

124
2^{er}



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

TRATAMIENTO DE CIMENTACION DE PRESAS POR MEDIO DE INYECCION.

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a :

Bernardo Navarro Vázquez



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.

INDICE.

PRIMER CAPITULO.

I.-INTRODUCCION. 2

SEGUNDO CAPITULO.

II.-GEOLOGIA. 6

2.1.-Formación de las rocas y clasificación. 6

2.1.1.-Rocas ígneas. 6

2.1.1.1.-Rocas piroclásticas. 9

2.1.2.-Rocas sedimentarias. 9

2.1.2.1.-Clasificación de las rocas sedimentarias. 10

2.1.3.-Rocas metamórficas. 13

2.2.-Estructuras geológicas. 16

2.2.1.-Estructuras ígneas intrusivas. 16

2.2.2.-Plegamiento de las rocas. 16

2.2.3.-Fracturamiento de las rocas. 20

2.2.4.-Fallas. 22

2.2.5.-Trascendencia de las fallas en Ingeniería. 23

TERCER CAPITULO.

III.- INVESTIGACION GEOLOGICA. 25

3.1.-Generalidades. 25

3.2.-Levantamiento geológico superficial. 25

3.3.-Métodos geofísicos. 27

3.4.-Socavones de exploración. 27

3.5.-Perforaciones directas o sondeos. 29

3.6.-Mapa geológico del sitio. 31

3.7.-Mapa geológico de la República. 32

CUARTO CAPITULO.

IV.-INVESTIGACION GEOTECNICA, PRUEBAS DE CAMPO.	35
4.1.-Generalidades.	35
4.2.-Prueba tipo Lugeon.	36
4.2.1.-Longitud de los tramos.	37
4.2.2.-Presiones de inyección.	37
4.2.3.-Tiempo de estabilización.	37
4.2.4.-Equipo y materiales necesarios.	38
4.2.5.-Ejecución de la prueba.	38
4.2.6.-Interpretación de la prueba.	42
4.3.-Prueba tipo Lefranc.	44
4.3.1.-Limitaciones del método.	46
4.3.2.-Medición del gasto.	48
4.3.3.-Medición del nivel de agua en la perforación.	48
4.3.4.-Equipo necesario.	48
4.3.5.-Ejecución de la prueba.	50
4.3.6.-Registro e interpretación de los datos.	51
QUINTO CAPITULO.	
V.-CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE INYECCIONES.	55
5.1.-Objetivo.	55
5.2.-Diseño de la pantalla impermeable.	56
5.2.1.-Profundidad del inyectado y diámetro de la perforación.	57
5.2.1.1.-Ejecución de las perforaciones y lavado del barrenos.	57
5.2.2.-Inyecciones progresivas en una o varias líneas.	58
5.3.-Tipos de mezclas.	60
5.3.1.-Mezclas inestables y mezclas estables.	60

5.3.2.-Relación agua-cemento en la inyección.	62
5.3.3.-Propiedades reológicas de las mezclas.	63
5.4.-Presiones de inyectado.	65
5.4.1.-Diferentes presiones de inyectado.	67
5.5.-Inyección de aluvión.	71
5.6.-Estación de inyección.	73
5.6.1.-Planta dosificadora o mezcladora.	73
5.6.2.-Sistemas de inyección.	73
5.6.2.1.-Sistema de una sola línea.	75
5.6.2.2.-Sistema circulante con retorno.	77
5.7.-Procedimiento de inyección.	79
5.7.1.-Progresiones de avance.	79
5.7.2.-Progresiones de regreso.	79
5.8.-Reportes de campo.	82
SEXTO CAPITULO.	
VI.-DRENAJE.	85
SEPTIMO CAPITULO.	
VII.-INVESTIGACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y EFICIEN-	
CIA DE LA PANTALLA.	88
7.1.-Control después del inyectado.	88
7.2.-Propiedades del terreno inyectado.	89
7.2.1.-Resistencia al destapamiento de una fisura in-	
yectada.	89
7.2.2.-Resistencia de aluviones inyectados.-	89
7.2.3.-Permeabilidad residual.	90
OCTAVO CAPITULO.	
VIII.-CONCLUSIONES.	92
BIBLIOGRAFIA.	94

PRIMER CAPITULO.

I. INTRODUCCION.

El tratamiento apropiado en la cimentación de las presas es un problema de gran importancia en la construcción moderna. Para que la estructura pueda funcionar como fue proyectada es importante que la cimentación pueda soportar las cargas máximas que se le aplicarán. Si la roca de la cimentación es inadecuada en su estado natural, es posible remediar los defectos existentes y mejorar la roca de tal forma que suministre un apoyo adecuado. Las inyecciones de lechada de cemento en las cimentaciones defectuosas es un método para su mejoramiento.

Por medio de las inyecciones a presión, mezclas de cemento y agua u otra clase de materiales, son obligados a penetrar a espacios confinados e innaccesibles para llegar a consolidar la masa rocosa y para que se forme un sólo conjunto. Hoy en día normalmente se usan las inyecciones a presión con el objeto de eliminar fugas o filtraciones y para reducir la subpresión en la cimentación de la estructura. La inyección aumenta, además, la resistencia de

la roca de la cimentación, rellinando los huecos o fisuras que puedan existir.

Las filtraciones y la subpresión en la cimentación de la cortina de una presa de tierra y enrocamiento se reduce inyectando la cimentación, mediante barrenos profundos, espaciados cerca -- unos de otros en una o más hileras paralelas al eje de la estructura.

Esta pantalla de inyecciones se complementa añadiendo una fila de perforaciones de drenaje, que se perforán a una corta distancia aguas abajo, en una línea paralela a la pantalla de inyecciones. Estos barrenos de drenaje tienen por objeto aliviar las presiones hidrostáticas que se puedan desarrollar a causa del agua que logra pasar a través de la pantalla de inyecciones.

La cimentación se debe explorar completamente, antes de preparar un plan de inyecciones para el sitio de una presa. Los datos obtenidos de las exploraciones se usan para determinar el tipo y tamaño de la cortina de la presa adecuada para el sitio; las propiedades de la roca de cimentación; la localización de fallas, fracturas, grietas y cavidades. Todo lo cual permite preparar planes de inyección adecuados.

El tamaño, número, profundidad y espaciamiento de los barrenos de exploración deben planearse de manera que se obtenga la mayor cantidad de información por el más bajo costo. El aumento del número de barrenos proporcionará datos más precisos, pero aumentará también el costo de la exploración. En toda obra debe existir un equilibrio entre la necesidad de obtener datos para la cimentación y el costo de obtención de los mismos. Esta decisión deberá

hacerla un Ingeniero especialista en cimentaciones.

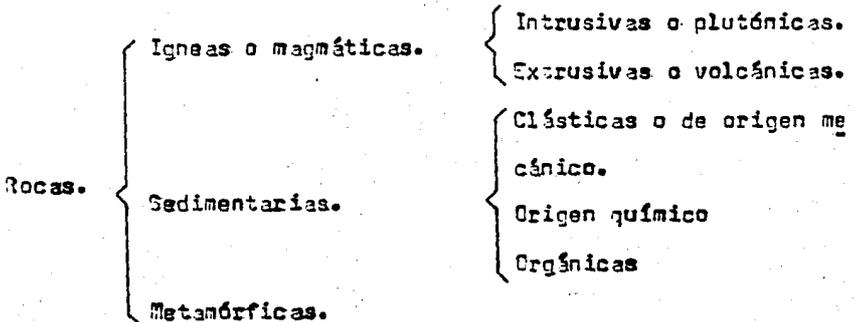
En el trabajo de inyectado es necesario tener un control estricto, en el sentido de que se verifique hasta es máximo posible todas las especificaciones del proyecto, puesto que el éxito que se obtenga dependerá en gran parte del cumplimiento de las reglas de ejecución que se hayan establecido.

SEGUNDO CAPITULO.

II. GEOLOGIA.

2.1.-Formación de las rocas y clasificación.

La totalidad de las rocas existentes en la corteza terrestre pueden clasificarse en tres grandes grupos, en base a su origen; a su vez, estos grupos se subdividen según sus características -- más particulares en:



2.1.1.-Rocas ígneas.

A grandes profundidades en el interior del globo terrestre, se encuentra el "magma" que es una masa fundida, constituida por

variados minerales, entre los que predominan los silicatos, óxidos y sulfuros. Este magma, a pesar de las grandes presiones a -- que está sometido, se encuentra en estado fluido pues las temperaturas del medio son también elevadas. Al descender estas temperaturas, los minerales cristalizan. Con diferentes rangos de temperatura de cristalización característicos y por tanto un orden más o menos constante en la formación de los distintos cristales.

La subdivisión que se presenta para las rocas ígneas en intrusivas y extrusivas se basa en el modo de cristalización.

Se llaman rocas ígneas intrusivas o plutónicas a aquellas cuya cristalización tiene lugar en el interior de la corteza terrestre, su enfriamiento es lento y en presencia de material volátil, especialmente agua, originan minerales como micas y turmalinas y se forman además minerales anhidros como el cuarzo y los feldespatos.

Las rocas ígneas extrusivas o volcánicas, se forman al enfriarse el magma que emerge desde el interior de la tierra, sobre la superficie del planeta, en estas condiciones el enfriamiento es más rápido, por lo cual el proceso de cristalización lo es también y los cristales se presentan menos desarrollados, además el vapor de agua en unión de otros gases escapa rápidamente del magma y se forman así minerales como el feldespato, piroxenas, nefelina, leucita, magnetita, pirita, etc..

Las rocas ígneas se clasifican en varias familias; una familia la forman dos rocas de composición química semejante, pero intrusiva una y extrusiva la otra. Las principales familias de rocas ígneas se muestran en la tabla I.

TABLA I	
FAMILIAS DE ROCAS IGNEAS	
INTRUSIVA	EXTRUSIVA
RIOLITA	GRANITO
DACITA	GRANODIORITA
TRAQUITA	SIENITA
LATITA	MONZONITA
ANDESITA	DIORITA
BASALTO	GABRO
	PERIDOTITAS

TABLA II		
ROCAS PIROCLASTICAS		
TAMAÑO DEL GRANO EN MM.	NO CONSOLIDADO	CONSOLIDADO
MAYOR DE 32	BOMBAS	AGLOMERADO
	BLOQUES (ANGULOSOS)	BRECHAS VOLCANICAS
	BLOQUES Y CENIZAS	BRECHAS TOBACEAS
MENOR DE 32 Y MAYOR DE 4	LAPILLI	TOBAS DE LAPILLI
	CENIZAS (VESICULARES)	TOBAS CINERICAS DE LAPILLI
MENOR DE 4 Y MAYOR DE 1/4	CENIZAS GRUESAS	TOBAS GRUESAS
MENOR DE 1/4	CENIZAS O POLVO VOLCANICAS	TOBAS

1.1.1.1.-Rocas piroclásticas.

Dentro del grupo de las rocas ígneas extrusivas, existen varias rocas cuya formación es muy particular y sus propiedades físicas difieren notablemente de las rocas originadas por enfriamiento rápido o lento de el magma; son las rocas piroclásticas -- que se forman por la acumulación de material detrítico expulsado al aire por un volcán, depositado al caer en tierra, lagos o mares.

Las rocas piroclásticas se clasifican de manera diferente a las rocas ígneas de que se habló anteriormente. La clasificación utilizada generalmente toma en cuenta el tamaño de las partículas el grado de consolidación y también la forma. La clasificación de las rocas piroclásticas se encuentra en la tabla II.

2.1.2.-Rocas sedimentarias.

Las rocas sedimentarias se forman por acumulación y consolidación de sedimentos o residuos de diversas rocas, que fueron transportadas y depositadas por agua, hielo o viento.

Constituyen sólo el 10% aproximado de la corteza terrestre, pero en cambio cubren alrededor de las dos terceras partes de la superficie terrestre, alcanzando en ocasiones espesores de varios kilómetros.

Generalmente las rocas sedimentarias se presentan estratificadas o sea que están constituidas por un conjunto de "capas, lechos o estratos", de espesor variable según las condiciones de sedimentación y cuyas características físicas (granulometría, color y composición mineralógica) pueden variar de estrato a estrato.

Las características de la roca permiten conocer el origen de

la roca sedimentaria y las condiciones de la formación del depósito, además es frecuente que en este tipo de roca se encuentren fósiles, que dan estimación precisa del medio ambiente y en muchos casos de la edad de la roca.

Los diferentes estratos están separados por planos de discontinuidad, generalmente bien definidos, que reciben el nombre de planos de estratificación.

En terminos generales podemos afirmar que en la formación de la mayoría de las rocas sedimentarias (excepto las de origen orgánico), intervienen inicialmente los procesos de "intemperismo o alteración" que atacan las rocas previamente existentes, y que producen los materiales de que se formará la roca sedimentaria. Estos materiales son posteriormente transportados a distancias más o menos largas por los agentes de la "erosión" y depositados en una "cuenca sedimentaria", se inicia entonces el proceso de "diagénesis o litificación", que principalmente a base de presión provocada por la carga de los sedimentos suprayacentes, transforma los sedimentos en roca sedimentaria.

Por tanto la diferencia entre sedimentos, generalmente llamados suelos en la práctica ingenieril, y roca sedimentaria es sólo cuestión del grado de consolidación que se haya alcanzado, se podría decir que los sedimentos de hoy son las rocas sedimentarias del mañana.

2.1.2.1.-Clasificación de las rocas sedimentarias.

La clasificación de las rocas sedimentarias se basa en tres grandes grupos, en función de su forma de depósito:

Las rocas detríticas o clásticas o de origen mecánico, se o-

rigen mecánico, se originan por acción mecánica posterior a la de integración de rocas preexistentes.

Los agentes erosivos (ríos, mares, glaciares, viento, etc.) - desprenden los fragmentos de roca del afloramiento y los transportan desgastándose más intensamente los mayores y las más frágiles ; cuando por cualquier causa el agente erosivo pierde energía, -- los deposita en forma más o menos selectiva como gravas, arenas, arcillas, etc..

Las rocas de origen químico se forman por disolución y posterior precipitación de algunos elementos. El material soluble es - arrastrado en disolución, dejando una roca residual en el lugar - del ataque químico. Cuando las condiciones químicas cambian por - algún motivo (como saturación del agua, reacción química, etc.) - el elemento disuelto se puede precipitar y da lugar así a la formación de la roca sedimentaria química.

Las rocas de origen orgánico se forman a partir de seres vivos. La formación de las rocas se lleva a cabo de diversas maneras; pueden ser animales marinos coloniales, como los caracoles o algas que forman un arrecife y sus partes duras formarían una caliza arrecifal. También la acumulación de las partes duras de los - restos orgánicos (conchas, caparazones, etc.) forman rocas orgánicas en forma similar a como se originaría una roca detrítica, es el proceso formativo de las coquinas, por ejemplo. Las partes --- blandas pueden fermentar por la acción de microorganismos, en la hulla y el petróleo. También existen rocas formadas indirectamente por bacterias que provocan ciertas reacciones químicas, así se originan por ejemplo, las rocas fosfatadas.

Una clasificación general de las rocas sedimentarias se presenta en la tabla III, en la cual se muestra su composición y la forma de identificarlas.

TABLA III.

ROCAS SEDIMENTARIAS.

1.-Rocas clásticas sedimentarias.

Nombre de la roca.	Composición esencial.	Prueba de identificación.
Conglomerado	Partículas cementadas, algo redondeadas; un por ciento considerable en el tamaño del guijarro.	Las partículas más grandes tienen más de 2 mm de diámetro; las partículas más pequeñas y la pasta cementante ocupan intersticios.
Brecha	Fragmentos claramente angulosos, con pasta cementante.	Las partículas grandes son del tamaño de un guijarro o aun mayores.
Arenisca	Fragmentos redondeados del tamaño de los granos de arena, de 0.02 a 2 mm; material cementante.	Generalmente los granos son de cuarzo, pero también los materiales derivados de otras rocas caen dentro de la clasificación general.
Limolita	Principalmente partí-	La superficie es lige

culas de limo, con algunas de arcilla. ramente áspera al tacto.

Lutita

Principalmente minerales arcillosos. La superficie es suave al tacto, aparenta ser áspera.

2.-Rocas de origen orgánico y de origen químico.

Caliza

Calcita; puede ser afanítica o cristalina. Se raya fácilmente con la navaja; efervesce con HCl diluido

Roca dolomítica o dolomía

Dolomita; puede ser afanítica o cristalina. Más dura que la caliza, más suave que el acero; se necesita rayarla o pulverizarla para que haya efervescencia con HCl frío diluido.

Turba

Fragmentos obvios de material vegetal.

Carbón bituminoso

Carbón negro, dispuesto en capas o bloques. Se raya fácilmente, hace raya negra.

Depósitos de sal.

Halita, yeso.

Fuente: Longwell, Chester R. y Flint, Richard F. GEOLOGIA FÍSICA.

2.1.3.-Rocas metamórficas.

Metamorfismo.-Puede ser definido como la respuesta mineralógica a los cambios de temperatura, presión e intensos esfuerzos cortantes, que permiten la alteración de los minerales sin pasar

por un estado fluido.

En general, los procesos que intervienen dan por resultado la recristalización de los materiales de la roca original, pero se incluyen también la fractura de los granos en el interior de una roca acompañada de recristalización secundaria.

Por lo tanto, se denomina "roca metamórfica" a aquella que resulta de la transformación de otra roca.

La existencia de estructuras laminares o foliáceas en tales rocas, indica que los principales agentes que han intervenido en su formación son intensos esfuerzos cortantes. La foliación no siempre es apreciable a simple vista, pero el microscopio puede señalar las líneas que denotan el esfuerzo o deformación. Aquellas rocas metamórficas que se han constituido sin estar sujetas a la acción de intensos esfuerzos cortantes ofrecen una estructura masiva. En la tabla IV aparecen las más corrientes entre las rocas metamórficas, subdivididas en dos tipos básicos con arreglo a su estructura.

TABLA IV.

ROCAS METAMORFICAS.

Nombre de	Características que las distinguen.
-----------	-------------------------------------

la roca.

1.-Rocas metamórficas foliadas.

Pizarra	Se separa en láminas planas, delgadas, que tienen mucho lustre; por lo común los planos de estratificación de la lutita, con la que guarda relación, marca líneas sobre las láminas; en cajas delgadas, suena cuando se le golpea de pronto.
---------	--

- Filita** La superficie de las láminas son excesivamente lustradas; las láminas comúnmente están plegadas o dobladas en forma abrupta; se encuentran cristales de granate y otros minerales en algunas láminas.
- Esquisto** Bien foliada, con minerales laminados o alargados visibles (mica, clorita); el cuarzo es integrante importante; es común encontrar granos de granate y otros minerales; las hojuelas pueden estar plegadas o corrugadas.
- Gneiss** Generalmente de grano grueso, con foliación imperfecta, pero conspicua, las lentes y las capas difieren en su composición mineralógica; el feldespato, el cuarzo y la mica son ingredientes comunes.

2.-Rocas metamórficas sin foliación.

- Cuarcita** Consiste totalmente de arena de cuarzo cementada con cuarzo; los granos de arena se esbozan en las superficies rotas, pasando las roturas a través de los granos. Amplia variedad de colores y tonos.
- Mármol** Caliza o dolomía totalmente cristalizadas; el grano varía de grueso a fino; responde a la prueba con ácido clorhídrico como lo hacen la calcita y la dolomita; los minerales accesorios se desarrollan de las impurezas contenidas en la roca original.

Fuente: Longwell, Chester R. y Flint, Richard F. GEOLOGIA FI

SICA.

2.2.-Estructuras geológicas.

2.2.1.-Estructuras ígneas intrusivas.

Uno de los vestigios más comunes de la actividad ígnea primitiva nos los proporcionan las intrusiones en forma de paredes o murallas llamadas diques (fig. 1). En ellos el magma ascendió por fisuras aproximadamente verticales, abriéndose paso y ensanchando se la grieta a medida que ascendía, y de este modo, al enfriarse quedó consolidado en forma de capa vertical de roca, cuyas caras laterales, más o menos, cortan transversalmente los planos de estratificación.

En ciertas circunstancias, el magma puede abrirse paso a lo largo del espacio entre dos planos de estratificación, donde se instala por levantamiento de las rocas situadas encima. Las formaciones tubulares de rocas resultantes (fig. 2) se llaman "montes interestratificados".

Los diques varían mucho en espesor, desde unos cuantos centímetros hasta centenares de metros, pero lo más frecuente es que tengan de metro y medio a seis metros de ancho. Existe también una considerable variación en longitud y que oscila entre algunos metros y varios kilómetros. Los diques son numerosos en algunas regiones de actividad ígnea.

2.2.2.-Plegamiento de las rocas.

Las fuerzas verticales u horizontales, de tensión o compresión, que actúan sobre la corteza terrestre pueden romper, desplazar o plegar las rocas produciendo en cada caso estructuras geológicas características.

Para comprender todos estos fenómenos y su representación en

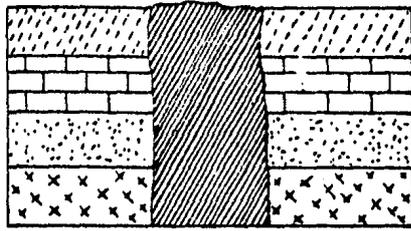


FIG. 1.- REPRESENTACION DE UN DIQUE.



DIQUE.

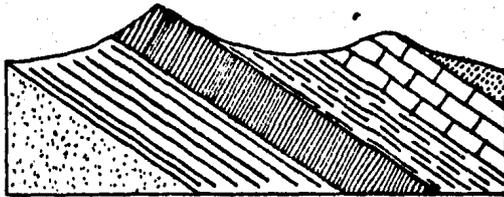


FIG. 2.- MANTO INTERSTRATIFICADO EN UNA SECCION SEDIMENTARIA DE ROCA PLEGADA.

planos, es necesario exponer dos conceptos de importancia geológica:

Rumbo.-Dirección de la línea que se forma por la intersección de la superficie de una roca con un plano horizontal. El rumbo siempre tendrá que ser perpendicular a la dirección del echado o buzamiento.

Buzamiento o inclinación del estrato, falla o fractura.-Angulo que forma el eje de una masa de rocas plegadas con relación a un plano horizontal (fig. 5).

El rumbo y el buzamiento nos determinan la posición de cualquier punto de la estructura. Conviene hacer notar que tanto rumbo y buzamiento siempre deberán formar un ángulo de 90° , por lo que no es necesario dar también el rumbo del buzamiento, sino solamente el cuadrante al que buza.

Los pliegues que se encuentran con más frecuencia en la naturaleza se deben a fuerzas que actúan horizontalmente sobre una sucesión de estratos, si bien también existen pliegues debidos a fuerzas verticales.

Un pliegue es un arco pronunciado en una capa de roca. En muchos lugares, especialmente en zonas montañosas, las rocas estratificadas han sido dobladas en pliegues más o menos regulares. Algunos lo son en pequeña escala y se pueden ver directamente, pero muchos pliegues son tan grandes y los afloramientos de la roca tan escasos, que es necesario estudiar e integrar la estructura de ciertas capas definidas, expuestas en muchos kilómetros a la redonda antes de comprender con claridad la forma exacta de los pliegues.

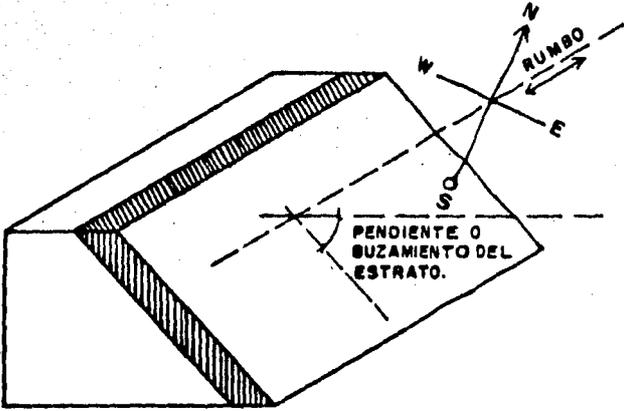


FIG. 3.-ILUSTRACION DE RUMBO Y BUZAMIENTO.

Un pliegue hacia arriba en forma de arco es un anticlinal; un pliegue hacia abajo en forma de artesa es un sinclinal.

En la descripción de los pliegues se requieren varios términos especiales. Los lados de un pliegue son los flancos y la línea media entre los flancos a lo largo de la cima de un anticlinal o de las partes más bajas de un sinclinal es el eje del pliegue.

Un pliegue con su eje inclinado es un pliegue buzante y el ángulo que forma el eje del pliegue con respecto a la horizontal es el buzamiento del pliegue.

El plano axial de un pliegue es un plano imaginario que pasa por la mitad del pliegue e incluye su eje. (fig.4).

2.2.3.-Fracturamiento de las rocas.

Las rocas están característicamente rotas por fracturas lisas conocidas como diaclasas. Las diaclasas se pueden definir como planos divisorios o superficies que dividen las rocas, y a lo largo de las cuales no hubo movimiento visible paralelo al plano o superficie. Aunque la mayoría de las diaclasas son planas, algunas son superficies curvas.

Las diaclasas pueden tener cualquier posición, algunas son verticales, otras son horizontales y muchas están inclinadas en ángulos variables. El rumbo y la inclinación de las diaclasas se mide de la misma forma que en la estratificación.

Las diaclasas difieren mucho en tamaño, pero las observaciones realizadas en canteras demuestran que otras se pueden seguir por decenas o centenares de metros a lo largo del rumbo y por distancias similares hacia abajo. En regiones montañosas se pueden -

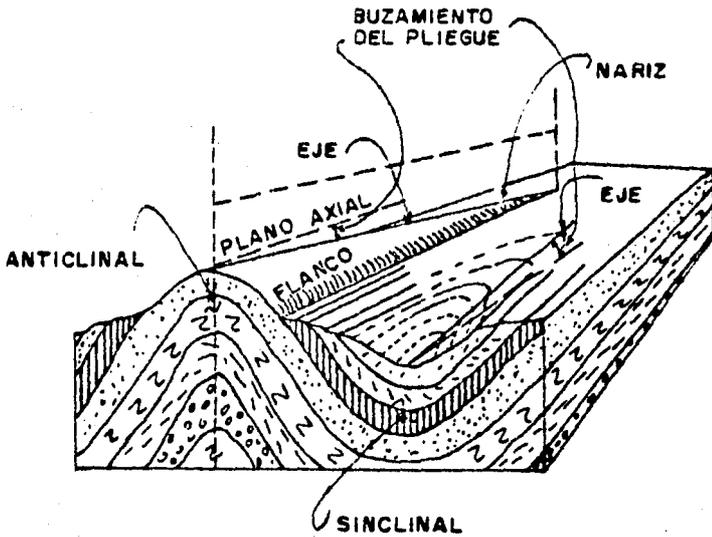


FIG. 4.- REPRESENTACION IDEALIZADA DE UN ANTICLINAL Y UN SINCLINAL SIMETRICOS MOSTRANDOSUS PARTES PRINCIPALES.

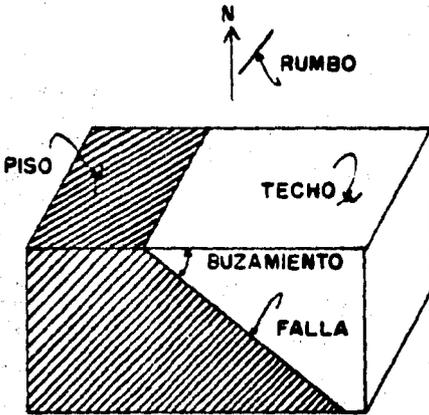


FIG. 5.- TERMINOLOGIA DE UNA FALLA.

observar diaclasa que tienen centenares o aún miles de metros de longitud, tanto en el sentido del rumbo como en el de la inclinación

Una diaclasa nunca se encuentra sola. El intervalo entre -- ellas puede ser de cientos de metros o solamente unos pocos centímetros.

En muchos casos, es difícil determinar el origen de las diaclasas. No es siempre posible distinguir diaclasas de tensión, -- que se forman perpendicularmente a fuerzas que tienden a separar las rocas, de diaclasas de cizalla, que se deben a fuerzas que -- tienden a deslizar una parte de la roca contra la otra adyacente.

2.2.4.-Fallas.

Las fallas son fracturas a lo largo de las cuales las paredes opuestas se han movido la una con relación a la otra. La característica esencial es el movimiento diferencial paralelo a la superficie de la fractura. Algunas fallas tienen sólo unos centímetros de largo y en el otro extremo hay fallas que tienen kilómetros de longitud.

El rumbo y la inclinación de una falla se mide en la misma manera que en la estratificación o en las diaclasas.

El bloque que está encima de la falla se denomina techo y el que está abajo piso. Es obvio que las fallas verticales no tienen techo ni piso (fig.5).

Aunque muchas fallas son bien definidas, en múltiples casos el desplazamiento no está confinado a una fractura única, sino -- que está distribuido a través de una zona de falla que puede tener centenares o aún miles de metros de espesor. La zona de falla

puede consistir en cantidades pequeñas de fracturas entrelazadas o puede ser una zona confusa de brecha.

La intersección de una falla con la superficie terrestre se conoce como línea de falla. En la mayoría de los casos, la línea de falla tal como aparece en el mapa es razonablemente recta o algo sinuosa. Sin embargo, si la inclinación de la falla es baja y el relieve topográfico es alto, la línea de falla puede ser considerablemente irregular.

2.2.5.-Trascendencia de las fallas en Ingeniería.

Las fallas en conjuntos pétreos, establecen a menudo discontinuidad en la ubicación de las obras, independientemente de cuales sean los rumbos y la pendiente de la roca. La búsqueda de las fallas no siempre es eficaz y como consecuencia no es raro que se pongan de manifiesto, a veces, durante el período de construcción. Las fallas pueden permanecer ocultas hasta profundidades considerables y si el piso de la excavación aparece recortado por pequeñas fallas que contienen roca en estado de polvo o de brecha, lo más aconsejable en la mayor parte de los casos desde los puntos de vista técnico y económico es abandonar la localización. En otros casos, si se presenta una falla cuando el fondo de la excavación ha alcanzado el nivel más profundo del proyecto, se podría a pesar de todo, utilizar el lugar eliminando una gran parte de la roca fallada, aunque evidentemente con considerable aumento en el costo.

TERCER CAPITULO.

III.- INVESTIGACION GEOLOGICA.

3.1.-Generalidades.

Las presas dependen de las condiciones de los alrededores, - particularmente de la geología del sitio y en éste caso se debe - realizar una investigación geológica detallada, la cual consta de las siguientes partes:

- a) Levantamiento geológico superficial.
- b) Métodos geofísicos.
- c) Perforaciones directas o sondeos.
- d) Socavones de exploración.
- e) Mapa geológico del sitio.

3.2.-Levantamiento geológico superficial.

En los 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, plegamientos y observar el intemperismo de las rocas, - en fin, analizar todas aquellas características que interesen para el proyecto.

Tanto los geólogos como los ingenieros encargados del proyecto deben discutir las campañas de exploración que deben realizarse para verificar el corte geológico de la boquilla y lugares de las obras complementarias, y los estudios para determinar las propiedades mecánicas de las rocas, permeabilidad, fracturamiento, - intemperismo, etc.. Conviene desarrollar el trabajo en dos etapas.

La primera etapa contiene el mínimo de exploraciones necesarias para conocer los aspectos fundamentales de las formaciones que se encuentren en el sitio: la segunda etapa complementa la información y verifica ciertos aspectos dudosos o debatibles descubiertos en la etapa anterior. Por esta razón, mientras la primera etapa es relativamente rígida en su planteamiento, la segunda esta sujeta a los resultados que se vayan obteniendo.

El objeto de esta subdivisión de los estudios es evitar gastos innecesarios si la primera exploración demuestra que en el lugar existen condiciones desfavorables no previstas en el reconocimiento superficial.

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 ciertos pro-

problemas no previstos por los estudios.

3.3.-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 el fondo del río. Como esta velocidad es función de las propiedades elásticas y del peso volumétrico de los materiales que atraviesa (rocas ígneas, sedimentarias, rellenos, etc) es posible tener una idea de la estratigrafía del sitio y de la presencia de fallas. Otro de los procedimientos se basa en las desviaciones de la gravedad en el lugar. Ambos son relativamente económicos y permiten hacer estimaciones en grandes áreas. Complementados con sondeos pueden ser de gran utilidad.

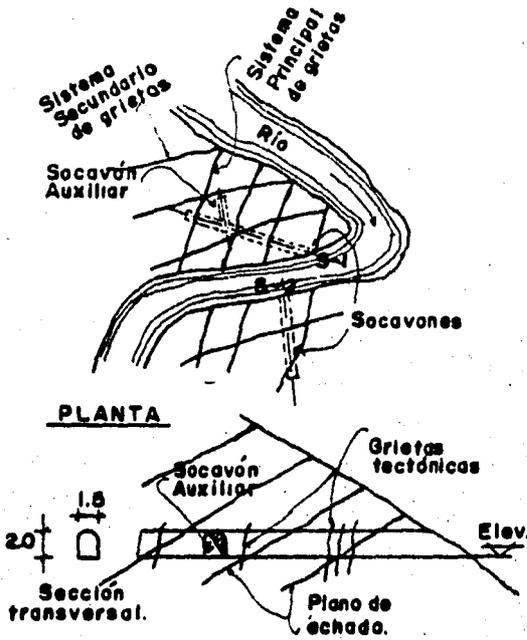
A continuación se mencionan los métodos geofísicos más importantes:

- a) Sísmico.
- b) De resistencia eléctrica.
- c) Magnético y gravimétrico.

3.4.-Socavones de exploración.

Es un tipo de exploración que penetra en las laderas de la boquilla, excavando un túnel pequeño; por ejemplo, de 1.5 m de ancho por 2 m de alto (fig.1). El objeto es: determinar el tipo de formación, fracturamiento, existencia de fallas, etc.; obtener muestras de las rocas para ensayarlas en el laboratorio; y realizar pruebas de campo con el fin de conocer la permeabilidad y la compresibilidad de la roca.

El número de socavones, su localización y profundidad dependen de la geología. Son exploraciones costosas: requieren equipos



CORTE SOCAVON S-1

FIG.1.- SOCAVONES

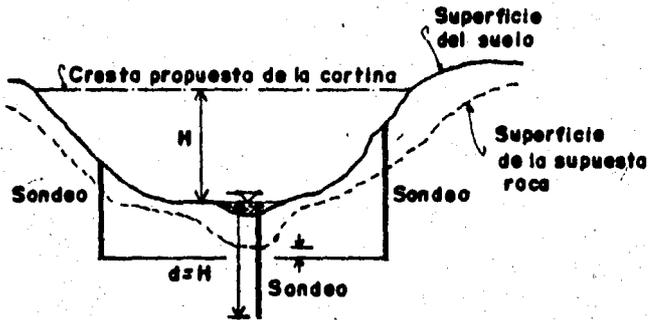


FIG.2.- SONDEOS.

simples de barrenación y explosivos; la extracción de los materiales se hace en general a mano; en ciertos casos, y particularmente a la entrada, es necesario colocar ademu, deben lavarse las paredes y el techo para inspeccionar debidamente la roca.

En estos socavones, el geólogo hace el levantamiento de grietas, determina rumbos y echados, observa los rellenos de dichas grietas y previa referencia a los bancos topográficos, establece correlaciones dibujando el plano geológico de la boquilla.

3.5.-Perforaciones directas o sondeos.

La información proporcionada por los socavones puede ser suficiente en ciertos casos, dadas las condiciones geológicas de el lugar. Pero en la mayoría de los casos es necesario ampliar la investigación a zonas que no son accesibles, o bien, muy costosas - las exploraciones por túnel. En estos casos se hacen perforaciones (fig.2), extrayendo corazones de la roca. Los equipos son rotatorios, los hay de muy diversas características y capacidades. Operan con brocas de diamante o de acero al tungsteno y agua inyectada a presión. En la tabla siguiente se indican los tamaños usuales para este tipo de trabajo.

Broca	Diámetro aproximado del agujero en pulgs.	Diámetro aproximado corazón en pulgs.
EX	1 1/2	7/8
Ax	1 7/8	1 1/8
8X	2 3/8	1 5/8
MX	3	2 1/8

Estas perforaciones se utilizan para realizar determinaciones de la permeabilidad, sondeos eléctricos y en algunos casos -

fotografiar grietas o contactos con cámaras especiales.

El número, localización, dirección e inclinación, profundidad y diámetro de las perforación, dependen del tipo de formación geológica, la disposición de las fracturas y el objeto que se persigue. No se pueden establecer criterios generales, pues cada caso es diferente. La norma es seguir de cerca los resultados que se van obteniendo y proponer modificaciones al programa. Esto es particularmente aplicable en la segunda fase de la exploración.

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 rotatorias, ademandando el pozo; pero en otros casos es adecuado el equipo que trabaja por percusión, geofísico, sísmico o eléctrico. Las muestras que se extraen distan mucho de proporcionar una correcta idea de la composición de el depósito. 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 trincheras 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".

Los tipos principales de sondeo que se usan para fines de muestreo y conocimiento del subsuelo, en general, son los siguientes:

- a) Pozos a cielo abierto, con muestreo alterado o inalterado.
- b) Perforaciones con posteadora, barrenos helicoidales o mé-

todos similares.

- c) Métodos de lavado.
- d) Método de penetración estándar.
- e) Método de penetración cónica.
- f) Perforaciones en boleas y gravas (con barretones, etc.).

Métodos de sondeo definitivo:

- a) Pozos a cielo abierto con muestreo inalterado.
- b) Métodos con tubo de pared delgada.
- c) Métodos rotatorios para roca.

3.6.-Mapa geológico del sitio.

Con los datos proporcionados por las exploraciones y las observaciones en la superficie, se construye el plano y las secciones transversales del levantamiento geológico. Los resultados se discuten y la conclusión puede ser:

a) Aceptación del sitio estudiado con recomendaciones específicas sobre la cimentación de las estructuras, los métodos de excavación y la necesidad de anclar, inyectado o drenes.

b) Los problemas que presenta la boquilla son de tal magnitud que aconsejable analizar otras alternativas.

c) El tramo del río estudiado es inaceptable para construir la presa.

La información contenida en los planos geológicos debe complementarse con observaciones que se realicen durante el periodo de construcción. Esto no sólo es necesario para anticipar en esa fase del trabajo problemas no previstos por la investigación, --- también para ganar experiencia aplicable a investigaciones futuras.

3.7.-Mapa geológico de la República.

La figura 3 es una reproducción simplificada del mapa geológico de México, elaborado por el Instituto de Geología, U.N.A.M.. Este plano, aunque muy generalizado, es de gran utilidad al ingeniero pues le permite conocer a grandes rasgos el tipo y edad de las rocas en la región objeto de estudio.



FIG. 8

CUARTO CAPITULO.

IV.-INVESTIGACION GEOTECNICA, PRUEBAS DE CAMPO.

4.1.-Generalidades.

Dada la importancia que tiene la permeabilidad de la roca en obras hidráulicas, las pruebas de absorción de agua se han convertido en determinaciones aceptadas en los sondeos geológicos y que son recomendables realizar de modo sistemático, por lo menos en cierto número de perforaciones, a fin de estudiar los problemas de circulación de agua que pueden presentarse a través de la cimentación de la cortina de la presa y en las estructuras auxiliares.

Los ensayos de permeabilidad en el laboratorio tienen muchas limitaciones. El espécimen que se lleva al laboratorio es muy pequeño y aparte de esto, tanto la masa rocosa como los depósitos de aluvión son, en general, heterogéneos de tal modo que las pruebas de laboratorio darán una información puntual casi imposible de interpretar. El ingeniero estará siempre interesado en conocer

la permeabilidad de la masa de roca o del depósito de aluvión en el sitio de la obra, es decir, la permeabilidad a escala de la obra.

En la mayoría de las cimentaciones o empotramientos formados por rocas la permeabilidad es consecuencia de su fracturamiento o disolución. Sin embargo, ciertas areniscas, tobas y conglomerados tienen una permeabilidad de despreciable. Por tanto, es importante determinar el gasto de filtración a través de las fisuras de una masa rocosa, variando la magnitud de la presión aplicada. Los ensayos de campo que permiten llevar a cabo esta determinación -- son la prueba Lugeon y la prueba Lefranc.

1.2.-Prueba tipo Lugeon.

Es una prueba de inyección de agua a presión en los tramos de una perforación, con la finalidad de formarse una idea de la permeabilidad de una masa de roca fisurada y por debajo del nivel freático. Esta prueba se ejecuta en sondeos de exploración geológica. Es un ensayo simple que sólo aporta una indicación cualitativa. Su interpretación cuantitativa es difícil e incierta.

La longitud de los tramos probados y las presiones de inyección son variables. La llamada unidad Lugeon se evalúa mediante la absorción en litros de agua por metro de sondeo y por minuto, bajo una presión de 10 kg/cm^2 . Se puede considerar que 1 unidad Lugeon equivale a un coeficiente de permeabilidad del orden de 1 a $2 \times 10^{-7} \text{ m/seg}$.

A continuación se señala la influencia que sobre los resultados tienen; la longitud de los tramos, las presiones de inyección y el tiempo de estabilización.

4.2.1.-Longitud de los tramos.

La longitud de los tramos de prueba debe adaptarse a la naturaleza del terreno. Se acostumbra realizar la prueba en tramos de 5 m, pero por ejemplo, en un terreno estratificado con estratos de permeabilidad muy variable y espesor menor de 5 m, es conveniente reducir la longitud de los tramos. Esta reducción sólo puede programarse después de efectuada la perforación y la clasificación de las muestras de roca recuperada.

Es aconsejable reducir los tramos de prueba a 1 m o menos en profundidades donde se notó pérdida de agua en la perforación.

Cuando la masa de roca es homogénea se aconseja comenzar con tramos de prueba de 5 m. Si la roca es fisurada y se mantiene la longitud de 5 m, no es posible formarse una idea precisa de la fisuración de la roca.

4.2.2.-Presiones de inyección.

La secuencia de presiones de inyección aplicadas en la prueba es la siguiente: 1, 2, 4, 6, 8, 10, 8, 6, 4, 2, 1 kg/cm². La curva de gastos de absorción se obtiene en función de las presiones aplicadas.

La presión efectiva que se toma en cuenta, es la del manómetro menos las pérdidas en la tubería y corregida por la altura del nivel freático.

4.2.3.-Tiempo de estabilización.

Cada incremento de presión debe ser mantenido de 5 a 10 minutos para que el flujo de agua que penetra al terreno se estabilice. El gasto que absorbe en cada incremento de presión debe mantenerse constante durante la medición.

4.2.4.-Equipo y materiales necesarios.

El equipo y materiales necesarios para realizar una prueba - tipo Lugeon es el siguiente:

-Un obturador o empaque y su tubo de inyección integrado (- fig. 1).

-Una bomba.

-Un medidor de gastos de agua.

-Un cronómetro.

-Uno o varios manómetros.

-Agua.

-Herramientas varias.

4.2.5.-Ejecución de la prueba.

El esquema general del montaje de la prueba Lugeon se muestra en las figuras 2 y 3.

El primer paso para la ejecución de la prueba, una vez que a sido instalado el obturador en el sitio apropiado, es hacer pasar agua y observar si sube por la perforación. Si el agua sube, puede ser debido a una o ambas de las siguientes causas:

-La perforación es irregular y el empaque no ajusta.

-El terreno está muy fisurado y se forma un corto circuito, pasando el agua por el terreno y volviendo a salir a la perforación a un nivel más cercano a la superficie del terreno.

En el primer caso se debe desplazar el obturador hasta lograr un mejor ajuste. Cuanto mayor sea la longitud del empaque, mayor sera la eficiencia de la obturación. Por esto, se recomienda utilizar un obturador no menor de 1 m.

Si se forma un corto circuito alrededor del empaque, resulta

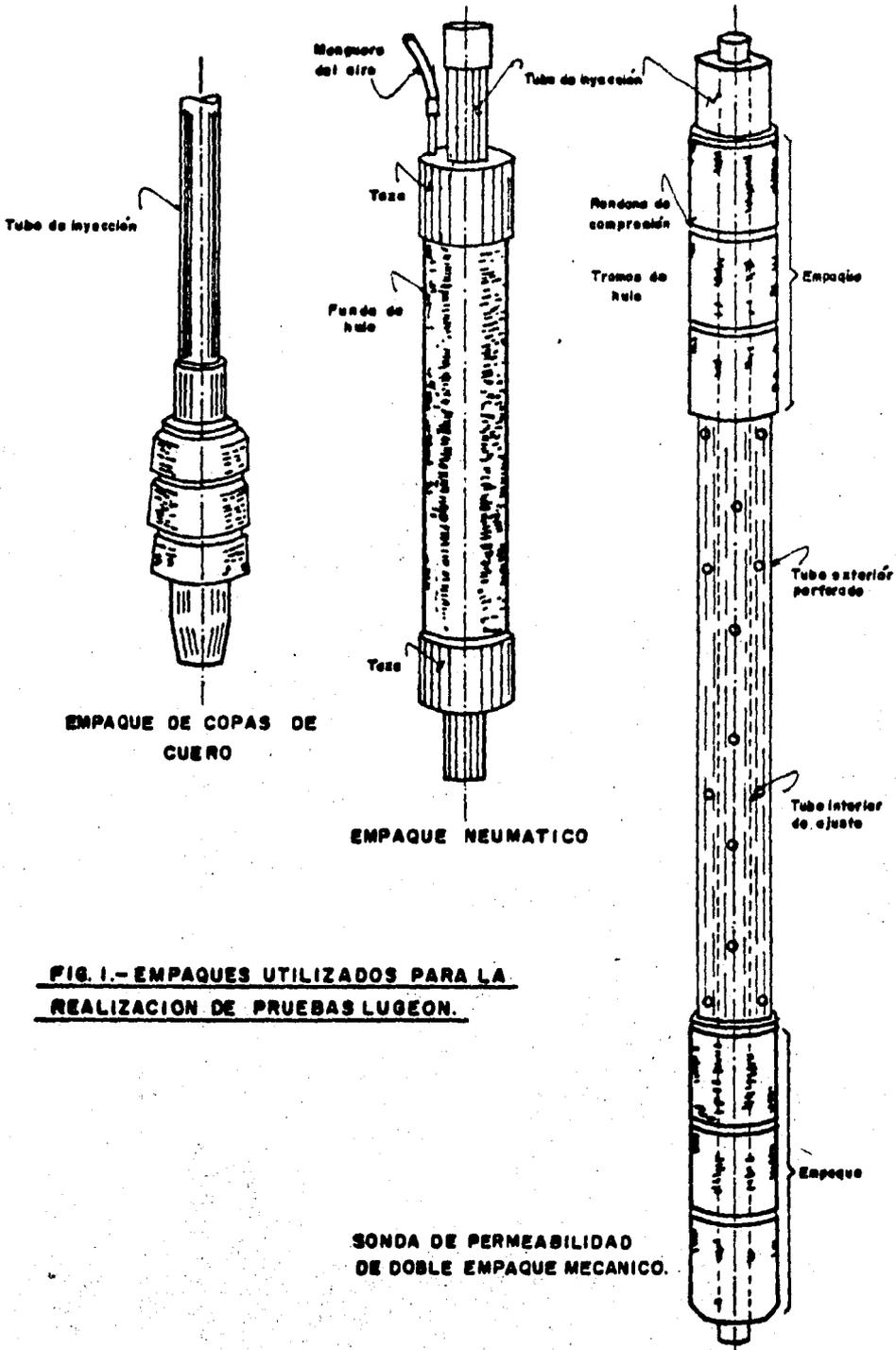


FIG. 1.- EMPAQUES UTILIZADOS PARA LA REALIZACION DE PRUEBAS LUGEON.

SONDA DE PERMEABILIDAD DE DOBLE EMPAQUE MECANICO.

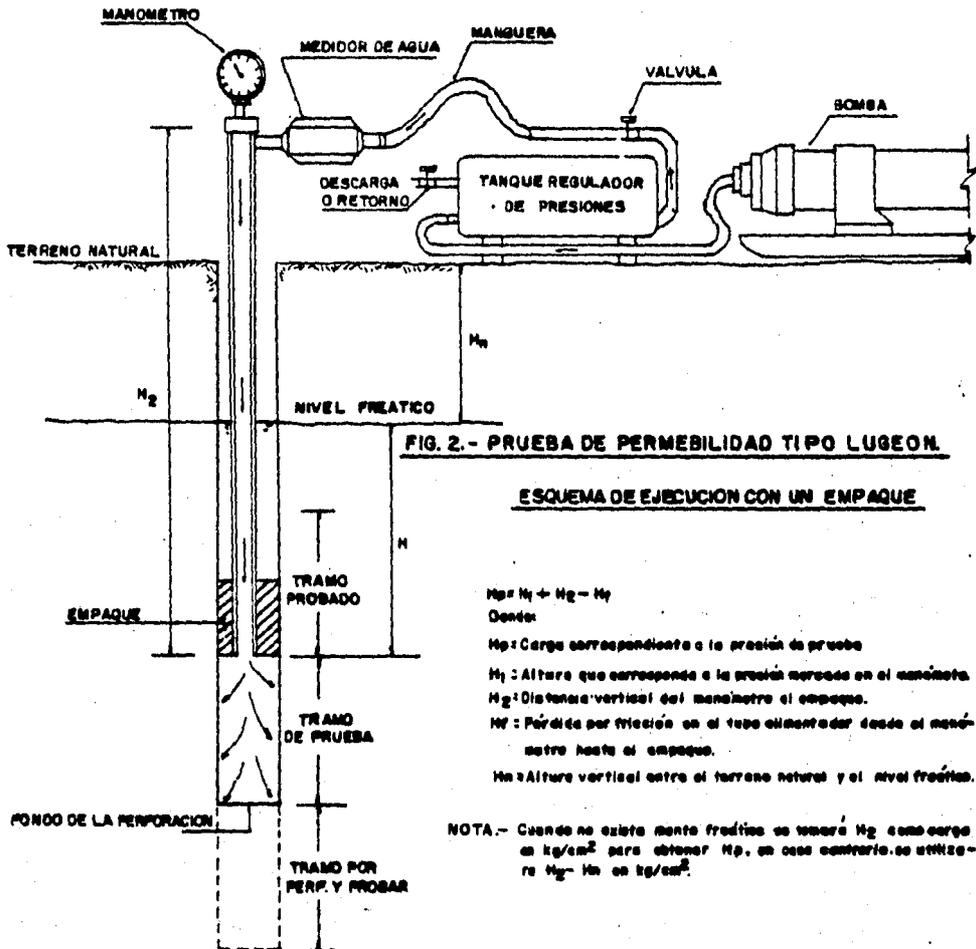


FIG. 2.- PRUEBA DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON.

ESQUEMA DE EJECUCION CON UN EMPAQUE

$H_p = H_1 + H_2 - H_f$

Donde:

H_p : Carga correspondiente a la presión de prueba

H_1 : Altura que corresponde a la presión marcada en el manómetro.

H_2 : Distancia vertical del manómetro al empaque.

H_f : Pérdida por fricción en el tubo elevador desde el manómetro hasta el empaque.

H_n : Altura vertical entre el terreno natural y el nivel freático.

NOTA.- Cuando no exista nivel freático se toma H_2 como carga en kg/cm^2 para obtener H_p , en caso contrario se utiliza $H_p = H_n$ en kg/cm^2 .

PERDIDA DE CARGA POR FRICCIÓN POR METRO DE PROF. $\text{kg/cm}^2/\text{m}$.

Q lit./min.	65 0.0184	70 0.0211	75 0.0242	80 0.0278	85 0.0312	90 0.0350	95 0.0389	100 0.0440
Q lit./min.	108 0.0480	110 0.0520	118 0.0571	120 0.0637	128 0.0688	130 0.0732	138 0.0795	140 0.0839
Q lit./min.	145 0.0898	150 0.0968	158 0.1028	160 0.1098	168 0.1170	170 0.1240	178 0.1313	180 0.1382
Q lit./min.	185 0.1468	190 0.1547	195 0.1633	200 0.1718	208 0.1803	210 0.1890	218 0.2080	220 0.2160
Q lit./min.	225 0.2240	230 0.2330	238 0.2460	240 0.2560	245 0.2660	250 0.2760	258 0.2880	260 0.3000
Q lit./min.	268 0.3118	270 0.3230	278 0.3300	280 0.3400	288 0.3520	290 0.3630	298 0.3758	300 0.3810

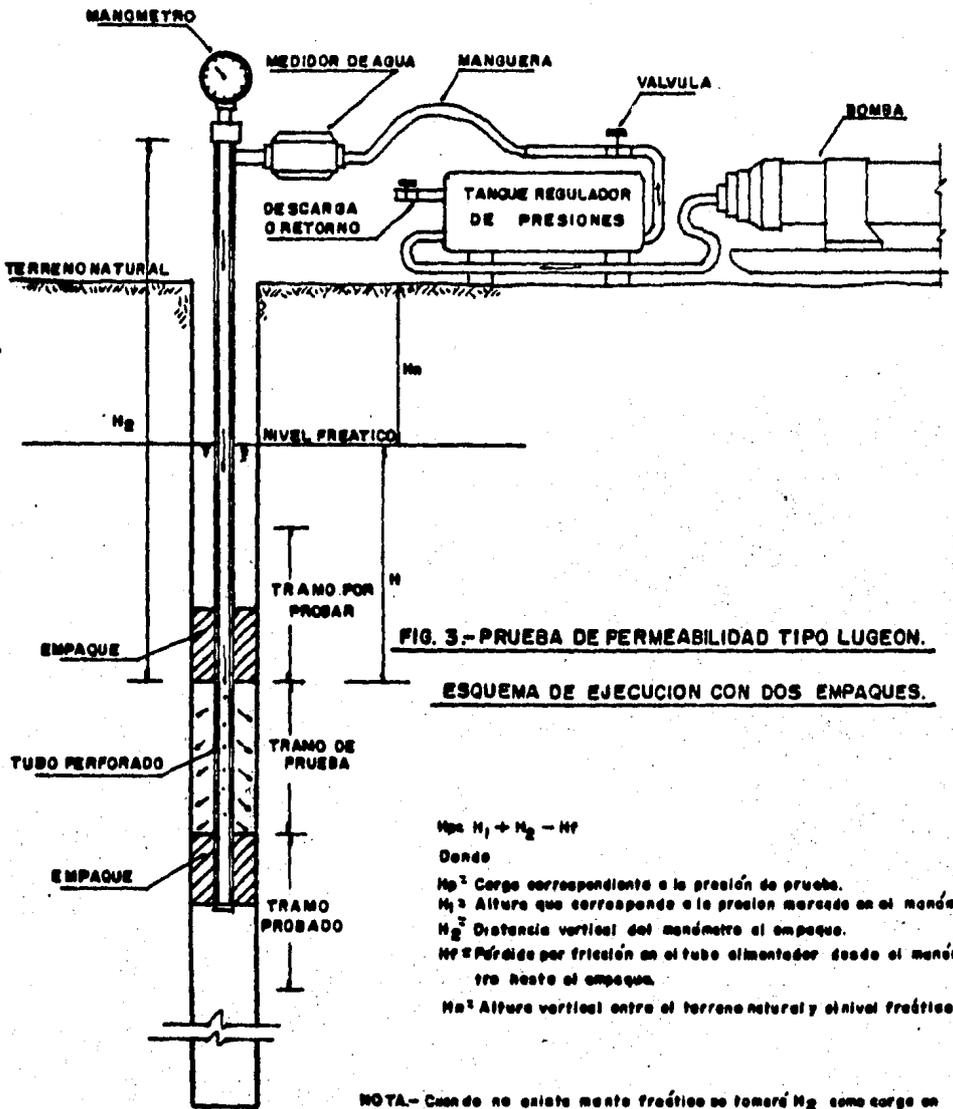


FIG. 3.- PRUEBA DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON.

ESQUEMA DE EJECUCION CON DOS EMPAQUES.

$$H_p = H_1 + H_2 - H_f$$

Donde

H_p = Carga correspondiente a la presión de prueba.

H_1 = Altura que corresponde a la presión marcada en el manómetro.

H_2 = Distancia vertical del manómetro al empaque.

H_f = Pérdida por fricción en el tubo alimentador desde el manómetro hasta el empaque.

H_3 = Altura vertical entre el terreno natural y el nivel freático.

NOTA- Cuando no exista nivel freático se tomará H_2 como carga en kg/cm^2 para obtener H_p , en caso contrario se utilizará $H_2 - H_3$ en kg/cm^2 .

difícil la realización correcta de la prueba. Una solución sería cementar el pozo, pero en tal caso, los costos y el tiempo necesario para efectuar la prueba aumentan considerablemente, por lo cual es recomendable llevar a cabo, si el terreno está saturado, la prueba tipo Lefranc.

Cuando se logra sellar el tramo por probar se inicia la aplicación de los incrementos de presión y las lecturas de los gastos inyectados.

La presión efectiva de prueba es:

$$H_p = H_1 + H_2 - H_f$$

donde:

H_p = Carga correspondiente a la presión de la prueba.

H_1 = Altura que corresponde a la presión marcada en el manómetro.

H_2 = Distancia vertical del manómetro al empaque.

H_f = Pérdidas por fricción en el tubo alimentador desde el manómetro hasta el empaque.

Cuando no exista manto freático se tomara H_2 como carga en kg/cm^2 para obtener H_p , en caso contrario se utilizara $H_2 - H_n$ en kg/cm^2 .

4.2.6.- Interpretación de la prueba.

La forma de las curvas de gastos de absorción en función de la presión de inyección es muy variable. Salvo en contados casos no es lineal. En la figura 4 se presentan varios casos típicos. Como no es lineal la relación entre los gastos y presiones, resulta inadmisibles extrapolar los datos obtenidos; es frecuente que, por limitaciones en la bomba no se alcance la presión de 10 kg/cm^2

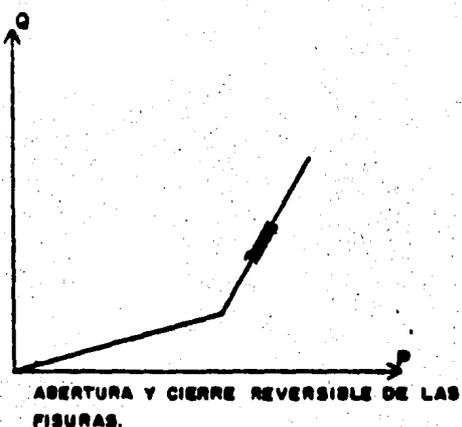
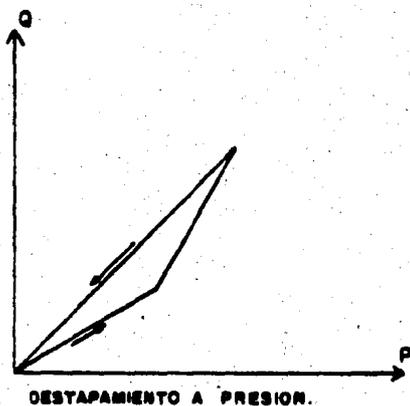
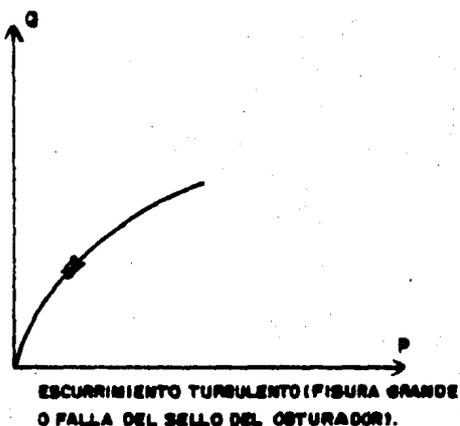
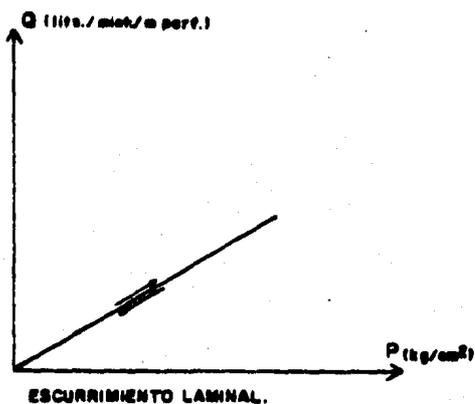


FIG. 4.-PRUEBAS LUGEON. GASTO DE ABSORCION VS. PRESION DE INYECCION.

e ingenuamente se proporcionen absorciones extrapoladas, esto es incorrecto. En la figura 5 se presenta una forma de registro de la prueba tipo Lugeon.

En general, la prueba Lugeon es importante en la aplicación de inyecciones de lechadas de cemento en el tratamiento de macizos rocosos, ya que por medio de las unidades Lugeon calculadas se estima la permeabilidad de la roca.

El Ing. Cambefort recomienda lo siguiente:

"Con cantidades inferiores a una unidad Lugeon podemos considerar que la inyección resulta innecesaria. El criterio Lugeon es adecuado para ser aplicado en presas de más de 30 m de altura. -- Por debajo de esta altura, se puede establecer como límite de permeabilidad el inferior a 3 unidades Lugeon".

4.3.-Prueba tipo Lefranc.

Está es una prueba destinada a medir con cierta precisión el coeficiente de permeabilidad en un punto de un terreno aluvial o de una roca muy fisurada, cuando existe una capa freática que satura el terreno.

Consiste en la inyección de agua en un terreno saturado a través de una cavidad y bajo una carga hidrostática pequeña y rigurosamente constante. Los valores del gasto y de la carga hidrostática permite calcular el coeficiente de permeabilidad con una buena aproximación.

En estas condiciones, si Q es el gasto inyectado y ΔH la carga hidrostática aplicada, se tiene:

$$Q = CK\Delta H$$

donde:

PRUEBA DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON

REGISTRO DE CAMPO

BOQUILLA O PRESA DE _____ RIO _____ EDO. DE _____
 POZO No. _____ TRAMO DE _____ EST. _____ ELEV. _____

						PRUEBA H ₂						
MEDIDOR AGUA LECTURAS	TIEMPO	GASTO Q	MANOMET N ₁	COLUMNA N ₂	FRICCION N _f		MANOMET N ₁	COLUMNA N ₂	FRICCION N _f	MEDIDOR AGUA LECTURAS	TIEMPO	GASTO Q
Litros	Minutos	lit/min	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	Litros	Minutos	lit/min	
FINAL _____						A			FINAL _____			
INICIAL _____									INICIAL _____			
V/ TRAMO _____						D			V/ TRAMO _____			
FINAL _____						A			FINAL _____			
INICIAL _____									INICIAL _____			
V/ TRAMO _____						D			V/ TRAMO _____			
FINAL _____						A			FINAL _____			
INICIAL _____									INICIAL _____			
V/ TRAMO _____						D			V/ TRAMO _____			
FINAL _____						A			FINAL _____			
INICIAL _____									INICIAL _____			
V/ TRAMO _____						D			V/ TRAMO _____			
FINAL _____						A			FINAL _____			
INICIAL _____									INICIAL _____			
V/ TRAMO _____						D			V/ TRAMO _____			
FINAL _____						A			FINAL _____			
INICIAL _____									INICIAL _____			
V/ TRAMO _____						D			V/ TRAMO _____			
						A						
						D						

Altera del manómetro desde el T.R. _____ P° = _____ Prof del manto freático _____ M.P. = _____ Longitud del tramo _____ L° = _____ Diámetro de la perforación _____ D° = _____ Profundidad del empaque _____ P° = _____	
---	--

FIGURA 6

K es el coeficiente de permeabilidad.

C es un coeficiente que tiene dimensión igual a una longitud que caracteriza geoméricamente la prueba (forma de la cavidad, - distancia al nivel freático o a una capa impermeable, etc.).

Normalmente el valor de C se calcula de la siguiente manera (ver fig. 5):

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

donde:

L es la longitud del tramo probado.

r es el radio de la perforación.

H es igual a la profundidad del tramo probado con respecto - al nivel freático.

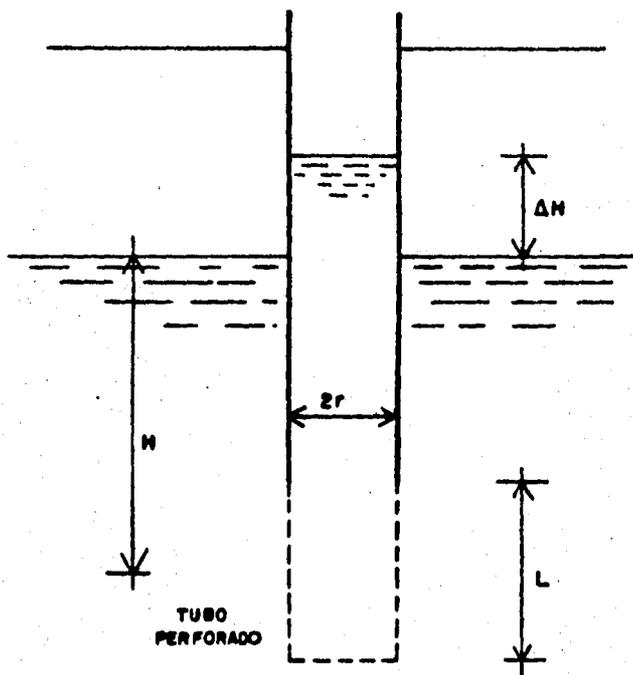
4.3.1.-Limitaciones del método.

Se pueden tener reservas sobre la interpretación matemática de la prueba, sin embargo, las hipótesis simplificatorias realizadas no conducen a errores importantes si la cavidad es pequeña en relación a su distancia a la superficie libre del terreno y si la carga es igualmente pequeña en relación con esa misma distancia. Además es una hipótesis fundamental que el flujo sea permanente - en un material saturado.

El método proporciona coeficientes de permeabilidad casi puntuales, por lo tanto, la heterogeneidad local influenciará la medición de una manera importante.

Por otra parte, los elementos finos del terreno pueden concentrarse en las paredes de la cavidad, de tal modo que el coeficiente de permeabilidad medido sea muy inferior al real.

$$Q = C \cdot K \cdot \Delta H$$



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

FIG. 6.- ELEMENTOS DE UNA PRUEBA TIPO LEFRANC.

4.3.2.-Medición del gasto.

En la prueba Lefranc se requiere la inyección de un gasto rigurosamente constante. El gasto se obtiene, en general, con la ayuda de un tanque de nivel constante a través de un orificio que regule el gasto. El tipo más simple de nivel constante consiste en un depósito lleno que es alimentado con un gasto superior al gasto de inyección.(fig. 7).

Un rebosadero permite mantener el nivel del depósito constante. La medición del gasto es más delicada. Se puede medir con un contador, pero estos aparatos tienen el inconveniente de su imprecisión a muy bajas cargas. Se puede medir el gasto al terminar la prueba, pasando el gasto de la perforación a un recipiente de volumen conocido y medir el tiempo necesario para su llenado. En la figura 7 se muestra la forma de medir el gasto si variar las condiciones hidráulicas del flujo.

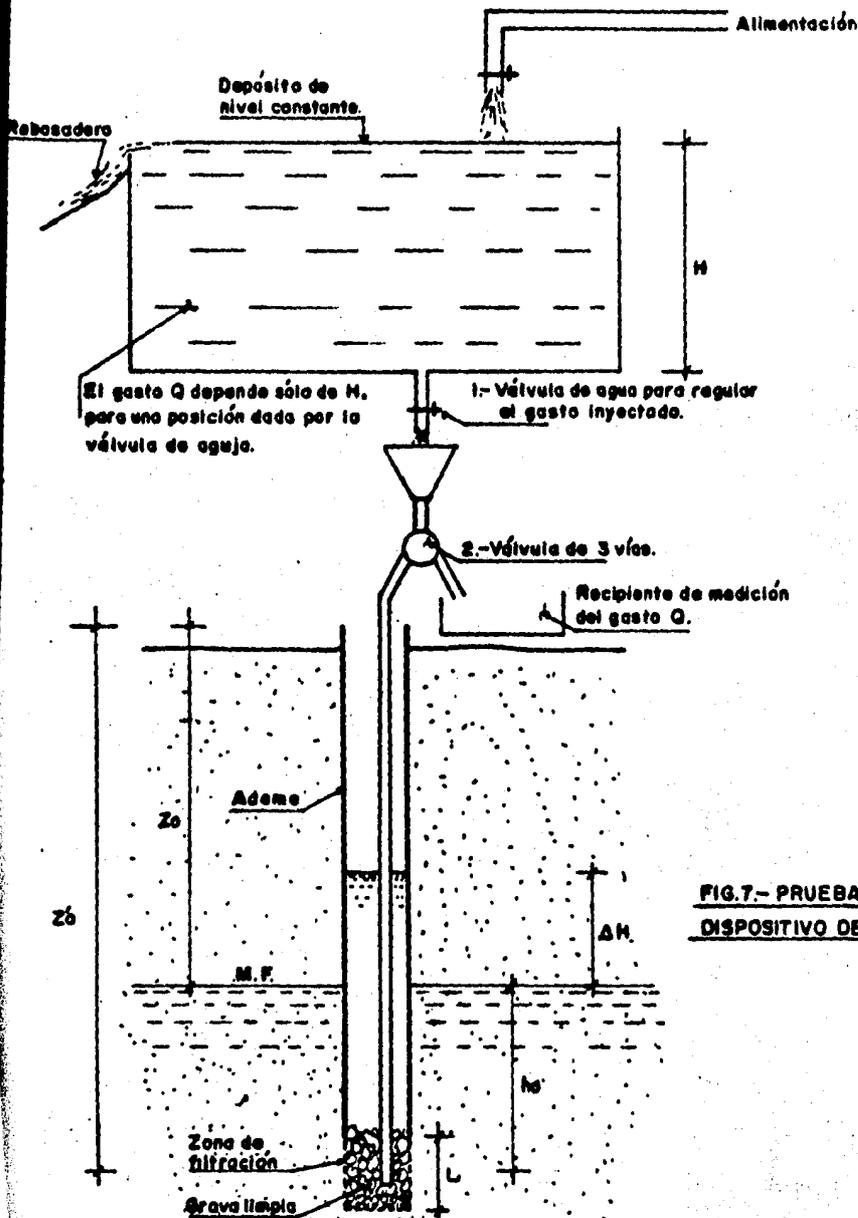
4.3.3.-Medición del nivel de agua en la perforación.

El procedimiento más frecuente es el de las sondas eléctricas. Estas constan de dos alambres de cobre aislados en toda su longitud, salvo en los extremos. Cuando estos extremos hacen contacto con el agua, la corriente pasa a través del agua y se registra en un amperímetro.

4.3.4.-Equipo necesario.

El equipo necesario para efectuar una prueba Lefranc es el siguiente:

- Una bomba.
- Un recipiente elevado con rebosadero.
- Una válvula de aguja.



**FIG.7.- PRUEBA LEFRANC.
DISPOSITIVO DE ENSAYE.**

-Un embudo al cual se le adapta una válvula de tres pasos.

-Tubería.

-Un recipiente de volumen conocido.

-Un cronómetro.

-Una sonda eléctrica.

-Un amperímetro.

-Herramientas diversas.

4.3.5.-Ejecución de la prueba.

La prueba LeFranc se puede efectuar en terrenos aluviales y en roca muy fracturada localizados bajo el nivel freático. El problema esencial que se plantea en la ejecución de esta prueba es el de asegurar la estabilidad de la perforación en la cavidad que se ha de crear en el terreno.

La estabilización de las paredes de la perforación se efectúa mediante un ademe. Queda descartado el uso de lodos bentoníticos para la estabilización de la perforación. Al llegar el ademe a la profundidad deseada, se rellena con grava limpia de muy alta permeabilidad (por ejemplo, grava uniforme de 1") una longitud igual a la deseada para la prueba, por lo general es de 1 m. Posteriormente se levanta el ademe un metro, quedando la perforación lista para realizar la prueba.

La prueba se realiza de la manera siguiente, de acuerdo con el esquema que se presenta en la figura 7.

1.-Se mide el nivel freático de la perforación.

2.-Se pone en marcha la bomba que alimenta el tanque elevado con rebosadero.

3.-Cuando dicho recipiente derrama agua se abre la válvula -

del orificio inferior del recipiente con la válvula de tres pasos conectada a la perforación.

4.-Se mide la variación del nivel de agua en el pozo H1 con respecto al tiempo.

5.-Cuando el nivel de agua queda estable durante 10 minutos, se anota el nivel estabilizador H1.

6.-La válvula de tres pasos se conecta con el recipiente de volumen conocido y se mide y anota el tiempo necesario para llenarlo.

En el mismo punto se realiza la prueba variando los gastos inyectados y midiendo los respectivos niveles estabilizados del agua en la perforación.

4.3.6.-Registro e interpretación de los datos.

Los datos que se deben anotar son:

-Nivel freático.

-Niveles estabilizados del agua en la perforación.

-Gastos inyectados.

-Diámetro de la cavidad.

-Longitud de la cavidad o tramo de prueba.

Es preciso señalar que el nivel freático, que se mide al terminar de perforar un tramo, no debe confundirse con el nivel del agua dentro de la perforación. Para asegurarse que se está midiendo realmente el nivel freático es preciso tomar lecturas a distintos tiempos y comprobar que estas condiciones resultan idénticas. En caso contrario, resulta necesario esperar antes de empezar la prueba, la estabilización del agua dentro de la perforación.

En la figura 8 se presenta una forma de registro de la prueba

ba Lefranc. La interpretación de los datos se hace con base en la fórmula siguiente:

$$Q = CK\Delta H$$

En el caso más frecuente, la prueba se realiza con un tramo perforado de longitud L y radio r , y el coeficiente C es igual a:

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

Siendo H la profundidad del tramo probado con respecto al nivel freático. Aplicando las dos formulas anteriores se obtiene el coeficiente de permeabilidad del tramo probado.

QUINTO CAPITULO.

V. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE INYECCIONES.

5.1.-Objetivo.

De acuerdo con el objeto que se persigue las inyecciones se clasifican en:

- de sellado
- de consolidación

Con las primeras se intenta llenar las grietas, los conductos de disolución o los huecos mayores de un aluvión, según sea el caso. La finalidad de la segunda es disminuir la compresibilidad de la roca, al mismo tiempo que la permeabilidad, llenando fisuras de la roca con una mezcla resistente, aplicada a alta presión. A fin de rellenar los huecos entre estructura y roca, por ejemplo entre revestimiento y tapones de túneles, se recurre a las llamadas inyecciones de contacto.

Los medios inyectables, son de dos tipos de materiales que interesa tratar: la roca y los depósitos de aluvión. Los defectos

en las rocas son fisuras o conductos de disolución; en general, - la permeabilidad intrínseca de la masa ígnea, sedimentaria o metamórfica es muy baja. Los depósitos de grava y arena tienen una porosidad elevada por los vacíos que dejan entre sí las partículas sólidas. La estructura que forman es muy variable en la naturaleza; la heterogeneidad es su característica distintiva.

El proceso de inyectado durante la construcción, abarca tres fases esenciales:

-Perforaciones para el inyectado.

-Mezcla de los ingredientes de la lechada.

-Bombeo de la misma en la masa de roca fracturada a través de los hoyos barrenados.

El proceso de diseño también incluye el programa de la pantalla en términos de: profundidad, diámetro y espaciamiento de las perforaciones, una sola línea o varias, tipos de lechadas, secuencia del barrenado e inyectado; tipos de progresiones ascendentes o descendentes y otros.

5.2.-Diseño de la pantalla impermeable.

El diseño de la pantalla impermeable no es un procedimiento riguroso, sino una selección casi arbitraria de un trazado geométrico de la extensión de la misma, profundidad de las perforaciones y su espaciamiento, y número de líneas de inyectado. Sin embargo, lo anterior solamente podrá resolverse después que se hayan hecho consideraciones sobre la forma del cauce, tipo de cortina, la carga hidrostática, los detalles de la geología del sitio, las posibilidades de filtración o tubificación y las consecuencias de ello.

5.2.1.-Profundidad del inyectado y diámetro de la perforación.

La profundidad de la pantalla impermeable es una función de la carga hidrostática y de la calidad de la roca. Por esta razón, la práctica recomendable es aumentar los datos geológicos y de permeabilidad obtenidos durante la fase de exploración, con los obtenidos de los primeros pozos de inyectado, hechos durante la construcción. Estos pozos iniciales son conocidos como perforaciones para inyectado y exploración.

En base a los resultados obtenidos de estos pozos exploratorios-inyectados y de las exploraciones originales, se seleccionan las profundidades apropiadas para los pozos primarios o de la primera etapa de la pantalla impermeable.

La profundidad seleccionada normalmente puede estar dentro del rango de $1/3 H$ a $2/3 H$, con una profundidad mínima indicada en las especificaciones. Para algunas situaciones geológicas y topográficas puede ser deseable perforar la pantalla impermeable más profunda en los empotramientos. En tales casos, pueden ser excavadas en cada ladera 2 ó 3 galerías de inyectado a diversas profundidades.

Generalmente los pozos para inyectado son de 3.81 cm (1.5 pulg.) de diámetro (calibre EX) y deben limpiarse con agua a presión.

5.2.1.1.-Ejecución de las perforaciones y lavado del barrero.

Las perforaciones se ejecutan sin interrupción en toda su longitud. Si durante el proceso de barrenación se presentan pérdi-

das de agua o caídos que impidan la continuación de la perforación, se procedera a sellar el barreno inyectando mezclas de cemento, con el obturador colocado un metro por arriba del punto donde se presentó la fuga de agua o caído hasta alcanzar la presión de rechazo especificada. Terminada la inyección se removerá el obturador y se lavara o reperforará el tramo, para continuar la perforación del barreno hasta su profundidad total.

El lavado del barreno consista en la limpieza de la perforación, utilizando agua y aire a presión, mediante la introducción en el barreno de un tubo cuyas boquillas o perforaciones estén orientadas en dirección perpendicular al eje del barreno. La presión deberá ser tal que permita la salida del material producto de la barrenación, de caídos de roca o material que se encuentre rellenando fracturas, hasta que el agua retorne limpia.

5.2.2.-Inyecciones progresivas en una o varias líneas.

La mayoría de los programas de impermeabilización se definen como un tipo de inyectado progresivo, donde se especifica un patrón básico de pozos para inyección con ciertos requerimientos mínimos. Por ejemplo, los pozos de inyección-exploratorios a 40 m de espaciamiento y los pozos de la primera etapa a 10 m de separación.

Los pozos secundarios de la segunda etapa, en espacios intermedios serían también requeridos, pero tal vez la profundidad sería menor.

Pozos terciarios intermedios; de la tercera etapa, pueden ser o no requeridos, dependiendo de la absorción de lechada en los primeros pozos y de los requerimientos especificados.

En algunos casos las especificaciones establecen que los pozos terciarios serán ejecutados dependiendo de las tomas de las progresiones de los pozos secundarios. Un método alterno sería formular las especificaciones de modo que se requieran pozos terciarios a ambos lados de cualquier pozo secundario que haya tomado en una o más progresiones un consumo de 50 a 100 kg de cemento/ml.

Las especificaciones pueden también permitir absorciones límites más grandes a mayores profundidades, pero pueden ser más restrictivas a profundidades cortas. La tabla I da, en función de la profundidad, algunas sugerencias de los límites superiores de absorción de lechadas para distintas progresiones de los pozos secundarios o de la segunda etapa, arriba de los cuales serían necesarios pozos terciarios o de la tercera etapa.

TABLA I

Límites máximos de absorción de lechada en función de la profundidad.

Progresiones en metros	Absorción de lechada en kg de cemento/ml de perforación.
0-10	25
10-20	35
20-30	50
30 +	100

Fuente: Deere U., Don CONTROL DE CAMPO DEL DIRECTADO DE LA CIMENTACION EN PRESAS.

Al aplicar el criterio, se deberá tomar en cuenta si sólo deben ser consideradas una o varias progresiones y también si hay -

sospechas de una falla o zona fracturada, lo cual podría merecer un tratamiento especial.

Cuando los pozos de la tercera etapa no llenan los criterios de la tabla I, se especificarán pozos de cuarta etapa a ambos lados, cuyas profundidades corresponden a las zonas que muestren tasas de lechadas mayores que los límites.

Las consideraciones anteriores se aplican a la pantalla de una sola línea. En ocasiones los diseñadores especificarán una pantalla de línea múltiple, particularmente cuando sea deseado tener una pantalla ancha para reducir el gradiente hidráulico y el paso de filtraciones.

Otra condición que amerita una pantalla de 3 líneas es la de una roca permeable con fracturas muy abiertas, donde se desea tener un buen sellado, pero limitando la absorción de lechada. Esto puede ser hecho impermeabilizando primero la línea de aguas abajo después la de aguas arriba y finalmente la línea central.

El sellado total no debe ser intentado en las dos líneas de afuera; pero se debe inyectar una primera, segunda y hasta tercera etapa. La línea central será inyectada hasta el rechazo usando segunda, tercera, cuarta y hasta quinta etapa si es necesario.

La inclinación de los barrenos depende del rumbo y echado del fracturamiento y en su caso de los planos de estratificación.

La pantalla de inyección suele quedar en un plano vertical, pero no es raro ni particularmente costoso inclinarlas cuando así convenga.

5.3.-Tipos de mezclas.

5.3.1.-Mezclas inestables y mezclas estables

Los productos inyectables son de 3 tipos:

-Suspensiones inestables.

-Suspensiones estables.

-Líquidos.

Aquí únicamente trataremos las suspensiones inestables y las suspensiones estables, ya que son los productos más utilizados en el inyectado. Las suspensiones inestables son lechadas de agua y cemento; la sedimentación en ellos ocurre cuando cesa la agitación. Las suspensiones estables son mezclas de arcilla, cemento y arena. Variando la dosificación de estos componentes y la intensidad de la agitación se logra que la suspensión no sedimente durante el proceso de inyección. A estas últimas mezclas se agregan otros productos químicos en pequeñas cantidades, para regular el fraguado o evitar contracciones.

Las fracturas de roca se tratan con lechadas inestables; las estables se emplean para los depósitos de aluvión grueso. La permeabilidad de suelos finos, como limos y arcillas es tan baja que no tiene objeto un tratamiento de este tipo.

Una mezcla inestable es comúnmente tomada como aquella que tenga más del 5 % de sedimentación. La mayoría de las lechadas agua-cemento son mezclas inestables, con la excepción de la mezcla 1:1 por volumen. Un valor bajo para la sedimentación puede también ser alcanzado agregando a las mezclas delgadas un pequeño porcentaje de bentonita.

Una mezcla más uniforme y estable resultará de aquella que mantenga sus características durante el bombeo y la penetración en la roca. También debe ser considerado el efecto de la bentoni-

ta en la viscosidad de la lechada y en la resistencia a la compresión de la mezcla endurecida.

Cuando las grietas que presenta la roca tienen aberturas variables entre un centímetro y varios decímetros, es usual el tratamiento preliminar a base de una suspensión estable, se controla la cantidad a inyectar con la presión. Después que esté producto a fraguado se reperforan los barrenos y se inyectan lechadas de cemento.

Las rocas fisuradas son tratadas con suspensiones inestables o sea mezclas de agua-cemento. La proporción de estos ingredientes es de gran importancia, pues si la relación agua-cemento es baja los sólidos se sedimentarán en forma rápida y obturan las entradas de las grietas en la perforación; cuando A/C es alta, la lechada penetra a grandes profundidades sin ningún objeto y puede provocar movimientos de la roca en la parte superior.

La inyección de mezclas inestables se suspende al alcanzar el rechazo, o sea, la presión máxima que ha sido especificada con base en el tipo de roca, fisuración y profundidad. Si la relación agua-cemento se escoge en forma adecuada, a gasto constante, la presión va creciendo paulatinamente hasta llegar al rechazo. Sin embargo, normalmente no ocurre así, pues es muy difícil seleccionar el valor de A/C correctamente, o bien, no es práctico variarlo con frecuencia durante el inyectado de un barreno.

5.3.2.-Relación agua-cemento en la inyección.

Para escoger la relación agua-cemento, Cambefort recomienda tomar como base el número de unidades Lugeon de la prueba de absorción de agua, previamente realizada en la perforación. La re-

gla que Cambefort sugiere como guía para la inyección es la siguiente:

De 1 a 2 Lugeon, comenzar el inyectado con $A/C = 8$ y llegar al rechazo con 4.

De 2 a 5 Lugeon, iniciar con $A/C = 8$, pasar a 4 y obtener el rechazo con 2, si esté no se alcanza con el anterior valor de A/C .

De 5 a 10 Lugeon, empezar el trabajo con $A/C = 4$, continuar con $A/C = 2$ y si el rechazo no ocurre, aumentar $A/C = 1$.

Cuando la absorción de agua es mayor que 10 Lugeon, es recomendable tratar previamente la roca con una suspensión estable.

5.3.3.-Propiedades reológicas de las mezclas.

Para usar correctamente las diversas mezclas en los diferentes tipos de suelos que requieren tratamiento, es necesario conocer reológicamente los morteros de inyección por medio de sus propiedades.

Sedimentación.- El grado de sedimentación que presenta cada lechada, proporciona indicaciones muy instructivas, debe tenerse en consideración que mientras mayor sea el volumen de agua libre que tenga una lechada, después de sedimentarse, mayor será el riesgo de "exprimirse".

La estabilidad de una mezcla depende del proceso de sedimentación que está tenga.

A medida que las lechadas son más estables, presenta características mejores de inyectabilidad, tanto para roca fisurada como para los aluviones.

Densidad.-La densidad de las mezclas que tienen el mismo ti-

po de fluidez, y están compuestas de materiales de clase similar (cemento-bentonita o cemento-arcilla) pero con diferente relación agua-sólidos, se puede decir que la resistencia a la compresión de ellas es proporcional a la densidad; es decir, a mayor densidad mayor resistencia, a menor densidad menor resistencia. Lo anterior es explicable, puesto que las lechadas menos densas proporcionan productos más porosos y por lo mismo menos resistentes. - También las densidades dan idea sobre el proporcionamiento de las lechadas, la prueba se considera como básica para llevar un control de calidad en la fabricación de los morteros.

Resistencia a la compresión.-La resistencia mecánica que se pretende lograr con el producto final de cada proporcionamiento debe estar de acuerdo con la finalidad que se persigue en el trabajo a desarrollar, las impermeabilizaciones no requieren, en general, resistencias mayores de 10 a 12 kg/cm² a la compresión simple a los 28 días. El material que se inyecta en las fisuras de la roca, además de quedar confinado, se adhiere a las paredes de ella y forma un verdadero tapón que resiste fácilmente la sobrepresión que se aplica normalmente.

Si el propósito del inyectado es el de consolidar la roca de cimentación para aumentar el módulo de elasticidad del macizo rocoso, el criterio que se debe aplicar para seleccionar las mezclas de inyectado es diferente, se tendrá que pensar en resistencias más altas que deberán ir de acuerdo con los esfuerzos que se transferirán al terreno.

Exprimido o filtrado.-Las mezclas de inyectado que tienen alta resistencia al "exprimido" debe reunir las siguientes cualida-

des:

-Normalmente conservan la homogeneidad durante casi todo el desarrollo del inyectado en el subsuelo.

-Como consecuencia del punto anterior, la estabilidad de las mezclas se mantiene un tiempo bastante largo.

-La sedimentación de los granos de la mezcla debe ser reducida, con lo cual se evitará la obturación o taponamientos a la entrada de las grietas de la roca o en los vacíos que existen en los materiales granulares.

Las propiedades anteriores se cumplen debido a que casi no se producen pérdidas de agua en esta mezcla, por este motivo conserva la misma composición en el producto durante el inyectado y aún durante algún tiempo después que se haya efectuado éste.

Fluidez.-El tipo de fluidez (alta, mediana y baja) da una idea sobre la penetración de la lechada y sobre el campo de aplicación, que depende del suelo por inyectar y del fin que se quiere alcanzar con el tratamiento.

La fluidez y la sedimentación están íntimamente ligadas al contenido de agua de la mezcla, ambas propiedades varían generalmente en sentido inverso; la inyectabilidad óptima consiste en establecer un equilibrio y cierta relación entre las dos, esto es muy importante, ya que una lechada fluida y poco estable es deficientemente inyectable.

5.4.-Presiones de inyectado.

La presión durante el inyectado tiene un papel importante. En principio, es necesario operar con las presiones más altas que resulten admisibles, para abrir las fisuras y penetrar a mayor

profundidad. Sin embargo, hay limitaciones sobre este particular: la principal es que no provoque levantamiento de las formaciones, con pérdida de lechada o daño a la roca.

Es importante hacer la diferencia entre presión de inyectado y presión de rechazo:

Presión de inyección es la presión ascendente que se desarrolla durante la inyección antes de llegar a la presión de rechazo.

Presión de rechazo es el valor máximo de la presión específica para la inyección de las mezclas, midiéndose en todos los casos en la boca de la perforación.

Para conseguir un buen tratamiento es necesario tener una presión de rechazo tan alta como sea posible, pero tal presión puede ser perjudicial si una gran cantidad de lechada es inyectada bajo esta presión. Esta es una de las partes más delicadas de técnica de inyección.

En un tramo dado, al principio de la inyección el flujo de la lechada está en función de la presión aplicada. La presión debe ser tal que se obtenga flujo en la lechada. Mientras menor sea la presión de inyección con respecto a la presión de rechazo, mayor puede ser el flujo y mientras más cercana sea la presión de inyección a la presión de rechazo, menor debe ser el flujo.

A menos que la presión de rechazo sea muy conservadora y, en torces, la inyección no es muy eficiente. Es un método malo y peligroso aplicar inmediatamente la presión de rechazo al barrenado y permitir que tome lo que quiera.

No es posible poner en forma de especificaciones estrictas al procedimiento correcto, dado que esto es más que nada una cues

tión de sentido común y de saber hacerlo. El principio es el siguiente:

-Aumentar la presión gradualmente para "sentir" el comportamiento del barreno.

-Si el consumo es alto, digamos sobre 60 litros por minuto, mantener la presión baja, digamos que a un tercio de la presión de rechazo.

-Si el consumo es bajo, digamos inferior a los 20 litros por minuto, aumentar la presión.

Normalmente según progresa la inyección la presión aumenta y el flujo disminuye hasta alcanzar la presión de rechazo prácticamente sin flujo.

A este respecto, para verificar y controlar el trabajo que se realiza, es muy importante colocar manómetros de registro en el barreno en que se haga la inyección.

5.4.1.-Diferentes presiones de inyectado.

En el tratamiento de la cimentación de la cortina de una presa se usan, generalmente, tres tipos de presiones de inyección, inyección a baja presión, a presión intermedia y a alta presión. se pueden usar en conjunto o en forma aislada según se requiera para una cimentación en particular. La figura 1 muestra un arreglo típico de las zonas de inyección a presión. La carpeta de inyecciones a baja presión se utiliza para sellar y consolidar la cimentación cercana a la superficie y en general se hace como un primer paso en programa normal de construcción, la inyección de presión intermedia se usa para conseguir un sello más profundo en la cimentación, a lo largo de la arista de aguas arriba de la se-

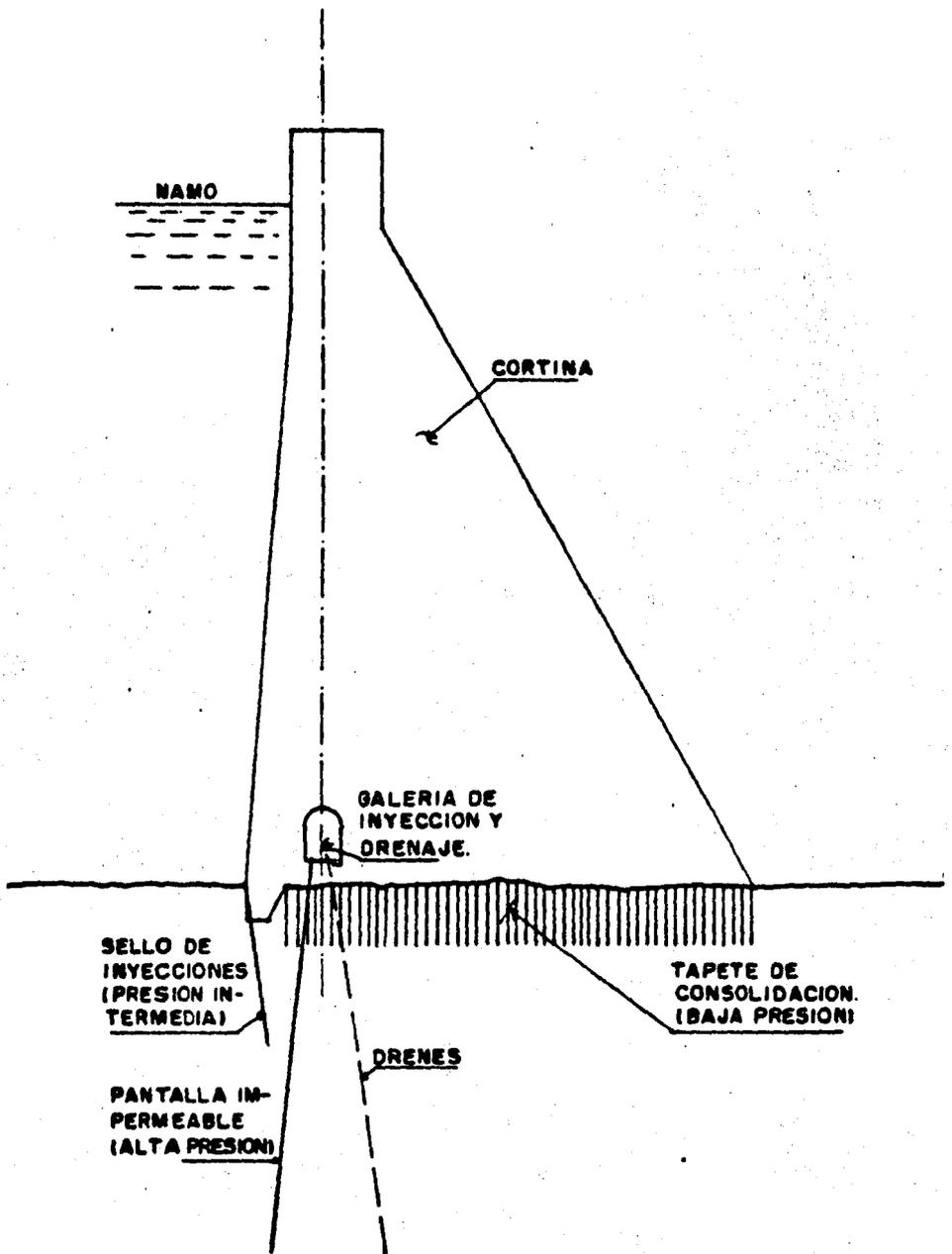


FIG.1.-ZONAS DE INYECCION A PRESION EN LA CIMENTACION DE LA CORTINA DE UNA PRESA.

estructura. La inyección a alta presión se utiliza para formar una pantalla impermeable, como dentellon principal para reducir la filtración bajo la estructura.

En algunos casos es preciso ejecutar inyecciones especiales para sellar manantiales, para consolidar la roca alrededor de los túneles y para detener fugas ocasionales que aparecen dentro de la roca cimentación.

En la construcción de presas de concreto, se ejecuta una carpeta de inyecciones a baja presión en la roca superficial en el tercio superior de aguas arriba del área de cimentación, y en ocasiones en toda la cimentación si es necesario. En el caso de presas de tierra y enrocamiento si se necesita una carpeta de inyecciones. La carpeta de inyecciones se usa en la cimentación de cualquier tipo de presa para sellar la superficie de la roca de la cimentación cuando hay zonas debiles.

Las perforaciones para inyectar a baja presión, normalmente se perforan a profundidades que varían desde 3 m hasta 15 m perpendicularmente a la superficie de la cimentación. Sin embargo, cuando hay fisuras es preferible perforar los agujeros de modo -- que intercepten las grietas. Las presiones varían de 1.4 kg/cm^2 a 10.5 kg/cm^2 , dependiendo del tamaño y tipo de la estructura y de las condiciones de la cimentación. Por lo regular se procura inyectar a la presión más alta que no produce daños por subpresión a la roca de la cimentación.

En caso de presas de concreto los barrenos de presión intermedia se perforan desde la superficie de la roca de la cimentación, justamente aguas arriba de la arista de la estructura, o -

bien se perforan a través de tubos que se han dejado en el chaflán de aguas arriba de la base de la presa. Sus profundidades varían de 15 m a 30 m dependiendo de las condiciones que se encuentran. Las presiones que se emplean dependen del peso del concreto que se apoya sobre la cimentación cuando se efectúa la inyección y también de la estructura geológica y de la resistencia de la roca de cimentación, normalmente varían de 5.25 kg/cm^2 a 28 kg/cm^2 .

Las inyecciones de alta presión se usan en presas tanto de concreto como de tierra y enrocamiento para formar la pantalla impermeable. En grandes presas de concreto la inyección se efectúa, generalmente, desde una galería adyacente, que está ligeramente aguas abajo del eje de la presa y que se encuentra localizada cerca de la cimentación. Las tuberías que se extienden desde la roca hasta la galería se colocan en el concreto durante la construcción, los barrenos se perforan y luego se inyecta a alta presión a través de los tubos, después que se ha colocado el concreto a una altura razonable sobre la cimentación. La profundidad de los barrenos varía con las condiciones geológicas y topográficas. Para algunas presas se aplica el siguiente criterio:

$$d = h/3 + C$$

en donde:

d es la profundidad del barreno.

h es la altura de la presa aguas arriba del barreno.

C es una constante.

Como todas las unidades están dadas en metros, C varía de 7.5 m a 22.5 m.

Las presiones que se usan son de 7 kg/cm^2 hasta 35 kg/cm^2 en

grandes presas. En algunos casos se han usado hasta 70 kg/cm^2 para inyectar las secciones más profundas de los barrenos. Para evitar levantamientos de la roca en la cimentación, las altas presiones se deben utilizar con mucha precaución y de ningún modo al azar.

5.5.-Inyección de aluvión.

Cuando se requiere formar una pantalla de inyectado en los acarreos del cauce de un río con el propósito de construir la cortina de una presa, es preciso formular un programa de investigación relativo a las características de los materiales que se encuentran en el apoyo de la cortina.

La información básica que debe obtenerse es la permeabilidad de los acarreos fluviales y de la roca basal de la cimentación; granulometría de los acarreos y estratigrafía de 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, nos permite diseñar con bastante precisión las lechadas de inyectado a base de cemento-bentonita-agua, con las propiedades necesarias 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 las muy finas son bastante complicadas de inyectar, a menos que se usen productos químicos, esta clase de tra

bajos 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 una función de la permeabilidad de los materiales.

Con el manejo adecuado de los parámetros antes mencionados, se logra con el inyectado un grado de permeabilidad final que depende en gran parte de la proporción de vacíos no inyectados. Con el equipo adecuado de perforación e inyectado, es posible tratar acarrees con espesores de 20 m ó 30 m para presas medianas o bien hasta de 60 m u 80 m para grandes presas, si esto se justifica.

Puede decirse que hay dos formas o tipos de inyección: el de impregnación y el que a base de fuertes golpes de presión se producen fallas o roturas sucesivas de la estructura de los acarrees. Cualquiera de estas técnicas es difícil de realizar independientemente, ya que aunque esporádicamente la otra se presentará.

Antes de hacer un tratamiento, es útil realizar pruebas de perforación para conocer las dificultades que se pueden presentar y definir el equipo que es deseable usar; también es conveniente efectuar un tramo de prueba de inyectado lejos de la cortina para precisar las variantes que se deben aplicar al tratamiento, teniendo además con esto la oportunidad de poder hacer en esa zona toda clase de reconocimientos sin correr el riesgo de alterar las condiciones finales de la pantalla impermeable, que en caso extremo, pudieran ser peligrosas para el correcto funcionamiento de la misma.

Al terminar el tratamiento se debe establecer un control de calidad de él mismo, tan severo como se juzgue necesario.

5.6.-Estación de inyección.

5.6.1.-Planta dosificadora o mezcladora.

Deberá estar localizada en sitios estratégicos que permita surtir a varias estaciones de inyección con el menor recorrido posible.

La planta estará provista de una balanza automática que será alimentada con cemento por medio de un tornillo de Arquímedes (sinfin) que se detenga automáticamente cuando se haya obtenido el peso requerido para cada dosificación.

Si por alguna razón no se dispusiera de cemento a granel siempre será posible instalar un pequeño silo en el cual los sacos sean vaciados. Las mediciones en volúmenes de agua y el lodo bentonítico pueden automatizarse usando electroválvulas.

Los turbomezcladores serán alimentados de esta y después de 2 minutos de agitación será conducida la mezcla a la estación de inyección.

El orden de dosificación de las mezclas será: agua, lodo bentonítico y cemento.

El lodo bentonítico deberá prepararse con un mínimo de 12 horas de anticipación para permitir una buena hidratación de la bentonita. La proporción será 10 partes de agua por una de bentonita en polvo, podrán usarse agitadores de baja velocidad y luego almacenado en tanques de gran capacidad donde se recircule de tiempo en tiempo por medio de una bomba centrífuga común. (ver fig. 2).

5.6.2.-Sistemas de inyección.

Los sistemas de inyección pueden ser de dos tipos: de una sola línea sin retorno, cuando se utiliza bomba de doble pistón, ti

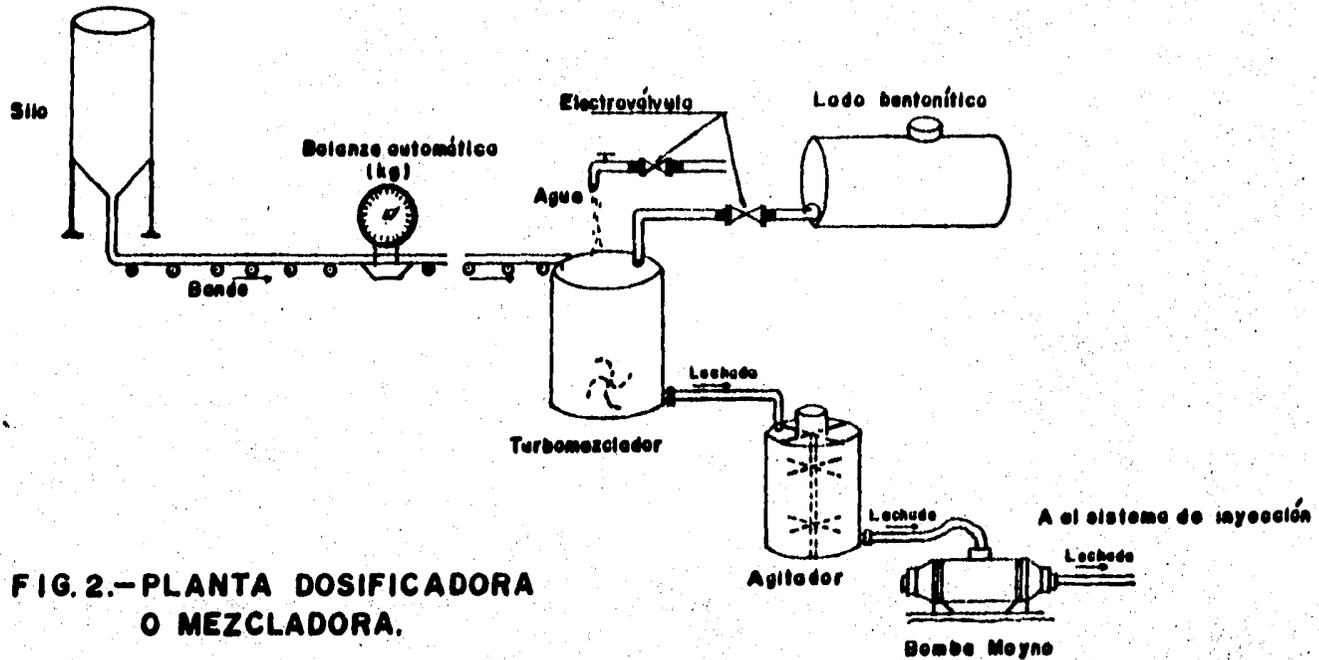


FIG. 2.-PLANTA DOSIFICADORA O MEZCLADORA.

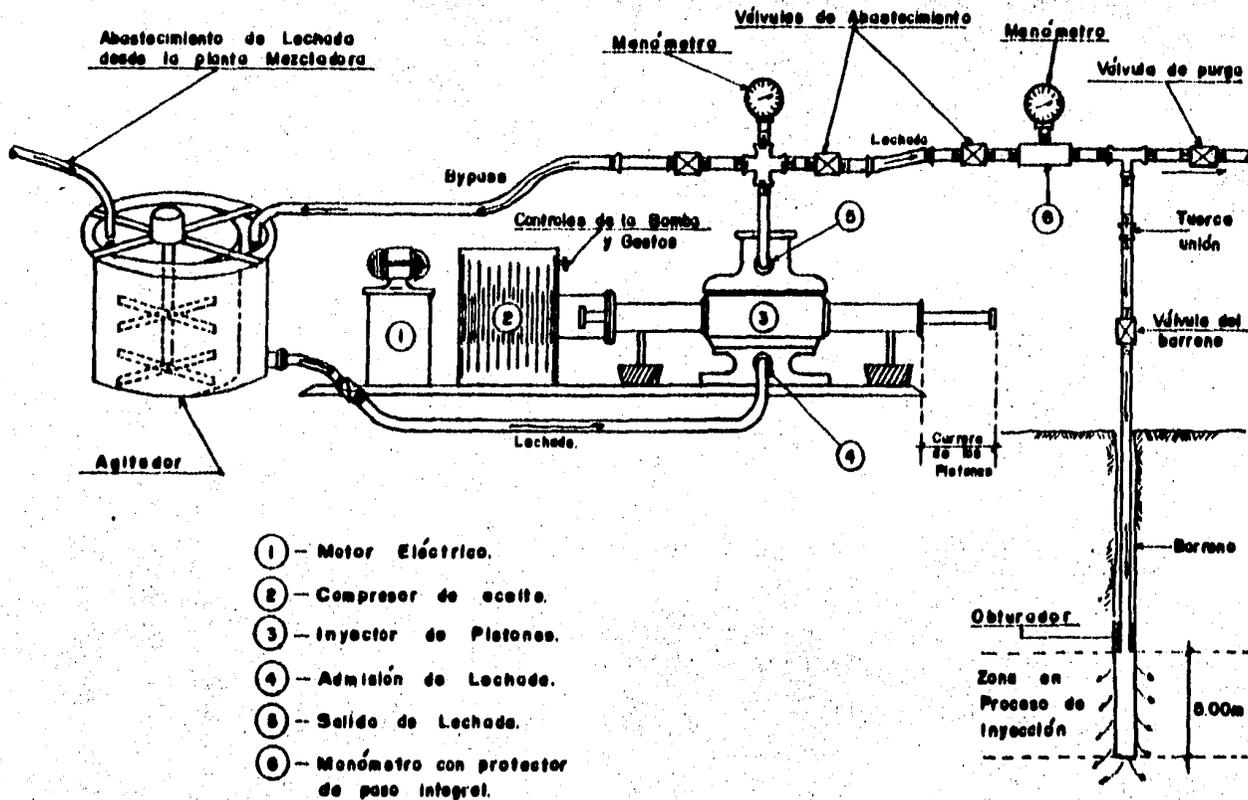
po Clivio o con retorno cuando se utiliza bomba tipo Moyno (ver figuras 3 y 4).

5.6.2.1.-Sistema de una sola línea.

En el sistema de una sola línea, está se extiende desde la bomba hasta el barreno. El distribuidor conectado tiene una válvula de abastecimiento para sostener el inyectado en la línea de alimentación cuando se retira el distribuidor de un barreno a otro y una válvula de purga para limpiar o lavar la línea de abastecimiento. Abajo del distribuidor y sujeto al niple de la tubería se encuentra la válvula para inyectar en la perforación. Esta válvula retiene el inyectable en el barreno cuando se desconecta el distribuidor de la unión, e impide que le entre agua cuando se lava la línea de abastecimiento.

El procedimiento para inyectar con el sistema de una sola línea es como sigue: cuando entra el inyectable por primera vez a la línea de abastecimiento, la válvula del barreno está cerrada y están abiertas las válvulas de abastecimiento y la de purga. Tan pronto como el inyectable sale expulsado por el extremo de la salida de la válvula de purga, se abre la válvula del barreno y se cierra entonces la válvula de purga. Cuando se bombea el inyectable, el manómetro del distribuidor se debe observar continuamente para asegurar que se están empleando las presiones deseadas; las presiones se regulan variando la velocidad de la bomba o en una emergencia abriendo la válvula de purga.

Una presión diferencial excesiva entre el barreno y la bomba indica que la línea de abastecimiento se está taponando parcialmente. Esto se puede remediar cerrando la válvula del barreno y



**FIG. 3.- SISTEMA DE UNA SOLA LINEA, SIN RETORNO.
 BOMBAS DE PISTONES (CLIVIO O SIMILAR).**

abriendo la válvula de purga. Entonces se puede bombear inyectable con velocidad creciente para limpiar y arrastrar los depósitos que están en el interior; o bien la línea de abastecimiento puede ser lavada con agua.

Cuando la válvula de inyección del barreno se abre, la válvula de purga nunca se debe abrir o cerrar de manera intempestiva que produzca golpe de ariete en la línea de abastecimiento; si se hace esto puede resultar que se tapen las fracturas de la roca de la cimentación que están siendo inyectadas. Al terminar la inyección, la válvula del barreno se cierra para que se detenga el inyectable dentro del mismo hasta su fraguado (ver fig. 3).

3.6.2.2.-Sistema circulante con retorno.

En el sistema circulante corre una línea de abastecimiento continuo desde la bomba hasta el distribuidor del barreno, y de ahí regresa al agitador.

El distribuidor tiene 3 válvulas de control en adición a la válvula del barreno que está en el niple. Cuando se empiezan las operaciones de inyección la válvula del barreno está cerrada y las válvulas de control se abren de modo que el inyectable circule a través de la línea y regresa al agitador.

Tan pronto como fluye el inyectable de la salida de la línea de retorno hacia el agitador, se abre la válvula de inyección del barreno. La presión de inyección deseada se obtiene ajustando la válvula de la línea de retorno, y regulando la velocidad de la bomba. Para llenar grandes huecos se debe dirigir todo el flujo del inyectable cerrando la válvula de retorno. Cuando se hace esto, la válvula de retorno debe abrirse periódicamente con el fin:

Abastecimiento Lechado desde la planta de Mezclado.

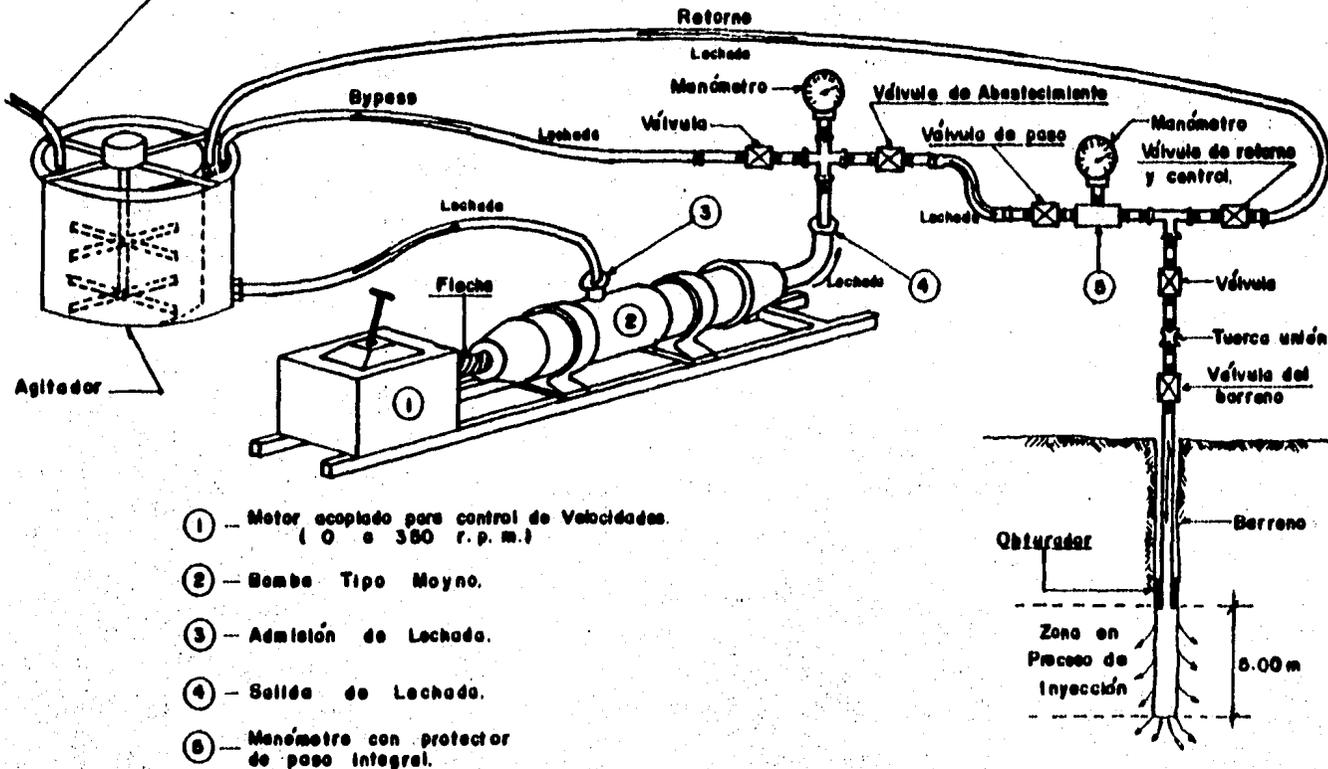


FIG. 4.- SISTEMA CIRCULANTE CON RETORNO.

(BOMBA TIPO MAYNO)

de reemplazar el inyectable residual de las líneas con inyectable fresco. Al terminar la inyección del barrenado, la válvula del mismo y la válvula principal de control se cierran. Con estas válvulas cerradas podrá desconectarse el distribuidor y conducirse al siguiente barrenado con el inyectable aún en el sistema circulante.

En ambos sistemas se instala una línea de retorno al depósito agitador, desde un punto de la línea de abastecimiento cercano a la bomba (ver fig. 4).

5.7.-Procedimiento de inyección.

5.7.1.-Progresiones de avance.

Esta inyección se lleva a cabo a medida que avanza la perforación (ver fig. 5), es decir:

- Perforar un tramo de 5 metros.
- Lavarlo e inyectarlo.
- Reperforar de 0 a 5 m.
- Perforar un nuevo tramo de 5 a 10 m.
- Lavarlo e inyectarlo, y así sucesivamente hasta el fondo del barrenado.

Este procedimiento es muy seguro, pero tiene el inconveniente de ser muy lento.

5.7.2.-Progresiones de regreso.

En este procedimiento las inyecciones se ejecutan en tramos de 5 m desde el fondo del barrenado hacia el brocal (ver fig. 6), es decir:

- Perforación del barrenado a su profundidad total.
- Se coloca el obturador 5 m antes del fondo del barrenado y se inyecta el tramo.

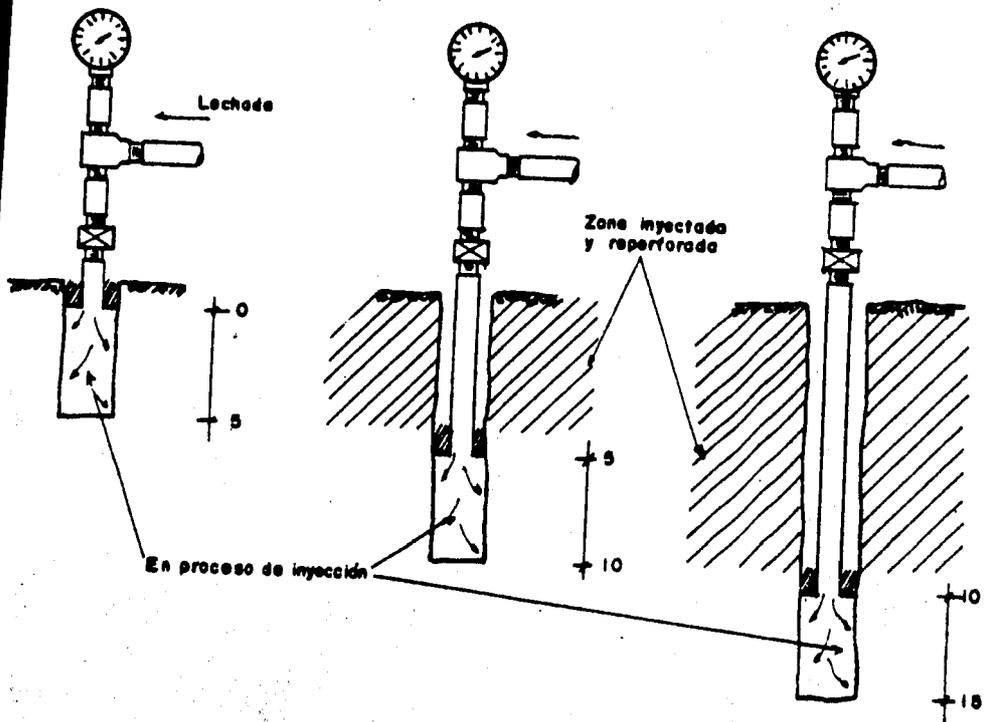


FIG. 5.-PROGRESIONES DE AVANCE.

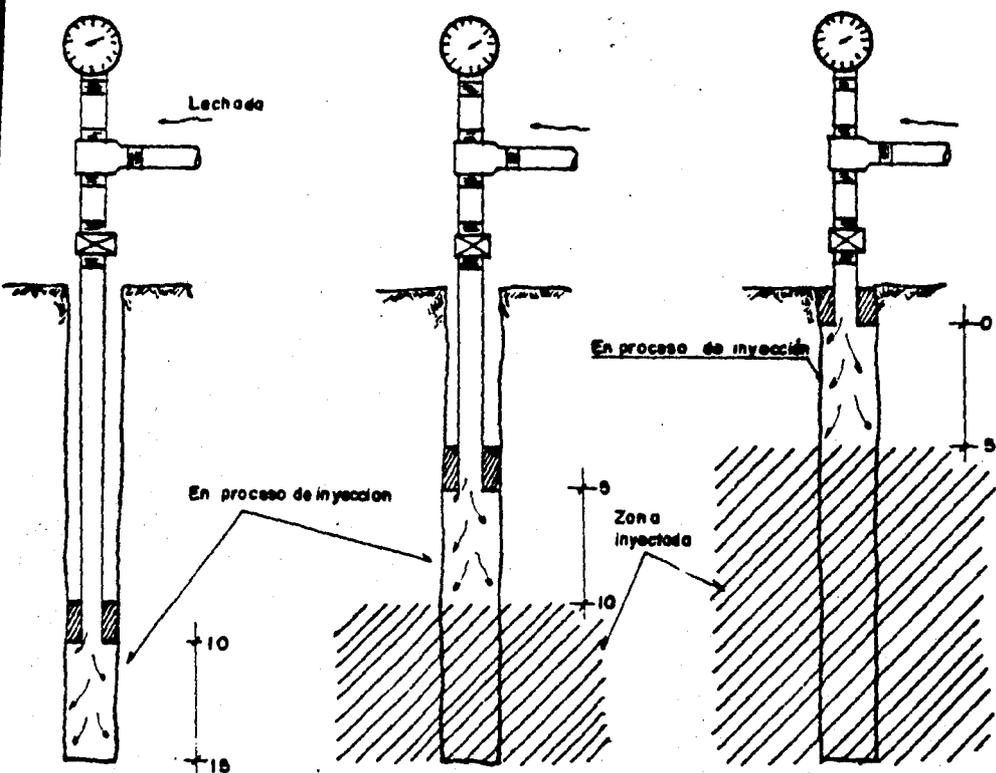


FIG. 6.- PROGRESIONES DE REGRESO.

-Se sube el obturador otros 5 m y se inyecta el nuevo tramo y así sucesivamente hasta el brocal del terreno.

Este procedimiento es más rápido que el de progresiones de avance, porque la perforadora está libre para perforar otro barro no tan pronto como un barreno es terminado. No se tiene que esperar a que se haga la inyección. El principal inconveniente de este procedimiento es el riesgo de que la lechada brinque el obturador debido a las fisuras en la roca, atrapándolo en el barreno. En zonas en que este fenómeno sea frecuente se tendrá que inyectar por el procedimiento de inyecciones de avance.

En algunas zonas podría ser necesario, debido a las condiciones de la roca, combinar los dos procedimientos, por ejemplo, inyectar por avance los primeros 10 ó 15 metros del barreno, después reperfurar ese tramo, perforar el barreno a toda su longitud e inyectarlo por el procedimiento de progresiones de regreso.

5.8.-Reportes de campo.

Los reportes diarios de trabajo deberán ser elaborados minuciosamente sin omitir detalles que permitan la interpretación correcta del proceso de perforación e inyectado de los barrenos con signados en él.

En el proceso de perforación deberán anotarse el avance con sus tiempos así como los cambios e accidentes que se presenten en dicho proceso, cambios bruscos en el avance que nos denotará la presencia de un material más suave, una cavidad, pérdidas de agua caídos, etc., anotando la profundidad a que ocurren éstos.

En esas profundidades se suspenderá la perforación y se procederá a inyectar con el obturador anclado un metro arriba de don

de se presento el accidente.

En el proceso de inyección se anotará también los tiempos, - consumos y presiones, así como las anomalías que se observen durante toda la operación de inyectado hasta llegar al sello del barrero.

El equipo que se usa en la perforación, inyección y personal se consignara en el renglón de observaciones o al reverso del reporte.

D

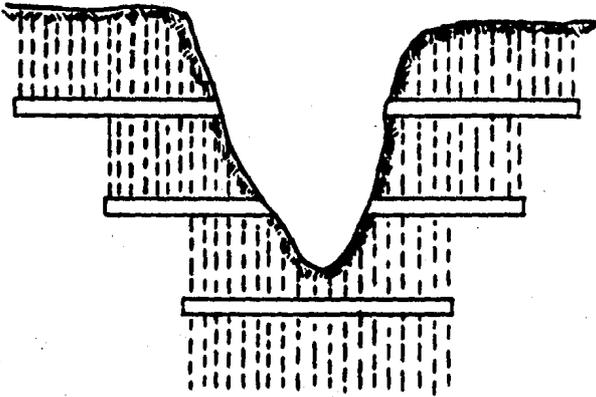
SEXTO CAPITULO.

VI. DRENAJE.

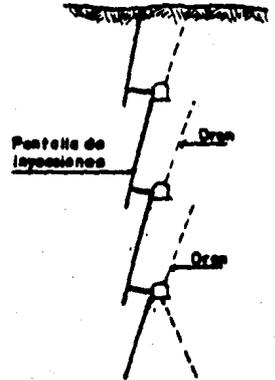
El objetivo del drenaje es el abatimiento de las cargas hidrostáticas que actúan sobre un bloque de roca para asegurar su estabilidad.

El drenaje en presas consiste en una combinación de perforaciones y galerías de drenaje a unos cuantos metros aguas abajo de la pantalla impermeable. En la figura 1 se muestra un ejemplo de un sistema de drenaje desde galerías subterráneas. Los detalles de una galería de drenaje se muestran en la figura 2. No siempre es necesario revestir la galería, de modo que opera como superficie de drenaje.

El tratamiento mediante inyecciones de la cimentación de una presa no garantiza la impermeabilidad de la misma. Por lo tanto, es una práctica común construir desde las propias galerías de inyección perforaciones que intercepten y canalicen al exterior el agua que pudiera fugarse por el mal funcionamiento de la pantalla

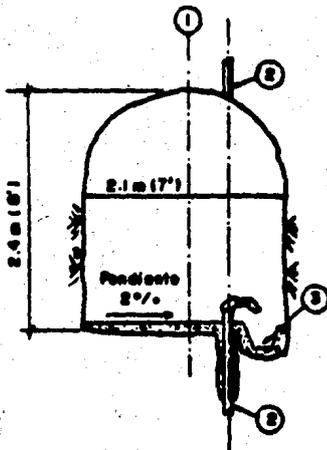


a) Corte transversal al río.



b) Corte paralelo al río.

FIG.1.- PANTALLA DE INYECCIONES Y DRENAJE EN LA CIMENTACION DE UNA PRESA.



- 1.- Eje central.
- 2.- Barrenos de drenaje.
- 3.- Canal de drenaje.

FIG. 2.-CORTE TRANSVERSAL DE LA GALERIA DE DRENAJE.

de inyecciones. Este sistema de drenaje evita que se genere alta - subpresión bajo la cortina de la presa.

El proyecto de un sistema de drenaje requiere un conocimiento correcto de las grietas en la roca, sus rellenos y dirección predominante. A veces es suficiente realizar perforaciones desde la superficie, a profundidades de 10 a 20 metros. En otras la presencia de fallas o diques, obliga a construir galerías, desde donde se perforarán barrenos para aliviar la subpresión. Los barrenos son de 5 a 7 centímetros de diámetro; la profundidad y el espaciamiento dependen de las características de las rocas. Es preferible empezar, por razones económicas y posibles deficiencias en la información geológica, con un esquema sencillo y un número reducido de barrenos. En estos se instalan manómetros, con las medidas de presión y la localización de las filtraciones, después del primer llenado del embalse se complementa el sistema de drenes.

Desafortunadamente para el encargado del proyecto, éste aspecto de la construcción es algo que no puede evaluarse con precisión.

SEPTIMO CAPITULO.

VII.. INVESTIGACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y EFICIENCIA DE LA PANTALLA.

7.1.-Control después del inyectado.

La investigación de los resultados y eficiencia de la pantalla se realizan por medio de un control posterior al tratamiento.

Dicho control consta de las siguientes partes:

- Control local de inyecciones de impermeabilidad.
- Control global de inyecciones de impermeabilización.
- Control local de inyecciones de consolidación.
- Control global de inyecciones de consolidación.

Control local de inyecciones.

Se realiza mediante pruebas de inyección tipo Lugeon en roca y tipo LeFranc en suelos aluviales, en cada perforación y en cada tramo, comparando los valores de la permeabilidad obtenidos antes y después del tratamiento.

Control global de inyecciones.

Este control consiste en la medición de los niveles piezométricos aguas arriba y aguas abajo de la zona inyectada, antes y después del tratamiento y determinar con esta información la eficiencia del tratamiento.

Control local de inyecciones de consolidación.

Se mide la deformabilidad en el interior de la perforación con dilatómetros diseñados para esta finalidad o en la superficie interior de los socavones por medio del ensayo estándar denominado prueba de placa.

Control global de inyecciones de consolidación.

La prospección geosísmica no sólo permite información sobre la alteración inicial de un terreno, sino el mejoramiento de su módulo de elasticidad dinámico debido a las inyecciones de consolidación. Los ensayos geosísmicos y su interpretación son relativamente simples y deben emplearse en combinación con los métodos locales.

7.2.-Propiedades del terreno inyectado.

7.2.1.-Resistencia al destapamiento de una fisura inyectada.

Como las pantallas de inyección deben soportar la presión hidrostática del embalse, el relleno de fisuras y cavidades debe soportar esta presión que tiende a producir el destapamiento.

7.2.2.-Resistencia de aluviones inyectados.

En arenas y gravas la inyección más eficiente es la que rellena los huecos intersticiales, conservando el contacto intergranular. El aumento de resistencia se debe a que se le añade cohesión al suelo friccionante. Como la lechada inyectable tiene una

determinada cohesión, después de la inyección, el suelo tendrá una cohesión más su propio ángulo de fricción interna, que no se modifica al inyectar.

Si la inyección es tal que todos los granos de los aluviones quedan envueltos por la lechada inyectada con un espesor considerable, el resultado puede ser favorable o no serlo, dependiendo del valor del ángulo de fricción interna de la lechada.

7.2.3.-Permeabilidad residual.

La permeabilidad media después de la inyección no es la permeabilidad de la lechada que es muy pequeña, sino que es la debida a los vacíos que se forman por la contracción de la lechada y que quedan sin rellenar. Ahora bien, es cierto que si un conjunto de huecos, incluso de gran dimensión, quedan rodeados por el material inyectado se reduce la filtración considerablemente. La única forma de determinar la eficiencia de una inyección es midiendo la permeabilidad residual.

A medida que el medio es menos permeable la inyección es más difícil, ya que, el mortero que penetra impregna con mayor facilidad los terrenos permeables. Por lo tanto, no parece apropiado calificar una inyección por la reducción de permeabilidad lograda sino que por el valor absoluto de la permeabilidad media lograda. Esta debe compararse con un límite práctico de estaqueidad.

OCTAVO CAPITULO.

VIII. CONCLUSIONES.

Como comentarios finales al presente trabajo, deseo hacer notar la importancia que dentro de la Ingeniería de Presas representa el tratamiento de la cimentación de la cortina de una presa.

En el trabajo de inyectado es necesario tener un control estricto de el mismo, en el sentido de que se verifiquen hasta el máximo posible todas las especificaciones del proyecto, pues el éxito que se obtenga dependerá en gran parte del cumplimiento de las reglas de ejecución que se hayan establecido.

Debido a que el inyectado es un procedimiento en el cual no se pueden observar visualmente los resultados de su ejecución, es necesario que la gente encargada de la aplicación de la inyección tenga experiencia y este capacitada en este tipo de tratamiento. Puesto que, de el tratamiento correcto de la roca de cimentación dependerá la vida de la obra.

Por ultimo, el presente trabajo es una aportación a la Facul

tad de Ingeniería de la UNAM, como agradecimiento a la ayuda que se me proporcionó durante su elaboración, y a todas las personas que de alguna manera contribuyeron.

BIBLIOGRAFIA.

- Cambeport, Henri. INYECCION DE SUELOS. Barcelona, Omega, - 1968.
- Cambeport, Henri. PERFORACIONES Y SONDEOS. 3a. ed. Barcelona Omega, 1975.
- Deere U., Don. CONTROL DE CAMPO DEL INYECTADO DE LA CIMENTACION EN PRESAS. Trad. Ing. Jesús Pliego. México, SARH, (s.f.).
- Krynine, D.P. y Judd, W.R.. PRINCIPIOS DE GEOLOGIA Y GEOTECNIA PARA INGENIEROS. 3a. ed. Barcelona, Omega, 1980.
- Longwell, Chester R. y Flint, Richard F.. GEOLOGIA FISICA. México, Limusa, 1981.
- Marsal, Raul J. y Resendiz Muñoz, Daniel. PRESAS DE TIERRA Y EMPROCAMIENTO. México, Limusa, 1983.
- México, C.F.E.. "ALGUNOS ASPECTOS BASICOS SOBRE EL DISEÑO DEL TRATAMIENTO DE LA ROCA MEDIANTE INYECCIONES DE LA CIMENTACION Y PANTALLA IMPERMEABLE DE UNA PRESA". Curso impartido por: Ing. - Leopoldo Espinosa Graham. El Caracol, Gro., 10-14 enero de 1984.
- México, C.F.E.. INFORME DEL LABORATORIO DE MEZCLAS DE INYECCIONES. P.H. EL CARACOL., Por el Ing. Pedro Jasso Delgadillo, Marzo-Abril-Mayo. 1984.
- México, C.F.E.. INSTRUCTIVO PARA INSPECTORES DE INYECCIONES DEL "P.H. EL CARACOL". Residencia de inyecciones, 1979, Recopiló y formuló: Ing. Edmundo Chávez Vergara.
- México, C.F.E.. MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES. GEOTECNIA.
- B.3.5. Tratamiento de macizos rocosos.
- B.3.4. Pruebas de campo y laboratorio.
- México, I.I.E., 1980

-México, SARH. INSTRUCCIONES GENERALES SOBRE OPERACIONES DE PRUEBAS DE PERMEABILIDAD, TIPO LUGEOIL Y LEFRANC. México, Dirección General de Estudios, (s.f.)

-Vega Roldan, Oscar y Arreguín Cortes, Felipe. PRESAS DE ALMACENAMIENTO Y DERIVACION. 2a. ed. México, UNAM, 1983.