

14
21



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES, ACATLAN

**TRATAMIENTO DE CIMENTACIONES DE PRESAS DE TIERRA Y
ENROCAMIENTO EN FORMACIONES ROCOSAS**

TESIS



QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

ABELINO LEÓN GARCÍA

ASESOR

ING. JORGE FLORES NÚÑEZ

ACATLAN, EDO. DE MEXICO, JUNIO DE 1996.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"
JEFATURA DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

SR. ABELINO LEON GARCIA
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL.
P R E S E N T E :

DE ACUERDO A SU SOLICITUD PRESENTADA CON FECHA 9 DE OCTUBRE DE 1990, ME COMPLACE NOTIFICARLE QUE ESTA JEFATURA DEL PROGRAMA TUVO A BIEN ASIGNARLE EL SIGUIENTE TEMA DE TESIS:

" TRATAMIENTO DE CIMENTACIONES DE PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO EN FORMACIONES ROCOSAS "

INTRODUCCION

- I.- ASPECTOS GENERALES.
 - II.- ESTUDIOS GEOTECNICOS.
 - III.- METODOS DE TRATAMIENTO.
- CONCLUSIONES.

ASI MISMO FUE DESIGNADO COMO ASESOR DE TESIS EL ING. JORGE FLORES NUNEZ.

PIDO A USTED TOMAR NOTA QUE EN CUMPLIMIENTO DE LO ESPECIFICADO EN LA LEY DE PROFESIONES, DEBERA PRESTAR SERVICIO SOCIAL DURANTE UN TIEMPO MINIMO DE SEIS MESES COMO REQUISITO BASICO PARA SUSTENTAR EXAMEN PROFESIONAL ASI COMO DE LA DISPOSICION DE LA DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES EN DE QUE SE IMPRIMA EN LUGAR VISIBLE DE LOS ENEMES TESIS. EL TITULO DE TRABAJO REALIZADO ESTA DE DEBERA IMPRIMIRSE EN EL INTERIOR DE LA TESIS



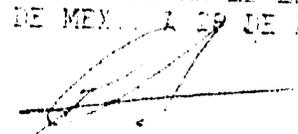
SIN MAS POR EL MOMENTO RECIBO UN CORDIAL SALUDO

ENEF-ACATLAN

JEFATURA DEL

PROGRAMA DE INGENIERIA

A T E N T A M E N T E
POR MI BASTA HABLARA EL ESPERITO
ACATLAN, EDU. DE MEX. A 29 DE ABRIL DE 1991


ING. CARLOS ROSALES AGUILAR
JEFE DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

DEDICATORIAS

A MI MADRE, HERMANOS, TIA

Y

A LA MEMORIA DE MI PADRE

CONTENIDO

-	INTRODUCCIÓN.	10
I.	ASPECTOS GENERALES.	12
I.1.	Introducción.	12
I.2.	Partes constitutivas de una presa	13
I.3.	Consideraciones de diseño	14
I.3.1.	Causas de falla en presas	14
	a). Causas de falla en presas de tierra y enrocamiento	14
I.3.2.	Fuerzas actuantes en una presa	16
I.3.3.	Diseño de la cortina	17
	a). Selección del tipo de presa	17
	b). Requerimientos básicos de diseño	17
	c). Comportamiento de las presas de tierra	18
I.3.4.	Proyecto de cimentación de presas	18
I.3.5.	Diseño del contacto corazón-roca	19
I.4.	Problemas en la cimentación	20
I.4.1.	Presencia de agua	21
	a). Filtraciones	21
	b). Modificación del nivel y flujo de aguas subterráneas	22
	c). Sismicidad inducida	22
I.4.2.	Deformabilidad	23
	a). Expansiones en la cimentación	23
I.4.3.	Estabilidad	24
	a). Estabilidad de taludes	24

I.5.	Presas sobre cimentaciones con problemas geológicos especiales.	25
I.5.1.	Cimentaciones sobre roca cársica	25
I.5.2.	Cimentaciones sobre fallas y otras discontinuidades	26
	a). Fallas	26
	b). Zonas de corte	27
	c). Zonas débiles, con fisuras y otras discontinuidades	27
I.5.3.	Cimentaciones sobre roca suave, intemperizada y/o fracturada y/o sobre roca volcánica	28
	a). Roca suave e inalterada	28
	b). Roca intemperizada, alterada, fracturada	28
	c). Rocas volcánicas	29
II.	ESTUDIOS GEOTÉCNICOS	30
II.1.	Introducción	30
II.2.	Etapas de exploración	31
II.2.1.	Etapa de reconocimiento o prefactibilidad	31
	a). Objetivo	31
	b). Nivel de reconocimiento	33
	c). Métodos de investigación.	33
II.2.2.	Etapa de exploración preliminar o de factibilidad	33
	a). Objetivo	33
	b). Nivel de reconocimiento	34
	c). Métodos de investigación.	34
II.2.3.	Exploración definitiva o de diseño final	34

a).	Objetivo	35
b).	Nivel de reconocimiento	35
c).	Métodos de investigación.	35
II.2.4.	Construcción	36
II.3.	Métodos de investigación en la cimentación	36
II.3.1.	Investigación geológica e hidrogeológica	37
II.3.2.	Investigación Geofísica	38
II.3.3.	Investigaciones especiales	39
a).	Investigación del riesgo sísmico	39
a.1).	Localización y evaluación de fallas	39
a.2).	Evaluación de la sismicidad y monitoreo	39
b).	Investigación del agua subterránea	39
II.3.4.	Barrenos, muestreo y barrenos de prueba	40
II.3.5.	Pruebas de laboratorio	41
II.3.6.	Pruebas "in situ" en excavaciones y socavones	41
a).	Deformabilidad	41
b).	Resistencia al corte	42
c).	Resistencia residual	43
d).	Permeabilidad, drenaje e inyectabilidad	43
III.	MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE CIMENTACIONES	46
III.1.	Introducción	46
III.2.	Métodos de tratamiento	46
III.2.1.	Tratamiento superficial	47
a).	Limpia superficial	47

b). Excavación de regularización	47
c). Trincheras impermeables excavadas en roca	48
d). Tratamiento de grietas superficiales	49
e). Rellenos de concreto	50
III.2.2. Tratamiento subsuperficial	50
a). Inyecciones	50
b). Tapete de inyecciones o consolidación	51
c). Pantalla impermeable de inyecciones	51
III.2.3. Planeación del inyectado	52
a). Programación	52
b). Objetivo del inyectado	52
c). Evaluación de la necesidad de inyectado	53
III.2.4. Consideraciones de diseño del inyectado	54
a). Pruebas de inyectado	54
b). Presión de inyectado y toma de lechada	56
b.1). Criterio de rechazo	58
c). Extensión de la pantalla	58
d). Inclinación de la pantalla de inyecciones	59
e). Selección del ancho de la pantalla de inyecciones	59
f). Separación de los barrenos	60
g). Tratamiento de empotramientos	60
h). Tapón de inyectado	61
i). Galería de inyectado	62
j). Materiales de inyectado	62
j.1). Cemento ultrafino	63

j.2). Inyectado suplementario con químicos	63
k). Consideraciones geológicas	63
III.2.5. Ejecución de los trabajos de inyectado	64
a). Métodos de inyectado	64
a.1). Sondeo completo	65
a.2). Tramos de regreso	65
a.3). Tramos de avance	66
a.4). Solución mixta	66
b). Disposición de los barrenos y secuencia	66
b.1). Secuencias	67
c). Longitud de etapas	70
d). Orientación	71
e). Pruebas de agua	71
e.1). Lavado	72
e.2). Pruebas de presión	72
f). Resurgencias	72
III.2.6. Casos especiales	73
a). Inyectado de roca cárstica	73
b). Flujo artesiano	74
III.2.7. Evaluación de la eficiencia del inyectado	74
a). Criterio de permeabilidad	74
b). Criterio de toma de lechada	75
III.3. Drenaje	76
III.3.1. Consideraciones de diseño	76
III.3.2. Elementos del drenaje	78

a). Pozos de alivio	78
b). Galerías de drenaje	78
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
- BIBLIOGRAFÍA	88

INTRODUCCIÓN

Las presas representan una de las obras más complejas para la Ingeniería Civil, tanto por la magnitud de la inversión y de los trabajos, como por la dificultad para el análisis y el diseño de las mismas. Por lo que el diseño y construcción de presas, deberán realizarse con sumo cuidado, para minimizar la posibilidad de falla, por el alto costo que ésto representaría.

En el presente trabajo, se describirán los problemas que posiblemente se presentarán al desplantar una presa de tierra sobre roca (se tratarán únicamente las presas de tierra, incluyendo en esta denominación, a las presas de sección homogénea, de materiales graduados y de enrocamiento, con corazón impermeable de suelos finos). Se comentan, básicamente, los problemas geológicos y constructivos, así como los métodos de tratamiento para solucionarlos.

En el primer capítulo, se describen cuales son las principales causas de falla en presas de éste tipo, así como sus mecanismos de desarrollo, así mismo, se presentan los principales problemas geológicos y constructivos que se presentan y algunas consideraciones de diseño del contacto corazón-roca, que se recomiendan observar, con el fin de obtener un diseño seguro y económico.

En la segunda parte, se presenta la metodología a seguir para la obtención de la información necesaria para el diseño de la presa y de los trabajos de tratamiento de la cimentación. Por lo que, se describen las etapas y procedimientos de los estudios geotécnicos y el objetivo a alcanzar en cada etapa.

En el último capítulo, se tratan los diversos métodos de tratamiento existentes, para mejorar las propiedades de la roca de cimentación y/o facilitar los trabajos de construcción en la boquilla; describiendo su funcionamiento para poder seleccionar adecuadamente, según sea el objetivo del tratamiento, el método más eficaz.

Este trabajo, se realiza con el fin de que el Ingeniero que se dedique a la construcción de presas, conozca cuáles son los problemas típicos que se

7

presentan en este tipo de presas y los métodos de tratamiento disponibles para solucionar cada caso. Esperando haber alcanzado este objetivo, queda el presente trabajo,

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

I.1. INTRODUCCIÓN.

A partir de la década de los cincuentas, en nuestro país se empezaron a construir presas de tierra con gran altura; debido principalmente a los avances de la Mecánica de Suelos y a la Mecánica de Rocas, por ejemplo, la presa "El Infiernillo" con 140 m de altura, que se terminó de construir en 1963, presas de semejante altura eran imposible de construir a principios de siglo. Desde entonces, el uso de presas de tierra se ha extendido, por lo que su utilización ha sido mayor que el de las presas de concreto, influyendo también para esto, el menor costo de las presas de tierra.

Aunque la roca es superior a la tierra desde el punto de vista de resistencia y compresibilidad, se tienen mayores problemas en sitios con roca. Ya que la sección impermeable de la presa, tiene que ligarse a la roca de cimentación y empotramientos para prevenir las filtraciones excesivas que se desarrollan a lo largo del contacto entre el terraplén y roca; por lo tanto el problema principal es analizar la filtración que puede ocurrir por abajo y alrededor de la presa, en las fracturas y juntas de la roca y proveer los medios de control de la filtración para no tener riesgo de tubificación y la pérdida de agua sea tolerable.

El tratamiento de macizos rocosos, en los que se desplantará la cimentación de la cortina, para mejorar sus propiedades mecánicas es de suma importancia, ya que de ello depende en gran medida la seguridad estructural de la cortina.

En presas de tierra y enrocamiento, construidas sobre roca, el principal problema es por filtraciones. En algunas ocasiones no es importante la pérdida de agua (presas reguladoras) por lo que no se requerirá un tratamiento especial para reducir la permeabilidad⁽¹⁾. En otros casos es de suma importancia la pérdida de agua por filtraciones (presas almacenadoras), debiéndose reducir al mínimo.

En cuanto a la resistencia y deformabilidad de la roca de cimentación, para presas de tierra y enrocamiento, los esfuerzos que induce ésta a la cimentación son reducidos, en comparación a los que transmite una presa de concreto; por lo que en forma general se acepta que las rocas ofrecen una resistencia suficiente para sustentar presas de tierra y enrocamiento. Las deformaciones serán importantes cuando la roca de cimentación esté muy fisurada y al cerrarse las fisuras bajo los esfuerzos actuantes se presentarán deformaciones en la roca pudiendo ocasionar agrietamientos en la cortina.

Por lo que, de acuerdo al uso de la presa y las características de la roca de cimentación, deberán emplearse uno o más métodos de tratamiento para conseguir el buen funcionamiento de la presa.

I.2. PARTES CONSTITUTIVAS DE UNA PRESA DE TIERRA Y ENROCAMIENTO.

Los elementos esenciales de una presa de tierra y enrocamiento son:

1. Una zona de baja permeabilidad (el corazón) con espesor adecuado para limitar las filtraciones a cantidades tolerables.

2. Un sistema de filtros-drenes para coleccionar y descargar con seguridad, las filtraciones que puedan ocurrir a través del corazón y en la cimentación de la presa.

3. Respaldo para esos elementos, los cuales sirven para protección del corazón y filtros contra el intemperismo y la acción directa del agua, así como para dar mayor estabilidad en su conjunto a la cortina. Los respaldos pueden ser de roca, grava u otro material permeable.

¹ Siempre y cuando estas filtraciones no pongan en peligro la estabilidad de la cortina, por ejemplo, tubificación en el contacto corazón roca.

I.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

Las presas que se construyen con materiales térreos compactados, gravas y roca se pueden agrupar en dos tipos, de acuerdo a su comportamiento:

- Tipo rígido: cortinas construídas totalmente de enrocamiento, con una pantalla de concreto como elemento impermeable.

- Tipo flexible: cortinas homogéneas construídas totalmente de material arcilloso, cortinas construídas con materiales graduados y cortinas de enrocamiento.

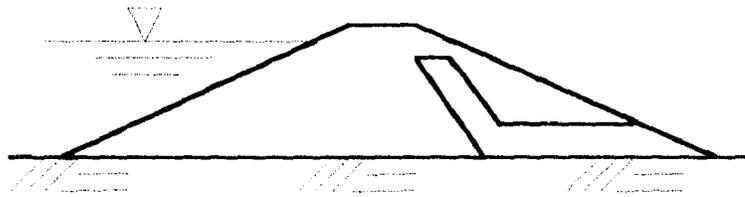
En el presente trabajo, se tratan únicamente las últimas, en la Fig. I.1 se muestran varios tipos de cortina de este tipo.

I.3.1. CAUSAS DE FALLAS EN PRESAS.

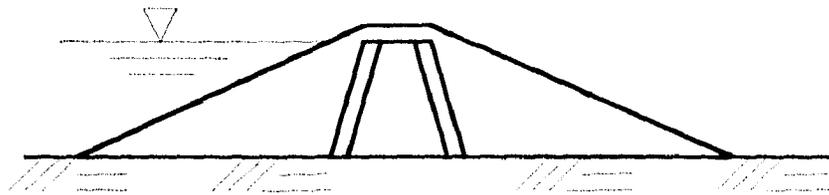
A continuación se muestra una lista de causas de falla en presas, elaborada por Gruner en 1962:

Fallas de la cimentación	40 %
Insuficiencia del vertedor	23 %
Baja calidad en la construcción	12 %
Asentamientos diferenciales	10 %
Alta presión de poro en presas de tierra	5 %
Actos de guerra	3 %
Deslizamiento de taludes	2 %
Materiales defectuosos	2 %
Operación incorrecta	2 %
Sismo	1 %

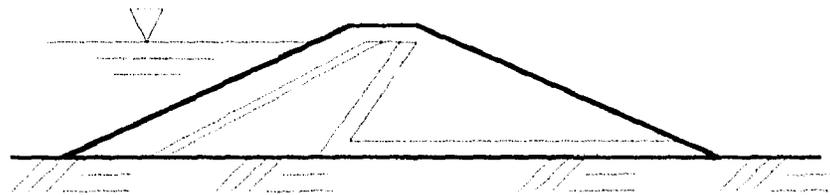
Como se aprecia en esta tabla, un alto porcentaje de fallas es debido a la cimentación, de aquí la importancia de conocer los mecanismos de falla en presas de tierra y enrocamiento para su adecuado tratamiento o prevención.



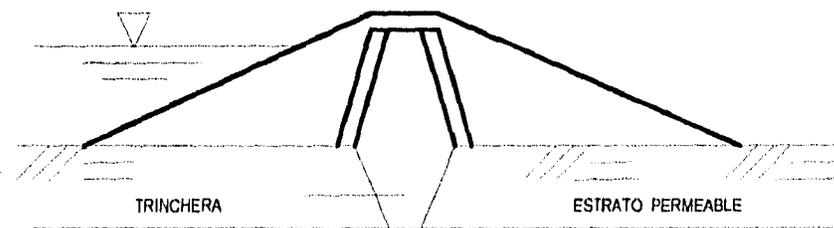
a). Presa de sección homogénea con drenaje integral



b). Presa con corazón impermeable central



c). Presa con corazón impermeable inclinado



c). Presa con corazón central y trinchera impermeable

Fig.I.1-TIPOS DE CORTINAS

La función más importante de una presa es la de almacenar agua para el control de avenidas, para irrigación, para la generación de energía y/o recreación.

a). Causas de falla en presas de tierra y enrocamiento.

Las causas más comunes que originan los mecanismos de falla son:

1. Erosión interna de los suelos finos (ya sea del propio terraplén, de la cimentación o empotramientos), y los problemas de estabilidad originados por la alta presión de poro y/o el gradiente hidráulico, particularmente debajo de la presa en la zona aguas abajo.

2. Desbordamiento de la presa o del vertedor, causados por tormentas inusuales, mala operación de las compuertas de los vertedores o inadecuado diseño de los mismos.

Menos común, pero igualmente importantes, son el desarrollo de posibles licuaciones debido a las altas presiones de poro en capas saturadas de materiales granulares poco compactados, pudiéndose presentar en la cimentación o en el terraplén durante sismos. Además, los movimientos del terreno a lo largo de fallas es un riesgo potencial.

I.3.2. FUERZAS ACTUANTES EN UNA PRESA.

La construcción de una presa y su embalse, imponen una carga sobre las laderas y piso del valle, creando nuevas condiciones de esfuerzos. Esos esfuerzos deberán analizarse ampliamente, asegurando que no exista la posibilidad de falla.

Las presas de tierra tienen un comportamiento semiplástico y la presión sobre la cimentación en cualquier punto depende de la altura de la presa sobre dicho punto.

Las fuerzas verticales estáticas actúan hacia abajo incluyendo el peso de la estructura y del agua, aunque una gran parte de la presa se encuentra sumergida, por lo que el efecto de flotación reduce la influencia de estas fuerzas.

Las fuerzas dinámicas más importantes que actúan sobre una presa son: oleaje, desbordamiento, impacto y sismo.

Las fuerzas horizontales se presentan en las presas por la acción del agua. Si es excesiva, puede causar el deslizamiento en presas de concreto y la falla por deslizamiento de taludes en las presas de tierra.

1.3.3. DISEÑO DE LA CORTINA.

a). Selección del tipo de presa.

Después de los estudios preliminares, tales como las investigaciones de campo, pruebas de laboratorio y de los análisis ingenieriles, se debe tomar una decisión respecto al sitio y al tipo de la presa a construirse. Son muchos los factores que gobiernan la selección del tipo de estructura, pero como en la mayoría de los trabajos de ingeniería, una vez considerados los factores de seguridad adecuados, la selección del tipo de estructura se hace en base a un criterio predominantemente económico. En las décadas recientes esos factores han tendido a favorecer la adopción de presas de tierra y enrocamiento. Las razones para esto son, primero, que la presa puede ubicarse donde la cimentación no puede soportar presas de concreto, y segundo, con los modernos equipos de movimientos de tierra utilizando los materiales localmente disponibles, hacen las presas más económicas, aún donde las condiciones de la cimentación no son favorables. Por lo que, la adopción de las presas de tierra, se debe a la conveniencia de construir una estructura económica y segura con los materiales que existen en la vecindad de la boquilla, teniendo en cuenta las condiciones geológicas que prevalecen en el sitio. Frecuentemente, sin embargo, la selección del tipo de la presa es basada en preferencias personales o la experiencia del diseñador.

b). Requerimientos básicos de diseño.

Los siguientes criterios son tomados del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, para asegurar un comportamiento satisfactorio de la estructura, se debe cumplir que:

1. El terraplén, la cimentación y empotramientos deberán ser estables bajo todas las condiciones de construcción y de operación.

2. Las filtraciones a través del terraplén, cimentación y empotramientos deberán controlarse para evitar las subpresiones excesivas, tubificación, derrumbes, remoción del material por solución o erosión a través de las grietas causadas por el agrietamiento de la cortina, juntas y cavidades en la cimentación. Además, el proyecto deberá limitar las filtraciones.

3. El bordo libre deberá ser suficiente para evitar desbordamientos por olas y deberá incluir una sobre-elevación (contraflecha), para absorber los asentamientos de la cimentación y la cortina.

4. El vertedor deberá tener la capacidad suficiente para evitar desbordamientos sobre al cortina.

c). Comportamiento de las presas de tierra.

Las observaciones de campo y los análisis matemáticos han revelado tres problemas básicos de comportamiento: agrietamiento, efecto de arqueo entre empotramientos y la interacción estructural entre corazón y respaldos.

Además, una gran variedad de tipos de grietas se pueden presentar en la presa, pudiendo ser exteriores o interiores, transversales o longitudinales.

1.3.4. PROYECTO DE CIMENTACIÓN DE PRESAS.

Las presas ejercen grandes esfuerzos de compresión, de corte y filtraciones en la cimentación. Por lo que, los factores que rigen el diseño de las cimentaciones de presas son: los asentamientos, la acción del agua y la estabilidad. Por lo cual, los parámetros que mayor influencia tienen en el diseño, son la resistencia al corte y la resistencia a la compresión simple o no confinada, así como la permeabilidad.

El diseño de la cimentación y empotramientos debe garantizar que los esfuerzos que se generen, estén dentro de los niveles aceptables de acuerdo al tipo de presa y sus condiciones de cimentación.

Respecto a los asentamientos de la presa; éstos deben ser lo suficientemente pequeños, de tal manera que los esfuerzos de tensión en la presa sean pequeños para evitar que la cortina se agriete.

En cuanto a los problemas de estabilidad, se deberá revisar la posibilidad de deslizamiento de la cortina, fallas de talud de la propia cortina, deslizamientos en las laderas, y principalmente la resistencia al corte de la cimentación y poder así, asegurar la estabilidad de la estructura; por lo que la cimentación y empotramientos se deberán considerar como una unidad. El factor de seguridad para la estabilidad, deberá calcularse y juzgarse adecuadamente. En todos los casos, los cálculos requieren un conocimiento de la resistencia al corte de los materiales de la cimentación y de los materiales de la cortina.

El flujo de agua puede ser la causa directa de falla de la presa, cuando produce tubificación, reblandecimiento o subpresión excesiva en la cimentación. Por lo que, la determinación de la permeabilidad en la cimentación es de suma importancia, para evitar o controlar los efectos mencionados.

Además, la pérdida de agua en la presa puede ser o no un factor económico importante para determinados proyectos. Sin embargo, la magnitud y distribución de la presión hidrostática es un factor clave en la determinación de la estabilidad al deslizamiento, potencial tubificación, y la necesidad para costosas inyecciones y/o drenajes.

El diseño final para la cimentación de una presa segura y económica, está dado principalmente por las características de la roca de cimentación y la profundidad de excavación a realizar en la cimentación, así como por las especificaciones de construcción de la presa y el tratamiento de la cimentación.

Por lo tanto, como las presas de tierra tienen taludes tendidos y los esfuerzos de cortante inducidos a la cimentación son normalmente bajos, se acepta generalmente, que la mayoría de las cimentaciones de roca pueden resistir adecuadamente a las presas de tierra. Solo en el caso de roca muy débil, con orientación adversa de los planos de debilidad, y particularmente donde la presión de poro puede desarrollarse, pueden existir problemas de deslizamiento con presas de tierra.

1.3.5. DISEÑO DEL CONTACTO CORAZÓN-ROCA.

Aquí se realiza una breve descripción del diseño del contacto corazón-roca. En el que se deberán alcanzar los siguientes objetivos en el área de contacto:

1. La roca debajo del corazón, incluyendo el material presente en las fallas o juntas de la roca, deberá ser no erosionable, o protegerse de la erosión debido a la acción de las grandes fuerzas de filtración que se desarrollan bajo el corazón y por lo tanto no deberá degradarse.

2. Las filtraciones que pasen a través de la cimentación deberán ser controladas y descargadas; de tal forma que no se desarrollen presiones excesivas de filtración en el respaldo aguas abajo, en los materiales debajo del respaldo o aguas abajo de la presa.

3. Se deberá dar cuidadosa atención al diseño de la geometría del contacto superficial corazón-roca, para asegurar que los esfuerzos en el contacto permanezcan como deformaciones de la presa bajo las cargas gravitatorias y las del agua.

Por lo que, particular cuidado requieren los sitios en cañones escarpados y estrechos, ya que en estas condiciones, los taludes aguas abajo en el fondo del valle o en las laderas pueden divergir significativamente aguas abajo. Un corazón central bajo tales circunstancias puede estar sujeto a deformaciones o movimientos tendientes a separar el corazón de la roca. Esto puede evitarse reorientando el corazón en planta o en sección transversal o relocalizando la presa; moviendo el eje a una posición ligeramente aguas arriba de la boquilla sobre un empotramiento o de otra forma que sea deseable, aún cuando se requieran volúmenes ligeramente mayores en el terraplén.

Los corazones inclinados de las presas, son más tolerantes de las paredes empinadas y divergentes o valles con fondo inclinado que el corazón

central vertical de las presas comunes; porque el corazón es presionado hacia abajo contra la pendiente del empotramiento bajo la carga del agua. Por esta razón, los corazones inclinados de las presas deberán considerarse seriamente cuando se presenten problemas con la geometría contacto corazón-roca.

En ocasiones, las presas son arqueadas en planta, de tal forma que el empuje del agua induce esfuerzos de compresión paralelos al eje, ayudando así a prevenir el agrietamiento transversal. La diferencia entre longitud de cuerda y arco es pequeña para la geometría usual. Las deformaciones y esfuerzos inducidos por el arqueado son pequeños. Los costos de supervisión para la disposición son más caros que para un eje recto y hay riesgos mayores de errores en los trabajos, especialmente para los filtros. Por consiguiente para muchos sitios es dudoso si el arqueado es de ayuda.

Remover el material subyacente bajo los respaldos de aguas arriba o abajo puede ser necesario o no. Es necesario si se presentan asentamientos excesivos bajo su peso o si el material subyacente es tan débil que se produzcan deslizamientos o si el paso de filtraciones que se presenten a través del corazón impermeable o a través de los materiales de cimentación no pueden controlarse y descargarse adecuadamente.

En la evaluación y planeación para la excavación y control de filtraciones, deberá darse especial atención a las discontinuidades de la roca, tales como fallas y juntas de relajación de esfuerzos, que pueden extenderse por grandes distancias y muy cercanas a la superficie. Las juntas de relajación pueden existir naturalmente o presentarse durante la excavación. Es más probable que ocurran en valles profundos y empinados, especialmente en roca quebradiza o donde hay roca con un alto módulo de elasticidad subyaciendo a roca con bajo módulo. Las juntas son más o menos paralelas a las laderas y pueden causar deslizamientos durante la construcción.

I.4. PROBLEMAS EN LA CIMENTACION.

Desde el punto de vista de la planeación del tratamiento, la roca tiene varias características principales de interés para el proyectista: 1) forma o topografía de la superficie, 2) dureza y 3) permeabilidad y naturaleza del sistema de fracturas; cada una de estas propiedades varía entre amplios límites.

La topografía puede ser plana, lisa con cambios graduales en los taludes, en los que es relativamente fácil compactar el terraplén. Por otro lado, la roca puede ser escarpada, irregular, dentada, en este caso es más difícil obtener una buena unión entre el terraplén y la cimentación.

La dureza de la roca de cimentación varía de la sumamente sólida (roca ígnea intrusiva) que sólo puede ser excavada usando explosivos, hasta la suave (roca sedimentaria o meteorizada) que puede ser excavada fácilmente con equipo de movimiento de tierras. En roca dura, hay siempre una superficie definida entre el terraplén y la cimentación y es difícil compactar el terraplén en la zona adyacente a la roca dura. En la roca suave puede formarse una superficie "lisa" en la que es posible usar rodillos.

I.4.1. PRESENCIA DE AGUA.

a). Filtraciones.

El agua almacenada en una presa siempre busca escapar, ocasionando así cuatro problemas básicos de filtraciones, que pueden causar serias dificultades y en algunas ocasiones, hasta puede causar la falla total.

1. Tubificación, que ocurre cuando el agua acarrea partículas de suelo y las mueve hacia salidas no protegidas, desarrollando canales o tubos no visibles a través de la presa o su cimentación.

2. Empuje o falla de taludes (incluyendo desprendimientos) causados por las fuerzas de filtración.

3. Fenómenos físico-químicos, posibles cambios de las propiedades de la roca por la presencia del agua.

4. Pérdida excesiva de agua, esto puede reducirse empleando alguno de los métodos básicos para controlar las filtraciones, como son: el uso de filtros para prevenir la tubificación y empujes, reducción de filtraciones mediante algún tratamiento.

El estado de saturación a que quedan sometidas las boquillas en donde se construye la cortina, cambia las propiedades mecánicas de los materiales, causando erosión, fundamentalmente en el contacto corazón-roca, así como erosión o degradación de la roca por efecto de saturación en las paredes de excavación.

La presión de poro dentro de la cimentación es una fuerza variable que actúa en todas direcciones. Su determinación es un factor fundamental en el diseño de la presa y en el estudio de la estabilidad de los taludes adyacentes. Reduce la resistencia a la compresión de la roca y causa un incremento en la cantidad de deformación que soporta. La presión de poro también causa "esponjamiento" en ciertas rocas y una aceleración en su degradación. El agua de poro en roca estratificada de la cimentación, reduce el coeficiente de fricción entre las capas individuales y entre la cimentación y la presa. Así mismo, el incremento de la presión de poro puede elevar las capas y la presa

misma y reducir tanto la resistencia al corte como la resistencia al deslizamiento dentro de la masa de roca.

Por esta razón, cada presa de considerable importancia deberá instrumentarse con piezómetros, pozos de observación y dispositivos de medición de filtraciones. Ya que una adecuada instrumentación y observación de las presas de tierra y la corrección de cualquier condición insegura es una parte importante de todo proceso de diseño. Causa por la cual se requiere en algunos casos estudios cuidadosos de mecánica de rocas.

La tendencia en el diseño, es tolerar filtraciones mientras no afecten la operación económica de la presa, y prever un sistema de drenaje que es más económico que una pantalla de inyecciones. Este sistema de drenaje deberá ser adecuado para prevenir la erosión y compensar las fugas con las descargas.

b). Modificación del nivel y flujo de aguas subterráneas.

El nivel del agua en el embalse y los elementos de impermeabilización incorporados dentro de la cimentación y empotramientos; aún antes del llenado, pueden en casos especiales, afectar la estabilidad de los empotramientos.

El agua de lluvia, que tenía su drenaje natural hacia el embalse antes de la construcción de la pantalla, es forzada a buscar caminos de drenaje más lejos hacia aguas abajo, incrementando las fuerzas de subpresión en esta peligrosa zona.

c). Sismicidad inducida por el embalse².

En los últimos años, han aumentado los reportes de actividad sísmica que pueden acompañar la construcción de grandes presas y sus embalses. La siguiente lista está relacionada con el llenado del embalse y un incremento de la actividad sísmica regional:

- La actividad sísmica está relacionada más bien con el llenado del embalse que con la construcción de la presa.

- La actividad sísmica aumenta considerablemente después del llenado del embalse.

- La actividad sísmica aumenta y disminuye con las fluctuaciones del nivel del agua y los sismos más severos siguen después de las velocidades más altas de llenado.

² Ver referencia 20.

- La sismicidad no está relacionada aparentemente con el volumen almacenado y la actividad tiende a ser más evidente, cuando la profundidad del agua es mayor a los 100 m.

- Aunque la actividad sísmica, puede iniciarse tan pronto como se inicie el llenado, la máxima actividad muestra un retraso después de alcanzado el máximo nivel del embalse. La sismicidad está relacionada con la velocidad de llenado, con un llenado rápido, se inducen más sismos.

- Los eventos inducidos por el embalse, se caracterizan por presentar focos relativamente poco profundos y magnitudes modestas, no más de 6 ó 6.5 grados en la escala de Mercalli en la mayoría de las veces.

- En muchos casos, a las fuertes sacudidas les siguen numerosos temblores, incrementándose en magnitud y frecuencia.

- Condiciones especiales geológicas son aparentemente necesarias para la sismicidad asociada al embalse.

En los sitios que pueden estar sujetos a sismicidad inducida, deberá contarse con la asesoría de un especialista en sismología, y diseñar la presa y las estructuras complementarias con el máximo sismo que se pueda presentar.

1.4.2. DEFORMABILIDAD.

Las deformaciones que la presa induce en la cimentación son de gran importancia, ya que son la causa principal de agrietamiento en la cortina. Esto es un aspecto secundario en presas de tierra y enrocamiento desplantada en roca sana; salvo casos especiales, para fines prácticos se considera rígida la cimentación.

Cuando se desplanta el corazón impermeable sobre roca, usando una trinchera para atravesar una formación permeable, apoyando sobre ésta los enrocamientos, el asentamiento de éstos respecto al núcleo produce grietas longitudinales, localizadas en el centro o en la frontera de los respaldos permeables.

Otro aspecto que no se debe olvidar, es el del bordo libre, ya que por los asentamientos excesivos de la cimentación y de la cortina, éste se puede perder.

a). Expansiones en la cimentación.

Cuando se realiza una excavación, se remueven volúmenes considerables de material del frente de excavación, por lo que éste, tiende a moverse ligeramente hacia arriba ("rebote"). El problema del rebote puede ser serio, si durante la construcción, una capa gruesa de material inestable es

removido del sitio. La cantidad de la expansión depende del módulo de elasticidad, mientras más grande el módulo más pequeño el rebote. La situación se complica, si la cimentación es de más de un tipo de roca con diferentes propiedades físicas, esto puede provocar expansiones diferenciales.

El proceso de la expansión, generalmente toma considerable tiempo para completarse y continuará, aún después de que la presa ha sido construída, si la presión de rebote o el esfuerzo ya desarrollado por el material de la cimentación excede el peso efectivo de la presa. Para contrarrestar el efecto de levantamiento, la presa deberá imponer una carga mayor o igual sobre la cimentación.

1.4.3. ESTABILIDAD.

Una presa puede ser tan estable como la cimentación que la sustenta y ambas deberán tratarse como partes inseparables de un todo.

La estabilidad de un macizo rocoso en su conjunto con la presa, depende directamente de la resistencia al esfuerzo cortante de sus principales discontinuidades geológicas (planos de estratificación, grandes diaclasas, fallas y otras), éstas tienen, en general, una resistencia a la tracción prácticamente nula, mientras que el valor de su resistencia al esfuerzo cortante depende de la rugosidad de las paredes, del material de relleno y de la imbricación de los bloques individuales.

a). Estabilidad de taludes.

La distribución geométrica de las discontinuidades geológicas, que atraviesan el embalse y el sitio, pueden limitar bloques en el macizo rocoso, que pueden volverse inestables con el llenado del vaso.

Los agentes externos que afectan la estabilidad de los taludes son variados, siendo los siguientes los más importantes:

- Llenado o vaciado rápido del embalse.
- Saturación de las masas de roca y pérdida de la resistencia al corte.
- Alteración del régimen hidráulico en las laderas e incremento de la presión de poro en las discontinuidades debido al llenado.
- Actividad sísmica.
- Alteración del estado local de equilibrio debido a los trabajos de construcción (excavaciones).

- La carga de agua en el embalse y reactivación de los movimientos en bloques de roca limitados por fallas.

Las fallas de los taludes han causado serios problemas, como son los retrasos en la construcción, reducción en la capacidad de almacenaje, colapso de túneles y generar una ola que rebasa la corona de la presa, pudiendo destruir la cortina.

En vista de los problemas que generan los deslizamientos en el embalse o cerca del sitio, es necesario estudiar el problema a fondo en las etapas de exploración y diseño, introduciendo medidas correctivas, tales como: proveer de drenaje los empotramientos, excavar las masas potencialmente inestables, estabilizar los taludes con anclaje, determinar la velocidad de llenado y vaciado del embalse e incrementar el bordo libre, para evitar que una ola causada por el deslizamiento de roca pueda rebasar la cortina, o abandonar el sitio.

I.5. PRESAS SOBRE CIMENTACIONES CON PROBLEMAS GEOLÓGICOS ESPECIALES.

La creciente necesidad de construir presas sobre sitios problemáticos con completa seguridad, actúa como un estimulante para desarrollar más la ingeniería de presas.

Se presenta en esta sección, varios casos en los que el criterio geológico es aplicado para el análisis y toma de decisión.

I.5.1. CIMENTACIONES SOBRE ROCA CÁRSTICA.

El fenómeno de carsticidad en la cimentación está siempre relacionado con grandes pérdidas de agua inaceptables, debido a que la presión del embalse causa erosión del material de relleno de los canales cársticos o de capas solubles intercaladas en el cauce, o la presencia de cavidades.

Si la mayor parte del área del embalse muestra fenómenos de carsticidad lo más probable es que impida el llenado del embalse.

Además, cualquier canal cárstico, que sea sometido a presión y que escape a la detección y consecuentemente no sea tratado, puede provocar cambios en el nivel de aguas subterráneas, presión intersticial y condiciones de subpresión; pudiendo poner seriamente en peligro la estabilidad de la

cimentación y empotramientos, mientras que una salida excesiva del gradiente aguas abajo, puede causar erosiones peligrosas, por lo que, en general, la resistencia es raramente un problema en este tipo de rocas.

I.5.2. CIMENTACIONES SOBRE FALLAS Y OTRAS DISCONTINUIDADES.

La presencia de una falla es razón suficiente para que cualquier ingeniero de presas proceda con gran cuidado y particular minuciosidad en sus investigaciones, no importa que tan favorables puedan ser las formaciones geológicas.

Hay también otras discontinuidades mayores que aunque frecuentemente menos notables y más difíciles de detectar, tal vez no menos problemático para el proyecto de una presa; estos pueden ser zonas poco resistentes de unos cuantos metros de espesor, intercalaciones de unos pocos centímetros, o raramente, juntas maestras abiertas; pero todas ellas representan la extensiva discontinuidad de la roca con los parámetros geotécnicos que son claramente inferiores a los de la roca adyacente. Cuando tales discontinuidades pasan a través de una sección mayor de la cimentación de una presa o sólo ligeramente abajo, se pueden presentar grandes problemas con respecto al deslizamiento de la presa, en obras auxiliares y sus empotramientos, con respecto a la filtración en conexión con la subpresión y el peligro de tubificación y erosión, así como también la excesiva compresibilidad y asentamientos diferenciales que la presa puede sufrir al llenarse.

a). Fallas.

Las grandes fallas frecuentemente representan la característica tectónica de una región completa. Algunas veces las fallas han establecido el curso actual del río sobre el que se construirá la presa, y aún si no pasan a través del sitio de la propia presa, sus sistemas de fallas secundarias y zonas de corte pueden ser un factor perjudicial sobre la estructura y su calidad. Además, las fallas regionales son de significado decisivo para el riesgo sísmico del sitio.

La pregunta crucial en la evaluación de una falla, deberá incluir: el problema de la sismicidad inducida por el embalse y su potencial reactivación. Un resultado insatisfactorio de este aspecto, tal vez sólo necesite abandonar el sitio. Sólo en pocos casos excepcionales se han construido presas sobre fallas consideradas activas y son presas de terraplén relativamente pequeñas con una zona especialmente estructurada.

Las zonas de falla, que varían en ancho dependiendo de la calidad de la roca original y la intensidad del desplazamiento relativo y que pueden estar sujetos a los proceso de erosión y desintegración o aún de carsticidad, generalmente son muchas veces más compresibles que la roca adyacente. Estas también sufren una gran reducción de su resistencia al corte, que

normalmente puede determinarse como la resistencia residual en pruebas de laboratorio. Éstas pueden ser completamente permeables o tal vez formen un corazón impermeable de material particularmente fino localizado entre dos zonas más permeables.

Las zonas de falla reducidas, localizadas entre roca sólida en el contacto de la cimentación y de la presa o en sus inmediaciones son generalmente tratadas mediante una excavación a una profundidad de dos o tres veces el ancho y relleno con concreto. Estos rellenos ayudan a la falla a soportar las cargas de la presa o a transmitir las fuerzas de empuje hacia dentro de la roca o hacia abajo. Soluciones excepcionales pueden requerirse, donde las zonas de falla sean muy anchas, o existan superficies potenciales de deslizamiento o altamente permeables.

Muchas fallas, especialmente las más pequeñas o coexistentes de fallas mayores, no son problema por sí solas, pero si lo son en combinación con otras zonas de corte y discontinuidades.

b). Zonas de corte.

Aparte de las fallas, existe otra clase de zonas de corte que pueden reducir considerablemente la calidad del sitio de una presa y provocar problemas de diseño y construcción, porque son capas de debilidad que pueden ser continuas en una área considerablemente grande y presentan un valor de cohesión de cero y un ángulo de fricción muy bajo o el mismo valor al residual, tal como una zona delgada de corte continua originada de pequeños movimientos diferenciales, asociados con plegamientos o fallamientos causados por compresión lateral en la corteza, esfuerzos horizontales debido al hundimiento regional, o de alivio de esfuerzos a lo largo del valle. La diferencia de las fallas es que los desplazamientos diferenciales tienden a ser relativamente pequeños, los espesores varían de unos pocos centímetros a unos cuantos decímetros y la orientación tiende a ser paralela a la foliación en rocas metamórficas ("foliación por corte").

c). Zonas débiles, con fisuras y otras discontinuidades.

La interestratificación y grietas de roca poco resistente que favorece la foliación o estratificación de corte, representan zonas potenciales de falla aún antes de que cualquier desplazamiento relativo haya ocurrido y por lo tanto merece la misma atención que las zonas de corte, especialmente si están afectados por la alteración y decementación.

Esto es igualmente cierto para discontinuidades como diques y varias vetas muy próximas.

Todas las masas de roca presentan en menor o mayor grado las juntas. Éstas exhiben una gran variación en su grado de continuidad, rugosidad de sus planos, alteración química y clase de rellenos, factores que afectan la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de sus superficies. Las siguientes clases de juntas han probado ser débiles y perjudiciales para los proyectos ingenieriles. Juntas intemperizadas, tienen una gran continuidad y son más

abiertas por la relajación de esfuerzos cercana a la superficie, éstas pueden contener arcilla y tienen poca resistencia por la alteración química y debilitamiento de las asperezas superficiales. Juntas maestras, pueden formar parte de un sistema de juntas, pero mucho más separadas que las intermedias, son menos continuas, las juntas paralelas frecuentemente tienen una separación de 30 a 300 m, éstas están abiertas y alteradas secundariamente (intemperización, alteración hidrotermal o rellenas). Juntas de corte, pueden estar tan separadas como las anteriores o menos, están frecuentemente estriadas y acanaladas en una dirección y pueden contener depósitos de minerales, tales como clorita, óxidos de hierro, sericita y otros.

Las juntas en roca fresca, no causan generalmente problemas excepcionales a menos que estén abiertas, meteorizadas o sin rellenar las juntas maestras.

1.5.3. CIMENTACIONES SOBRE ROCA SUAVE, INTEMPERIZADA O FRACTURADA Y/O SOBRE ROCA VOLCANICA.

a). Roca suave e inalterada.

Una roca fresca, sólida y suave - que son normalmente las rocas sedimentarias, tales como las lutitas, margas, areniscas no consolidadas, y otras - no es problemático con respecto a la resistencia y deformabilidad, a menos que la saturación y el embalse le causen deterioro o si esfuerzos excepcionalmente grandes son colocados sobre ellos por presas muy altas o de diseño especial. Las presas de terraplén, que son tan eficientes en la distribución de la carga, muy raramente sufren de tales problemas, sólo en los casos de unas pocas presas excepcionalmente altas que tienen un corazón de concreto colocado sobre el estrato suave en el piso del valle, apoyado sobre un inyectado de consolidación.

b). Roca intemperizada, alterada, o fracturada.

La intemperización empieza en un proceso destructivo de la superficie por descomposición de ciertos minerales, con incremento de la debilidad y desintegración de la roca, hasta completar la transformación, con el granito y areniscas produce arena y de la lutita o marga produce arcillas.

A lo largo de los planos de esfuerzos cortantes, juntas, fracturas, contactos y estratos, cuyos efectos negativos como la separación de planos se intensifica, la meteorización se extiende hacia el interior de la roca en una proporción desigual y eventualmente dejando debajo tres sistemas de capas de variación característica, con frecuencia muy irregular y límites transitorios. Entre una capa superior de suelo residual y la roca meteorizada subyacente, hay una zona intermedia con roca en muy variados estados de meteorización. En este nivel intermedio, sobre una porción inferior parcialmente meteorizada,

se encuentra una zona de transición, que no es roca ni suelo y por eso es más difícil su evaluación y su tratamiento.

En esas zonas, que han sido debilitados en varios grados por el intemperismo y la alteración, y generalmente muy heterogéneos, la pregunta básica es la de la necesidad y posible profundidad de los trabajos de excavación, la factibilidad de la consolidación y especialmente de los trabajos de sellado. La roca que está afectada por la meteorización en su propia matriz, es generalmente desfavorable para la construcción de presas altas de concreto. En general, en roca intensamente meteorizada es mejor construir presas de tierra, que raramente dan problemas de resistencia, pero en cambio dan problemas de permeabilidad. (resultando posiblemente en peligrosas erosiones) y en algunas ocasiones en asentamientos diferenciales.

c). Rocas volcánicas.

La cimentación en roca volcánica es sinónimo de que los problemas de la cimentación requieren: exploraciones intensivas y generalmente extensivas. Las dificultades derivan de la extraordinaria heterogeneidad de los materiales, así como su irregular patrón de distribución.

La roca volcánica que menos problemas manifiesta, son las formaciones ampliamente extendidas formadas por flujos basálticos de gran extensión con intercalaciones de varios espesores de brecha y escoria, de lutitas, arena o limo. Esas capas horizontales involucran problemas de deslizamiento horizontal y excesiva permeabilidad de las capas interestratificadas.

El alto grado de complejidad y dificultad que deben esperarse de los sitios formados por productos de erupciones de volcanes cercanos, formados por basalto duro, frecuentemente fracturado, andesitas y riolitas, así como también, todos los grados de baja densidad, baja resistencia, bajo módulo de deformabilidad de rocas piroclásticas, su comportamiento depende del grado de endurecimiento alcanzado, tales como muchos tipos de lava, tobas, pumitas, cenizas y flujos de lodo, que sufrieron un cambio metamórfico por contacto de calor o afectadas por alteración de fuerzas de corte.

Se ha observado que el enfriamiento de la roca, al llenar el vaso contribuye a que las fracturas ya tratadas con inyecciones se abran nuevamente, al hacer las exploraciones geológicas, se registraron temperaturas de 30 a 35 °C en la roca, mientras que la del agua almacenada es de 10 a 20 °C en promedio. Este factor puede ser importante en países con clima semejante al de México.

CAPÍTULO II

ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

II.1. INTRODUCCIÓN.

El comportamiento de un macizo rocoso sometido a una variación de esfuerzos queda determinado por las propiedades mecánicas del material rocoso y por el número y naturaleza de las discontinuidades geológicas existentes.

En la construcción de las cortinas, que se diseñan para sellar completamente el flujo de agua (superficial y freática), la reacción de la presa al resistir la presión del agua embalsada, genera cuatro problemas geológicos básicos: 1. Determinación de la resistencia de los apoyos subyacentes de cimentación y su capacidad de soportar las cargas que se generan; 2. Determinación del grado de impermeabilidad de los apoyos de cimentación en la ubicación de la cortina y las medidas requeridas para convertir en impermeable los estratos geológicos subyacentes; 3. el estudio del efecto de la prolongada exposición al agua de la roca y 4. la investigación de la posibilidad de movimientos de tierra en el lugar de la cortina y la determinación de las medidas de protección que deben tomarse. Por lo que es de suma importancia su identificación en las primeras etapas de investigación, para determinar adecuadamente la magnitud de cada problema y sus posibles consecuencias, así como las posibles soluciones. De lo anterior, se deduce la gran importancia de los estudios geotécnicos en las etapas de diseño, construcción y operación del proyecto. En este capítulo se verá cual es la forma más adecuada de planear la ejecución de los estudios geotécnicos.

II.2. ETAPAS DE EXPLORACIÓN.

La exploración del sitio de una presa es el conjunto de acciones técnicas, de campo y laboratorio, que proporcionan el conocimiento geotécnico necesario para el diseño y construcción de la presa. Este proceso se inicia con los estudios de factibilidad, se desarrolla para el diseño y continúa durante la construcción.

La exploración debe ejecutarse en etapas, debiéndose programar y ejecutar de manera que la bondad del proyecto se determine lo más pronto y con el menor costo posible.

Hay muchas formas de dividir la secuencia del diseño, y paralelamente, el reconocimiento de la cimentación en etapas individuales, definida cada una por el nivel u objetivo ha alcanzar y determinado por los métodos de investigación a usar. Para esto se puede dividir en las siguientes etapas: prefactibilidad o de reconocimiento, de factibilidad, de diseño final y construcción, seguido por la supervisión y monitoreo durante su operación.

El objetivo de esta división es evitar gastos innecesarios, si las primeras exploraciones demuestran que en el lugar existen condiciones desfavorables no previstas en un reconocimiento superficial, y si las medidas para solucionar estos problemas son muy costosos se puede tomar la decisión de cambiar de sitio e iniciar otra vez el proceso de exploración. En la fig. II.1. se muestra como la secuencia descrita, es un proceso complejo a causa de que siempre está abierta la posibilidad de que surjan problemas que no fueron advertidos anteriormente y que por su importancia deben ser incluidos en el programa de exploración, ya que pueden ocasionar modificaciones significativas al proyecto e incluso obligar a abandonar el sitio.

II.2.1. ETAPA DE RECONOCIMIENTO O PREFACTIBILIDAD.

Su finalidad es identificar las características geológicas y geotécnicas para prever los posibles problemas que se puedan presentar, se realiza para sostener la decisión de proseguir con investigaciones más detalladas, tomando como base datos generales y estudios abreviados.

a). Objetivo.

Se hará una selección y evaluación preliminar de las opciones de sitios de la presa y de diferentes tipos. Disposición de la presa y las estructuras complementarias. Fuentes potenciales de los materiales de construcción cercanas. Comparaciones preliminares de costos. Decisión y preparación para el estudio de factibilidad.

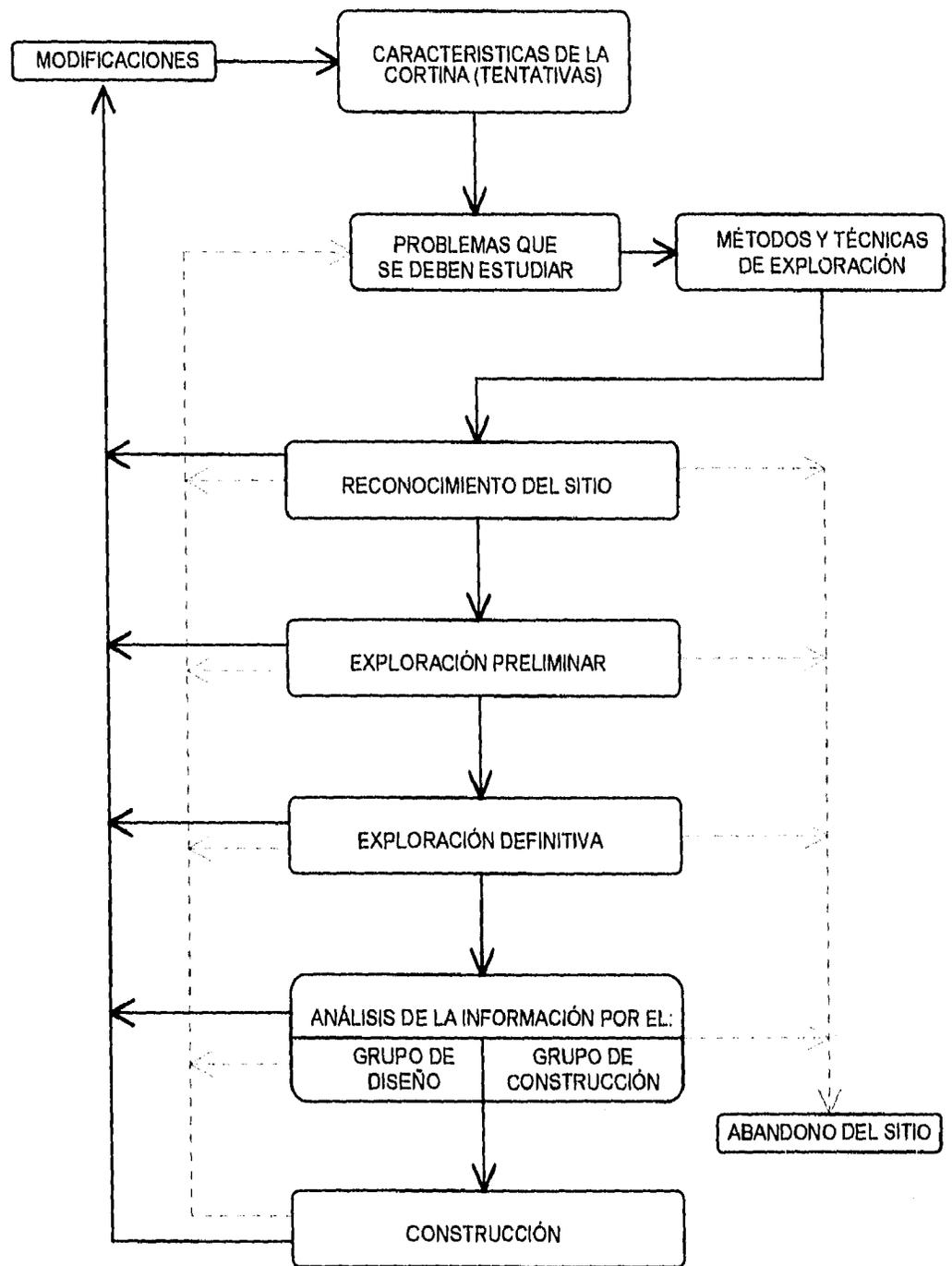


Fig. II.1- SECUENCIA DE LA EXPLORACION DE UN SITIO.

b). Nivel de reconocimiento.

Evaluación general de la geología del sitio de la presa y del embalse como parte de la geología regional, para obtener la historia de su geomorfología o sismicidad y posibles esfuerzos de la corteza, determinando también la litología, explicando los procesos tectónicos y de erosión por los que la topografía del sitio se formó, revelando los sistemas mayores de fallas, valles enterrados, caídos de taludes, deslizamientos, preconsolidación glacial o la existencia de formaciones cársticas. Reconocimiento de las condiciones críticas y construcciones riesgosas, indicando las zonas de debilidad y potencialmente problemáticas, o características inciertas para investigaciones posteriores. Primera estimación del relleno, profundidad de intemperización y excavación necesaria y otros datos básicos.

c). Métodos de investigación.

Se realizará un estudio de todos los mapas relevantes geológicos y reportes disponibles; fotointerpretación que revele las mayores estructuras geológicas, incluyendo fotografías de satélite con diferenciación de color, fotos de rayos infrarrojo y otros. Revisión geológica de campo y mapeo. Sólo excepcionalmente, se realizarán pruebas geofísicas, barrenos y socavones.

II.2.2. ETAPA DE EXPLORACION PRELIMINAR O DE FACTIBILIDAD.

En esta etapa se obtiene información básica que permite definir y jerarquizar los problemas geotécnicos que se presenten, mediante la recopilación y análisis de la información existente y reconocimientos de campo.

a). Objetivo.

Se realizará la comparación de alternativas y se tomará la decisión final sobre el sitio, tipo y localización de la presa y estructuras complementarias de ésta. Refinamiento del diseño preliminar con mayor precisión, ya sea con la topografía disponible o la preparada, ajustada para incrementar el conocimiento de la geología de la cimentación y sus problemas. Evaluación de las áreas potenciales de los bancos de materiales. Estimación del costo, evaluación de la factibilidad técnica y económica, así como también, la decisión sobre el diseño final.

El área a explorar estará determinada por la topografía, geología y tipo de la presa, y se realizará de la siguiente manera. Marcando sobre el mapa topográfico, la corona de la presa y extendiendo los ejes de la presa a una distancia igual al doble de la altura de proyecto de la presa, más allá del fin de la corona en cada lado. Después en cada lado de la corona, se dibujarán dos líneas perpendiculares a los ejes prolongados, que tengan una longitud de cuatro veces la altura de la presa en ambas direcciones aguas arriba y abajo.

El área a explorar será la comprendida entre las líneas dibujadas. Sin embargo, en casos de una topografía o geología peculiar, puede ser necesario modificar el área de acuerdo a las circunstancias.

b). Nivel de reconocimiento.

Deberá obtenerse un bosquejo de la estratigrafía y de la estructura geológica del lugar, así como también, distribución de los estratos de roca o si es roca masiva, dirección y echado de los estratos, esquistocidades y planos de juntas.

Identificación completa de todas las características geológicas mayores que puedan afectar el tipo, la disposición y diseño de la presa, tales como fallas, zonas de corte, grietas y otras discontinuidades de las formaciones rocosas, zonas de debilidad o especialmente zonas de alta permeabilidad, viejos o potenciales deslizamientos, localización de manantiales y pérdidas de agua superficial, presencia de cavidades, depresiones, fumarolas de gas, u otras características críticas. Información confiable sobre la profundidad del material de relleno y profundidad a excavar en la roca.

Suposición de los parámetros ingenieriles para los cálculos preliminares de análisis de estabilidad usando valores conservadores de pruebas anteriores o materiales similares. Estas características pueden ser: dureza, peso, absorción, componentes solubles (yeso, conchas, aglomerado calcáreo), materiales orgánicos, material que presente expansiones, resistencia, elasticidad y permeabilidad. Así como posibles requerimientos de tratamiento especial de la cimentación.

c). Métodos de investigación.

Revisión y complementación del mapeo geológico, mediante la observación de los afloramientos, soportado por barrenos (incluyendo la prueba de permeabilidad y otras), cortes, pozos de exploración y socavones, así como también los métodos geofísicos de exploración y fotografía aérea en zonas de difícil acceso. También se pueden requerir pruebas de laboratorio y pruebas limitadas *in situ*.

II.2.3. EXPLORACION DEFINITIVA O DE DISEÑO FINAL.

En esta etapa se obtiene la información necesaria para el análisis confiable de los problemas encontrados, complementando la información y verificando aspectos dudosos.

a). Objetivo.

Obtención de los datos geológicos necesarios para el diseño definitivo y detallado de la presa, determinando los trabajos y las obras complementarias para planos y especificaciones.

b). Nivel de reconocimiento.

Definición exacta de la geología del sitio y del embalse, así como una presentación detallada de reportes, mapas, secciones o modelos tridimensionales de todos los datos sobre:

- litología del sitio, extensión y condiciones de las diferentes formaciones, profundidad y grado de intemperismo o desintegración;

- profundidad, tipo y características del material de relleno en el cauce;

- orientación, espaciamiento y continuidad de fallas, zonas de corte, grietas, juntas y planos de estratificación. Orientación de los planos de esquistocidad. Condiciones superficiales de las juntas, espesores y tipo de rellenos en las fallas o zonas de corte; desplazamiento total y la relación con la sismicidad regional;

- nivel del agua subterránea, permeabilidad (características de carsticidad), posibles condiciones de subpresión sobre la presa y potenciales fallas superficiales, fugas, inyecciones y drenaje requeridos;

- límites de masas de roca potencialmente inestables determinadas por planos potenciales de falla, posible falla potencial bajo la carga de la presa y del embalse; esfuerzos residuales;

- características de la roca, resistencia a la compresión sin confinamiento, peso específico y absorción, durabilidad, velocidad de la onda elástica, contenido de materiales solubles y/u orgánicos, así como material que pueda presentar expansiones;

- determinación de los parámetros ingenieriles para la cuantificación de la resistencia (resistencia al esfuerzo cortante y coeficiente interno de fricción), deformabilidad (módulo de elasticidad o coeficiente de deformación) y permeabilidad;

c). Métodos de investigación:

Revisión geológica detallada, basada sobre barrenos orientados específicamente (incluyendo pruebas), trincheras, socavones o pozos para la aclaración de cualquier incertidumbre existente hasta esta etapa. Desmonte de la roca de cimentación antes de que avancen los trabajos de construcción. Pruebas *in situ* en las exploraciones abiertas, pruebas complementarias de laboratorio.

II.2.4. CONSTRUCCION.

Con el inicio de los trabajos de construcción, todas las investigaciones ejecutadas se ponen a prueba. A la vez, esta etapa involucra la preparación de la superficie de la cimentación, ya que se realizan los siguientes trabajos: el corte de varias galerías para accesos (la obra de toma u otros propósitos), y finalmente el barrenado y pruebas de presión de la pantalla de inyecciones, esto representa la fase más completa en la exploración de la cimentación. Por lo que se deberá realizar un cuidadoso registro de todos los detalles que se vayan descubriendo, para integrarlo al modelo geológico y realizar una comparación continua con las suposiciones que se hicieron antes de la excavación, esto es necesario para las correcciones necesarias.

Sólo en los casos de una muy clara condición geológica, esta etapa deberá completarse sin la necesidad de alteraciones al proyecto, a pesar de esto, tal vez sea necesario realizar ajustes locales a la profundidad de la cimentación.

El tratamiento de la cimentación, frecuentemente involucra mas mediciones extensivas que las originalmente previstas. Los resultados de la excavación pueden algunas veces necesitar menos o más relocalizaciones de las estructuras complementarias o de la presa actual, o aún cambios en el tipo del proyecto de la presa. En tales casos, los trabajos de construcción están limitados por los retrasos y solo con una temprana detección de los problemas ocasionados por los cambios hará posible minimizar los retrasos.

Un monitoreo geotécnico de la cimentación de la presa, deberá continuar después de que la excavación sea terminada. Esto involucra observaciones del comportamiento de la cimentación, incluyendo las filtraciones y la presión intersticial, que puedan presentarse bajo el incremento del peso muerto de la presa en construcción, durante el primer llenado y también durante su subsecuente operación.

II.3. METODOS DE INVESTIGACION EN LA CIMENTACION.

El objetivo de la investigación de toda cimentación es producir un modelo del sitio de la presa , incluyendo todas las características que sean relevantes para el diseño y comportamiento posterior de la presa. En el curso de las investigaciones, este modelo se desarrollará con tres categorías de datos:

1. Como modelo geológico, su fin es proveer una presentación puramente descriptiva de las estructuras geológicas del sitio de la presa, esto es: distribución, naturaleza y condiciones de la roca, tectónica y otras estructuras, especialmente discontinuidades, rutas de filtraciones y niveles de agua subterránea. Este modelo es el resultado de los trabajos de geología (e hidrogeología) en la superficie, en socavones en el subsuelo y muestras de los barrenos o soportado por métodos geofísicos para presentar de forma indirecta las condiciones del subsuelo.

2. Después de esta etapa puramente descriptiva, los parámetros índice son medidos para el primer grado de cuantificación ("pruebas índice" en roca, por ejemplo: gravedad específica, RQD, velocidad de las ondas sísmicas), parámetros que provean medios de mayor exactitud y objetividad de identificación y así mejores bases para la evaluación por el ingeniero. Esos parámetros índice también forman las bases del sistema de clasificación de las rocas.

3. En un paso más adelante, un modelo geotécnico es producido por la determinación de los actuales parámetros ingenieriles, incluyendo todos los datos requeridos para los análisis numéricos o modelos físicos (por ejemplo: módulo de deformación, resistencia al corte, permeabilidad). En el caso de cimentaciones de roca, las mediciones directas ("pruebas de diseño") que se han hecho casi siempre *in situ* son considerablemente costosas, tal que sólo unas pocas pruebas son seleccionadas en un sitio dado.

II.3.1. INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA.

De los factores naturales que influyen directamente en el diseño de presas, ninguno es más importante que el geológico, no solo porque determina el tipo de cimentación, sino porque también gobierna la disponibilidad de materiales para la construcción.

En el levantamiento geológico se deben estudiar cuidadosamente las fracturas, estratos, planos de foliación, zonas de deslizamientos antiguos y fallas geológicas en el sitio. El levantamiento y la determinación de sus características se logran a partir de pozos y trincheras a cielo abierto, prospección sísmica y eléctrica y recuperación de núcleos. En obras importantes se realizan barrenos orientados e integrales, fotografías del interior de los sondeos, lumbreras y socavones. Todos los datos sobre discontinuidades, deben señalarse claramente en mapas, trazando especialmente las zonas de debilidad que sean continuas en el sitio, esto permitirá delimitar bloques y zonas potencialmente inestables.

De todos los métodos de investigación geológica de la cimentación, los mapas geológicos producen más información a un costo menor. En el pasado, fue la base para el diseño de las presas. Hoy, aún es el paso principal en

cualquier programa de investigación y permanece como guía y base para la integración de todas las fases del diseño y construcción.

Se empieza con una inspección visual y mapeo de la superficie, siendo ésta la única fuente de información, soportada posteriormente por cortes, sondeos y socavones. El geólogo cooperará con especialistas en geofísica, sismología, mecánica de rocas y de suelos, ayudará en la selección de las pruebas del sitio y en la interpretación de los resultados, e integrará sus hallazgos en un modelo que será continuamente mejorado, y será continuamente revisado hasta el fin de la construcción.

Además de la fotointerpretación convencional, las técnicas auxiliares disponibles de reconocimiento geológico ahora incluyen mayores innovaciones como rayos infrarrojos o imágenes de satélite aumentadas por computadora, que son métodos que permiten identificar características tectónicas antes irreconocibles, siendo así un valioso estudio de riesgo sísmico.

Tales estudios son ahora usualmente realizados para todas las presas de importancia localizadas en zonas sísmicas o posibles, para determinar la potencialidad de movimientos sísmicos de gran intensidad. Éstos analizan todos los datos disponibles de los temblores históricos, la investigación de los detalles geológicos y en particular los detalles sismo-tectónicos, la distancia de fallas y sistema de placas, pudiendo complementar la información con inspección microsísmica.

II.3.2. INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA.

Estos métodos, que fueron originalmente desarrollados para la industria petrolera y minera, han sido ahora adaptados para encontrar, las diferencias necesarias en la cimentación de una presa, donde una capacidad para una fina diferenciación y delimitación dentro de un área relativamente pequeña de estudio es requerida. Este rápido desarrollo ha sido posible por el mejoramiento de la sensibilidad de los dispositivos de medición y de la disponibilidad de los métodos computarizados. La exactitud de estos métodos puede incrementarse en las primeras etapas del reconocimiento mediante la combinación de varios métodos, y especialmente si los procedimientos geofísicos, sus resultados directos y los parámetros geotécnicos obtenidos vía correlación pueden calibrarse en los barrenos, socavones y pruebas *in situ*.

El perfil de resistividades geoelectricas permite las deducciones sobre el tipo de roca, nivel de aguas subterráneas y características tales como fallas, canales de filtración, porosidad y permeabilidad de los suelos. Las mediciones electromagnéticas indican la profundidad de la zona superficial de intemperización o la localización y orientación de fallas, rutas de filtración y es un útil complemento del método de refracción sísmica. El método gravimétrico es auxiliar en la detección de vacíos, por ejemplo, rellenos de arcilla en cavidades cársticas, o como una indicación general de áreas críticas donde

los altos o bajos gradientes de la gravedad, por ejemplo, requieren investigaciones detalladas con sondeos y otros. La alteración acústica parece ser muy sensible a los cambios en el grado de fracturamiento y así es un mejor parámetro que la velocidad del sonido para evaluar el estado de fracturamiento de la masa rocosa.

II.3.3. ESTUDIOS ESPECIALES.

a). Investigación del riesgo sísmico.

La historia ha demostrado, la gran importancia que tienen respecto a la seguridad de las presas, el movimiento del terreno durante los sismos. Este problema se puede dividir dentro de dos categorías: 1. movimiento del terreno a lo largo de una falla que atraviese los ejes de una presa, y 2. como una respuesta de la presa y su cimentación al movimiento del terreno causado por un sismo.

Los elementos necesarios de la investigación de campo, para la evaluación de riesgo sísmico, aparte de la evaluación de la geología regional son:

a.1). Localización y evaluación de fallas.

Las fallas se localizan mediante la revisión de publicaciones, reconocimiento y análisis de sensores remotos (fotos aéreas e imágenes de satélite). Estas son complementadas con fotografías de rastreo de sonar y reconocimientos aéreos, los cortes en carreteras y afloramientos, frecuentemente proveen evidencia visual de la presencia de fallas.

Sobre las bases de toda la información disponible, un mapa de campo es desarrollado para localizar e identificar los rasgos sospechosos, dando prioridad a las fallas que puedan afectar al sitio de la presa. Para confirmar la existencia de fallas, sus características y los desplazamientos recientes, se requieren de trincheras.

a.2). Evaluación de la sismicidad y monitoreo.

La catalogación y mapeo de la historia de los eventos sísmicos, se pueden obtener del Instituto Sismológico Nacional.

Es deseable instalar un programa para detectar deformaciones de la corteza y/o actividad sísmica dentro del área del proyecto.

b). Investigación del agua subterránea.

La naturaleza del agua subterránea, es importante en el diseño, esto es, si es normal, aislada o artesisiana y la variación de una forma a otra dentro del

embalse, cimentación y empotramientos. Por ejemplo, si el agua observada en los empotramientos es aislada o normal, es significativo con respecto a las características de las filtraciones dentro y alrededor de los empotramientos. La elevación del nivel de aguas subterráneas fuera del cauce es significativo con respecto a las fugas potenciales del futuro embalse. Además, la estabilidad de las laderas y los potenciales asentamientos de la cimentación en el primer llenado están directamente relacionados con la posición y naturaleza del nivel de aguas subterráneas. Los cambios causados por el primer llenado son importantes a considerar también, tales como los efectos de un reajuste ascendente del nivel de aguas subterráneas regional sobre la estabilidad de los taludes del embalse.

Las observaciones del nivel de aguas subterráneas se realizan durante y después de las operaciones de barrenación. Además las observaciones del nivel de agua subterránea se realizan a través de piezómetros colocados adecuadamente, durante un período de tiempo largo, registrando las fluctuaciones durante las estaciones u observando la relación con la elevación y disminución de los niveles del río.

Los niveles del agua subterránea pueden dibujarse, revelando las características del flujo hacia el valle. En algunas ocasiones tales niveles pueden revelar anomalías subsuperficiales, causadas por ejemplo por fallas o por cuerpos intrusivos.

II.3.4. SONDEOS, MUESTREO Y BARRENOS DE PRUEBA.

Los sondeos de prueba permiten:

- la extracción de corazones y muestras para su clasificación y pruebas de laboratorio;
- los métodos de observación directa (cámara de televisión o cámaras fotográficas, "impresión de Packer" para la medición de la orientación de discontinuidades) o investigaciones indirectas (métodos geofísicos: explosión en barrenos y pruebas en barrenos cruzados) del subsuelo;
- el desarrollo de pruebas de barrenos para determinar el nivel de aguas subterráneas y la presión de poro, permeabilidad, inyectabilidad, deformabilidad, resistencia al corte y esfuerzos naturales;
- ubicación de instrumentación para el control de la cimentación durante la construcción y operación de la presa (péndulos invertidos, extensómetros, piezómetros, cadena de deformación, etc.)

La barrenación de corazones con diamante sigue predominando para los fines de investigación porque permite la extracción de corazones de forma continúa siendo la principal fuente de información. La introducción de barriles

de doble y triple corazón han mejorado la recuperación de corazones en roca suave, también, las técnicas integrales de muestreo permiten la extracción de corazones completos aún en roca con alto grado de fracturamiento y en su posición original.

Todos los métodos destructivos de barrenación (barrenación por percusión: perforadora de carretilla o barreno hacia abajo con martillo, barreno rotacional con cabeza tricónica) se han usado sólo excepcionalmente en la exploración de sitios, porque estas técnicas, aunque rápidas y relativamente baratas, producen sólo polvo o lodo de limitado valor informativo. Por lo que deberá de evitarse su uso.

II.3.5. PRUEBAS DE LABORATORIO.

Para el análisis de estabilidad, dos tipos de prueba son indispensables: 1. pruebas de clasificación de arcillas de los rellenos de las fisuras o fallas y 2. pruebas directas de corte. Las pruebas de clasificación deberán incluir análisis de tamaño de grano y los límites de Atterberg. Los resultados son útiles para la comparación de diferentes rellenos y en la correlación con el ángulo residual.

II.3.6. PRUEBAS *IN SITU* DE ROCA EN EXCAVACIONES Y SOCAVONES DE EXPLORACIÓN.

a) Deformabilidad.

Las cimentaciones de roca heterogéneas, inelásticas, anisotrópicas e invariablemente discontinuas representa uno de los materiales más complicados para el análisis matemático, y aún así el comportamiento de la deformación ha sido representado en una ecuación con un simple parámetro, el módulo de deformación.

Sólo una prueba de campo, en las direcciones de las fuerzas de la presa, que someta un volumen de roca que contenga las suficientes discontinuidades para que provea un módulo de elasticidad representativo del volumen de roca que se deformará bajo la carga de la presa.

Para la determinación de la compresibilidad en masas de roca, las pruebas de campo que se realicen, deben ser de gran tamaño para incluir los defectos de la roca, como grietas y rellenos, para obtener resultados confiables.

Los cálculos de deformaciones y asentamientos tienen la misma incertidumbre que la estimación de esfuerzos en la cimentación. Estos

esfuerzos se calculan en forma aproximada con la teoría de la elasticidad (Zienkiewics y Cheung 1967).

El valor de la deformabilidad obtenida con ensayos de campo, se emplea principalmente para : 1) Diseño de cimentaciones que estarán sometidas a cargas elevadas. 2). Evaluación de la necesidad de tratamiento de consolidación de la roca.

b) Resistencia al corte.

La resistencia y estabilidad de las formaciones rocosas está determinada invariablemente por la resistencia al corte de las discontinuidades geológicas y éstas dependen de su frecuencia, su extensión y de los intervalos en que las juntas son interrumpidas y sustituidas por otras juntas. La mayoría de las pruebas de corte son ejecutadas a lo largo de discontinuidades u otro plano de debilidad (fallas, grietas, juntas, planos de estratificación, esquistocidad) contenidas cerca de la base del bloque de prueba. La prueba triaxial *in situ* de corte se reserva para roca suave, intensamente fracturada o microbrechoso.

La resistencia depende del tipo y origen (ocasionado por corte o por esfuerzos de tensión) de la discontinuidad, si es plana, paredes rugosas y profundidad de intemperización y espesores y tipo del material de relleno.

La cimentación puede presentar problemas de resistencia al corte en presas de terraplén sólo sobre rocas como lutitas arcillosas, sobre roca con capas débiles, fallas o grietas, durante la excavación de taludes o en la interface de roca muy suave.

La estabilidad abarca los problemas en que se involucra la resistencia al corte de los materiales de cimentación.

Del estudio geológico de la boquilla se conocen las rocas existentes, disposición de las grietas y la presencia de materiales que puedan presentar problemas . Con esta información es posible prever algunos problemas que ocurrirán al crear el embalse y tener una idea aproximada de sus consecuencias.

Es necesario determinar la resistencia al corte de los materiales para evaluar si la estructura o ladera está en peligro de fallar. En el análisis de estabilidad de masas de roca, importa el tipo de roca, la disposición del fracturamiento, los rellenos de las grietas, la alteración sufrida por intemperismo, etc. Para investigar la estabilidad de las laderas o del conjunto cortina cimentación, se debe estudiar cuidadosamente los defectos o debilidades más que la competencia de los elementos sanos.

Los cálculos de una posible falla, plantean problemas de compatibilidad en deformación, que obligan a considerar dos valores de la resistencia: 1) la de corte simple por la roca sana en los tramos de la trayectoria que no sean grietas preexistentes , afectado por un factor de concentración de esfuerzos; y 2) la de fricción en la posible superficie de deslizamiento, suponiendo que la roca ha fallado previamente.

El análisis de estabilidad puede complicarse por la presencia de esfuerzos de origen tectónico en la masa y los efectos generados por las explosiones al excavar la roca. Las fallas por esfuerzos de origen tectónico dan origen a superficies aproximadamente planas, que penetran a gran profundidad y tienen longitudes de kilómetros. Para determinar la actual condición de equilibrio (actividad) puede resolverse por inspección directa de las grietas y rellenos en la falla, observaciones sísmicas en la región y mediciones geodésicas a lo largo de ella.

La determinación de la resistencia al corte en el sentido de las fracturas, se resuelve mediante el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales que rellenan la grietas. La composición de estos rellenos es muy errática, pueden ser fragmentos triturados de la misma roca o arcillas plásticas de baja resistencia.

c) Esfuerzos residuales en roca.

Los esfuerzos residuales son raramente medidos en la cimentación de una presa, pero estos pueden existir aún cerca de la superficie como un efecto posterior de la historia tectónica y de erosión del sitio y así influir en la excavación, estabilidad y permeabilidad.

d). Permeabilidad, Drenaje e Inyectabilidad.

Las pruebas tipo de permeabilidad en barrenos, son usados para obtener no sólo el valor de unidades Lugeon sino también las gráficas de presión-fuga para varios ciclos de incremento y descenso de presión, con secciones de longitudes variables, y obteniendo así, información adicional sobre el espaciamiento y abertura de discontinuidades.

En presas de tierra y enrocamiento el factor más importante y determinante es la permeabilidad del macizo, que se presenta como consecuencia de su fracturamiento y/o disolución. Aunque ciertas areniscas, tobas y conglomerados tienen una permeabilidad intrínseca considerable. El valor de la permeabilidad, permite detectar zonas de mala calidad y definir el tipo de tratamiento.

Para determinar los valores de permeabilidad, se realizan pruebas de absorción de agua: la prueba Lugeon y la prueba Lefranc, las que se describen a continuación.

PRUEBA LUGEON

Consiste en medir el gasto de agua, en litros por minuto y por metro lineal de perforación que fluye por la roca bajo una presión de $10 \frac{kg}{cm^2}$, la absorción así registrada es la unidad Lugeon.

La prueba se realiza en tramos de 3 a 5 m de longitud, aislándolos con empaques de cuero o de hule. Es importante registrar los gastos a medida que

se incrementa la presión hasta alcanzar la máxima, así como al regresar a cero. Se obtendrán curvas gasto v.s. presión (es inadmisibles extrapolar).

Las pruebas son lentas, pues para cada incremento de presión debe esperarse hasta alcanzar la condición de flujo constante durante 15 min. La prueba es susceptible de errores importantes por fugas en los empaques, o bien por flanqueo en roca muy fracturada.

En ciertos casos se corre el riesgo de mover masas importantes de roca por subpresión.

PRUEBA LEFRANC.

En este método se convierte el pozo de perforación en permeámetro de carga constante. En la boca del pozo se proporciona el caudal de agua necesario para mantener fijo el nivel hidráulico. Con el dato anterior, la carga de agua, la longitud del tramo y el diámetro del pozo, puede calcularse la permeabilidad de la roca.

$$q = 4\pi khC$$
$$C = \frac{2\sqrt{l^2 - r^2}}{\ln \frac{l + \sqrt{l^2 - r^2}}{l - \sqrt{l^2 - r^2}}}$$

- Donde: k = coeficiente de permeabilidad
 h = carga al centro del tramo de prueba
 l = longitud del tramo de prueba
 r = radio de la perforación

Cuando las fisuras tienen una distribución uniforme en la masa, el coeficiente de permeabilidad determinado es confiable pudiéndose realizar estimaciones del flujo, en caso contrario, su significado es dudoso.

La capacidad de drenaje es normalmente evaluada de las pruebas de presión de agua y sólo estudiado en pruebas separadas en casos excepcionales. La conductividad hidráulica puede variar considerablemente con los esfuerzos en la cimentación de la presa.

Dada la relación de incertidumbre entre la permeabilidad y la toma de lechada, las pruebas de inyectabilidad¹ deberán siempre desarrollarse antes de cualquier trabajo importante y extensivo.

¹Éstas pruebas se describen en el capítulo tres.

CAPÍTULO III

MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE CIMENTACIONES

III.1. INTRODUCCIÓN.

Los métodos de tratamiento, son aquellos procedimientos que tienen como fin, mejorar algunas de las propiedades del macizo rocoso (permeabilidad, deformabilidad y resistencia), así como los procedimientos que faciliten la construcción del cuerpo de la presa y logren una mejor interacción entre cimentación y presa.

III.2. MÉTODOS DE TRATAMIENTO.

Las cimentaciones de presas en roca, generalmente reciben algún tipo de tratamiento correctivo:

- Tratamiento superficial: es aquel que se realiza sobre la roca superficial, en la que se desplantará la cortina para obtener una unión adecuada entre cortina y cimentación.

- Tratamiento subsuperficial: es el que se lleva a cabo en la parte interna del macizo, en la zona donde se desplantará la cortina. Corrige los defectos de la roca para obtener un buen comportamiento del macizo cuando se le apliquen las cargas de la presa.

III.2.1. TRATAMIENTO SUPERFICIAL.

Las diversas formas de tratamiento superficial, tienen como objetivo:

- Lograr una superficie lo suficientemente regular en la roca de cimentación, para que el material del corazón impermeable quede apoyado sobre una superficie adecuada y pueda compactarse correctamente.

- Sellar la superficie de la roca en el contacto corazón-roca, con el fin de controlar mejor las filtraciones en esta frontera.

Los métodos de tratamiento superficial son:

a). Limpia superficial.

Es la remoción de vegetación, suelo orgánico y escombros que se encuentre sobre la roca de cimentación, estos trabajos son indispensables en todos los sitios de las presas.

La limpieza gruesa se realiza con tractor o excavadoras y se completa en las zonas del corazón y filtros de aguas arriba y aguas abajo, así como en la zona de transición de aguas abajo, con un trabajo minucioso hecho con pico o martillo neumático y/o aire y agua a presión, con objeto de exponer una superficie lo suficientemente limpia para efectuar el tratamiento de grietas, huecos y otros defectos.

b). Excavación de regularización.

Se realiza en el desplante del corazón impermeable y filtros. La superficie de contacto en transiciones y enrocamientos, generalmente sólo se les realiza una limpieza gruesa y eliminación de masas sueltas o con estabilidad precaria; todas las protuberancias deberán eliminarse manualmente o con ligeras voladuras, éstas últimas deberán evitarse al máximo para no abrir las juntas o dañar a la roca superficial, no debiéndose realizar en roca ya tratada.

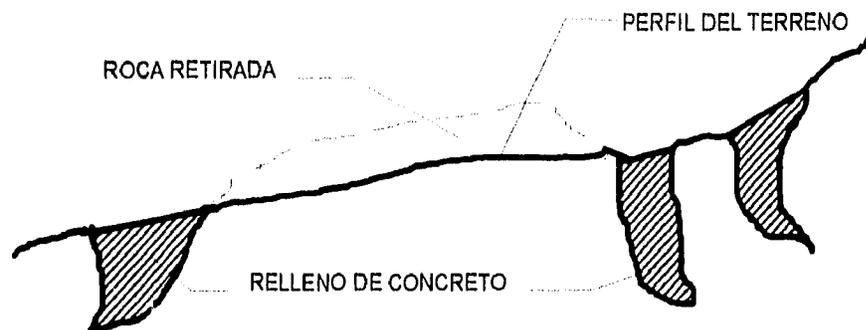


FIG. III.1.- EXCAVACIÓN DE REGULARIZACIÓN

La excavación de regularización tiene por objeto corregir:

- La divergencia de las laderas hacia aguas abajo, cuando los empotramientos en el sitio se abren hacia aguas abajo y constituyen un cañón estrecho, las condiciones de apoyo del corazón impermeable son desfavorables porque un desplazamiento en dirección del río tiende a despegar la estructura de las laderas, en estos casos se recomienda: 1. buscar una localización más apropiada del eje, dentro del mismo tramo del río, aunque esto implique aumento del volumen de la cortina; 2. cambiar la orientación del eje, si ello conduce a una mejor disposición del trazo del núcleo en el empotramiento; y 3. realizar excavaciones en las laderas para lograr un buen empotramiento del corazón.

- El perfil transversal de la roca, eliminando desplomes y escalones, después de la limpia superficial es frecuente encontrar secciones transversales, que en sus laderas presente un cambio brusco de pendiente y/o desplomes. En ambos casos es posible que se produzcan asentamientos diferenciales en el corazón.

Cuando se presenten cambios brusco de pendiente, se tendrá que realizar excavaciones para corregir el talud, esto es, la conformación de una superficie continua sin escalones ni depresiones, mediante cortes de roca y/o rellenos de concreto.

Como regla general se aceptan escalones menores de 2 m de altura y 1 m de huella y en tales casos se especifica que el material adyacente al contacto núcleo roca sea un suelo plástico compactado con pisones neumáticos. Cuando el escalón tiene dimensiones mayores que las indicadas, se efectúan cortes con explosivos para formar taludes de 0.25:1 o mayores.

c). Trincheras impermeables excavadas en roca.

Una trinchera impermeable consiste en una prolongación del corazón hacia abajo dentro de la roca de cimentación.

La trinchera en roca es especialmente útil para crear un sello entre la presa y la cimentación, cuando la roca es relativamente suave y su permeabilidad decrece con la profundidad. En sitios donde la roca está compuesta por capas alternadas de roca suave y dura, tales como capas alternadas de arenisca y lutita, frecuentemente la roca más suave ha sido erosionada en extensiones más grandes que la roca más dura y las paredes del valle están nervadas. En estos casos es necesario excavar a profundidades considerables hasta obtener una superficie plana en los empotramientos, de tal forma que la tierra pueda compactarse directamente contra la roca con rodillos. En algunas presas, las trincheras han sido excavadas en cimentaciones y empotramientos de roca dura. La roca dura, usualmente es mejor tratarla con inyecciones y las capas superficiales con lechadas y concreto.

d). Tratamiento de grietas superficiales.

Se pueden presentar dos tipos de grietas:

- Grietas finas, sin relleno visible, éstas son generalmente producidas por el uso de explosivos en las excavaciones.

- Grietas anchas o zonas fracturadas, con rellenos diversos, son de origen tectónico o producidas por la relajación de esfuerzos en las paredes del cañón o a la estabilidad precaria de la masa de roca.

Las grietas finas se tratan con rellenos de mortero o simple aplicación de lechada (usando cemento como aglutinante).

Para las grietas más prominentes, se realizará una limpieza, ampliando en forma de cuña las fronteras exteriores y hasta una profundidad de por lo menos tres veces el ancho, las que se rellenaran con una lechada de cemento, el agregado máximo no excederá un tercio del ancho de la grieta. La superficie de la lechada deberá cepillarse y nivelarse para asegurar que el contacto con el material del corazón sea lo más hermético posible y no erosionable.

Además se deberá realizar, en ambos casos, un revestimiento impermeable sobre la superficie de la roca, para que las presiones y la cantidad total de infiltraciones a través de la roca se reduzca.

La superficie de tratamiento deberá extenderse aguas arriba aproximadamente hasta el límite del filtro, en situaciones particularmente adversas, donde las juntas tengan un ancho mayor que el agregado grueso del filtro, la zona de tratamiento se deberá extender hasta la zona de transición.

El sellado de la superficie es igualmente importante que la construcción de una pantalla impermeable. Como se muestra en la fig. III.2., si la superficie de la roca no se impermeabiliza con el sellado de grietas, una concentración de flujo con un gradiente muy grande se desarrollará a través del corazón de tierra, directamente por encima del tope de la pantalla impermeable (flujo 1). Esto creará todas las condiciones hidráulicas necesarias para la tubificación del material del corazón dentro de las grietas en la porción aguas abajo de la pantalla. Si las grietas son selladas adecuadamente, el flujo de agua es forzada a fluir a través del corazón como el diseño lo prevé (flujo 2). La pantalla vertical y la superficie de roca sellada crean una "T" impermeable en la cimentación. El propósito básico de la primera parte de la "T" formada por la pantalla BD es reducir las fugas por abajo de la presa, el propósito secundario es reducir las presiones de filtración y el gradiente del flujo del agua a través de las grietas de la roca aguas abajo de la pantalla. El principal propósito del sellado de la superficie de roca AC es controlar el gradiente hidráulico y la tubificación a través de la parte baja del corazón y el segundo fin, es reducir la cantidad de filtración a través del corazón.

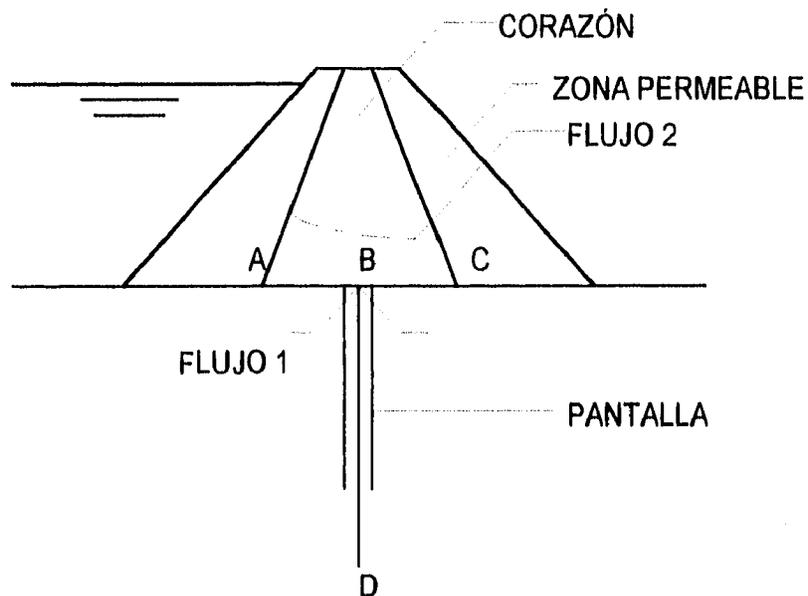


FIG. III-2 SELLADO DE GRIETAS SUPERFICIALES.

e). Rellenos de concreto.

Áreas de depresiones, hoyos, baches e irregularidades similares deberán rellenarse con una mezcla plástica de concreto vibrado en el lugar de su colocación. Pequeños diques (costillas) e irregularidades similares, deberán rellenarse con concreto para producir taludes no escarpados, cercanos a pendientes 1:1.

III.2.2. TRATAMIENTO SUBSUPERFICIAL.

a). Inyecciones.

El principal tratamiento subsuperficial es el inyectado, el cual consiste en hacer penetrar un fluido en la masa rocosa, de tal forma que fragüe en las grietas y fisuras desplazando el aire o el agua existente. El producto al mismo tiempo que impide la circulación del agua proporciona una resistencia adicional.

Generalmente se admite que para el inyectado debe utilizarse la máxima presión posible, ya que en el caso de un embalse se desarrollarán presiones hidrostáticas considerables al llenarse éste. La presión de inyectado depende del estado de esfuerzos de la roca en el instante de la inyección. Cabe realizar ensayos de rotura por presión hidráulica con objeto de estimar la presión de trabajo adecuada. En algunos casos se han aplicado presiones

suficientemente grandes para causar un levantamiento local del terreno al inyectar a pequeñas profundidades, con el objeto de consolidar la roca.

b). Tapete de inyecciones.

La cimentación de cualquier presa ha de ser impermeable, debiendo tener una adecuada resistencia a la compresión.

Las inyecciones de consolidación se realizan generalmente ejecutando una malla de taladros con separaciones de 3 a 12 m según la naturaleza de la roca. Si las admisiones de lechada son grandes es normal inyectar una malla intercalada que reduzca el espaciamiento definitivo hasta 1.5 m o menos. La profundidad del tratamiento depende de la naturaleza de la estructura, pero raramente es inferior a 9 m, pudiendo llegar hasta unos 30 m.

El tapete se construye en la parte superior del cauce, en el contacto corazón-roca, obteniéndose con este tratamiento: aumento en la resistencia de la roca y consecuentemente disminución de la deformación; así como también disminución de la permeabilidad, reduciendo la probabilidad de pérdida de materiales del corazón dentro de la cimentación y proporciona una cimentación homogénea que evita los asentamientos diferenciales.

La inyección repara también en cierta forma los daños provocados a la roca por las voladuras y la descompresión causada por la excavación.

Puesto que hasta la roca más fracturada, normalmente tiene suficiente resistencia para soportar presas de tierra, el tapete es usado más comúnmente, sólo donde la parte superior de la roca pueda ser tan permeable que una sola línea de inyectado no se considere suficiente para crear una barrera impermeable. En algunos casos la parte superior, puede ser muy permeable como resultado de una intemperización excesiva o fracturamiento. En estos casos, se deberá decidir entre excavar hasta encontrar roca más impermeable o sólo desmontar y hacer un tapete de inyecciones sobre la roca más permeable.

Se ha incrementado el uso de los tapetes de consolidación, en las presas más altas con corazón impermeable delgado, con buenos resultados. La mejora de las propiedades de la roca se pueden apreciar por medio de los módulos elásticos.

c). Pantalla impermeable de inyecciones.

Es una zona de roca tratada, normalmente vertical, que tiene una considerable profundidad y longitud, pero también un ancho apreciable. Localizada bajo la cortina en la parte media de aguas arriba de ésta. El propósito de esta zona inyectada es reducir la permeabilidad localmente de tal modo, que se forme una barrera al paso de las filtraciones debajo de la cortina, bajo las condiciones de carga hidráulica del embalse. No solamente se reducen las pérdidas por filtración, sino que también, las subpresiones y la tubificación potencial, pueden ser controladas más fácilmente por un drenaje aguas abajo. Una ventaja adicional de las perforaciones para la pantalla es la

información adicional obtenida del sitio. No es raro que la ejecución de una pantalla indique que la roca es perfectamente sana en gran parte de la presa, pero quizá exista, en alguna parte de la estructura, roca alterada que requiera tratamiento.

III.2.3. PLANEACIÓN DEL INYECTADO.

a). Programación.

La preparación de un programa de inyectado requiere:

1. Planeación de la inversión en los trabajos de inyectado.
2. Revisión de la geología y permeabilidad, para tomar la decisión sobre la necesidad de inyectado, y si lo es, si éste es factible.
3. Secuencias de inyectado.
4. Especificación de las presiones a usar.
5. Propiedades de las lechadas a inyectar.
6. Tiempo entre operaciones.
7. Evaluación diaria de los trabajos de inyectado, para detectar cualquier necesidad de cambio en las técnicas y especificaciones usadas.
8. Monitoreo de la pantalla de inyecciones durante el llenado inicial y durante la vida de la presa.

Estos factores son determinados según el objetivo por alcanzar y las condiciones geológicas en la que se realizarán los trabajos.

Las mejores probabilidades de rellenar las aberturas con la lechada, se presentan cuando el barrenado de inyectado atraviesa el máximo número de aberturas.

b). Objetivo del inyectado.

Cuando se realiza la planeación de los trabajos de inyectado, el objetivo del mejoramiento, de acuerdo a las condiciones geológicas de cada sitio, puede considerarse como el primer paso a establecer.

Los fines de la inyección son:

- Reducción de las filtraciones por debajo de las presas.

- Control de la subpresión bajo las estructuras, junto con dispositivos de drenaje.

- Consolidación de la cimentación de las presas.

- Control de presiones intersticiales en los estribos de presas.

- Reparación de daños causados por las voladuras.

En el caso de inyectado de consolidación, la cantidad de cemento por metro de longitud es usado como medida del mejoramiento, o la unidad Lugeon es usada para expresar el tamaño de las grietas.

El inyectado de consolidación se realiza para obtener una cimentación monolítica, mejorando las zonas débiles, tales como fallas y capas sueltas superficiales producidas por la excavación de la cimentación. El efecto secundario es el control de las filtraciones.

El inyectado de consolidación, en presas de tierra, se ejecuta en toda la zona de cimentación o en el corazón impermeable. Estos trabajos se realizan a poca profundidad (que generalmente es de 5 a 10 m). En zonas cercanas a la pantalla impermeable, el inyectado puede alcanzar profundidades de 15 a 20 m, funcionando como auxiliar de la pantalla impermeable.

La pantalla impermeable deberá cumplir con las siguientes premisas: contar con una profundidad adecuada para asegurar la impermeabilidad o que la longitud de la ruta de las filtraciones sea lo suficiente para disminuir el gradiente hidráulico.

c). Evaluación de la necesidad de inyectado.

Uno de los problemas más difíciles que afronta el proyectista, es decidir si un sitio necesita inyecciones.

Por regla general, puede decirse que presas con altura mayor de 15 m o menos, cimentada sobre roca que no esté excesivamente fracturada, generalmente no han sido inyectadas. Por otra parte, presas de más de 30 m generalmente han sido inyectadas.

La conveniencia del inyectado depende, en primer lugar, de la altura de la presa, la permeabilidad de la roca y el valor del agua que puede perderse por filtración a través de la roca de cimentación.

En casos donde los resultados de la investigación, muestran que la roca es muy permeable y el agua es valiosa, el inyectado obviamente deberá realizarse.

En la mayoría de los casos, donde la pérdida de agua debida a la filtración a través de la cimentación, no es muy valiosa y los resultados de la exploración preliminar, indican que la roca no es excesivamente permeable, la

7

decisión no es fácil, ya que habrá que determinar que será más costoso, si las pérdidas de agua o los trabajos de inyectado.

La decisión de si se inyecta o no, depende también de la naturaleza de las grietas en la roca.

La permeabilidad de la mayoría de las rocas decrece con la profundidad, puesto que las juntas están generalmente abiertas cerca de la superficie, debido a la relajación de esfuerzos e intemperización. Sin embargo, algunos tipos de roca, tales como basaltos columnares y algunas calizas, las grietas no disminuyen con la profundidad y la pantalla puede ser casi completamente inefectiva, aún si la pantalla se extiende cientos de metros abajo hasta el fondo del valle y más allá de los empotramientos.

El inyectado es también dudoso en roca donde la permeabilidad resulta de un gran número de grietas que tienen un ancho mucho más fino que 0.2 mm, en tales circunstancias, la relación de grietas sin lechada respecto al total, será alta y la inyección es casi inútil.

A continuación se presenta un diagrama (Fig. III.3) en donde se usan los valores de la prueba Lugeon, desarrollada por Housby (1976), en donde se evalúa la necesidad de inyectar la cimentación en los sitios de presas. En otras palabras, los datos de permeabilidad se usan para determinar cuando es necesario el inyectado.

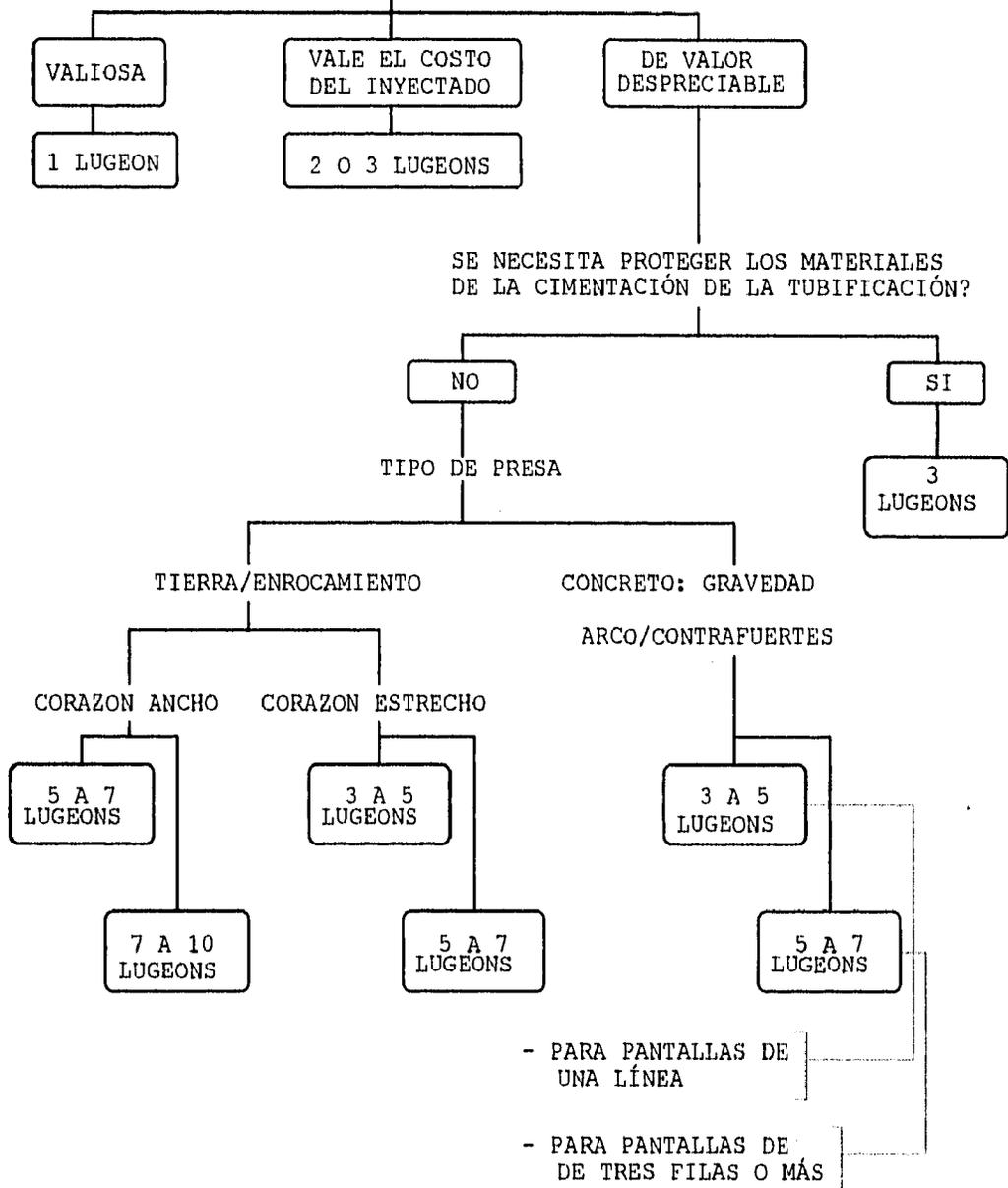
III.2.4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL INYECTADO.

El diseño de la pantalla de inyecciones no es un procedimiento rígido, 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. Todo esto se resolverá después de que se hayan hecho consideraciones sobre la forma del cauce, el tipo de cortina, la carga hidrostática, los detalles geológicos del sitio, la posibilidad de filtraciones o tubificaciones y las consecuencias de ello.

a). Pruebas de inyectado.

Cuando no existen datos confiables, para comparar sitios similares, será necesario realizar un programa de pruebas de inyectado, antes de finalizar el diseño de la pantalla impermeable y la cimentación. El parámetro más importante que puede obtenerse es la reducción de la permeabilidad que puede alcanzarse. La información obtenida ayuda a refinar el diseño y procedimientos de construcción, ayudando a seleccionar el equipo y labores necesarias para completar el programa de trabajo.

QUE TAN VALIOSA EL ES AGUA QUE SE PIERDE POR FILTRACIONES?



NOTAS: - ESTA ES SÓLO UNA GUÍA, PUEDEN SER NECESARIOS MODIFICACIONES SEGUN EL SITIO.
 - ESTOS VALORES SON VÁLIDOS SOLAMENTE PARA EL INYECTADO EN ROCA.

FIG. III.3.- EVALUACIÓN DE LA NECESIDAD DE INYECTADO

El método convencional de dirigir una prueba de inyección, es construir un segmento de pantalla, usando el método de cierre progresivo. Los barrenos primarios son perforados, pruebas de agua e inyectado se ejecutan hasta una profundidad donde la permeabilidad es menor de la preestablecida (comúnmente un máximo de 10^{-4} a 10^{-5} cm/seg). La separación de los barrenos es reducida hasta la especificada o permeabilidad deseada, establecida antes del inyectado final.

Nonveiller indica que los siguientes datos estadísticos deberán obtenerse de la prueba de inyectado:

- Reducción del coeficiente de permeabilidad, la relación del promedio de permeabilidad antes del inyectado y el promedio de permeabilidad después de cada etapa de inyectado.

- Consumo promedio de lechada en cada etapa del inyectado.

- Espaciamiento máximo entre barrenos en la etapa final.

Mientras los resultados estadísticos pueden indicar la efectividad de una prueba de inyectado, los datos más reales son obtenidos donde es posible hacer una exploración a través del área inyectada. La utilidad de los resultados de la prueba de inyectado dependen de la complejidad geológica del sitio.

Nonveiller 1970, anota: "en las más complejas condiciones geológicas, deberán realizarse varias pruebas, localizadas en zonas de condiciones típicas para obtener datos reales para el diseño de la pantalla de inyecciones, en todas las diferentes clases de roca".

b). Presión de inyectado y toma de lechada.

La presión de inyección juega un papel preponderante en la penetrabilidad de la mezcla, obteniendo con ello una disminución en la longitud de barrenación. Una mayor penetrabilidad se obtiene cuando las fracturas se abren elásticamente sin producir rotura del macizo rocoso.

Es necesario tener presente que: la presión de rechazo es la presión máxima o límite que se alcanza y una vez que se alcanza se debe aplicar momentáneamente para evitar que la alta presión sostenida ocasione el fracturamiento hidráulico; la presión de inyectado es la que se desarrolla durante la operación de inyectado, con la duración que se juzgue conveniente para rellenar las oquedades del macizo sin llegar a la presión de rechazo; y penetrabilidad es la distancia que se alcanza desde el barreno hasta el extremo de la mezcla inyectada.

La presión máxima permisible de inyectado deberá usarse en cada perforación así como en cada etapa. La presión máxima esta limitada hasta que no se cause desplazamientos apreciables de la formación rocosa y aumentar el fracturamiento de la misma, (Sherard).

Deere considera que las presiones más bajas deben ser usadas en la parte superior de la masa rocosa donde pueden ocurrir levantamientos de la misma, particularmente donde las fracturas son paralelas a la superficie, tales como, juntas horizontales bajo una superficie también horizontal o juntas inclinadas paralelas a una ladera inclinada.

La presión máxima permisible depende del tipo y la continuidad de las grietas en las rocas, su resistencia, la permeabilidad de la roca, la consistencia de la lechada a usarse, la profundidad, la longitud del barreno a inyectar, experiencias de inyectado en el mismo tipo de roca y otros factores.

Para capas horizontales, por ejemplo, rocas sedimentarias, no es recomendable usar una presión de inyectado, en cualquier profundidad, mayor que el peso de la roca superyacente. Para roca masiva dura, la presión de inyectado puede ser igual a diez o más veces que el peso de la roca superyacente y se ha usado de forma segura (Sherard).

El único método confiable y directo para establecer la presión máxima de inyectado en un determinado sitio, es hacer una serie de pruebas en que la presión de inyectado se va incrementando hasta que ocurra la falla. Las pruebas se realizan con una lechada lo suficientemente delgada que pueda bombearse indefinidamente sin sellar el barreno. Deberán realizarse varias pruebas con barrenos de distintas longitudes y obturadores a diferentes elevaciones.

La toma de lechada es uno de los factores principales a cuidar en la inyección, ya que es un indicador de la efectividad del mismo. Sherard menciona que uno de los errores más comunes es bombear mil sacos de cemento por barreno en forma continua, esto es totalmente antieconómico, puesto que esto indica que la lechada viaja grandes distancias. Siempre es conveniente detener el inyectado después de que varios cientos de sacos de lechada densa han sido bombeados, y continuar después de que la lechada ha fraguado y/o usar otras técnicas para confinar la lechada a la zona deseada.

La toma de lechada algunas veces no se correlaciona con los resultados de las pruebas de presión de agua. En sitios donde la roca toma grandes cantidades de agua pero no toma lechada, la adición de pequeñas cantidades de gel de silicato bajo presión, algunas veces tiene un efecto lubricante sobre las fisuras que en consecuencia permitirán grandes absorciones de lechada. También, la adición de pequeñas cantidades de bentonita (generalmente menos del 5 % en peso del cemento) tiene una influencia apreciable en la disminución de la viscosidad de la mezcla y alguna veces incrementa en gran medida la toma de lechada en roca con grietas finas.

Algunos criterios establecen que el inyectado se hará hasta el rechazo, esto es que la presión se aplicará hasta que la lechada resurja en el barreno. Un criterio razonable, es que el inyectado se considere completado cuando el barreno o sección de barreno empiece a tomar no más de 0.30 m^3 de lechada en cinco minutos bajo la presión máxima.

b.1). Criterio de rechazo.

- La Comisión de Recursos del Agua de New South Wales, continúa cada inyección hasta el rechazo, mientras no cambie el indicador del agitador en 15 minutos, a menos que se presenten tomas muy altas, y manteniendo la presión otros 15 minutos para hacer la lechada densa.

- La Oficina de Reclamaciones de E.U., son menos restrictivos, el inyectado de cualquier barreno se hará hasta el rechazo o hasta que la toma de lechada sea menor de 0.028 m^3 (1 ft^3) en 20 minutos si presiones de 3.50 kg/cm^2 o menos han sido usados; en 15 minutos para presiones entre 7 y 14.05 kg/cm^2 y 5 minutos si la presión excede de 14.05 Kg/cm^2 han sido usados; o cuando menos de dos sacos por hora han sido inyectados con bombeo continuo.

Hay dos métodos que son más usados para determinar cuando el inyectado se puede considerar completado:

1. Especifica que el inyectado deberá continuarse hasta que la toma de lechada del barreno sea del 75 % de la máxima presión de inyectado.

2. El inyectado continuará hasta que la toma de lechada sea 28.3 lt o menos en 10 minutos, medidos en el último periodo. Esto es frecuentemente modificado de acuerdo a la mezcla y a la presión usada.

c). Extensión de la pantalla.

Donde haya situaciones topográficas críticas o donde se desee aumentar la longitud del recorrido de las filtraciones, porque existe la posibilidad de que se presenten fugas o tubificación, la pantalla impermeable puede ser prolongada algunas decenas de metros en las laderas. En ocasiones es aconsejable excavar una galería superior para hacer este trabajo, esto es mejor que barrenar desde la superficie, particularmente si la superficie se eleva en forma abrupta, de manera que las perforaciones resultarían muy profundas.

Idealmente la profundidad de la pantalla impermeable debe ser en función de la carga hidrostática y de la calidad de la roca. La práctica recomienda aumentar los datos geológicos y de permeabilidad obtenidas durante la fase de exploración, para compararlos con los obtenidos de los primeros pozos para inyectado.

La profundidad de la pantalla, comúnmente es seleccionada en base a la geometría de la presa, con el principal objetivo de alargar la longitud de recorrido y reducir el gradiente hidráulico a algún valor acorde con el ancho del corazón impermeable de la presa. Sin embargo, esta acción protegerá a la presa de los efectos de filtración o fugas, pero la cantidad de filtraciones no necesariamente se reducirá. Por lo tanto, si el agua es valiosa o si la cimentación puede desarrollar erosión interna (tubificación), se considerará extender la pantalla hasta capas relativamente impermeables. Esto es particularmente importante en roca caliza cárstica, donde las pérdidas de agua

a través de los conductos de disolución pueden causar daño aguas abajo o impedir el llenado del embalse.

La profundidad, algunas veces se selecciona arbitrariamente basándose en la altura de la presa, la Oficina de Reclamaciones de E.U. usa la fórmula $D=1/3H+C$, donde D es la profundidad del barreno en fts, H la altura de la presa sobre el barreno y C es una constante variable de 25 a 75, que depende de la permeabilidad de la masa rocosa, indicando que el número está relacionado con la profundidad a la que se encuentra una de permeabilidad aceptable. Sin embargo, si no existe una reducción de la permeabilidad con la profundidad, este método será útil sólo para controlar la longitud del recorrido de las filtraciones y así proteger a la presa.

La construcción de una pantalla, producirá mejoras significativas, sólo si la pantalla se une con la roca más impermeable, de otra forma, la cantidad de filtraciones no será reducida.

d). Inclinación de la pantalla de inyecciones.

Es recomendable que la pantalla de inyecciones pueda inclinarse de 15 a 20° aguas arriba, para inducir un camino de filtración más largo entre la pantalla y los barrenos del drenaje, reduciendo así, las fuerzas de filtración, la erosión y el volumen de filtraciones.

e). Selección del ancho de la pantalla de inyecciones (una línea vs. líneas múltiples).

Existe una tendencia internacional hacia la construcción de pantallas con una sola línea de inyectado, donde las condiciones geológicas favorables fomenten la interacción entre los barrenos de inyección y no se presenten desviaciones en las perforaciones, lo anterior es económicamente apropiado. Sin embargo, las condiciones ideales rara vez existen en la naturaleza, el resultado de construir una pantalla con esta tendencia, puede resultar en una pantalla defectuosa. Esto es particularmente cierto, donde las condiciones geológicas contribuyen a la desviación de los barrenos.

Las pantallas de líneas múltiples, se recomienda cuando sea necesario tener una pantalla ancha para reducir gradientes hidráulicos y el paso de filtraciones. Otra condición que necesita la pantalla de dos o tres líneas es la de roca permeable con fracturas muy abiertas donde se desea tener un buen sellado, pero limitando la absorción de lechada. Esto se puede lograr, impermeabilizando primero la línea aguas abajo, después la de aguas arriba y finalmente la línea central. La línea aguas abajo se inyecta primero para que el inyectado de la segunda línea sea forzado hacia aguas arriba; el sellado total no debe ser intentado en las dos líneas de afuera, pero se debe inyectar una primera, segunda y hasta tercera etapa. En alguna progresión que tomase más de una tonelada de cemento, el inyectado será detenido y recommenzado otra vez después de 24 hrs, pudiéndose usar arena fina y silicato de sodio para disminuir el recorrido. La línea central será inyectada hasta el rechazo usando segunda, tercera, cuarta y hasta quinta etapa si es necesario.

La combinación de pantallas de una sola línea y una múltiple puede ser útil, la pantalla de una sola línea es inyectada inicialmente, pero en cualquier zona donde haya grande tomas de lechada en la segunda etapa o donde las condiciones de la roca son pobres, puede establecerse una pantalla de tres líneas localmente (Deere).

La construcción de una pantalla con dos líneas de inyectado con barrenos en ángulos opuestos, reduce la probabilidad de que grandes "ventanas" se queden sin inyectar en la cimentación.

f). Separación de los barrenos.

El espaciamiento de los barrenos, generalmente se especifica con una separación máxima de 3 m. Este espaciamiento se puede reducir, dependiendo de las tomas de lechada. Sin embargo, la separación máxima puede fallar al interceptar defectos geológicos ampliamente distribuidos o aislados que pueden tener una gran capacidad de transportar agua.

La efectividad de una pantalla depende fuertemente de la interacción entre los barrenos. Por eso, la separación máxima de cualquier proyecto deberá relacionarse con los radios de influencia promedio esperados (el radio de influencia puede definirse como la zona, dentro de la cual las fracturas abiertas circundantes al barreno pueden ser saturadas por la lechada inyectada dentro del barreno).

Este radio de influencia depende de las características de las aberturas interceptadas por el barreno: la extensión que las aberturas presenten y si están interconectadas con otras aberturas; de varios tipos de rocas, grado de deformación, extensión local de los esfuerzos de relajación y condiciones de meteorización. El radio de influencia varía mucho, de 10 m en casos excepcionales a unos pocos centímetros en roca con pocas aberturas finas, (Ewert 1985).

g). Tratamiento de empotramientos.

En los empotramientos se debe dar especial atención a las irregularidades en la roca expuesta y en las grietas y fisuras de la misma, aún cuando las presiones de contacto son bajas en la parte superior de la zona del corazón, es importante obtener un buen sellado en el contacto corazón-roca mediante una compactación adecuada. Por lo tanto, es esencial que la roca de los empotramientos sea convenientemente preparada.

La zona de empotramientos es inyectada cuando la fisuración del macizo da un módulo de deformación considerablemente excesivo. Si las grietas están limpias y libres de material de relleno, la eficiencia del tratamiento se incrementa con el grado de abertura de las fisuras y su efecto es hacer más regular la deformación sobre todo el empotramiento. Pero los resultados son mucho más dudosos cuando las fisuras contienen material de relleno, así las tomas de lechada son bajas obteniéndose resultados poco confiables. Es aún más difícil evaluar el mejoramiento de la resistencia de la zona debido al inyectado, aunque debe prevenirse el movimiento de bloques individuales por

la acción de la presión de inyectado. La resistencia contra el deslizamiento a lo largo de discontinuidades extensivas, es probable que no se incremente.

h). Tapón de inyectado.

El diseño de la presa deberá incluir un tapón de inyectado en cualquier parte de la cimentación donde esté altamente fracturada, con juntas o roca cizallada expuesta en la superficie y/o cuando en algunos sitios, bloques sueltos de material o pequeñas juntas abiertas pueden encontrarse más abajo del nivel de excavación; si remover estos bloques es impracticable, esas zonas deberán consolidarse con inyectado. Esto es especialmente necesario si los posibles movimientos de los bloques pueden alterar la superficie de tratamiento de la roca (fig. III.4).

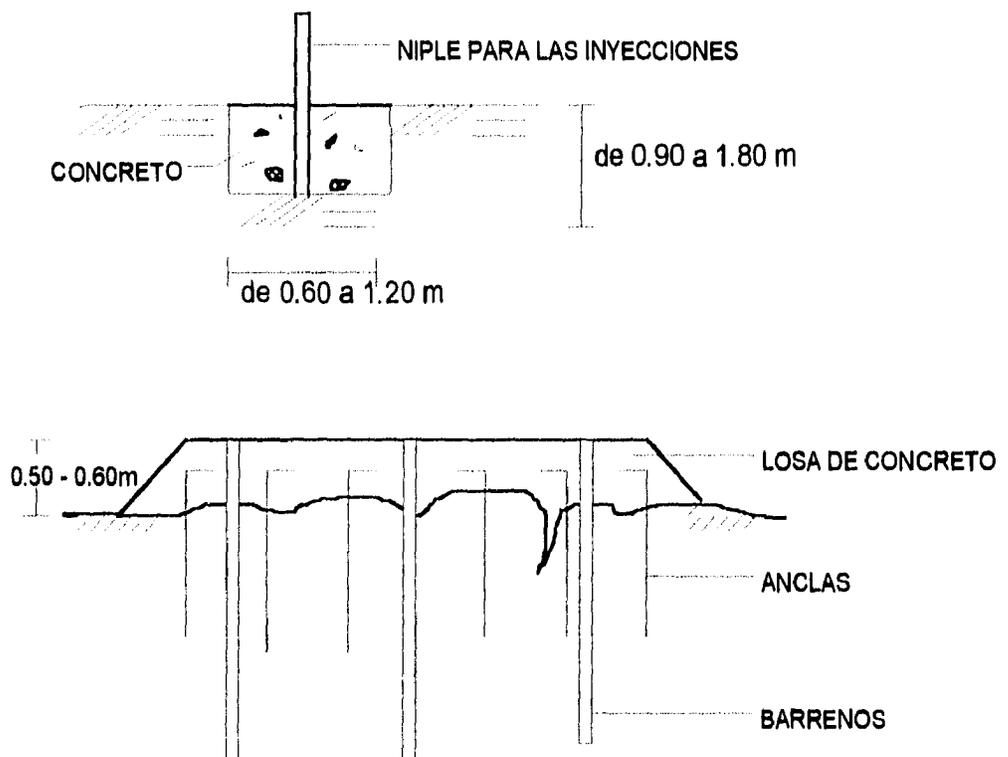


FIG. III.4.- TAPONES DE INYECTADO

Para asegurar el inyectado y el sello de las grietas superficiales, se requiere una cubierta efectiva sobre la roca. La mejor forma es cubrir el área con concreto anclado con varillas dentro de la roca. Las varillas deberán tener el largo, tamaño y espaciamiento que permita usar alguna presión en el inyectado, realizándose éste a través del concreto.

Así mismo, el tapón de inyectado sirve para:

1. Formar una trinchera superficial donde no interactúen los barrenos.

2. Prever un firme anclaje para el niple de inyectado y/o empaques.

El tapón de inyecciones es usado donde se encuentra roca débil que puede dañarse por los movimientos del equipo de barrenación o es tan irregular que los movimientos del equipo se dificultarían.

i). Galerías de inyectado.

En el diseño de grandes presas, se deberá considerar la factibilidad de incluir una galería de inyectado, que ofrece las siguientes ventajas:

- El programa de construcción se podrá hacer más realista, ya que las operaciones de inyectado no estarán interferidas por otras operaciones de la construcción de la presa.

- Se pueden usar presiones de inyectado más grandes, realizando así, trabajos más efectivos, pudiéndose reducir la cantidad de barrenación requerida.

- La barrenación y el inyectado, puede realizarse en varias elevaciones. Mitiga las desviaciones de los barrenos y reduce substancialmente los costos de tratamiento de zonas permeables que se encuentren a profundidades mayores.

- El programa de inyectado puede ser menos conservador, que sin la galería, o tal vez diferir el inyectado hasta las medidas de filtraciones o la instrumentación lo demuestre necesario, teniendo acceso permanente para un inyectado posterior.

- La galería provee acceso para la inspección y para el barrenado de pozos de drenaje si se presenta la presión de poro.

Las desventajas de barrenar e inyectar desde las galerías son:

- El tamaño usual de las galerías de 1.5 por 2.4 m, es reducido para el equipo a usar, por lo que se deberán usar barras cortas de 0.6 m a 1.5 m en comparación de los tramos de 3 m usados comúnmente en la superficie.

- Todo el equipo debe acarreararse a mano y la planta mezcladora se localiza a gran distancia, debido a ésto, habrá un volumen relativamente grande de lechada en las líneas, por lo que, los cambios rápidos de consistencia en la lechada, requeridos por las condiciones geológicas que se vayan encontrando, no son factibles.

j). Materiales de inyectado.

El cemento es el principal material usado para el inyectado de las cimentaciones, por su precio, estabilidad y resistencia. El tipo de cemento usado normalmente es el cemento normal o tipo B.

Como aditivo para la lechada, se usa bentonita o agentes dispersantes para reducir la viscosidad y velocidad de fraguado..

j.1). Cemento ultrafino.

El cemento ultrafino con partículas de tamaño de 4 micrones en promedio o menos, está empezando a usarse en aplicaciones especiales, donde hay aberturas muy pequeñas por rellenar, con lechada resistente, durable y no contaminante. Aunque el cemento ultrafino es muy expansivo, su mayor penetración, impregnación y características de sangrado pueden reducir el número de barrenos.

j.2). Inyectado suplementario con químicos.

No es raro encontrar zonas que no pueden ser tratadas efectivamente con cemento portland en las lechadas. Esas zonas frecuentemente incluyen filtraciones de agua de manantiales que resiste la penetración de la lechada convencional o del cemento ultrafino y que presenta dificultades con el tratamiento superficial y la subsecuente colocación del relleno.

Menos evidentes son las fracturas y zonas de corte y los lentes de arena pobremente cementadas que tienen una relativa alta permeabilidad intergranular.

Defectos geológicos como estos, pueden ser capaces de transmitir flujos considerables. Por lo se deberá considerar un inyectado adicional con químicos, para minimizar retrasos y problemas en la construcción.

Hay un gran número de marcas comerciales disponibles de materiales en el mercado, que son usados en el inyectado. La mayoría de las lechadas con químicos son relativamente un poco más expansivas, comparadas con las lechadas de cemento, pero tienen una amplia y efectiva aplicación en los siguientes casos:

- Algunos penetran pequeños vacíos o fisuras que el cemento portland no puede.
- Otros, pueden penetrar vacíos o fisuras que sólo el agua puede penetrar.
- El tiempo de fraguado puede controlarse variando el porcentaje.

Los químicos más comúnmente usados están compuestos de sodio de silicato.

k). Consideraciones geológicas.

El diseño adecuado de una pantalla y la estimación real del costo, requiere un conocimiento completo de la geología del sitio.

La permeabilidad, frecuentemente varía mucho aún sobre un mismo sitio. Por lo que se deberá dar especial cuidado a la investigación del sitio. Al evaluar las pruebas de agua se pueden cometer errores por el tipo de flujo que se presenta, se necesita hacer la distinción entre medidas hechas durante flujo laminar y las que se hacen durante flujo turbulento, así como los efectos de dilatación, movimientos de roca, pérdidas de agua, etc., deben considerarse, por lo tanto, se ha observado que:

- El inyectado es eficaz cuando las fracturas están abiertas y limpias, ya que la lechada se adhiere a las paredes de las fisuras, mejorando la cohesión de la roca y evita la circulación del agua.

- Las fracturas rellenas de arcilla son más difíciles de tratar; si estas fracturas están muy próximas, resultará imposible inyectarlas excepto en la inmediatez de los taladros, donde la arcilla es arrastrada por el agua que se usa en la perforación.

Cuando se requiere impermeabilización, rara vez será necesario tratar la roca que tenga fisuras de éste tipo, ya que el relleno arcilloso es suficiente para resistir gradientes elevados sin ser arrastrados.

- Si existen capas gruesas de arcilla dentro de un macizo rocoso, raramente se puede recurrir a la inyección. El lavado puede arrastrar parte de la arcilla y con dispersantes, si ésta se utiliza en amplios estratos de arcilla, puede producir el colapso de la roca antes de que los huecos se llenen con lechada.

- Para el método de lavado se han tratado con éxito capas de arcilla hasta de 30 cm de espesor o incluso más cuando se encuentran en forma continua y se pueden identificar fácilmente.

III.2.5. EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS DE INYECTADO.

a). Métodos de inyectado.

Par que los trabajos de inyección sean exitosos, los procedimientos y objetivos, deberán decidirse de acuerdo al grado de fisuración de la roca, el nivel de estanqueidad que se desea alcanzar, y el programa de obra.

El proceso de inyectado consiste en cuatro pasos elementales:

1. Perforación de los barrenos.

2. Lavado de las perforaciones, cortando y eliminando todo material de las paredes de los barrenos.

3. Pruebas de presión en los barrenos con agua para obtener una estimación de la permeabilidad de la roca y presiones de inyectado.

4. Inyectado de lechada dentro de los barrenos bajo presión para forzarla en todas direcciones y que penetre en grietas y cavidades.

La determinación de los parámetros que intervienen en el diseño de los trabajos de inyectado, se obtienen del proceso de ensaye y experimentación. La roca es sistemáticamente evaluada con pruebas de absorción de agua e inyectado. La determinación de la profundidad de las perforaciones, espaciamiento y selección de lechada se realizan en campo.

a.1). Sondeo completo.

La inyección se efectúa después de terminar la perforación del barreno. El tramo inyectado queda comprendido entre el fondo de la perforación y un obturador colocado cerca de la superficie. Este método es adecuado cuando la abertura de las fisuras es prácticamente uniforme. En cambio tiene las desventajas de que las partículas sólidas de la lechada se van sedimentando hasta obturar la perforación en vez de introducirse en las fisuras. Este fenómeno se presenta cuando los tramos tienen 10 m de longitud. Además, cuando las fisuras tienen aberturas desiguales toda la lechada penetra en las de mayor abertura; si se hace más espesa la lechada para evitar esto, se tapan las aberturas de las fisuras finas, impidiendo la penetración de la lechada.

Otras desventajas de este método es que únicamente se puede aplicar una sola presión, que tiene que ser baja para evitar resurgencias y además, no es posible ajustar la dosificación de la lechada a la calidad de la roca.

Por otra parte, se tiene la ventaja económica de poder emplear el equipo de perforación en otro punto, mientras se inyecta en la perforación ya terminada.

Pero por las desventajas, desde el punto de vista técnico, éstas son suficientes para eliminar casi siempre este método.

a.2). Tramos de regreso.

Este procedimiento es similar al anterior ya que se inyecta después de completar la perforación de todo el sondeo hasta la profundidad deseada. La diferencia es que la inyección se hace por tramos (5 m generalmente), empezando en el fondo de la perforación. El inyectado empezará con la colocación de un obturador en la parte superior del tramo más profundo, cuando este tramo se termina de inyectar, el obturador es elevado al siguiente tramo superior y el procedimiento es repetido.

Este método tiene las siguientes ventajas, el trabajo se realiza más rápido al poder emplear el equipo de perforación independientemente del de inyectado, se obtiene mejor información de la elevación donde se toma más lechada, además permite un mejor control de las fugas de lechada a través de

las grietas. Pudiéndose ajustar la lechada y las presiones aplicadas de acuerdo a las características del tramo por inyectar.

Este método no debe emplearse cuando se presente roca muy fisurada, porque la lechada "puentea" el obturador y circula de regreso hacia el exterior atrapando la sonda en el interior de la perforación. El riesgo de que la sonda quede atrapada es menor y la efectividad del tratamiento es mayor, cuando las lechadas son estables.

a.3). Tramos de avance.

Esta técnica consiste en inyectar a medida que avanza la perforación, es decir, se perfora un barreno a una profundidad determinada y se inyecta ese barreno, se perfora un nuevo tramo y se inyecta colocando el empaque al fondo del tramo previo. El incremento de profundidad se realiza en tramos aproximadamente iguales. La lechada remanente es generalmente retirada del barreno antes de que fragüe, para minimizar la rebarrenación.

Este procedimiento es el más costoso pero es el que se puede usar en macizos rocosos de mala calidad donde no es posible evitar que el obturador sea "puenteado", además presenta las ventajas de que no es necesario prefijar la profundidad de inyección y las lechadas y las presiones de inyección se pueden adaptar a las condiciones geológicas del tramo perforado. Otra ventaja de este método es que debido al tratamiento previo de la parte superior del terreno pueden aplicarse presiones mayores en los tramos inferiores sin dañar la estructura superficial y se minimiza el fracturamiento hidráulico en la cimentación.

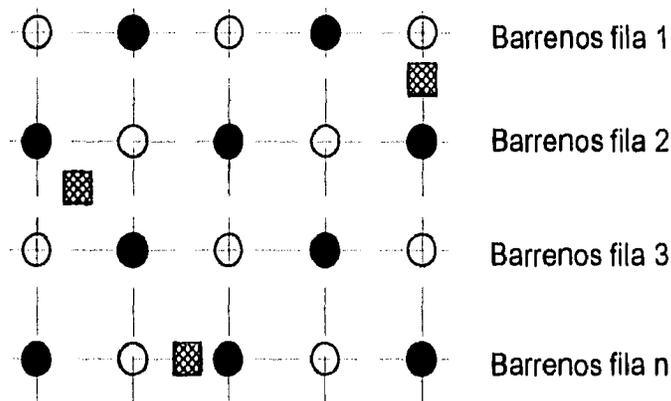
a.4). Solución mixta.

Consiste en inyectar por tramos de avance los primeros tramos donde el material puede estar más fisurado y después efectuar por tramos de regreso la parte inferior de la perforación. Esta solución mixta combina la ventaja técnica de la inyección en tramos de avance en medios muy fisurados cercanos a la superficie del terreno y la ventaja económica del procedimiento de tramos de regreso en la parte profunda del terreno.

b). Disposición de los barrenos y secuencia.

Para el inyectado de consolidación, los barrenos se disponen en planta en una cuadrícula, ver Fig. III.5, el espaciamiento de los barrenos es de 3 a 5 m generalmente, pero en algunos casos se puede reducir más dependiendo de las condiciones geológicas.

Con respecto a la disposición de los barrenos en las cortinas, en la Fig. III.6, se muestran el número de filas y el espaciamiento de los barrenos. El espaciamiento de los barrenos es generalmente de 1 a 3 m (en cada fila), determinándose en cada caso según las condiciones geológicas de cada presa.



Disposición de los barrenos para el inyectado de consolidación.

- Barrenos primarios
- Barrenos secundarios
- ▣ Barrenos adicionales

FIG. III.5.- DISPOSICIÓN DE LOS BARRENOS PARA TAPETE DE INYECCIONES.

El espaciamiento entre filas, generalmente es de 1 a 1.5 m en el caso de dos filas y de 0.5 a 1 m en el caso de tres filas.

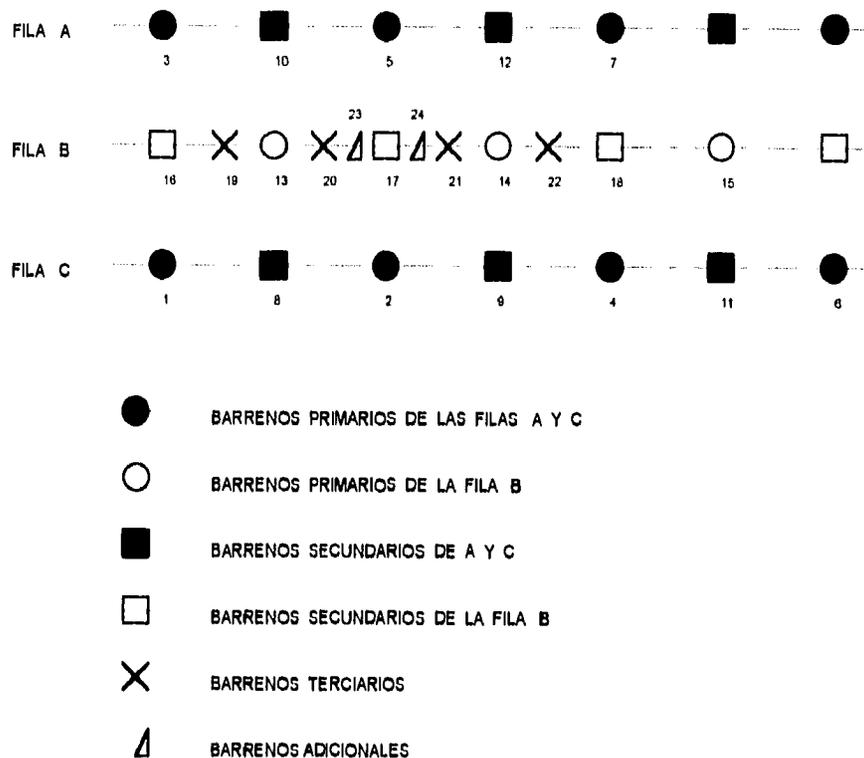
b.1) Secuencias.

El método de cerramiento progresivo es el método más empleado en los trabajos de inyectado.

En la secuencia de los trabajos de inyectado, los barrenos piloto son importantes para confirmar las condiciones geológicas y la permeabilidad de la cimentación antes del inyectado, por eso se obtienen corazones y usualmente se realizan pruebas Lugeon, ver Fig. III.7. El muestreo de corazones ya no se realiza para los barrenos secundarios y los restantes, y la permeabilidad es determinada obteniendo el valor de la permeabilidad en unidades Lugeon mediante pruebas de agua con dos o tres incrementos de presión.

El inyectado simultáneo de barrenos adyacentes, puede interactuar uno con otro y ocasionar grandes presiones que actúan sobre la roca. Por eso, una distancia de más de 8 m debe ser mantenida en la dirección horizontal.

AGUAS ARRIBA

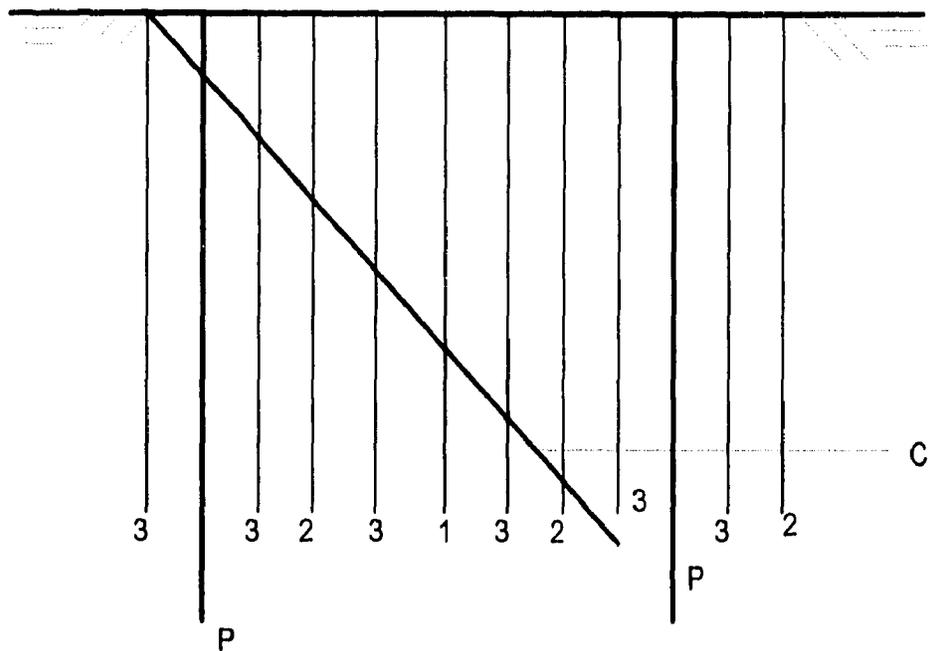


1, 2... SECUENCIA EN QUE LOS BARRENOS SON PERFORADOS
E INYECTADOS

FIG. III.6.- DISPOSICIÓN Y SECUENCIA DE INYECTADO EN UNA PANTALLA DE TRES FILAS.

Para grandes presas y para condiciones donde una pantalla densa es deseable, se puede usar el método de inyectado progresivo, donde se realizan más barrenos donde los resultados demuestren que se necesiten. Generalmente, una sola línea es diseñada, pero previendo la necesidad de una doble fila, y localmente aún, una triple fila de barrenos.

La buena práctica indica que primero se realizará un determinado número de barrenos de exploración, ampliamente separados, por lo menos 30 m y con una profundidad igual a la carga hidráulica. Estos barrenos se muestrearán, se realizarán pruebas de agua de presión y de inyectado. En cualquier sección donde se hayan realizado tres barrenos de exploración, los resultados se deberán analizar y se procederá a realizar los barrenos primarios, perforándolos e inyectándolos hasta una profundidad de 2/3 la carga hidráulica, u otra profundidad determinada a partir de los barrenos de exploración, con separación aproximada de 8 m.



Secuencia de los trabajos de inyectado

- P barrenos piloto
- C barreno de chequeo
- 1,2 y 3 secuencia de los barrenos ordinarios

FIG. III.7.- SECCIÓN DE UNA PANTALLA CON LA SECUENCIA DE TRABAJOS DE INYECTADO.

Los barrenos secundarios se realizarán por el método de cerramiento progresivo a profundidades de $1/3$ a $1/2$ de la carga hidráulica, dependiendo de los resultados de barrenos primarios. Todos los resultados deberán analizarse para determinar si es necesario un inyectado adicional en cualquier área local o en las extensiones lateral y vertical. Posteriormente, se tendrá que elegir entre si se realizan los barrenos terciarios en las áreas permeables, o si se realiza una segunda fila de barrenos, separada más o menos dos metros para formar una zona de inyectado más amplia. Donde se tenga roca suave o material suelto alterado en las fracturas, es preferible tener una pantalla ancha. También, si la toma de lechada en los barrenos secundarios es moderadamente alta, es recomendable inclinarse por una pantalla ancha.

La segunda fila de inyecciones, se deberá ejecutar donde los resultados indiquen que es necesario y se realizará esencialmente en el mismo orden, profundidad y espaciamiento como en los barrenos primarios y secundarios de la primera fila. Se realizará una evaluación al completar los barrenos secundarios para ver si se han alcanzado los objetivos preestablecidos.

A continuación se muestra una tabla, en la que se indican las tomas de lechada razonables para diferentes grados de impermeabilización.

Toma de lechada muy baja	0 a 12.5 kg/m
Toma de lechada baja	12.5 a 25
Toma de lechada moderadamente baja	25 a 50
Toma de lechada moderada	50 a 100
Toma de lechada moderadamente alta	100 a 200
Toma de lechada alta	200 a 400
Toma de lechada muy alta	más de 400

Para grandes presas, los últimos barrenos deberán alcanzar el rango de toma de lechada baja. Si no es así, se deberá decidir si se realizan barrenos terciarios localmente en la segunda fila o en la tercera entre las dos primeras.

c). Longitud de etapas.

El uso de etapas cortas, hace posible identificar las zonas o defectos geológicos que están aceptando lechada, maximizando la oportunidad de tratar esas zonas de una forma efectiva y eficiente. Por el contrario, el uso de etapas largas incrementa la probabilidad que aperturas significativas puedan perderse en distintas zonas cercanas, como resultado de contar sólo con promedios de toma de lechada o permeabilidad, como base de datos para evaluar esas zonas. El uso de etapas largas también incrementa la probabilidad de que las lechadas usadas en cualquier zona, pueden ser inadecuadas para las aberturas a ser tratadas. Además, se incrementa la probabilidad de que la sedimentación de la columna de lechada, dentro de la etapa puede tener efectos adverso. Finalmente, en la zona más profunda en roca fracturada puede presentarse una pérdida de circulación, el uso de etapas largas incrementa la oportunidad de que el material perforada obstruya las aberturas y reduzca su inyectabilidad.

Para la primera sección de inyectado, en el tapete, cuando la presión crítica es pequeña o el control de la presión de inyectado no es fácil por las fugas en la superficie, secciones de inyectado de 2 ó 3 m se usan generalmente, desarrollándose los trabajos más cuidadosamente.

Para las cortinas de inyectado con profundidades superiores de 10 a 20 m, si el valor de la permeabilidad es pequeño y la cantidad de lechada a

inyectarse también es relativamente pequeña, entonces dos secciones de 10 m son utilizados. Sin embargo, en este caso, una prueba de agua para checar la permeabilidad es ejecutada a cada 5 m de profundidad.

d). Orientación.

La orientación de los barrenos, particularmente en pantallas con una línea, son perforados perpendicularmente a la pendiente del terreno superficial, esto ofrece las ventajas de ejecutar la cortina a una profundidad igual a la del barreno. Sin embargo, puede falla al no interceptar un número óptimo de discontinuidades. Además, si existen planos abiertos con inclinación similar a la del barreno, tal vez no se puedan inyectar.

El comité suizo de grandes presas, establece que los barrenos deberán atravesar el sistema principal de juntas en ángulos mayores de 30 grados, de tal forma que atraviere el mayor número de discontinuidades posible por unidad de longitud, e indica que la pantalla deberá tener por lo menos dos filas de barrenos con diferentes orientaciones, realizándose barrenos de chequeo con una tercera orientación que cumpla con el criterio de los 30 grados.

Debido a la dificultad de seleccionar y ejecutar las orientaciones óptimas en un tapete de inyecciones, raramente es usado este criterio. El mismo objetivo es alcanzado barrenando filas adyacentes en ángulos opuestos.

e). Pruebas de agua.

Antes del inyectado deberá realizarse una prueba de agua a presión, a menos que no sea útil por las condiciones de las aberturas, la prueba de agua sirve para:

- Ayudar a decidir si el inyectado es necesario o no.
- Averiguar la presión crítica y así la presión máxima de inyectado.
- Ayuda a deducir el tamaño relativo de las fracturas.
- Toma parte en la identificación de anomalías de bajas tomas de lechada.
- Evalúa los efectos del criterio de cerramiento.
- Verifica que la permeabilidad deseada haya sido alcanzada.

Además, se obtienen los siguientes beneficios incidentales:

- La roca seca por encima del NAF es humedecida, reduciendo la tendencia de absorber el agua de la lechada prematuramente.
- Verifica que el obturador esté colocado adecuadamente y no haya fugas en la roca alrededor del obturador.

- La comunicación entre barrenos puede ser identificada, permitiendo las preparaciones para múltiples conexiones.

- Las superficies de fuga pueden identificarse, realizando tratamientos superficiales suplementarios antes de iniciar el inyectado.

e.1). Lavado.

Antes de inyectar los barrenos, estos se lavarán con agua con el propósito de : limpiar los restos de la perforación en el barreno y remover los restos de suelo y todo material suelto de la grietas.

En presas de tierra, la pantalla se usa solo para impermeabilizar, por lo que el lavado no se deberá hacer de un barreno a otro (lavado a presión). Es preferible dejar el limo y la arcilla en las fisuras y compactarlas con la presión de inyectado.

Cuando el material a remover sea considerable, el proceso de lavado se auxilia con el bombeo de aire dentro del agua de lavado. Esto causa un efecto de ebullición, que en algunos casos es más efectivo al remover el relleno de las grietas que el agua sola.

e.2). Pruebas de presión.

Después del lavado, el siguiente paso es la prueba de presión, en que el agua es bombeada a presión dentro del barreno y el volumen del flujo es medido. La planeación de la prueba se basa en el conocimiento de los corazones extraídos y de una estimación de la permeabilidad. Las pruebas de presión generalmente se realizan con una presión aproximadamente igual a la máxima presión de inyectado.

f). Resurgencias.

En el inyectado de la parte superficial de la roca, hay una tendencia de la lechada a fluir ascendentemente e infiltrarse a través de las grietas de la roca adyacente al barreno.

Los siguientes métodos han sido utilizados para controlar estas superficies de fugas:

1. Construcción de un tapón de inyección o muro de concreto en una trinchera excavada en el cauce.

2. Calafateo de las fugas en la superficie con cuñas de madera, relleno de lechada de cemento seco, estopa, tejido de costales y otros materiales.

3. Cubrir la superficie limpia de la roca con una capa delgada de mortero.

4. Inyectado de una lechada muy densa dentro del barreno hasta que se llene y escurra en la superficie, permitiendo que fragüe antes de perforar otra vez para el inyectado.

5. Construcción temporal de un terraplén de tierra (llamado frecuentemente "plataforma de inyectado" con altura de 1.5 a 6 m a lo largo de la línea de inyecciones, realizándose el inyectado a través del terraplén.

Donde las condiciones no son demasiado severas, un tapón relleno de concreto, generalmente es suficiente para controlar las fugas en la parte superficial de la roca. El tapón de inyección tiene las siguientes funciones: constituye un muro impermeable en la parte superficial de la roca, que está más fracturada y es más difícil de inyectar; se obliga a la lechada a viajar distancias mayores y elimina las perturbaciones por la colocación del niple.

Donde la superficie de la roca está muy fracturada a considerable profundidad, un delantal de mortero controla satisfactoriamente las fugas. En la superficie de la roca agrietada, la lechada tiende a fluir hacia arriba dentro de un área relativamente confinada alrededor del barreno. Cuando la superficie de la roca, alrededor del barreno está cubierto con una capa impermeable de mortero, la lechada es forzada a moverse horizontalmente bajo el delantal y extenderse, creando una zona más amplia de inyectado e impermeabilizando la roca .

Cuando la superficie de las grietas no es demasiado grande, algunas veces pueden rellenarse bombeando alguna mezcla densa dentro del barreno, la mezcla es bombeada a bajas presiones y se permite verterse fuera de las principales grietas, rellenando las depresiones superficiales y dejándose fraguar antes de continuar.

La construcción del terraplén de tierra a lo largo de la línea de inyectado tiene dos ventajas: provee peso sobre la superficie de la roca que permitirá el uso de presiones de inyectado mayores en la parte superior del barreno y confina la inyección y previene el derramamiento fuera de las grietas de la roca en la superficie.

III.2.6. CASOS ESPECIALES.

a). Inyectado de roca cárstica.

El principal problema al inyectar roca cárstica, es el dejar canales de solución sin tratamiento, ya que un solo canal sin tratamiento, puede convertir en inservible a la cortina, aunque este riesgo es aceptado algunas veces en el área del embalse, pero siempre se debe intentar prevenir que en el sitio de la presa, se presenten filtraciones de agua bajo presión dentro de los empotramientos, ya que puede poner en riesgo la estabilidad de los mismos y de la estructura completa.

La única solución al problema hasta ahora, es el uso de barrenos, lo más cercanos posible entre sí, generalmente localizados en una sola fila. Hay una mayor oportunidad de interceptar todos los vacíos con un número dado de barrenos si son dispuestos en esta forma. El resultado es un conjunto de

barrenos con longitud mucho mayor comparada a los que se usan en formaciones no cársticas.

La toma de lechada por metro cuadrado de pantalla, no es generalmente, más grande que las de rocas que están simplemente fisuradas, ésto es, porque la toma de lechada está gobernada principalmente por las fisuras y los vacíos que están distribuidos erráticamente en toda el área, ésto significa que a pesar de las altas tomas locales ésto no altera el consumo global.

Donde se encuentran grandes cavidades abiertas, cavernas o cuevas el inyectado puede resultar poco confiable. Es preferible rodear las cavidades o rellenarlas con concreto. Este tipo de trabajo requiere pozos o socavones.

El relleno de los canales cársticos es complicado por las altas velocidades de flujo, pero esta operación ha sido realizada con éxito en varios sitios. Sin embargo no se pueden dar reglas generales. Los trabajos deberán basarse sobre el principio de autosellamiento de las cavidades por materiales de distintos tamaños y formas, las partículas más grandes se atascarán primero en la sección más estrecha del canal.

Así las filtraciones que provengan del embalse, podrán obstruirse durante el llenado por el uso de corrientes naturales para transportar los materiales hacia las entradas de las rutas de filtración.

Podemos decir que por el momento la tecnología de inyectado en rocas cársticas se basa en tratamientos convencionales.

b). Flujo artesiano.

El flujo de agua artesiano en los barrenos impide el inyectado y deberán tratarse separadamente.

Si el flujo artesiano no se trata antes de llegar hasta la profundidad total, el agua que sale del barreno es un factor de confusión cuando se realizan las pruebas de agua y la inyección se realiza a grandes profundidades. Por eso, el procedimiento óptimo es detener la perforación cuando el flujo artesiano es encontrado, y permitir que drene el máximo tiempo posible antes de intentar el inyectado. La inyección de la zona que produce agua deberá realizarse con las presiones más altas posibles usando lechada de cemento con un dispersante o lechadas químicas.

III.2.7. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL INYECTADO.

a). Criterio de permeabilidad.

La unidad Lugeon es la más usada en los trabajos de inyección en roca. Como la aplicación de una presión de diez atmósferas a poca profundidad puede dañar la cimentación, la prueba para averiguar la permeabilidad, se hace comúnmente a presiones menores y la permeabilidad calculada se

ajusta. La fórmula usada para este cálculo, cuando se usan unidades inglesas en los datos es :

$$L = \frac{\text{toma de agua en cfm}}{\text{longitud del intervalo}} \times \frac{147}{\text{presión del intervalo}} \times \frac{1}{0.01076}$$

Houlsby (1977): establece que en el uso del criterio de cerramiento progresivo, la permeabilidad deberá ser de 1 Lugeon si el agua es considerada valiosa y 2-3 Lugeon si el valor del agua que puede perderse por las fugas, es mayor al costo del inyectado .

Desde un punto de vista práctico, no es común en la práctica alcanzar una permeabilidad inferior a 1 Lugeon, que es equivalente a una permeabilidad de 1.3×10^{-5} cm/seg. Ya que es sumamente difícil disminuir la permeabilidad de roca fracturada de 10^{-5} a 10^{-6} cm/seg con el uso de lechadas convencionales de cemento.

La aplicación de la permeabilidad basada en el método de cerramiento progresivo, establece ejecutar la prueba de permeabilidad en cada barreno y averiguar si la reducción progresiva de la permeabilidad es alcanzada en las etapas sucesivas de inyectado (esto es en los barrenos primarios, secundarios, terciarios, cuaternario) o dirigir las pruebas a un número limitado de barrenos de verificación, debiendo mostrar la toma de agua una marcada reducción, a la vez que se alcanza una separación de 1.5 m entre barrenos indicando que no se necesita más inyectados.

b). Criterio de toma de lechada.

El criterio basado sobre la toma de lechada es más fácilmente aplicable que el criterio de permeabilidad, por lo que es el más ampliamente usado. Deere 1982, presenta los siguientes límites superiores de absorción de lechada para los barrenos secundarios en función de la profundidad.

PROFUNDIDAD DE INTERVALO (M)	ABSORCIÓN DE LECHADA (KG/M)
0 - 10	25
10 - 20	34
20 - 30	50
30 +	100

Sin embargo, se puede inferir que si seguimos los criterios de Deere, podemos esperar obtener una pantalla ligeramente densa en las etapas

superiores, el mismo resultado en las etapas intermedias y pantallas más densas en las etapas más profundas.

III.3. DRENAJE.

El sistema de drenaje de una presa, su cimentación y empotramientos, forman parte de un complejo sistema. La estabilidad de este sistema depende de una buena interacción entre estos elementos.

Debemos tener en cuenta que el sistema de drenaje cumple dos distintas funciones: 1. Contribuye a la estabilidad de la presa y 2. facilita el monitoreo de la misma.

El drenaje contribuye a la estabilidad de la presa, de las siguientes formas:

- Disminuyendo las subpresiones.
- Incrementando el flujo, aunque esto tiende a incrementar el gradiente y las velocidades de flujo, es decir, las posibilidades de erosión; esto permite drenar el agua más fácilmente.
- En algunas ocasiones es imposible garantizar la estabilidad de la presa, su cimentación y empotramientos, sin la ayuda del drenaje.
- La mayoría de las veces, el drenaje es sólo un elemento que contribuye a obtener un fin deseado de la manera más económica y segura.
- Si el drenaje se ha construido para contribuir a la seguridad o al monitoreo, deberá permanecer en funcionamiento durante toda la vida útil de la presa.

III.3.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

Las base para el diseño son:

- Extensión, esto es, las zonas que debe alcanzar y cubrir.
- El tipo de roca, estratificación, localización de las discontinuidades, espesor y características del material de relleno, altura del embalse y topografía del sitio.

- Las características mecánicas e hidráulicas del medio a drenar, que con la carga de agua, se determinará la importancia de los flujos a drenar, determinando el número y dimensiones de los canales que deberán incorporarse.

- La información que se obtenga a través del drenaje, ayudará a determinar el tipo de arreglos por zonas o global, de la instrumentación necesaria.

La red de drenaje en roca, consiste esencialmente de: barrenos de pequeño diámetro y galerías.

La profundidad que el drenaje deberá alcanzar, es determinada en algunas partes, con una regla sencilla basada en la altura de la presa. En otras partes, se consideran las características geológicas del terreno: estratificación, echado, fracturas, fallas, y otras. En ambos casos, mejoran sus determinaciones con la obtención de datos piezométricos durante el llenado.

El mismo procedimiento es seguido respecto a la extensión del drenaje dentro de las zonas laterales de la presa.

En el presente, se toma especial cuidado en proveer el drenaje necesario para los empotramientos aguas abajo de la presa. Para esto, se realizan cálculos de estabilidad por acciones de subpresión, basado en la estratigrafía, fracturas, etc. La intención, es que el drenaje alcance aquellos puntos en que la presencia de subpresiones pueda afectar la seguridad de la presa.

Las características hidráulicas deberán considerarse en dos aspectos: la permeabilidad general y localización y distribución de las características geológicas que puedan influir en la permeabilidad local y en las direcciones preferenciales y rutas del flujo.

Los métodos generalmente empleados para determinar las características hidráulicas son las pruebas de agua *in situ*, que dan la permeabilidad en unidades Lugeon. Estas pruebas se realizan en los barrenos de exploración y en los de la cortina de inyecciones.

Para determinar la distancia entre drenes, se usa generalmente el método de Casagrande, a pesar de esto, en la práctica la distancia entre barrenos y sus diámetros se determina actualmente por el criterio del propio diseñador, usando su experiencia y conocimiento de la geología del lugar en cada caso particular. Distancias entre 1.5 y 20 m y diámetros entre 60 y 110 mm son generalmente usados.

Hay varios criterios para determinar la dirección de los barrenos:

- Determinando que la dirección, la misma para todos los drenes, sea de acuerdo con las que se trabajaron en la cortina de inyecciones, o hacerlo simplemente vertical.

- Variando la dirección de cada dren, según las condiciones geológicas que se vayan encontrando, con el fin de obtener la mayor capacidad de drenaje en cada barreno, reduciendo así el número de barreno.

El primer arreglo, es frecuentemente incluido en las etapas iniciales de diseño y el segundo, para los drenes que se deciden barrenar como resultado de los detalles descubiertos en el terreno durante la construcción o por las subpresiones que se generan durante el llenado.

Una solución relativamente moderna, es el drenaje de los empotramientos por medio de galerías y barrenos hechos desde ahí. Para este fin, se pueden utilizar las que se construyeron para fines de exploración. Si éstas no son suficientes, y este es generalmente el caso, se pueden construir más, en uno o varios niveles en los lugares adecuados. Generalmente se ubican para que su drenaje sea por gravedad hacia aguas abajo del río. Desde estas galerías, el drenaje de la cimentación que no tiene una galería debajo del corazón, también es realizado o completado.

Si el terreno está estratificado desfavorablemente o la hidrogeología es desfavorable, una solución generalizada es emplear pozos de alivio en donde termina el filtro horizontal o en las galerías o aguas abajo del respaldo en el talón.

III.3.2. ELEMENTOS DEL DRENAJE.

a). Pozos de alivio.

Son perforaciones que se hacen en la roca, aguas abajo de la pantalla, con el propósito de interceptar y controlar las filtraciones. Deberán considerarse en cualquier sitio, donde se considere que se puedan desarrollar grandes presiones de agua en las fracturas de la cimentación o empotramientos de la presa, y especialmente en rocas sedimentarias estratificadas.

En muchas formaciones rocosas, perforaciones de dos o tres pulgadas de diámetro, serán adecuados para interceptar toda el agua que pueda filtrarse pasando la pantalla y reduciendo así la presión del agua en las fisuras de la roca a magnitudes tolerables.

b). Galerías de drenaje.

Las galerías deberán ser lo suficientemente grandes para que entre un hombre y pueda trabajar, con el propósito de inyectar y drenar el agua.

Algunos de los beneficios que se pueden obtener del uso de las galerías son:

- Sirve para tener acceso a la cimentación bajo la presa cuando el embalse está lleno, pudiendo indicar cualquier inyectado adicional o drenaje requerido.

- La galería del drenaje puede usarse para la instrumentación.

- Si la galería es construida en forma de túnel bajo la superficie y a lo largo del eje longitudinal de la presa, tiene una gran ventaja como un túnel de exploración de la roca de cimentación, recomendando que se haga una exploración en la galería después de cualquier evento, porque es el único modo de obtener un completo entendimiento de la naturaleza de la roca a lo largo de la pantalla.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El tamaño continuamente creciente de las presas modernas, produce esfuerzos sobre la roca, que pueden superar sus límites de resistencia si presentan algún defecto capaz de iniciar un proceso mecánico que no se conozca en toda su extensión o que se detecte demasiado tarde; por eso, para el diseño y construcción se debe seguir todo un proceso para minimizar los errores:

- 1). Determinación de la resistencia y deformabilidad de los macizos rocosos, ya sean fisurados o compactos.
- 2). Correlación entre las propiedades mecánicas de las rocas y los datos geológicos.
- 3). Análisis de las propiedades de las rocas y de las condiciones hidráulicas, en un área mayor a la de la zona de trabajo.
- 4). Estabilización de los macizos rocosos.
- 5). Determinación y reducción de la permeabilidad de los macizos rocosos.
- 6). Estudio de la evolución de los deslizamientos de los taludes naturales.
- 7). Medición de los esfuerzos en los macizos rocosos, antes y después de las excavaciones y construcción de la presa.

Para poder ejecutar este proceso, es necesario utilizar los métodos de investigación para obtener toda la información necesaria y realizar su análisis, por lo que es necesario realizar los siguientes pasos:

- 1). Geología e hidrogeología.
- 2). Descripción detallada de la estructura del sitio (geometría de las discontinuidades, características de los rellenos, etc.) y determinación de los índices de identificación mecánica.

- 3). Medición directa de los parámetros mecánicos utilizados en el cálculo.
- 4). Observación de la cimentación de la presa una vez puesta en servicio.

Es inevitable que las investigaciones, no importa que tan extensivas o tan cuidadosamente se hayan ejecutado, no puedan descubrir todas las características de la cimentación que son significativas e importantes para la seguridad de la presa.

Por eso, los cambios que se tengan que realizar en el diseño de la presa, se harán como trabajos progresivos para adaptar el proyecto constantemente a las condiciones de la cimentación que se vayan presentando. Muchas decisiones deberán tomarse en los trabajos de campo constantemente día a día; por ejemplo, la profundidad de la excavación, retiro de protuberancias y el aumento o disminución del número de barrenos de inyección.

Las especificaciones deberán establecer claramente cuál es el objetivo de los trabajos, para que tales decisiones puedan hacerse apropiada y rápidamente.

Por otra parte, las exploraciones con socavones y pruebas en pozos, deberán planearse y localizarse sólo después de tener un conocimiento suficiente de la geología del sitio. Ya que con este conocimiento inicial, se deberá saber lo que se busca, una zona brechosa de falla, zonas delgadas de fallamiento a lo largo de planos de estratificación, el contacto de diferentes materiales, caídos de taludes que pueden ser expansivos y deben ser removidos y otras características.

PROBLEMAS EN LA CIMENTACIÓN

La importancia de la geología para el conocimiento de los factores que influirán en el comportamiento de la presa es determinante, por lo que deberán entenderse completamente y prever las medidas necesarias para evitar o disminuir sus efectos adversos sobre la presa, por ejemplo:

- a). La cimentación en roca erosionable debe ser completamente explorada para descubrir cualquier cavidad preexistente o cualquier otro defecto.
- b). La total prevención de fugas, dentro del embalse y cimentación durante la vida de la presa, puede ser inalcanzable bajo circunstancias usuales, por lo que se deberá establecer el nivel de filtraciones aceptable.
- c). Las fallas que estén en la proximidad y subparalelamente a una falla activa, deberán considerarse como susceptibles de moverse durante un evento sísmico.

- d). La posibilidad de movimientos diferenciales de fallas no relacionados con la actividad tectónica deberá considerarse.
- e). Los efectos potenciales del hundimiento del terreno, deberán reconocerse en el diseño de presas y embalses. Así como las causas externas y efectos de hundimiento deberán ser monitoreados.
- f). A las discontinuidades de la cimentación deberá darse especial tratamiento durante la construcción.
- g). El terraplén y cimentación que contenga materiales erosionables, deberán ser eliminados o tener adecuada protección con filtros.
- h). El diseñador deberá visitar el sitio, por lo menos mensualmente, para verificar que las condiciones del sitio y materiales de construcción sean de acuerdo al proyecto, si no es así, determinar las modificaciones pertinentes.
- i). Los estudios previos a la construcción deberán considerar las propiedades de la masa rocosa como tal, y poner particular atención a su potencial deformación con el paso del tiempo. Una evaluación teórica por sí sola es inadecuada e insuficiente. La mejor forma de determinar las características de la roca, es una evaluación sistemática que incluye:
- Una investigación de la geología regional.
 - Una evaluación de los procesos geológicos que haya modificado las características y/o propiedades de las rocas del sitio y el embalse.
 - Un pronóstico de los efectos del llenado del embalse sobre las características geológicas en el sitio y embalse.
 - Las condiciones cambiantes durante el tiempo del proyecto en su área de influencia.
- j). El proyecto deberá instalar un sistema para adquirir datos sobre la interacción entre las condiciones geológicas y los cambios inducidos por la operación del proyecto, con los siguientes factores a reconocer:
- Las masas rocosas, bajo cambios ambientales, pueden debilitarse en cortos periodos de tiempo (días, semanas o meses).
 - La resistencia de las masas rocosas puede decrecer muy rápidamente, una vez que el creep se presenta, particularmente cuando actúan fuerzas externas.
 - La evidencia de creep activo debe considerarse como un aviso de advertencia, para actuar inmediatamente en las técnicas de evaluación y corrección, porque el colapso puede ocurrir rápidamente.

TRATAMIENTO DE CIMENTACIONES.

Son tres los objetivos del tratamiento de una cimentación:

1. Reducción de las deformaciones.
2. Control de las fuerzas hidráulicas y filtraciones.
3. Aumento de la resistencia.

El tratamiento de las cimentaciones de presas en formaciones rocosas, casi sin excepción, se relaciona con trabajos que tienen por objeto evitar o controlar las filtraciones, ya que generalmente presentarán suficiente resistencia para soportar las presas de tierra y enrocamiento.

CONTROL DE FILTRACIONES.

Las filtraciones en presas de tierra, pueden controlarse por tres métodos básicos:

1. Uso de filtros para prevenir la tubificación y los levantamientos.
2. Reducción de filtraciones, mediante el sellado de grietas (inyección).
3. Drenaje.

El inyectado y el drenaje de la cimentación de roca es algo sumamente crítico, no tanto para prevenir las fugas de agua sino para controlar las subpresiones de filtración.

Puesto que la mayoría de las fallas de las presas, tienen serias consecuencias, es necesario un diseño conservador para el control de las filtraciones.

Los principios de Mecánica de Suelos, la experiencia y un buen juicio deberán combinarse para desarrollar sólidos diseños y especificaciones prácticas, debiéndose supervisar cuidadosamente la construcción.

a). Tratamiento superficial.

El tratamiento superficial es una parte esencial del programa de inyectado, pues las fugas superficiales, si se permite que se presenten, evita el llenado de las fracturas con lechada de la masa rocosa. Por eso, las especificaciones deben establecer que cualquier colocación de concreto dental, el tratado de grietas superficiales, concreto lanzado o tapón de inyecciones en la roca superficial, debe ser completado antes de iniciar las operaciones de inyectado en cualquier parte de la cimentación.

b). Pantalla de inyecciones.

La información geológica necesaria para el diseño de una pantalla de inyecciones, puede en algunos casos, ir más allá que el reconocimiento necesario para el diseño de la propia presa. Se realizarán pruebas de permeabilidad hasta una profundidad en la que la permeabilidad ya no sea importante.

La estructura geológica deberá entenderse completamente, de tal forma que las rutas de filtración puedan identificarse y tratarse. La profundidad de un horizonte impermeable puede conocerse, pudiéndose determinar adecuadamente la profundidad de la pantalla.

La posible existencia de materiales tubificables, minerales solubles u otras condiciones adversas deberán reconocerse, tal que la factibilidad del inyectado como método para reducir las filtraciones pueda evaluarse.

La función primaria de la pantalla de inyecciones es interceptar y rellenar los pasos del agua, tales como los canales de solución y fisuras, su sellado provee una barrera impermeable.

La instalación de una pantalla de inyecciones en la cimentación y empotramientos, resultará en un mejoramiento, sólo si se alcanza la roca más impermeable a profundidades razonables. Si este no es el caso, la pantalla forma sólo una pantalla parcial, en el que la longitud de filtración es incrementada y ofrece resistencia a las filtraciones pero no disminuye las cantidades de filtraciones.

Algunos autores, han expresado sus dudas sobre la necesidad de las pantallas impermeables, hay pantallas que con estudios más profundos se podrían haber evitado. Sin embargo, la perforación de taladros muy próximos supone una investigación detallada de la roca. Por lo que, una vez que la línea de barrenos ha sido perforada e inyectada, se tiene considerable seguridad que se han localizado todos los estratos permeables y las fallas y fracturas dentro de la pantalla impermeable.

Para presas menores de 30 m de altura, el inyectado es frecuentemente omitido, en presas de tierra aún en alturas mayores.

b.1). Presión de inyectado.

La presión que puede usarse en forma segura depende en gran medida de la orientación de las juntas y qué tan rápidamente se disipa la presión, así como del movimiento de la lechada lejos del barreno. De los planos de juntas continuas, especialmente si son paralelas a la superficie libre y/o si están cercanas a la superficie, son las más críticas.

c). Tapete de inyecciones.

El propósito del tapete de inyecciones, es mejorar la roca en la parte superficial, donde se localizan los máximos gradientes para proveer una unión efectiva entre la pantalla de inyecciones y el corazón impermeable.

d). Procedimientos de inyectado.

Las consideraciones que se deben tomar en cuenta en los trabajos de inyección son:

- Para seleccionar el método de inyección y la naturaleza de la lechada, es necesario determinar la porosidad y/o el estado de fisuración del medio, así como su permeabilidad
- La evaluación de la permeabilidad en cimentaciones, es generalmente realizada con las pruebas Lugeon.
- La exploración de la permeabilidad de la roca, se desarrolla hasta que la roca tenga una baja permeabilidad.
- Cuando se planean los trabajos de inyectado, se debe establecer el objetivo en cada presa, y generalmente los valores usados son la unidad Lugeon y la toma de lechada.
- La práctica actual está tendiendo a usar solamente de dos a tres mezclas diferentes en una obra: una mezcla inicial, una normal para tomas continuas y una especial para grandes tomas.
- El rango de los trabajos de inyección es determinado principalmente sobre las bases de la permeabilidad y el nivel del agua subterránea en empotramientos.
- El método de cerramiento progresivo en combinación con las progresiones ascendentes, son los métodos más usados.
- La longitud de las secciones de inyectado es normalmente de 5 m, pero puede variar dependiendo de las condiciones geológicas.

- Los barrenos de inyectado y de drenaje deberán orientarse para interceptar el máximo número de juntas y aberturas, incluyendo las zonas más permeables.

- Los barrenos de chequeo se realizan para evaluar los efectos del inyectado, y los datos de las condiciones finales del inyectado se obtienen de estos barrenos.

- Para las condiciones finales de la zona inyectada, se requiere que de un 85 a 90 % de la sección, satisfaga el objetivo del mejoramiento preestablecido.

- Los efectos finales del inyectado, son evaluados cuando se llene el embalse en el primer año.

e). Drenaje.

El drenaje es usado primariamente para controlar las filtraciones del agua subterránea, aunque el drenaje facilita generalmente el incremento de las cantidades de los flujos de filtraciones, esto provee un seguro control de filtraciones y observación de las mismas.

Cuando una roca es drenada, el problema relativo a la estabilidad es reducido significativamente, aún en los empotramientos con una filtración baja, la presión hidrostática influyendo sobre la estabilidad de los taludes, debe estudiarse cuidadosamente. Por lo que será necesario construir en las laderas un sistema de drenaje.

La efectividad de un sistema de drenaje para reducir las subpresiones depende de la geometría de las rutas de filtración, localización de las galerías de drenaje, espaciamiento y tamaño de los barrenos así como de la permeabilidad de la roca. Un drenaje es considerado efectivo, si reduce la subpresión en la fila de drenes a un cuarto o a un tercio de la carga hidráulica.

COMENTARIOS FINALES.

El estudio de la roca de cimentación, está vinculada principalmente con eventos naturales, y no siempre es tarea fácil la identificación o caracterización de los problemas del sitio, por lo que la etapa de estudios geotécnicos es de suma importancia en la obtención de la información necesaria para conocer las características del macizo rocoso en el sitio, ya que de esta información depende todo el diseño inicial de la cimentación, y las propuestas para solucionar los problemas encontrados con los estudios.

La magnitud real de los trabajos de tratamiento de la cimentación, se determinará hasta que la roca de cimentación quede expuesta por la excavación, por lo que el programa de tratamiento deberá ser flexible y claro en los objetivos ha alcanzar, para que se realicen las modificaciones necesarias sin alterar el fin del tratamiento.

Para lograr ésto, el ingeniero de presas debe tener conocimiento de los mecanismos de falla en presas de tierra y de las condiciones geológicas que causarán problemas en la cimentación, para evitar o resolver adecuadamente los diversos problemas que se presenten durante la construcción de la presa.

BIBLIOGRAFÍA

1. Allende, J.L., "**Leakage Investigation and Drainage of Dams and their Foundations**", Twelfth International Congress on Large Dams, México, 1976, Q-45, Vol. IV, pp. 69-167, Reporte General.
2. Arnold, Arthur B., et. al., "**Geology**", Cap. 4 de, Advanced Dam Engineering, Construction and Rehabilitation, Ed. Van Nostrand Reinhold, E.U.A., 1988, pp. 106-152.
3. Bell, F.G., "**Dams and Dams Sites**", Cap. 7 de, Engineering Geology and Geotechnics, Ed. Newnes-Butterworths, London, 1980, pp. 275-321.
4. Bozovic, Aleksandar, "**Foundation Treatment for Control of Seepage**", Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausana, 1985, Q-58, Vol. III, pp. 1540-1582, General Reporter.
5. Cedergren, Harry R., "**Seepage Control in Earth Dams**", Embankment Dam Engineering (Casagrande Volume), Ed. J. Wiley and Sons, New York, 1973, pp. 21-45.
6. Comisión Federal de Electricidad, Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección B: Geotécnica, Vols.: B.3.1., B.3.3., B.3.4., B.3.5., México, 1980.
7. Deere, Don U., Control de Campo del Inyectado de la Cimentación en Presas, Ed. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1982.
8. Deere, Don U., "**Dams on Rock Foundations - Some Design Questions**", Contribución en, Rock Engineering for Foundations and Slopes, Vol. II, Univ. de Colorado, Boulder, Ed. ASCE, Nueva York, 1976, pp. 55-85.
9. Fetzer, Claude A., et. al., "**Earthfill Dam Construction and Foundation Treatment**", Advanced Dam Engineering, Construction and Rehabilitation, Ed. Van Nostrand Reinhold, E.U.A., 1988, pp. 321-340.

10. Higuera Gil, Sergio, Estudio de Mezclas de Inyectado en el Laboratorio y Algunas de sus Aplicaciones, Ed. SARH, México, 1976.
11. Houslyby, A.C., "**Design and Construction of Cement Grouted**", Fifteenth International Congress of Large Dams, Lausana, 1985, Q-58, R-60, Vol. III, pp. 999-1015.
12. James, Laurenceq B., et. al., "**Lessons from Notable Events**", Cap. 2 de, Advanced Dam Engineering, Construction and Rehabilitation, Ed. Van Nostrand Reinhold, E.U.A., 1988, pp. 8-59.
13. Japanese National Commite of the International Commission on Large Dams, Standar for Geological Investigation of Dam Foundation, 1978.
14. Jones, Jack, "**Rock Foundations and Abutments for Dams**", Contribución en, Rock Engineering for Foundations and Slopes, Vol. II, Univ. de Colorado, Boulder, Ed. ASCE, Nueva York, 1976, pp. 91-100.
15. Lancaster-Jones, P.F.F., "**Mejora de las Propiedades de los Macizos Rocosos**", Cap. 12, Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica, Ed. Blume, Madrid, 1970.
16. Londe, Pierre, La Mecánica de Rocas y el Proyecto de Cimentación de Grandes Rocas,
17. Londe, Pierre, "**Recent Developments in the Design and Construction of Dams and Reservoirs on Deep Alluvium, Karstic and other Unfavourable Formations**", Tenth International Congress on Large Dams, México, 1976, Q-37, Vol. V, pp. 143-221, Reporte General.
18. Lugget, Robert F. y Karrow, Paul F., "**Cimentación de presas**", Cap. 25 de, Geología Aplicada a la Ingeniería Civil, Ed. McGraw-Hill, México, 1986, pp. 25-1 a 25-48.
19. Marsal, Raúl J. y Reséndiz Núñez, Daniel, Presas de Tierra y Enrocamiento, Ed. Limusa, México, 1975.
20. Marsal, Raúl J. y Wilson, D. Stanley, Current Trends in Design and Construction of Embankment Dams, Ed. ASCE, New York, 1979.
21. Pircher, Wolfgang, "**Influence of Geology and Geotechnics on the Design of Dams**", Fourteenth International Congress on Large Dams, Río de Janeiro, 1982, Q-53, Vol. II, pp. 1019-1113, Reporte General.
22. Rigny, P., "**European v.s. U.S. Grouting Practices**", Contribución en, Rock Engineering for Foundations and Slopes, Vol. II, Univ. de Colorado, Boulder, Ed. ASCE, Nueva York, 1976, pp. 37-45.
23. Santoyo Villa, Enrique, "**Exploración de Sitios de Presas**", IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Mérida, México, 1978.

24. Sherard, J.L., Earth-Rock Dams, Ed. John Wiley and Sons, Nueva York, 1963.
25. Shimizu, Shigeaki, et. al., "**Design and Execution of Foundation Grouting for Multipurpose Dams in Japan**", Fifteenth International Congress of Large Dams, Q-58, R-23, Vol. III, pp. 429-453.
26. SRH, CFE y UNAM, Comportamiento de presas construídas en México, Contribución al XII Congreso Internacional de Grandes y Presas, México, 1976.
27. Swiger, William F., "**Preparation of Rock Foundations For Embankment Dams**", Embankment Dam Engineering (Casagrande Volume), Ed. J. Wiley and Sons, New York, 1973, pp. 355-363.
28. Szalay, Kalman, "**Dams on Rock Foundations-Some Design Questions**", Contribución en, Rock Engineering for Foundations and Slopes, Vol. II, Univ. de Colorado, Boulder, Ed. ASCE, Nueva York, 1976, pp. 114-124.
29. Weaver, Ken, Dam Foundation Grouting, Ed. ASCE, New York, 1991.