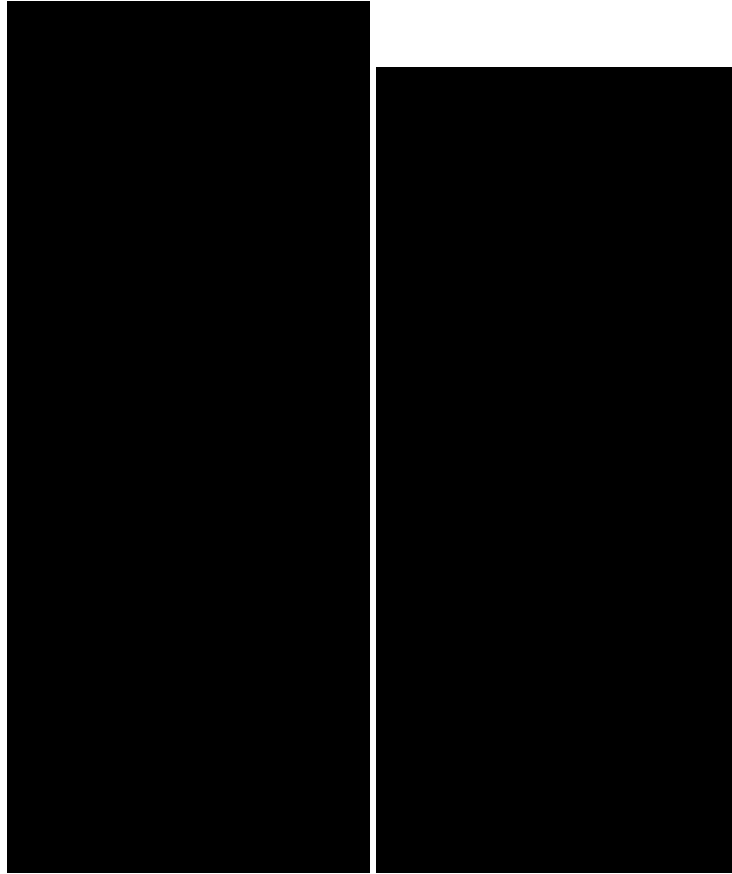
| AL-3 | | | |
|--------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Longitud [m] | Volumen [m ³] | Max. [kg/cm ²] | Min. [kg/cm ²] |
| 0.5 | 0 | 5 | 0 |
| 1 | 0 | 5 | 0 |
| 1.5 | 0 | 5 | 0 |
| 2 | 0 | 5 | 0 |
| 2.5 | 0.03 | 1 | 1 |
| 3 | 0.06 | 1 | 1 |
| 3.5 | 0.01 | 1 | 1 |
| 4 | 0.05 | 2 | 2 |
| 4.5 | 0 | 25 | 0 |
| 5 | 0 | 25 | 0 |
| 5.5 | 0 | 22 | 0 |
| 6 | 0 | 22 | 0 |
| 6.5 | 0.45 | 5 | 5 |
| 7 | 0.03 | 5 | 5 |
| 7.5 | 0 | 20 | 0 |
| 8 | 0.12 | 3 | 3 |
| 8.5 | 0.45 | 4 | 4 |
| 9 | 0 | 8 | 0 |
| 9.5 | 0 | 10 | 0 |
| 10 | 0 | 14 | 0 |
| 10.5 | 0 | 18 | 0 |
| 11 | 0 | 18 | 0 |
| 11.5 | 0 | 20 | 0 |
| 12 | 0 | 20 | 0 |
| | | promedio | |
| total | 1.2 | 11 | 0.92 |











Línea “BL” (aguas abajo). Tabla VII

Ésta línea quedó ubicada a 1.75 metros aguas abajo de la línea “AL” desfasando los barrenos en tres bolillo comprendido los cadenamientos 0+000 al 0+055. En esta línea se inyectaron 16 barrenos, las presiones empleadas para la inyección de lechada, quedan registraron en el plano anexo (perfil de inyección línea BL). Debido a que las absorciones de lechada fueron muy variables se ilustraron los resultados por tramos de 0.50 m, los volúmenes en m³ y presiones en kg/cm² para cada progresión y por etapas de inyección.

| Barreno | Longitud del barreno [m] | Volumen de Inyección [m ³] | Presión de Inyección [kg/cm ²] |
|----------------|--------------------------|--|--|
| BL - 1 | 9.5 | 1.06 | 5 |
| BL - 2 | 10.5 | 1.09 | 5 |
| BL - 3 | 13.5 | 1.80 | 5 |
| BL - 4 | 13.5 | 0.84 | 5 |
| BL - 5 | 13.5 | 0.76 | 5 |
| BL - 6 | 15.5 | 5.43 | 5 |
| BL - 7 | 18.0 | 1.62 | 4 |
| BL - 8 | 16.5 | 1.39 | 5 |
| BL - 9 | 18.5 | 0.50 | 4 |
| BL - 10 | 17.0 | 0.68 | 4 |
| BL - 11 | 15.5 | 0.48 | 4 |
| BL - 12 | 14.5 | 1.31 | 10 |
| BL - 13 | 13.5 | 1.04 | 5 |
| BL - 14 | 11.5 | 2.98 | 4 |
| BL - 15 | 9.5 | 1.00 | 5 |
| BL - 16 | 9.0 | 0.00 | 0 |
| promedio gral. | 14.6 | 1.47 | 5.00 |

Tabla VII. Resumen Línea BL

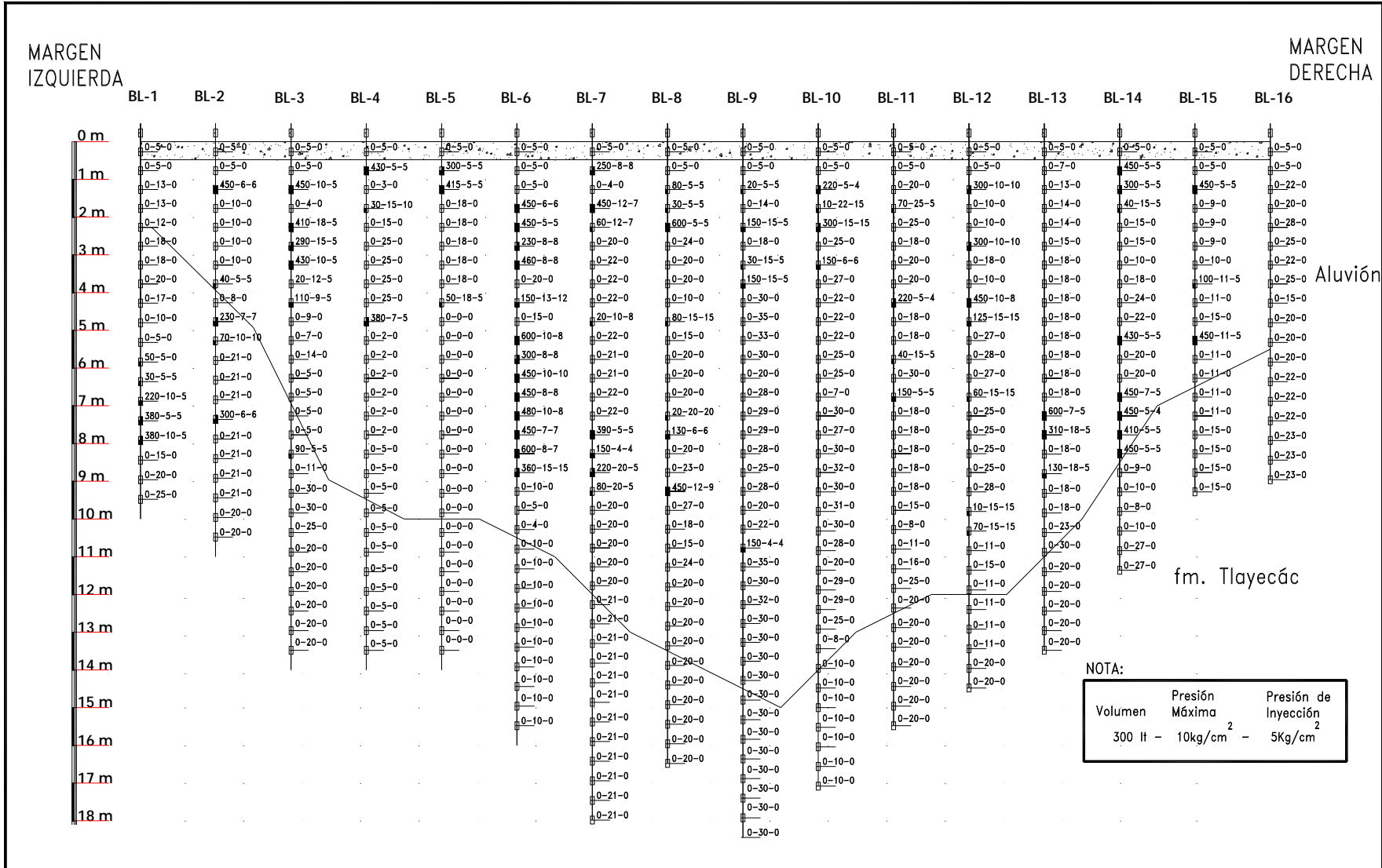
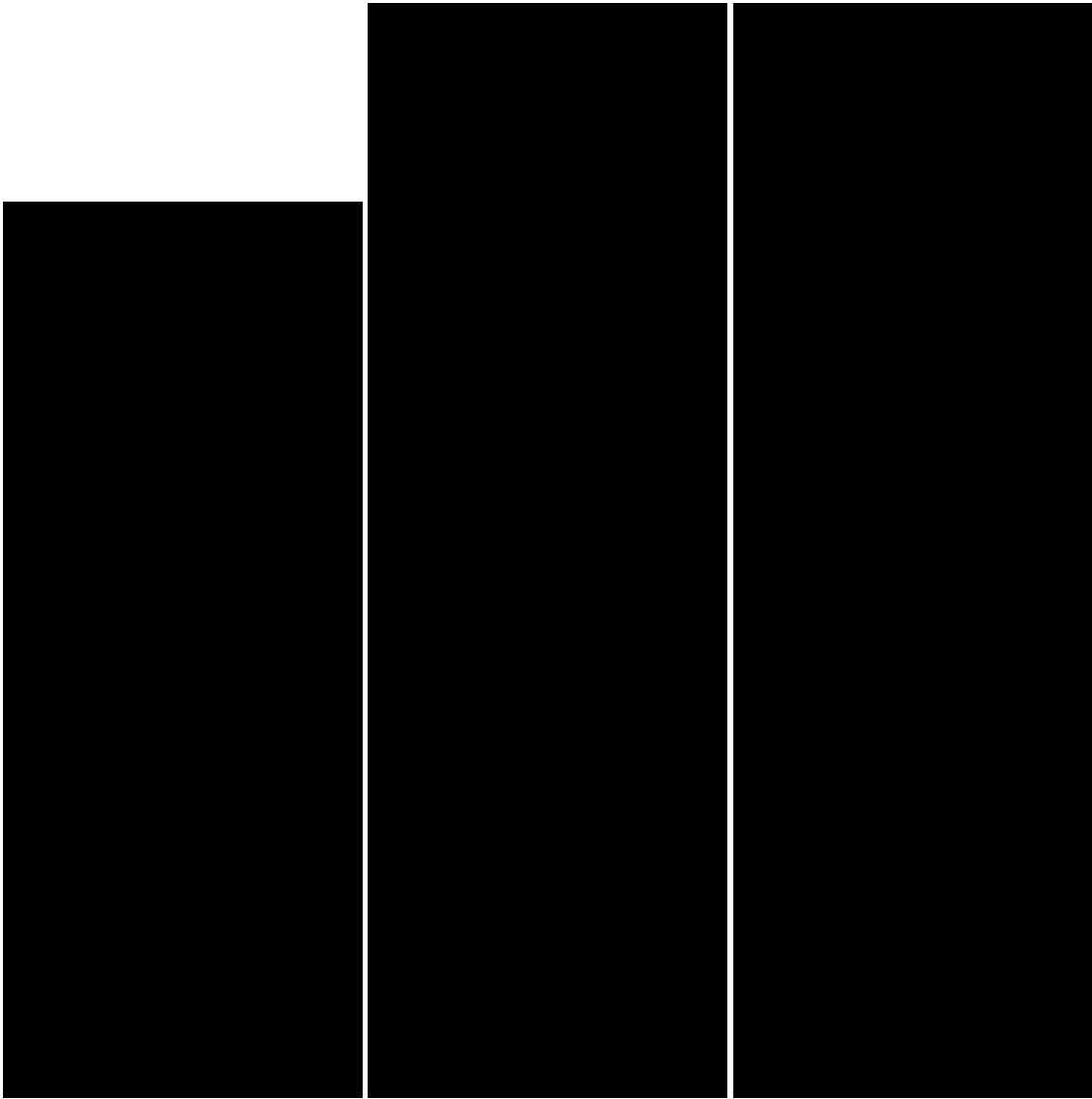


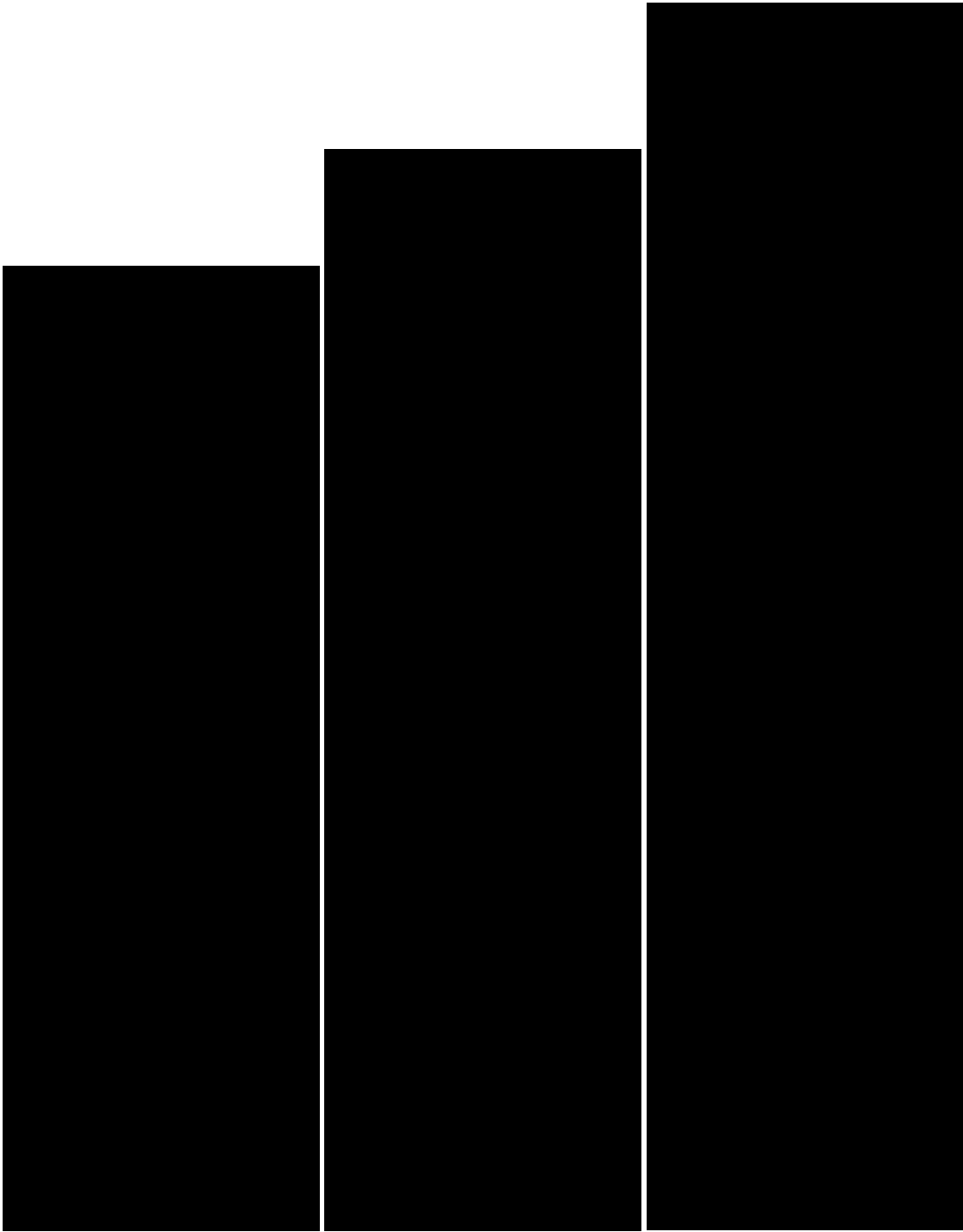
Figura. 29 Perfil de inyección en la Línea BL de la Pantalla Impermeable.

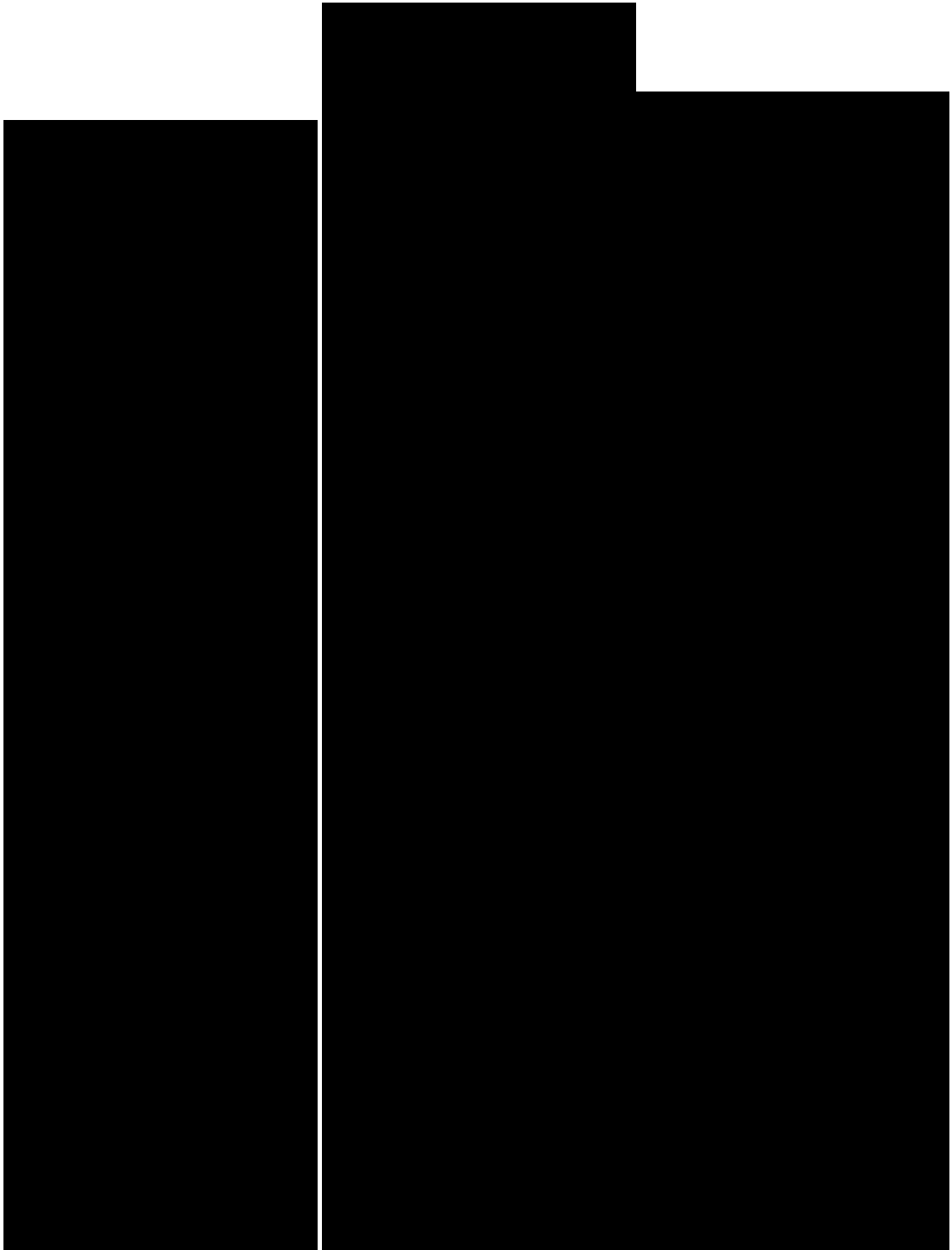
En la tabla VII de BL-1 a BL-16 se describen los volúmenes de obra ejecutados para cada uno de los barrenos de la línea BL.

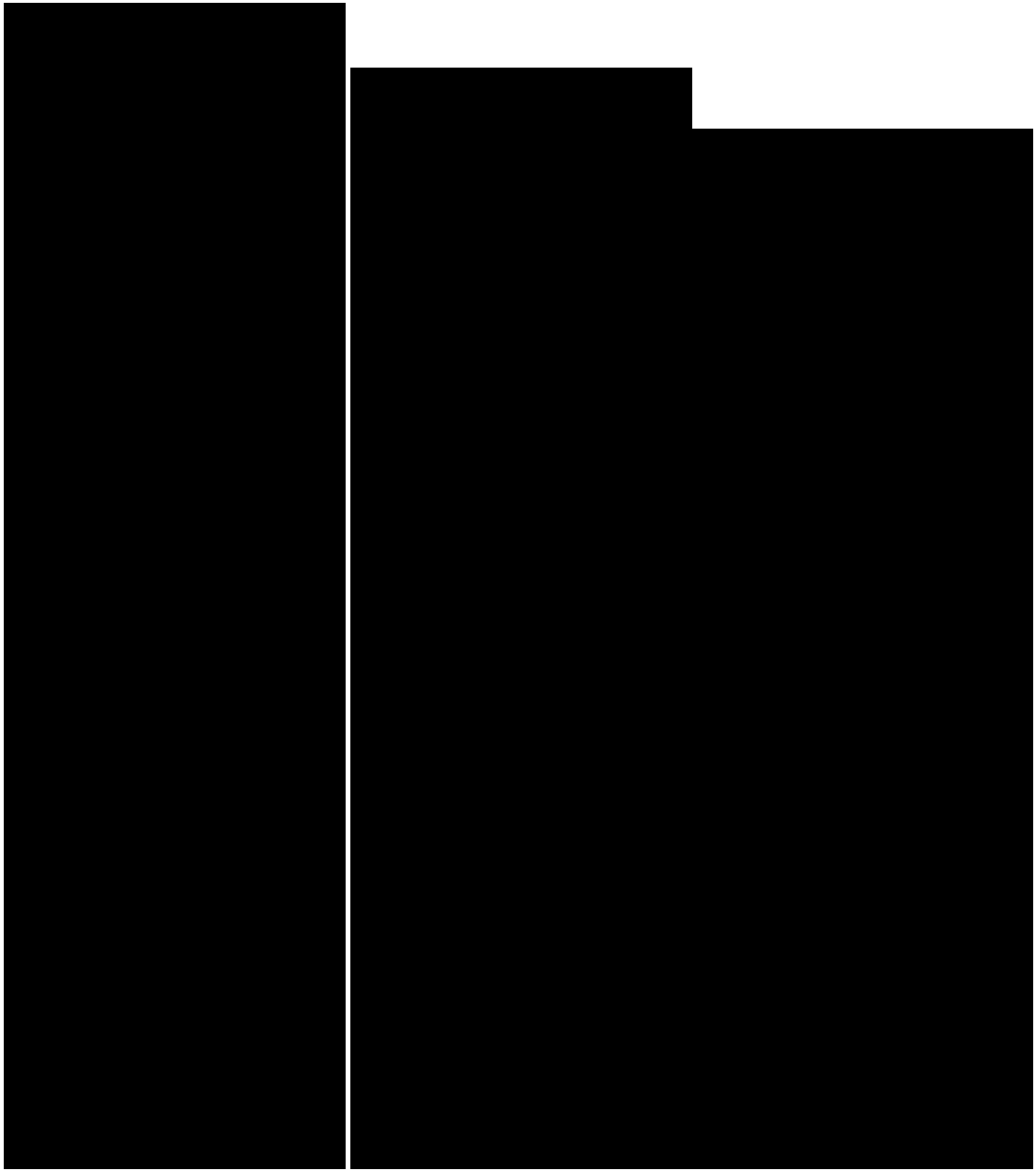
| BL-1 | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Longitud [m] | Volumen [m ³] | Presión Máx. [kg/cm ²] | Presión Mín. [kg/cm ²] |
| 0.50 | 0 | 5 | 0 |
| 1.00 | 0 | 5 | 0 |
| 1.50 | 0 | 13 | 0 |
| 2.00 | 0 | 13 | 0 |
| 2.50 | 0 | 12 | 0 |
| 3.00 | 0 | 18 | 0 |
| 3.50 | 0 | 18 | 0 |
| 4.00 | 0 | 20 | 0 |
| 4.50 | 0 | 17 | 0 |
| 5.00 | 0 | 10 | 0 |
| 5.50 | 0 | 5 | 0 |
| 6.00 | 0.05 | 5 | 0 |
| 6.50 | 0.03 | 5 | 5 |
| 7.00 | 0.22 | 10 | 5 |
| 7.50 | 0.38 | 5 | 5 |
| 8.00 | 0.38 | 10 | 5 |
| 8.50 | 0 | 15 | 0 |
| 9.00 | 0 | 20 | 0 |
| 9.50 | 0 | 25 | 0 |
| | | promedio | |
| volumen total | 1.06 | 12.16 | 1.05 |

Tabla VII. Consumo por barrenos de la línea BL











5.6 VERIFICACIÓN DEL TRATAMIENTO.

Se perforaron 3 barrenos de verificación con recuperación de núcleos y ejecución de pruebas de permeabilidad tipo Lefranc⁴. Se hicieron tres barrenos para la verificación de la permeabilidad, entre las líneas de inyección AL y BL, la ejecución se llevó acabo con recuperación de núcleos para constatar el tipo de terreno en que se hizo la prueba. Los tres barrenos fueron perforados hasta 10.5m de profundidad, es decir, 10 m bajo la base de la losa de concreto de cimentación de la cortina. La localización de los barrenos de verificación se ubicaron con referencia a los barrenos de inyección cercana a las líneas AL y BL.

Barreno de verificación No. 1 BL-6

Barreno de verificación No. 2 AL-10

Barreno de verificación No.3 BL-14

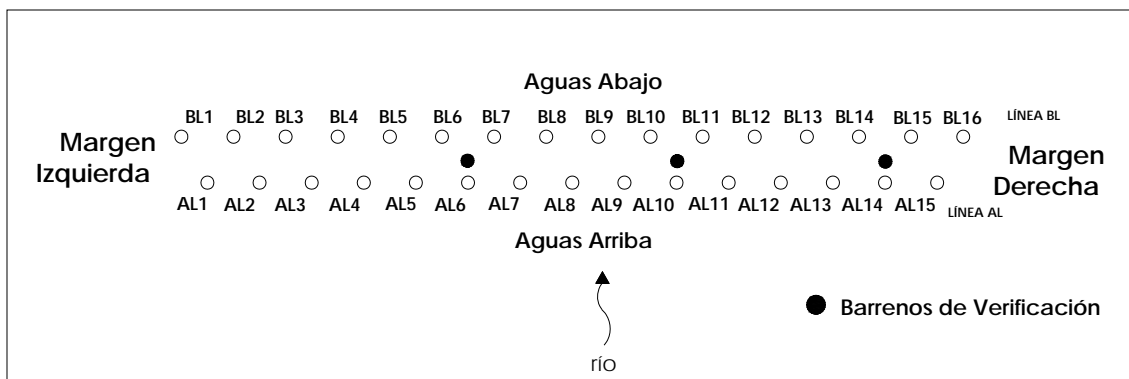


Figura. 30 Pantalla Impermeable

⁴ Prueba Lefranc – Mandel. Normas ASTM y AFNOR

El criterio para la aceptación del tratamiento es el de la permeabilidad residual. Para esto, se realizaron tres barrenos de prueba al final de la inyección, localizados en el centro de las dos líneas AL y BL donde se realizaron tres pruebas de permeabilidad tipo Lefranc en tramos de 5.0 m de longitud. Se consideró satisfactorio el tratamiento cuando la permeabilidad residual obtenida estaba en el rango de 10^{-4} y 10^{-5} cm/s. Se tuvo especial cuidado al medir la permeabilidad del contacto del aluvión - Formación Tlayécac.

Terminada la perforación de los barrenos, se lavó perfectamente el sondeo, y se dejó reposar durante un periodo mínimo de 12 horas o hasta que el NAF se estabilizó de acuerdo con las condiciones específicas del sitio, para ver las fluctuaciones del nivel del agua en el interior del barreno y para asegurar la posición del nivel freático NAF dentro del barreno. Conocida la posición del NAF en cada barreno de verificación, se procedió a efectuar la prueba de permeabilidad manteniendo la carga hidráulica constante con respecto a la posición del NAF, hasta alcanzar la presión equivalente de 15 m. de columna de agua, o sea, 1.5 kg/cm^2 . Se tomaron cuidadosamente las lecturas de tiempo, el gasto ó volumen de agua inyectado al terreno a la presión de 1.5 kg/cm^2 .

La permeabilidad obtenida en el barreno de verificación No. 1 se muestran en la tabla VIII:

Se puede observar que la permeabilidad fue de 5×10^{-4} a 7×10^{-4} cm/s en toda la longitud por lo que se considera que es tolerable estos valores.

Tabla VIII. Resumen de resultados de permeabilidad

| Barreno de Verificación No.1 (BL-6) | | | |
|--|-----------|------------------------------------|-----------------|
| Pruebas de Permeabilidad tipo Lefranc | | | |
| Profundidad [m] | | Pi =1.5 (kg/cm²) | k (cm/s) |
| de: | a: | | |
| 0.92 | 4.32 | CC | 5.05E-04 |
| 4.32 | 7.32 | CC | 5.11E-04 |
| 7.32 | 10.32 | CC | 7.00E-04 |

CC: prueba con carga constante

Pi: carga hidráulica

k: coeficiente de permeabilidad

La permeabilidad obtenida en el barreno de verificación No. 2 se muestran en la tabla IX:

Se puede observar que la permeabilidad fue de 2.9×10^{-4} a 5.5×10^{-4} cm/s en toda la longitud por lo que se considera que es aceptable estos valores.

Tabla IX. Resumen de resultados de permeabilidad

| Barreno de Verificación No.2 (AL-10) | | | |
|--|-----------|------------------------------------|-----------------|
| Pruebas de Permeabilidad tipo Lefranc | | | |
| Profundidad [m] | | Pi =1.5 (kg/cm²) | k (cm/s) |
| de: | a: | | |
| 1.30 | 4.30 | CC | 3.13E-04 |
| 4.30 | 7.30 | CC | 2.98E-04 |
| 7.30 | 10.30 | CC | 5.55E-04 |

CC: prueba con carga constante

Pi: carga Hidráulica

k: coeficiente de permeabilidad

La permeabilidad obtenida en el barreno de verificación No. 3 se muestran en la tabla X:

Se puede observar que la permeabilidad fue de 7×10^{-5} a 8.1×10^{-5} cm/s en toda la longitud por lo que se considera que son admisibles estos valores.

Tabla X. Resumen de resultados de permeabilidad

| Barreno de Verificación No.3 (AL-14) | | | |
|--|-----------|------------------------------------|--------------------------|
| Pruebas de Permeabilidad tipo Lefranc | | | |
| Profundidad [m] | | Pi =1.5 (kg/cm²) | k (cm/s) |
| de: | a: | | |
| 1.8 | 3.15 | CC | 7.04E-05 |
| 3.15 | 6.8 | CC | No hubo consumo de Gasto |
| 6.8 | 10 | CC | 8.16E-05 |

CC: prueba con carga constante

Pi: carga Hidráulica

k: coeficiente de permeabilidad

Como conclusión de las pruebas de verificación se tiene que en el área del aluvión la permeabilidad residual entre las dos líneas de la pantalla impermeables es de 3.37×10^{-4} cm/s en promedio. Este valor es 2 veces menor que la permeabilidad original del aluvión 1×10^{-4} cm/s.