

60
24



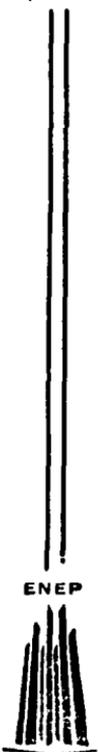
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
" ARAGON "**

**FALLA DE ORIGEN
"TRATAMIENTO DE CIMENTACION
EN PRESAS"**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
JORGE RAMIREZ MEJIA**



ARAGON

SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEXICO,

1995



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCION

JORGE RAMIREZ MEJIA
P R E S E N T E . .

En contestación a su solicitud de fecha 4 de junio del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor Ing. RODRIGO MURILLO FERNANDEZ pueda dirigirle su trabajo de Tesis denominado "TRATAMIENTO DE CIMENTACION EN PRESAS" con fundamento en el punto 6 y siguientes del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL-ESPÍRITU"

San Juan de Aragón, Edo. de Méx., Junio 28 de 1993.

EL DIRECTOR


ROBERTO C. MERRIFIELD CASTRO
DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS

- c c p Lic. Alberto Ibarra Rosas, Jefe de la Unidad Académica
- c c p Ing. José Paulo Mejorada Mota, Jefe de Carrera de Ingeniería Civil.
- c c p Ing. Manuel Martínez Ortiz, Jefe del Departamento de Servicios Escolares
- c c p Ing. Rodrigo Murillo Fernández, Asesor de Tesis

CCMC/AIR/JJ'

A la memoria de mi madre:

Sra. Baudina Mejía de Ramírez

A mi padre por el apoyo y confianza que siempre tuvo conmigo:

Sr. Martín Ramírez Yañez

A mis hermanos por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles:

María Guadalupe y Alfredo

A la memoria de mi tía:

Sra. Heriberta Mejía de Callejas

A mis tíos por su ayuda y consejos que en todo momento me externaron:

Sra. Juana Mejía de Callejas

Sr. Arnulfo Callejas Mejía

Sr. Pedro Callejas Mejía

A la Srita. M. en I. Karla Ivonne Gutiérrez Vázquez por su cariño y paciencia durante todo este tiempo.

A mis amigos por brindarme su amistad incondicional:

Alberto Saenz Suarez, Mauricio Valencia Bandera, Alfredo Hernandez Villeda,
Pedro Alcalá Mendiolá, Ramón Cruz Hernández, Gabriel Cruz Velazquez, Marco
A. Gutierrez Sanchez, Daniel Alarcon Reyes, Jesus Contreras Avila.

Quiero agradecer en forma muy especial al Ing. Rodrigo Murillo Fernández la paciencia para llevar a cabo este trabajo, para el mi respeto y admiración.

TRATAMIENTO DE CIMENTACIONES EN PRESAS

I. INTRODUCCION

II. ANTECEDENTES

2.1 ESTRUCTURAS DE UNA PRESA

III. ESTUDIOS PREVIOS

3.1 ESTUDIOS PRELIMINARES

3.1.1 Estudio topográfico

3.1.2 Estudio geológico

3.1.2.1 Exploraciones

3.1.2.2 Trincheras

3.1.2.3 Socavones

3.1.2.4 Sondeos

3.2 ABSORCION DE AGUA

3.2.1 Método de Lugeón

3.2.2 Método de Lefranc-Mandel

3.3 TRABAJOS PRELIMINARES

3.3.1 Localización del eje

3.3.2 Limpia superficial

3.3.3 Excavación de regularización

3.3.3.1 Divergencia en laderas

3.3.3.2 Corrección del perfil transversal

3.3.3.3 Escalones y depresiones

IV. PROYECTO PRELIMINAR

4.1 INYECCIONES EN ROCA

4.1.1 Objetivo

4.1.2 Programa de inyecciones

4.1.3 Tapete

4.1.4 Pantalla

4.1.4.1 Etapas de inyectado

4.1.4.2 Procedimientos de inyectado

4.1.5 Lavado

4.1.6 Presión

4.1.7 Factores de presión

- 4.1.8 Proceso de inyectado
- 4.1.9 Equipo
- 4.2 INYECCION EN ALUVIONES
- 4.2.1 Introducción
- 4.2.2 Algunos procedimientos para impermeabilizar aluviones
 - 4.2.2.1 Trinchera de arcilla compactada
 - 4.2.2.2 Muro de lechada plástica
 - 4.2.2.3 Pantalla flexible o de lodos
 - 4.2.2.4 Inyectado de aluviones
- 4.2.3 Diseño y control de inyectado. Método GIN

V. EVALUACION DE RESULTADOS

- 5.1 PERMEABILIDAD
- 5.2 GRANULOMETRIA
- 5.3 VOLUMEN DE FILTRACIONES
- 5.4 FORMULA DE DACHLER
- 5.5 LECHADAS
 - 5.5.1 Lechadas inestables
 - 5.5.2 Lechadas estables cemento-bentonita
 - 5.5.3 Lechadas cemento-bentonita-silicato
 - 5.5.4 Lechadas cemento-bentonita-silicato-acetato
- 5.5 FILTRACIONES POSTERIORES AL INYECTADO
- 5.6 EJEMPLO DE APLICACION

VI. CONCLUSIONES

VII. BIBLIOGRAFIA

I. INTRODUCCION

Las presas de cualquier tipo son estructuras de comportamiento estructural e hidráulico complejo, esto explica que los métodos para diseñarlas hayan progresado tan lentamente y se haya tenido que pagar en ocasiones el alto precio de una falla catastrófica. Mientras que las presas fueron ubicadas en boquillas geológicamente favorables y su altura fue reducida, sin la necesidad de predecir con detalle su comportamiento, pues para su diseño y construcción fue válido recurrir a experiencias previas. Sin embargo, al requerirse construir presas en boquillas de geología cada vez más desfavorables y complejas a mayores alturas de cortinas y al aumento del número de variables, que influyen significativamente en el comportamiento creció el grado, que el diseño vino a depender de las peculiaridades de cada caso más que de las semejanzas con otras estructuras del mismo tipo. Como se puede observar es un tema amplio y muy delicado en el cual, se desarrollan diversas etapas con estricto apego a especificaciones y normas de calidad existentes.

En el presente trabajo se tratan los temas que permiten tomar una decisión para realizar el tratamiento de la cimentación más conveniente. En primer término, se describen los estudios previos con la finalidad de visualizar los diferentes estudios de detalle que se deben realizar, como son los geológicos, topográficos y pruebas de absorción de agua. Más adelante, se trata el tema de inyecciones con lechadas tanto en roca como en aluviones; otro tema de importancia que se aborda, es el control de inyecciones por medio de computadora.

Finalmente se citan dos ejemplos, el primero es la presa "Boca del tesoro" en Zacatecas, que sirve como ejemplo para comprobar la importancia del tratamiento que se realiza en las cimentaciones, con valores del volumen de filtraciones antes y posteriores al inyectado. El segundo ejemplo, es la presa "El Salto" en Valle de Guadalupe, Jalisco, donde se describe cerca del tratamiento de la cimentación desde las pruebas de absorción, hasta la inyección del tapete y pantalla de inyecciones.

II. ANTECEDENTES

En los macizos rocosos y en los suelos aluviales las inyecciones de mezclas o lechadas se utilizan para reducir la permeabilidad (inyecciones de impermeabilización) y aumentar la resistencia y el módulo elástico (inyecciones de consolidación).

Para alcanzar los objetivos de la inyección deben rellenarse los huecos del medio en tratamiento con un líquido (lechada o mezcla) que se solidifica con el tiempo, el cual puede ser una suspensión (lechada de cemento), una solución (productos químicos) o un gel (arcillas).

Los terrenos aluviales, por su alta relación de vacíos y su heterogeneidad requieren de un reconocimiento especial y casi siempre deben ser inyectados para su impermeabilización.

El estudio de la porosidad, el estado de fisuración y la permeabilidad de los macizos rocosos se lleva a cabo mediante pozos, galerías y zanjas; como este procedimiento es costoso y su ejecución lenta es frecuente recurrir a perforaciones con obtención de núcleos para sustituir o completar la información requerida.

Para determinar la permeabilidad del terreno que va a ser tratado se efectúa la prueba Lugeon en macizos rocosos fisurados y la tipo Lefranc en suelos aluviales.

En el estudio previo de toda la zona que se pretende tratar, deben efectuarse pruebas de permeabilidad hasta una profundidad en la cual esta propiedad ya no sea importante. En cimentaciones de presas en terrenos aluviales, es preciso hacer sondeos sistemáticos con ensayos de agua en todo el espesor del depósito; sin embargo, no son recomendables los ensayos a más de 100 m de profundidad.

Las fórmulas de Boussinesq, que permiten estimar la distribución de esfuerzos en un medio seminfinito, elástico e Isótropo, se aplican para determinar la profundidad hasta la cual los esfuerzos inducidos por la carga superficial son importantes. Esta profundidad es la que se adoptará para el reconocimiento, siempre que no sea menor que la mitad del ancho de la cimentación.

2.1 ESTRUCTURAS DE UNA PRESA

Una presa es una estructura que tiene por objeto crear un almacenamiento de agua, derivar un río o para crear un lago artificial, para captar los escurrimientos y regar tierras y generar energía, o bien, dotar de agua potable a poblaciones o centros industriales, también para regularizar el flujo de una corriente que provoca inundaciones en poblados. De lo anterior se infiere que es el resultado de un estudio general, en el que intervienen las características del río, la geología de la región, la existencia de sitios apropiados para crear el embalse y cimentar la obra.

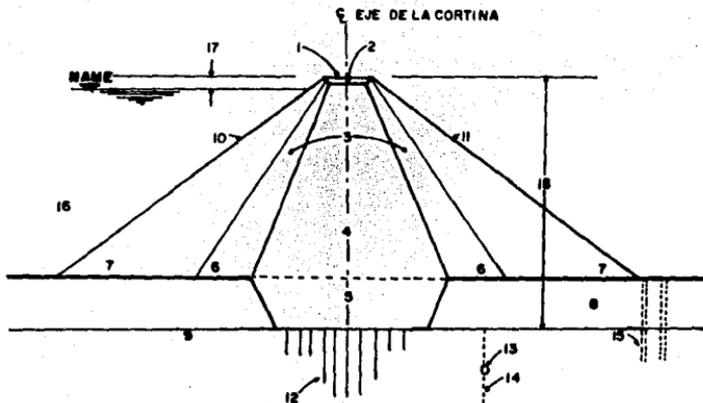
En la figura II.1 aparecen los términos más frecuentes que describen una cortina.

- **Boquilla.** Lugar donde se construye la cortina.
- **Sección de la cortina.** Cualquier corte transversal de la presa.
- **Corona o cresta.** Es la superficie superior de la cortina, es parte de la protección de la presa contra oleaje y sismo.
- **Talud.** Cualquier plano que constituye una frontera entre los materiales.
- **Corazón impermeable.** Es el elemento de la presa que cierra el Valle al paso del agua.
- **Resaldos permeables.** Masas granulares que integran, con el corazón impermeable la sección de la cortina.
- **NAME.** Nivel de aguas máximas extraordinario, cuando el agua del vaso se encuentra en su máximo nivel, además funcionando el vertedor.
- **Obra de desvío.** Es una estructura que tiene como finalidad el encauce del río durante la construcción de la presa.
- **Obra de excedencia.** Es una estructura que tiene como finalidad el desalajo de las aguas excedentes de la capacidad máxima de la obra.
- **Obra de toma.** Su función dentro de la obra es la obtención controlada del agua a la casa de máquinas para la generación de energía o irrigación.

En la figura II.2 se muestran los tipos de cortinas menos típicas utilizadas, como son:

- **Presas de relleno hidráulico**
- **Presas homogéneas**

- Presas homogéneas con filtros
- Presas de materiales graduados
- Presas de enrocamiento con corazón impermeable
- Presas con delantal o con pantalla
- Presas de enrocamiento con pantalla de concreto
- Presas con sección de gravedad (rígidas) de concreto o mampostería

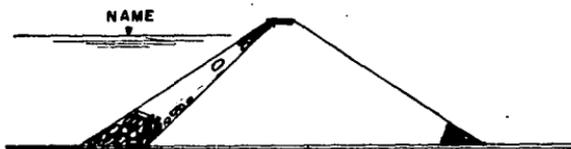


1 Cresta o corona	7 Enrocamientos	13 Galerías
2 Revestimiento	8 Depósito aluvial	14 Drenes
3 Filtros	9 Reca basal	15 Pasos de olivo
4 Carozón o núcleo impermeable	10 Talud aguas arriba	16 Embalse o vaso
5 Trinchera	11 Talud aguas abajo	17 Bordo libre
6 Transiciones	12 Pantalla de inyecciones	18 Altura de la cortina

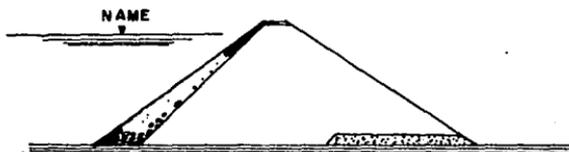
FIG. II.1 DEFINICIONES DE TERMINOS.



PRESA DE RELLENO HIDRAULICO



PRESA HOMOGENEA



PRESA HOMOGENEA CON FILTRO HORIZONTAL

FIG. II.2 TIPOS DE CORTINAS MENOS TIPICAS



PRESA DE MATERIALES GRADUADOS

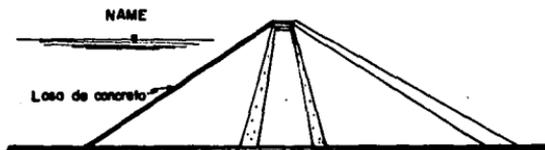


PRESA DE ENROCAMIENTO CON
CORAZÓN IMPERMEABLE



PRESA CON DELANTAL IMPERMEABLE

FIG. II.2a TIPOS DE CORTINA MENOS TÍPICAS



**PRESA DE ENROCAMIENTO CON
PANTALLA DE CONCRETO.**



**PRESA DE SECCION DE GRAVEDAD DE
CONCRETO O MAMPOSTERIA.**

FIG. II.2.b TIPOS DE CORTINA MENOS TIPICAS

III. ESTUDIOS PREVIOS

3.1 ESTUDIOS PRELIMINARES

3.1.1 Estudios topográficos

La primer actividad es comunicar la zona en estudio con la red ferroviaria o caminera, por lo que es necesario construir caminos de penetración para transportar equipo ligero, provisiones y mantener contacto con las brigadas de estudio.

Después de un reconocimiento terrestre o de preferencia aéreo, se fijan los monumentos básicos para apoyar los levantamientos topográficos. Es conveniente contar con la triangulación geodésica; la longitud de los lados depende de las características del terreno.

Para diseñar las estructuras de una presa es necesario contar con la topografía detallada del sitio, en un tramo que no sólo abarque obra de toma y vertedor, sino también caminos de construcción, ataguías, obra de desvío. Es fundamental que estos trabajos se ligen a la triangulación geodésica y se establezca un número suficiente de bancos. Es usual realizar este trabajo con plancheta, pero en ocasiones es conveniente recurrir a la fotogrametría terrestre.

3.1.2 Estudios geológicos

Se debe elaborar un mapa de la geología estructural de la región y verificar, en el tramo de río escogido para la boquilla, si existen condiciones que no concuerdan con los lineamientos generales, mediante fotografías aéreas, planos topográficos y el reconocimiento terrestre del sitio y del embalse.

En esta fase preliminar es necesario identificar las formaciones, localizar fallas, sistemas de fracturamiento, planos de contacto y plegamientos, observar el temperismo de las rocas y la carsticidad en su caso; en fin, analizar todas aquellas características que interesan al proyectista de la obra hidráulica. El informe respectivo con los planos del levantamiento topográfico conducen a la selección del eje de la cortina y a recomendaciones generales sobre la obra de toma, vertedor de excedencias y obra de desvío.

3.1.2.1 Exploraciones

Deben realizarse para determinar el corte geológico en la boquilla y lugares de las obras complementarias, y los estudios para determinar las propiedades mecánicas y características de las rocas, tales como permeabilidad, fracturamiento, intemperismo, etcétera.

El objetivo es verificar si existen o no condiciones desfavorables no previstas en el reconocimiento superficial, ejemplos: un valle sepultado en uno de los empotramientos con rellenos muy permeables; la existencia de una falla activa; depósitos de gran espesor en el río; intemperismo extraordinario en las laderas; esfuerzos residuales de gran magnitud debidos a tectonismos; flujo plástico (creep), fuerte permeabilidad en las rocas volcánicas jóvenes o callzas cársticas; presencia de pizarras fisuradas en la boquilla; comprobación de que el sitio escogido forma parte de un gran derrumbe o que en la vecindad se registraron fenómenos de este tipo.

La experiencia ha demostrado que las primeras exploraciones, cuidadosamente analizadas, son las que permiten catalogar los problemas con bastante precisión; sin embargo, debe reconocerse que en ciertos casos, al construir la obra, se encuentran circunstancias no previstas por los estudios. Esto puede ser el resultado de negligencia, de una exploración muy reducida o del exceso de confianza en la bondad de los estudios; pero el ingeniero debe considerar que los problemas geológicos son, en general, extraordinariamente complejos y recordar que el río escurre por zonas de debilidad de la corteza terrestre.

3.1.2.2 Trincheras

Consisten en excavaciones realizadas a mano, para descubrir la roca que normalmente se encuentra cubierta por una capa de tierra producto del intemperismo o derrumbes. La ventaja de este procedimiento de exploración es que pueden estudiarse las características del relleno y la roca subyacente en forma directa.

(Fig. III.1)

3.1.2.3 Socavones

Es semejante al anterior tipo de exploración, que penetra en las laderas de la boquilla excavando un pequeño túnel, por ejemplo de 1.5 m de ancho y 2 m de alto; el objeto es: a) determinar el tipo de formación, fracturamiento, existencia de fallas, b) obtener muestras de las rocas para ensayarlas en laboratorio y c) realizar pruebas

de campo a fin de conocer la permeabilidad, la resistencia y la compresibilidad de la roca.

Son exploraciones costosas, requieren equipos simples de barrenación y el uso de explosivos; la extracción se hace generalmente a mano; en ciertos casos y particularmente a la entrada, es necesario colocar ademe. Deben lavarse las paredes y el techo para inspeccionar debidamente la roca. En estos levantamientos, el geólogo hace el levantamiento de grietas, determina rumbos y echados, observa los rellenos de las grietas y dibuja el plano geológico de la boquilla. Fig. 2.

3.1.2.4 Sondeos

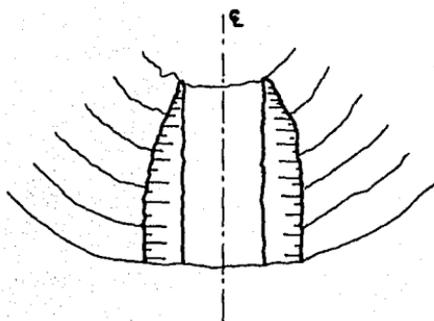
Son perforaciones con la extracción de corazones de roca; los equipos son rotarios y operan con brocas de diamante o de acero al tungsteno y agua a presión. En la siguiente tabla se indican algunos tamaños usuales para este tipo de trabajo.

BROCA	DIAMETRO APROX. DEL AGUJERO EN PULG.	DIAMETRO APROX. DEL CORAZON EN PULG.
EX	1 1/2	7/8
AX	1 7/8	1 1/8
BX	2 3/8	1 5/8
NX	3	2 1/8

Estas perforaciones se utilizan para realizar determinaciones de permeabilidad, sondeos eléctricos o en algunos casos fotografiar grietas o contactos con cámaras especiales.

El número, localización, dirección, inclinación, profundidad y diámetro de las perforaciones, depende del tipo de formación geológica, la disposición de las fracturas y del objeto perseguido. No se pueden establecer criterios generales, pues cada caso es diferente.

Un problema difícil y delicado es la determinación del espesor y la obtención de muestras de los depósitos aluviales que se encuentran en el cauce. Se usan máquinas rotarias, ademandando el pozo; pero, en otros casos, es adecuado el equipo que trabaja por percusión y el empleo de lodo bentonítico. Las muestras que se obtienen distan mucho de proporcionar una correcta idea de la composición de los mencionados depósitos; cuando estos contienen capas delgadas de arena o limo, es difícil registrarlas. Salvo raras excepciones, se logra conocer las condiciones imperantes cuando se abre la trinchera a través del río o mediante exploraciones con equipos especializados que utilizan brocas de gran tamaño, cucharas diseñadas para extraer materiales granulares, muestreadores de pistón y herramientas pescadoras.



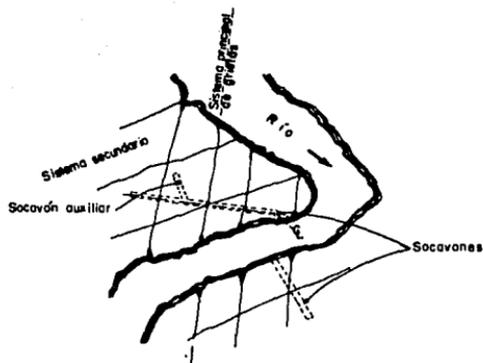
PLANTA



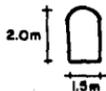
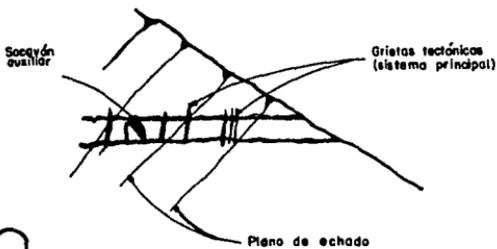
CORTE POR ϵ

FIG. III.1

TRINCHERA



P L A N T A



CORTE POR ϵ SOCAVON

FIG. III. 2 SOCAVONES

3.1.2.5 Métodos geofísicos

El más usado consiste en medir la velocidad de propagación de una onda provocada con explosivos, a través de las formaciones de las laderas o fondo del río. Como esta velocidad depende de las propiedades elásticas y el peso volumétrico de los materiales que atraviesa (roca ígnea, sedimentaria, relleno, etc.) es posible obtener una idea de la estratigrafía del sitio y la presencia de fallas. Cuando no hay un contraste marcado en la propiedades mecánicas, la información es confusa y de poco valor. Otro de los procedimientos se basa en las desviaciones de la gravedad en el lugar, tiene limitaciones aún mayores que el anterior y se usa sólo en casos muy particulares de la exploración geológica.

3.2 PRUEBAS DE ABSORCIÓN DE AGUA

Es frecuente que, al no poder obtener muestras inalteradas o suficientemente representativas, se tenga que recurrir a pruebas de campo para el mismo fin. Las pruebas de campo tienen que adaptarse a las peculiaridades de cada obra y, en general, no es posible ni deseable establecer un procedimiento estándar para su realización.

Las pruebas de permeabilidad de laboratorio son útiles cuando la estructura que se estudia está formada por un material que puede considerarse como homogéneo, isotrópico o anisótropo, como en el caso del corazón impermeable de una cortina construido con la tierra de un banco de préstamo homogéneo. En cambio, en las formaciones naturales, generalmente compuestas por mantos distintos, con variaciones importantes tanto en la disposición de los mismos como en las características de los materiales, es difícil estudiar el escurrimiento a partir de un número limitado de ensayos sobre muestras inalteradas; en mantos de arena y grava es casi imposible obtener especímenes inalterados, por lo que es necesario recurrir a las pruebas de campo.

En la siguiente tabla, se expone la aplicabilidad de los diversos tipos de prueba de permeabilidad a los suelos aluviales típicos de las boquillas de las presas, tomando en cuenta ciertas características del problema bajo estudio.

NIVEL FREÁTICO	MATERIAL	PRUEBA LE-FRANC	BOMBEO CON MEDICION DEL CONO DE ABATIMIENTO:	BOMBEO CON COLOCACION DE PIEZOMETRO.	ABSORCION Y FILTRACION	TRAZADOS RADIOACTIVOS.	MICRO MOLINETE
Por encima del nivel freático	Homogéneo				X		
	Heterogéneo				X		
Por debajo del nivel freático	Homogéneo	X	X				
	Heterogéneo	X		X		X	X

Además de las pruebas mencionadas en la tabla anterior se presenta la prueba de permeabilidad Lugeón, generalmente usada para determinar la permeabilidad de masas rocosas, pero aplicable asimismo a materiales granulares parcialmente cementados.

3.2.1 Método Lugeón

La prueba consiste en inyectar agua a presión en tramos de perforación, lo cual tiene por objeto tener una idea aproximada de la permeabilidad en grande, o sea la debida a las fisuras de la roca o del material granular; es posible modificar la longitud de los tramos probados, así como la presión a la que se inyecta el agua. La llamada unidad Lugeón corresponde a una absorción de un litro de agua por minuto, por metro de sondeo, con una presión de inyección de 10 kg/cm².

La longitud de los tramos de perforación en los que se realiza la prueba debe adaptarse a la naturaleza del terreno; en numerosos casos resulta adecuado el empleo de tramos de prueba de longitud reducida (1 metro o aún menos), con objeto de analizar detalladamente zonas de características excepcionales.

El equipo que se utiliza para llevar a cabo esta prueba consiste en:

Un obturador o empaque con su correspondiente tubo de inyección; existen numerosos tipos de obturadores; los mecánicos son adecuados para

perforaciones de diámetro mayor de 90 mm; en los obturadores de copa de cuero, la presión de inyección acuña una serie de copas contra las paredes de la perforación; este tipo de obturador requiere que las perforaciones sean muy regulares y perfectamente cilíndricas; los obturadores neumáticos constan de cubiertas cilíndricas de hule que se expanden con la inyección de aire comprimido; son eficientes pero de colocación delicada. En todos los casos, la longitud del obturador debe ser de 30 cm por lo menos y de preferencia de más de 1 m.

Una bomba necesaria para inyectar agua a presión, debe ser de características tales que no produzca variaciones rápidas de la presión; por tanto, debe usarse una de varios pistones, o de gusano, pero de preferencia una centrífuga de alta presión.

Medidor de gastos de agua. Sólo los medidores de tipo Venturi permiten determinar el gasto con la precisión suficiente (del orden del 1%).

Uno o varios manómetros, que se emplean para medir la presión, deben ser de buena calidad y encontrarse en buen estado; se calibrará cuidadosamente por comparación con un manómetro de precisión.

Agua. El agua de la inyección debe ser limpia y sin materiales en suspensión, para evitar taponamientos y daños en el medidor de gasto de agua. Fig. III. 3

Realización de la prueba

1. Verificado el sello, se anotan los datos correspondientes al tramo probado: profundidad del nivel freático, profundidad y longitud del tramo probado, y diámetro de la tubería de inyección.
2. Se aplica el primer incremento de presión de inyección, se observa el gasto correspondiente y se espera de 5 a 10 min para que éste se estabilice; se anotan los valores del gasto y de la presión correspondiente en el registro de prueba.
3. Se repite el paso anterior hasta llegar a una presión máxima de 10 kg/cm^2 , y se procede, entonces, a aplicar decrementos de presión, anotando asimismo los valores de la presión y del gasto correspondiente. La secuencia de presiones aplicadas pueden ser, por ejemplo, de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 8, 6, 4, 2, 1 kg/cm^2 . Es conveniente trazar el diagrama gasto-presión conforme progresa la prueba para ir observando las particularidades de la curva obtenida. La presión considerada debe ser la presión efectiva P , en la zona de prueba y obtenerse a partir de la presión leída en la superficie, P_m , tomando en cuenta las pérdidas de carga en la tubería y en el obturador, P_c , así como la profundidad del nivel freático con respecto al plano de lectura del manómetro, H_m .

$$P = P_m + \frac{H_m}{10} - P_c$$

4. Se calcula el valor de la absorción en unidades Lugeón, dividiendo el gasto correspondiente a una presión de 10 kg/cm², expresado en l/min, entre la longitud de la zona probada, en metros. Para dar una idea aproximada de lo que representa una unidad Lugeón, se puede establecer que, si se tuviera un medio poroso y homogéneo en lugar de roca fisurada sometida a una prueba de inyección, que diera una absorción igual a una unidad Lugeón, su permeabilidad sería $k = 1.3 \times 10^{-6}$ cm/s.

Interpretación de la prueba

El valor de la absorción no es la única información que se puede obtener de esta prueba; la forma de las curvas gasto-presión es muy variable y depende esencialmente de las características de fisuración de la masa; distribución y espesor de las fisuras, tipo de relleno de éstas, etc. Al aumentar la presión de inyección, se puede observar que la variación del gasto no es lineal, salvo en contados casos; el taponamiento y destaponamiento de las grietas con materiales de relleno provoca a diversas presiones, fenómenos de aumento o disminución de la permeabilidad; esta variabilidad de la permeabilidad de la masa debe tomarse en cuenta para valorar la permeabilidad de diseño.

A menudo se observan pseudodiscontinuidades en las curvas gasto-presión, las cuales pueden atribuirse a la abertura y cierre reversibles de las fisuras que provocan una variación no lineal del gasto con la presión de inyección.
Fig. III. 4

3.2.2 Método de Lefranc - Mandel.

Esta prueba tiene por objeto medir con cierta precisión el coeficiente de permeabilidad en algún punto de un terreno aluvial, o de una roca muy fisurada cuando existe un manto freático que satura al material.

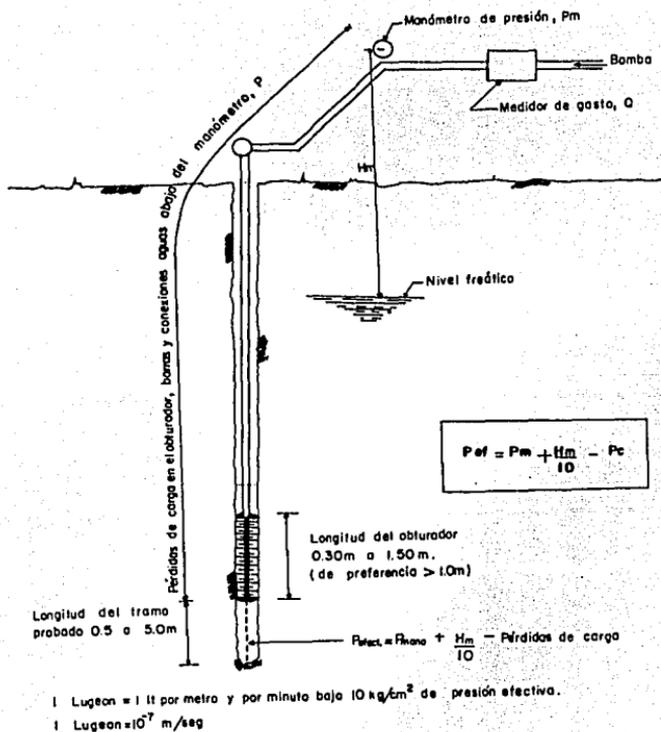
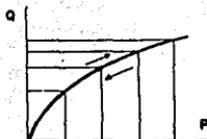


FIG. III. 3

METODO LUGION



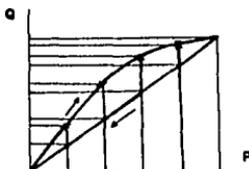
Escurrimiento laminar



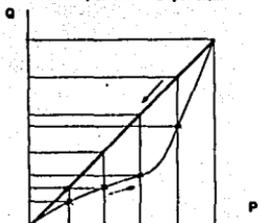
Escurrimiento turbulento
(fisura grande, o falla del
sello del obturador.)



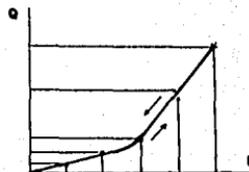
Destapamiento a presión.



Taponamiento a alta presión.



Destapamiento a alta
presión.



Abertura y cierre reversible de
las fisuras.

FIG. III. 4 INTERPRETACION GRAFICA

La prueba consiste en inyectar agua en una cavidad del terreno, de forma geométrica definida, situada debajo del nivel freático, con una carga pequeña y constante de agua; la medida del gasto y de la carga que lo origina permite calcular el coeficiente de permeabilidad, k , en la vecindad de la cavidad, con una buena aproximación.

Fig. III. 5

Si Q es el gasto de inyección y ΔH la carga aplicada, se tiene

$$Q = C K \Delta H$$

donde C es un coeficiente que tiene dimensión de longitud y que caracteriza geoméricamente la prueba (forma de la cavidad y distancia H del tramo de ensaye al nivel freático).

Se demuestra que C tiene los siguientes valores para cavidades de forma geométrica sencilla:

Cavidad en forma de disco de radio r $C = 4r$

Cavidad semiesférica de radio r $C = 2\pi r$

Cavidad esférica de radio r $C = 4\pi r$

Tubo perforado de longitud L y radio r $C = \frac{4\pi}{2 \log \frac{L}{r} - \frac{1}{2H}}$

Equipo

El equipo necesario para llevar a cabo una prueba Lefranc-Mandel consta de los siguientes elementos:

Bomba para agua

Sistema de medición del gasto, que incluye un recipiente elevado con rebosadero, una válvula de agua, un cono al que se adapta una válvula de tres

pasos, un recipiente de volumen conocido y un cronómetro.

Tubería de longitud suficiente para alcanzar la cavidad de inyección.

Sonda eléctrica para medir el nivel de agua en la perforación, con amperímetro de buena sensibilidad.

Procedimiento

La prueba más usual de efectuar la prueba es la siguiente:

1. Se realiza una perforación hasta la profundidad deseada, se estabilizan las paredes mediante un ademe, el cual se rellena con grava limpia de muy alta permeabilidad (grava uniforme de 3 cm, por ejemplo) en una longitud igual a la deseada para la prueba, por lo general un metro. A continuación se levanta el ademe un metro, quedando la perforación lista para realizar la prueba. Se anota el diámetro del ademe.
2. Se mide la profundidad del nivel freático, H_0 , respecto a la parte superior del ademe, repitiendo esta medición a distintos tiempos para asegurarse de que este nivel se ha estabilizado.
3. Se pone en marcha la bomba que alimenta el recipiente elevado con rebosadero.
4. Al derramar el agua del recipiente, se abre la válvula 1 con la válvula 2 conectada a la perforación. El agua que se derrama debe canalizarse hasta cierta distancia del punto de medición, o formar un circuito cerrado con el agua bombeada para no perturbar la prueba.
5. Se mide la variación con el tiempo del nivel de agua, h , en la perforación, respecto a la parte superior del ademe.
6. Cuando dicho nivel queda estabilizado durante 10 min, se anota el valor correspondiente, H_1 .
7. Se conecta la válvula 2 con el recipiente de volumen conocido y se mide y anota el tiempo, t , necesario para llenarlo.
8. Se repite la prueba en el mismo punto, variando los gastos inyectados y midiendo los respectivos niveles estabilizados de agua en la perforación.

9. Se calcula el coeficiente de permeabilidad del material mediante las fórmulas correspondientes al caso de un tubo perforado de longitud L, (generalmente 1 m) y radio r:

$$Q = C K (H_1 - H_0)$$

Por lo tanto

$$K = \frac{Q}{C (H_1 - H_0)}$$

donde

$$C = \frac{4\pi}{L \log \frac{2L}{D} - \frac{1}{2H}}$$

y H la profundidad media del tramo probado con respecto al nivel freático.

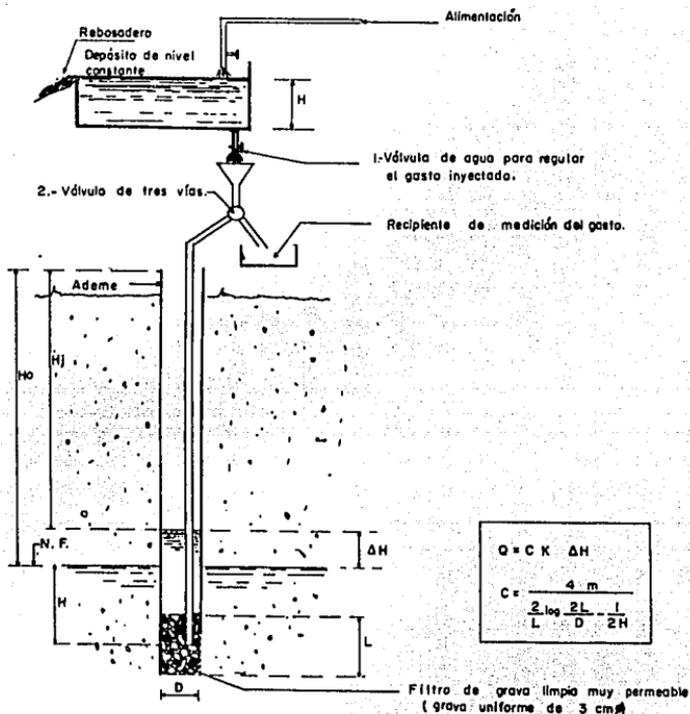


FIG. III.5 PRUEBA LEFRANC- MANDEL

FALLA DE ORIGEN

3.3 TRABAJOS PRELIMINARES

Para la construcción de una presa se requiere de determinados trabajos que dependen del suelo o roca expuestos en la cimentación y de los materiales componentes de la superestructura. En algunos casos, los trabajos mencionados pueden consistir únicamente en la eliminación de la capa vegetal, los suelos alterados por intemperismo y el material de derrumbes. En otros, es necesario descubrir las rocas, remover las masas sueltas, limpiar grietas y rellenarlas con mortero e inyectar a baja presión la parte superior de la formación. Para reducir asentamientos diferenciales en la cortina, ciertas boquillas requieren la modificación de pendientes en las laderas, lo cual implica el uso de métodos especiales de excavación para evitar daños mayores a la roca de cimentación. Hay sitios que presentan divergencias en sus laderas hacia aguas abajo y exigen una adecuada localización del eje, o bien, la ejecución de excavaciones en las laderas a fin de evitar condiciones adversas en el contacto del núcleo impermeable.

3.3.1 Localización del eje

Con base en la topografía detallada del lugar y al tomar en cuenta la geología respectiva con especial atención en el fracturamiento de la roca y la cubierta de material alterado, se analizan diversas alternativas del eje de dicha estructura; de ellas, se elige la de menor cubicación de materiales. Este criterio es aceptable para la etapa preliminar del proyecto en que la información es limitada y se trata de diseñar una presa acorde con los materiales de construcción disponibles en el lugar, la geometría de la boquilla y la disposición de las obras complementarias; cabe recordar que la verdadera topografía, características de grietas y planos de estratificación, aparecerán después de haber realizado la remoción de escombros y capa vegetal que cubren la cimentación.

En general el eje de la cortina formado por materiales térreos es recto; sin embargo, cuando se trata de una sección de enrocamiento con corazón relativamente delgado, vertical o inclinado y además la boquilla es estrecha, se recomienda un eje circular de radio y posición tales que el núcleo impermeable tenga buen apoyo en los empotramientos, para lo cual a veces es necesario recurrir a excavaciones de las laderas para lograr dicho objetivo.

3.3.2 Limpia superficial

La remoción de vegetación, suelo orgánico y escombros sobre la roca es indispensable en todo el desplante de la presa; la limpia gruesa se realiza con tractor o excavadoras y se completa en las zonas del corazón y filtros, con un trabajo minucioso hecho con pico o martillo neumático con objeto de exponer una superficie lo suficientemente limpia para efectuar el tratamiento de grietas, huecos y otros defectos, lo que se logra con la aplicación de agua y aire a presión; es normal realizar la limpia final y el tratamiento detallado, inclusive las inyecciones, a medida que avanza la colocación de materiales en la cortina, para evitar el uso de tarimas u obras falsas sobre las laderas.

3.3.3 Excavaciones de regularización

Tiene como finalidad corregir la divergencia de las laderas hacia aguas abajo y el perfil transversal de la roca eliminando desplomes y escalones; se aplican al desplante del corazón impermeable y filtros; la superficie de contacto en transiciones y enrocamientos, generalmente es objeto de una limpia gruesa y de la eliminación de masas cuya estabilidad, por ser precaria, puede constituir un peligro durante la construcción.

3.3.3.1 Divergencia de laderas

Cuando los empotramientos en el sitio de la presa se abren hacia aguas abajo y constituyen un cañón estrecho, las condiciones de apoyo del corazón impermeable son desfavorables porque un desplazamiento en dirección del río tiende a desprender la estructura de las laderas. En estos casos, se recomienda: 1) buscar una localización más apropiada al eje, dentro del mismo tramo del río, aunque implique aumento en el volumen de la cortina; 2) cambiar la orientación del eje cuando ello conduce a una mejor disposición de la traza del núcleo en el empotramiento y; 3) realizar excavaciones en las laderas para lograr tal objetivo. En general, una combinación de las tres posibilidades es la respuesta más conveniente.

El problema anterior pierde importancia si la cortina se construye en una boquilla amplia.

3.3.3.2 Corrección del perfil transversal

Es frecuente que después de realizada la limpia superficial, se encuentren secciones transversales con un cambio brusco de pendiente o desplomes en la parte inferior de la boquilla; en ambos es posible que se produzcan grietas en el corazón impermeable por asentamientos diferenciales. La solución más económica en ciertos casos puede consistir en excavaciones para obtener una superficie de apoyo del corazón impermeable más regular; lo conveniente es recurrir a excavaciones y a la reposición de roca por concreto en oquedades. Fig. III.6

3.3.3.3 Escalones y depresiones

La presencia de cambios de pendientes bruscas, aunque sean locales, puede ser causa de agrietamiento del núcleo impermeable. No existen reglas definidas sobre este particular; se aceptan escalones menores de 2 m en altura y 1 m de huella. (fig 3.3.3.3) y en tales casos se especifica que el material adyacente al contacto núcleo-roca sea un suelo plástico compactado con pisones neumáticos; cuando el escalón tiene dimensiones mayores que las indicadas, se efectúan cortes con explosivos para formar taludes de 0.25:1 o superiores. Por otro lado, se presentan en las cimentaciones defectos que requieren tratamiento, a menos que sea posible colocar el suelo compactándolo de acuerdo a especificaciones de diseño; dichos defectos pueden ser marmitas y ranuras producidas por erosión hidráulica; en ambos casos se efectúan rellenos de concreto previa limpia. Fig. III.7

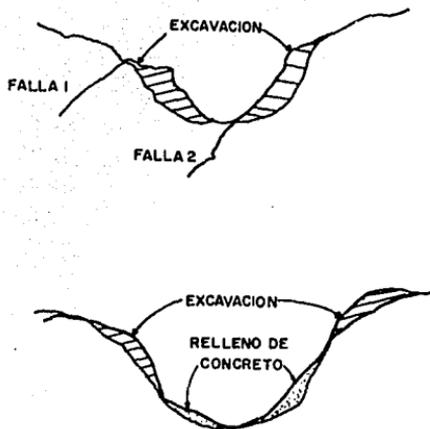
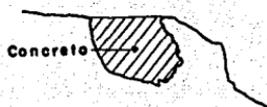
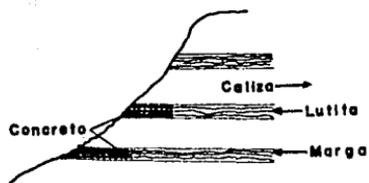


FIG. III.6 CORRECCION DEL PERFIL TRANSVERSAL.



Marmita



Ranuro

FIG. III.7 ESCALONES Y DEPRESIONES,

IV. PROYECTO PRELIMINAR

4.1 INYECCIONES EN ROCA

4.1.1 Objetivo

El principal objetivo del inyectado es hacer una barrera efectiva al paso del agua, o sea obtener un efecto impermeabilizante y como finalidad secundaria, pero también muy importante, mejorar la resistencia de la cimentación.

Para formular un buen diseño de cortina para una presa, es indispensable conocer previamente las características de los materiales en que se va a cimentar y este conocimiento se obtiene con un cuidadoso y detallado estudio geológico del sitio de la estructura, que incluya la información que se consiga por medio de exploraciones geológicas como pozos a cielo abierto, extracción de corazones, túneles o socavones y trincheras.

Los estudios y exploraciones geológicas fijarán el tipo y dimensiones de la cortina apropiada para el sitio y darán a conocer las propiedades esenciales de la roca de cimentación, localización de fallas, grietas, juntas, cavidades, etc. Con los datos anteriores podrá formarse un programa de inyecciones.

4.1.2 Programa de inyecciones

Desde que se hace el diseño de la cortina, se formula un programa de inyecciones, fundado en los conocimientos que aportaron todas las exploraciones geológicas. Las condiciones geológicas de la cimentación serán diferentes para cada proyecto y cualquier programa de inyecciones será sólo una guía tentativa inicial que se modificará en el campo, tanto por las características locales como por los resultados que vayan obteniéndose en el trabajo de inyecciones.

El inyectado de una cimentación puede hacerse en la forma de un tapete o en la de una o varias pantallas, o en la de ambos debidamente combinados.

4.1.3 Tapete

El tapete de inyecciones se forma con un conjunto de éstas, poco profundas y aplicadas a baja presión, que impermeabilizan y consolidan cierta área en la parte superior de la roca, al rellenar y sellar las grietas y los huecos superficiales. Cuando el agua del vaso tiene fácil acceso a esta zona, el tapete en esta área constituye un excelente reforzamiento para la pantalla. Generalmente, la amplitud de las grietas y fisuras es mayor en las cercanías de la superficie que a mayores profundidades; cuando una cortina queda en roca de buena calidad, bastará poner un tapete de inyecciones para sellar las fisuras que haya producido la operación de limpia.

En el programa preliminar de un tapete se fijará tentativamente la extensión que debe cubrir, tomando como base el conocimiento que se tenga de la cimentación por las exploraciones geológicas. Esta extensión se modificará de acuerdo con las características de la roca que se descubra después de la limpia del sitio de la cortina, dando atención preferente al área de la faja de la cimentación de aguas arriba.

El tapete de inyecciones de una cortina con sección de gravedad se hace en el tercio de aguas arriba del área de cimentación o en toda esa área si es necesario. Si la cortina es de tierra, cuando se requiere queda limitado a una superficie cercana a los dentellones, si se tiene una trinchera; en algunos casos el tapete ocupa toda el área de la pantalla.

4.1.4. Pantalla

La pantalla se hace con inyecciones profundas aplicadas a alta presión, según una o varias líneas paralelas o bien reforzada por líneas paralelas a ambos lados de la línea central. Generalmente basta con una sola línea de inyecciones de corto espaciamiento para formar la pantalla en cortinas de baja o mediana altura.

En lo relativo a impermeabilidad, generalmente es preferible una sola línea de perforaciones con corto espaciamiento a dos o más líneas con un espaciamiento grande entre las perforaciones.

4.1.4.1 Etapas de inyectado

Desde el diseño se hace un programa preliminar de inyecciones señalando la equidistancia que se considera deben quedar las perforaciones al terminar el inyectado, tomando en consideración el conocimiento que se tiene de las características de la roca de cimentación, por las exploraciones geológicas efectuadas. Generalmente en este programa se señala un espaciamiento de 2.50 m para las perforaciones en línea; pero, al realizar las operaciones de inyectado, se procede por etapas.

Primera etapa. Se perfora e inyecta con una equidistancia que está en relación con las características de la roca; se trata de aprovechar al máximo cada perforación, haciendo que la zona afectada por la lechada sea lo más amplia posible y con la mayor presión admisible posible; la salida de la lechada por una perforación vecina limita el área de influencia de la inyección, por lo tanto, es muy común que en esta primera etapa se adopte una equidistancia de 10 m. El avance del trabajo se procurará se haga en la línea de la pantalla, comenzando en un extremo para terminar en el otro; una vez terminada la primera etapa se procede a la segunda.

Segunda etapa. Estará constituida por una serie de perforaciones e inyecciones intermedias a la primera, reduciendo la equidistancia o espaciamiento a la mitad, o sea, como ejemplo, a sólo 5 m y no deberá haber perforación no inyectada a una distancia menor de 10 m de la que se está inyectando. Fundándose en los resultados que se tengan en la segunda etapa, se decidirá si habrá que realizar la tercera etapa.

Tercera etapa. Se hará con inyecciones intermedias que reduzca la equidistancia a sólo 2.5 m; en esta etapa no deberá haber perforaciones no inyectadas a distancia menor de 5 m de la que se está inyectando.

Si en algunos tramos de la línea de la pantalla, aún con esta última equidistancia se tienen consumos altos de cemento, se insistirá a estos puntos poniendo alrededor de ellos "inyecciones adicionales".

4.1.4.2 Procedimiento de inyectado

Esencialmente se aplican cuatro procedimientos de inyectado, que son:

- a. Sin progresiones; consiste en llevar la perforación hasta su profundidad total, lavado de la perforación, instalación del niple, prueba de agua sola e inyectado de lechada, todo en una sola operación.

Debe usarse este procedimiento únicamente para perforaciones de poca profundidad, en roca sana que sólo contiene pequeñas juntas o fisuras, pero donde sean necesarias presiones relativamente altas para lograr la penetración debida de la lechada; si se tienen fugas importantes en la superficie de la roca no debe usarse este procedimiento.

- b. Inyecciones progresivas; se hace la perforación llevándola como una primera progresión hasta que se encuentre una grieta, junta abierta o cavidad en la roca, la cual se manifiesta por la pérdida del agua de enjuague de la perforación; que generalmente cuando no se presenta esta pérdida de agua antes de los 5 u 8 m, se suspende la perforación para hacer la primer progresión; se hace lavado intenso de la perforación, se conecta con la línea de alimentación de la lechada, se hace la prueba de agua y luego se inyecta lechada con la relación agua-cemento y presión debidas.

Para aplicar la segunda progresión se debe esperar hasta que el cemento en las grietas inyectadas en la primera haya alcanzado el fraguado final; se instala nuevamente la perforadora en el pozo y se prolonga la perforación hasta alcanzar la profundidad en que se tenga pérdida de agua o la que se haya fijado como límite para la segunda progresión; generalmente se establece a los 15 m contados a partir de la boca del pozo. Se vuelve a hacer el lavado intenso en la perforación, se conecta con la línea de alimentación de lechada, se hace la prueba de agua, se inyecta lechada y luego se limpia la perforación, terminada así la segunda progresión.

Para la tercera progresión, que generalmente se hace a los 25 m y para las progresiones sucesivas, si se hacen necesarias, se repiten las operaciones anteriores.

El procedimiento de inyecciones progresivas, aunque es más costoso, tiene ventajas esenciales sobre el inyectado sin progresiones:

-Se da un tratamiento particular a las zonas más malas que se cruzan con la perforación, lo que permite elegir la relación agua-cemento y la presión más apropiadas para cada progresión.

-La repetida aplicación de lechada con aumento sucesivo de la presión, no solamente tiene un efecto benéfico sobre las grietas más finas, sino que tiende a compensar la retracción por fraguado del cemento en las grietas más grandes previamente inyectadas.

-El inyectado progresivo permite incrementar las presiones para las mayores profundidades con menor peligro de dislocar la roca.

-Se reduce la cantidad de lechada desperdiciada por fugas superficiales. Algunas veces se usa una lechada espesa en la primera progresión para sellar las fugas y tan pronto como la inyección en la roca ha alcanzado su fraguado inicial se reanuda el inyectado con una lechada más delgada.

Una vez iniciada una progresión es requisito indispensable la continuidad del inyectado, hasta su terminación, debiéndose reducir a un mínimo la duración de cualquier interrupción, pues cuando esta se prolonga un tiempo suficiente para que el cemento inicie su endurecimiento, se producirá una reducción en la capacidad de toma de la perforación, llegando hasta la nulificación en algunos casos.

Se deben tomar las precauciones necesarias para asegurar la continuidad de la progresión:

-Debe deshecharse el equipo que obliga a efectuar el inyectado de la lechada en forma alterna.

-Se debe disponer del equipo de refacción necesario para que pueda usarse mientras se arregla cualquier desperfecto del que se tiene en servicio.

-Es indispensable el equipo de mezclado para la confección de la lechada y los depósitos necesarios para la reserva con su dispositivo de agitación muy activa y constante.

La longitud de las progresiones en cada inyección gobierna el incremento de la presión máxima admisible en lo relativo a la profundidad del punto más alto que no ha recibido inyección.

Es recomendable que la primera progresión no se haga a una profundidad mayor de 5 m y que con la lechada aguada se inyecte con una presión máxima de 0.8 a 1.2 kg/cm².

Se sugiere la conveniencia de que en toda inyección progresiva, después de alcanzar con la perforación la profundidad máxima planeada y aplicada la inyección de lechada con la presión que corresponde al punto más alto que no ha recibido inyección, hasta obtener el sellado, se lave la perforación o se reperfore como si fuera a hacer una progresión adicional, pero sin profundizar más y después de transcurrido el tiempo necesario para que el cemento en las grietas inyectadas haya alcanzado el fraguado final, no menos de 6 horas, se vuelva a inyectar, pero ahora tomando como profundidad para la presión máxima de inyectado, hasta obtener el sellado, la correspondiente al fondo o punto más bajo de la perforación.

Por ejemplo

PROGRESION	PROFUNDIDAD (m)	PRESION MAXIMA (kg/cm ²)
1	0-5	1.05
2	5-15	1.40
3	15-25	4.24
4	25-35	7.04
Inyección final sin prof.	25-25	9.88

En este caso se daría por terminada la inyección cuando se llegara al rechazo o al consumo nulo para una presión 67% de 11.27 kg/cm² o sea 7.56 kg/cm², o bien cuando tome menos de 30 litros de lechada con un tiempo que varía con la presión.

c. Inyecciones con empaque

Un importante avance constituye el uso del procedimiento de empaques, que es sencillamente la forma de proceder para que un tramo de perforación se inyecte separadamente dando al empaque la posición deseada dentro de la perforación e inyectando el tramo que quede abajo. El procedimiento de inyección con empaques consiste en:

1.- Hacer la perforación hasta una profundidad total llevando nota detallada de los puntos donde tiene grietas o huecos; de acuerdo con la distribución de estos puntos, se procede al inyectado por tramos desde el fondo hacia arriba; terminada la perforación se procederá al lavado de ella, este lavado se podrá hacer antes o después de colocado el empaque. Las grietas en una roca de cimentación puede lavarse e inyectarse más eficazmente colocando el empaque en la intersección de la perforación con el límite superior de la grieta.

2.- Inmediatamente después de conectada la manguera de alimentación de lechada, se hará el inyectado con agua sola a presión para definir la permeabilidad del tramo y luego se inyectará la lechada; seguida se levanta el empaque hasta el extremo superior del nuevo tramo que se va a inyectar a una presión menor; en forma análoga se procederá para el tercer tramo y los sucesivos hasta que se haya inyectado toda la perforación.

En una cimentación común la mayor parte de las perforaciones pueden llevarse hasta su profundidad total e inyectarse en la forma descrita; sin embargo, las condiciones

que se presentan pueden justificar la modificación en el procedimiento para obtener mejores resultados.

Existen tres tipos de empaque para inyección que son de uso común:

- * El tipo de copas de cuero: Se adapta muy bien en roca bastante dura, donde la perforación no tiene sobreexcavación y las paredes son relativamente lisas y bien alineadas, es el mejor tipo cuando puedan usarse altas presiones de inyectado.
- * El tipo de empaque mecánico: Se adapta en rocas de menor calidad, pero dificulta la colocación cuando la perforación está muy sobreexcavada. Con una buena colocación puede éste empaque soportar altas presiones.
- * El tipo de empaque neumático: Se emplea para perforaciones con diámetro variable y su uso está indicado en perforaciones muy sobreexcavadas en rocas de pobre calidad.

d. Inyectado por series

Este procedimiento se desarrolla en la forma siguiente; se hace en la línea de la pantalla una primera serie de perforaciones poco profundas, como de una primera progresión que se inyectarán a baja presión, procediendo por etapas, con espaciamentos de 10 m la primera, que se reduce a 5 m en la segunda y así sucesivamente, hasta que la pantalla de corta profundidad tome poca lechada; se procede enseguida a una segunda serie, haciendo nuevas perforaciones más profundas, en la línea de la pantalla que se inyectan a mayor presión, avanzando también por etapas como la primera serie; en algunos casos puede requerirse de la tercera serie, si lo exige la profundidad a que debe llevarse finalmente la pantalla.

Las principales ventajas de este procedimiento de inyección son:

- 1.- Se pueden hacer los pozos con perforadora de percusión en la primera serie.
- 2.- Se evita la reperforación y el rimado de los tramos ya inyectados.
- 3.- Se elimina la dificultad de impermeabilizar los empaques y también la tendencia de la lechada a escapar, saltando en "by pass" el empaque. La gran desventaja de este procedimiento es la necesidad de una gran cantidad de perforación.

4.1.5 Lavado

Una perforación se lava al terminarla y antes de inyectar, para remover el polvo y esquilas de la roca productos de la perforación, para que no obstruyan el paso de la lechada a las grietas. Algunas veces el lavado de la perforación tiene como finalidad introducir en las grietas existentes una corriente de agua capaz de remover la arcilla de que están llenas, dándole salida por la misma perforación o por otra adyacente. En este caso el lavado debe ser enteramente eficaz o ni siquiera intentarlo, porque si quedan residuos de esa arcilla, el cemento puede mezclarse con ellas formando una masilla que no llega a fraguar.

La presión y por lo tanto la velocidad que se dé al agua se debe hacer con precaución para no dislocar la roca por un exceso de presión, ni erosionar las paredes de la perforación por una velocidad mayor a la debida. El lavado resulta más difícil pero se conseguirá lo mejor posible, cerrando el desfogue o retorno e inyectando agua sola por un tiempo dado con una presión algo menor que la máxima con que se estaba inyectando al iniciar este lavado.

4.1.6 Presión

Uno de los problemas más importantes y difíciles que se presentan en una operación de inyectado es el establecer un criterio o base en que fundar la selección de la presión con que debe inyectarse la lechada. Si es muy alta puede dislocarse la roca y si es muy baja resultaría un inyectado deficiente. Desgraciadamente no hay bases precisas para establecer un máximo de presión, si no es estimativamente por la experiencia y por un buen conocimiento de la constitución de la roca, lo cual debe complementarse con un amplio uso de aparatos de control, tales como niveles fijos, medidores de combamiento, medidores de subpresión, etc. La presión usada en inyecciones designadas de alta presión, depende principalmente de las características de la cimentación y puede ser menor que la usada en inyecciones de baja presión en otro proyecto. La presión que debe usarse es la máxima necesaria para asegurar el relleno completo de todas las grietas y huecos, sin causar dislocaciones en las rocas.

Una regla elemental ampliamente aceptada para fijar en forma aproximada la presión máxima de inyectado que debe usarse, es que dicha presión en libras por pulgada cuadrada (psi) no deberá ser mayor que tres veces la profundidad en metros del punto más alto del tramo que por primera vez se inyecta. Es decir, que si se va a inyectar una tercera progresión de 15 a 25 m, la presión máxima admisible será de 3.62 kg/cm².

La regla antes expuesta da la presión de inyectado únicamente en función del peso de la roca arriba del plano que se trata, pero debe tomarse en consideración en total los siguientes elementos:

- a.- Peso de la roca
- b.- Características físicas y geológicas de la roca que se inyecta
- c.- Relación agua-cemento de la lechada
- d.- Inyectados anteriores hechos en la zona de influencia
- e.- Peso de la estructura sobrepuesta que descansa sobre la roca

a.- Peso de la roca

Donde la roca se supone que pesa 2300 kg/m^3 se podrá aplicar la regla anterior, es decir que si se hace por el procedimiento de empaque, será posible usar una presión máxima de 0.24 kg/cm^2 por cada metro de profundidad contenida desde la roca del pozo hasta el empaque. Donde se tiene una roca con un peso volumétrico mayor, podrá usarse una presión un poco mayor.

b.- Tipo de roca

En una formación estratificada horizontalmente se podrá usar una presión de 0.24 kg/cm^2 por metro de profundidad, pero debe tomarse en cuenta que en este tipo de formación, cuando la presión actúa sobre un área considerable, se puede producir un grave daño si se da una alta presión. Con una estratificación inclinada o en una formación de bloques, el peligro de dislocación es menor, porque se presentan las fugas superficiales que alivian la presión aplicada antes de que se produzcan algunas dislocaciones; en este tipo de formación se puede usar una presión mayor de 0.24 kg/cm^2 por metro de profundidad.

Las presiones que son peligrosas en una roca estratificada horizontalmente o laminada, serán excesivamente conservadoras en una formación masiva como el granito, donde pueden usarse seguramente de 0.48 a 1.2 kg/cm^2 por cada metro de profundidad.

c.- Relación agua-cemento

No tiene sentido especificar una presión máxima sin señalar la correspondiente relación agua-cemento, excepto en casos especiales. Debe tenerse presente que la dislocación se produce por la presión actuando sobre un área; la lechada delgada o de una alta relación agua-cemento puede llegar más lejos de la perforación que una espesa, o sea, que la primera actúa sobre un área más extensa y por lo tanto presenta mayor peligro de causar daño a la cimentación. En una formación dada se puede inyectar seguramente con una presión de 8.05 kg/cm^2 con una lechada agua-cemento

de 0.75, en tanto que con la misma presión se provocaría una dislocación si se inyecta una lechada con una relación agua-cemento de 2. Por esta razón, puede causar trastornos las inyecciones que llegan al manto freático o que se aplican a grietas llenas de agua.

d.-Inyectado anterior

El procedimiento ideal del inyectado de la roca es llenar toda grieta, ruptura, junta abierta o plano de estratificación con lechada, que teniendo la relación más baja de agua-cemento, pueda forzárselo a penetrar en los vacíos con una presión permisible. Esta se consigue mejor con una impermeabilización gradual de la formación, lo cual constituye el criterio básico del inyectado por etapas y el procedimiento de inyecciones progresivas.

e.- Peso de la estructura

Cuando la estructura está constituida en parte o totalmente, transmitiendo presiones de importancia a la roca de cimentación, a la presión total que se estima puede soportar esta roca, se deberá aumentar la presión unitaria que le transmite la estructura que está sobre ella cuando se hace el inyectado.

4.1.7 Factores de presión

Como ayuda para seleccionar la presión máxima admisible en la lechada a inyectar se dan los siguientes factores:

1. Por la roca

Roca estratificada horizontalmente 0.24 kg/cm² por metro de profundidad.

Roca firme 0.48 kg/cm² por metro de profundidad.

2. Por etapa

Para la primera etapa multiplique por 1 el factor.

Para la segunda etapa multiplique por 1.5 el factor.

Para la tercera etapa multiplique por 2 el factor.

3. Por relación agua-cemento

Para lechada aguada multiplique por 1 el factor roca.

Para lechada espesa multiplique por 1.5 el factor roca.

No debe olvidarse que los datos anteriores son solamente tentativos y siempre podrán cambiarse cuando lo indiquen las condiciones locales o los resultados, a medida que avanza el inyectado. La profundidad se mide no desde el fondo de la perforación o de el tramo por inyectar, sino a partir del punto más alto no inyectado antes.

4.1.8 Proceso de inyectado

Al efectuar la inyección a través de una perforación ya hecha, hay tres variables que deben coordinarse debidamente para obtener el final mejores resultados, estas variables son: presión de lechada, velocidad de bombeo y viscosidad de la lechada.

En la práctica se inicia inyectando solamente agua sin cemento para conocer si la perforación está hecha sobre una formación cerrada, abierta o intermedia. Un pozo impermeable rechazará el agua o la tomará muy lentamente. El manómetro subirá de una vez hasta la presión máxima admisible con la bomba trabajando lentamente, llegando hasta pararse.

Esta operación no debe hacerse con lechada aunque sea muy aguada, porque la obstrucción actúa como filtro que deja pasar el agua, pero detiene el cemento que refuerza así la barrera. Es claro que un pozo que no toma agua no tomará lechada.

Cuando el pozo es permeable no se puede obtener el aumento apreciable en la presión, ni trabajando a su máxima velocidad; de todas formas se debe iniciar la inyección con una lechada de alta relación agua-cemento para evitar que se tapen las grietas finas y medianas donde penetra la lechada, siempre que con ella se consiga levantar la presión. Si ni con ella levanta la presión, se inyectará lechada espesa con relación agua-cemento 3 o 2; si ni aún así se consigue levantar presión deberá recurrirse a la inyección de mortero de cemento con arena de grano fino y redondeado. Este caso podría corresponder a una grieta amplia o grandes conductos de disolución.

Si ni aún así se circunscribe ese espesor para que la inyección levante presión, se deberán hacer, junto al eje de la pantalla, perforaciones de mayor diámetro tal vez de 7 a 10 cm, para que se pueda introducir morteros con mayor proporción de arena o concreto hecho con granzón.

En una perforación de permeabilidad media, al poner el agua sola, la bomba trabajará a una velocidad normal, con la presión máxima admisible; después la presión decrecerá gradualmente debido a la remoción con el agua, del polvo de la perforación. Este decrecimiento en la perforación obligará al aumento en la velocidad de bombeo para llegar a mantener la presión debida.

Ya se ha indicado que al iniciar la inyección la lechada deberá ser delgada y conducirá a un descenso en la velocidad de la bomba o un aumento de presión, o ambos dependiendo de las condiciones del subsuelo y de la mezcla que se aplica. El bombeo se continúa con esta mezcla por un periodo definido (15 min). Transcurrido este tiempo se calculará y se registrará el consumo de cemento y se deducirá el consumo por hora. La inyección se continúa con esta consistencia hasta que disminuya el consumo, indicando que el pozo se acerca al rechazo. Entonces se incrementará la relación agua-cemento lo suficiente para aumentar la velocidad de bombeo incrementando el consumo.

Hay dos procedimientos para fijar el final de una inyección, se continúa hasta que tome menos de 30 litros en 20 minutos, si se está utilizando una presión de 3.50 kg/cm² o menos, o en 15 minutos si se está usando una presión de 4.02 a 8.04 kg/cm²; o en 10 minutos si dicha presión está entre 8.04 y 16.1 kg/cm² y en 5 minutos si la presión es mayor de 16.1 kg/cm².

4.1.9 Equipo

El equipo requerido para el inyectado a presión consiste esencialmente en:

a. Perforadora

Se indica como diámetro mínimo 1 7/16", siendo recomendable el uso de la corona AX para perforación de 1 7/8"; respecto a la profundidad se señala, en un tapete, un mínimo de 3 m y un máximo de 15 y como regla general para una pantalla la profundidad varía entre el 30 y 40 por ciento de la carga hidrostática sobre la boca del pozo, pero en una cimentación de pobre calidad puede ser mayor.

Generalmente en perforaciones que no excedan de 8 m de profundidad podrán usarse perforadoras de percusión. La perforadora de percusión tiende a obstruir los huecos o grietas chicas con polvo o esquilras que produce la misma roca y por eso se exige un lavado enérgico.

Para profundidades mayores de 8 m siempre será preferible el uso de una perforadora rotaria, que tenga broca de diamante que permita la extracción de corazones de muestra en las perforaciones de la primera etapa, para darle carácter de exploración, pero en las subsiguientes podrá usarse la corona de diamantes que es ciega, atacando la operación sin recuperación de muestras.

Para la formación de un tapete de inyecciones comúnmente se admite la perforadora de percusión, por resultar de un costo menor, pero para una pantalla de inyecciones, en lo general debe usarse la máquina rotaria con broca de diamante.

b. Equipo de lavado

Este equipo debe permitir hacer llegar al fondo de la perforación un determinado gasto de agua o de aire comprimido para que forme una corriente ascendente que despegue, remueva y arrastre el material suelto producto de la perforación.

En algunos casos el lavado tiene como finalidad el extraer arcilla, arena u otro material deleznable que rellena defectuosamente los huecos en la roca, con el fin de sustituirlo por el material que se está inyectando para la mejor consolidación e impermeabilización de la roca que se está tratando.

c. Mezcladora

Consiste en un tanque circular con eje horizontal o vertical en el que gira una flecha con aspas para agitar la mezcla líquida. Es buena cualquier máquina mezcladora; siempre que tenga la capacidad requerida y que consiga hacer la lechada con una consistencia uniforme; su tamaño es variable de 250 a 750 l.

d. Tanque agitador

Después de mezclada la lechada se necesita agitación para evitar que se asiente mientras se está bombeando, pasando de la mezcladora a un tanque agitador, que debe tener la misma capacidad de la mezcladora, de modo que una colada de lechada pueda estarse bombeando mientras la próxima se está mezclando.

e. Bombeo de lechada

Las bombas para lechada de cemento deben ser suficientemente flexibles en su operación para permitir el estricto control de las presiones con un gasto variable de lechada y con un mínimo taponamiento de válvulas y tuberías de alimentación.

Se pueden conseguir con dimensiones y capacidades que pueden entregar de 75 a 378 litros por minuto cuando están abastecidas con aire, a presión de 8.05 kg/cm² y bombeando contra 16.1 a 40.2 kg/cm².

Las bombas deben tener operación ininterrumpida durante la ejecución de los trabajos, evitando equipos con cajas presurizadas de poca capacidad.

f. Manómetro

Es muy importante la medida cuidadosa de la presión de la lechada inyectada. Siempre se deben usar dos manómetros, uno en la bomba para el uso del operador y el otro directamente en las conexiones de la perforación para el uso del ingeniero o inspector.

g. Obturadores

En los métodos de sondeo completo y tramos de avance el tubo de inyección se fija mediante un obturador en el extremo cercano al brocal del tramo por inyectar. En el método de tramos descendente es necesario aislar el tramo por inyectar por medio de dos obturadores.

Estos obturadores son los mismos que se utilizan en las pruebas de permeabilidad. Pueden ser de copas de cuero o de varias rondanas de hule que al ser comprimidas se dilatan sellando la perforación, o pueden ser neumáticos que consisten en una camisa de hule que al inflarse se comprime contra la pared de la perforación (fig. IV.1).

Los de copas de cuero se emplean en perforaciones de paredes lisas y perfectamente cilíndricas y se deterioran pronto durante la recuperación, debido al giro que se les impone. Los de rondanas de hule funcionan satisfactoriamente aunque su colocación es lenta; los neumáticos se ajustan a cualquier tipo de perforación, pero su colocación a profundidad es delicada y pueden atraparse en las fisuras que se cierran al eliminar la presión.

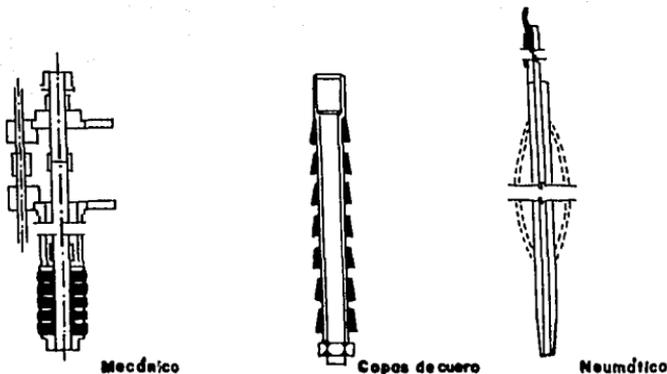


FIG. IV.1 TIPOS DE OBTURADORES

4.2 INYECCION EN ALUVIONES

4.2.1 Introducción

Las boquillas que tienen espesores de acarros (aluviones) o terrazas aluviales de 10 a 12 metros de espesor eran consideradas aceptables para desplantar presas de mediana altura; sitios con mayores espesores de estos materiales, generalmente se desechaban debido al alto costo que representaba la construcción de la trinchera de los materiales arcillosos compactados, que es necesario desplantar en la roca que subyace a los aluviones, es decir, el costo de ese tratamiento de cimentación representaba un porcentaje muy alto en relación al costo de la estructura y del proyecto completo mismo, motivo por el cual las obras se cancelaban o se diferían.

Al referirnos a cortinas de materiales graduados, se engloban todos los tipos de cortina que tienen un corazón de material impermeable compactado y respaldos de un material permeable, o bien, cortinas de sección homogénea de arcilla.

Debido a que muchos sitios para presa estudiados tienen espesores de acarros superiores a 1.20 m, en algunos llegan de 30 a 35 m, se dio la tarea investigar, estudiar y comparar algunos métodos para impermeabilizarlos, con el fin de seleccionar aquel o aquellos que más se adaptaran a las condiciones particulares de cada proyecto, desde el punto de vista técnico y económico.

El caso a que nos referimos es el de cimentaciones granulares permeables que superyacen a rocas más o menos impermeables. Los materiales permeables pueden variar desde arenas finas hasta gravas gruesas de estructura abierta; en la naturaleza los diferentes tamaños de granos mencionados, casi siempre se encuentran mezclados en depósitos heterogéneos que pueden estar más o menos estratificados y además contener cantos rodados de diferentes tamaños y en diversas cantidades.

Los problemas que representan los aluviones son el de permeabilidad y el de arrastre de partículas más pequeñas ocasionado por las presiones de filtración. Es muy importante cuantificar esta última manifestación para evitar tubificaciones que pueden poner en peligro la cortina.

Por otra parte, las cimentaciones de grano grueso no presentan asentamientos peligrosos o de estabilidad particularmente en presas pequeñas o medianas, característica que es conveniente para desplantar las cortinas de las presas.

Conviene hacer destacar que nos referimos a inyectado de aluviones para impermeabilizarlos, ya que existe también un inyectado de consolidación para mejorar las propiedades mecánicas de los mismos.

4.2.2 Algunos procedimientos para impermeabilizar aluviones

Actualmente se pueden emplear diversos métodos para reducir las filtraciones a través de los materiales granulares; el que se seleccione en cada caso será aquel que más se adapte a la granulometría de los mismos, a la profundidad que se encuentre la roca base y al tipo de obra que se trate.

4.2.2.1 Trinchera de arcilla compactada

Cuando en una boquilla se tienen espesores no mayores de 12 m de acarrees fluviales permeables constituidos por diversos materiales como cantos rodados, gravas, arenas o materiales finos, ha sido utilizado el método de la excavación de una trinchera en los acarrees para llegar a un manto rocoso para tener un apoyo estable para la prolongación del material impermeable de la cortina, que elimine posibles asentamientos que produzcan grietas y ocasionen filtraciones indeseables en la arcilla del núcleo de la estructura; la liga de la arcilla de la trinchera con la roca base debe hacerse de acuerdo con las características físicas y mecánicas de la arcilla; sin embargo, se ha tomado como regla constructiva de seguridad dar un ancho mínimo en la trinchera que permita tener un gradiente hidráulico no mayor de dos, al tomar en consideración el valor de la carga hidráulica aguas arriba de la cortina, menos de la carga hidráulica aguas abajo, dividido por el ancho inferior de trinchera.

La construcción de muchas presas pequeñas y medianas, ha indicado que es antieconómico la construcción de cortinas de almacenamiento desplantadas en fuertes espesores de acarrees; lo anterior es debido a que es muy costoso construir la trinchera, pues requiere se excaven los depósitos de acarrees con taludes de aproximadamente 1:1, si están secos, o bien taludes de 1.5:1 cuando se tiene presencia de subálveos, la cual origina condiciones más severas en la excavación, que implica las siguientes operaciones: bombear los subálveos aguas arriba de la trinchera, tender y compactar la arcilla de la trinchera en condiciones difíciles de restituir los acarrees en la zona de excavación excedente; las operaciones constructivas anteriores se complican a medida que el espesor de acarrees aumenta y resultan cada vez más caras hasta llegar al límite en que su construcción es prohibitiva.

4.2.2.2 Muro de lechada plástica

De los diferentes procedimientos que se conocen para formar pantallas impermeables, uno de ellos es el "muro de lechada plástica". Para que sea posible la aplicación de éste procedimiento se requiere que los aluviones no contengan gran

cantidad de cantos rodados con dimensiones de 3 a 4"; fragmentos de roca más grande dificulta la excavación de los aluviones, debido a que el muro tiene espesores de 60 a 80 cm y se utiliza de preferencia para dichas excavaciones draga con cucharón de almeja hidráulico, que aunque es dirigido en el sentido vertical por medio de una barra rígida, al encontrar fragmentos de gran tamaño, provoca derrumbes e irregularidades indeseables en la excavación, que dificulta la marcha de los trabajos en algunos casos y los hace imposible en otros.

Como se puede apreciar, tiene limitaciones muy serias esta técnica pues requiere de un medio muy especial y difícil de encontrar en los acarrees (gravas y arenas, limos y limos-arenosos) de los cauces fluviales. Si se cuenta con el equipo adecuado, se pueden alcanzar profundidades del orden de los 50 m; el procedimiento consiste básicamente en excavar y restituir simultáneamente con la lechada, que a la vez que sirve de ademe, se queda como definitiva. A diferencia de la pantalla flexible en el muro plástico, no se requiere primero hacer la excavación con auxilio de lodo bentonítico para sustituirlo posteriormente con otra mezcla. La lechada se compone de agua, cemento, bentonita y otras sustancias para aumentar el tiempo de fraguado de la misma; debe reunir las siguientes características:

1. Debe conservar una cierta fluidez por lo menos unas 20 o 30 horas, con cohesión que puede variar entre 10 y 20 g/cm².
2. El fraguado es lento debido a que además de bentonita, que aumenta el tiempo de fraguado del cemento, se usan sustancias retardantes, como Festerlith 1200-R, Lignosulfito de sodio, etc; que de acuerdo con la dosificación que se aplique, se logra un endurecimiento lento que puede considerarse termina a los 30 días y cuya resistencia a la compresión simple estará comprendida entre 500 y 1000 g/cm².

Se dice que en el muro se eliminan las juntas a pesar de que se va haciendo por tramos alternados, que generalmente son de 3 m en el sentido longitudinal de éste, es decir que se construyen los tramos 1 y 3, luego se hace el tramo 2 que es el intermedio, en esta forma se va avanzando hasta terminar; se considera que no se tienen juntas porque cuando se hace el tramo 2, la lechada en el tramo 1 y 3 apenas inicia el fraguado y la junta existirá solamente si el trabajo se suspende por descompostura del equipo o alguna otra causa. Fig. IV.3

4.2.2.3 Pantalla flexible o de lodos

La construcción de esta pantalla, consiste en excavar en los aluviones una trinchera o zanja con un ancho de 1 a 2 m, a lo largo del eje de la cortina o en alguna otra posición previamente proyectada, pudiendo llegar o no ésta hasta la roca que subyace a los acarreo; para que sea posible realizarla, se emplea una mezcla de agua-bentonita con la que se va restituyendo simultáneamente el material que se excava con una draga. El lodo bentonítico actúa como ademe para mantener las paredes verticales y evitar derrumbes; en esta primera etapa de trabajo es necesario construir a lo largo de la trinchera una plataforma de trabajo con su brocal, para evitar caídos superficiales y facilitar el trabajo de excavación.

En la fabricación de lodo se usa con frecuencia bentonita sódica con índice de plasticidad del 75 a 85 por ciento, la proporción de agua-bentonita fluctúa de 10:1 a 14:1 y la viscosidad medida en el cono Marsh puede variar entre 50 y 120 s.

Se han hecho pruebas de laboratorio con mezclas bentonita-arcilla en proporciones 1:0.5 y 1:1 y se ha podido observar que la adición de arcillas plásticas naturales, en las proporciones antes indicadas prácticamente no modifican las propiedades de los lodos bentoníticos y pueden emplearse con buenos resultados constructivos y económicos, cuando se dispone de este tipo de material en zonas cercanas a la obra.

Cuando se termina la excavación en los acarreo se procede a la sustitución de los lodos bentoníticos de la trinchera, por la mezcla definitiva que debe ser plástica e impermeable y puede estar complementada con arena y grava (saturada y superficialmente seca). La densidad de la mezcla definitiva es bastante más alta que la del lodo bentonítico por lo que fácilmente se consigue desplace a éste. La profundidad a la que se puede llegar con este procedimiento está en el orden de los 20 m; para excavar se puede usar draga, los acarreo pueden contener boleos y fragmentos de rocas mayores a 1 m, los cuales para excavar se rompen con un barrotón de acero con punta de cincel de 7 a 8 toneladas.

4.2.2.4 Inyectado de aluviones

Cuando se requiere formar una pantalla de inyectado en los acarreo del cauce de un río, para construir la cortina de una presa, es preciso formular un programa de investigación relativo a las características de los materiales que subyacen al apoyo de la cortina.

La información básica que debe obtenerse se puede deducir de la permeabilidad de los acarreo y estratigrafía fluvial así como de la roca basal de la cimentación y

empotramiento de la estructura; granulometría de los acarreos y estratigrafía de la roca en la boquilla; perfil de la roca en que se apoyan los acarreos y profundidad máxima de los mismos. El conocimiento del resultado de los estudios anteriores, permite diseñar con bastante precisión las lechadas del inyectado a base de cemento-bentonita-agua, con la peculiaridad suficiente para impregnar de buena manera las partículas de diferente tamaño de los acarreos. La mayor o menor impregnación que se consigue en los materiales granulares, depende en gran parte de la permeabilidad, es decir, a mayor permeabilidad (mayor proporción de vacíos) es más fácil la inyección y comparativamente es donde se logra un mayor rango de impermeabilización, motivo por el cual las arenas finas y muy finas son bastante complicadas de inyectar, a menos que se usen productos químicos. Esta clase de trabajo se reserva únicamente para casos muy especiales.

En el grado de impregnación de las partículas, también influye de manera decisiva la presión de inyección, que en cada caso debe ser función de la permeabilidad de los materiales. Con el manejo adecuado de los parámetros anteriores se logra mediante el inyectado un grado de permeabilidad final que depende en gran parte de la proporción de vacíos no inyectados. Con el equipo adecuado de inyección y perforación es posible tratar espesores de 20 a 30 m para presas medianas o bien de 60 a 80 m para presas grandes, si esto se justifica.

En los trabajos de inyectado es necesario tener un control estricto de los mismos, en el sentido que se verifique hasta el máximo posible todas las especificaciones del proyecto, pues el éxito que se tenga en los mismos dependerá en gran parte del cumplimiento de las reglas de ejecución que se hayan establecido. Puede decirse que existen dos formas o tipos de inyección: el de impregnación y el que a base de fuertes golpes de presión produce fallas o roturas sucesivas de la estructura de los acarreos; cualquiera de estas técnicas es difícil de llevar a cabo cabalmente, dicho de otra manera, no es posible separar por completo una forma de inyectar de la otra, es decir, una de ellas predominará, pero aunque sea esporádicamente, la otra se presentará.

Antes de hacer un tratamiento es útil realizar pruebas de perforación para conocer las dificultades que se puedan presentar y definir el equipo que se desea usar. También es muy conveniente efectuar un tramo de prueba de inyectado lejos de la presa para precisar las variantes que se deben aplicar al inyectar, teniéndose además con esto, la oportunidad de hacer en esa zona toda clase de reconocimientos sin correr el riesgo de alterar las condiciones finales de la pantalla de la cortina que en un caso extremo, pudiera ser peligrosas para el correcto funcionamiento de las mismas.

Durante el tratamiento debe establecerse un control de calidad tan severo como se juzgue necesario.

Los métodos que comúnmente se utilizan para inyección de aluviones son tres:

a. Método ascendente (de abajo hacia arriba)

En este procedimiento se utiliza para el inyectado, el mismo tubo que sirve de ademe para efectuar la perforación; una vez realizado el barrenado a la profundidad total, se limpia el interior del tubo y se conecta con el equipo de inyección procediendo a inyectar la zona más profunda; cuando el volumen establecido de lechada ha penetrado en el terreno, se hace subir el tubo 20 o 30 cm; y de forma similar se inyecta hasta la superficie. El diámetro del tubo puede ser hasta de 100 mm. Este procedimiento presenta tres graves inconvenientes:

- Las resurgencias que aparecen alrededor del tubo pueden a veces fijar a éste con el terreno.
- Cuando se realiza una inyección profunda deben acoplarse unos tubos con otros, lo que ocasiona una operación y con mayor peligro de quedar la tubería fija al terreno.
- Cuando se da por concluida la inyección no es posible reanudarla, a menos que se haga una nueva perforación.

Este método es muy sencillo pero no conveniente, por lo que no es muy utilizado en la práctica común.

b. Método descendente (de arriba hacia abajo)

Se realiza únicamente cuando se utiliza una perforadora rotaria, debido a que los aluviones contienen bloques que con frecuencia son difíciles de perforar con máquinas de percusión. Se comienza a empotrar a la entrada del barrenado un tubo provisto de un empaque a través del cual pasan los tubos que tienen un diámetro ligeramente menor al del barril muestrador. Una vez perforado a una cierta profundidad, se inyecta por estos conductos la mezcla más conveniente, subliéndolos progresivamente a medida de que se va terminando el inyectado. Una vez terminado el inyectado de este tramo se reperfora el mismo, prosiguiendo la perforación e inyectado del siguiente tramo. Este método no es utilizado en la práctica común.

c. Inyección por medio de tubos de manguitos

Es el método más utilizado en la actualidad para el inyectado de aluviones a un costo razonable. Su procedimiento consiste en que una vez realizada la perforación para el inyectado, se introduce hasta la profundidad total un tubo que puede ser de fierro fundido, galvanizado o de PVC; a profundidades mayores de 15 m la utilización del tubo metálico es práctica usual, ya que el de PVC tiene grandes deformaciones con la profundidad, dando lugar a que el obturador no penetre y con ello no sea posible la inyección. El tubo puede ser de 38 a 60 mm de diámetro y deberá contar con agujeros perforados a distancias iguales, los que suelen estar en grupos de tres para cada metro de longitud. Cada grupo está cubierto por un empaque exterior de hule o casquillo de caucho que funciona como válvula y al que se ha denominado "manguito". Este empaque de hule (10 cm de ancho) debe cubrir los agujeros más o menos a la mitad y en su parte inferior debe estar asegurado con alambre recocido que se amarra alrededor del mismo; de esta manera, la mezcla de inyectado puede salir del tubo pero no entrar en él.

Mientras se proceda al levantamiento del tubo de ademe se rellena el espacio anular comprendido entre éste y el tubo con manguitos con una mezcla agua-cemento-bentonita (1:1:12 a 1:1:30, según SARH) la dosificación de la mezcla debe ser tal que al fraguar se convierta en un material semiplástico que logre adherir perfectamente el tubo con manguitos con el terreno; además, su resistencia a la compresión debe ser pequeña para que se pueda romper fácilmente al momento del inyectado. Una excesiva dosificación de cemento hace que la ruptura sea difícil y si la dosificación es insuficiente el recubrimiento será demasiado plástico que no se romperá frágilmente ocasionando el desprendimiento del tubo y posiblemente resurgencias hasta la superficie.

El inyectado del aluvión se produce después de la ruptura de la mezcla en el espacio anular con agua o mezcla a presión. La presión de ruptura será mayor a la de inyectado del terreno, siendo esa una sobrepresión transitoria que sólo requiere de unos golpes en el bombeo para lograr el objetivo. El tramo por inyectar se limita con un tubo con dos obturadores a la altura del manguito, por lo cual es posible inyectar capas más profundas y comenzar por cualquier punto, separando las operaciones de perforación.

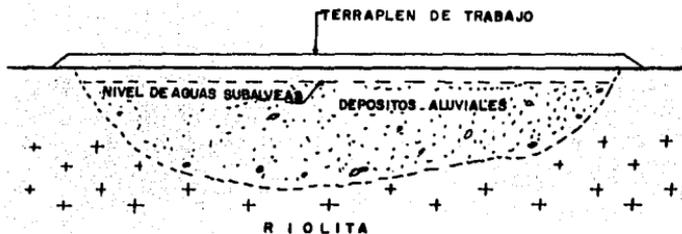
Es importante señalar que el inyectado provoca deformaciones al terreno por lo cual, si los tubos no son de buena calidad, pueden romperse o sufrir grandes flexiones que impidan colocar el obturador. El equipo de perforación e inyección es similar al que se utiliza para el tratamiento de macizos rocosos. Fig. IV.4

4.2.2.5 Diámetro y separación de perforaciones

La perforación en aluviones se realiza generalmente a percusión, en los menores diámetros posibles que resulten ser los más económicos; si los aluviones contienen grandes bloques, la perforación se realiza generalmente a rotación con diámetros relativamente más grandes, sin que esto llegue a ser un impedimento para la colocación del tubo de manguitos.

En la práctica se ha observado que una sola línea de barrenos para formar una pantalla impermeabilizante es insuficiente, por lo que se han utilizado generalmente dos líneas con una separación de 3 a 4 m y una distancia entre barrenos de 3 a 4 m; si es necesario realizar una línea adicional, ésta se efectuará entre las dos primeras, y en este caso, las líneas primarias le darán un confinamiento a la línea central.

La localización en planta de los barrenos se podrá realizar a "tresbolillo" o en forma de cuadrícula, dependiendo del número de líneas.



CORTE LONGITUDINAL POR EL EJE
DE LA CORTINA.

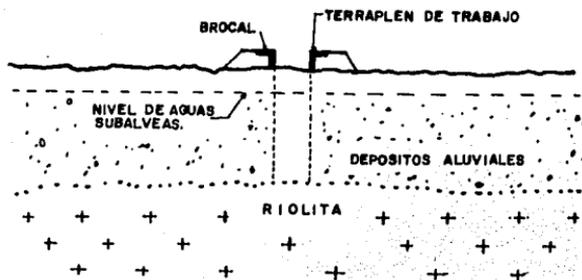


FIG. IV.3 CORTE LONGITUDINAL POR EL EJE DEL RIO.

FALLA DE ORIGEN

PRESA "BOCA DEL TESORERO", ZAC.

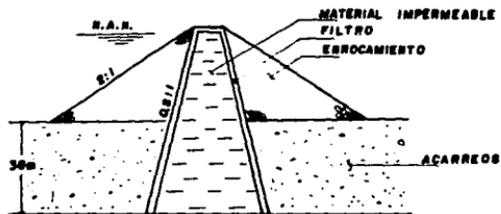


FIG. 4.221. TRINCHERA DE ARCILLA COMPACTADA

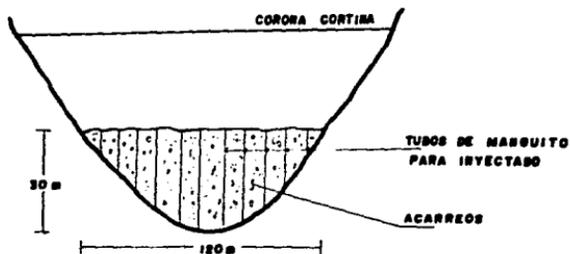


FIG. IV.4 INYECCION DE ALUVIONES

FALLA DE ORIGEN

4.2.3 Diseño y control del inyectado. Método GIN (G. Lombardi y D. Deere. Water Power & Dam Construction. Traducción Ing. Ulrich Hungsberg, IMTA, 1993)

El inyectado de masas de roca y suelos granulares con lechadas de cemento para mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas es una práctica bien establecida en ingeniería civil; sin embargo, esta práctica ha estado dominada por reglas empíricas y experiencias personales o institucionales.

La información obtenida por los estudios de laboratorio de la cohesión (resistencia a la fluencia) y la viscosidad dinámica de diferentes mezclas de inyectado, por medio de estudios teóricos de flujo, penetración de lechada y por el monitoreo de campo de las presiones de inyectado y absorciones (tomas), ha conducido al concepto del número de intensidad de inyectado (GIN).

La experiencia en proyectos hidroeléctricos mayores en varios países indica que este método es técnica y económicamente efectivo y tiene las siguientes ventajas:

- (1) una sola mezcla de inyectado estable para todo el proceso (relación agua-cemento por peso de 0.67 a 0.8:1) con un aditivo superplastificante para incrementar la penetrabilidad.
- (2) una velocidad de bombeo constante de la lechada baja a mediana conduce con el tiempo, a una presión que se incrementa gradualmente conforme la lechada penetra más adentro de las fracturas de la roca.
- (3) el monitoreo de la presión, velocidad del flujo, volumen inyectado y penetrabilidad contra el tiempo, en tiempo real, se realiza por medio de gráficas en una computadora PC.
- (4) el inyectado termina cuando la trayectoria de inyectado registrada sobre el diagrama de presión contra volumen total (por metro de intervalo inyectado) interseca a una de las curvas de volumen limitante, presión limitante o intensidad de inyectado limitante, como queda dado por la curva hiperbólica seleccionada de GIN (una curva de un valor constante de $p.V.$ (presión por volumen), una medida de la energía empleada).

Conceptos teóricos de flujo de lechada y su penetración

A diferencia de los fluidos newtonianos, como el agua y el aceite, en donde el comportamiento reológico puede caracterizarse únicamente por el parámetro de viscosidad, una lechada de inyectado "estable" se comporta como un fluido Binghamiano durante el flujo, teniendo simultáneamente viscosidad y cohesión (resistencia a la fluencia); ambos son parámetros de resistencia al flujo, la viscosidad gobierna la velocidad del flujo y la cohesión la distancia máxima de penetración.

La distancia máxima de penetración lograda por una lechada de inyectado es directamente proporcional a la presión aplicada y a la abertura de las fisuras, e inversamente proporcional a la cohesión de la lechada de inyectado.

Selección de la mezcla de inyectado

En la literatura se prefiere el uso de mezclas más espesas desde 1985. La práctica de agregar del 1 al 2% de bentonita para estabilizar la mezcla y reducir la sedimentación, está siendo reemplazada progresivamente por el empleo de mezclas de contenidos de cemento más elevados, pero con aditivos superplastificantes. Estas últimas mezclas son estables (aquellas que exhiben en dos horas una decantación menor del 5% de agua clara en la parte superior de un cilindro de 1000 ml), ya que poseen menor cohesión y son más penetrantes; también tienen una mayor resistencia después del fraguado, a diferencia de las mezclas delgadas e inestables que durante el flujo de la lechada a través de las fisuras de roca, pueden mostrar un comportamiento de sedimentación errática, erosión, resuspensión y resedimentación.

Comparada con una lechada delgada, durante el inyectado de una lechada estable moderadamente espesa, se tienen las siguientes ventajas:

- Menor sedimentación de los granos de cemento durante flujo lento.
- Menos agua de sangrado que acomodar, como resultado del exprimido o filtración en zonas estrechas en las trayectorias del flujo, con menor bloqueo prematuro.
- Mayor estabilidad en el tiempo y distancia como un fluido predecible (fluido Binghamiano con una cohesión y una viscosidad dinámica dadas).
- Menor riesgo de hidrofracturamiento (también denominado partición hidráulica o efecto de gato hidráulico) y levantamiento de los estratos geológicos, debido a una caída de presión alejada de la perforación de inyectado, como resultado de la cohesión de la lechada (y el llenado de la fractura como una lechada de alta calidad en el caso de tal ocurrencia).

Durante la vida útil de una lechada endurecida en fisuras de roca, la lechada espesa tiene las siguientes ventajas en comparación con una lechada delgada:

- Menos contracción durante el fraguado y con esto una mayor adherencia a lo largo de las paredes de la fisura en la roca y menos riesgo de una reabertura;
- Mayor densidad y mayor resistencia mecánica, debido al mayor contenido de cemento y con ello una mayor resistencia a la erosión y tubificación.

- **Menor porosidad, menor permeabilidad, mayor resistencia de liga y con esto una mayor resistencia química contra la lixiviación; además una mayor durabilidad de la pantalla de inyectado durante la vida útil de la presa.**

Debido a su cohesión la lechada estable, requiere de menores presiones de inyectado para alcanzar la misma distancia de penetración comparada con una lechada delgada; sin embargo, por medio del empleo de una pequeña cantidad de aditivo superplastificante, ambos parámetros, su cohesión y su viscosidad, pueden reducirse dramáticamente.

La práctica actual en proyectos mayores es emplear una relación de mezcla de **0.67:1 a 0.8:1** (agua:cemento por peso) para obtener la mayor densidad y resistencia deseables de la lechada endurecida y un superplastificante para reducir la cohesión y viscosidad durante la colocación de la lechada. Se realizan pruebas de laboratorio para determinar las propiedades de flujo, sedimentación, fraguado y de resistencia de diferentes mezclas de inyectado para diferentes cementos y diferentes aditivos superplastificantes.

algunos valores típicos de laboratorio son: peso específico de la lechada, **1.59 a 1.67 t/m³ (99.2 a 104.2 lb/ft³)**; tiempo de flujo del embudo Marsh de **29 a 32 s**; y resistencia a la compresión a los **28 días** de **152.92 a 203.90 kg/cm² (2250 a 3000 lb/in²)**

Un aspecto que se debe tener presente, es la pérdida potencial de agua al inyectar roca seca arriba del nivel de agua subterránea. En el caso de que se espesara la lechada por esta razón, se incrementaría su cohesión (aumentaría la fricción interna) al grado que ya no se podría inyectar más lechada. Una práctica prudente es inyectar agua por un periodo de tiempo para obtener una saturación parcial de la masa rocosa, precisamente antes del inyectado; también se pueden emplear en la lechada aditivos retenedores de agua.

Al inyectar fisuras finas en roca, debe tomarse en cuenta que la penetración de la lechada depende más del tamaño de los granos de cemento y partículas de cemento aglutinadas, que de la dilución de la mezcla con agua en exceso. De esta manera, en vez de tratar de obtener una penetración mayor diluyendo la mezcla, debería emplearse un cemento más fino con aditivo superplastificante junto con mayores presiones de inyectado.

Una vez que se haya determinado una mezcla aceptable, por medio de pruebas de laboratorio, con sus propiedades mecánicas en los rangos deseables, esta mezcla deberá emplearse para todo el inyectado en el proyecto; el empleo de una sola mezcla simplifica grandemente el procedimiento de inyectado.

Desarrollo del método

Inyectado de fisuras abiertas amplias

Existen tanto razones prácticas como económicas para reducir la penetración de la lechada y el volumen de lechada inyectada. Hay tres maneras de lograr esta reducción; empleando una lechada menos penetrante (más espesa con mayor cohesión), limitando la presión de inyectado o limitando el volumen de lechada inyectado.

Antes de seleccionar el criterio limitante, deberá considerarse que también pueden existir fisuras más finas en el intervalo de roca que se está inyectando; éstas son más difíciles de inyectar y probablemente no se inyectarán bien hasta una etapa posterior, cuando se hayan rellenado las fisuras más abiertas. Sin embargo, durante la primera etapa de inyectado, es deseable lograr algún llenado de estas fisuras finas. De esta manera, la mezcla de inyectado no deberá espesarse, pero se deberá usar una lechada moderadamente espesa estable con un aditivo superplastificante. La alternativa de limitar la presión tampoco es muy atractiva, ya que esto reducirá el inyectado de las fisuras finas; la alternativa restante, de limitar el volumen parece ser el mejor camino.

Inyectado de fisuras finas

Este inyectado puede realizarse, ya sea utilizando una mezcla más delgada con una menor cohesión, o inyectando a mayores presiones. Es más conveniente elevar la presión y mantener la mezcla moderadamente espesa, de alta calidad, con el aditivo superplastificante. En vista de que las fisuras más finas tendrán una menor penetración de lechada y ya que la presión de inyectado se reduce rápidamente conforme se aleja de la perforación, la fuerza total de levantamiento aún a presiones de inyectado elevadas será, como regla, mucho más baja que el peso de la sobre carga; el hidrofracturamiento de las juntas y planos de estratificación en la roca raras veces es un problema.

Al considerar estos factores se sugiere un límite superior para la presión de inyectado, cuando las tomas de lechada son pequeñas en el rango de 2.4 a 4.0 kg/cm², dependiendo de la geología (intemperización, estratificación, zonas débiles, estado de esfuerzos insitu, etc.), la presión de agua futura y la intensidad deseada de inyectado.

De esta manera, se identifica el tercer ingrediente del procedimiento GIN: una presión progresivamente más elevada conforme se consolida la roca, de manera de que se inyecten progresivamente fisuras más finas.

El Método GIN

Para inyectar una zona de roca en forma más intensa, se requiere emplear más energía. En un intervalo de inyectado dado, la energía empleada es aproximadamente proporcional al producto de la presión p del inyectado final y del volumen de inyectado V dando un producto de $p.V$. Este es el número de intensidad de inyectado o GIN (Grouting Intensity Number).

La presión ha sido utilizada tradicionalmente como bar, resultando en $p.V$ o unidades GIN siendo bar^*l/m , aunque obviamente se pueden utilizar otras unidades, haciendo las conversiones apropiadas.

De esta manera, empiezan a emerger los primeros dos elementos del principio GIN: una limitación de volumen, cuando la lechada entra fácilmente a bajas presiones, y una limitación de presión cuando la lechada penetra únicamente con dificultad. Queda por enfocarse a los rangos intermedios. Sin embargo, antes de continuar con este rango intermedio es conveniente revisar otras consideraciones sobre el inyectado.

Ventajas de mantener un valor constante de GIN

El método GIN requiere que una vez que se haya seleccionado el nivel de intensidad de inyectado (por ejemplo una intensidad alta GIN de $2000 \text{ bar}^*l/m$), este valor deberá utilizarse, tanto para las fisuras fácilmente inyectables con grandes volúmenes de absorción a baja presión, como para las fisuras más finas con tomas bajas pero con presiones considerablemente más elevadas. De esta manera, se mantiene un valor constante de GIN.

Al mantener un valor constante de GIN durante el proceso de inyectado para todos los intervalos, se obtiene una penetración casi constante de la lechada y se limita casi automáticamente el volumen en una fisura abierta amplia, pero se permiten presiones elevadas en zonas más estrechas y fisuras menos inyectables.

Un valor constante de GIN, cuando se dibuja en una gráfica de presión contra volumen, produce una curva hiperbólica; mientras más elevada es la intensidad de inyectado o valor GIN, más grande es la distancia del origen de la curva. De esta manera la curva GIN completa el ingrediente faltante para juntar los otros dos límites discutidos en párrafos anteriores: la línea del volumen limitante y la línea de la presión limitante. La combinación de los tres da una envolvente limitante compuesta para el inyectado.

Aplicado a pantallas de inyectado

El método GIN, trata principalmente consideraciones para un solo intervalo de inyectado o progresión; también es aplicable a todos los intervalos de una perforación de inyectado y a todas las perforaciones primarias o con espaciamientos intermedios. El procedimiento de reducción de espaciamientos en una pantalla de una línea, es un método eficiente comprobado que se basa en un razonamiento teórico fundamentado.

En ciertas rocas altamente permeables o cavernosas (flujos de lavas, algunas calizas, areniscas fracturadas), se han construido pantallas de tres líneas. Generalmente se inyecta primero la línea de agua abajo, seguido por la línea de aguas arriba y finalmente por la línea central. Se considera que las dos líneas exteriores se comportan como líneas de barrera (confinamiento) y con frecuencia se inyectan únicamente las perforaciones primarias y secundarias, con la intención de rellenar la mayoría de las fisuras o huecos mayores. La línea central puede tratarse entonces como una pantalla normal de una sola línea con perforaciones desde primarias hasta terciarias y aún cuaternarias o quinarias, si se requieren.

En el método de reducción de espaciamientos, las perforaciones primarias rellenarán parcial o totalmente y obturarán únicamente las fisuras más amplias de la roca. Las etapas siguientes de perforaciones (secundarias), nuevamente obturarán únicamente las fisuras más amplias, que todavía no se taparon en la primera serie, y así sucesivamente. En la figura IV.7 se grafican las posiciones finales probables de las perforaciones primarias, secundarias, terciarias y adicionales (cuaternarias o perforaciones de comprobación) sobre la curva GIN. El volumen promedio de lechada absorbida disminuirá de una serie a la siguiente, mientras que obviamente la presión final de inyectado se incrementará de una manera correspondiente de una serie a la siguiente. Esto sucede en forma automática cuando se utiliza el procedimiento GIN.

Con un espaciamiento de perforaciones primarias de 10 a 12 m, es probable que se requerirán ambos, la serie (etapa) secundaria y la terciaria. Las perforaciones terciarias estarán a una distancia de 2.5 a 3 m de la perforación adyacente más cercana; estas perforaciones podrían ser más cortas, dependiendo de la geología y de los resultados de las perforaciones secundarias.

Es posible que no se requieran las perforaciones cuaternarias; por lo menos se requerirán algunas perforaciones de comprobación, para llevar a cabo pruebas Lugeon, y comprobar si se logró una permeabilidad aceptablemente baja de la masa de roca; para una pantalla muy "cerrada", los requisitos pueden ser tan severos como que el 90% de todas las pruebas deberán estar cerca o abajo de 1 Lugeon (1×10^5 cm/s), con ningún valor mayor de 3 unidades Lugeon.

Relación de espaciamiento de los barrenos y el GIN

Es obvio que debe existir una relación entre el espaciamiento de las perforaciones y el GIN requerido; por ejemplo, si el espaciamiento primario es demasiado amplio y el GIN seleccionado demasiado bajo, no resultará ningún decremento significativo de la toma de lechada de la serie primaria a la secundaria, o aún hasta la terciaria. En tal caso, no se puede dar ninguna garantía para una pantalla exitosa, aunque se hayan efectuado gastos considerables de perforación e inyectado.

Si el espaciamiento primario es demasiado cercano o el GIN es demasiado elevado, las tomas de lechada serán muy bajas después de las primeras dos series y las perforaciones terciarias serían esencialmente un desperdicio. El GIN también está relacionado con la distancia que viaja la lechada y por lo tanto, con el espesor de la pantalla en roca o "el muro".

Una regla empírica que funciona, es seleccionar los valores de GIN y el espaciamiento de tal manera; que el volumen inyectado por metro de progresión se reduzca de una serie de perforaciones a la otra en alrededor del 50% (de una manera realista en el rango del 25 al 75%), tal comportamiento daría confianza de que está ocurriendo un cierre progresivo en la pantalla. Se podrán emplear uno o más tramos de inyectado de prueba durante la fase de diseño o en la primera parte del inyectado, para definir mejor el espaciamiento óptimo de las perforaciones primarias y el valor de GIN.

Criterios para el cierre

Si las trayectorias de inyectado de las perforaciones de la última serie (digamos la serie terciaria) no alcanzan la línea de la presión límite superior del GIN seleccionado (y preferentemente en la mitad izquierda de la línea), se deberán inyectar perforaciones adicionales en ambos lados de las perforaciones que no cumplan estos criterios. De esta manera todas las partes de la pantalla (aunque no todas las perforaciones primarias, secundarias y terciarias), se habrán inyectado a la presión límite máxima como absorciones de lechada razonablemente bajas (menos de 25 kg/m o 0.18 sacos/ft, por ejemplo).

Si se efectuó una selección no óptima del espaciamiento entre los barrenos, el método propuesto es hasta cierto grado un procedimiento que se regula por sí solo. Esto es como un resultado de la técnica de reducción de espaciamiento, la curva GIN y el requisito de la última serie de perforaciones de alcanzar la presión límite con tomas unitarias mínimas.

Envolventes limitantes compuestas para diferentes intensidades de inyectado

En la figura IV.3 se muestran las trayectorias p,V de tres tipos de fisuras. Una fisura abierta y amplia se representa en la curva 1, que demuestra un volumen creciente de lechada inyectada con sólo un incremento ligero de la presión. La curva 2 representa una fisura promedio, en donde la presión se incrementa gradualmente conforme el volumen de lechada inyectada aumenta; únicamente en el punto a' se eleva rápidamente la presión conforme la resistencia a la penetración de la lechada se incrementa en una forma desproporcionada. La curva 3 representa una fisura cerrada, en donde la presión de inyectado se eleva rápidamente con tomas de lechada pequeñas. De manera similar, la curva 4 representa una fisura extremadamente cerrada con una toma de lechada muy pequeña y una presión elevada de rechazo.

La figura IV.4 ilustra 5 envolventes limitantes sugeridas para diferentes intensidades de inyectado. El valor GIN, la presión límite y el volumen límite son de hecho 3 parámetros más o menos independientes, que definen la curva envolvente limitante para el inyectado. En la definición propuesta se relacionan entre sí pero no necesitan estarlo. La envolvente superior representa un inyectado de muy alta intensidad, con un valor de GIN de 2500 bar²/l/m, una presión límite muy elevada de 50.98 kg/cm² y un volumen límite muy elevado de 300 l/m. La envolvente más baja representa una intensidad muy baja con un valor de GIN de 500 bar²/l/m, una presión máxima de 15 bar y un volumen límite de 100 l/m. Para la mayoría de las condiciones, los autores recomendarían la envolvente de intensidad moderada con un valor dado de 1500 bar²/l/m, una presión límite de 30.56 kg/cm² y un volumen límite de 200 l/m.

Para áreas geológicamente críticas (cerca de la superficie o sobre taludes parados), sería aplicable la curva muy baja. Se comprende fácilmente, de la combinación de las figuras, que el proceso de inyectado se detendrá en diferentes puntos dependiendo del valor seleccionado para la envolvente de inyectado.

En la curva 1 (fig. IV.3), el inyectado se terminaría en el punto a para un inyectado de baja intensidad, debido al volumen límite de 150 l/m con una presión resultante de 3.057 kg/cm². Sin embargo, si el diseñador especificó la envolvente de intensidad moderada, el inyectado continuaría hasta el punto b, el volumen límite de 200 l/m, y nuevamente la presión final sería alrededor de 3.057 kg/cm². Si se hubiera seleccionado un inyectado de alta intensidad, el inyectado continuaría hasta el punto c, el volumen límite de 250 l/m, siendo la presión final alrededor de 6.114 kg/cm². Finalmente, si se hubiera seleccionado una intensidad muy elevada, el inyectado continuaría hasta el punto d. La trayectoria no se terminaría por el volumen límite, sino más bien por la intersección con la curva GIN 2500 bar²/l/m. En este punto, el volumen total inyectado sería de 285 l/m y la presión final de inyectado sería de 9.20 kg/cm². De esta manera, habría un rango de volumen inyectado de 150 a 285 bar²/l/m y un rango de la presión final de inyectado de 3.057 a 9.20 kg/cm², que depende del GIN especificado.

Para la curva 2 (fig. IV.3), el volumen inyectado en el punto a', sería de alrededor de 60 l/m y la presión final de inyectado sería de 13.25 kg/cm². Si se hubiera continuado el inyectado hasta el punto d', que representa una intensidad muy elevada ($p \cdot V = 2500$ bar^ol/m), la toma de lechada se hubiera incrementado únicamente hasta 90 l/m, pero la presión hubiera alcanzado 28.55 kg/cm², considerablemente menor que el valor límite de 50.95 kg/cm². De una manera similar para la curva 3, se detendría el inyectado entre el punto a" y d" dependiendo de los criterios de GIN y de la presión límite previamente seleccionados. La porción x-y representa un ejemplo de hidrofracturamiento o un evento de partición por presión hidráulica, en donde una junta o plano de estratificación se forza repentinamente abriendo con una calda resultante de presión y un incremento en la velocidad de absorción. Se podría continuar el inyectado a velocidades bajas, para tratar de alcanzar la curva GIN seleccionada, pero, si la presión se incrementara, se presentaría probablemente otro evento de hidrofracturamiento aproximadamente a la misma presión o un poco mayor. Es cuestionable si el inyectado debería continuarse bajo tales circunstancias; sin embargo, muchas veces se ha hecho sin ningún problema serio. En cualquier caso, tarde o temprano se alcanza la curva límite y el inyectado se detiene.

Inyectado controlado por computadora

Ya que actualmente se pueden instalar computadoras PC fácilmente en el sitio mismo del inyectado, existe ahora la posibilidad de un control continuo del proceso de inyectado, en tiempo real. Solamente se deberán leer de una manera continua dos valores por medio del sistema: la presión actual p, y la velocidad de flujo q, de la cual se puede obtener por medio de integración el volumen acumulado V, por unidad de longitud (inyectado desde el inicio de la progresión en cuestión). Si se desea, puede medirse directamente el volumen V de lechada inyectada y la velocidad de flujo se podrá obtener por derivación.

Empezando desde los valores medidos de p y q, se puede mostrar y graficar una serie de gráficas sobre la pantalla del monitor (por ejemplo presión, velocidad de flujo, volumen acumulado y penetrabilidad contra el tiempo), la figura IV.5 muestra tal serie de gráficas. Llama la atención la curva (d), que representa el flujo específico (q/p) o penetrabilidad contra el tiempo. Esta curva muestra claramente el llenado progresivo de los huecos y fisuras y el crecimiento de la resistencia al inyectado, causada en primer lugar por el incremento total de la fuerza cohesiva conforme se extiende el flujo de lechada más adelante a lo largo de las fisuras de la roca. Se observa fácilmente un evento de hidrofracturamiento o hidroelevarción por la presencia de un pico en la gráfica.

Las curvas GIN y de penetrabilidad-volumen como controles prácticos del inyectado

La figura IV.6 representa las gráficas principales de control que puede presentar la computadora. Estas curvas pueden utilizarse para controlar el proceso de inyectado. La figura (a) muestra la envolvente limitante de inyectado que ha sido seleccionada para el proyecto, incluyendo la presión límite p_{max} , el volumen límite de V_{max} por unidad de longitud y la curva hiperbólica GIN seleccionada. Esta envolvente puede introducirse en el programa y puede presentarse a petición. En general, a las curvas de la envolvente limitante, se les llama simplemente curvas GIN.

En la curva irregular 2 mostrada en la figura IV.6 representa la trayectoria real del inyectado graficada en pequeños incrementos de tiempo, de la presión instantánea de inyectado contra el volumen acumulado de inyectado de lechada por unidad de longitud. La curva irregular de la trayectoria de inyectado interseca la curva GIN en el punto F y el inyectado se detiene a una velocidad de flujo "cero", con una presión p_F y un volumen total unitario acumulado de lechada inyectada V_F .

La figura IV.6 también es una curva importante de registro en tiempo real. La penetrabilidad q/p se grafica contra el volumen acumulado de lechada inyectada en vez de hacerlo contra el tiempo, como en la figura IV.5, dando sin embargo curvas de tipo similar. Conforme se desarrolla la curva, se observa normalmente un descenso en la penetrabilidad, lo que indica que la eficiencia del inyectado está disminuyendo; de esta manera, a una presión constante de inyectado, la velocidad de flujo disminuye o bien, si se mantiene una velocidad constante de flujo (casi al final), la presión de inyectado crece.

El descenso de la curva de penetrabilidad-volumen indica que el proceso de inyectado está progresando normalmente. Deberá registrarse y controlarse la presión de inyectado para detener el proceso en los límites de inyectado sobre la curva GIN.

Como se indicó, la trayectoria de inyectado llegará a la curva GIN en diferentes puntos, en función de la abertura de las fisuras de las rocas (fisura amplia cerca del punto B y fisura fina cerca del punto A; fig. IV.3). Conforme avance la trayectoria de inyectado hacia la curva GIN, las velocidades de bombeo deberían ser tan bajas como sea posible, mientras todavía se logre una penetración de lechada (por ejemplo 500 l/h es decir 17.6 ft³/h o 2.2 gals/min). La experiencia ha demostrado que estas gráficas ayudan a controlar el proceso de inyectado de una manera efectiva y continua.

En conclusión, si son seguidos los conceptos y reglas presentadas, se puede lograr una distribución bastante óptima del volumen total inyectado a lo largo de la pantalla. El procedimiento toma en cuenta, casi en forma automática, las irregularidades reales de las condiciones geológicas en la masa de la roca. Al hacer esto, se puede maximizar la relación beneficio-costos de la pantalla de inyectado.

Control de campo

- Se definen los elementos de control de la curva GIN a partir de los resultados del programa de inyectado de prueba, así como cualquier consideración especial ingenieril, de mecánica de rocas o geológica: (a) para garantizar que los límites de volumen y presión sean razonables para las características geológicas existentes; y (b) para evaluar la necesidad de diferentes valores de GIN en diferentes partes de la obra.

- Se inyecta cada cuarta perforación primaria primero como perforaciones de inyectado exploratorias, excepto en áreas de un inyectado de prueba previo: (a) para permitir una mejor definición por áreas de las condiciones geológicas y geohidrológicas (por medio de perforación rotatoria con recuperación de núcleos y pruebas de presión de agua Lugeon hasta una profundidad igual a la altura futura del embalse arriba del punto del terreno en cuestión; (b) para permitir una selección final de la profundidad de los barrenos para las perforaciones primarias restantes (probablemente un rango de profundidad de 0.5 a 0.8 de altura del embalse); y (c) para asegurarse de que la curva GIN seleccionada sea apropiada.

- Se controla el proceso de inyectado por medio de una computadora personal de campo, utilizando la curva GIN y la curva de penetrabilidad: (a) para permitir un registro en tiempo real de la trayectoria de inyectado; y (b) para permitir que se anticipe la terminación del inyectado a partir de la curva de penetrabilidad declinante y del acercamiento de la trayectoria de p contra V hacia la curva GIN de control (incluyendo el volumen límite y las porciones de presión límite de la curva).

- Se inyecta previamente agua antes del inyectado de cualquier progresión arriba del nivel del agua subterránea, para saturar parcialmente la roca, de manera de reducir el riesgo de pérdida del agua de la lechada junto con un bloqueo prematuro.

- Se emplean pruebas de presión de agua Lugeon únicamente en las perforaciones exploratorias primaria y en las perforaciones de comprobación, para comparar las permeabilidades iniciales y finales de la masa de roca.

- Se resumen los resultados del inyectado por medio de métodos estadísticos gráficos, para asegurar un cierre progresivo de las fisuras de la roca con una permeabilidad residual resultante aceptablemente baja.

Ejemplo

En el inyectado en proceso en la presa Aguamilpa en México, puede mencionarse como un ejemplo sobresaliente. Esta presa de 180 m de altura, propiedad de la Comisión Federal de Electricidad, es la más alta de enrocamiento con cara de concreto en el mundo. Su llenado se inició durante 1993.

El método GIN se empleó para la consolidación de roca abajo del plinto de la cimentación de la cara de concreto y para la pantalla de inyectado profunda. Después de pruebas extensas de laboratorio y de campo, se seleccionó una sola mezcla "normal" con las siguientes características:

Cemento:	Cemento puzolánico fino con valor Blaine alrededor de 5100 cm ² /g
Relación agua-cemento:	0.9:1 (un poco mayor que el normal, debido al valor elevado de Blaine)
Aditivo superplastificante:	1.6% del peso de cemento de Sikament NZ
Densidad de la mezcla:	1.5 a 1.55 g/cm ³
Decantación	4% en 2 horas
Tiempo de flujo en embudo Marsh:	28 a 32 s
Cohesión relativa (C/):	0.08 a 0.2 mm, aumentando a 0.2 hasta 0.3 en 2 horas
Resistencia de la mezcla endurecida:	91.75 a 101.95 kg/cm ² a los 7 días y 132.55 a 173.30 kg/cm ² a los 28 días

Corresponde a una mezcla estable, pero muy fluida con propiedades de alta penetración durante la primera hora y una resistencia excelente tanto mecánica como contra lixiviación.

Para la pantalla de inyectado se especificó lo siguiente:

- Procedimiento: progresiones ascendentes de 5 m;
- Método de reducción de espaciamentos, iniciando con perforaciones primarias a una distancia de 24 m.

- **Perforación de barrenos adicionales de orden mayor, mientras que la toma era mayor de 25 l/m**
- **Saturación de la masa de roca (arriba del nivel de agua) durante una hora a una presión de 2.038 kg/cm², inmediatamente antes del inicio del inyectado para cada progresión de 5 m.**
- **Intensidad de inyectado: 2500 bar*l/m (reducido a 1500 debajo del plinto);**
- **Límite máximo de presión: 40.75 kg/cm² (reducido cerca de la superficie a 10 bar y aumentando a 40 bar a una profundidad de 20 m y reducido en forma adecuada en sitios geológicamente delicados)**
- **Límite máximo de absorción: 400 l/m; en efecto, 2000 litros por 5 m de progresión (se reduce localmente a 300 l/m);**
- **Criterio de suspensión: velocidad de flujo menor de 3 l/m min para una progresión de 5 m, a la presión final de inyectado.**

Estas especificaciones son fáciles de manejar en el sitio, especialmente porque se utiliza una sola mezcla.

Como un ejemplo, la figura IV.9 muestra la trayectoria del inyectado de consolidación abajo del plinto de una progresión. Las lecturas fueron tomadas en forma intermitente a intervalos de alrededor de 5 minutos, ya que no había disponibilidad de registro por computadora PC. En la parte superior figura IV.8 las trayectorias de la presión p así como la velocidad de flujo q se grafican contra el volumen V de lechada inyectada. La trayectoria de presión puede compararse con la frontera limitante del GIN.

La meta del inyectado fue una intensidad de 1500 bar*l/m; sin embargo, se alcanzó una intensidad de 2510 bar*l/m y se excedió ligeramente el volumen límite de 300 l/m. Este exceso fue causado por un retraso en la transmisión de datos del sitio de inyectado al operador de la bomba, o debido a una reacción lenta del operador mismo de la bomba; esto indica lo deseable de un registro continuo en tiempo real y una presentación por computadora PC, así como el tener un paro automático de la bomba cuando se alcance la curva GIN de control.

En la parte inferior de la figura IV.9, se grafica la penetrabilidad contra el volumen tomado V . Al principio del proceso de inyectado, la penetrabilidad se incrementa de 0.2 a 0.5 l/min*m³bar, debido a la abertura progresiva de las discontinuidades de la masa de roca; después de una toma de 200 l/m, disminuye la penetrabilidad en forma regular a 0 para un volumen de 320 l/m; en efecto, el proceso de inyectado se detuvo justamente antes de alcanzar este valor.

Se considera que algunas de las irregularidades mostradas en la curva de penetrabilidad son causadas por el redondeo de algunas lecturas por los operadores. También, es probable que ocurrieron dos o más eventos de hidrofracturamiento que no se detectaron completamente por el registro intermitente.

Comparación con el inyectado usual

Con el método GIN, únicamente se emplea una mezcla; consecuentemente la cohesión es una constante; conforme avance la lechada a lo largo de las fracturas, su contacto con las paredes de las fracturas se incrementa y de esta manera la resistencia total de flujo por cohesión; consecuentemente, se deberán utilizar presiones de bombeo mayores para vencer la resistencia al flujo. Este es un fenómeno físico normal y esperado; el método GIN permite que se continúe con el proceso de inyectado bajo una presión que se incrementa gradualmente hasta que se alcanzan uno de los valores límites: la presión límite, el volumen límite o una combinación de presión y volumen, representada por la curva especificada p-V.

Existen otras diferencias entre los métodos tradicionales y el procedimiento GIN; el método GIN siempre emplea la mejor mezcla posible con relación a resistencia, durabilidad, resistencia a la lixiviación y contracción; el GIN evita el inyectado de grandes volúmenes en forma de mezclas delgadas; el empleo de una mezcla estable evita o reduce, de una manera significativa, el riesgo de dañar la roca por hidrofracturamiento; se reducen grandemente los errores en el proceso de inyectado; y resulta ser este más sencillo y rápido, ya que no se pierde tiempo al cambiar la mezcla.

Resumen y conclusiones

El proceso de inyectado involucra un bombeo constante de la lechada a una velocidad de baja a mediana con un aumento lento de la presión, conforme la lechada penetra más adentro de la masa de roca. El inyectado se detiene cuando el volumen inyectado alcanza un valor límite especificado para una progresión, cuando la presión de inyectado alcanza el valor límite previamente seleccionado, o cuando la intensidad de inyectado especificada ha sido alcanzada en una posición intermedia, menor que los valores límite de volumen y presión, como se juzga por la curva GIN previamente seleccionada.

La distancia al origen de la curva es una función de la energía empleada en el inyectado; se puede preparar una familia de curvas para diversas intensidades de inyectado, variando desde un valor muy bajo hasta un valor muy elevado; se puede seleccionar una curva de intensidad para el proyecto o se pueden emplear dos; por ejemplo, una de alta intensidad para el inyectado del fondo del valle y una de baja intensidad para los taludes someros de los empotramientos o en áreas geológicamente débiles.

De esta manera, la envolvente limitante completa de la línea de presión límite (en el rango de 15.30 a 30.50 kg/cm²), la línea del volumen límite (en el rango de 100 a 300 litros por metro de intervalo de inyectado) y una curva GIN seleccionada que conecte las dos líneas límite (con valores GIN que varían de muy bajos a muy elevados, por ejemplo 500 a 2500 bar^{*l}/m)

El Método GIN requiere un registro constante por medio de gráficos de computadora con curvas de tiempo real de la presión contra el tiempo, de la velocidad de flujo de la lechada contra el tiempo, además de la curva derivada de la penetrabilidad (velocidad de flujo dividida entre la presión, q/p) contra el tiempo. Esta última curva es de un valor particular, ya que señala el alcance del rechazo del inyectado, o por lo menos, de absorciones se van reduciendo.

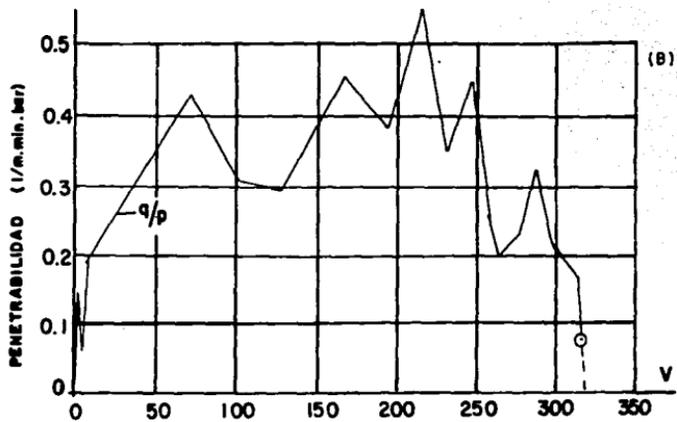


FIG. IV. 9

Presa Aguamilpa, México, barreno 674 P. progresión 17-22 inyectada diciembre 3 1992: (B) penetrabilidad (q/p) contra volumen.

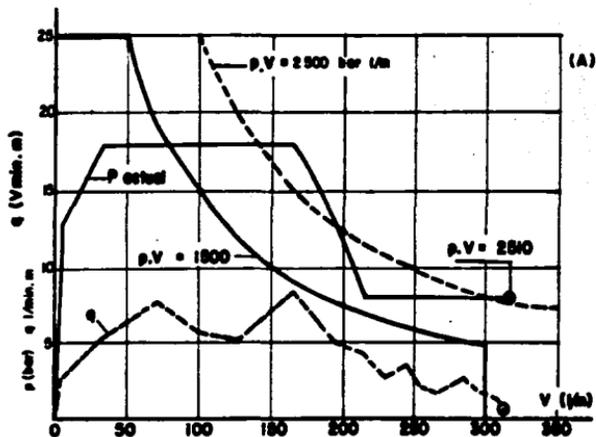


FIG. IV. 8

Pres. Aguascaltecas, México, barrera 674.P, Progresión 17-22 m inyectada diciembre 1992. (A) Presión p y caudal q contra volumen absorbido y equivalente límite de la intensidad de inyectado.

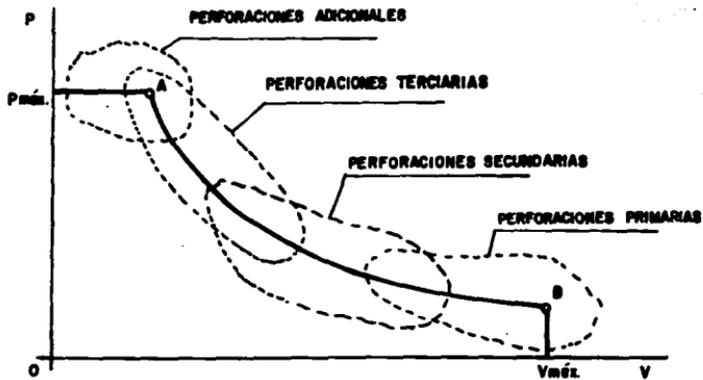


FIG. IV.7
 EJEMPLO DE RESULTADOS DEL INYECTADO PARA UNA PANTALLA DE INYECTADO.
 PUNTOS FINALES DE LAS TRAYECTORIAS DE TODAS LAS PROGRESIONES DE INYECTA-
 DO (TÍPICO).

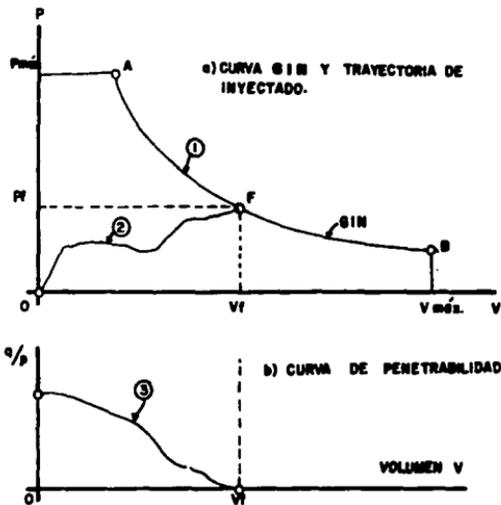


FIG. IV. 6
 PROCESO DE INYECTADO DE UNA SOLA PROGRESION (TIPICO), EN DONDE: 1) CURVA LIMITE
 PRESION CONTRA TOMA DE LECHADA, 2) TRAYECTORIA REAL DE INYECTADO PRESION —
 CONTRA TOMA DE LECHADA, 3) PENETRABILIDAD (q/p) CONTRA TOMA DE LECHADA
 F= PUNTO FINAL DEL INYECTADO P1) PRESION FINAL DE INYECTADO, V1) TOMA REAL DE LE-
 CHADA,

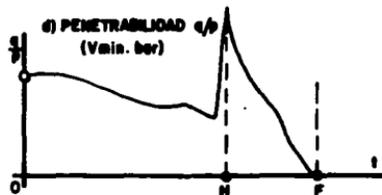
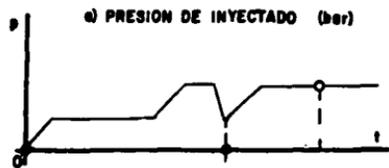


FIG. 5

PROCESO DE INYECTADO DE UNA SOLA PROGRESION: a) PRESION DE INYECTADO, b) FLUJO DE MEZCLA DE LECHADA; c) VOLUMEN ABSORBIDO; d) PENETRABILIDAD, O) INICIO DEL INYECTADO; H) HIDROFRACTURAMIENTO; F) TERMINACION DEL INYECTADO.

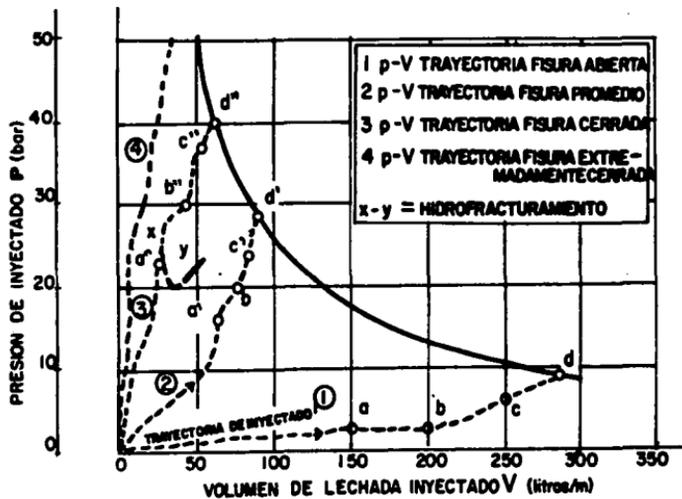


FIG. IV.3 EJEMPLO DE CURVAS DE TRAYECTORIAS DE INYECTADO.

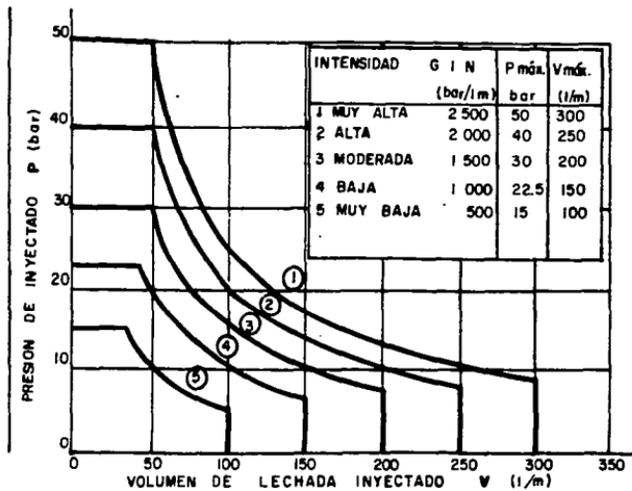


FIG.4 ENVOLVENTES LIMITANTES PROPUESTA PARA INYECTADO.

V. EVALUACION DE RESULTADOS

5.1 PERMEABILIDAD

Los depósitos fluviales presentan dificultades para muestrearse sin alteración, pues es difícil que se extraigan los componentes del acarreo y aún en el caso de que se puedan extraer todas las partículas, cambia la estructura que tienen in situ; esta circunstancia impide que se puedan hacer pruebas de permeabilidad en el laboratorio realmente representativos.

Para obtener el perfil de la roca basal, conviene hacerlo por medio de exploraciones con recuperación de muestra; se pueden emplear máquinas rotarias, o bien, si se requiere una recuperación más continua es recomendable la utilización de perforadoras de circulación invertida; las perforaciones que así se ejecutan se pueden utilizar para realizar ensayos Lefranc, con los cuales se define con buena aproximación la permeabilidad de los materiales que se pretenden inyectar.

Si las pruebas de campo se van a llevar a cabo en materiales de baja permeabilidad como arenas bien graduadas, finas o limos, es aplicable la prueba de carga variable con buenos resultados; si el caso corresponde a arenas gruesas o arenas con gravas, es decir a materiales más permeables, es posible servirse de la prueba de la carga constante.

Los testigos que se obtienen con el muestreo definen más o menos las capas o estratos de materiales arcillosos, arenosos, gravosos, etc. Si se correlacionan dichos datos con los resultados de las pruebas de permeabilidad, pueden aportar fundamentos muy valiosos para el diseño de las lechadas de inyectado y presiones convenientes de aplicar.

5.2 GRANULOMETRIA

Si no se dispone de métodos adecuados para obtener muestras inalteradas del terreno por investigar, tampoco se podrán hacer pruebas de permeabilidad en el laboratorio; por otra parte, si se obtienen muestras integrales y la granulometría, ésta tampoco proporcionará datos sobre la permeabilidad del terreno; si algunos estratos están constituidos de arenas finas, las permeabilidades obtenidas de las muestras y

de su granulometría serán más cercanas a la realidad. Para que se puedan determinar permeabilidades a partir de las muestras, son necesarios materiales en los cuales es posible labrar muestras inalteradas como limos y arcillas que al probarse en el laboratorio sí pueden dar resultados muy aproximados de la permeabilidad.

5.3 VOLUMEN DE FILTRACIONES

Conocidas las permeabilidades de los materiales granulares del lecho de un río y el perfil de los mismos en relación a la roca basal, es útil conocer el volumen de agua que fluye a través de ellos; esta cuantificación es posible hacerla por varios procedimientos: como el de la red de flujo y en el que se aplica la fórmula de Darchler.

Con la red de flujo de la cimentación del proyecto de cortina de materiales graduados de la presa "Boca de Tesorero", Zacatecas, efectuaremos dos de las principales aplicaciones de ésta:

- a. Gasto de agua que fluye por la cimentación.
- b. Gradiente hidráulico y factores de seguridad en cuatro puntos diferentes a la salida de la cimentación en la zona de los respaldos (arena y grava) de aguas abajo de la cortina. Fig V. 1 de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$q = k H \frac{N_c}{N_o}$$

donde

- q gasto de filtración en m^3/s
 k coeficiente de permeabilidad en m/s
 H carga de agua en m
 N_c número de conductos de la red de flujo
 N_o número de caídas de potencial de la red

$$k = 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$H = 23 \text{ m}$$

$$N_1 = 3 \text{ m}$$

$$N_2 = 7 \text{ m}$$

$$\text{Gasto unitario} = q = 4 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}} (23.0 \text{ m}) \left(\frac{3}{7} \right) (1 \text{ m})$$

$$q = 0.000394 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$q = 0.394 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

El gasto anual en el área de acarreos de 1400 m² que se tienen es:

$$Q_1 = 869,763 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$Q_1 = 2382.912 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$Q_1 = 238912.30 \frac{\text{l}}{\text{día}}$$

$$Q_1 = 27.58 \frac{l}{s}$$

5.4 FORMULA DE DACHLER

De acuerdo con la fórmula de Dachler, el volumen de filtraciones debe obtenerse con el siguiente desarrollo (Fig V.2).

$$q = \frac{kH}{0.88 + \frac{B+B'}{D}}$$

- q gasto de filtraciones en m^3/s
- k permeabilidad de los acarreo en $m/s = 4 \times 10^{-5} m/s$
- H carga de agua en m
- B ancho del núcleo de la presa en m
- B' longitud del delantal en m
- D espesor de acarreo de la cimentación en m

$$q = \frac{4 \times 10^{-5} \frac{m}{s} (23 m)}{0.88 + \frac{31 m}{20 m}}$$

$$q = 0.00037 \frac{m^3}{s} = 0.37 \frac{l}{s}$$

$$Q_1 = 0.37 \frac{l}{s} \cdot 70 = 25.9 \frac{l}{s}$$

$$Q_2 = 86400 s \cdot 25.9 \frac{l}{s} = 2237760 \frac{l}{dia} = 2237 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_3 = 2237 \frac{m^3}{s} \cdot 365 dias = 816,782 \frac{m^3}{año}$$

$$Q_3 = 25.892 \frac{l}{s}$$

Se puede observar que los dos métodos dan resultados muy similares; se recomienda verificar no exista tubificación en los materiales de la cimentación de la cortina provocada por el flujo de agua.

PRESA "BOCA DEL TESORERO", ZAC.

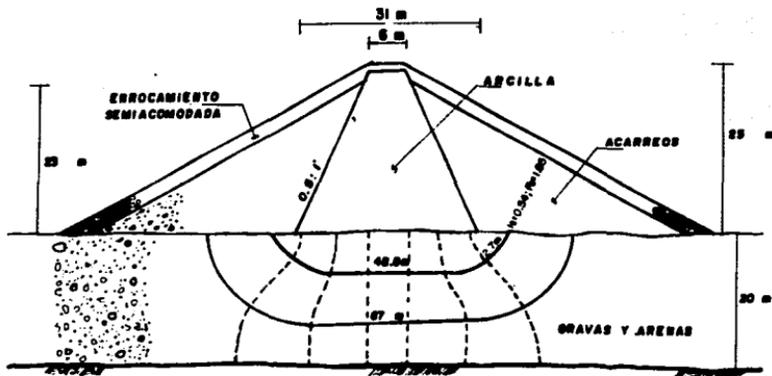


FIG. V.1 . RED DE FLUJO (GRADIENTE HIDRAULICO Y FACTORES DE SEGURIDAD)

FALLA DE ORIGEN

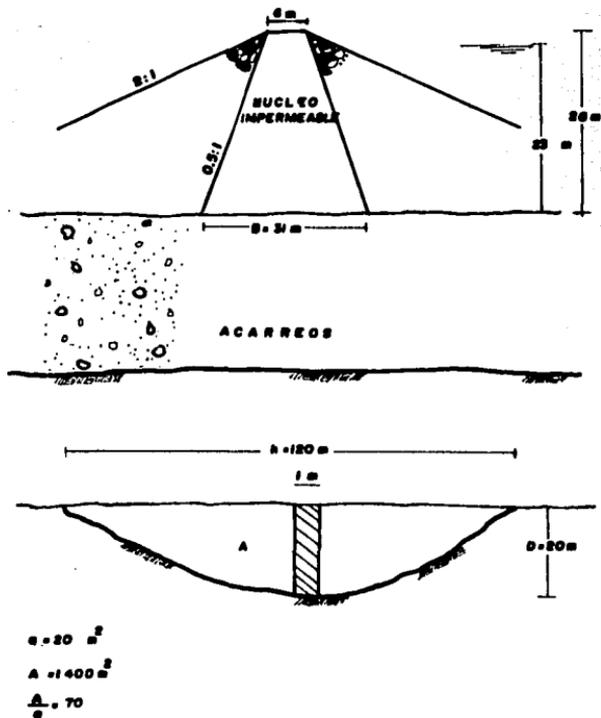


FIG.V.2 SUPERFICIE DE ACARREOS POR EL DE LA CORTINA.

5.5 LECHADAS

Las lechadas destinadas a rellenar fisuras, fracturas, fallas, o los huecos contenidos entre partículas de los materiales granulares de los acarreos, deben tener la viscosidad y la rigidez convenientes para que se efectúe una buena penetración de los accidentes estructurales de la roca o se logre una correcta impregnación, si se requiere impermeabilizar gravas y arenas.

Se recomienda reproducir en el laboratorio la granulometría y relación de vacíos del terreno natural, especialmente en los suelos aluviales. A pesar de que las condiciones de campo no pueden ser reproducidas con fidelidad en los ensayos de laboratorio, éstos son adecuados como un procedimiento de bajo costo que permite determinar la lechada que es más conveniente inyectar en aluviones de acuerdo a la granulometría y a la permeabilidad de los mismos.

Las gráficas (figs V.3, V.4, V.5 y V.6) permiten seleccionar la lechada de inyección de acuerdo con la granulometría del terreno por inyectar. Es conveniente verificar si la mezcla determinada por medio de las tablas es adecuada; para ello se emplea la ecuación:

$$d \leq c \sqrt{k}$$

donde

d diámetro medio de los granos de la lechada en micras

k coeficiente de permeabilidad en m/s

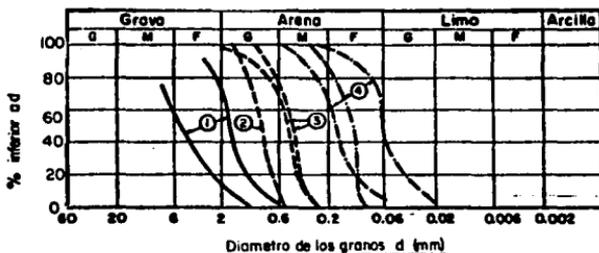
C constante que varía entre 600 y 800

La ecuación anterior se presenta graficada en la fig V.6

Tipos de mezclas

- 1 suspensiones de cemento
- 2 suspensiones de cemento-arcilla
- 3 suspensiones de arcilla
- 4 soluciones de silicato de sodio

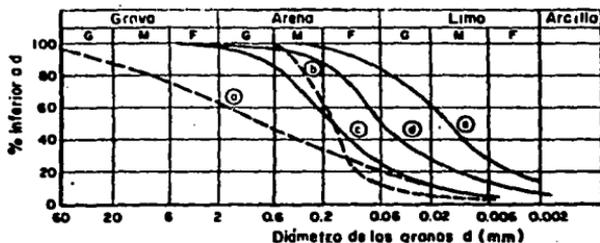
Fig V.3 Curvas granulométricas correspondientes a los límites de penetrabilidad con suspensiones y soluciones coloidales, según varios autores.



FALLA DE ORIGEN

- a suspensiones cemento-bentonita y soluciones de silicato con aditivo orgánico
- b soluciones de silicato con aditivo orgánico
- c soluciones estables de cemento y resinas fenólicas
- d-e resinas fenólicas y acrílicas

Fig V.4 Curvas granulométricas de terreno tratadas con inyecciones de soluciones coloidales y de resina pura



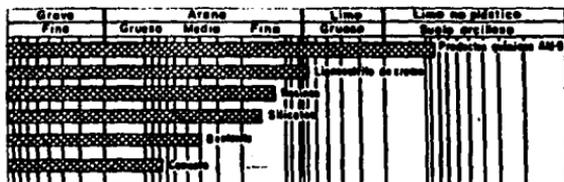
FALLA DE ORIGEN

Fig V.5 Intervalos de penetrabilidad con suspensiones y soluciones coloidales

Propiedades de las mezclas

a) Viscosidad

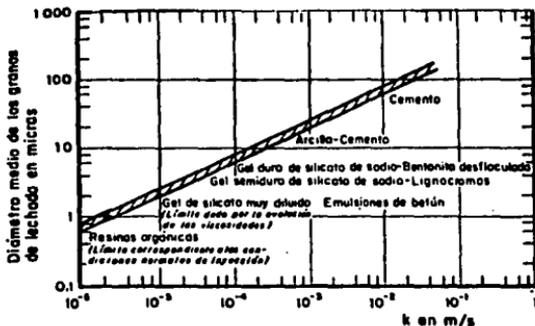
La viscosidad se mide principalmente en el viscosímetro de cilindros coaxiales, en los viscosímetros de circulación, o en conos calibrados.



FALLA DE ORIGEN

Fig V.6 Límites de penetrabilidad de los morteros basados en la permeabilidad de los terrenos

El viscosímetro de cilindros coaxiales consta de dos cilindros de altura h , el interior, de radio r , cuelega de un cable de torsión; el exterior es móvil alrededor de su eje longitudinal y su radio es R ; el momento M aplicado al cilindro interior se mide en el cable de torsión y la viscosidad μ puede estimarse aplicando las expresiones siguientes:



FALLA DE ORIGEN

Para un líquido newtoniano

$$\omega = \frac{M}{4 \pi h \mu} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right)$$

Para un fluido de Bingham

$$\omega = \frac{M}{4 \pi h \mu} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) - \frac{\tau_f}{\mu} \log \frac{R}{r}$$

donde

ω velocidad angular del cilindro exterior

τ_f límite de fluencia

La unidad de viscosidad en el sistema C.G.S. es el poise, que es igual a una dina s/cm².

Conociendo las dimensiones del aparato, la velocidad angular ω y el momento M se obtiene μ y τ_f .

En el campo se acostumbra utilizar el cono calibrado tipo Marsh; e que se mide el tiempo en segundos necesario para el vaciado de un volumen determinado. Esta medida depende de la viscosidad, del límite de fluencia y de la densidad de la mezcla; el volumen de lechada comúnmente utilizado es de 1 o 1.5 l.

La viscosidad aparente o fluidez de las lechadas adecuadas para inyecciones medida en el cono Marsh varía entre 32 y 40 s.

b) Decantación

La decantación es el espesor de la lámina de agua que se forma sobre una suspensión después de la sedimentación de sus partículas sólidas. Esta separación de fases da lugar, sobre todo en fisuras y cavidades horizontales, a un paso por donde puede circular el agua.

La decantación de la lechada antes de fraguar produce una disminución del contenido del agua de la fase sólida y un aumento de su resistencia; varía en un intervalo muy amplio, en función de la naturaleza de la lechada y de la granulometría del terreno.

c) Exprimido

Es la separación del agua de una lechada que se filtra a través del medio poroso cuando se somete a la presión de inyección.

Un aparato universalmente empleado para medir el volumen de agua de la mezcla inyectada que se filtra en la roca y el espesor de los sólidos de la mezcla prensada resultante es el filtro-prensa. Se coloca la muestra de lechada en un cilindro provisto de un filtro y se le aplica una presión hasta 7 kg/cm^2 . El ensayo se realiza bajo presión y volumen constante con volumen prefijado; su duración depende del proporcionamiento de la mezcla y de las características de los materiales constitutivos.

El fenómeno que se logra reproducir con el filtro-prensa es la inyección de lechada de cemento, arcilla-cemento y bentonita-cemento en rocas porosas y fisuradas. Los resultados pueden indicar si la granulometría del cemento es adecuada o no. Si el esqueleto del cemento es muy abierto, la arcilla se filtra a través del cemento, es decir, aparece una separación de fases; pero el objetivo principal del experimento es indagar la reducción de la relación agua-cemento antes del fraguado.

d) Tixotropía y reopexia

La tixotropía es un fenómeno que aparece en ciertas suspensiones de arcilla en agua que consiste en el aumento de su viscosidad al disminuir la velocidad de circulación del fluido; el fenómeno inverso se denomina reopexia.

La tixotropía y la reopexia de las lechadas son importantes en la inyección de las rocas; la tixotropía permite que a velocidades importantes la lechada penetre y

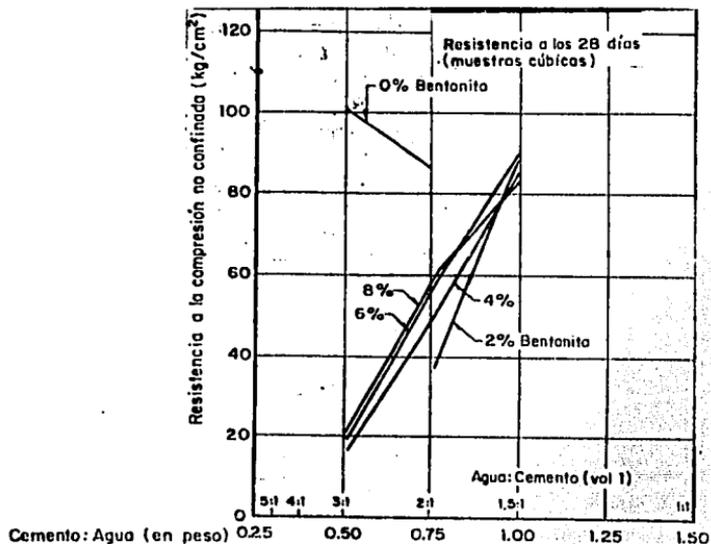
finalmente, al disminuir la velocidad, adquiere una viscosidad suficiente para evitar la decantación de los granos de cemento. La reopexia por su parte, puede provocar obstrucciones importantes en las tuberías durante la inyección; las dos características mencionadas pueden medirse por medio del viscosímetro de cilindros coaxiales.

e) Resistencia a la compresión simple

Las gráficas de resistencia a la compresión simple contra el cociente cemento-agua en peso de mezclas con diferentes porcentajes de bentonita en peso del cemento (fig. 10), da únicamente una idea de la resistencia de la lechada impregnada.

El efecto de interacción entre la mezcla y el terreno son predominantes en la resistencia del conjunto. Cuando se prevé una reducción importante de la relación agua-cemento por efecto de exprimido, la prueba de compresión simple deberá reproducir la condición final de la lechada inyectada, esto es, la condición posterior al exprimido.

Los tipos de lechadas aplicables para inyectado de rocas y acarreo son las inestables y las estables respectivamente.



5.5.1 Lechadas inestables

Sobre éstas sólo se harán algunos comentarios breves en el sentido de que las más usadas están elaboradas a base de cemento; este tipo de lechada, da magníficos resultados en el tratamiento de rocas fisuradas, tanto para impermeabilizar como para consolidar; los proporcionamientos de agua-cemento (en peso) convenientes dependerán del tipo de cemento que se use y de la abertura de las fisuras que se quiera inyectar; se ha observado que con proporcionamientos de 1 a 0.2 se puede cubrir prácticamente cualquier clase de inyectado en roca. La presión de inyectado tiene efectos muy notables, ya que al aplicar altas presiones se produce un efecto de exprimido en la mezcla que hace que se depositen los granos de cemento y se expulse el exceso de agua como consecuencia de la presión, obteniéndose un buen enjarre o relleno de fracturas.

Algunas veces se agrega bentonita en proporción de 1 a 4 por ciento a la lechada de cemento, según la relación A/C empleada. El uso de la bentonita como aditivo, produce un aumento considerable del volumen final de sólidos y mejora la estabilidad de la lechada. Esta lechada es práctica en presiones intermedias que no ocasionen deformaciones en la roca.

A lechadas con relación A/C comprendidas entre 1 y 0.2 a las que se les agrega pequeñas cantidades de bentonita, no se les considera como estables, debido a que todavía presentan sedimentación más o menos rápida y superior al 10 por ciento. La experiencia ha demostrado que lechadas con estas características no son recomendables para inyectar aluviones, ya que propician la formación de tapones a la entrada de los intersticios de los granos del aluvión y evitan que avance la lechada en toda la zona que se requiere tratar, lo que produce una impermeabilización defectuosa.

5.5.2 Lechadas estables cemento-bentonita

En algunas ocasiones se preparan lechadas con relación A/C comprendidas entre 1 y 2 a las que se les agrega bentonita en proporciones del 2 al 5 por ciento con respecto al peso del cemento; por contener gran cantidad de cemento dichas mezclas presentan sedimentación (agua libre) menor del 5 por ciento, lo que las sitúa en el campo de las mezclas estables.

El uso de estas lechadas queda en general limitado a trabajos de inyectado de aluviones con características granulométricas muy particulares. Como consecuencia de la fuerte dosificación de cemento, estas mezclas resultan demasiado caras, pero pueden ser útiles cuando se necesitan altas resistencias mecánicas para consolidar, además de impermeabilizar.

Cuando se busca con el inyectado únicamente impermeabilizar, caso en el que no se necesitan altas resistencias mecánicas, se usan mezclas con relación A/C (en peso) que varían de 0.25 a 0.40 y cantidades de bentonita entre 10 y 20 por ciento, que además de ser económicas, tienen buena aplicación en diversas clases de aluviones, incluidos los constituidos por arenas. Este tipo de lechada se ha utilizado para impermeabilizar aluviones en que se han apoyado las cortinas.

La práctica en los trabajos de campo indica que la recirculación de los lodos bentoníticos empleados en la elaboración de las lechadas mejora la estabilidad y propiedades reológicas de las mismas.

5.6 FILTRACIONES POSTERIORES AL INYECTADO

Ahora se obtendrá el volumen de filtración después de haber construido la pantalla de inyectado; para esto se aplicará la fórmula desarrollada por Ambraseys:

$$q = \frac{kH}{0.88 + \frac{B}{D} + \left(\frac{k}{k_1} - 1\right) \frac{E}{D}}$$

- k_1 permeabilidad media de los acarreo inyectados = 5×10^{-7} m/s
- E espesor de la pantalla de inyectado
- k permeabilidad media de los acarreo = 4×10^{-5} m/s
- H 23 m
- B 31 m
- D 16 m; $a = 16$ m²
- L $A/a = 57.5$ m; $A = 920$ m²

$$Q_1 = \frac{4 \times 10^{-5} \frac{m}{s} (23 \text{ m})}{0.88 + \frac{31 \text{ m}}{16 \text{ m}} + \left(\frac{4 \times 10^{-5}}{5 \times 10^{-7}} - 1 \right) \frac{8 \text{ m}}{16 \text{ m}}}$$

$$Q_1 = 0.0000217 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_2 = 0.0000217 \frac{m^3}{s} \cdot 57.5 = 0.00125 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_3 = 0.00125 \frac{m^3}{s} \cdot 86400 = 107.91 \frac{m^3}{\text{día}}$$

$$Q_4 = 107.91 \frac{m^3}{\text{día}} \cdot 365 = 39388 \frac{m^3}{\text{año}}$$

Comparando resultados de volúmenes de infiltración que se producen en los acarreo en su estado natural con los que se presentan en los mismos cuando ya se terminaron de inyectar, se puede apreciar que se logra una disminución del orden del 95 por ciento, es decir, que se consiguió cambiar la permeabilidad promedio original de $k = 4 \times 10^{-5}$ m/s a la de $k = 5 \times 10^{-7}$ m/s (Fig V.8).

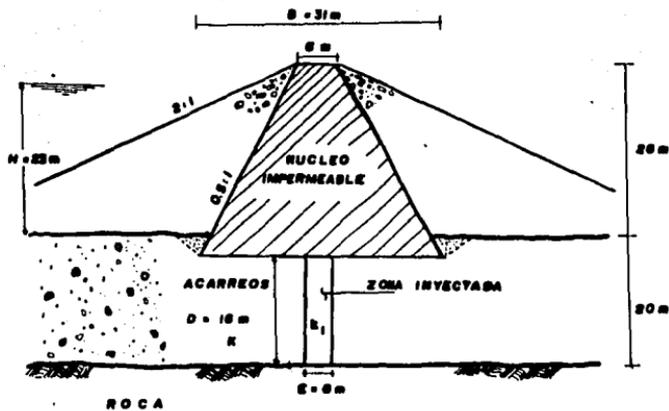


FIG.V.8 ACARREOS CON PANTALLA DE INYECTADO.

FALLA DE ORIGEN

5.7 EJEMPLO DE APLICACION

Considerando el crecimiento demográfico e industrial de la ciudad de Guadalajara para el año 2000, se prevé un déficit en el abastecimiento de agua, por lo que será necesario recurrir a otras fuentes de suministro que no sean los que actualmente se explotan, ya que se rompería el equilibrio en el que se encuentra el acuífero del valle de Teztlán-Atemajac y el lago de Chapala, de donde se obtiene el agua que se utiliza actualmente.

Esta situación hace necesario recurrir a opciones más lejanas, como es el caso del proyecto El Salto, el cual se encuentra sobre el río del mismo nombre, en las cercanías de Valle de Guadalupe, Jal. (Fig V.9).

El proyecto El Salto, Jal., consiste en la construcción de una presa con una cortina de aproximadamente 40 m de altura, capacidad para almacenar un volumen de 140 millones de m³ de agua, que servirán para enviar 2 m³/s hacia Guadalajara mediante un acueducto que funcionará por gravedad.

a) Localización geográfica. La presa se localiza sobre el río Valle de Guadalupe, afluente del río Verde por la margen izquierda, a 112 km al noreste de Guadalajara, en el sitio de coordenadas 21° 21' 21" de latitud norte y 102° 42' 26" de longitud oeste de Greenwich.

b) Vías de comunicación. Partiendo de la Ciudad de Guadalajara por la carretera a Lagos de Moreno, hasta la población Valle de Guadalupe, donde se desvía a la izquierda por un camino de terracería de 13 km que lleva a la presa.

c) Finalidad y breve descripción de la obra. La presa tiene como finalidad controlar el río de Valle de Guadalupe para suministrar un gasto de 2.4 m³/s de agua a la zona metropolitana de Guadalajara; está constituida de una cortina de materiales graduados de 2100 m de longitud y 40 m de altura, que forma un embalse de 112 millones de m³ de capacidad, un vertedor de cresta libre con canal lateral ubicado en la ladera derecha, con capacidad para un gasto de 576 m³/s y una obra de toma alojada en el mismo lado con capacidad para un gasto de 3 m³/s (Figs V.10, V.11, V.12).

HIDROLOGIA

a) Región hidrológica. Número 12, cuenca del río Lerma; subcuenca del río Verde.
Área de la cuenca hasta el sitio 713 km²

b) Período observado. Registro de 44 años, en la estación de aforos Valle de Guadalupe.

c) Escurrimiento anual.

Mínimo	6 millones de m ³
Medio	107 millones de m ³
Máximo	146 millones de m ³

d) Gastos.

Avenida máxima registrada	235 m ³ /s
Avenida de diseño	576 m ³ /s
Período de retorno	10 000 años

e) Capacidades de almacenamiento.

Capacidad	Almacenamiento millones de m ³	Elevación m
Azolves	5	1 795.30
Util	80	810.16 NAMO
Superalmacenamiento	27	1 812.50 NAME
Total	112	

f) Bordo libre.

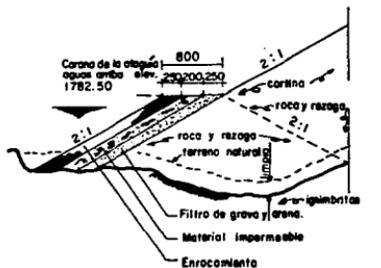
2 m

g) Áreas de embalse.

1 003 ha al NAMO

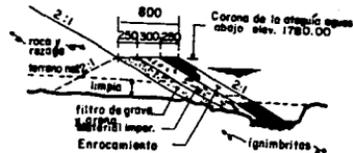
1 433 ha al NAME

FALLA DE ORIGEN



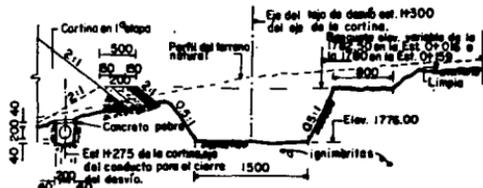
ATAGUA AGUAS ARRIBA

corte A-A



ATAGUA AGUAS ABAJO

corte B-B



TAJO DE DESVIO

Est. 0+016.00

FIG. V.12 CORTES DE ATAGUIAS Y TAJO DE DESVIO

- Elevación en m -
 - Estaciones en m -
 - Dimensiones en cm -

PRESA "EL SALTO"
EDO. DE JALISCO

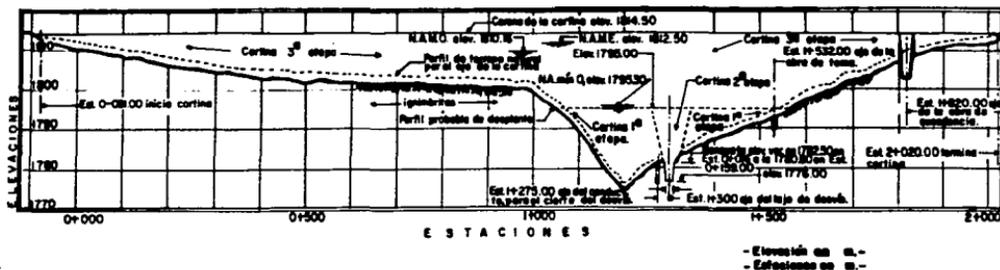
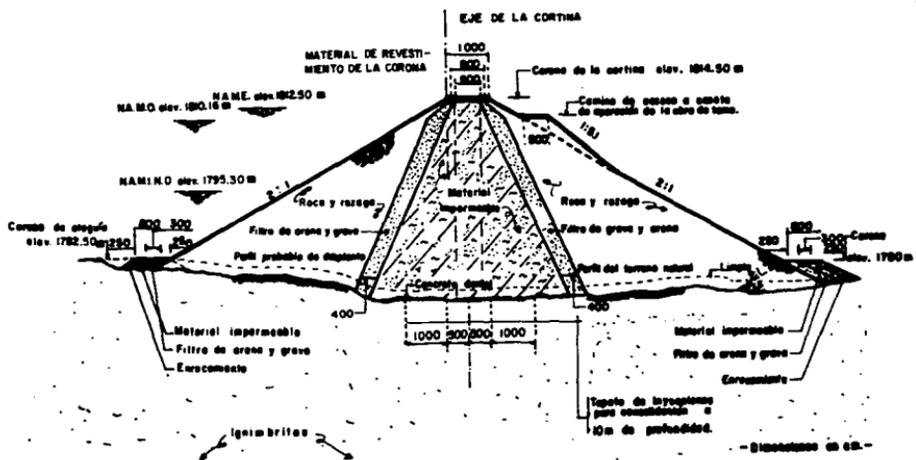


FIG.VII PERFIL LONGITUDINAL POR EL EJE DE LA CORTINA

FALLA DE ORIGEN



SECCION TIPICA

**FIG. V.10 PRESA "EL SALTO"
EDD. JALISCO**

FALLA DE ORIGEN

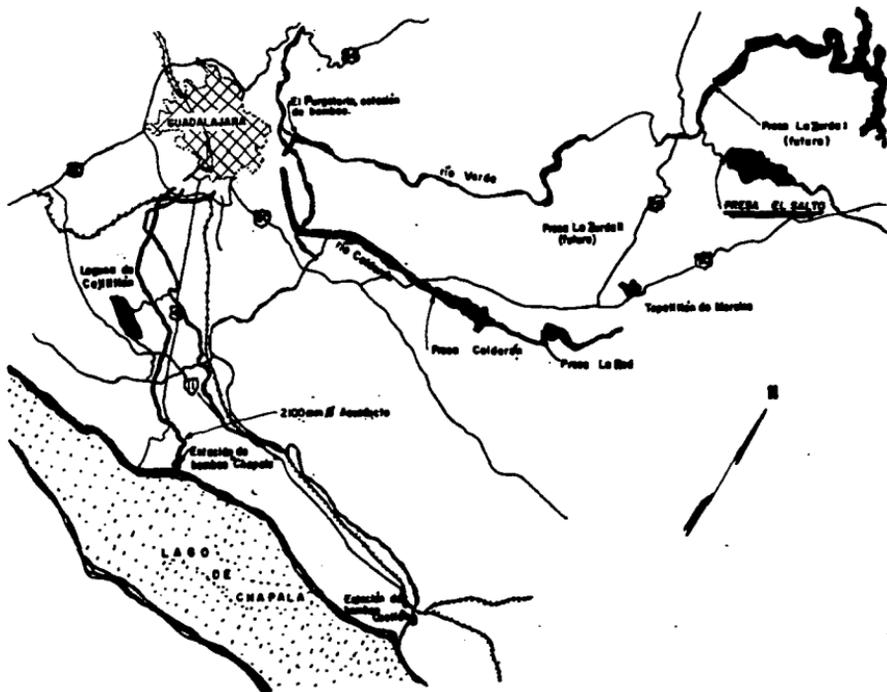


FIG. V. 9 LOCALIZACION DEL PROYECTO

A continuación se presentan algunas figuras como son:

- **Detalles de la cortina, obra de toma y ataguías aguas arriba y aguas abajo.**
- **Planta general del sitio de la obra.**
- **Planta de localización de barrenos del tapete de consolidación.**
- **Corte longitudinal de la pantalla de inyección.**
- **Planta de localización de barrenos de contacto de la obra de desvío y de la obra de toma.**
- **Planta y corte longitudinal de la localización de los barrenos de la pantalla de inyección de la obra de excedencia.**

GEOLOGIA

Fisiográficamente se ubica en la parte norte del Eje Volcánico Transmexicano. geomorfológicamente el área se asocia a pequeños montículos aislados que corresponden a conos volcánicos terciarios; la hidrología del área se asocia a un drenaje radial que parte de los conos hacia los valles, los cuales drenan hacia al Río Verde. En la región de estudio se han reconocido dos eventos volcánicos principales en el Oligoceno-Mioceno y en el Pliocuaternario.

Las estructuras regionales importantes se asocian a los alineamientos este-oeste, representados por el Lago de Chapala y alineamientos en dirección NW-SE y NE-SW que corresponden a los Ríos Santiago y Verde respectivamente. Los eventos geológicos están íntimamente ligados a la tectónica de placas en la parte occidental del país. La geología en la zona de la boquilla está representada por Ignimbritas y tobas riolíticas que se encuentran sobreyaciendo a tobas ílticas, de las 8 exploraciones directas realizadas en el proyecto El Salto, se midieron en promedio 60% de recuperación, el 18% de RQD 10 y menos del 5% de RQD 20. Respecto a las permeabilidades, los barrenos se mantuvieron poco permeables (= 5 UL), excepto en algunos tramos, donde las permeabilidades son mayores a 12 UL (UL = unidades Lugeon); también se puede concluir que a presiones de inyección menores a 4 UL. A partir del análisis estructural se concluye que existen cuatro sistemas de fracturas detectados en el cauce y en la margen derecha. En la margen izquierda sólo aparecen dos sistemas. Los cuatro sistemas definidos son N-S, E-W y NW-SE, todos con buzamientos mayores a 70 grados. Además, una discontinuidad también se midió una estructura que es determinante en la definición del índice RQD, la pseudoestratificación,

la cual tiene una orientación NE 86 grados con buzamiento de 46 grados SE. A partir de los resultados de Geofísica se concluye que la capa superficial presentó resistividades entre 75 y 650 Ohm-metro y velocidades de transmisión entre 300 y 700 m/s. Estos datos corresponden a suelo o material de cobertura, (Vo). La capa intermedia o unidad U1 presenta resistividades de 200 ohm-metro y velocidades de 2300 m/s, que corresponde a ignimbritas y las tobas líticas presenta valores de 65-117 ohm-m. A partir de las clasificaciones geomecánicas se concluye que el índice Q es igual a 2, que clasifica al macizo rocoso como de mala calidad. A partir de los ensayos de laboratorio se definió que las ignimbritas son de resistencias medias, con valores a la carga puntual de 50 kg/cm², sus módulos de deformación son de 350 t/cm² que clasifica a estas rocas como poco deformables. Respecto a los pesos unitarios, estas rocas presentan valores mayores a 2.2 g/cm³. Las tobas alteradas y líticas presentan valores geomecánicos inferiores, ya que sus resistencias y módulos de deformación son bajos, aunque sus pesos unitarios son similares a las ignimbritas. De las pruebas de laboratorio para medir módulos estáticos de roca se encontró que éstos son similares a los módulos dinámicos de laboratorio, con valores de 250 ton/cm². Estos datos son inferiores a los módulos estáticos en un 30%.

Geología regional

a) Fisiografía

El área de estudio se encuentra con el límite septentrional de la provincia fisiográfica conocida como Eje Neovolcánico (Fig V.13). Esta provincia la forma el alineamiento casi Este-Oeste que tienen los grandes volcanes del país, que principian con el Citlaltépetl, en el Estado de Veracruz, hasta el volcán de Colima, en el Occidente de México, pasando por los volcanes Popocatepetl, Nevado de Toluca y el Tacaná, por mencionar algunos.

En los espacios que existen entre los volcanes se pueden encontrar extensas planicies de varios centenares de kilómetros de amplitud y también sierras de gran magnitud, formadas por diversas estructuras volcánicas. Dentro de estas estructuras se tienen los conos volcánicos, que pueden ser clasificados en tres: a) primarios, de considerable altura y creadores de los rasgos mayores del relieve, formando el núcleo de los conjuntos; b) secundarios, apoyados en los flancos de los primarios, alcanzan alturas menores, pero todavía tienen un lugar importante en los conjuntos, y c) terciarios, pequeños y aislados de los núcleos montañosos, situados casi siempre en zonas centrales de las planicies, donde aparecen solitarios o en grupos de dos y esporádicamente de tres. A esta última clase las estructuras volcánicas encontradas en la zona de estudio.

b) Geomorfología

La geomorfología del área que circunda el embalse del proyecto El Salto, está representado por pequeños montículos aislados que corresponden a conos volcánicos en una extensa planicie y de mesetas basálticas en las partes altas; los conos volcánicos tienen formas redondeadas en sus cimas; ejemplos de ellos son los cerros Gordo, El Carnicero, El Guillote, Ramblas, El Mirador y Cerro Pelón, los cuales han aportado el material volcánico que constituye el área (ver secciones geomorfológicas A-A' y B-B', plano No. 2.1) (Fig)

La hidrografía del área corresponde a un drenaje radial que parte de los conos hacia los valles, los cuales drenan hacia el Río Verde, que constituye el nivel base de erosión del área.

c) Estratigrafía

En la región de estudio se han reconocido dos eventos volcánicos principales, uno del Periodo Oligo-Mioceno y el otro del Pli-Cuaternario (Demant, 1978). Las rocas más antiguas están constituidas principalmente de andesitas, dacitas, riolitas, e ignimbritas, que en ocasiones se observan "plegadas" en diferentes partes de los Estados de Jalisco y Nayarit (Nieto, 1985). Esta secuencia se le ha asociado con las rocas que han dado origen a la Sierra Madre Occidental y se ha considerado como la provincia ignimbrítica más grande del mundo (Clabaugh, 1972); en el estado de Jalisco cubre un área muy extensa. Por otro lado, las rocas más jóvenes se han asignado al Eje Neovolcánico, que consiste fundamentalmente de una actividad calcoalcalina.

La figura V.15 muestra la distribución de las unidades de roca que afloran en la región; esta figura se elaboró con base en la carta geológica escala 1:1000 000 editada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

A continuación se mencionan cada unidad, de la más antigua a la más joven.

- Tobas e ignimbritas ácidas terciarias T (Igea)
- Terciaria superior lacustre T (cg-ar-t-l-cz)
- Terciario superior basaltos y andesitas T (Igeb-l)

- Cuaternario basaltos Q (Igeb)
- Depósitos recientes Q (s)

d) Geología Estructural

En la figura V.16 se pueden apreciar tres alineamientos estructurales principales; el primero corresponde a una alineación este-oeste, que se manifiesta con fallas normales, como es el caso de graben de Chapala, que dió lugar a la formación del lago del mismo nombre.

Otros lineamientos importantes son el NW-SE y NE-SW, que corresponden a los ríos Grande de Santiago y el Verde respectivamente, los cuales fueron labrados sobre fracturas de magnitud regional.

Geología del vaso

El vaso queda sobre rocas volcánicas terciarias de composición riolítica (ignimbritas) que se encuentran cubiertas por un suelo arenoso-arcilloso en espesores que varían de 0 a 5 m en algunas zonas, según se observó en la parte terminal del embalse.

a) Columna litológica

Las rocas más antiguas están representadas por una secuencia de tobas riolíticas de color rosa, intercaladas con brechas y tobas líticas y algunos lentes de vidrio volcánico, como se observó aguas abajo del sitio denominado "Salto del Agua", el espesor aproximado de esta secuencia es de 90 m (Figura V.17).

Sobreyacen a la secuencia anterior, ignimbritas de color rosa a rojo violáceo con estructura fluidal con un espesor de 120 m. Cubriendo este paquete, se encuentra un espesor de 160 m de tobas riolíticas de color rosa que en su base se encuentran regularmente alteradas. Corona la parte alta de los cerros, una secuencia de tobas líticas de color verde con un espesor de 90 m; hacia la parte alta del vaso, se localizan dos cuerpos de rocas vulcano-sedimentarias consistentes en areniscas tobáceas (depósitos lacustres) cuyo espesor es menor a 20 m; en los alrededores del poblado de Valle de Guadalupe, se tienen varios derrames basálticos que forman mesetas y que tienen un espesor de 25 m; por último, se cartografiaron depósitos aluviales recientes que están compuestos principalmente de arenas, limo y arcillas producto

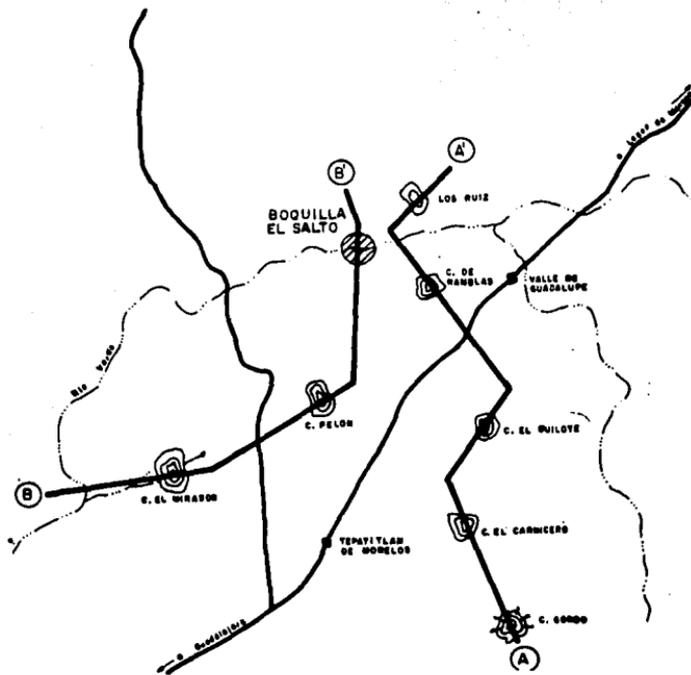


FIG. V.14 CROQUIS DE LOCALIZACION DE PERFILES GEOMORFOLÓGICOS

PROVINCIAS FISIOGRAFICAS

(Raisz, 1964)

FALLA DE ORIGEN

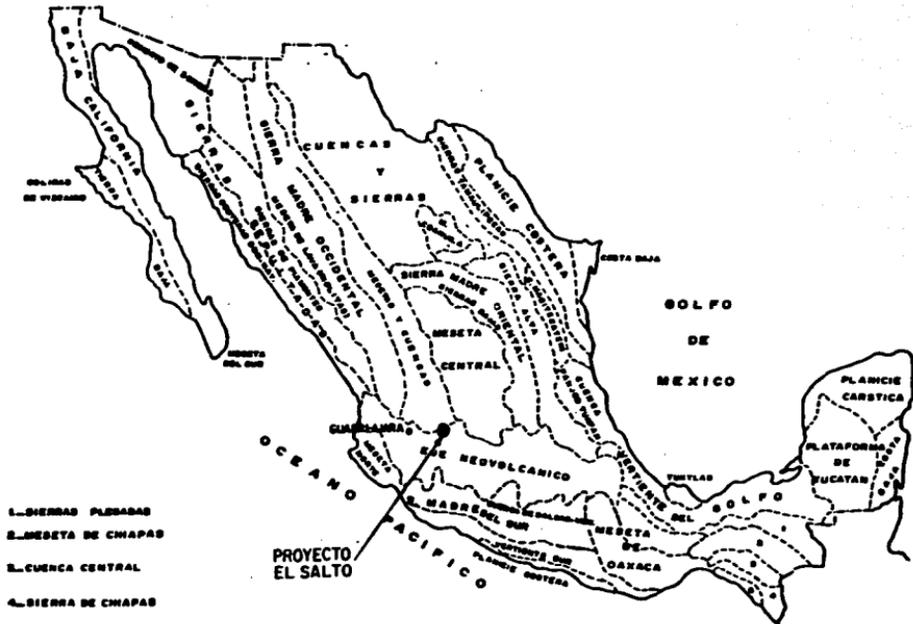


FIG. V. 13

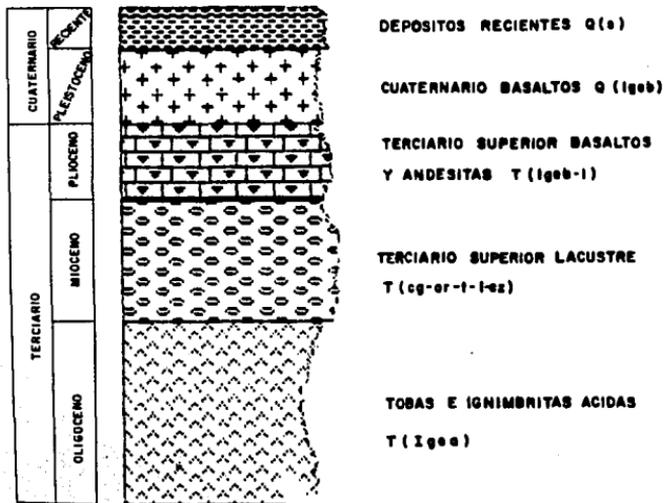
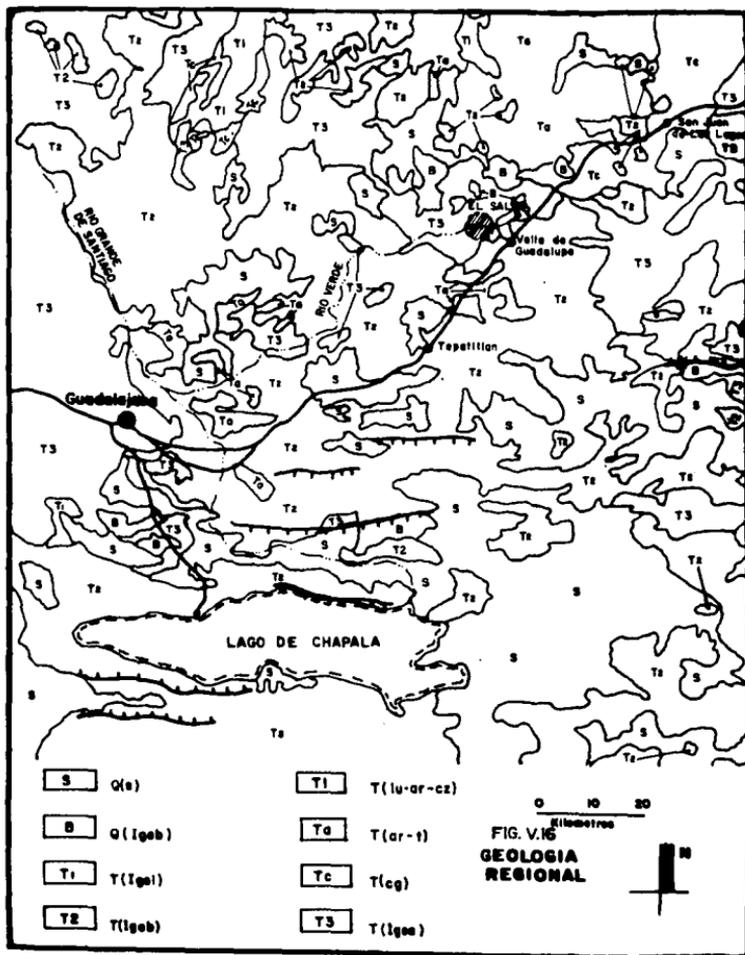


FIG.V.15 COLUMNA ESTRATIGRAFICA REGIONAL .



FALLA DE ORIGEN

de la alteración "in situ" y de poco transporte de las rocas que componen el área (Figura V.17).

b) Estructuras Geológicas

Sobre la margen derecha se observan alineamientos bien marcados en los cerros "Los Guajes" y "las Tunas", que corresponden al patrón regional este-oeste. Este alineamiento es desplazado por otros cuya alineación es NE-SW. Existe otro alineamiento llamado "El Pandito".

c) Estanquidad del Embalse

En los recorridos que se hicieron para determinar la geología del vaso, no se localizaron manantiales importantes, tan sólo algunas zonas húmedas y pequeños lloraderos en las partes altas, sobre todo en las tobas verdes.

Los pobladores de las rancharías del área construyen pequeños diques de contención sobre los arroyos y el cauce principal para almacenar agua durante la época de estiaje.

Tomando en cuenta las observaciones anteriores y debido a la impermeabilidad de la roca, se considera que la zona del vaso será estanco, después de la saturación en la zona de roca descomprimida de la parte superficial.

Geología de la boquilla

En la zona de la boquilla afloran rocas ácidas del Terciario que están representadas por ignimbritas y tobas riolíticas. Las primeras aparecen en un 90% del área estudiada y las tobas se encuentran en contacto con las ignimbritas a la altura de las exploraciones VII y VIII. Las tobas tienen un color rosáceo y se encuentran alteradas, tomando una coloración blanquesina, produciendo un suelo arcilloso. Ambas unidades se encuentran cubiertas por una delgada capa de suelo residual producto del intemperismo de la roca subyacente.

El rasgo estructural más importante observado en la roca es una falla normal localizada

unos 150 m hacia aguas arriba del eje de la cortina; tiene una longitud aproximada de 25 m con un espesor de 5 m, en el plno de falla se encuentra una brecha bien cementada y cortando a las brechas se detectó un dique color negro con espesores de 2.5 a 4.50 m.

a) Columna Litológica

En los recorridos superficiales en la zona de la boquilla, se identificaron dos unidades litológicas ignimbríticas y tobas de composición riolítica. Con las exploraciones directas realizada, se detectó que ambas unidades sobreyacen a una secuencia de tobas líticas, que constituyen la base de la columna litológica de esta zona.

Los espesores determinados por medio de exploraciones directas para cada unidad son: las tobas rosas tienen un espesor de 25 m, las ignimbríticas, 90 m y las tobas líticas deben tener un espesor mayor de 40 m, ya que el barreno exploratorio V solo cortó 18 m y no llegó a su base (Figura V.18).

b) Exploraciones directas

Con el fin de tener un modelo claro del subsuelo donde se desplantaría la cortina se realizaron un total de ocho exploraciones, cuatro en cada margen, las cuales varían su profundidad de 15 a 60 m; en todos los barrenos se realizaron pruebas de permeabilidad y se llegó a los siguientes resultados:

BARRENO I Margen Izquierda (Sin recuperación)

Se llevó hasta una profundidad de 15 m; permeabilidad máxima de 1.2 U.L. (Figura V.19).

BARRENO II Margen Izquierda (Con recuperación)

Se perforó hasta una profundidad de 15 m; recuperación promedio del 73%, un RQD_{10} promedio general del 22% alcanzando de 7 a 13 m un 60% y un RQD_{20} promedio general del 7%, alcanzando en el tramo de 7 a 13 m un 25% de promedio, este barreno sólo cortó ignimbríticas. La máxima permeabilidad fue de 4 U.L. en el tramo de 2 a 6 m (Figura V.20).

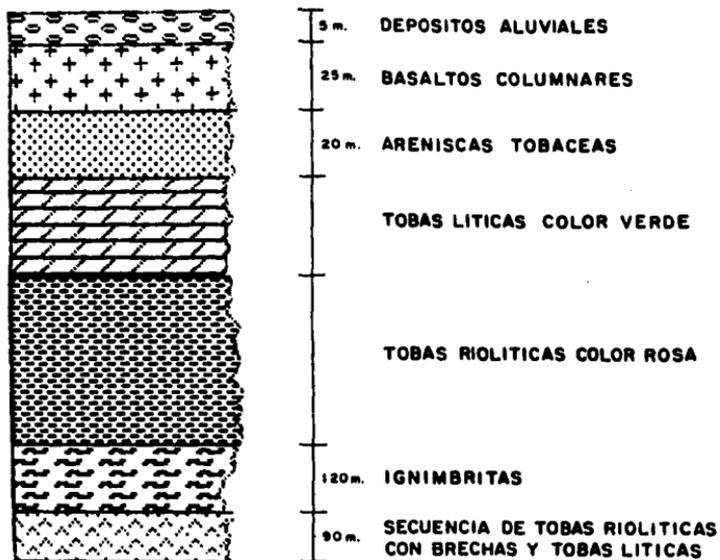


FIG. V.17 COLUMNA LITOLOGICA DEL VASO.

BARRENO III Margen Izquierda (Sin recuperación)

Se profundizó hasta los 25 m; tuvo el tramo permeabilidades abajo de las 6 U.L., disparándose sólo en el tramo de 22 a 25 m con una permeabilidad de 23.6 U.L., pero existiendo una presión crítica a 5.4 kg/cm² y una permeabilidad a esa presión de 4 U.L. (Figura V.21).

BARRENO IV Margen Izquierda (Con recuperación)

Perforado hasta los 30 m, cortó sólo ignimbritas con textura fluidal (bandeamiento casi horizontal). Presentó una recuperación promedio del 69%, con un RQD₁₀ del 11%; alcanzó el máximo en el tramo de 3 a 5 m con un 44% y un RQD₂₀ con un promedio del 4%, alcanzó su máximo en el tramo de 7 a 10 m con un 26%.

En este barreno la permeabilidad varió de 0.5 U.L. con una presión máxima de 8.6 kg/cm² en el tramo de 5 a 1 m hasta 12.8 U.L. a 8.6 U.L. en el tramo de 24.50 a 27.50 m. En este tramo existe una mayor permeabilidad y se encontró una presión crítica a los 5 kg/cm², la cual da una permeabilidad a esa presión de 5.5 U.L. (Fig V.22).

BARRENO V Margen Derecha (Con recuperación)

Se perforó hasta los 60 m cortando de 0 a 42 m ignimbritas y de 42 a fordo una toba lítica. Se tuvo una recuperación promedio del 40%, un RQD₁₀ prácticamente de 0 subiendo sólo a 27% en el tramo de 8.50 a 11.50 m y un 40% en el tramo de 46 a 54 m, un RQD₂₀ prácticamente de 0, subiendo sólo a 23% en el tramo de 48.80 a 51.80 m.

La máxima permeabilidad encontrada es en el tramo de 15-18 m, alcanzó 18 U.L. con una presión crítica a 3.8 kg/cm², y una permeabilidad de 7 U.L.; en el tramo de 9 a 12 m se obtuvieron 10 U.L. a una presión máxima de 5 kg/cm² y de 12 a 15 m se tuvo 14.4 U.L. a 7.2 kg/cm² como presión máxima, de 21 a 74 m se tuvo una presión crítica a 4.3 kg/cm² dando menos de 1 U.L. (Figura V.23).

BARRENO VI Margen Derecha (Con recuperación)

Se perforó hasta 25 m; cortó únicamente ignimbritas, presentó una perforación promedio del 56%, un RQD₁₀ promedio del 10%; alcanzó su máximo en el tramo de 18 a 22 m con un 15% (Fig V.24).

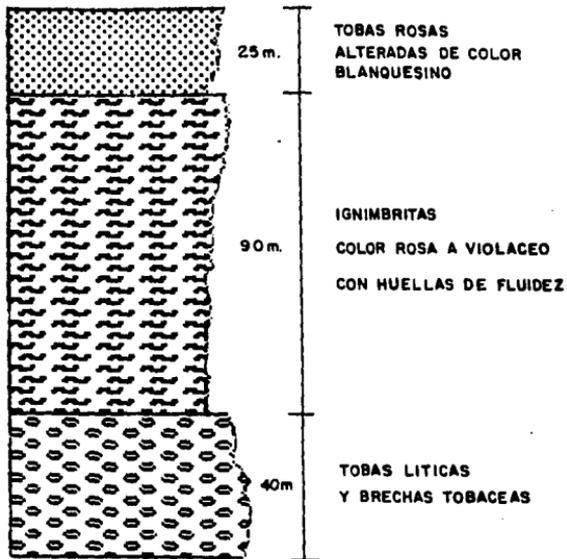


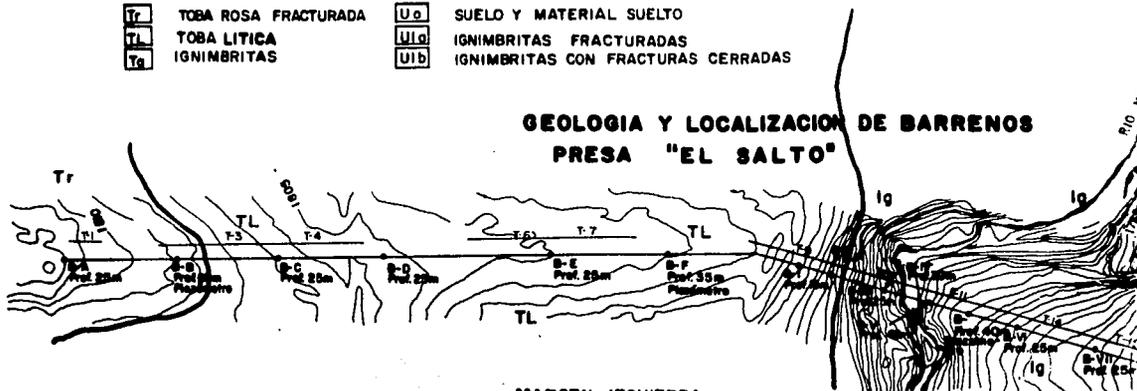
FIG. V.18 COLUMNA LITOLÓGICA DE LA BOQUILLA.

PLANO N-2

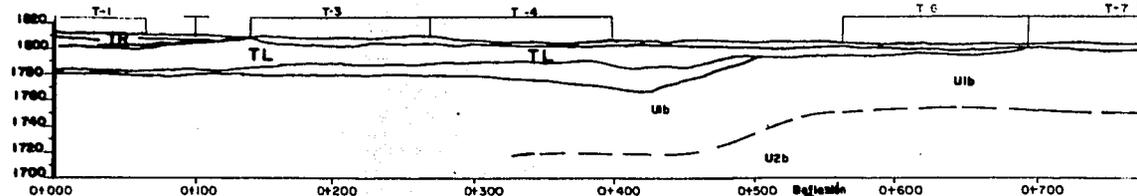
Tr TOBA ROSA FRACTURADA
 TL TOBA LITICA
 Ig IGNIMBRITAS

Uo SUELO Y MATERIAL SUELTO
 U1a IGNIMBRITAS FRACTURADAS
 U1b IGNIMBRITAS CON FRACTURAS CERRADAS

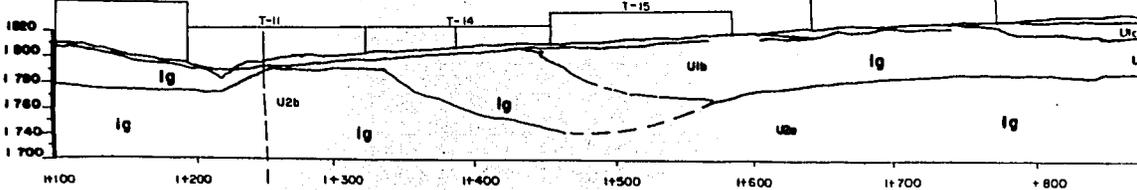
GEOLOGIA Y LOCALIZACION DE BARRENOS
 PRESA "EL SALTO"



MARGEN IZQUIERDA



MARGEN DERECHA



BARRENO EXPLORATORIO I (SIN RECUPERACION) MARGEN IZQUIERDA

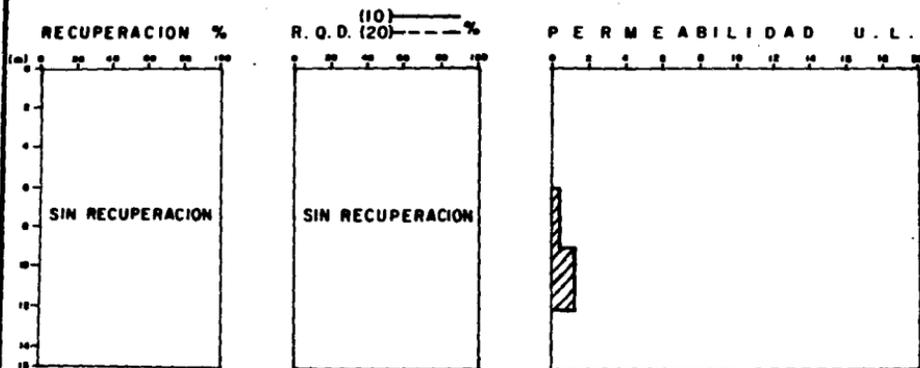
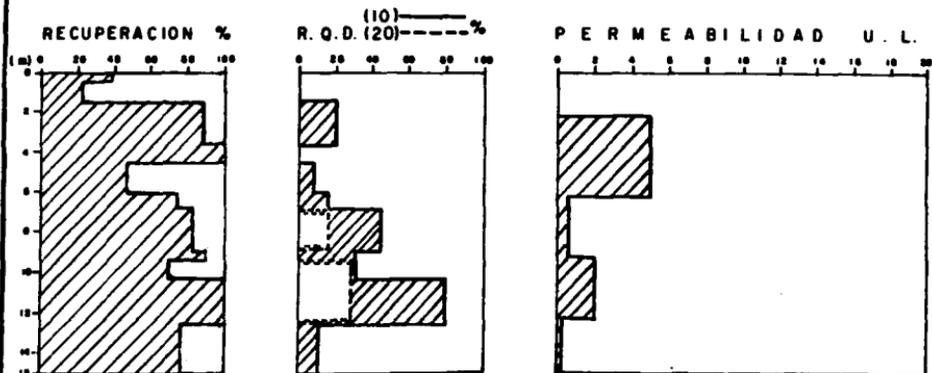


Figura.V.19

BARRENO EXPLORATORIO II (CON RECUPERACION) MARGEN IZQUIERDA



PROMEDIO DE RECUPERACION 73 %

R. Q. D. (10) 22 %

R. Q. D. (20) 7 %

-Figura V.20

BARRENO EXPLORATORIO III (SIN RECUPERACION) MARGEN IZQUIERDA

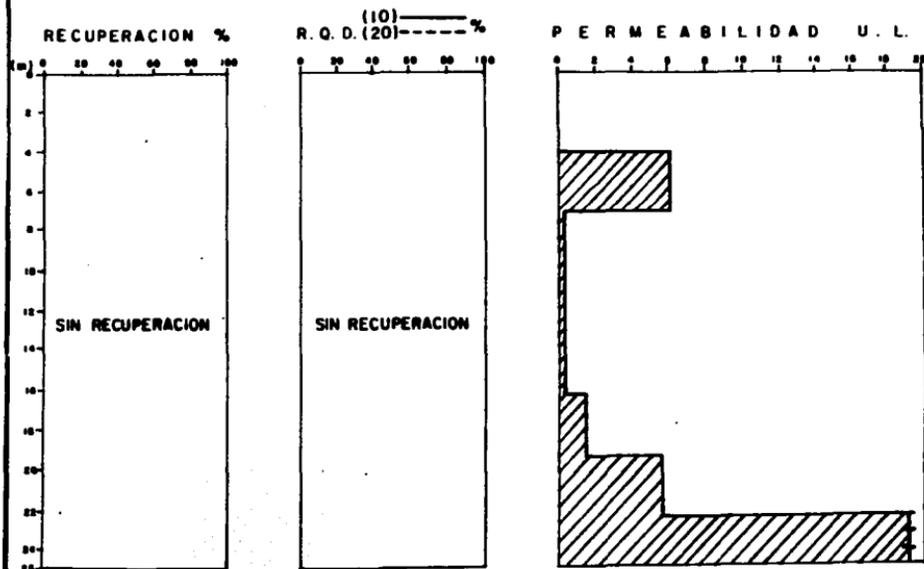


Figura V21

BARRENO EXPLORATORIO IV (CON RECUPERACION) MARGEN IZQUIERDA

RECUPERACION %

(10)
R. O. D. (20) %

PERMEABILIDAD U. L.

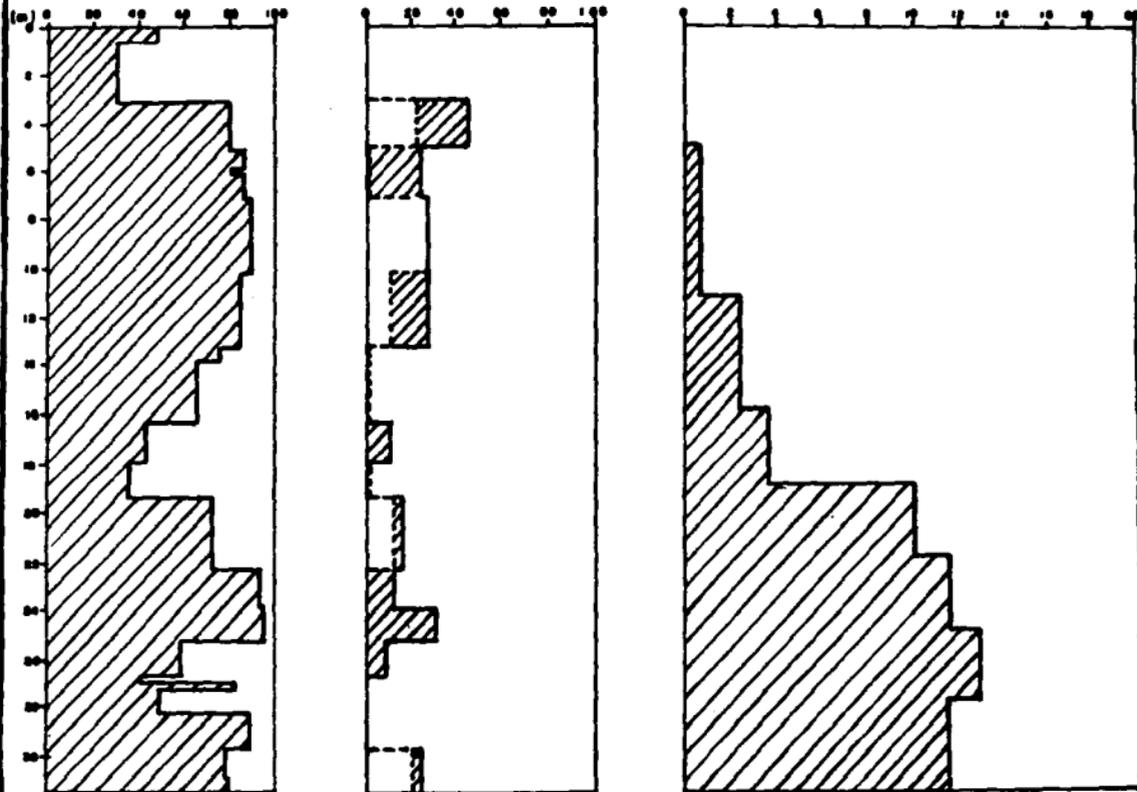


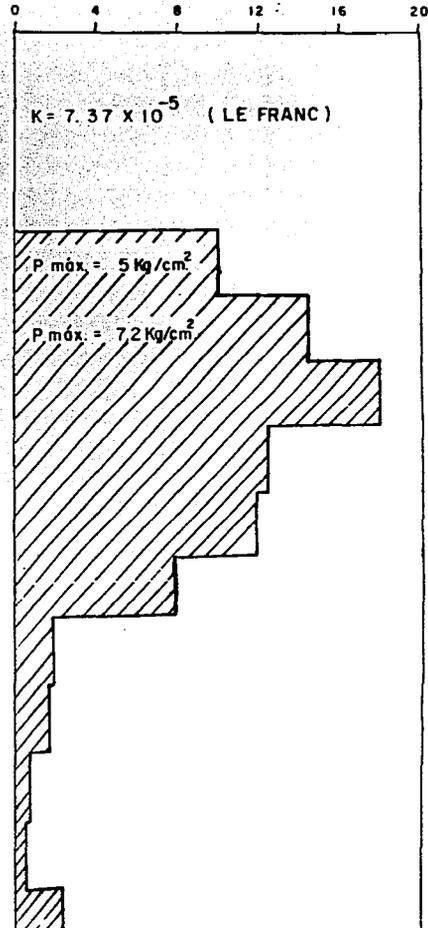
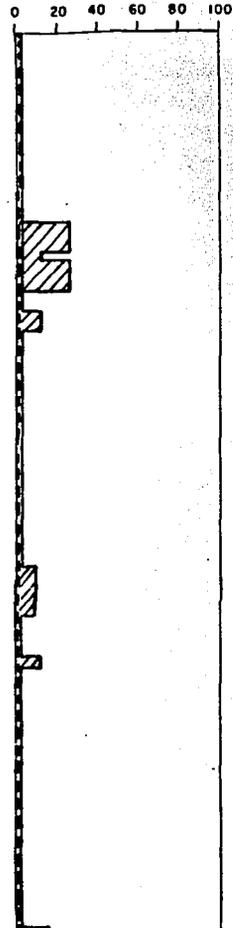
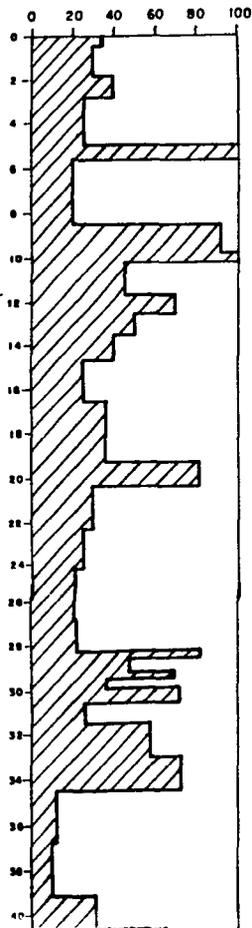
Figura V.22

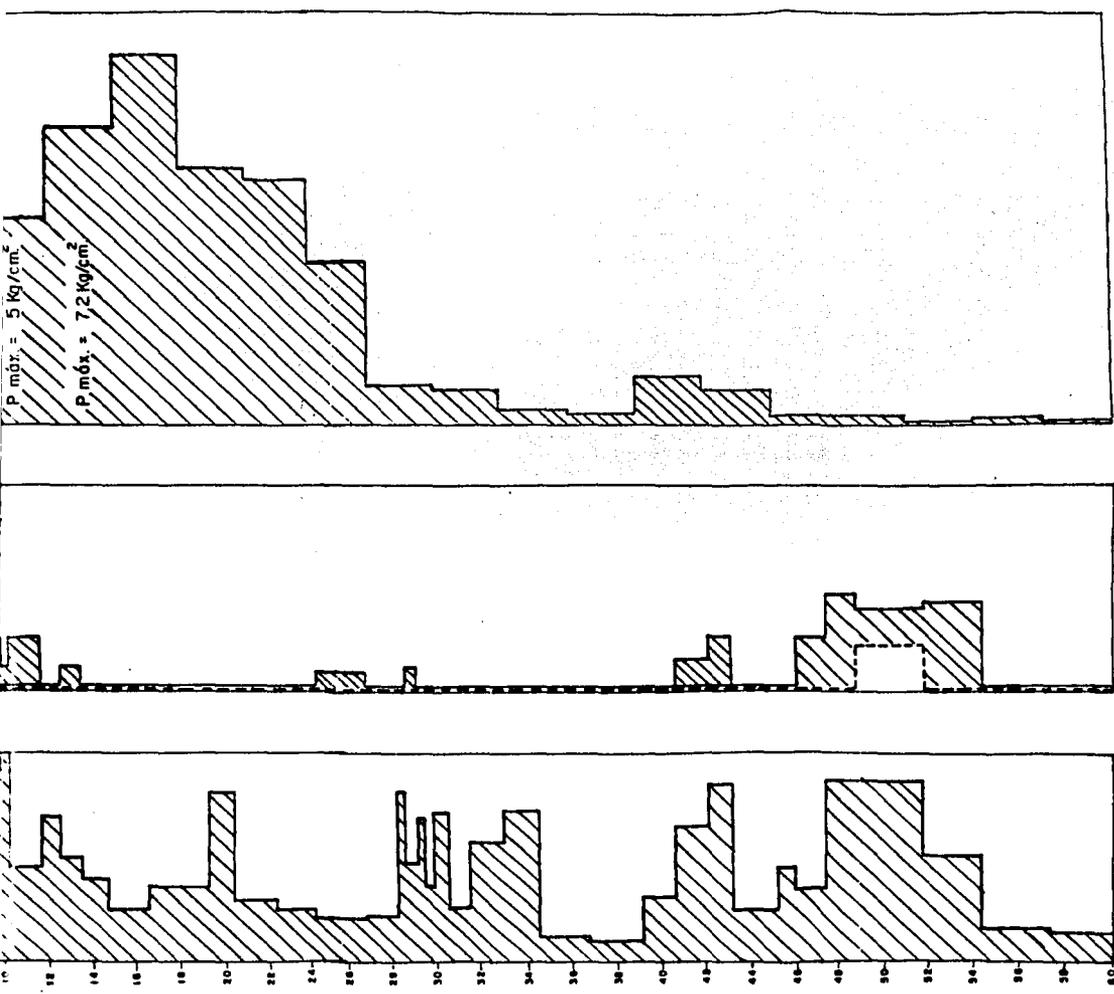
RECUPERACION %

R. Q. D. (10) ——— %

R. Q. D. (20) - - - - %

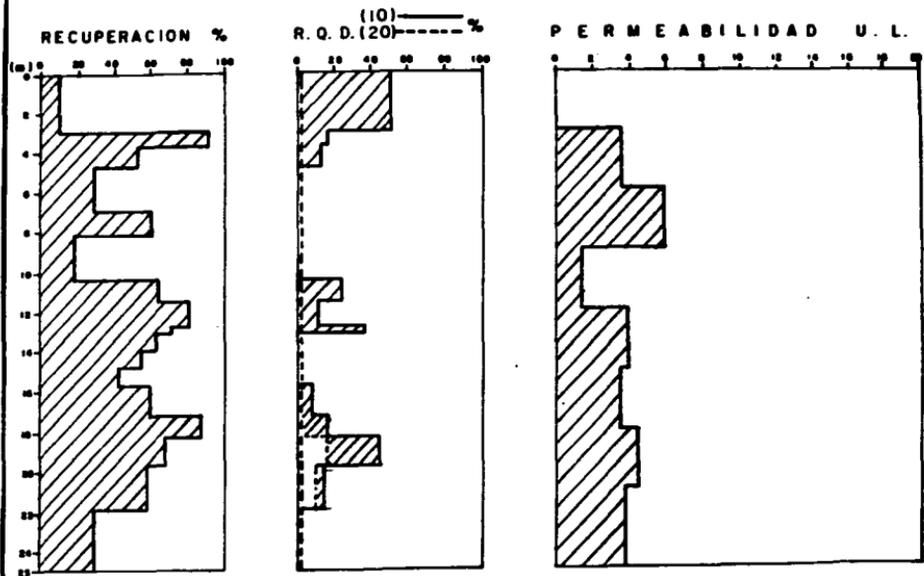
PERMEABILIDAD U. L.





Figuro V. 23.

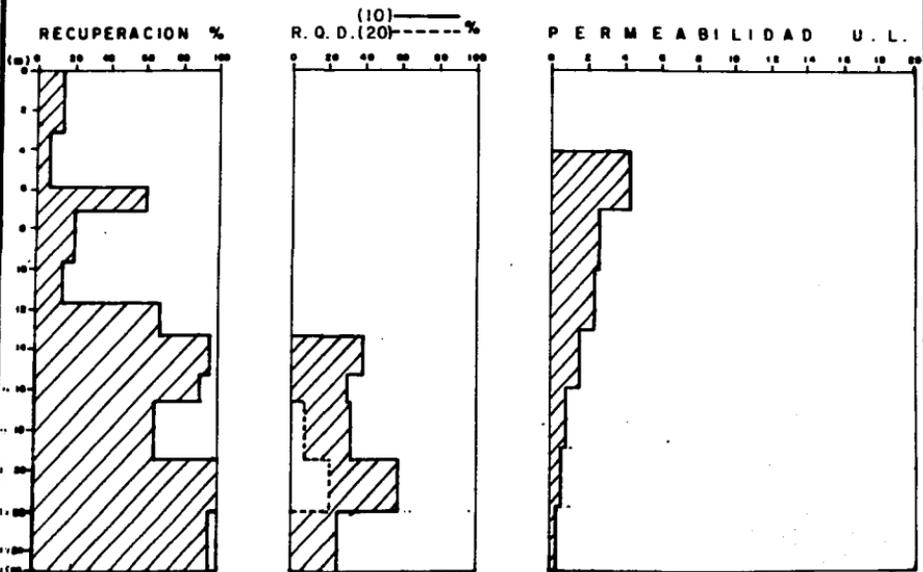
BARRENO EXPLORATORIO VI (CON RECUPERACION) MARGEN DERECHA



PROMEDIO DE RECUPERACION 56 %
 R. Q. D. (10) 10 %
 R. Q. D. (20) 1.4 %

Figura V.24

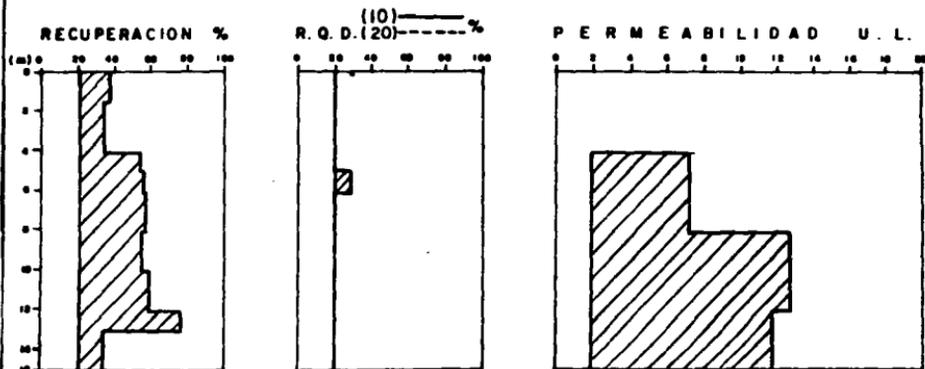
BARRENO EXPLORATORIO VII (CON RECUPERACION) MARGEN DERECHA



PROMEDIO DE RECUPERACION 57 %
 R. Q. D. (10) 16 %
 R. Q. D. (20) 2.5 %

Figura V.25

BARRENO EXPLORATORIO VII (CON RECUPERACION) MARGEN DERECHA



PROMEDIO DE RECUPERACION	31 %
R. Q. D. (10)	22 %
R. Q. D. (20)	0 %

Figuro V.26

BARRENO VII Margen Derecha (Con recuperación)

Perforado hasta 25 m; cortó sólo ignimbritas, con una recuperación promedio del 57%, siendo en el tramo de 0 a 12 m en promedio del 24% y de 12 a 25 m un 90%, el RQD₁₀ de 0 a 13 m fue de 10% y de 13 a 25 m alcanzó hasta un 32%, el RQD₂₀ es de 0% excepto en el tramo de 16.80 a 22 m que tuvo hasta un 15% (Fig V.25).

BARRENO VIII Margen Derecha (Con recuperación)

Con una profundidad de 15 m, perforado en una toba blanquesina muy alterada, con una recuperación promedio del 31%, RQD₁₀ y RQD₂₀ de prácticamente 0% (Fig V.26).

b.1) Recuperación

En la margen izquierda se obtuvo una recuperación promedio del 71%

En la margen derecha se obtuvo una recuperación promedio en Tobas rosas de 31%, en ignimbritas de 58% y en tobas líticas de 40%.

b.2) INDICE DE CALIDAD DE ROCA (ROCK QUALITY DESIGNATION (R.Q.D.))

En la margen izquierda el promedio de RQD considerando tramos de núcleo con longitudes mayores o iguales a 10 cm RQD₁₀ de 30%. El promedio de RQD considerando tramos de núcleo con longitudes mayores o iguales a 20 cm RQD₂₀ es de 5%.

En la margen derecha el promedio de RQD₁₀ es de 16% y el promedio de RQD₂₀ del 6%.

b.3) Permeabilidad

Las pruebas de permeabilidad realizadas en la capa superficial de roca alterada y fracturada fueron del tipo LEFRANC y para el cuerpo de roca subyacente se empleó el método LUGEON, de los cuales se obtuvo que en la margen izquierda el promedio de unidades lugeon es de 5.5 U.L.; sin embargo, en algunos tramos probados sólo se alcanzó una presión máxima de prueba de 8 kg/cm² debido a fuga de agua por fracturas, como sucedió en los barrenos II y IV que presentaron fugas a las profundidades de 22 a 25 m para el caso del barreno III y en los tramos de 5 a 11 m y 22 a 27 m en el barreno IV.

En la margen derecha la permeabilidad promedio fue de 7.7 U.L., pero al igual que en la izquierda, se presentan zonas de alta permeabilidad debido al fracturamiento en los barrenos V, VII y VIII. En el barreno V se encontró la máxima permeabilidad en el tramo de 15 a 18 m, de 18 U.L.; pero con una presión crítica a los 3.8 kg/cm² con una permeabilidad de 7 U.L.; en los tramos de prueba de 4 a 7 m en el barreno VII y de 8 a 12 m en el barreno VIII.

Tratamiento para la cimentación

La remoción de vegetación, suelo orgánico y escombro sobre la roca es indispensable en toda el área comprendida dentro de las trazas de la cortina; la remoción de roca alterada se realizó en el área de apoyo del núcleo impermeable. En la zona del cauce, para desplantar el núcleo impermeable sobre roca sana, se excavó una trinchera con taludes de 0.5:1 a una profundidad de 2.0 m; en la margen derecha se removió alrededor de 1.5 m y en la margen izquierda de 0.0 a 1.5 m de materiales alterados.

En el momento oportuno, se ejecutaron rápidamente las excavaciones previstas. A continuación, en la zona del núcleo impermeable de la cortina, se cubrió con arcilla.

Una vez descubierta la roca de cimentación en el área de contacto con la zona impermeable, se aplicó agua y aire a presión a la superficie para localizar con mayor precisión y facilidad las fracturas, grietas y fisuras. Con el calafateo se rellenaron estas discontinuidades: en cada grieta o junta tratada se dejaron tubos para inyectado a presión de lechadas de cemento. De esta forma se evitan concentraciones posteriores de flujo que puedan provocar tubificaciones. En las zonas donde la limpia dejó depresiones en el terreno, fueron rellenadas de concreto.

Finalmente, se realizó un tapete de consolidación a una profundidad de 5 m, y a baja presión, para disminuir la permeabilidad de la roca bajo el área de contacto con el material impermeable de la cortina, sellando todas las fisuras o fracturas que no se trataron individualmente, así como para homogeneizar el terreno de cimentación.

Los barrenos de inyección quedaron en los vértices de una cuadrícula inicial de 10 x 10 m en una primera etapa y de 5 x 2.50 m en una segunda y tercera etapa respectivamente, de acuerdo con los consumos observados durante la inyección de la etapa anterior. Se tuvo especial cuidado de no aplicar excesiva presión de inyectado, observando que no se presentaran movimientos tanto en la roca, como en los calafateos de concreto.

De acuerdo con la información de los barrenos, existen zonas sumamente fracturadas, por lo tanto el tratamiento de inyección se efectuó a base de una suspensión estable compuesta por una mezcla de agua, cemento y un acelerador; la proporción de estos ingredientes es de gran importancia.

Teniendo como antecedentes que del resultado de 4 pruebas de permeabilidad en cada una de las laderas, la permeabilidad de las ignimbritas es de moderada a alta, el de las tobas alteradas es alta (en el barreno V) y en las tobas líticas, donde el contacto se considera de alta permeabilidad, por lo que deberá tomar en cuenta esto para adoptar un criterio general a partir del número de ensayos puntuales. Se consideró adecuado fijar la profundidad del tratamiento de impermeabilización empleando la norma empírica de la mitad de la carga hidrostática que tendrá el embalse, por lo que puede ser de 15 a 20 m la profundidad de la pantalla.

Integración Geológica-Geofísica

De los datos obtenidos en las observaciones de campo, el análisis de exploraciones directas y los estudios geofísicos de prospección sísmica y eléctrica, se integraron los siguientes resultados:

- **Sección Eje cortina y secciones paralelas (A-A aguas abajo y B-B aguas arriba.**

Con la prospección eléctrica se pudo determinar la traza del contacto entre las ignimbritas y las tobas líticas subyacentes. La resistividad de las ignimbritas van de 200 a 400 ohm-m y las de tobas varían de 65 a 88 ohm-m, observándose este contacto en el barreno V.

Se observó que de manera general las resistividades de la margen izquierda son ligeramente mayores respecto a las de la margen derecha, esto se atribuye a que las fracturas de la margen izquierda se encuentran con menor o nulo contenido de agua,

mientras que en la margen derecha las fracturas tienen un mayor contenido de humedad, lo que puede indicar que las ignimbritas y tobas de la margen derecha, tienen una mayor permeabilidad que las rocas de la margen izquierda en esta zona, esto coincide con las pruebas de permeabilidad tipo Lugeon realizadas con los barrenos exploratorios en ambas márgenes.

Con el método geoelectrico también se determinó el contacto ignimbritas-tobas líticas, el cual se comporta generalmente de manera horizontal, con resistividades que van de 166 a 500 ohm-m y para las tobas de 62 a 184 ohm-m.

Integrando los valores obtenidos por los métodos de Don Deere, Bieneawsky y Barton, los cuales determinaron un macizo rocoso de regular calidad para ambas márgenes y el cauce; se puede observar en las secciones Eje cortina 1 a 10 que existe una correlación de los parámetros ingenieriles con las velocidades de onda sísmica obtenidos en ambas márgenes.

De esta forma para el Eje de la cortina se tiene por debajo de la capa de suelo o roca alterada superficial, la siguiente clasificación:

TABLA

CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOSO EJE CORTINA

DON DEERE (RQD)	BIENEAWSKY (RMR)	BARTON (Q)	SISMICA (m/s)
M.I MUY MALA	REGULAR	MALA	2300-2700
M.D. MALA	REGULAR	MALA	2700-3300

Estas características, extrapoladas con los resultados de geofísica para toda la zona de la boquilla, se pueden considerar semejantes de acuerdo con las secciones 1 a 10.

Por otro lado, el plano de isopacas de suelo y roca con velocidades mayores de 1000 m/s, incide que el eje de la cortina y área adyacente existe un encape de 0 a 1,5 m de espesor, que es el que tendrá que removerse, a excepción de dos zonas hacia aguas abajo de la cortina, donde el espesor de la capa llega a ser hasta 3 m.

Conclusiones del estudio geológico

- **En el área del vaso no existe una estructura geológica de importancia que ponga en peligro las obras civiles y la estanquidad del embalse.**
- **El macizo rocoso en la zona de la boquilla se considera de regular calidad y adecuado para el emplazamiento de una presa.**
- **El fracturamiento en la zona de la boquilla es abundante, presentando cuatro familias de fracturas.**
- **El espesor máximo de roca alterada y descomprimida en la zona de la boquilla es de 1.5 m, que fue removida.**
- **Pueden existir subpresiones verticales bajo las estructuras civiles debido a la circulación de agua a través de las fracturas y a la homogeneidad del macizo rocoso.**
- **El tratamiento del macizo rocoso considerado en el texto persigue el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas para garantizar la seguridad y en el comportamiento adecuado de las estructuras que en él se apoyen.**

De acuerdo con el análisis de taludes efectuado y de las estimaciones del tratamiento requerido, se concluye que las excavaciones serán un tanto desfavorables cuando sean paralelas al cauce, en cambio cuando estas tengan cierta dirección (NE 60 grados SW) podrán tener más estabilidad siempre y cuando la pseudoestratificación este buzando hacia la margen izquierda.

Es necesario practicar pruebas en las tobas rosas alteradas de la M.D. correspondientes a porosidad, pero específico y absorción de agua (índice de alteración) y quizá pruebas de sensibilidad para determinar a estas tobas alterabilidad luego que se encuentren sumergidas.

Se considera que en excavaciones a cielo abierto efectuadas en estas rocas, es adecuado un talud de 0.3:1.

Se considera que los materiales de construcción son suficientes para el proyecto excepto los bancos de Grava-Arena.

La roca que servirá como cimentación de la obra presenta módulos estáticos aceptables.

A partir de la exploración sísmica se definieron 4 unidades de roca que se asocian a la velocidad de transmisión de las ondas P.

Con la exploración geoelectrica fue posible definir el contacto entre las Ignimbritas y las tobas liticas.

Los resultados de las pruebas de laboratorio sugieren que se tiene una roca de mediana a alta resistencia, con módulos de deformación altos y pesos volumétricos mayores a 2.2 gr/cm³.

Para definir la factibilidad, la CNA creyó necesario realizar estudios de exploración directa e indirecta en los tramos del eje de boquilla que no estuvieron incluidos en el estudio antes tratado aquí.

Geología de la boquilla

La litología se compone de siete horizontes o paquetes que a continuación se describen de abajo hacia arriba, en orden de ocurrencia.

a) Toba riolitica (Tr)

Es una roca piroclástica de color rosa, porosa semicompacta; presenta fragmentos de roca (riolitas), de pómez y otras rocas ígneas extrusivas, las pasta o matriz vítrea, observándosele plagioclasas y óxidos de hierro.

Fue detectado en el subsuelo en la margen izquierda con los barrenos B y D y se interpretó con la geofísica; su espesor no fue determinado; parece correlacionarse de una a otra margen con las tobas liticas encontradas en el barreno V.

b) Ignimbrita riolitica (Igr)

Ignimbrita de tipo riolitico, compacta, densa, tiene intercalaciones de franjas de cuarzo criptocristalino, presenta esferulitas; asociadas se encuentran esquisas vítreas y cristales también de vidrio.

c) Tobas blancas (Tb)

Sobre las ignimbritas riolíticas descansan estas rocas en la margen derecha, donde afloran; son de color blanco, ligera de peso, semicompacta, tiene clastos de rocas ígneas extrusivas, sobre todo de riolitas.

d) Basalto (Ba)

Exclusivamente en margen derecha aflora y continúa en el subsuelo hacia el extremo del eje; es un basalto vesicular denso, compacto que presenta vesículas de tamaño variable, de 0.1 a 1.0 cm, tiene un espesor de 15 m, fue detectado con el barreno K.

e) Toba de grano grueso (Tgg)

En los barrenos B y J sobre las ignimbritas riolíticas se presentan unas tobas de textura gruesa, con aspecto de arenas, de matriz de plagioclasas, semicompactas en general, que probablemente sean correspondientes, es decir, contemporáneas; su espesor es de 10 m máximo.

f) Aluvión (Al)

Se compone de arcillas, gravas y arenas de clastos de rocas ígneas, sobre todo de riolitas y de ignimbritas, tiene espesores variables, encontrado en los barrenos perforados, desde mínimo un metro, hasta ocho metros.

En la sección geotécnica del plano No. 2 se pueden observar de manera gráfica todos los barrenos y sus características.

La calidad de roca se basa en la clasificación geotécnica de Deere, en base al RQD de

la siguiente manera:

TABLA DE CLASIFICACION

INDICE DE CALIDAD	CALIDAD
RQD %	
0 - 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Geofísica

Con los datos analizados e interpretados, se distinguieron seis unidades de propagación de onda sísmica bastante significativas, que se resumen en la siguiente tabla:

V_p en km/s	CORRELACION LITOLÓGICA	OBSERVACIONES
0.4 - 0.8	Qst	Capas de materiales varios alterados intemperismo
1.0 - 1.2	B	Basalto vesicular material superficial alterado
1.2 - 3.2	Igr - Igd Tr	Alternativa de Ignimbritas Riolíticas (Igr), Ignimbrita Devitrificada (Igd) y Toba Riolítica (Tr)
1.6 - 2.3	Tb	Toba blanca
1.4 - 3.0	Igr	Ignimbrita Riolítica
3.8 - 5.0	Tl	Toba Lítica
2.6 - 2.8	Tr	Toba Riolítica

Integrando estas velocidades con los resultados de la geología, se tiene que:

La U0 corresponde a los suelos y al aluvión, que se encuentra sobre cualquiera de las unidades litológicas descritas en el inciso de geología de la boquilla, tiene de 0.5 a 5.0 m de espesor; la U1 corresponde exclusivamente al basalto vesicular (B) de la margen derecha, que aflora al extremo del eje; la U2 encontrada también en la misma margen, corresponde a una alternancia ignimbrítica (Igr-Igd-Tr), que presenta velocidades de 1.2 y 3.2 km/s; la U3 con velocidades de 1.6 a 2.3 km/s se identifica con la toba blanca (Tb).

La Ignimbrita riolítica (Igr) denominada como U4 presenta dos unidades de velocidad, una de 1.4 a 3.0 km/s que es la roca fracturada y otra de 3.8 a 5.0 km/s

que es la ignimbrita sana; la U6 es una toba riolítica (Tr) que se encuentra en el subsuelo de la margen izquierda y que tiene velocidades de 2.6 a 2.8 km/s.

A fin de relacionar el parámetro de velocidad de propagación en materiales consolidados (rocas) con el grado de facilidad de excavación de un arado de tractor (aradabilidad) para saber que tipo de maquinaria es recomendable usar en el área; la tabla siguiente hace esa clasificación de las velocidades encontradas en el área partiendo de la experiencia de Hawkins (1969) por la compañía Atlas Copco Abem.

VP EN km/s	MODULO DE YOUNG E kg/cm ² x 10 ³	ARADABILIDAD
0.3 - 1.4	7.0 - 28.0	Muy arable
1.5 - 2.0	29.0 - 63.0	Arable regular
2.1 - 2.9	67.0 - 170.0	Poco arable (Poco explosivo)
3.0 - 5.0	180.0 - 633.0	Uso de explosivos

De esta clasificación se desprende que las unidades litológicas "arables" con facilidad A1, B y una parte de la secuencia Ignimbítica (Igr-Igd-Tr) y la Igr en su parte fracturada.

Permeabilidad

De las pruebas de permeabilidad realizadas en los nueve barrenos perforados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El macizo de la zona de la boquilla se considera de mala a regular calidad, el emplazamiento de una cortina es adecuado, pero requiere tratamiento sobre todo en la denominada secuencia ignimbítica de margen derecha.

El fracturamiento superficial y el del subsuelo (obtenido de los barrenos) es abundante.

En la zona de la boquilla se definen 7 paquetes litológicos determinados con la barrenación y con la geofísica.

La permeabilidad en la margen izquierda es mayor que en la margen derecha.

Con la geofísica se confirmaron las 7 unidades y se determinó que 4 de ellas son "arables", o sea, que tienen facilidad para ser removidas con equipo mecánico.

Fue conveniente que el macizo rocoso fuese tratado desde 0 a 25 m de profundidad para mejorar las propiedades mecánicas e hidráulicas para garantizar su seguridad y el comportamiento adecuado de las estructuras que en él se apoyen. Esto consistiría en la limpieza, calafateo, tapete de consolidación, pantalla de impermeabilización y sistema de drenaje.

La profundidad recomendada obedece a que existe un salto o desnivel del río, aguas abajo en el que la diferencia de nivel entre el sitio de boquilla y ese es de aproximadamente 22 m, y por donde pudiera haber "escape" o circulación que se embalsará con la cortina.

PRINCIPALES CARACTERISTICAS Y SU CONSTRUCCION

TRATAMIENTO DE LA CIMENTACION

Dentro de las trazas del material impermeable y los filtros, se retiró el material común y laroca intemperizada, hasta llegar a la roca sana. Posteriormente se llevó a cabo un tapete de consolidación, mediante inyecciones de lechada, agua-cemento-bentonita en barrenos de 10 m de profundidad y espaciados a cada 10.00 m entres hileras formando cuadrícula. Por los bajos consumos de cemento observados, que en promedio fueron de 7 kg por metro lineal de barreno, no fue necesaria la barrenación e inyección de una segunda etapa, que consistía según el proyecto, en barrenos espaciados a cada 5 m.

Adicional a este tratamiento, sobre el eje de la corona de la cortina y en toda su longitud, se efectuaron barrenos de 20 m de profundidad en los extremos; 25 m entre los extremos y la zona centro y 35 m en la parte central de la cortina, espaciados a cada 10 m, para formar mediante la inyección de lechada una pantalla profunda de impermeabilización, que se ejecutó en progresiones ascendentes a cada 5 m. Los consumos de cemento fueron bajos, en promedio de 13 kg por metro lineal, por lo que sólo en algunas zonas fue necesario efectuar segunda y hasta tercera etapas.

INVERSION

Obra de cabeza:	₡ 58 207 millones
Camino de acceso:	₡ 1 030 millones
Electrificación obra de toma:	₡ 314 millones
Supervisión y control de calidad:	₡ 3 941 millones
Desmonte del vaso e instrumentación de la cortina	₡ 1 058 millones
Ingeniería y administración	₡ 685 millones
Total:	₡ 65 241 millones

a) Fecha de iniciación. Se cerró el día 1 de junio de 1993 habiéndose almacenado 47 millones de m³. No ha habido extracciones.

b) Fuente de energía. Se construyó una línea de 23 000 volts de 9.5 kilómetros de longitud, conectada a una línea de la cabecera municipal Valle de Guadalupe, Jalisco, dotada de sub-estación con un transformador de 15 kva, para reducir la tensión a 220/440 volts.

INFORME DE INYECCION

a) Descripción de los trabajos.

El tratamiento de la cimentación mediante inyecciones tuvo por finalidad la creación de una pantalla de impermeabilización para disminuir las filtraciones a través de la cimentación de la cortina; y la formación de un tapete de consolidación.

a.1) pantalla impermeable. Cortina.

Esta formada por perforaciones verticales de 3 1/4" de diámetro separadas 10 m entre sí, ubicadas sobre la línea correspondiente al eje de simetría de la cortina, denominado con la letra (D); para este caso la localización y profundidad de las perforaciones de acuerdo a proyecto es como sigue:

ESTACION	PROFUNDIDAD
0-080 - 0-010	15.0 m
0+000 - 0+200	25.0 m
0+210 - 0+480	15.0 m
0+490 - 1+100	20.0 m
1+100 - 1+420	30.0 m
1+430 - 1+740	20.0 m
1+750 - 1+850	25.0 m
1+850 - 2+020	15.0 m

La inyección de pantalla inició en la estación 0+380 y terminó en la estación 2+040. Figs IP-01 a IP-05

a.2) Tapete de consolidación cortina.

Está formado por dos y cuatro líneas de perforación paralelas al eje de la cortina conformando una carpeta de consolidación. Estas perforaciones están ubicadas en trespelillo respecto a las perforaciones de la pantalla impermeable.

Las líneas de perforación están localizadas como sigue:

ESTACION	
0+076 - 0+485	2 líneas de perforación (C,E)
0+495 - 0+895	4 líneas de perforación (B,C,E,F)
0+905 - 1+055	2 líneas de perforación (C,E)
1+065 - 1+565	4 líneas de perforación (B,C,E,F)
1+575 - 2+015	2 líneas de perforación (C,E)

Todas las perforaciones están separadas 10.0 m una de otra, así como también las líneas de perforación.

ESTACION	PROFUNDIDAD
0-080 - 0-010	15.0 m
0+000 - 0+200	25.0 m
0+210 - 0+480	15.0 m
0+490 - 1+100	20.0 m
1+100 - 1+420	30.0 m
1+430 - 1+740	20.0 m
1+750 - 1+850	25.0 m
1+850 - 2+020	15.0 m

La inyección de pantalla inició en la estación 0+380 y terminó en la estación 2+040. Figs IP-01 a IP-05

a.2) Tapete de consolidación cortina.

Está formado por dos y cuatro líneas de perforación paralelas al eje de la cortina conformando una carpeta de consolidación. Estas perforaciones están ubicadas en tresbolillo respecto a las perforaciones de la pantalla impermeable.

Las líneas de perforación están localizadas como sigue:

ESTACION	
0+076 - 0+485	2 líneas de perforación (C,E)
0+495 - 0+895	4 líneas de perforación (B,C,E,F)
0+905 - 1+055	2 líneas de perforación (C,E)
1+065 - 1+565	4 líneas de perforación (B,C,E,F)
1+575 - 2+015	2 líneas de perforación (C,E)

Todas las perforaciones están separadas 10.0 m una de otra, así como también las líneas de perforación.

Las perforaciones del tapete de consolidación son verticales de 3 1/4" de diámetro y tienen 10.0 m de profundidad. La inyección del tapete de consolidación inició en la estación O+385 y terminó en la estación 2+015. Figs TC-01 a TC-07.

a.3) Pantalla vertedor.

Formada por una línea de perforación ubicada a un lado del muro del cimacio y a una distancia de 17.15 m respecto al eje del canal colector localizada entre las estaciones O-010 a la O+087.50 y una línea de perforación ubicada a 3.60 m del paño del muro de inicio del canal colector, localizada entre las estaciones O-040 a la O-010.

Las perforaciones son verticales de 3 1/4" de diámetro separadas 10.0 m una de otra, con una profundidad de 25 m cada una.

a.4) Inyección de contacto. Obra de desvío y obra de toma.

El objetivo de esta inyección es sellar la junta formada entre el terreno natural y el concreto que conforma el revestimiento del conducto de la obra de toma y el concreto del conducto de la obra de desvío con el fin de eliminar filtraciones y asentamientos en dichas zonas.

Está formada por perforaciones verticales de 3 1/4" de diámetro con una separación de 5.0 m entre sí y distribuidas a lo largo de los hombros de los taludes de excavación donde se alojan estos conductos.

Adicionalmente a las perforaciones verticales se realizaron perforaciones inclinadas a 37° respecto a la vertical, de 3 1/4" de diámetro con una separación de 10.0 m entre sí y ubicadas en forma alternada respecto a las perforaciones verticales mencionadas. Las perforaciones inclinadas se efectuaron a 6 y 8 m respecto al eje del conducto de la obra de toma y al eje del conducto de la obra de desvío respectivamente, y a ambos lados de dichos conductos. La profundidad de las inyecciones de contacto fue de 15 m.

Lo anteriormente descrito en los puntos a.1, a.2.a.3 y a.4 para el tratamiento de la cimentación corresponde a la primera etapa de inyectado, lo cual se complementó en algunos casos con etapas adicionales (2a. etapa, 3a. etapa, 4a. etapa) por perforaciones intermedias de acuerdo a los consumos que se fueron registrando durante el proceso de inyección.

El criterio especificado para la inyección fue de progresiones ascendentes en tramos de 5 m de profundidad kg/cm² en orden ascendente definiéndose como progresión al ciclo completo de perforación, lavado, prueba de presión e inyectado de cualquier tramo de una perforación.

La proporción base de la lechada utilizada para la inyección fue 3:1 en relación agua cemento, con un 5 por ciento de bentonita previamente hidratada en relación al peso del cemento, siendo necesario, de acuerdo a los consumos que se fueron registrando durante el proceso de inyectado, utilizar en ocasiones los proporcionamientos 2:1, 1:1, 0.8:1 con un 4, 2 y 1 por ciento de bentonita hidratada, respectivamente.

Es importante mencionar que antes de proceder al inyectado se llevó a cabo la verificación del correcto lavado y limpieza de las perforaciones, y durante el inyectado el control de las presiones, dosificaciones y pruebas (fluidez, densidad y sedimentación) de las mezclas utilizadas.

Generalmente las actividades que se llevaron a cabo para garantizar la calidad de las mezclas fueron las siguientes:

1. Verificar que el equipo para el mezclado estuvieran en buenas condiciones de trabajo.
2. Verificar que los materiales a usar en la elaboración de mezclas se encontraron debidamente almacenados y protegidos.
3. Realizar ensayos de campo para verificar que las mezclas cumplieran con especificaciones en cuanto a densidad, fluidez y sedimentación. figs 1C-01, 1C-02.

b) Equipo utilizado durante la inyección.

b.1) Equipo de perforaciones para inyectado.

- Un compresor 825.
- Un track drill.
- Barras de perforación.

b.2) Equipo de lavado para inyección "HANY".

- Un tanque de agua de 600 l.
- Un tanque de agua de 400 l.
- Un tanque de agua de 500 l.
- Una bomba de dos pistones presión máxima 50 bars.

- Dos mangueras de alta presión 1 1/2" de diámetro.
- Tubería galvanizada de 1 1/2" de diámetro.

b.3) Equipo de inyección "HANY ZMP725".

- Un tanque de agua de 600 l.
- Un tanque mezclador capacidad de lechada 400 l.
- Un tanque agitador capacidad máxima de lechada 500 l.
- Una bomba hidráulica de dos pistones presión máxima 50.95 kg/cm²
- Un registrador de lechada en litros, litros/minuto y presión.
- Manguera de alta presión.
- Tubería galvanizada de 1 1/2".
- Un obturador de aire de 2" de diámetro.
- Manguera de plástico 1/4" de diámetro para el obturador.
- Tanque almacenador de aire con manómetro de 200 lb de presión.
- Bomba manual de aire.
- Una araña liberadora de presión.
- Un manómetro de 7 kg/cm² de presión máxima.
- Una planta generadora de energía eléctrica.
- Ocho tanques para preparar bentonita de 200 l cada uno.

c.4) Equipo para inyección MOYNO.

- Tres tanques de agua de 1500 l.
- Un tanque con agitador. Capacidad 600 l.
- Un tanque mezclador. Capacidad 480 l.
- Una bomba con motor de gasolina presión máxima 20 kg/cm².
- Manguera de alta presión de 1" de diámetro.
- Tubería galvanizada de 1" de diámetro.
- Una araña liberadora de presión.
- Un manómetro de 7 kg/cm² de presión alta.
- Ocho tanques para preparar bentonita de 200 l de capacidad cada uno.

c) Descripción del proceso de inyección.

c.1) Inyección con equipo "HANY".

a) La primera actividad antes de iniciar el proceso normal de inyectado de la cimentación fue de hidratar la bentonita con 24 horas de anticipación en una proporción 10:1 en relación agua-bentonita.

- Dos mangueras de alta presión 1 1/2" de diámetro.
- Tubería galvanizada de 1 1/2" de diámetro.

b.3) Equipo de inyección "HANY ZMP725".

- Un tanque de agua de 600 l.
- Un tanque mezclador capacidad de lechada 400 l.
- Un tanque agitador capacidad máxima de lechada 500 l.
- Una bomba hidráulica de dos pistones presión máxima 50.95 kg/cm²
- Un registrador de lechada en litros. litros/minuto y presión.
- Manguera de alta presión.
- Tubería galvanizada de 1 1/2".
- Un obturador de aire de 2" de diámetro.
- Manguera de plástico 1/4" de diámetro para el obturador.
- Tanque almacenador de aire con manómetro de 200 lb de presión.
- Bomba manual de aire.
- Una araña liberadora de presión.
- Un manómetro de 7 kg/cm² de presión máxima.
- Una planta generadora de energía eléctrica.
- Ocho tanques para preparar bentonita de 200 l cada uno.

c.4) Equipo para inyección MOYNO.

- Tres tanques de agua de 1500 l.
- Un tanque con agitador. Capacidad 600 l.
- Un tanque mezclador. Capacidad 480 l.
- Una bomba con motor de gasolina presión máxima 20 kg/cm².
- Manguera de alta presión de 1" de diámetro.
- Tubería galvanizada de 1" de diámetro.
- Una araña liberadora de presión.
- Un manómetro de 7 kg/cm² de presión alta.
- Ocho tanques para preparar bentonita de 200 l de capacidad cada uno.

c) Descripción del proceso de inyección.

c.1) Inyección con equipo "HANY".

a) La primera actividad antes de iniciar el proceso normal de inyectado de la cimentación fue de hidratar la bentonita con 24 horas de anticipación en una proporción 10:1 en relación agua-bentonita.

b) Posteriormente se agitó la mezcla agua-bentonita mediante su recirculación durante un tiempo de 30 minutos.

c) Una vez instalada la tubería de alimentación se procedió al lavado de los barrenos programados para inyectarse en el turno de trabajo. Este lavado se efectuó a base de agua y aire a una presión de 4.0 kg/cm^2 .

d) En seguida se elaboró la mezcla agua-cemento en el tanque mezclador incluyéndosele la mezcla agua-bentonita especificada, con un tiempo de mezclado mínimo de 3 minutos.

e) A continuación se introdujo en el barreno la sección de tubería preparada previamente para obturar primero a 5.0 m del fondo para la primera progresión.

f) Al mismo tiempo se bombeó la lechada del tanque mezclador de 400 l al tanque de 500 lt existiendo una recirculación.

g) Posteriormente las bombas hidráulicas inyectaron la lechada del tanque agitador pasando por el registrador de lechada automático, el cual registró la presión en bar (1.015 kg/cm^2) y los consumos de lechada inyectada en litros y el litros por minuto.

h) Se dió inicio al inyectado abriendo la llave de paso al final de la tubería que va al barreno, controlándose la presión especificada con la llave misma y observado la lectura indicada en el manómetro colocado en el extremo superior de la tubería que se introdujo en el barreno.

i) Para los trabajos correspondientes de la presa "El Salto" se consideró como inyectada y sellada la progresión de una perforación o pozo cuando la toma de lechada fue de 40 l como máximo durante un tiempo de 15 min.

En ocasiones hubo necesidad de cambiar en forma sucesiva los proporcionamientos de las mezclas (1, 2, 3, 4) hasta terminar el inyectado de una progresión.

Realizando esto cuando durante la inyección, se llegaba al consumo autorizado para el cambio de mezcla de acuerdo a la siguiente tabla:

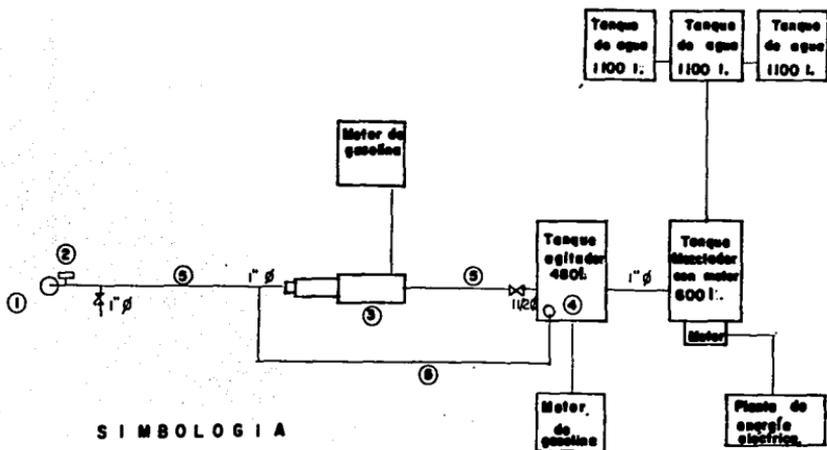
MEZCLA	1	2	3	4
AGUA-CEMENTO	3:1	2:1	1:1	0.8:1
BENTONITA HIDRATADA	0.05	0.04	0.02	0.01
CONSUMO (CEMENTO kg)	250	250	500	500

j) Al terminar el inyectado de la última progresión (la superior) se rellena el resto del barrero en la zona donde se localiza el obturador, con una mezcla agua-cemento muy densa.

c.2) Inyección con equipo MOYNO.

Básicamente el funcionamiento es casi el mismo que se menciona para el equipo de inyección HANNY.

Lo que prácticamente los diferencia es el registrador automático con que cuenta el equipo HANNY para los consumos de lechada inyectada y presiones de inyección.

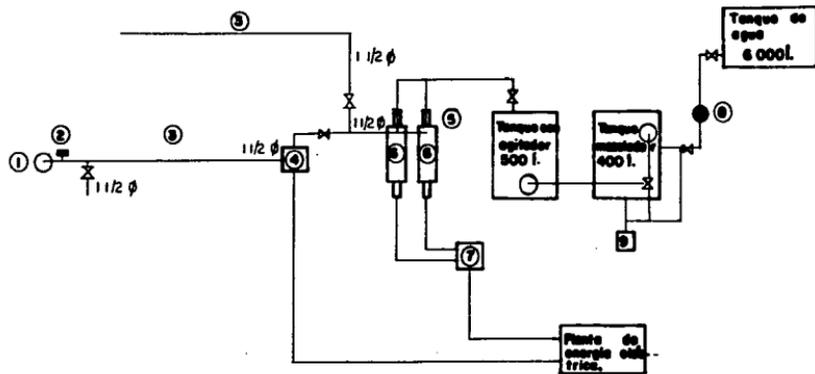


SIMBOLOGIA

- ① Barreno por inyectar
- ② Manómetro de 100
- ③ Bomba MOYNO 300
- ④ Tubo graduado de material transparente, para medir el contenido del tanque agitador en l.
- ⑤ Tubo galvanizado y manguera de alta presión.
- ⊗ Válvula de control.

DIAGRAMA DE EQUIPO DE INYECCION MOYNO

FIG. V.30



S I M B O L O S I A

- ① Barreno por inyector.
- ② Manómetro 100
- ③ Tubería galvanizada 1 1/2 ϕ y manguera de ella presión.
- ④ Registradora de lechada inyectada en l./min., y presión de inyección en bar.
- ⑤ Manómetro de 1450
- ⑥ Bombas hidráulicas.
- ⑦ Arrancador y control de presiones.
- ⑧ Medidor de agua.
- ⑨ Bomba del tanque mezclador.
- ⊗ Válvulas de control.

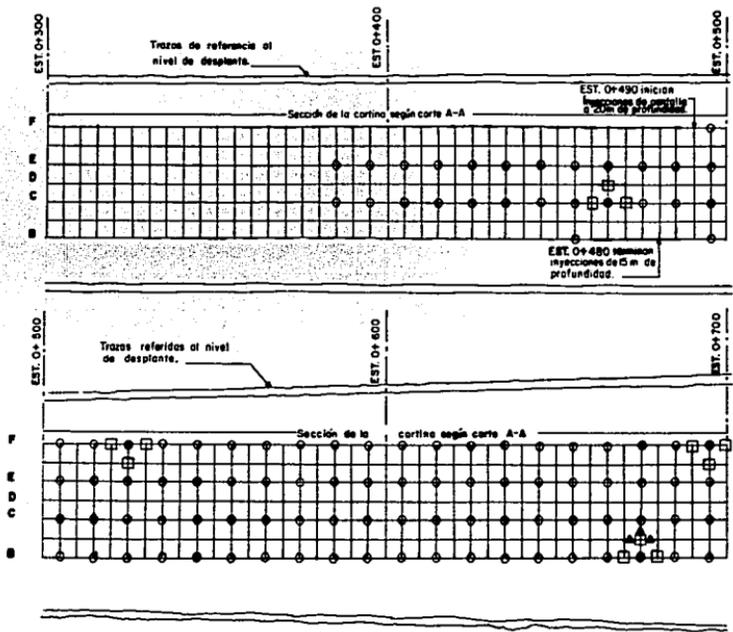
DIAGRAMA DE EQUIPO DE INYECCION HANY.

FIG. V. 29

d) Resumen de cantidades de la obra ejecutada y de consumos.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD
LONGITUD TOTAL INYECTADA	m	12,470.00
VOLUMEN TOTAL DE LECHADA INYECTADA	l	497,465.17
CEMENTO TOTAL INYECTADO	kg	168,580.00
PROMEDIO GLOBAL DE CEMENTO CONSUMIDO POR METRO LINEAL DE PERFORACION INYECTADA	kg/m	13.52
TIEMPO TOTAL EMPLEADO EN EL LAVADO DE LOS BARRENOS	hs	225.54
TIEMPO EFECTIVO TOTAL EN EL INYECTADO	h	1.077.46
NUM. TOTAL DE OBTURACIONES	CONEXION	2,245.00

FALLA DE ORIGEN



CONSUMOS DE CEMENTO EN Kg/m



ETAPA DE BARRENACION.

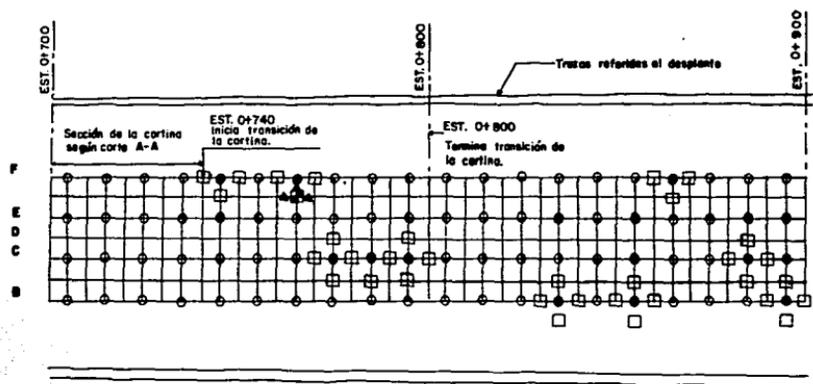


PRESA "EL SALTO"
Valle de Guadalupe, Jal.

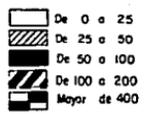
Tapete de consolidación

TC-01

FALLA DE ORIGEN



CONSUMOS DE CEMENTO EN Kg/m



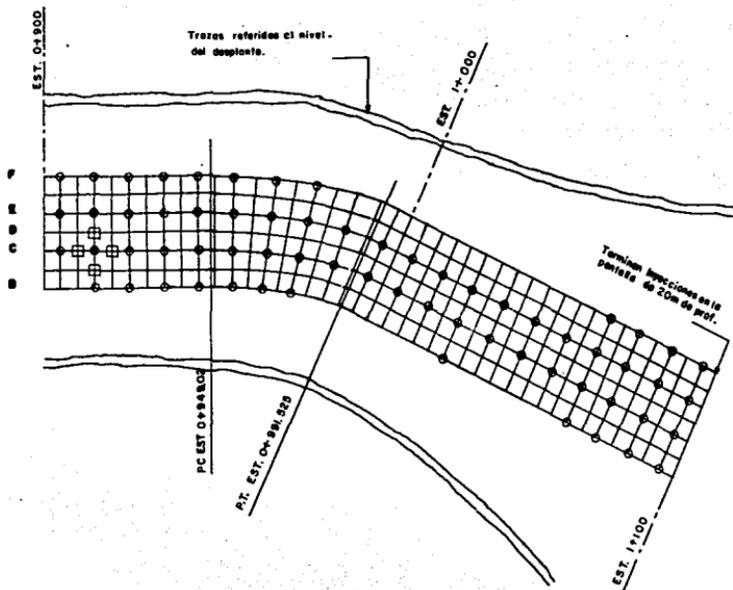
ETAPA DE BARRENACION.

- Primera
- Segunda
- ▲ Tercera

PRESA "EL SALTO"
 Valle de Guadalupe, Jal.
 Reporte de consolidación

TC-02

FALLA DE ORIGEN



CONSUMOS DE CEMENTO EN Kg/m



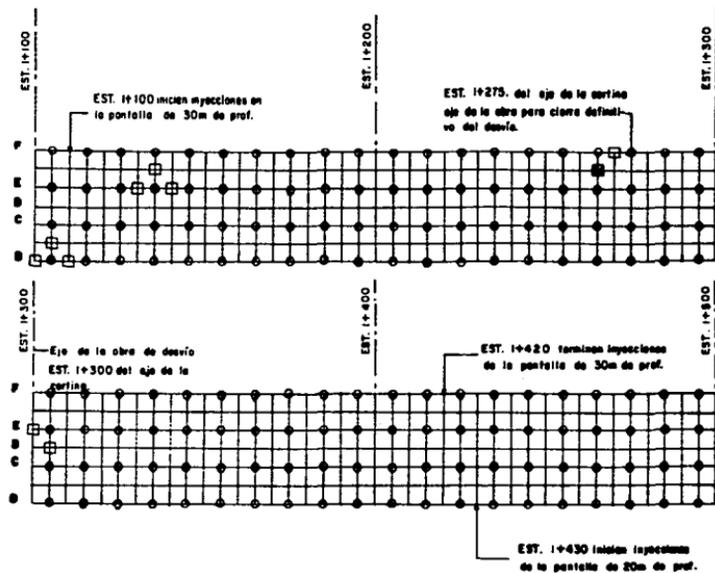
ETAPA DE BARRENACION



PRESA "EL SALTO"
Valle de Guadalupe, Jal.
Topografía de consolidación

TC-03

FALLA DE ORIGEN



CONSUMOS DE CEMENTO EN Kg/m



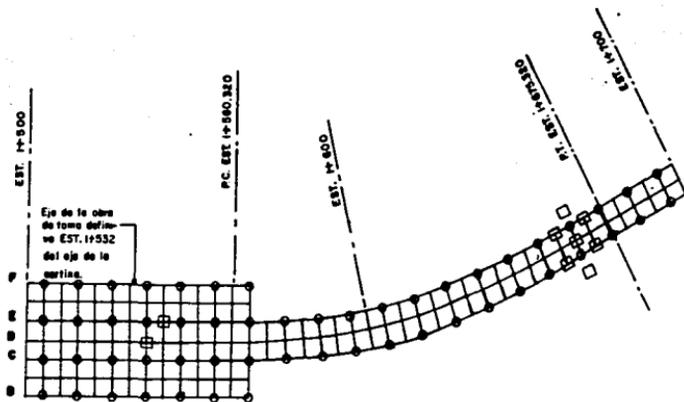
ETAPA DE BARRENACION



PRESA "EL SALTO"
Valle de Guadalupe, Jal.
Tipo de construcción

TC-04

FALLA DE ORIGEN



CONSUMOS DE CEMENTO EN Kg/m³



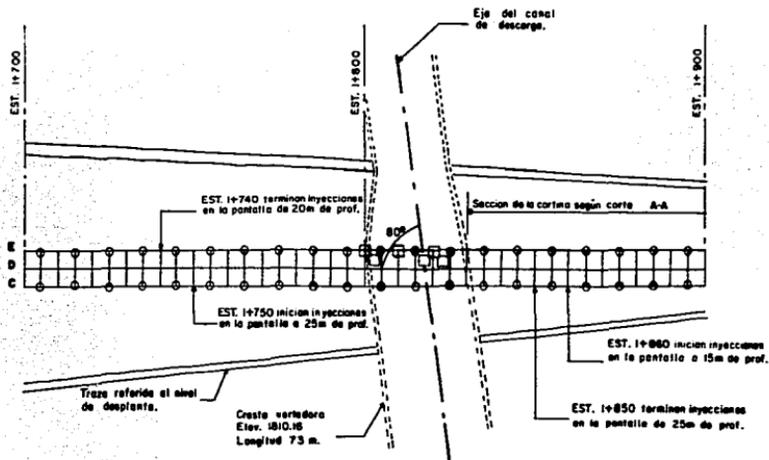
ETAPAS DE BARRENACION



PRESA "EL SALTO"
 Valle de Guadalupe, Jal.
 Topografía de construcción

TC-05

FALLA DE ORIGEN



CONSUMOS DE CEMENTO EN Kg/m

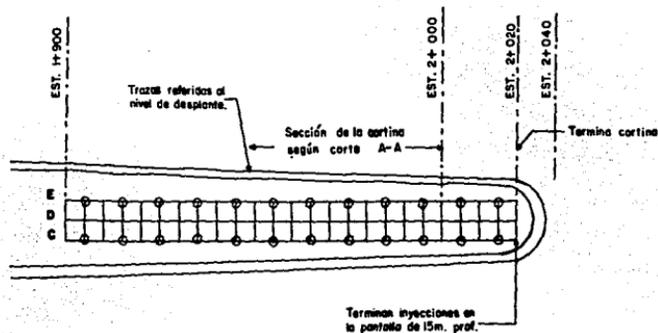


ETAPA DE BARRENACION



PRESA "EL SALTO"
Valle de Guadalupe, Jal.
Tapete de consolidación

TC-06



CONSUMOS DE CEMENTO Kg/m

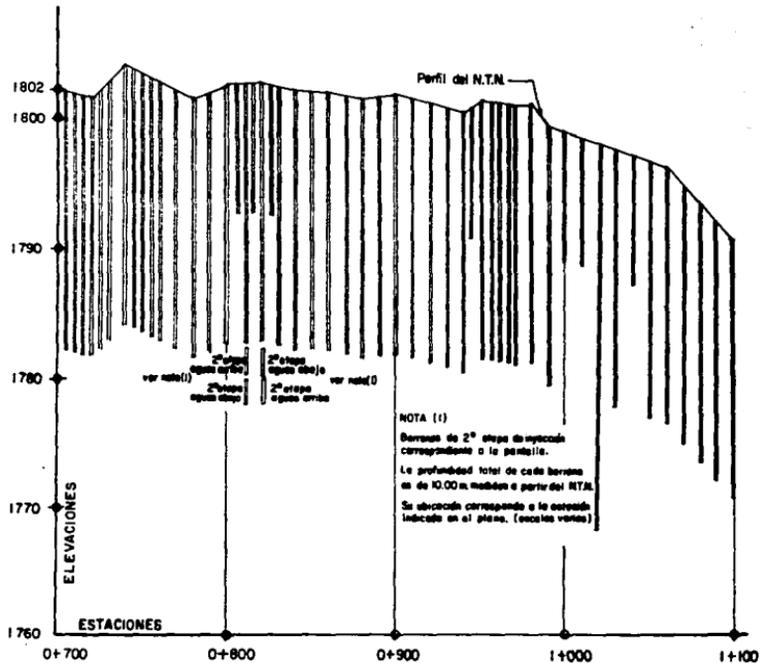
De 0 a 25

ETAPA DE BARRENACION

○ Primera

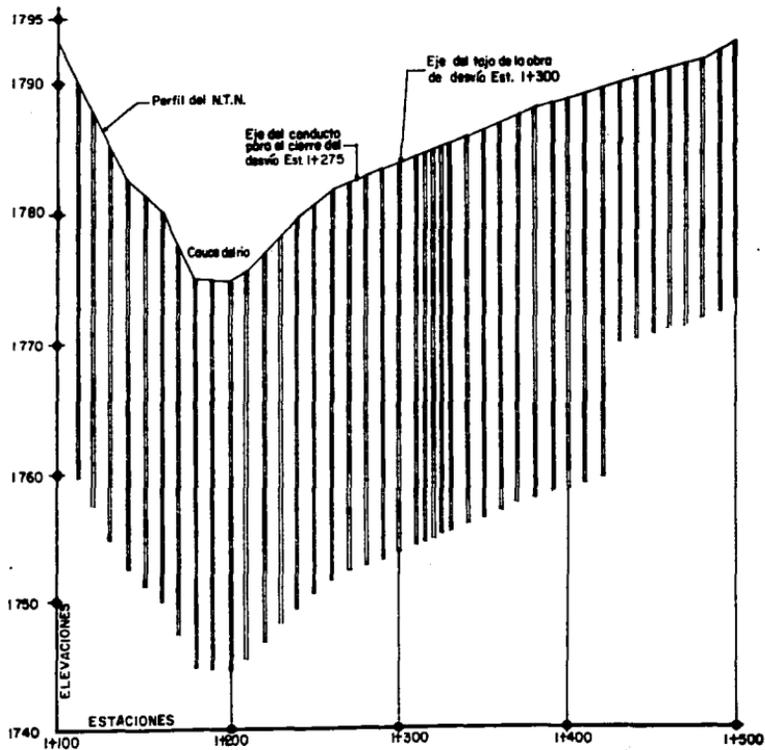
PRESA "EL SALTO"
 Valle de Guadalupe, Jal.
 Tapete de consolidación

TC-07



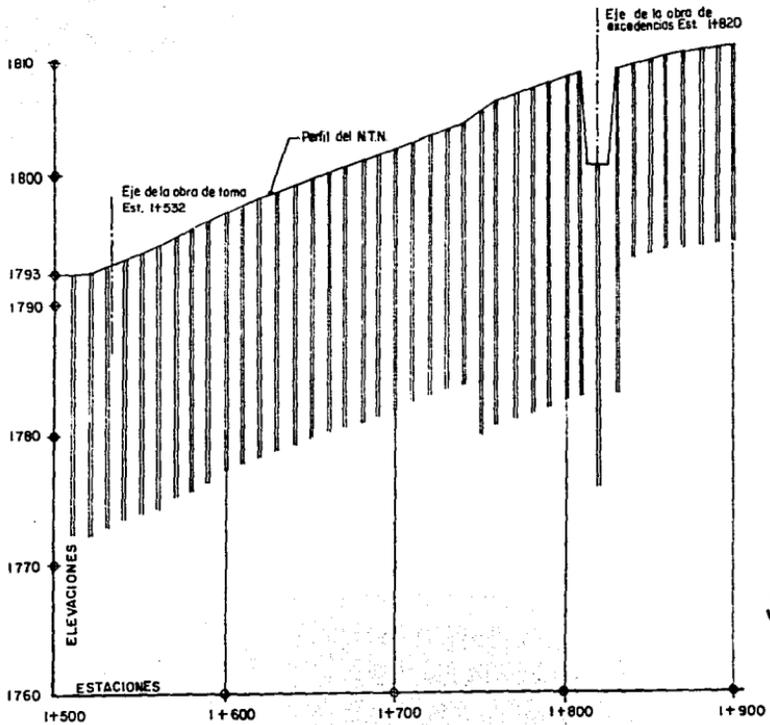
PRESA "EL SALTO"
 Voto de Sanaboga, Jal.
 Inyección de concreto
 IP-02

ESTA TESTA NO DEBE
SALIR DE LA OVALOTECA

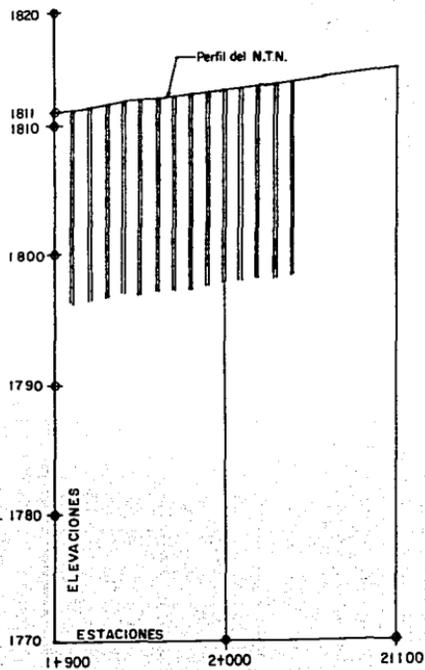


PRESA "EL SALTO"
Vista de Guadalupe, Jal.
Inyección de puente

IP-03

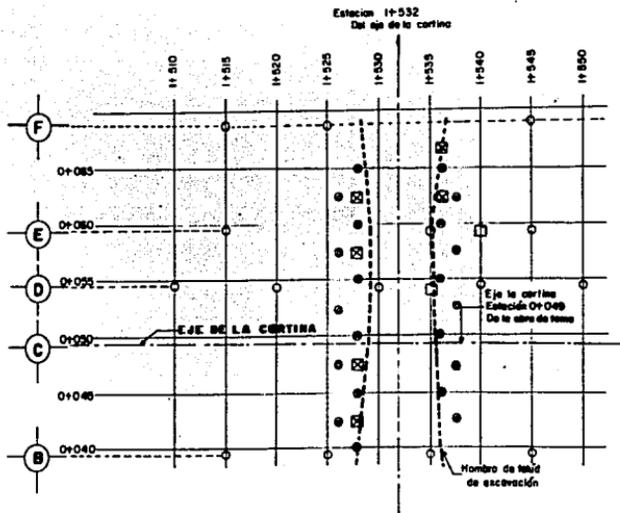


PRESA "EL SALTO"
 Valle de Guadalupe, Jal.
 Inyección de pontón
 IP-04



PRESA "EL SALTO"
 Valle de Guadalupe, Jal.
 Inyección de ponales
1P-05

EJE DE LA OBRA DE TOMA



NOTAS IMPORTANTES

La profundidad de los barrenos de contacto en el conducto de la obra de toma es de 15.00m. a partir del N.T.N.

El ángulo de inclinación de los barrenos inclinados es de 37° con respecto a la vertical.

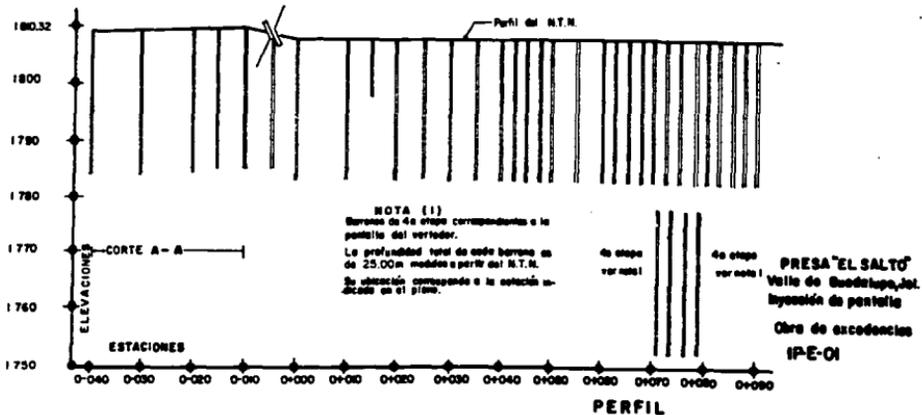
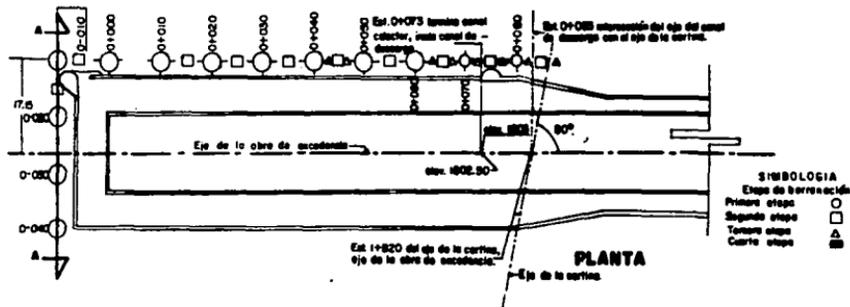
SIMBOLOGIA

- Barrenos tapete y pantalla 1ro etapa
- Barrenos tapete 2 de etapa
- ⊗ Barrenos contacto 1ro etapa
- ⊗ Barrenos contacto 2 de etapa
- ⊙ Barrenos inclinados de contacto 1ro etapa

PRESA "EL SALTO"
Valle de Guadalupe, Jal.
Inyecciones de contacto

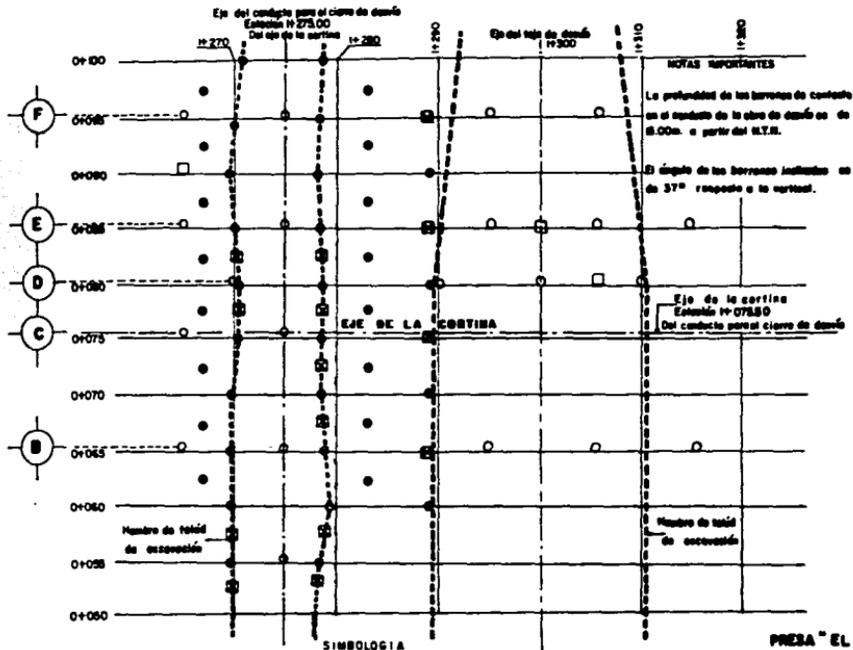
Obra de toma

IC-01



FALLA DE ORIGEN

FALLA DE ORIGEN



NOTAS IMPORTANTES

La profundidad de los barrenos de contacto en el momento de la obra de damo es de 8.00m. a partir del N.T.R.

El ángulo de los barrenos inclinados es de 37° respecto a la vertical.

Eje de la cortina
Estación N 075.00
Del contacto para el cierre de damo

- SIMBOLOGIA**
- Barrenos hechos y permito 1m etapa
 - Barrenos hechos 2da etapa.
 - ⊗ Barrenos contacto 1ra etapa.
 - ⊗ Barrenos contacto 2da etapa.
 - ⊙ Barrenos inclinados de contacto 1ra etapa.

PRESA "EL SALTO"
 Valle de Guadalupe, Jal.
 Inspección de contacto
 Obra de damo
 IC-02

VI CONCLUSIONES

- Los estudios preliminares son de gran importancia, porque de ellos depende la posibilidad de desplantar en una boquilla. Del resultado de esta etapa dependerá el éxito que se tenga para construir la presa.
- Las pruebas de absorción de agua, nos indican las condiciones de permeabilidad del sitio de la obra, lo que permite determinar si es necesario llevar a cabo inyecciones de lechada de cemento y las características con que se deben realizar.
- Dos procedimientos fundamentales son el inyectado en roca y en suelos aluviales, los cuales son los medios donde principalmente se desplantan las presas; en cada uno de ellos influyen los procedimientos y equipos que se utilizan para llevar a cabo la correcta inyección de la cimentación. De la efectividad de esta etapa dependerá la estabilidad y funcionamiento de la estructura.
- La selección de lechadas es primordial, ya que para cada lugar de desplante de la obra, se requiere de lechadas que satisfagan sus condiciones particulares, porque de lo contrario se corre el riesgo de tener un mal comportamiento de la mezcla y por lo tanto una deficiente impermeabilización o consolidación del lugar, que pondría en riesgo la seguridad de la obra.
- El moderno método de control de inyectado GIN es un herramienta poderosa para llevar a cabo un control estricto del inyectado por medio de computadora. Este método nos ofrece grandes ventajas como son: una velocidad de bombeo constante, uso de una sola mezcla durante todo el proceso; monitoreo en tiempo real mediante computadora de la presión, velocidad del flujo, volumen inyectado y penetrabilidad contra el tiempo. El método GIN supera ampliamente a los tradicionales métodos de control de inyección como el de rechazo y el de volumen máximo.
- El caso de inyectado en la Presa "Boca del tesorero", ubicada en Zacatecas, en el cual se describen los resultados de pruebas de permeabilidad antes y después del

tratamiento, permite observar claramente la importancia de este en el tratamiento de la cimentación, debido a que se reduce el volumen de filtración de una manera muy considerable.

- El segundo caso abordado, la presa "El Salto", ubicada en Valle de Guadalupe, Jalisco, ejemplifica de una manera detallada los estudios que se realizaron para establecer procedimientos y los volúmenes de inyectado, los materiales y equipos que se utilizaron en el tratamiento de la cimentación del tapete de consolidación, de la pantalla impermeable, el tratamiento especial en el cimacio del vertedor y en la obra de desvío.

- El tratamiento de las cimentaciones por medio de inyecciones de lechada de cemento son definitivamente confiables y de buen comportamiento, tanto para la impermeabilización como para la consolidación, por lo que el uso de este método es recomendable en el mejoramiento del sitio de desplante de cortinas. Los costos de este método se justifican con la seguridad que proporcionan al comportamiento y operación de la estructura.

VII. BIBLIOGRAFIA

- 1.- Conferencias "Fernando Gutiérrez", compilación, 1993, México D.F., CICM.
- 2.- Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, 1991, SMMS.
- 3.- Instrucciones sobre la operación de inyectado. SARH.
- 4.- Principios de geología y geotecnia. D.P. Krynine, Will R. Judd. Editorial Omega.
- 5.- Mecánica de suelos. Juárez Badillo y Rico Rodríguez. Segunda edición. Editorial Limusa. Tomo II y III.
- 6.- Inyecciones en suelos. H. Cambefort. Ediciones Omega.
- 7.- Control de campo del inyectado de cimentación en presas. Ing. D. V. Deere. SARH.
- 8.- Presas de tierra y enrocamiento. R.J. Marshal. Editorial Limusa.
- 9.- Manual de mecánica de suelos. S.R.H.. México, 1970.
- 10.- Manual de diseño de obras civiles. C.F.E.. México 1980. Sección B, tema 3, capítulo 5.
- 11.- Presas pequeñas. R.J. Marsal. Instituto de Ingeniería. UNAM, 1974.
- 12.- Informe final de inyección y control de calidad. DIRAC S.A. de C.V.. México, 1993.
- 13.- Memoria de la presa "El salto". CNA. México, 1994.
- 14.- Estudio de factibilidad de la presa "El salto". CNA. México, 1991.
- 15.- Estudio geológico de la presa "El salto". CNA. México, 1991.