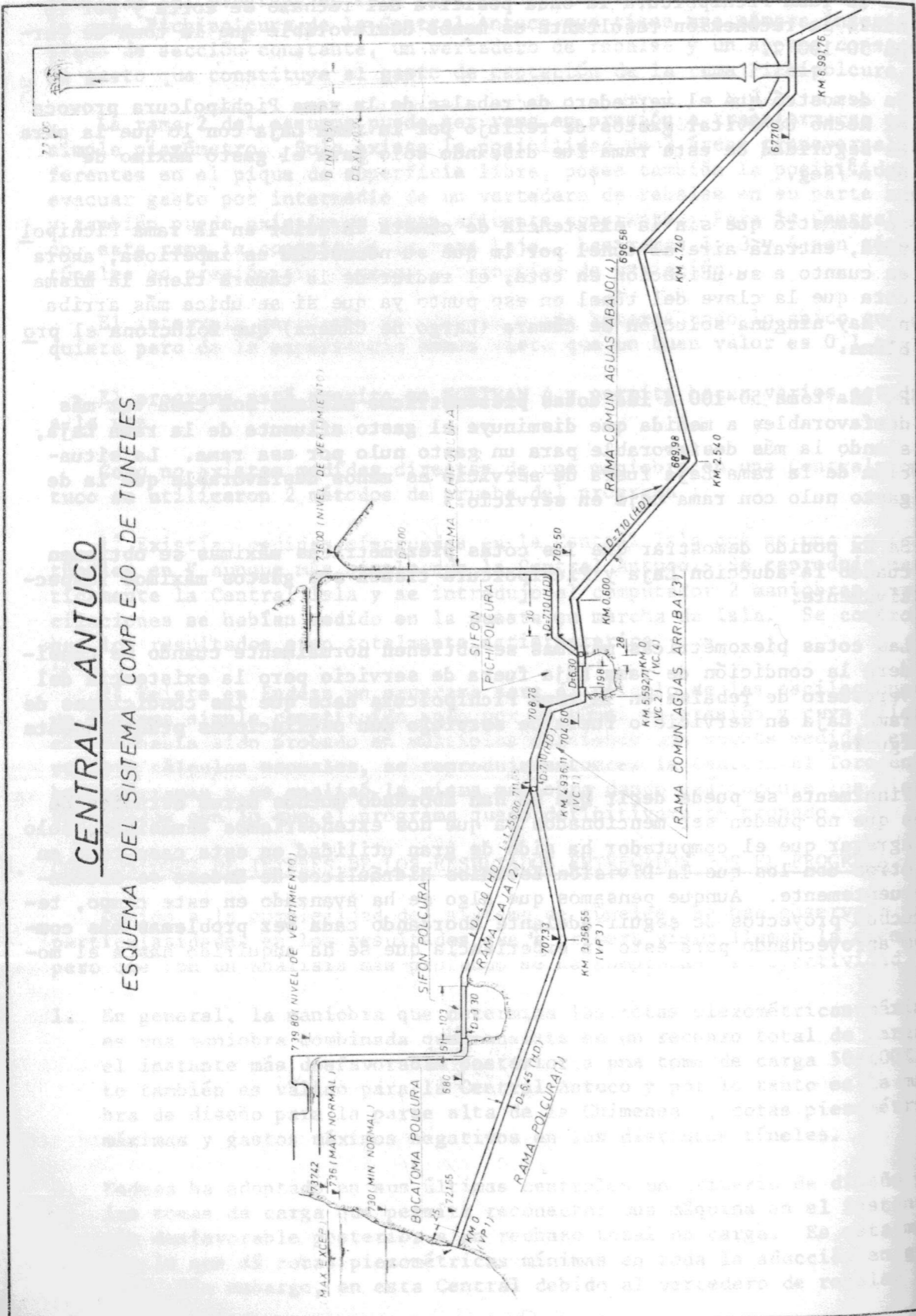


CENTRAL ANTUCO  
ESQUEMA DEL SISTEMA COMPLEJO DE TUNELES



SEGUNDO COLOQUIO NACIONAL  
SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

REDUCCION DE LA PERMEABILIDAD DE UN FLUVIAL GRUESO  
MEDIANTE INYECCIONES DE LECHADAS DE ARCILLA-CEMENTO

Fernando Echeverría Acuña<sup>1</sup>      Eugenio Garcés Vial<sup>2</sup>  
INGENIEROS CIVILES UNIVERSIDAD DE CHILE

RESUMEN

La presa del futuro Embalse Colbún, quedará fundada en gran parte sobre rellenos fluviales gruesos, los cuales dada su alta permeabilidad será necesario impermeabilizarlos para evitar pérdidas importantes de agua por filtraciones a través del suelo de fundación, las que incluso podrían hacer peligrar la estabilidad de la presa.

Una solución de impermeabilización que parece ser muy atractiva es la construcción de una cortina de inyección que prolongue el núcleo de la presa hasta la roca a través de los fluviales que se inyectarían.

Esta cortina de inyección alcanzaría dimensiones considerables y por lo tanto su costo sería importante. Ello ha motivado a ENDESA (responsable del proyecto) a realizar un ensayo de inyección en estos fluviales con miras a estudiar la factibilidad tanto técnica como económica de la cortina de inyección. Este ensayo de inyectabilidad actualmente se encuentra en etapa de realización, habiéndose ya ejecutado más de la mitad del programa realizado previo al ensayo.

En esta comunicación se dan a conocer los resultados obtenidos a la fecha de lo realizado en este ensayo y además las conclusiones aunque parciales que se desprenden de lo observado en él.

- 1 Jefe División Sondajes, Inyecciones y Geofísica, Empresa Nacional de Electricidad.  
Profesor de Mecánica de Fluidos del Departamento Obras Civiles, Universidad de Chile.
- 2 Proyectista, Empresa Nacional de Electricidad.  
Profesor Mecánica de Suelos del Departamento Obras Civiles, Universidad de Chile.

1.- INTRODUCCION

El proyecto Colbún, actualmente en etapa de estudio, consulta el aprovechamiento del tramo inferior del valle andino del río Maule. Su obra fundamental será una presa que cerrará el cauce de este río en la angostura de Colbún, cercana al pueblo del mismo nombre y ubicada a 60 km al S.O. de la ciudad de Talca.

El embalse así creado regulará los caudales aportados por una hoya hidrográfica de 5 710 km<sup>2</sup> y tendrá un uso múltiple para energía y riego. El volumen a embalsar será de 2 000 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales 1 050 corresponderán al volumen normal de regulación y 400 a un colchón de reserva.

Estudios técnicos y económicos han demostrado que el tipo de presa más adecuado es una de tierra por zonas con núcleo central. Su altura será de 110 metros sobre el lecho actual del río y su desarrollo de 560 metros en el coronamiento.

El movimiento de tierra que será necesario realizar para la ejecución de esta obra alcanza aproximadamente a 13 millones de m<sup>3</sup>.

La presa se apoyará directamente sobre el relleno fluvial que cubre la caja del río y sobre brechas volcánicas que forman las laderas de la angostura. La potencia media de dicho relleno es del orden de 40 metros, con un máximo de 60, y está formado por gravas gruesas limpias, bien y pobremente graduadas, con abundantes bolones de tamaño máximo 24" y siendo altamente permeables.

Dadas las características de la presa y considerando el tipo de suelo en que se fundará, se ha concluido que es imprescindible impermeabilizarlo adecuadamente. Para esto existen varias soluciones, siendo la más probable la de realizar una cortina de inyección que permita unir el núcleo de la presa con la roca por medio del fluvial inyectado.

2.- GENERALIDADES SOBRE INYECCION DE SUELOS

El tratamiento de terrenos por medio de inyecciones consiste en transformar un suelo inconsistente y permeable en una masa resistente y estanca.

Es conocido que para realizar una buena inyección, teniendo en cuenta tanto los resultados como el aspecto económico, es preciso adaptar la naturaleza de la lechada al tipo de terreno a ser inyectado. Si no se aplica esta regla fundamental se puede llegar a un fracaso rotundo o a gastos superfluos.

En el caso de terrenos constituidos por depósitos fluviales (como es el caso de Colbún), aparece como fundamental tener un conocimiento lo más preciso posible de su estructura estratificada para poder asegurar un tratamiento conveniente por medio de inyecciones.

De acuerdo a los resultados que se pretende obtener, se fija un grado de relleno límite para que el trabajo sea aceptable económica y técnicamente. Nunca se puede lograr una saturación completa, salvo en terrenos muy homogéneos. La experiencia muestra que la inyección clásica de un fluvial llena aproximadamente un 50 a 65% del volumen de huecos del terreno.

La presión de inyección depende esencialmente de la estructura del terreno, de la viscosidad de la lechada y de la profundidad del tratamiento. Esta presión tiende a un límite máximo sobre el cual el terreno se quiebra (claquage), creando grietas artificiales por las cuales se escurre la lechada. Este fenómeno de quiebre debe en general evitarse, aunque a veces es conveniente provocarlo para contribuir al tratamiento del terreno.

Una lechada adecuada para el tratamiento de fluviales debe caracterizarse por su estabilidad e inyectabilidad durante el proceso de inyección, y por su resistencia en el tiempo a las erosiones físicas o químicas, sobretodo cuando se trata de una obra definitiva.

Según sus constituyentes las lechadas de inyección se pueden dividir en dos grandes grupos:

- a) Lechadas con fases sólidas, a base de cemento, arcilla-cemento, arcilla o bentonita defloculadas, etc.
- b) Lechadas con fases líquidas, a base de silicato de sodio, lignocromos, resinas orgánicas, etc.

La penetrabilidad de las distintas lechadas de inyección es un factor determinante para su elección (Cambefort 1968).

Londe (1970) da abundantes antecedentes sobre inyecciones realizadas en presas fundadas sobre rellenos fluviales.

- 
- Cambefort H. (1968) "Inyección de Suelos", Ediciones Omega, Barcelona.
  - Londe P. (1970) "Progrés Récents dans L'Etude et la construction des Barrages et des Réservoirs situés sur alluvions profondes, sur des terrains karstiques, ou des terrains difficiles" 10° Congrès des Grands Barrages, Vol. V, R.G. - Q37, Montreal.

### 3.- APLICACION AL CASO DE LA CENTRAL COLBUN

Dada la alta permeabilidad media del fluvial en Colbún (del orden de  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s), si se adopta la solución de una cortina de inyección, los volúmenes a inyectar serán considerables. De acuerdo a los promedios de otras presas similares, se pueden estimar las siguientes cifras:

superficie cortina de inyección:	10 000 m <sup>2</sup>
material seco inyectado	: 2,5 ton/m <sup>2</sup> cortina
volumen inyectado	: 5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> cortina.

Con estas cifras se tienen 25 000 ton de materiales secos (cemento, arcilla, aditivos) y 50 000 m<sup>3</sup> de lechada de inyección. Estas cantidades son aproximadamente iguales a las que se ocuparon en Serre-Poncon.

Teniendo en cuenta la magnitud y costo de esta faena, ENDESA decidió realizar un ensayo de inyectabilidad del fluvial que permitiera conocer por anticipado algunos de los parámetros más importantes que intervienen en el proyecto de una cortina de inyección. Para ello se ha contado con la asesoría de la empresa francesa BACHY, especialista en esta materia de reconocido prestigio.

En la actualidad este ensayo de inyección se encuentra en la última etapa prevista para la utilización de arcilla-cemento. Si es necesario, deberá completarse la inyección con geles blandos de silicato de sodio.

En esta comunicación se pretende dar a conocer los resultados obtenidos a la fecha en la realización de este ensayo y divulgar, aunque sea brevemente, la importancia de esta herramienta constructiva que es la inyección de suelos.

### 4.- PROGRAMACION DEL ENSAYO DE INYECTABILIDAD

El ensayo de inyectabilidad programado por ENDESA con la asesoría de la empresa Bachy pretende despejar las siguientes incógnitas:

- Número de líneas de inyección, separación óptima entre líneas y entre perforaciones.
- Materiales de inyección, características y dosificaciones de las lechadas a inyectar, presiones de inyección y sistema más adecuado para realizar las inyecciones.
- Equipos de perforación e inyección recomendables.
- Eficiencia de la cortina proyectada.

### e) Costo de la cortina definitiva.

Durante la programación del ensayo se estudiaron dos tipos de esquemas: uno con ordenamiento de las perforaciones de tipo rectangular y otro con ordenamiento de tipo circular. Se adoptó finalmente este último por ser más simples los controles y requerir menor número de perforaciones.

El esquema adoptado se indica en la lámina N° 1 y corresponde básicamente a:

- Una línea exterior representada por un círculo con 12 perforaciones espaciadas cada 3 metros.
- Una línea intermedia representada por un círculo concéntrico con el anterior con 6 perforaciones espaciadas cada 3 metros.
- Una línea interior representada por la perforación central.

El desarrollo del ensayo contempla las siguientes etapas o fases, las cuales contemplan las modificaciones surgidas durante la ejecución:

Fase 1. Determinación de las propiedades hidráulicas del acuífero virgen mediante una prueba de bombeo realizada en el pozo E1, ubicado en el centro del área de inyección.

Fase 2. Ejecución de las perforaciones N° 1 al 6 de la línea exterior (espaciadas cada 6 metros) y su inyección con lechadas de arcilla-cemento.

Fase 3. Control del efecto de las inyecciones de la fase 2 mediante una prueba de bombeo en el pozo E1.

Fase 4. Ejecución de las 6 perforaciones restantes de la línea exterior (7 al 12) y su inyección con lechadas de arcilla-cemento.

Fase 5. Control del efecto de las inyecciones realizadas hasta la fase 4 mediante una prueba de bombeo en un nuevo pozo (E2).

Fase 6. Ejecución de la perforación central (N° 13) y las N°s. 14, 15 y 16 de la línea intermedia y su inyección con lechadas de arcilla-cemento.

Fase 7. Control del efecto de las inyecciones realizadas hasta la fase 6 mediante una prueba de bombeo en un nuevo pozo (E3).

Fase 8. Ejecución de las 3 perforaciones restantes de la línea intermedia (N° 17, 18 y 19) y su inyección con geles blandos de silicato de sodio.

Fase 9. Control final de las inyecciones realizadas mediante una prueba de bombeo en un nuevo pozo (E4), en el cual se excavará a mano hasta donde sea posible para hacerlo visitable.

Actualmente el ensayo de inyectabilidad se encuentra en la parte final de la fase 6.

#### 5.- DESARROLLO DEL ENSAYO DE INYECTABILIDAD

La elección del lugar para realizar el ensayo requirió de un estudio bastante acucioso. En primer lugar la magnitud de este trabajo aconsejaba ubicarlo en una zona que coincidiera con la futura cortina para así aprovechar esta inversión. Por otra parte, el lugar escogido debería ser lo más representativo del promedio del fluvial a inyectar, para así sacar conclusiones valederas.

La exploración realizada en la angostura de Colbún y el estado del anteproyecto con que se contaba en el momento de iniciarse el ensayo, permitieron definir con bastante acierto el lugar.

##### - Fase 1

El ensayo mismo se inició con la determinación de las características del acuífero virgen, para lo cual fue necesario realizar una prueba de bombeo en un pozo que se perforó en el fluvial hasta alcanzar la roca (46,7 m de profundidad).

El pozo de bombeo (E1) fué perforado en 24" hasta los 25,4 m y de allí hasta la roca en 20" de diámetro. El tramo superior fué equipado con un ranurado de 20" y el inferior con uno de 16", disponiéndose un filtro de grava seleccionada de 2" de espesor.

Para el control de la napa durante el bombeo se ejecutaron 6 perforaciones adicionales de observación (piezómetros P1, P2, P3, P51, P52, P53).

La prueba de bombeo se ejecutó en dos etapas, siendo la primera una prueba preliminar de corta duración en la cual se bombeó un gas de 124 lt/s durante tres horas, y posteriormente con escalones de 85, 105 y 132 lt/s. En la segunda etapa se bombearon 150 lt/s durante 48 horas, seguido de tres escalones de 85, 115 y 154 lt/s durante 4,00, 4,00 y 3,20 horas, respectivamente.

Ambas pruebas fueron interpretadas considerando condiciones de desequilibrio (relaciones de Theis), llegando a obtener para el fluvial virgen un coeficiente de permeabilidad promedio del orden de  $2,25 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Esta prueba de bombeo fué motivo de una publicación (Martínez, 1971) en la cual se la describe y discute en detalle.

A. Martínez L. (1971) "Discusión de una prueba de bombeo realizada en los fluviales del río Maule". Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Primer Coloquio Nacional, Junio-Julio 1971, Santiago-Chile Separata.

##### - Fase 2

En esta etapa del ensayo de inyectabilidad se planteó la necesidad de definir dos problemas básicos:

- Equipo y sistema de perforación.
- Equipo y sistema de inyección.

Para la perforación se ocuparon 3 equipos diferentes, a saber: una sonda rotativa Frank de gran potencia, una sonda rotativa Longyear 34 de mediana potencia y una perforadora BBE-53 Atlas Copco, especialmente diseñada para perforar terrenos de sobrecarga. De estos equipos fué descartada la sonda Frank por fallas mecánicas y por ser muy difícil su operación. La perforadora BBE-53, que en un principio se estimó como el equipo más adecuado por ir entubando la perforación a medida que se avanza, tuvo que descartarse debido a su falta de potencia y diámetro reducido de la entubación.

La sonda Longyear 34 es un equipo moderno especialmente diseñado para trabajar con rockbit y, aunque no tiene mucha potencia y su carrera de trabajo es corta, se manifestó apta para realizar el trabajo y se ha seguido empleando hasta la actualidad. Como fluido de refrigeración y de transporte de sedimento se utilizó una mezcla de bentonita y agua con algunos aditivos especiales. Este barro de perforación tiene además la propiedad de sostener las paredes de la perforación formando una costra protectora (cake) que impide el derrumbe de las paredes.

Una vez terminada la ejecución de cada perforación, que se profundizaba hasta 3 metros en la roca base, se precedía a su habilitación para la inyección introduciendo un tubo de 1 1/2" (con perforaciones cada 33 cm recubiertas por un manguito de goma) dentro de la perforación previamente rellenada con una lechada de arcilla-cemento de gran viscosidad y baja resistencia ("Coulis de gaine"). Este manto de lechada una vez fraguado impide las fugas por el contorno del tubo, pero es lo suficientemente débil para ser roto por la presión de inyección y permitir así el paso de la lechada en sentido radial.

Para realizar las inyecciones fué necesario instalar una central de inyección, ubicada a 300 m de la zona del ensayo, con dos equipos completos de inyección compuestos por un mezclador de alta turbulencia, un agitador y una bomba SIF de alta presión.

En la lámina N° 2 aparecen gráficos de admisiones promedias de las perforaciones, notándose dos zonas de baja admisión: entre 0 y 10 m y entre 25 y 35 m. La baja admisión del tramo superior se explica por problemas de resurgencias superficiales de las lechadas, lo que se tradujo en una mala inyección. El segundo tramo corresponde casi exactamente a una zona arenosa que necesariamente debe tener admisiones menores.

Como norma general, para evitar pérdidas innecesarias de lechadas, se limitó la admisión a 1 200 lts por cada tramo de 33 cm. El total inyectado en esta etapa fué de 573 m<sup>3</sup> de lechada, lo que corresponde a 5 100 bolsas de cemento.

### - Fase 3

Para medir la efectividad de las inyecciones realizadas en la fase 2, se realizó una nueva prueba de bombeo en el pozo E1, que había sido protegido rellenándolo con arena fina para impedir su colmatación con lechada. Esta prueba también se realizó en 2 etapas: en la primera se bombearon 23,6 lt/s durante una hora, subiendo luego a 37,2 y a 54,8 lt/s por poco más de una hora. En la segunda etapa se bombearon 59,5 lt/s durante 10 horas y 35 minutos. Para el control de esta prueba se contó con 9 piezómetros de observación, agregándose el P4, P5 y P6 a los ya existentes.

De la observación del comportamiento del pozo y de los piezómetros durante el bombeo se pudo concluir que el ranurado y el filtro se encontraban parcialmente colmatados con lechada, produciendo enormes pérdidas de carga. Este problema ya se había vislumbrado durante la limpieza de la arena de protección del pozo, pues se encontraron muestras de lechada en su interior.

La colmatación del ranurado impidió provocar depresiones apreciables en la zona controlada por los piezómetros. Haciendo un análisis bajo condiciones de desequilibrio se obtuvo para el terreno parcialmente tratado un valor del coeficiente de permeabilidad de  $3.5 \cdot 10^{-3}$  m/s, valor que es prácticamente similar al obtenido para el terreno virgen. Esto estaría indicando que una cortina monolineal con perforaciones cada 6 metros tiene una eficiencia casi nula, ya que aparentemente no se ha logrado una reducción del coeficiente de permeabilidad medio del fluvial.

### - Fase 4

Con la experiencia adquirida durante la primera etapa de inyecciones, se inició esta fase ya sin dudas en cuanto al equipo y procedimiento a seguir, lo que permitió mejorar mucho los rendimientos. Se realizaron e inyectaron las perforaciones 7 al 12, completándose la línea exterior con perforaciones cada 3 metros.

Teniendo en cuenta las inyecciones ya realizadas, se limitó esta vez el volumen máximo por tramo a 900 lt. El volumen total inyectado en esta etapa fué de 245 m<sup>3</sup>, lo que es inferior a la mitad de lo inyectado en la fase 2.

En la lámina N° 2 se indican las admisiones promedias en profundidad de la perforación. Ahí se puede ver que se repite la distribución de admisión de acuerdo a la estratigrafía y condiciones del terreno, ya encontrada en la fase 2.

### - Fase 5

Teniendo en cuenta la colmatación producida en el pozo E1, no prevista en el proyecto primitivo, fué necesario realizar un nuevo pozo (E2) para controlar el resultado de las inyecciones realizadas hasta la fase 4.

La prueba de bombeo de la fase 5 contó con 12 piezómetros de observación, ya que a los 9 anteriores se agregaron 3 ubicados en el interior del pozo E1 a distintas cotas, con el fin de detectar diferencias acuíferos.

Esta prueba de bombeo se realizó en dos etapas. La primera se llevó a cabo a mediados de Diciembre de 1972, en período de deshielo, encontrándose la napa 3 metros más alta que en las pruebas anteriores. En esta etapa pudo comprobarse que el acuífero superior, que se encontraba tratado en forma deficiente según ya dijimos, tenía una gran influencia sobre la respuesta del pozo, influencia que fué muy difícil e incierta de precisar.

Debido a lo anterior, se repitió la prueba a fines de Febrero de 1973 cuando el nivel estático de la napa hubo bajado lo suficiente como para considerar que la influencia del acuífero superior no era tan importante.

La interpretación de los resultados de esta prueba se hizo considerando tanto condiciones de desequilibrio como de equilibrio, lográndose a obtenerse para el coeficiente de permeabilidad un valor medio del orden de  $7 \cdot 10^{-5}$  m/s.

Los diferentes bombeos realizados en esta prueba muestran que al cabo de un tiempo moderado se alcanza la condición de equilibrio.

## 6.- CONCLUSIONES

Aunque sería pretencioso querer sacar conclusiones definitivas de este ensayo de inyectabilidad que aún se está desarrollando, creemos que ya hay muchas conclusiones parciales que se pueden anotar.

Estas conclusiones se pueden agrupar como sigue:

### Del equipo y sistema de perforación

- a) El equipo empleado (fué una sonda Longyear 34) aunque fue capaz de ejecutar el trabajo, demostró dos fallas importantes para la perforación de la cortina definitiva. Una corresponde a la falta de potencia, que se puede solucionar con un modelo de mayor potencia, y la otra, más básica, se debe a la carrera corta de perforación que incide directamente

en el rendimiento. Para solucionar esta falla es preciso cambiar de tipo de sonda. Se puede escoger una con motor de rotación hidráulico montado en un riel, con carrera de 3 metros lo que lleva a eliminar al máximo las pérdidas de tiempo.

- b) El sistema de perforación, usando como fluido un barro a base de bentonita, reveló ser suficiente a condición de cuidar al máximo el sistema de regeneración del barro, que es de vital importancia.

#### Del equipo y sistema de inyección

- a) La bomba de inyección utilizada fué una SIF accionada con motor de aire, con pistones de 2" y de una presión máxima de 100 kg/cm<sup>2</sup>. Se encontraron dificultades para inyectar caudales muy pequeños, debido a la dificultad para regularlos. Para solucionar este inconveniente se puede recurrir a una bomba similar pero de accionamiento hidráulico (como la PIHP 100 o la Clivio) y con pistones de menor diámetro.
- b) La central de inyección debe organizarse de modo que la mayoría de los procesos sean automáticos para así mejorar los rendimientos y obtener una mejor utilización del personal especializado.
- c) El sistema de inyección utilizado de tubos con manguitos y obturador doble de campana, reveló ser en general bastante eficiente a condición de que el tubo sea lo suficientemente resistente para soportar la presión de ruptura del manto de lechada circundante, y lo suficientemente liso para permitir un deslizamiento suave del obturador.

#### Del control de los resultados de las inyecciones

- a) La prueba de bombeo realizada en pozos ubicados en la zona de inyección son capaces de controlar con relativa precisión los resultados de una inyección.
- b) Durante las pruebas se constató fehacientemente que tanto el pozo de bombeo como los piezómetros de control estaban expuestos a quedar inutilizados por la introducción de lechadas que viajan por vías privilegiadas. Por lo tanto se concluye que después de cada inyección es preciso rehacer tanto el pozo como los piezómetros para obtener resultados confiables.

#### De los resultados obtenidos

- a) El tratamiento de los 10 primeros metros ha sido deficiente, debido principalmente a las resurgencias por la falta de confinamiento. Este problema se podría evitar en gran medida con la nueva bomba de inyección mencionada al poder inyectar más lentamente.

- b) La eficiencia de una cortina monolínea con perforaciones de inyección cada 6 metros es prácticamente nula. El coeficiente de permeabilidad medio del fluvial inyectado en esta forma es similar al del suelo virgen.
- c) La eficiencia de una cortina monolínea con perforaciones cada 3 m inyectadas con lechada de arcilla cemento es bastante aceptable.

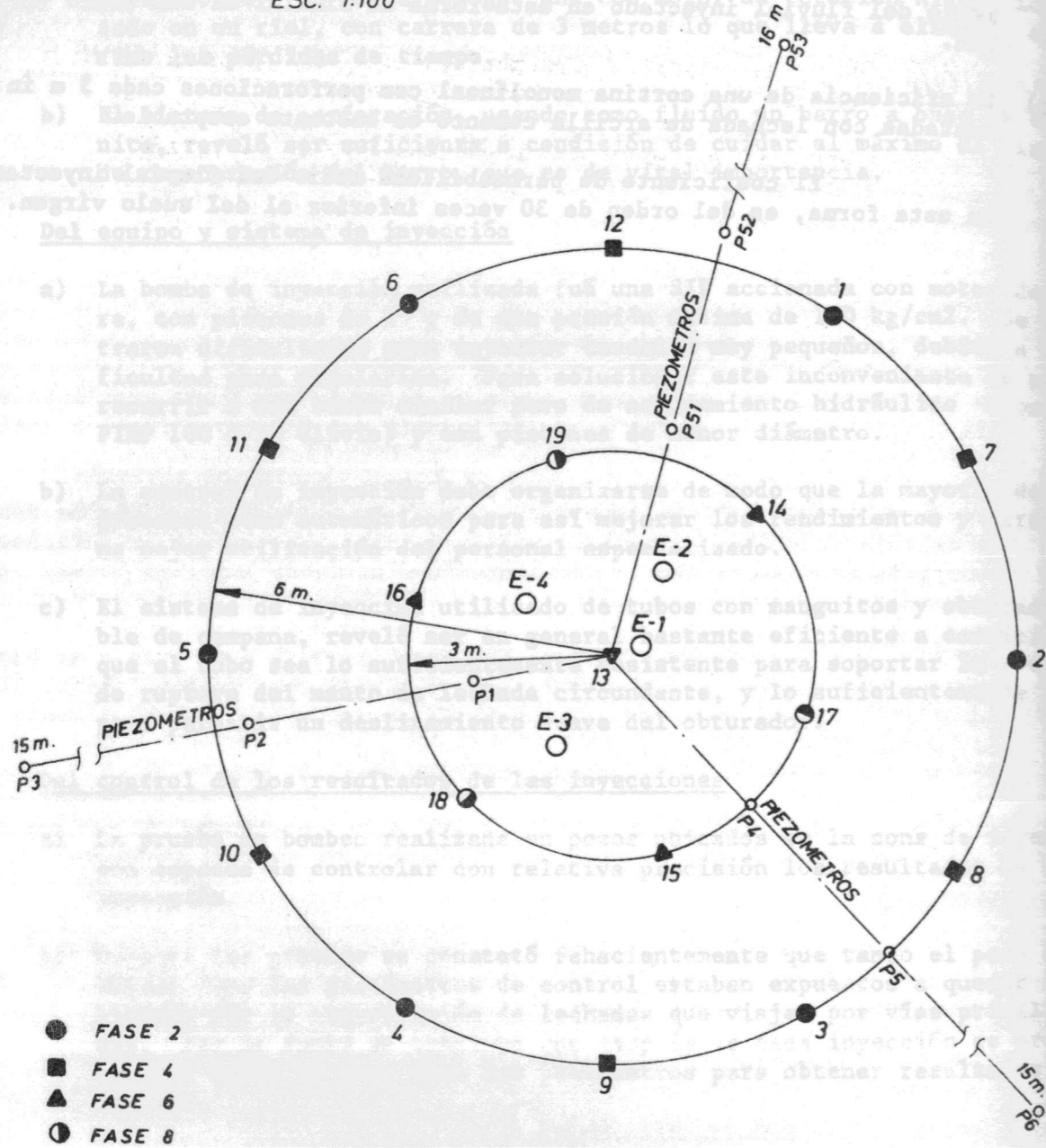
El coeficiente de permeabilidad medio del fluvial inyectado en esta forma, es del orden de 30 veces inferior al del suelo virgen.



CENTRAL COLOMBIANA DE INVESTIGACIONES Y ENSAYOS DE INYECTABILIDAD  
 ENSAYO DE INYECTABILIDAD  
 LAMINA N° 2

**DISPOSICION EN PLANTA**

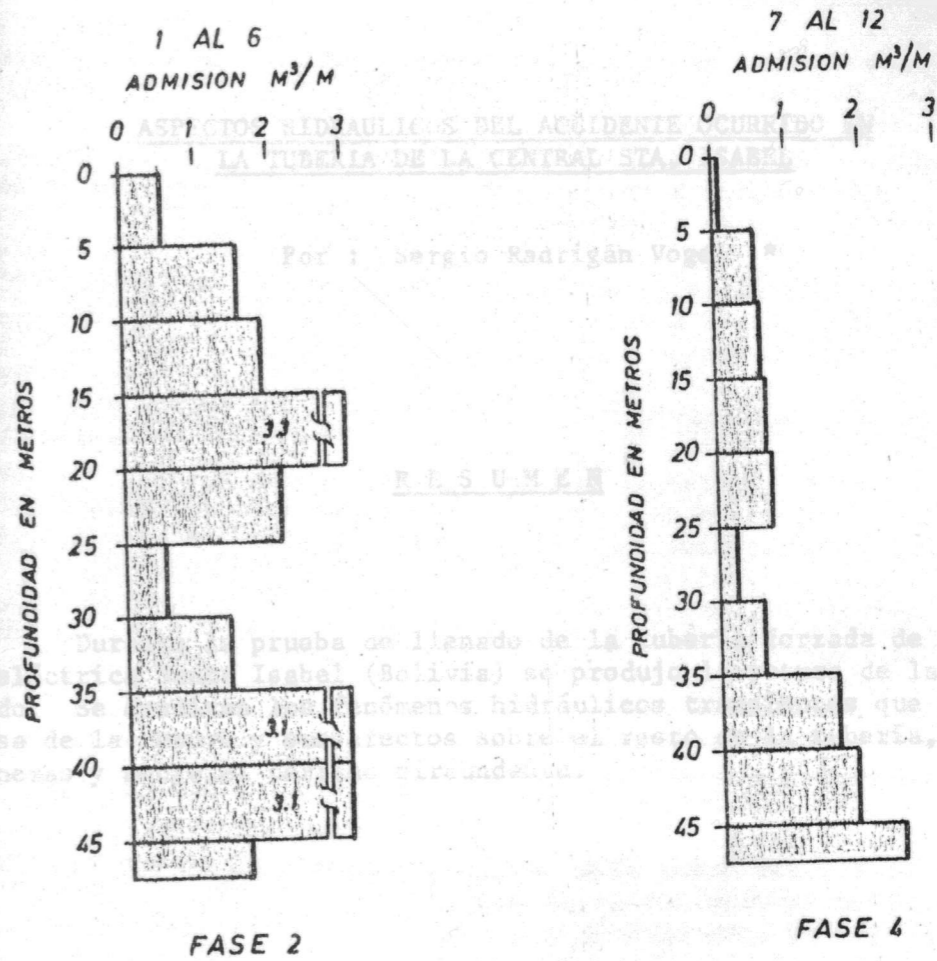
ESC. 1:100



**CENTRAL COLBUN  
ENSAYO DE INYECTABILIDAD**

LAMINA Nº1

**ADMISION PROMEDIO DE LAS PERFORACIONES**



**CENTRAL COLBUN  
ENSAYO DE INYECTABILIDAD**

LAMINA Nº2