



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"ARAGÓN"**

**INYECCIÓN DE LECHADA PARA LA CONSOLIDACIÓN  
E IMPERMEABILIZACIÓN DE LA CORTINA  
PERTENECIENTE AL P.H. "EL CAJÓN"**

**DESARROLLO DE UN CASO PRÁCTICO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

**OMAR ALEJANDRO SIGUENZA VALLEJO**

**ASESOR:**

**M. en I. MARIO SOSA RODRÍGUEZ**





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.



---

## AGRADECIMIENTOS

Son tantas personas a las cuales debo parte de este triunfo, de lograr alcanzar mi culminación académica, la cual es el anhelo de quienes así lo deseamos.

Sin embargo, deseo agradecer profundamente a la casualidad que la vida me otorgó al haberme puesto en un hogar maravilloso al nacer, el cual recuerdo ahora de manera nostálgica. Con el apoyo, en todo el sentido de la palabra, de mis padres y hermanos, el placer cotidiano de vivir sería simple monotonía. Es difícil imaginar cómo sería el andar cotidiano sin recordar su comprensión, su inmenso apoyo y su amor.

A ti Padre, que te debo la gran parte de tu vida que nos dedicaste, por tu enseñanza del sentido de responsabilidad y trabajo, a ti que me inculcaste que el aprendizaje y las metas son lo único en la vida. Gracias por tu ejemplo.

Que no decir de mi madre, simplemente que siempre serás mi inspiración para alcanzar mis metas, por enseñarme que todo lo que se aprende y que todo esfuerzo es al final recompensa. Igualmente te agradezco el amor y la dedicación que me regalaste. Gracias porque nunca me has dejado caer.

Su esfuerzo y su tenacidad, se convirtió en su triunfo y el mío, LOS AMO.

A mis hermanos, Adrián, Karina y Laura, confidentes y cómplices de retos y aventuras a los que agradezco sean como son, por ayudarme a crecer y madurar como persona por sus locuras y virtudes.

A mis sobrinas Aimmét y Mariana a las que deseo de todo corazón que jamás trunquen sus sueños y que algún día se encuentren en un momento mejor al que yo tengo hoy en día.

A mi abuelita Concepción por haberme apoyado durante toda la carrera, gracias por sus desvelos y esmeros, porque de ese modo nunca me sentí solo, aun cuando estuve lejos de mi hogar.

El día de hoy tengo la fortuna de contar con dos pequeñas vidas que vinieron a darme la fuerza necesaria para superarme día a día y a los que transmitiré los mejores regalos que una vez me



---

entregaron, apoyo, educación y amor. Los amo Johan y Alexa. Y por su puesto no puedo dejar de mencionar a la mujer que me regalo tan bella aventura de ser padre y por impulsarme a culminar con lo que un día empecé, gracias Yaneth.

Durante la carrera me encontré con los mejores seres humanos que he conocido en mi vida, compañeros, amigos, confidentes y todo tipo de adjetivos positivos que puede ser acreedor un amigo, sin ustedes, sin su apoyo no hubiera sido fácil culminar la carrera. Gracias a ustedes: Manuel, Luis, Christian, Edgar, Jorge, Ayac Yuan, William, Edson, Samuel.

No puedo dejar de mencionar el apoyo que me brindaron mis compañeros de trabajo para poder culminar con este trabajo, ya sea de modo humorístico, moral, técnico, etc., todo ese apoyo fue muy valioso para mí.

Al M. en I. Mario Sosa, por haberme asesorado, apoyado y orientado para la realización de este trabajo de titulación.

A los miembros del jurado por dedicarme su tiempo.

Sin lugar a duda este trabajo no pudo haberse realizado sin la formación que recibí durante cinco años en la FES Aragón. Gracias a todos los maestros que contribuyeron realmente en mi formación.

A Fundación ICA por haberme dado la gran oportunidad de facilitarme la estancia en obra en el P.H. El Cajón y de este modo lograr enriquecer y culminar mi trabajo de titulación.

Y finalmente, a todos aquellos que no por ser menos importantes he dejado de mencionar o que han quedado en los recintos más escondidos de mi memoria, pero que igualmente fueron participes en cincelar a este Omar Sigüenza, GRACIAS.



---

INTRODUCCIÓN	I
CAPITULO I GENERALIDADES	1
I.1 Antecedentes	2
I.2 Localización	2
I.3 Aspectos Sociales	3
I.4 Esquema general	4
I.4.1 Obra de desvío	5
I.4.2 Obra de contención	6
I.4.3 Obra de generación	7
I.4.4 Casa de maquinas	7
I.4.5 Obra de control y excedencias	8
I.5 Hidrología	9
I.6 Geología y Geotecnia	10
CAPITULO II TRATAMIENTO DE LA ROCA	12
II.1 Tratamiento de roca	13
II.1.1 Localización del eje	14
II.1.2 Tratamiento superficial	14
II.1.3 Pantalla flexible en ataguías	15
II.1.4 Anclajes	15
II.1.5 Marcos de acero	16
II.1.6 Revestimientos y protección con concreto lanzado	17
II.1.7 Drenajes	18
II.1.8 Tratamiento dental	18
II.1.9 Inyecciones	19
II.1.9.1 Tipos de inyección	20
II.1.9.2 Procedimientos de inyección	20
II.1.9.2.1 Inyecciones de contacto.	21
II.1.9.2.2 Inyecciones de consolidación.	21
II.1.9.2.3 Pantalla de impermeabilización profunda.	22
II.1.9.2.4 Inyecciones de impermeabilización bajo la pantalla flexible.	22
II.1.10 Recomendaciones de los materiales para los tratamientos de roca.	22
II.2 Teoría del diseño y control de la inyección de lechada ó mortero empleando el método GIN	23
II.2.1 El Método GIN	23
II.2.2 Conceptos teóricos del flujo de lechada y su penetración	24
II.2.3 Selección de la mezcla de inyectado	25
II.2.4 Diseño de obras de inyectado	28
II.3 Desarrollo del método GIN	29
II.3.1 Inyectado de fisuras amplias abiertas	29
II.3.2 Inyectado de fisuras finas	29
II.3.3 La reducción del espaciamiento de las perforaciones del inyectado por etapas	30
II.3.4 Pruebas de presión de agua (LUGEON)	31
II.3.5 Energía específica empleada	32
II.3.6 Ventajas de mantener un valor constante GIN	32
II.3.7 Envoltentes limitantes compuestas para diferentes intensidades de inyectado	33
II.3.8 Selección del valor GIN	36

---



---

II.3.9 Inyectado controlado por computadora	36
II.3.10 Las curvas GIN y de penetrabilidad – volumen como controles prácticos de inyectado	37
II.3.11 Aplicación a pantallas de inyectado	39
II.3.12 Relación de espaciamiento de los barrenos y el GIN	41
II.3.13 Criterios para el cierre	41
II.4 Puntos principales del método GIN	42
II.4.1 Conceptos básicos	42
II.4.2 Diseño de la mezcla	43
II.4.3 Arreglo de las perforaciones de inyectado	43
II.4.4 Control de campo	44
CAPITULO III PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN DE LECHADA	46
III.1 Inyecciones en el P.H. El Cajón	47
III.1.1 Inyecciones de Contacto	47
III.1.2 Inyecciones de Consolidación	47
III.1.3 Inyecciones de Impermeabilización Profunda	47
III.2 Equipo	47
III.2.1 Equipo Mezclador	47
III.2.1.1 Turbomezclador de altas revoluciones	48
III.2.1.2 Agitador o mezclador de bajas revoluciones	48
III.2.2 Bombas para Inyecciones	48
III.2.3 Manómetros	49
III.2.4 Obturadores	50
III.2.5 Sonda Eléctrica	51
III.2.6 Perforadoras	51
III.3 Plantas para la Preparación de Mezclas de Inyección y Estaciones de Inyección	53
III.4 Procedimiento en la Ejecución de la Inyección	54
III.4.1 Localización y Trazo del Barreno	54
III.4.2 Instalación de tubos guía	55
III.4.3 Perforaciones en Roca	55
III.4.3.1 Perforaciones para la Consolidación e Impermeabilización	57
III.4.3.2 Perforación para la consolidación	57
III.4.3.3 Perforación para la impermeabilización	58
III.4.4 Lavado del Barreno	59
III.4.5 Pruebas de Agua a Presión	60
III.4.5.1 Prueba Lugeon	60
III.4.5.1.1 Procedimiento	62
III.4.5.1.1.a Verificación del sello	62
III.4.5.1.1.b Realización de la prueba	63
III.4.5.1.1.c Interpretación de la prueba	64
III.4.6 Saturación Previa	64
III.4.7 Preparación de la Mezcla	65
III.4.8 Colocación y Secuencias de la Inyección	68
III.5 Inyecciones en Roca	69
III.5.1 Inyecciones en la Roca para Consolidación	71
III.5.2 Inyecciones en la Roca para Pantallas de Impermeabilización	72
III.6 Actividades de Control durante los Tratamientos de Inyección.	74
III.7 Verificación Después de Terminar los Tratamientos de Inyección	74

---



---

III.7.1 Inyecciones de Contacto	75
III.7.2 Retaque Final de Barrenos	76
III.8 Problemas que se presentan durante el proceso de Inyección	77
III.8.1 Inyección de Barrenos Comunicados	77
III.8.2 Calafateo de Grietas	77
III.8.3 Lavado de Mezclas en el Barreno	78
III.8.4 Taponamiento de tubería y bombas de inyección.	78
III.9 Suministro de Mezclas de Inyección	79
III.10 Telecomunicaciones en los Frentes de Trabajo	80
III.11 Limpieza en el Sitio de Trabajo	80
CAPITULO IV CONTROL DE CALIDAD	81
IV.1 Importancia del control de calidad	82
IV.2 Requisitos Previos de los Equipos de Laboratorio	84
IV.3 Mezclas de inyección fabricadas con cemento	85
IV.3.1 Mezclas	85
IV.3.1.1 Mezclas estables	85
IV.3.1.1 Mezclas inestables	85
IV.3.2 Lechada	85
IV.3.3 Suspensiones	86
IV.3.4 Disoluciones	86
IV.4 Equipo e Instrumentos de Medición	86
IV.5 Dosificación de la mezcla	87
IV.6 Procedimiento de Mezclado de la Lechada para Diseño de Laboratorio y Campo	88
IV.7 Pruebas de Laboratorio y limites de la mezcla a utilizar para las inyecciones de consolidación e impermeabilización	89
IV.7.1 Viscosidad Marsh	90
IV.7.2 Decantación ó Sedimentación	90
IV.7.3 Cohesión con Placa	92
IV.7.4 Coeficiente de Filtrado y Espesor de Costra Cake	93
IV.7.5 Resistencia a la Compresión	94
IV.7.6 Densidad del lodo con balanza Baroid	95
IV.8 Formatos para las pruebas índice y de resistencia para la inyección de roca	96
IV.9 Materiales y especificaciones de los productos	96
IV.9.1 Requisitos Generales	96
IV.9.2 Materiales usados para la lechada de Inyección	97
IV.9.2.1 Agua	97
IV.9.2.2 Cemento	99
IV.9.2.3 Aditivos	101
IV.9.2.4 Bentonita	103
CONCLUSIONES	105
ANEXOS	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

---



---

## INTRODUCCIÓN

Para poder realizar una obra de tal magnitud como lo es el proyecto hidroeléctrico El Cajón, se requieren de diversos estudios, procedimientos constructivos así como de un ético y correcto control de calidad para llevar a cabo una obra de vital importancia. Una vez cubiertos los puntos anteriores de un modo adecuado, se podrán evitar futuras fracturas o deficiencias en el trabajo ejecutado, lo que encarecería la obra y mantenimientos futuros.

De acuerdo a lo anterior se eligió un tema a desarrollar de entre todos los trabajos que se ejecutaron en el P.H. El Cajón, por lo que en este trabajo de investigación se abordara el tema de la inyección de lechada en plinto y galerías para consolidar e impermeabilizar la cortina perteneciente al P.H. “El Cajón”, a partir de las experiencias que en lo particular, pude colaborar para ejecutar dicho trabajo correctamente.

Dicho trabajo presentará el procedimiento de inyección aplicado en el proyecto del P.H. “El Cajón”, además de señalar la importancia del control de calidad, así como las pruebas de laboratorio en campo y especificaciones de los materiales empleados, durante el procedimiento de inyección.

## OBJETIVO GENERAL

Dar a conocer la importancia de la inyección de lechada para consolidar e impermeabilizar el macizo rocoso desde el plinto y galerías de las márgenes derecha e izquierda de la obra de contención, y de este modo, obtener la cimentación adecuada para la cortina de la presa, además de evitar futuras infiltraciones, provocando que no pueda ser llenado el vaso de regulación ó la fractura de la cortina de la presa.

## OBJETIVOS ESPECIFICOS

Presentar las características principales del método GIN para la inyección de roca y demostrar que es el método mas adecuado para tal trabajo, GIN, que en sus siglas en ingles significa “Grouting Intensity Number” (numero de intensidad de inyectado, traducción a nuestro idioma)



Ver los problemas que se presentaron durante el procedimiento de inyección de lechada en el P.H. “El Cajón”.

Demostrar la importancia del control de calidad durante el procedimiento de inyección, para poder obtener un producto inyectable de excelente calidad.

Dar a conocer los diferentes tratamientos de roca, así como la importancia que tiene cada uno de estos durante la construcción de una presa.

### **DESCRIPCIÓN DEL CAPITULADO**

Los siguientes párrafos, darán a conocer de un modo general el capitulado que compone este trabajo de titulación, los cuales están basados en la investigación y experiencias en sitio para dar a conocer el procedimiento de inyección de lechada en plinto y galerías del P.H. El Cajón.

Así mismo, en el capítulo I, se explican brevemente los antecedentes de la presa “El Cajón”, haciendo mención a la ubicación de la obra, la hidrología, la geología y la geotecnia del sitio para poder conocer el marco general que rodea a esta importante obra civil en México. Por otra parte, se describe generalmente las obras de infraestructura proyectadas para el P.H. El Cajón, en las que se encuentran: La obra de desvío, Obra de contención, Obra de generación, Casa de maquinas, Obra de control y excedencias, etc.

En el capítulo II, se expone de una manera breve los diferentes métodos de tratamiento de roca utilizados en las presas, tales como: Localización del eje de la cortina, limpieza superficial, anclas, marcos de acero, concreto lanzado, malla de alambre electrosoldada, drenaje de los macizos rocosos, y en específico, se hará mención del tratamiento de la roca mediante la inyección de lechada,

Y para concluir este capítulo, se dará a conocer la teoría del método GIN utilizado para las inyecciones de lechada en plinto y galerías en el P.H. “El Cajón”.

Por otra parte, el capítulo III, muestra el procedimiento a seguir para la inyección en plinto y galerías del P.H. “El Cajón”, desde el trazo de los barrenos, hasta el retaque final de los mismos, las pruebas de permeabilidad que deberán ejecutarse para poder dar por concluida la inyección de un barreno, parámetros y secuencias de inyección, mencionando además el



equipo y material utilizada en la inyección de lechada. Finalmente se mencionaran los problemas que se presentan durante el procedimiento de inyección, y al mismo tiempo se darán las recomendaciones para su solución.

Para complementar los temas anteriores, el capítulo IV, indica la importancia vital del control de calidad durante la ejecución de una obra civil, así como los lineamientos básicos que deberá cubrir un laboratorio para formar parte del E.M.A. Por otra parte, se mostraran las pruebas de laboratorio en campo para monitorear la lechada inyectable en el macizo rocoso y de este modo tener un producto de buena calidad, dentro de este tema igualmente se indicará el equipo y las especificaciones de proyecto de los materiales utilizados para la inyección de lechada.

Finalmente, se emiten las conclusiones y recomendaciones para una mejor ejecución del método de Inyecciones de lechada en plinto y galerías, utilizando el método GIN.

### **UTILIDAD DEL TRABAJO**

La utilidad de este trabajo, en base a los temas que se hacen mención, es que el lector, conozca el procedimiento constructivo para consolidar e impermeabilizar la cortina de una presa mediante la inyección de lechada con el método GIN; además, al presentar las pruebas de laboratorio en campo para el monitoreo de la lechada, podrá basar estas experiencias para trabajos futuros y si bien es cierto que todas las obras son diferentes, al menos el punto de partida es similar para todos los casos.

### **ALCANCE**

Se dará a conocer teóricamente el método de inyección (GIN), para la inyección de lechada en el macizo rocoso y sellar fallas o grietas existentes.

Además, éste trabajo abarcará el procedimiento constructivo de la inyección, mencionando todo lo necesario para la correcta ejecución de la inyección de lechada, además de mencionar los problemas constructivos que se presentan durante la inyección, dando la solución de estos al mismo tiempo.



## INTRODUCCIÓN

---



De acuerdo a lo anterior se mencionará desde el trazo de los barrenos de inyección, pasando por la perforación, preparación del barreno, y la inyección en todas sus etapas hasta el sellado del barreno y finalmente las pruebas de permeabilidad para poder liberar los barrenos.

Finalmente, se explicarán las pruebas de laboratorio para la lechada de inyección utilizada en el P.H. "El Cajón".



# ***CAPITULO I***

# ***GENERALIDADES***

## I.1 Antecedentes

El proyecto hidroeléctrico El Cajón forma parte del Sistema Hidroeléctrico Santiago, que comprende a 27 proyectos con un potencial hidroenergético de 4300 MW, del cual solo se ha desarrollado el 32% mediante la construcción de seis centrales. El Cajón ocupa el segundo lugar en potencia y generación dentro del sistema, después de la Central de Aguamilpa-Solidaridad.

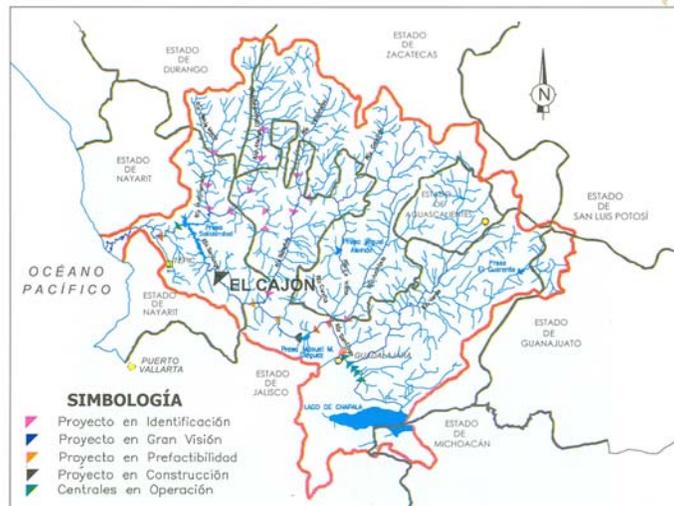


Figura I.1 Esquema hidráulico del río Santiago

## I.2 Localización

El sitio provisto para la construcción de las obras del proyecto se encuentra en los municipios de la Yesca y Santa María del Oro a 47 Km. en línea recta de la ciudad de Tepic, en terrenos comunales del poblado Cantiles, sobre el río Santiago a 60 Km. Aguas arriba de la C.H. Aguamilpa; sus coordenadas geográficas son 21°25'41" de latitud norte y 104°27'14" de longitud oeste.

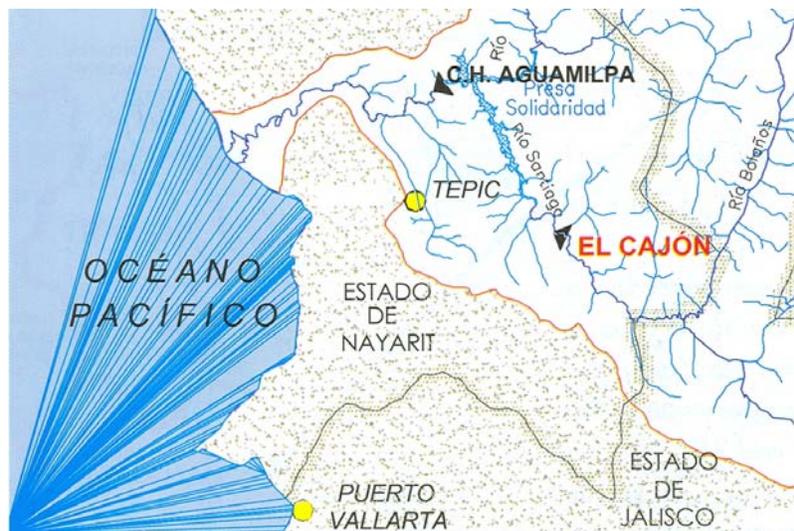


Figura I.2 Localización del P.H. El Cajón

### I.3 Aspectos Sociales

El embalse del proyecto comprende una superficie de 3,980 Has. A las que corresponden:

- 2,188 (55%) Municipio La Yesca, Nay.
- 795 (20%) Municipio de Jala, Nay.
- 795 (20%) Municipio Sta. Ma. del Oro, Nay.
- 56 (1.5%) Municipio de Ixtlán del Río, Nay.
- 139 (3%) Municipio de Hostotipaquillo, Jal.
- 10 (0.5%) Zona Federal.

El área del futuro vaso involucra la afectación parcial de 24 predios, cuya tenencia de la tierra corresponde: 3 a la propiedad ejidal (19% del área de embalse), un terreno comunal (64%), y 20 propiedades privadas (16.5%).

Se identificaron también 15 asentamientos humanos, de los cuales “El Ciruelo” constituye el de mayores dimensiones con 93 habitantes; le sigue “La Playa” con 48; y los 13 restantes con población menor a 30 habitantes. En total suman 300 pobladores agrupados en 70 viviendas (Censo CFE, 1995).



Los pobladores son en mayor porción de origen mestizo (77%) y los restantes (23%) pertenecen al grupo étnico Huichol; estos últimos se encuentran bajo un proceso de aculturación intenso.

La principal actividad económica es la agricultura de autoconsumo, complementada con explotación ganadera en forma extensiva. La producción agrícola afectable por el proyecto se estima en 70 Has, principalmente con cultivos de maíz, frijol y algunos árboles frutales.

La infraestructura afectable por el proyecto se limita a las 70 viviendas y a una pequeña instalación semi abandonada que sirve para el triturado y lavado de material de explotación (oro, plata, y cobre entre otros) correspondientes a unas minas localizadas en el área de influencia del proyecto.

## **I.4 Esquema general**

Camino de acceso de 43 Km. de longitud.

Cortina de enrocamiento con cara de concreto; desvío mediante dos túneles de sección portal y dos ataguías de materiales granulados; vertedor de excedencias controlado, obra de generación con casa de maquinas subterránea que alojara dos grupos de turbogeneradores, con potencia instalada total de 750 MW a la salida del generador.

Obras de infraestructura, desarrollo social y protección ambiental.

Alcance del proyecto: Ingeniería complementaria; construcción de obras civiles; suministro e instalación de equipos y sistemas electromecánicos; suministro de repuestos y herramientas especiales; montaje, pruebas y puesta en servicio; fletes, seguros, manejo aduanal y capacitación.

La supervisión se hará por medio de un sistema de calidad.

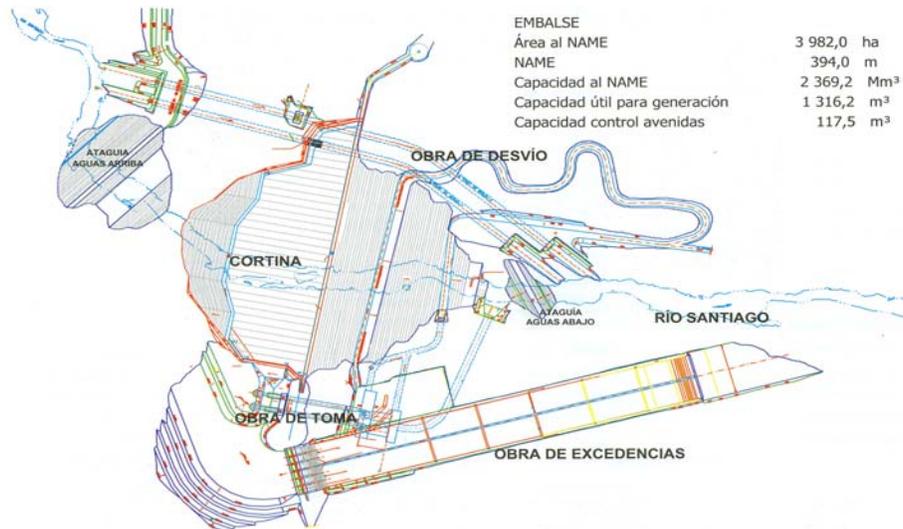


Figura I.4 Esquema General

### I.4.1 Obra de desvío

Consiste en dos túneles de sección portal, localizados en la margen izquierda del río excavados en roca revestidos de concreto hidráulico en la plantilla y paredes, concreto lanzado en bóveda, diseñados para transitar la avenida de diseño (6 481 m<sup>3</sup>/seg.). Los portales de entrada y salida serán excavados en roca, cada túnel cuenta con una lumbrera revestida de concreto para operar los obturadores accionados por malacates estacionarios para el control del flujo de agua.

La compuerta se deslizará a través de una lumbrera vertical revestida de concreto por medio de un malacate; el mecanismo instalado estará en la plataforma junto al marco que soportará la compuerta durante el cierre final.

Se complementa con dos ataguías construidas con materiales graduados, el núcleo impermeable de ambas estará ligado a una pantalla impermeable construida sobre aluvión, hasta la roca sana del fondo del cauce del río, para evitar filtraciones hacia la zona de construcción de la cortina, garantizando la correcta construcción del núcleo y pantallas impermeables, para tener las condiciones adecuadas para el desplante del plinto, lo cual consiste en mantener seca dicha zona, es conveniente realizar la construcción de las ataguías antes del periodo de lluvia.

Para la estabilización de las excavaciones se deberán realizar los tratamientos al macizo rocoso, consistentes en: preanclajes, anclajes, concreto lanzado, y en los portales de entrada y salida se deberán utilizar ademes metálicos.



**Figura I.4.1 Túneles de desvío del río Santiago**

#### **I.4.2 Obra de contención**

Consiste en una cortina de enrocamiento con cara de concreto, el cuerpo de la misma se compone de materiales graduado que dan apoyo a la cara de concreto formada con tableros de concreto de aproximadamente 15 m de ancho y espesor variable, la cara de concreto se apoya en el plinto que además de esta función sirve como plataforma para realizar las inyecciones de consolidación y pantalla impermeable que junto con un sistema de galerías excavadas en ambas laderas adyacentes al empotramiento de la cortina formaran el plano de estanqueidad.

La cara de concreto contara con un sistema de sellos y juntas de cobre y PVC; que serán colocadas en todas las juntas de la cara de concreto y en la junta perimetral plinto-cara de concreto, estas protecciones deben garantizar que las filtraciones sean mínimas. Para medir estas filtraciones, se ubicará una galería filtrante al pie de la cortina en la zona de aguas abajo, de tal manera que por ella se capten todas las filtraciones que ocurran por el cuerpo de la presa y se pueda medir el gasto de filtración en cualquier época del año.

- Altura máxima sobre el cauce: 186.50 m.
- Longitud de la corona: 550 m
- Volumen de materiales: 10,450,000 m<sup>3</sup>

- Volumen de la cara de concreto: 51,200 m<sup>3</sup>.



Figura I.4.2 Cortina del P.H. El Cajón

### I.4.3 Obra de generación

Se localiza en margen derecha; consiste en una obra de toma de concreto reforzado y rejillas metálicas, la estructura de control cuenta con dos compuertas deslizantes de servicio operadas con servomotores; la conducción del agua hacia casa de maquinas es mediante 2 túneles circulares a presión, de concreto reforzado en su primera parte y posteriormente revestidos con camisa metálica.

La casa de maquinas es subterránea y su ingreso será por un túnel vehicular. La obra se complementará con la galería de oscilación y el túnel de desfogue, ambos excavados en roca.

La subestación se ubicará en una plataforma exterior y será blindada tipo SF<sub>6</sub>.

### I.4.4 Casa de maquinas

La casa de maquinas se encuentra alojada en una caverna excavada en roca, sus losas, muros y bóveda son de concreto reforzado, equipada con dos grupos de turbogeneradores, las turbinas son tipo Francis de eje vertical. Se ingresa a ella mediante un túnel de acceso vehicular dimensionado de acuerdo con las partes más grandes de los equipos que se van a instalar.

Ésta cuenta con un sistema forzado de ventilación por medio de tres lumbreras verticales y una lumbrera más para contener todos los cables de control, fuerza y medición.

En la casa de maquinas se instalarán dos grúas viajeras con la capacidad conjunta de para realizar el montaje y los servicios de mantenimiento de todos los equipos y sistemas auxiliares de los turbogeneradores: también se debe instalar una turbina auxiliar tipo Francis de eje horizontal, para suministro de energía eléctrica para los servicios auxiliares de la central en caso de emergencia.

La energía se conduce a través de lumbreras verticales hasta la superficie, por medio de buses de fase aislada a los transformadores que van a elevar el voltaje de 17 a 400 kv. La estación debe ser del tipo blindado, con dispositivos en atmosfera de hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ) y se alojará en un edificio construido en una plataforma a cielo abierto, de manera similar se ubican los transformadores de potencia, casetas de ventilación, control, baterías y la subestación blindada de servicios auxiliares de la central con una tensión de 13.8 kv.



**Figura I.4.4 Casa de Maquinas (Turbinas de generación)**

### **I.4.5 Obra de control y excedencias**

Diseñada para un gasto máximo de  $14\ 864\ m^3/seg$  que inicia en un canal de llamada excavado a cielo abierto en la margen derecha, la zona de control esta formada por el cimacio y pilas de concreto reforzado para formar 6 vanos equipados con compuertas radiales operadas por servomotores; el canal de descarga de 95 m de ancho, es de sección rectangular revestido con



concreto reforzado y aireadores en el piso, esta dividido por un muro longitudinal, rematando en una cubeta deflectora tipo salto de ski.

## I.5 Hidrología

Temperatura media mensual máxima de 32°C en el mes de mayo y mínima de 23.2°C en el mes de enero.

Evaporación media mensual máxima de 317.8 mm en mayo y mínima de 129 mm en diciembre.

Precipitación media mensual máxima de 234.6 mm en julio y mínima de 10.7 mm en diciembre.

Escurrimiento medio mensual máximo de 852 millones de metros cúbicos en el mes de agosto y mínimo de 82 millones de metros cúbicos en febrero.

En la zona de obras, la temporada de lluvias se presenta muy marcada entre los meses de junio a octubre y el estiaje entre los meses de noviembre a mayo. Durante el invierno se presentan lluvias en un porcentaje ligeramente mayor al 5% de la media anual.

• Área de la cuenca aportadora.	54,198 Km <sup>2</sup>
• Volumen de escurrimiento medio anual histórico (1949-1999)	4,026 hm <sup>3</sup>
• Volumen de escurrimiento medio anual menos usos futuros.	3,323 hm <sup>3</sup>
• Volumen medio aprovechable	3,166 hm <sup>3</sup>
• Gasto medio anual menos usos futuros	105 m <sup>3</sup> /s
• Gasto máximo registrado.	7,029 m <sup>3</sup> /s



Figura I.5 Río Santiago

## I.6 Geología y Geotecnia

Existe un profundo conocimiento de la geología del sitio y de las discontinuidades estructurales del macizo rocoso. Han sido abundantes los trabajos geofísicos, geológicos, de perforación, permeabilidad y piezometría. Se han excavado cuatro socavaciones y varias trincheras en las márgenes como apoyo a los estudios.

Adicionalmente, se han llevado a cabo amplios estudios en los bancos de materiales (aluvión del río y enrocamiento) y realizado una extensa campaña de investigaciones geotécnicas para definir los parámetros de resistencia, deformación y permeabilidad del macizo rocoso.

En la actualidad existen suficientes estudios y análisis geológico-geotécnicos que han permitido diseñar las obras civiles estimando las cantidades de obra y costo de las mismas con mayor certidumbre.

La boquilla del P.H. El Cajón esta enmarcada geológicamente por unidades de diversa litología y edad, desde rocas metamórficas del precenozoico e ígneas del Oligoceno al cuaternario. Existen rocas metavulcanosedimentarias, granitos, andesitas, flujos y emisiones piroclásticas ácidas, derrames basálticos, diques de composición granítica, andesítica y diabásica; depósitos vulcanosedimentarios, aluviones de paleocauce, depósitos pumicíticos, lacustres, de talud y el aluvión reciente.



Desde el punto de vista geológico estructural, el macizo rocoso del proyecto se encuentra intrusionado, basculado y claramente delimitado por callamiento regional, que permitió la definición de bloques y sub-bloques.

De acuerdo a los estudios realizados, las obras se emplazarán principalmente en roca Ignimbrita de composición riodacítica, la cual se diferenció en tres unidades denominadas TicU1, TicU2 y TicU3, entre estas unidades aparecen dos horizontes aglomeráticos, uno de 5 m de espesor entre las unidades 2 y 3, y otro de 22 a 25 m de espesor ubicado en la unidad 2.

En el macizo rocoso del sitio donde se ubican las obras y en especial en la margen izquierda. Esta situación implica que en la margen izquierda se prevea tener mayores tratamientos a la roca para la construcción de las obras exteriores y subterráneas.



# ***CAPITULO II***

## ***TRATAMIENTO DE LA ROCA***



---

## II.1 Tratamiento de roca

El tratamiento de la roca tiene la finalidad de garantizar la estabilidad del macizo rocoso y de las obras construidas, así como evitar la intemperización de la roca y reducir su permeabilidad y/o deformabilidad, y/o aumentar su resistencia, por lo que se debe conocer la naturaleza geológica de la zona de las obras.

Para construir una cortina se requieren determinados trabajos preliminares que dependen del suelo o roca expuestos a la cimentación y de los materiales componentes de la superestructura, teniendo en cuenta la función que desempeña cada una de las partes integrantes de la misma.

En algunos casos, los mencionados trabajos pueden consistir simplemente en la eliminación de la capa de tierra vegetal, los suelos alterados por intemperismo y el material de derrumbes. En otros, es necesario descubrir la roca, remover las masas sueltas, limpiar grietas y rellenarlas con mortero e inyectar a baja presión la parte superior de la formación.

Para reducir asentamientos diferenciales de la cortina, ciertas boquillas requieren la modificación de pendientes en las laderas, lo cual implica el uso de métodos especiales de excavación para evitar daños mayores a la roca de cimentación. Hay sitios que presentan divergencia de sus laderas hacia aguas abajo o exigen una adecuada localización del eje, o bien, la ejecución de excavaciones en las laderas a fin de evitar condiciones adversas en el contacto del núcleo impermeable.

Las posibilidades son ilimitadas y cada ejemplo demanda el análisis cuidadoso de alternativas para dictaminar los requisitos mínimos del tratamiento. Las recomendaciones respectivas están basadas en la información geológica y topográfica; pero es regla casi sin excepción que solo al realizar la limpia superficial del sitio se conozca la extensión de estos trabajos, siendo frecuente la introducción de cambios significativos para el programa de construcción y la economía de la obra.

Las actividades que deben ejecutarse para el tratamiento de la roca en el P.H. “El Cajón” son:

- Localización del eje.
- Limpieza superficial.



- Anclas.
- Marcos de acero.
- Concreto lanzado.
- Malla de alambre electrosoldada.
- Drenaje de los macizos rocosos.
- Inyecciones para relleno de oquedades.

A continuación, se presenta una breve descripción de los trabajos de tratamiento del P.H. “El Cajón”.

### **II.1.1 Localización del eje**

Con base en una topografía detallada del sitio elegido para construir la cortina (esc. 1 : 1000 y curvas de nivel a cada metro) y considerando la geología respectiva con especial atención al fracturamiento de la roca y la cubierta del material alterado, se analizan diferentes alternativas del eje de dicha estructura; de ellas se elige la de menor cubicación de materiales. Este criterio es aceptable para la etapa preliminar del proyecto, en que la información es limitada y se trata de diseñar una presa acorde con los materiales disponibles en el lugar, la geometría de la boquilla y la disposición de las obras complementarias (túneles, estructura de toma, vertedor, etc.). Pero debe recordarse que la verdadera topografía de la superficie de apoyo y las características de las grietas y planos de estratificación, en su caso, aparecerán después de haber realizado la remoción de escombros y suelos que cubren la cimentación. En este momento y ya en construcción, es necesario tomar decisiones definitivas, tanto en lo que se refiere a la localización de la presa como al tratamiento de la roca.

### **II.1.2 Tratamiento superficial**

La remoción de vegetación, suelo orgánico y escombros sobre la roca es indispensable en todo sitio de presa. La limpia gruesa se realiza con tractor o excavadoras y se completa en las zonas del corazón y filtros, con un trabajo minucioso hecho con pico o martillo neumático con objeto de exponer una superficie lo suficientemente limpia para efectuar el tratamiento de grietas, huecos y otros defectos. Esto se logra con la aplicación de agua y aire a presión.



En la mayoría de los casos, la limpieza gruesa se hace en todo el desplante de la cortina, enviando el producto de la misma a los bancos de desperdicio para evitar interferencias con operaciones subsecuentes. Por esta razón resulta conveniente atacar las excavaciones importantes de regularización en esa etapa constructiva. En cambio, es normal realizar la limpieza final y el tratamiento detallado, inclusive las inyecciones, a medida que avanza la colocación de materiales en la cortina, para evitar el uso de tarimas u obras falsas sobre las laderas.

En resumen, las actividades que comprende el tratamiento superficial de la roca, son:

- Limpieza y amacice hasta el nivel de desplante.
- Tratamiento de los accidentes geológicos importantes (fallas, grietas, fracturas, juntas, fisuras).
- Preparación de la superficie de la cimentación para iniciar el colado o desplante de las estructuras y las actividades de inyectado.

### **II.1.3 Pantalla flexible en ataguías**

Consiste en un muro plástico de concreto o mortero ubicado bajo las ataguías como una prolongación de los núcleos impermeables, atravesando todo el espesor de aluviones hasta hacer contacto con la roca de cimentación, y de este modo evitar infiltraciones del río “Santiago” en el área de trabajo.

### **II.1.4 Anclajes**

El anclaje es el soporte que debe aplicarse en forma sistemática y en un menor grado de manera selectiva cuando se requiera, para estabilizar las excavaciones subterráneas y los taludes en las excavaciones exteriores. Para que cumpla este propósito, la actividad del anclaje debe quedar integrada a cada ciclo de trabajo de las excavaciones. Se han diseñado los anclajes para que las barras sean empacadas de la siguiente forma:

- Anclaje con resina de fraguado rápido para los soportes inmediatos en las bóvedas de las excavaciones subterráneas.
- Anclaje con cartuchos de mortero de fraguado rápido y normal.
- Anclaje con mortero para todos los demás frentes, ya sea en superficie o subterráneo.

Todo el anclaje está diseñado como un soporte definitivo para que trabaje a fricción o a tensión de acuerdo a su diseño. Las anclas consisten en pernos de varilla de acero corrugado de  $f_y=412,02$  MPa (4200 kg/cm<sup>2</sup>), instalados e inyectados en toda su longitud dentro del barreno con mortero de cemento o con resina epóxica. Cabe mencionar que las características de los materiales antes mencionados son exclusivos para el proyecto del P.H. El Cajón, y que se deberán hacer los análisis necesarios para cada caso en particular.

La longitud es variable y se fija para cada caso particular de acuerdo al diseño. En el extremo libre del ancla se debe colocar una placa de acero, de dimensiones preestablecidas, la cual se fija contra el terreno con una tuerca apretada con el torque especificado.



**Figura II.1.4 Anclajes**

### **II.1.5 Marcos de acero**

Los marcos son elementos estructurales formados por vigas de acero tipo “I” y sirven para el soporte de la roca en los portales y en algunas zonas en el interior de los túneles que por condiciones de riesgo de falla de la roca se requieran. Es necesario que la instalación de los marcos quede integrada a cada ciclo de excavación de portales o túneles. Para la construcción de estos marcos debe considerarse que sus dimensiones dejen libre el área hidráulica de proyecto.



**Figura II.1.5 Marcos de acero en galerías**

### **II.1.6 Revestimientos y protección con concreto lanzado**

Con el fin de evitar la erosión, la intemperización de la roca y problemas de estabilidad en zonas de alto fracturamiento, se debe aplicar un tratamiento sistemático de concreto lanzado vía seca o húmeda con tamaño máximo de agregado de 19,0 mm, reforzado con una o dos capas de malla de alambre electrosoldada, aunque en algunos sitios de la obra se podrán utilizar fibras metálicas como refuerzo del concreto lanzado.

En zonas inestables de alto fracturamiento, que pongan en peligro la seguridad del personal y del equipo, se debe aplicar este revestimiento antes de continuar con las actividades subsecuentes. En estos casos, para que se cumpla con el propósito indicado, el concreto lanzado debe incluirse a cada ciclo de excavación.

La estructura formada por el conjunto de anclaje y concreto lanzado reforzado o simple debe formar el sistema de soporte definitivo.

Se debe realizar un muestreo aleatorio y selectivo de los componentes empleados en los procesos de producción y/o construcción de concreto lanzado con pruebas de laboratorio, bajo el siguiente lineamiento:

Por cada 250 m<sup>2</sup> de aplicación de concreto lanzado se deben obtener artesas con muestras de concreto representativas del sitio, determinando las propiedades físicas y de resistencia mecánica; los resultados deben cumplir con los requerimientos del proyecto.



**Figura II.1.6 Concreto lanzado en galerías**

### **II.1.7 Drenajes**

El sistema de drenaje tiene por objeto captar el agua tanto superficial como subterránea para eliminar problemas de erosión y abatir la presión hidrostática de los macizos rocosos para asegurar su estabilidad, así como evitar su influencia sobre las estructuras subyacentes. El sistema de drenaje debe estar formado por zanjas, canales, cunetas, galerías y drenes mediante excavaciones y/o perforaciones sistemáticas convenientemente orientadas para interceptar el fracturamiento dominante de la roca.

Otro objetivo del sistema de drenaje es observar y cuantificar las filtraciones a través de la pantalla principal de impermeabilización. Para tal efecto, es necesario instalar dispositivos en la boca de los barrenos para realizar los aforos; estos dispositivos están diseñados para que también sirvan como protecciones contra carbonatación y el taponamiento de los barrenos.

### **II.1.8 Tratamiento dental**

Es el tratamiento que debe efectuarse en aquellos terrenos muy fracturados o fallados y en rocas intrusivas parcial o totalmente alteradas, rellenas con material triturado o arcilloso.

Consiste en retirar el material alterado usando herramientas manuales y/o mecánicas apropiadas, incluso explosivos en caso necesario, hasta encontrar la roca sana o hasta una profundidad específica relacionada con el ancho de la falla, la cual se dictamina dependiendo de cada tipo de falla; vaciar o colar con concreto hidráulico y/o concreto lanzado, instalando

previamente boquillas dirigidas hasta el contacto y las fallas de la roca; finalmente, a través de éstas, se deben efectuar inyecciones de contacto concreto-roca y de consolidación.

En zonas de fallas importantes que crucen la cimentación de la cortina, este trabajo se debe realizar en una longitud definida en función del tipo de cimentación.

### II.1.9 Inyecciones

Este tratamiento consiste en introducir a la roca, de manera controlada, tanto en presión como en volumen, mezclas fabricadas con cemento, agua y aditivos; y para el caso de tratamiento de oquedades mayores se adiciona agregado fino para formar morteros.

La inyección de un terreno implica la introducción en el mismo, para reducir su grado de permeabilidad y/o mejorar sus condiciones mecánicas, de una mezcla fluida que posteriormente fragua y endurece.

En el proceso se controla indirectamente la colocación a distancia de materiales bombeables mediante el ajuste de sus propiedades reológicas y de sus parámetros de colocación (presión, volumen, caudal).



**Figura II.1.9 Colocación de tubería de inyección en barreno**



---

### II.1.9.1 Tipos de inyección

- Impregnación: Sustitución del agua y/o gas intersticial en un medio poroso, por una lechada inyectada a una presión suficientemente baja, que asegure que no se producen desplazamientos significativos de terreno.
- Relleno de fisuras: Inyección de lechada en las fisuras, diaclasas, fracturas o discontinuidades, en general, en formaciones rocosas.
- Relleno de huecos: Consiste en la colocación de una lechada, con un alto contenido de partículas, para el relleno de grandes huecos.
- Inyección por compactación: Consiste en un método de inyección con desplazamiento del terreno, en el cual se introduce un mortero de alta fricción interna en una masa de suelo.
- Fracturación hidráulica: Consiste en la inyección del terreno mediante su fracturación por lechada, con una presión por encima de su resistencia a tracción y de su presión de confinamiento. También se denomina hidro-fracturación, hidrofisuración, hidrojetting o claquage.

### II.1.9.2 Procedimientos de inyección

- Inyección desde la boca de la perforación: Consiste en introducir la lechada desde la boca del sondeo, obturando en la parte superior.
- Inyecciones por fases descendentes: consiste en un proceso en el cual se perfora e inyecta un tramo de terreno, reperforando e inyectando a continuación el tramo inmediato inferior. También se puede aplicar este método con la colocación de obturadores, iniciándose el proceso de inyección progresivamente hacia el fondo de sondeo.
- Inyecciones por fases ascendentes: se trata de un proceso de inyección por tramos sucesivos, comenzando desde la parte inferior de la zona a inyectar hasta la zona superior.
- Inyección por fases repetitivas mediante tubos manguito: se trata de un procedimiento que permite tratar repetidamente, en distintas fases, un mismo punto, sin reperforación, para lo cual se perfora un taladro colocando en su interior un tubo, denominado "tubo manguito", que tiene una serie de agujeros periféricos, obturados exteriormente por

manguitos de goma, que sirven de válvulas antirretorno, por los que sale la lechada. El espacio anular entre el tubo y el terreno se rellena, constituyendo lo que se denomina "gaine", con el objetivo de conseguir una obturación longitudinal continua.

Finalmente, cabe mencionar que los trabajos que se realizarán en el P.H. "El Cajón", son los siguientes.

### II.1.9.2.1 Inyecciones de contacto

Tienen como finalidad rellenar y empacar los espacios entre la roca y los concretos, y/o entre éstos y las placas de las estructuras metálicas, asegurando el contacto entre ambos por medio de inyección de lechadas o morteros para evitar concentraciones de flujo y garantizar la correcta transmisión de esfuerzos.

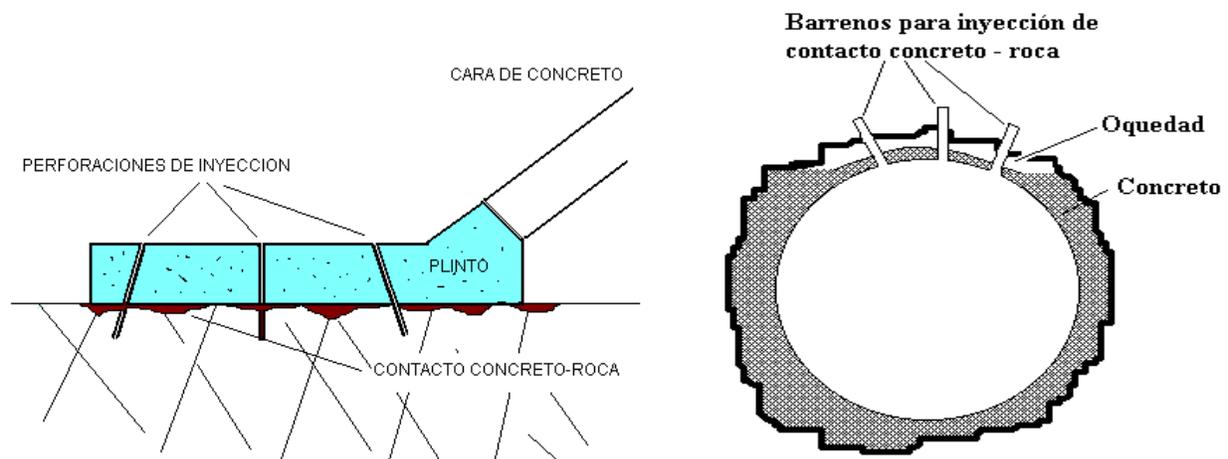


Figura II.1.9.2.1.a Inyección de consolidación en plinto    Figura II.1.9.2.1.b Inyección de contacto en galerías

### II.1.9.2.2 Inyecciones de consolidación

Tienen como propósito mejorar las características de deformabilidad de la roca de cimentación, consolidándola mediante inyecciones que sellen las fisuras o grietas, y así reducir las deformaciones del terreno al recibir las cargas de la estructura.

### II.1.9.2.3 Pantalla de impermeabilización profunda

Consiste en la impermeabilización de la roca mediante inyecciones a través de perforaciones profundas, sellando fracturas o debilidades, para que cumpla los requisitos de impermeabilidad necesaria y garantizar la estanqueidad de la obra.

Este trabajo, solo hará mención del procedimiento de inyección de contacto, de consolidación y de impermeabilización profunda.

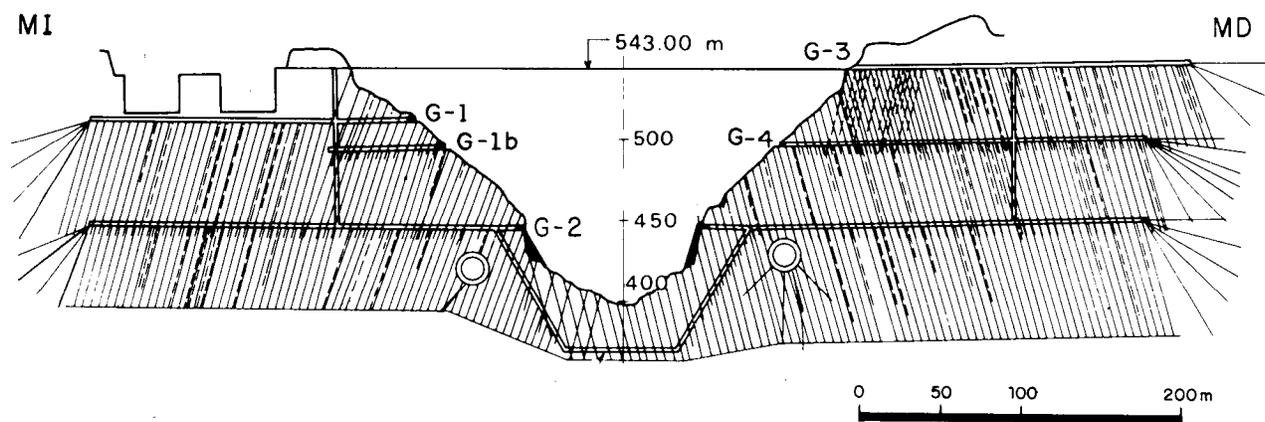


Figura II.9.2.3 Esquema de Inyecciones

### II.1.9.2.4 Inyecciones de impermeabilización bajo la pantalla flexible

Consisten en la impermeabilización de la superficie de contacto entre la roca y la pantalla de muro plástico de las ataguías, para lograr continuidad de la pantalla y garantizar estanqueidad.

### II.1.10 Recomendaciones de los materiales para los tratamientos de roca

Es fundamental y de gran importancia verificar, previamente al inicio de los trabajos, que los insumos requeridos para los tratamientos (p.e., acero de refuerzo, anclaje del plinto, cemento, agua, arena, aditivos, etc.), cumplan con la calidad requerida en las especificaciones, por lo que se debe establecer un monitoreo sistemático en las plantas de acopio y de fabricación, con el apoyo de laboratorios centrales o de campo.

Durante los trabajos de tratamientos de la roca, se debe establecer una estrecha vigilancia de los procesos de producción y/o construcción, verificando lo siguiente:



- Los diámetros del acero de refuerzo
- El calibre y espesor de la sección de los marcos de acero de metálicos de acuerdo a la geometría del proyecto
- Diámetro-ancla, diámetro-barreno y diámetro-cartucho de mezcla empleado para la fijación de las anclas
- Calidad y dosificación de los cementantes, agregados y aditivos
- El volumen de la mezcla dentro del barreno debe ser por lo menos el volumen teórico del espacio anular
- Asegurar la limpieza y colocación adecuada del acero de refuerzo dentro del barreno
- Los espesores de recubrimiento de concreto lanzado de proyecto con el uso de escantillones.
- Asegurar la integración de conjunto de los distintos sistemas de soporte (marcos metálicos, anclaje en sus distintas opciones integrado al concreto lanzado, etc.)

## **II.2 Teoría del diseño y control de la inyección de lechada ó mortero empleando el método GIN**

### **II.2.1 El Método GIN**

Se deriva y presenta aquí el método del numero de intensidad de inyectado (GIN) para el inyectado con mezclas de cemento de masas rocosas.

Las características principales únicas del método son:

1. Una sola mezcla de inyectado estable para todo el proceso (relación agua: cemento por peso de 0.67 a 0.8:1) con un aditivo superplastificante para incrementar la penetrabilidad.
2. Una velocidad constante baja a media de bombeo de la lechada conduce con el tiempo, a una presión que se incrementa gradualmente conforme la lechada penetra mas adentro de las fisuras de la roca.
3. El monitoreo de la presión, la velocidad de flujo, el volumen inyectado y la penetrabilidad contra el tiempo, en tiempo real por medio de gráficos en una computadora PC.



4. La terminación del inyectado cuando la trayectoria de inyectado registrada sobre el diagrama de presión contra volumen total (por medio de intervalo de inyectado) interseca a una de las curvas de volumen limitante, presión limitante o intensidad de inyectado limitante como queda dado por la curva hiperbólica seleccionada de GIN (una curva de valor constante  $p V$ , presión por volumen, una medida de la energía empleada). La experiencia en varios países en proyectos hidroeléctricos mayores indica que el método es técnicamente y económicamente efectivo.

El inyectado de masas de roca con lechadas de cemento para mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas es una práctica bien establecida en la ingeniería civil. Sin embargo, esta práctica ha estado dominada por mucho tiempo por reglas empíricas y experiencias personales o institucionales, que conducen frecuentemente a creencias dogmáticas.

Durante esta década, los autores han tenido la oportunidad de trabajar en una serie de proyectos hidroeléctricos mayores en construcción en diferentes países, con proyectistas, ingenieros geotécnicos y geólogos, así como ingenieros de control de campo en el desarrollo de una comprensión mejor del proceso de inyectado mediante una combinación de investigaciones de laboratorio, teóricas y de campo.

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

Se dará un fundamento teórico breve seguido por conceptos tanto teóricos como prácticos que conducen al desarrollo del procedimiento de inyectado GIN.

## **II.2.2 Conceptos teóricos del flujo de lechada y su penetración**

A diferencia de los fluidos newtonianos, tales como agua y aceite, donde el comportamiento reológico puede caracterizarse únicamente por el parámetro de viscosidad, una lechada de inyectado “estable” se comporta como un fluido Binhamiano durante el flujo, teniendo ambos viscosidad y cohesión (resistencia a la fluencia).



Mientras que ambos son parámetros de resistencia al flujo, la viscosidad gobierna la velocidad de flujo y la cohesión gobierna la distancia máxima de penetración (para una presión de inyectado aplicada dada a una apertura dada de las fisuras de la roca). Se han desarrollado y presentado en otro lado ecuaciones para calcular la distancia máxima de penetración, el volumen máximo de lechada inyectada y la fuerza máxima total de levantamiento ejercida sobre el área de inyección.

Será suficiente hacer notar que la distancia máxima de penetración lograda por una lechada de inyectado es directamente proporcional a la presión aplicada a la apertura de las fisuras y es inversamente proporcional a la cohesión de la lechada de inyectado. De esta manera, para lograr la penetración de la lechada en fisuras de roca fina, es necesario incrementar la presión de inyectado o reducir la cohesión de la lechada, o ambos casos.

Quizás el mayor valor de las ecuaciones de flujo Binhamiano consiste en proporcionar una visión del proceso de inyectado con relación a los factores que influyen la penetración de la lechada en una fisura de roca y la extensión de las fuerzas de levantamientos creadas por el proceso de inyectado.

Mientras que las lechadas estables (definida como aquellas que exhiben en dos horas una decantación menor del 5% de agua clara en la parte superior de un cilindro de 1000 ml) puede aproximarse al comportamiento de un fluido Binghamiano, no es razonable aplicar las ecuaciones a lechadas delgadas y acuosas.

Tales mezclas delgadas o lechadas son suspensiones inestables de partículas de cemento en agua, que, durante el flujo de la lechada a través de las fisuras de roca, pueden mostrar un comportamiento de sedimentación errática; erosión, resuspensión y resedimentación. Este comportamiento es imposible de predecir y caracterizar con las ecuaciones de flujo Binghamianas o cualquier otra.

### **II.2.3 Selección de la mezcla de inyectado**

La controversia sobre mezclas espesas contra delgadas (lechadas) seguramente continuará por varios años más. Varios autores, han expresado su preferencia por mezclas más espesas desde 1985. La practica de agregar del 1 a 2% de bentonita para estabilizar la mezcla y para reducir la sedimentación, esta siendo reemplazada progresivamente por el empleo de mezclas



de contenidos de cemento más elevados, pero con aditivos superplastificantes. Estas últimas mezclas son estables, ya que poseen menos cohesión y son más penetrantes, también tienen una mayor resistencia después del fraguado.

Tradicionalmente, los abogados de mezclas más espesas han indicado varias ventajas que exhiben las mezclas espesas, ambas durante el proceso de inyectado o durante la vida útil de la masa de roca inyectada, después de que se haya endurecido la lechada.

Durante el inyectado una lechada moderadamente espesa estable tiene las siguientes ventajas, comparada con una lechada delgada:

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

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

- Menos contracción durante el fraguado y con esto una mayor liga a lo largo de las paredes de la fisura en la roca y menos riesgo de una reabertura.
- Mayor densidad y mayor resistencia mecánica, debido al mayor contenido de cemento y con ello una mayor resistencia a la erosión física ó tubificación.
- Menor porosidad, menor permeabilidad, y una mayor resistencia de liga y con esto una resistencia química mayor contra la lixiviación y una mayor durabilidad de la pantalla de inyectado durante la vida útil de la presa.



La lechada estable, debido a su cohesión, requiere presiones de inyectados mayores para alcanzar la misma distancia de penetración comparada con una lechada delgada. Sin embargo, por medio del empleo de una pequeña cantidad de aditivo superplastificante, ambos parámetros, su cohesión y su viscosidad, pueden reducirse drásticamente.

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

Los valores de cohesión y viscosidad pueden obtenerse en el laboratorio empleando un viscosímetro rotatorio con cilindros concéntricos. Si embargo, puede emplearse también el medidor sencillo de placa de cohesión. Este es una pieza de una placa de acero rugosa, de 100 mm por 100 mm por un espesor de 1.5 mm, que se pesa antes y después de sumergirla por unos segundos en la mezcla de inyectado.

La diferencia en peso dividida entre el área de ambos lados da el parámetro de cohesión en unidades de resistencia al esfuerzo cortante. Es conveniente dividir la cohesión  $C$  entre el peso unitario de la lechada  $g$ , expresando la cohesión relativa  $C_r = C/g$ , que es la que normalmente se reporta. Se da generalmente en mm, y los valores típicos son de 90.2 a 0.35 mm para lechadas espesas sin aditivo superplastificante.

Con aditivos, la cohesión aparente, baja a valores de 0.08 a 0.15 mm, para el rango recomendado. Es de interés notar que el valor de  $C_r$  es de hecho el espesor de la lechada de cemento, que se adhiere a cada lado de la placa de cohesión.

La placa de cohesión debe ser lo suficientemente rugosa, cortando pequeñas ranuras que se intersectan sobre su superficie, de manera que la adhesión entre la superficie del acero sea mayor que la cohesión entre la capa superficial de la lechada adherida y el resto de la lechada; de otra manera la lechada se deslizará de la placa.



Otros valores típicos del laboratorio son: peso específico de la lechada, 1.59 a 1.67 t/m<sup>3</sup> (99.2 a 104.2 lb/ft<sup>3</sup>); tiempo de flujo del embudo Marsh de 29 a 32 seg; y resistencia a la compresión a los 28 días de 15 a 20 Mpa (2,250 a 3,000 lb/in<sup>2</sup>).

Otro punto que deberá mantenerse en mente, es la pérdida potencial de agua al inyectar roca seca, arriba del nivel de agua subterránea. En el caso de que se espesara la lechada por esta razón, se incrementaría su cohesión (se aumentaría la fricción interna) al grado que ya no se podría inyectar mas lechada. Una practica prudente es la de inyectar agua por un periodo de tiempo para obtener una saturación parcial de la masa rocosa, precisamente antes del inyectado. También se pueden emplear aditivos retenedores de agua en la lechada.

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

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

## **II.2.4 Diseño de obras de inyectado**

El diseño de una pantalla de inyectado incluye la selección de las siguientes características principales: mezcla de inyectado, espaciamiento y profundidad de las perforaciones de inyectado, procedimiento de inyectado (incluyendo la limitación del volumen y presión) y el control de campo. Se requiere un buen conocimiento de la geología del sitio al seleccionar algunos de estos parámetros, en especial, las características físicas de las discontinuidades de la masa de roca que deberán inyectarse (tipos, frecuencia, abertura de la fisura, rugosidad, alteración o relleno y extensión). El estado de esfuerzo in situ y las condiciones de agua subterránea existentes también deberán considerarse.

Además de un conocimiento de las condiciones geológicas y geotécnicas existentes, deberán tomarse en cuenta los cambios inducidos por el estado de esfuerzos del proyecto y las



presiones hidráulicas y su variación en el tiempo (tales como durante del llenado y abatimiento del vaso). Finalmente, deberá definirse de una manera mejor la meta que deberá lograrse en términos de consolidación o efectos de densificación, como es el caso en general.

## **II.3 Desarrollo del método GIN**

### **II.3.1 Inyectado de fisuras amplias abiertas**

Las observaciones prácticas y los estudios teóricos, indican que las fisuras más amplias abiertas en una masa rocosa son aquellas que se inyectan más fácilmente. La penetración de la lechada también puede ser considerable (algunas decenas de metros). Por lo tanto, existen tanto razones prácticas como económicas para reducir la penetración de la lechada y el volumen de lechada inyectada. Hay tres maneras de lograr esta reducción:

- Empleando una lechada menos penetrante (más espesa con mayor cohesión).
- Limitando la presión de inyectado.
- Limitando el volumen de lechada inyectada.

Antes de seleccionar el criterio limitante, deberá considerarse que también pueden existir fisuras más finas en el intervalo de roca que se está inyectando. Estas son más difíciles de inyectar y posiblemente no se inyectarán bien hasta una etapa posterior, cuando se hayan rellenado las fisuras más abiertas. Sin embargo, durante la primera etapa de inyectado, es deseable lograr algún llenado de estas fisuras finas.

De esta manera, la mezcla de inyectado no deberá espesarse, pero deberá permanecer una lechada moderadamente espesa estable con un aditivo superplastificante. La alternativa de limitar la presión tampoco es muy atractiva, ya que esto reduciría el inyectado de las fisuras finas. La alternativa restante de colocar una limitación de volumen parece ser el mejor camino.

### **II.3.2 Inyectado de fisuras finas**

Después que se hayan inyectado las fisuras mas abiertas, o si no existieron originalmente en la zona por inyectar fisuras abiertas de abertura amplia, el inyectado de las fisuras finas se hace



con prioridad. Tal inyectado puede realizarse, ya sea utilizando una mezcla más delgada con una cohesión menor, o inyectando a presiones mayores.

Es más conveniente elevar la presión mantener la mezcla moderadamente espesa de alta calidad con el aditivo superplastificante. En vista de que las fisuras mas finas tendrán una menor penetración de lechada y ya que la presión de inyectado se reduce rápidamente conforme se aleja de la perforación, la fuerza total de levantamiento aún a presiones de inyectado elevadas será, como regla, mucho más baja que el peso de la sobrecarga; el hidrofracturamiento de las juntas y los planos de estratificación en la roca es rara vez un problema (con excepción de los 5 a los 10 metros superiores).

Consecuentemente, son aceptables presiones de inyectado bastante elevadas, aún de hasta 30 a 40 bar, es decir, de 3 a 4 Mpa (425 a 570 lb/in<sup>2</sup>) calculados en el intervalo de inyectado en el caso de que la toma de lechada sea pequeña.

Al considerar estos factores se sugiere un límite superior para la presión de inyectado, cuando las tomas de lechada son pequeñas en el rango de 30 a 50 bar (3 a 5 Mpa), dependiendo de la geología (intemperización, estratificación, zonas débiles, estado de esfuerzos in situ, etc.), la presión de agua futura y la intensidad deseada del inyectado.

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

### **II.3.3 La reducción del espaciamiento de las perforaciones del inyectado por etapas**

En la práctica usual, se inyectan las perforaciones primarias, con un espaciamiento bastante abierto (tales como 10 a 12 m) de manera que el inyectado en el primer barreno primario no interfiera con el siguiente. Frecuentemente se especifica que se perfore e inyecte, cada tercer o cuarto barreno primario antes de los demás primarios, para servir como perforaciones primarias exploratorias.



Estas perforaciones serán frecuentemente perforaciones con núcleo y se probarán con pruebas de agua a presión hasta una profundidad total de  $0.75 \times H$  (en donde H es la altura del vaso futuro en el punto en cuestión). El resto de las perforaciones primarias podrán ajustarse en profundidades de acuerdo a los resultados de las perforaciones exploratorias primarias.

La siguiente serie (etapa) de perforaciones, los llamados barrenos secundarios, se inyectan a continuación en una localización intermedia de espaciamiento entre los primarios. Ya que estas perforaciones se encuentran únicamente de 5 o 6 metros de las perforaciones primarias, encontraran con frecuencia lechada endurecida en algunas de las fisuras más amplias.

En general, sus “tomas” serán mas bajas que el de los primarios. Frecuentemente se requieren perforaciones terciarias, nuevamente a un espaciamiento intermedio (2.5 a 3 metros), generalmente con tomas aún menores; eventualmente se podrán requerir aún perforaciones cuaternarias (de 1.25 a 1.5 metros de cada perforación terciaria), resultando generalmente en una absorción aceptablemente baja de lechada.

Ya que la roca se hace mas cerrada con cada fase (etapa) de perforaciones, las fisuras no inyectadas encontradas en las últimas perforaciones generalmente serán mas finas; por lo tanto, las presiones mas altas serían benéficas y producirían una operación de inyectado mas eficiente.

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

### **II.3.4 Pruebas de presión de agua (LUGEON)**

Se han empleado frecuentemente pruebas de presión de agua (pruebas Lugeon) en cada intervalo de inyectado para ayudar a seleccionar la mezcla de inyectado. Sin embargo, la experiencia y la teoría han indicado una correlación muy pobre de los valores Lugeon con las absorciones de lechada. Sin embargo todavía podrán emplear las pruebas Lugeon o similares en las perforaciones exploratorias primarias, para obtener una imagen general de la permeabilidad a través del empotramiento y el área de cimentación de la cortina principal. Luego se podrán efectuar comparaciones con pruebas Lugeon llevadas a cabo como



comprobación o barrenos de control después del inyectado, para ver si se ha logrado una reducción suficiente en la permeabilidad.

### II.3.5 Energía específica empleada

Para inyectar una zona de roca en forma más intensiva, se requiere emplear más energía. En un intervalo de inyectado progresión dado, la energía empleada es aproximadamente proporcional al producto de la presión  $p$  del inyectado final y del volumen de inyectado de  $V$  dando un producto de  $p V$ . Este número de  $p V$  se llama el número de intensidad de inyectado o GIN (Grouting Intensity Number). El producto puede normalizarse con la longitud del intervalo de inyectado como litros/metro (o en forma intercambiable por peso de cemento inyectado en Kg/m, ya que para mezclas moderadamente espesas los valores numéricos son similares dentro de un 5 al 10%). La presión ha sido utilizada tradicionalmente como bar, resultando en  $p V$  o unidades GIN siendo bar/litros/m, aunque obviamente se pueden utilizar otras unidades, haciendo las conversiones apropiadas.

### II.3.6 Ventajas de mantener un valor constante GIN

El método GIN requiere que, una vez que se haya seleccionado el nivel de intensidad de inyectado (por ejemplo una intensidad alta GIN de 2,000 bar/litros/m), este valor deberá utilizarse, tanto para las fisuras fácilmente inyectables con grandes volúmenes de absorción a baja presión como para las fisuras más finas con tomas bajas pero con presiones considerablemente más elevadas. De esta manera, se mantiene un valor constante GIN.

Al mantener un valor constante de GIN durante el proceso de inyectado para todos los intervalos, se obtiene una penetración casi constante de la lechada y se limita casi automáticamente el volumen en una fisura abierta amplia, pero se permiten presiones incrementadas en zonas más apretadas y fisuras menos inyectables. También, se eliminan las combinaciones de presión baja con una toma baja, las cuales inyectarían las fisuras finas de una manera inadecuada.

Un valor constante de GIN cuando se dibuja en una gráfica de presión contra volumen, produce una curva hiperbólica: mientras más elevada la intensidad de inyectado o el valor GIN, más grande es la distancia del origen de la curva. De esta manera la curva GIN completa el

ingrediente faltante para juntar los otros dos límites discutidos en párrafos anteriores; la línea de volumen limitante y la línea de presión limitante. La combinación de los tres da una envolvente limitante compuesta para el inyectado.

### II.3.7 Envoltentes limitantes compuestas para diferentes intensidades de inyectado

En la figura II.3.7.a se muestran las trayectorias  $p-V$  de tres tipos de fisuras. Una fisura abierta con una abertura amplia se presenta en la curva 1, que demuestra un volumen creciente de lechada inyectada con un sólo incremento ligero de la presión. La curva 2 representa una fisura promedio en donde la presión se incrementa gradualmente conforme el volumen de lechada inyectada aumenta; únicamente en el punto (a') se eleva rápidamente la presión conforme la resistencia a la penetración de la lechada se incrementa en una forma desproporcionada. La curva 3 representa una fisura cerrada, en donde la presión de inyectado se eleva rápidamente con tomas de lechadas pequeñas. De una manera similar, la curva 4 representa una fisura extremadamente cerrada con una toma de lechada muy pequeña y una presión elevada de rechazo.

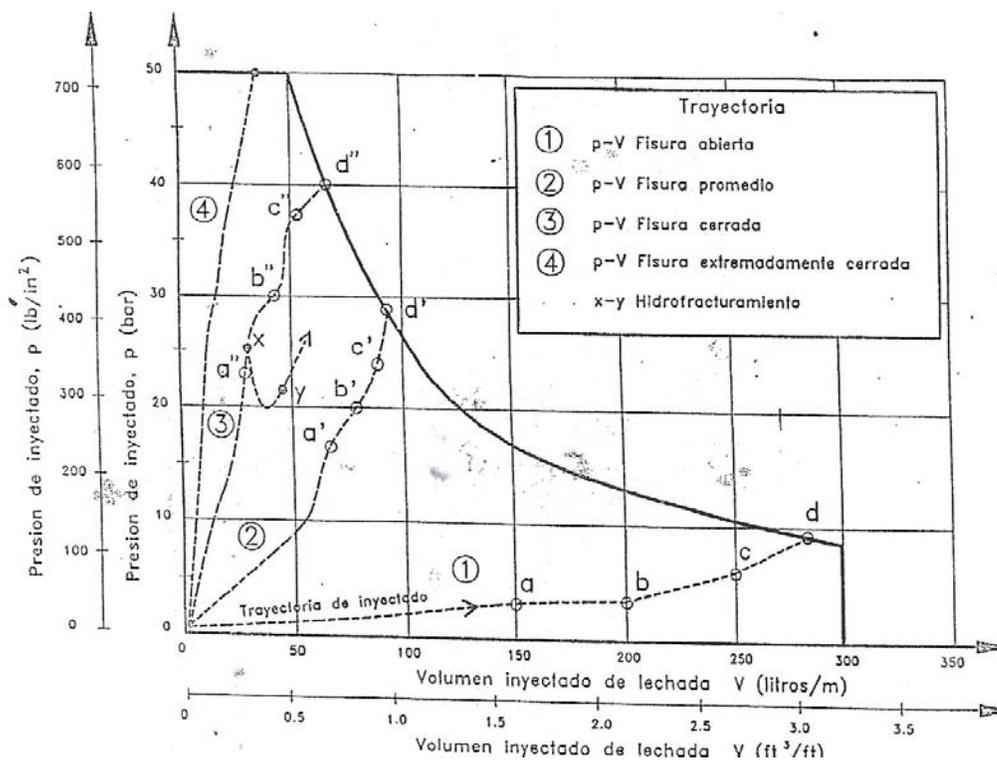


Fig. II.3.7.a Ejemplo de curvas de trayectorias de inyectado



La Figura II.3.7.b ilustra 5 envolventes limitantes sugeridas para diferentes intensidades de inyectado. El valor GIN, la presión límite y el volumen límite; son de hecho tres parámetros más o menos independientes, que definen la curva envolvente limitante para el inyectado. En la definición propuesta se relacionan entre sí pero no necesitan estarlo. La envolvente superior representa un inyectado de muy alta intensidad, con un valor de GIN de 2,500 bar/litros/m, una presión límite muy elevada de 50 bar y un volumen límite muy elevado de 300 l/m. La envolvente más baja representa una intensidad muy baja con un valor GIN de 50 bar/litros/m, una presión máxima de 15 bar y un volumen límite de 100 l/m. Para la mayoría de las condiciones, los autores recomendarían la envolvente de intensidad moderada con un valor dado de 1,500 bar/litros/m, una presión límite de 30 bar y un volumen límite de 200 l/m.

Para áreas geológicamente críticas (cerca de la superficie o sobre taludes parados), sería aplicable la curva muy baja. Se comprende fácilmente, de la combinación de las figuras 1 y 2, que el proceso de inyectado se detendrá en diferentes puntos dependiendo del valor seleccionado para la envolvente del inyectado.

En la curva 1 (figura II.3.7.a), el inyectado se terminaría en el punto (a) para un inyectado de baja intensidad, debido al volumen límite de 150 l/m con una presión resultante de 3 bar. Sin embargo, si el diseñador especificó la envolvente de intensidad moderada, el inyectado continuaría hasta el punto (b), el volumen límite de 200 l/m, y nuevamente la presión final sería alrededor de 3 bar. Si se hubiera seleccionado un inyectado de alta intensidad, el inyectado continuaría hasta el punto (c), el volumen límite de 250 l/m, siendo una presión final alrededor de 6 bar. Finalmente, si se hubiera seleccionado una intensidad muy elevada, el inyectado continuaría hasta el punto (d). La trayectoria no se terminaría por el volumen límite sino más bien por la intersección de la curva GIN 2,500.

En este punto, el volumen total de inyectado sería de 285 l/m y la presión final de inyectado de 9 bar. De esta manera, habría un rango de volumen inyectado de 150 a 285 l/m y un rango de la presión final de inyectado de 3 a 9 bar, dependiendo del GIN especificado.

Para la curva 2 (figura II.3.7.a), el volumen inyectado en el punto (a'), sería de alrededor de 60 l/m, y la presión final de inyectado sería de 13 bar. Si se hubiera continuado el inyectado hasta el punto (d'), que representa una intensidad muy elevada ( $p V = 2500$ ), la toma de lechada se hubiera incrementado únicamente hasta 90 l/m, pero la presión hubiera alcanzado 28 bar,



considerablemente menos que el valor límite de 50 bar. De una manera similar, para la curva 3, se detendría el inyectado entre el punto (a) y (d) dependiendo de los criterios de GIN y de la presión límite previamente seleccionado.

La porción x-y representa un ejemplo de hidrofracturamiento o un evento de partición por presión hidráulica, en donde una junta o plano de estratificación se forza repentinamente abierto con una caída resultante de presión y un incremento en la velocidad de absorción. Se podría continuar con el inyectado a velocidades bajas, para tratar de alcanzar la curva GIN seleccionada, pero, si la presión se incrementara, se presentaría probablemente otro evento de hidrofracturamiento aproximadamente a la misma presión o un poco mayor. Es cuestionable si el inyectado debe continuarse bajo tales circunstancias. Sin embargo, muchas veces se ha hecho sin ningún problema serio. En cualquier caso, tarde o temprano se alcanza la curva límite y el inyectado se detiene.

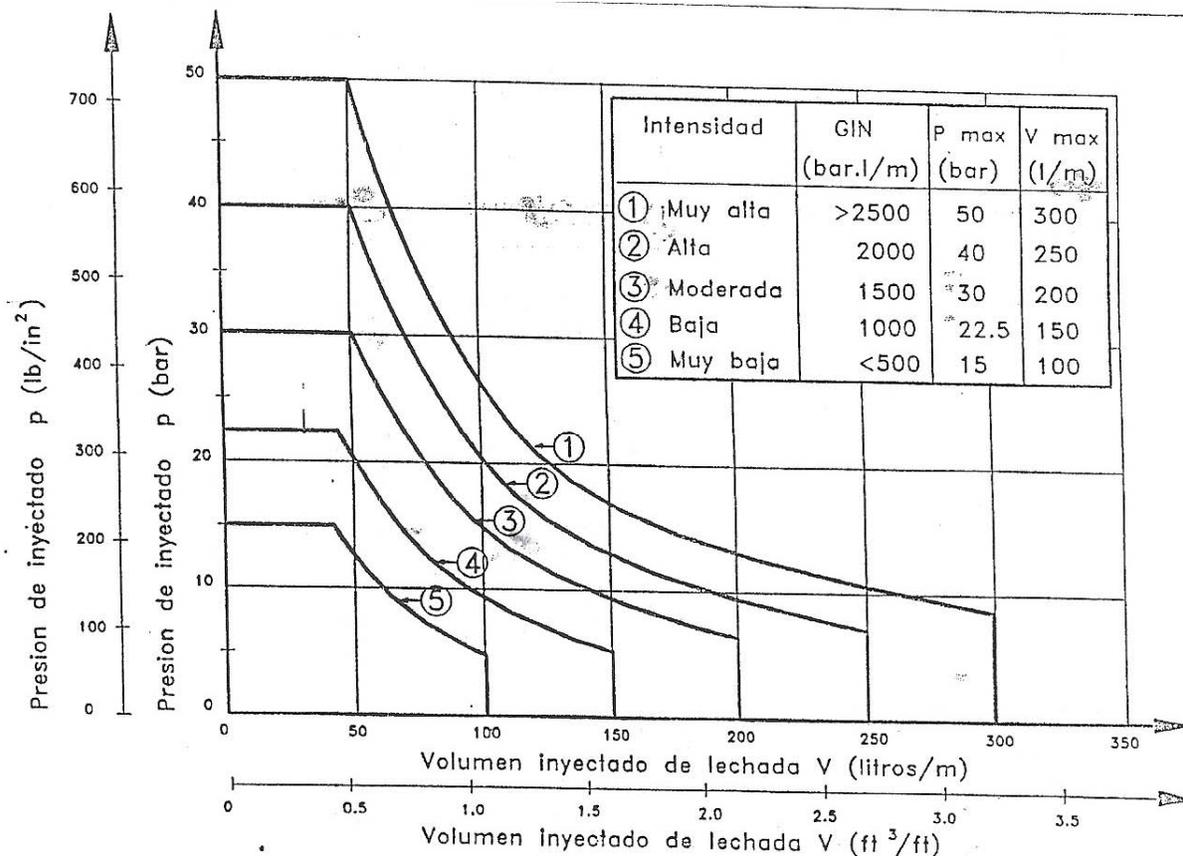


Fig. II.3.7.b Envoltentes limitantes propuestas para inyectado



### II.3.8 Selección del valor GIN

El proyectista de la presa y su grupo geotécnico y de inyectado deberán seleccionar el valor de GIN para la pantalla de inyectado proyectada. Mientras que algunos autores recomiendan el valor de GIN moderado de 1,500 bar/litros/m, como un inicio, deberán tomarse en cuenta las condiciones geológicas, el valor de las futuras pérdidas de agua y las presiones de subpresión después del llenado. Los límites superiores de presión y los límites superiores de volumen también pueden ser modificados por los proyectistas y los ingenieros de control de campo para casos especiales. Probablemente el mejor procedimiento es el de llevar a cabo 1 ó 2 tramos de inyectado de prueba antes de seleccionar la envolvente limitante de inyectado.

El límite superior de presión puede ser menor en los empotramientos de aquel seleccionado para el fondo del valle, debido a diferencias en la carga del embalse. Una meta que vale la pena, es una presión límite de aproximadamente 2 veces la carga del vaso, pero puede ser difícil lograr esto sin inducir un hidrofracturamiento no deseable.

### II.3.9 Inyectado controlado por computadora

Ya que actualmente se pueden instalar y operar computadoras PC fácilmente en el sitio de inyectado mismo, existe ahora la posibilidad de un control continuo, en tiempo real, del proceso de inyectado. Solamente se deberán de leer de una manera continua 2 valores por medio del sistema: La presión actual  $p$  y la velocidad de flujo  $q$ , de la cual se puede obtener por medio de integración el volumen acumulado  $V$  por unidad de longitud (inyectado desde el inicio del inyectado de la progresión en cuestión). Si se desea, puede medirse directamente el volumen  $V$  de lechada inyectada; y la velocidad de flujo se podrá obtener por derivación.

Empezando desde los valores medios de  $p$  y  $q$ , se pueden mostrar y graficar una serie de gráficas de tiempo sobre la pantalla del monitor (por ejemplo presión, velocidad de flujo, volumen acumulado y penetrabilidad contra el tiempo). La Figura II.3.9 muestra tal serie de gráficas. Llama la atención la curva (d), que representa el flujo específico ( $q/p$ ) o penetrabilidad (es decir, la velocidad de flujo dividida entre la presión) contra el tiempo. Esta curva muestra claramente el llenado progresivo de los huecos y fisuras y el crecimiento de la resistencia al inyectado, causada en primer lugar por el crecimiento total cohesiva, conforme se extiende el

flujo de lechada mas adelante a lo largo de las fisuras de la roca. Se observa fácilmente un evento de hidrofracturamiento o hidroelevación por la resistencia de un pico en la gráfica.

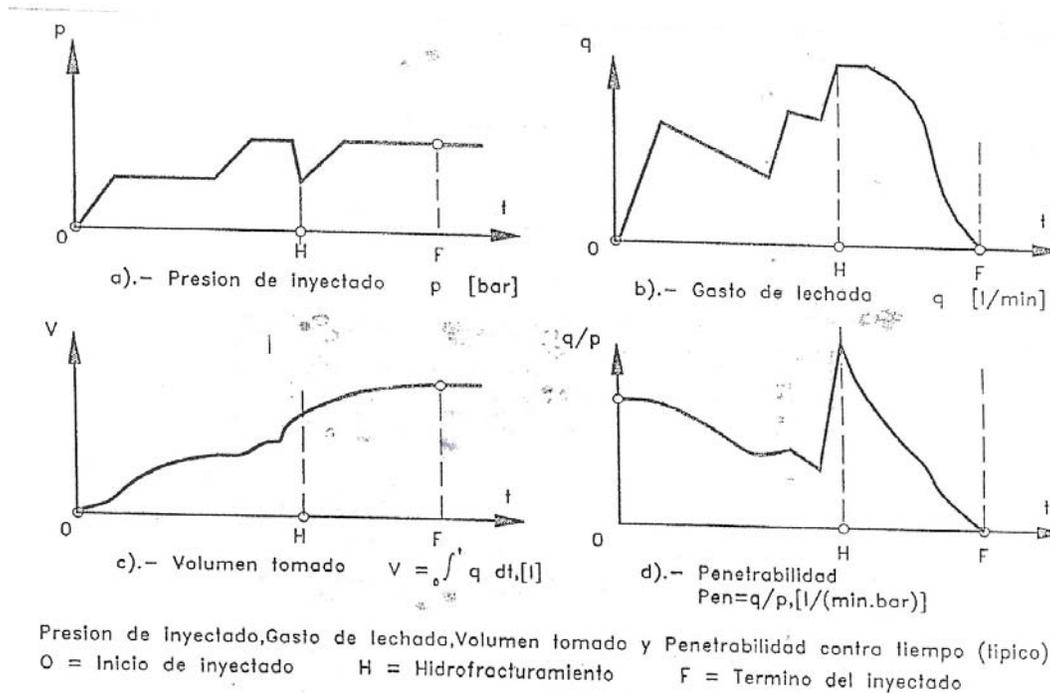


Fig. II.3.9 Proceso de inyectado de una etapa

### II.3.10 Las curvas GIN y de penetrabilidad – volumen como controles prácticos de inyectado

La Figura II.3.10 representa las gráficas principales de control que puede presentar la computadora. Estas curvas pueden utilizarse para controlar el proceso de inyectados. La Figura II.3.10 (a) muestra la envolvente limitante de inyectado que ha sido seleccionada para el proyecto (o para una zona dada del proyecto), incluyendo la presión límite  $p_{max}$ , el volumen límite de  $V_{max}$  por unidad de longitud y la curva hiperbólica GIN seleccionada. Esta envolvente puede meterse en el programa y puede presentarse a petición. En general, a estas curvas de la envolvente limitante se les llama simplemente curvas GIN.

La curva irregular 2 mostrada en la Figura II.3.10 (a) representa la trayectoria real del inyectado graficada en pequeños incrementos de tiempo, de la presión instantánea de inyectado contra el volumen acumulado de inyectado de lechada por unidad de longitud. La curva irregular de la trayectoria de inyectado intersecta la curva GIN en el punto F, y el inyectado se detiene a una



velocidad de flujo “cero”, con una presión final  $p_f$  y un volumen total unitario acumulado de la lechada inyectada  $V_f$ .

La Figura II.3.10 (b) también es una curva importante de monitoreo en tiempo real. La penetrabilidad  $p/q$  se gráfica contra el volumen acumulado de lechada inyectada en vez de, contra el tiempo, como en la Figura II.3.9 (d), dando sin embargo curvas tipo similar.

Conforme se desarrolla la curva, se observa normalmente un descenso en la penetrabilidad, lo que indica que la eficiencia del inyectado está disminuyendo. De esta manera, a una presión constante de inyectado, la velocidad de flujo va disminuyendo, o bien, si se mantiene una velocidad constante de flujo (casi al final), la presión de inyectado va creciendo.

La decisión de cual de estas combinaciones es aplicable, depende de ambos, el tipo de bomba y los detalles de la operación de inyectado (tuberías y válvulas).

El descenso de la curva de penetrabilidad – volumen indica que el proceso de inyectado esta caminando normalmente. Deberá monitorearse y controlarse la presión de inyectado para detener el proceso en los límites de inyectado sobre la curva GIN.

Como se indico en la sección anterior, la trayectoria de inyectado llegará a la curva GIN en diferentes puntos, en función de la abertura de las fisuras de roca (fisura amplia cerca del punto B y fisuras finas cerca del punto A; Figura II.3.10 a). Conforme avance la trayectoria de inyectado hacia la curva GIN, las velocidades de bombeo deberían ser tan bajas como sea practicable, mientras todavía se logre una penetración de lechada (por ejemplo 500 l/h es decir 17.6 ft<sup>3</sup>/h ó 2.2 gals/min). La experiencia ha demostrado, que estas diferentes gráficas ayudan a controlar el proceso de inyectado de una manera continua y efectiva.

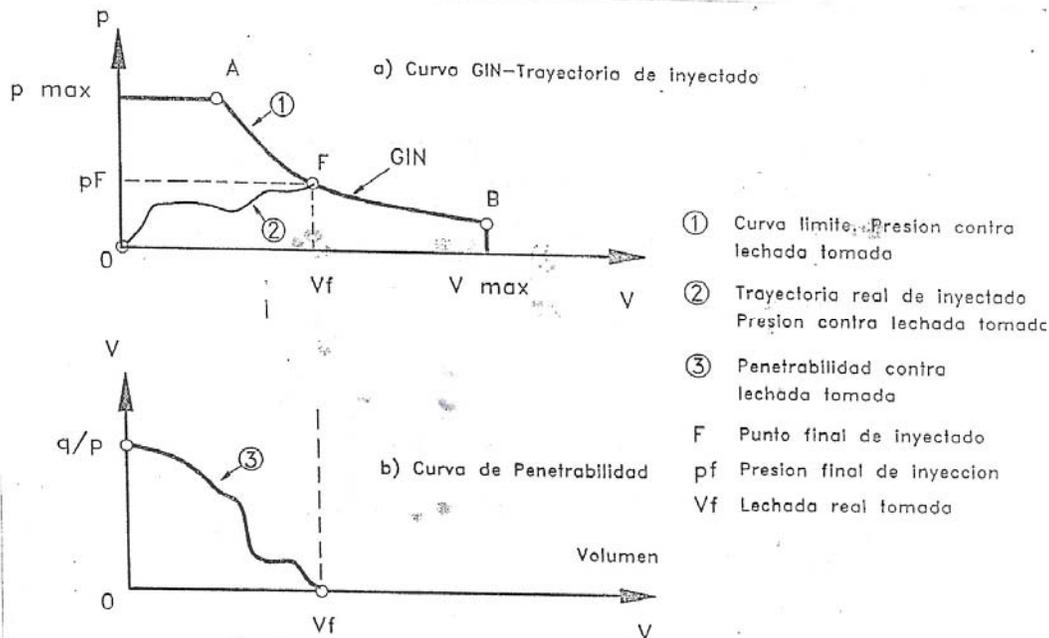


Fig. II.3.10 Proceso de inyectado de una progresión (Típico)

### II.3.11 Aplicación a pantallas de inyectado

El método GIN, tal como se presenta, ha tratado principalmente con consideraciones para un solo intervalo de inyectado o progresión. El método también es aplicable a todos los intervalos de una perforación de inyectado y a todas las perforaciones primarias y con espaciamentos intermedios. El procedimiento de reducción de espaciamentos de una pantalla de una línea, es un método comprobado eficiente basado en un razonamiento teórico fundamentado.

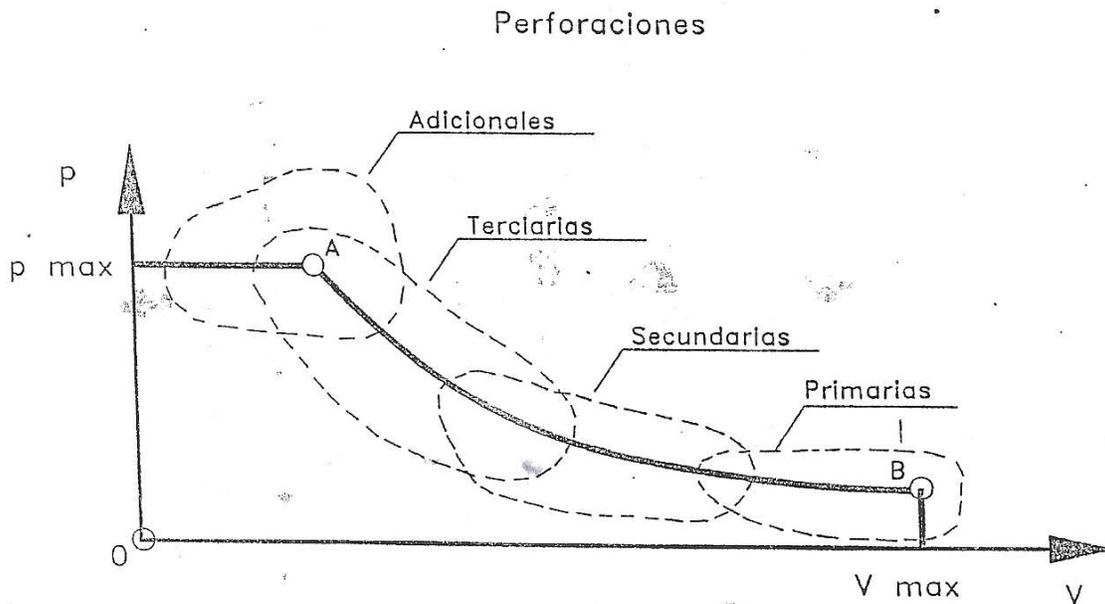
En ciertas rocas altamente permeables o cavernosas (flujos de lavas, algunas calizas, areniscas fracturadas), se han construido pantallas de tres líneas. Generalmente se inyecta primero la línea de aguas abajo, seguidos por la línea de aguas arriba y finalmente por la línea central. Se considera que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

El método de reducción de espaciamentos, las perforaciones primarias rellena total o parcialmente y obturan únicamente las fisuras más amplias de la roca. La serie (etapa)

siguiente de perforaciones secundarias nuevamente obturaran únicamente las fisuras más amplias, que todavía no se taparon en la primera serie, y así sucesivamente. En la II.3.11 se grafican las posiciones finales probables de las perforaciones primarias, secundarias, terciarias y adicionales (cuaternarias o perforaciones de comprobación) sobre la curva GIN. El volumen promedio de lechada absorbida disminuirá de una serie a la siguiente. Esto sucede en forma automática cuando se sigue el procedimiento GIN.

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

Es posible que no se requieran las perforaciones cuaternarias. Por lo menos se requerirán algunas perforaciones de comprobación, para llevar a cabo las pruebas Lugeon, para ver si se logró una permeabilidad baja aceptable de la masa de roca; para una pantalla muy cerrada, los requisitos pueden ser tan severos como que el 90% de todas las pruebas deberán estar cerca o debajo de 1 Lugeon ( $1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ), con ningún valor mayor de 3 Lugeon.



**Fig. II.3.11 Ejemplo de resultados del inyectado para una pantalla de inyectado. Puntos finales de las trayectorias de todas las progresiones de inyectado (Típico).**



### **II.3.12 Relación de espaciamiento de los barrenos y el GIN**

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

Si el espaciamiento primario es demasiado cercano o el GIN es demasiado elevado. Las tomas de lechada serán muy bajas después de las primeras 2 series y las perforaciones terciarias serían esencialmente un desperdicio. El GIN también está relacionado con la distancia que viaja la lechada y por lo tanto, con el espesor de la pantalla en roca o “el muro”.

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

### **II.3.13 Criterios para el cierre**

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

Si se efectuó una selección no óptima del espaciamiento entre los barrenos, el método propuesto, por lo menos hasta un cierto grado un procedimiento que se regula por si solo. Esto



es como un resultado de la técnica de reducción de espaciamiento, la curva GIN y el requisito de la última serie de perforaciones de alcanzar la presión límite con tomas unitarias mínimas.

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

## II.4 Puntos principales del método GIN

Varios procedimientos y conceptos son básicos aplicación del método de inyectado GIN. Estos se resumen a continuación bajo cuatro encabezados.

### II.4.1 Conceptos básicos

- Se emplean únicamente mezclas estables moderadamente espesas de lechada.
  - a) Para reducir la sedimentación y el bloqueo prematuro.
  - b) Para obtener una lechada endurecida, densa y resistente.
- Se usa, hasta donde sea posible, solo una mezcla única para todo el trabajo de inyectado.
  - a) Para proporcionar un solo fluido Binghamiano con propiedades conocidas.
  - b) Simplificar el procedimiento de inyectado, mejorando así la eficiencia y reduciendo errores.
- Se emplea la curva GIN para monitoreo de la presión de inyectado.
  - a) Para que permita la aplicación de una presión elevada donde se requiera.
  - b) Evitar la presión elevada donde sería dañina o un desperdicio.
- Se controla el proceso de inyectado por medio de una computadora de campo:
  - a) Para seguir en tiempo real la presión y la velocidad de flujo.
  - b) Para graficar la trayectoria  $p$   $V$  sobre la curva GIN seleccionada.
  - c) Para indicar la terminación del inyectado, utilizando la trayectoria de inyectado  $p$   $V$  y la curva de penetrabilidad – volumen.



---

#### II.4.2 Diseño de la mezcla

- Se usan aditivos para obtener las características de la lechada.
  - a) Aditivo superplastificante para reducir la cohesión y viscosidad de la mezcla de manera de incrementar la penetrabilidad de la lechada.
  - b) Posiblemente un agente retenedor de agua, para reducir la pérdida de agua durante el exprimido.
- Se lleva a cabo una serie amplia de pruebas de laboratorio en el periodo inicial con varias mezclas de lechada con una relación agua : cemento (por peso) que varía de 0.7:1 a 1:1, esto para:
  - a) Probar diferentes cementos disponibles de finura variable.
  - b) Probar diferentes aditivos en diferentes porcentajes.
  - c) Obtener valores de prueba del peso unitario de la lechada, viscosidad aparente del embudo Marsh, sedimentación a las dos horas, cohesión, tiempos iniciales y finales de fraguado, resistencias a la compresión a los 7 y 28 días y pérdida de agua en pruebas de exprimido.

#### II.4.3 Arreglo de las perforaciones de inyectado

- Se adopta el método normal de reducción de espaciamientos desde las perforaciones primarias hasta a través de la terciaria o hasta cuaternarias.
  - a) Para proporcionar una cobertura mínima uniforme en todo.
  - b) Permitir que haya perforaciones con espaciamientos más cercanos, en donde las condiciones geológicas y los resultados de inyectado así lo indiquen.
- Se llevan a cabo pruebas de inyectado de campo, ya sea durante la fase final de diseño de la cortina durante la primera parte de la fase de construcción:
  - a) para probar las diferentes zonas del sitio, que tengan condiciones geológicas o topográficas diferentes (por ejemplo, fondo del valle y cada empotramiento)
  - b) para seleccionar el espaciamiento óptimo de las perforaciones primarias, de manera que las perforaciones secundarias y terciarias posteriores muestren una disminución continuada del



25 al 75% por serie (considérese un espaciamiento preliminar de las perforaciones primarias de 10 a 12 m)

- c) para permitir que se prueben diferentes curvas GIN (por ejemplo graficando la trayectoria  $p$   $V$  para cada etapa de inyectado hasta la intensidad de inyectado anticipada o hasta el primero o segundo evento de hidrofracturamiento.

#### II.4.4 Control de campo

Se definen los elementos de control de la curva GIN a partir de los resultados del programa de inyectado de prueba, así como cualquier consideración especial ingenieril, de mecánica de rocas o geológica:

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

Se controla el proceso de inyectado por medio de una computadora de campo, utilizando la curva GIN y la curva de penetrabilidad.

- a) Para permitir un monitoreo en tiempo real de la trayectoria de inyectado.
- b) Para permitir que se anticipe la terminación del inyectado a partir de la curva de penetrabilidad declinante y del acercamiento de la trayectoria  $p$  contra  $V$  hacia la curva GIN controlada (incluyendo el volumen límite y las proporciones de presión límite de la curva.



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

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

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



# ***CAPITULO III***

# ***PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN DE***

# ***LECHADA***



---

## III.1 Inyecciones en el P.H. El Cajón

### III.1.1 Inyecciones de Contacto

Tienen como finalidad rellenar y empacar los espacios entre la roca y los concretos, y/o entre éstos y las placas de las estructuras metálicas, asegurando el contacto entre ambos por medio de inyección de lechadas o morteros para evitar concentraciones de flujo y garantizar la correcta transmisión de esfuerzos, así como la de proporcionar cohesión entre bloque de roca o llenar fisuras, grietas u oquedades. Según su función los tratamientos de inyección se clasifican en:

### III.1.2 Inyecciones de Consolidación

Tienen como propósito mejorar las características de deformabilidad de la roca de cimentación, consolidándola mediante inyecciones que sellen las fisuras o grietas, y así reducir las deformaciones del terreno al recibir las cargas de la estructura.

### III.1.3 Inyecciones de Impermeabilización Profunda

Consiste en la impermeabilización de la roca, mediante inyecciones a través de perforaciones profundas, sellando fracturas o debilidades, para que cumpla los requisitos de impermeabilidad necesaria y garantizar la estanqueidad del vaso de regulación, o impedir flujos de agua subterránea a través de discontinuidades como fisuras, grietas u oquedades

## III.2 Equipo

El equipo que se utilice para realizar las actividades del tratamiento de la roca debe estar en excelentes condiciones mecánicas, ser del tipo y capacidad adecuados para asegurar la óptima ejecución del concepto de trabajo y llevar a cabo un mantenimiento sistemático para conservarlo en estas condiciones durante su utilización en la obra.

### III.2.1 Equipo Mezclador

Para la fabricación y almacenamiento de las mezclas de inyección, se requiere la utilización de los siguientes equipos:

### **III.2.1.1 Turbomezclador de altas revoluciones**

Este equipo deberá ser de las altas revoluciones (1250 r.p.m.) del tipo de bomba centrífuga para la fabricación de lechadas. Debe contar con un tanque de almacenamiento con capacidad mínima de 150 litros, con una malla para retención de los grumos, papeles e impurezas que pueda contener el cemento o agua y tener integrado un medidor y dosificador para agua.

### **III.2.1.2 Agitador o mezclador de bajas revoluciones**

Este equipo tendrá la capacidad mínima de 60 r.p.m. Su utilización se requiere para fabricar morteros o para depositar la mezcla previamente preparada en el turbomezclador, manteniendo en suspensión las partículas sólidas y eliminando las burbujas de aire de la lechada, de tal manera que la operación de inyectado sea continua. Se recomienda que la capacidad mínima de estos agitadores sea de 200 litros.



**Fig. III.2.1.1 Turbomezclador de altas revoluciones y Agitador de bajas revoluciones**

## **III.2.2 Bombas para Inyecciones**

Para la inyección de lechada, se requiere la utilización de los siguientes equipos:

- Bombas de desplazamiento positivo del tipo pistón de doble efecto, adaptadas con válvula de control en el sistema hidráulico. Deben seleccionarse bombas cuya capacidad de inyección sea variable de 0 a 100 litros por minuto y presión ajustable de 0 a 5 MPa. El equipo de bombeo deberá estar conectado preferentemente a un sistema computarizado de

control de inyección; éste tendrá adicionalmente el software que permita introducir los parámetros requeridos para cada inyección, aportando los reportes del comportamiento de la misma de manera gráfica y numérica.

- Bombas de desplazamiento positivo del tipo rotatorias o tornillo de Arquímedes, para inyección de mezclas pesadas y morteros que tengan una capacidad de bombeo de hasta 100 litros por minuto y 2 MPa de presión.

Estas bombas deben estar equipadas con medidores de presión y de gasto justo a la salida de la bomba.



**Fig. III.2.2 Bomba de Inyección**

### III.2.3 Manómetros

Los manómetros son dispositivos para medir la presión, deben tener una capacidad de 1,5 veces la presión máxima especificada, estar protegidos contra el golpe hidráulico (de glicerina) y utilizar protectores de membrana plana o de membrana tubular; deben estar debidamente calibrados y certificados por un laboratorio. Los manómetros usados deben revisarse frecuentemente y reemplazarse inmediatamente todo aquel que muestre indicios de inexactitud.

Además de lo anterior, se debe contar con medios para verificar y calibrar los manómetros de la obra.



Fig. III.2.3 Manómetro en barreno de inyección

### III.2.4 Obturadores

Instrumento que se coloca dentro del barreno al final de la tubería de inyección, cuya finalidad es la de aislar el tramo que se vaya a inyectar, y de este modo sellar la boca del barreno, de modo que la lechada no resurja por el brocal. Pueden ser neumáticos, mecánicos o de copas de cuero, dependiendo de las condiciones del sitio de inyección y de la presión de trabajo.



Fig. III.2.4.a Obturador de inyección



Fig. III.2.4.b Bomba manual para saturar al obturador



Fig. III.2.4.c Gato hidráulico para sacara al obturador atascado

### III.2.5 Sonda Eléctrica

Se utiliza para medir o detectar el nivel de agua en el subsuelo, antes de efectuar la saturación o inyección del terreno. Con este dispositivo, se verifica si será necesaria la saturación completa de agua en el barreno así como las condiciones del subsuelo en la zona a inyectar.

### III.2.6 Perforadoras

Deben utilizarse perforadoras de accionamiento neumático o hidráulico de percusión-rotación o rotatorias para barrenos de 41; 51.8; 57.2; y 76.2 mm de diámetro, con capacidad suficiente para barrenar a profundidades de hasta 80 m. Debe preverse que tengan incluido un dispositivo para inyectarlos de agua en forma continua durante la perforación, requisito indispensable para eliminar la contaminación producida por el polvo de la barrenación.

- Se recomienda la utilización de perforadoras con martillo de fondo para profundidades superiores a los 20 m con el fin de garantizar la dirección dada en los datos de diseño del barreno.
- Se recomienda el uso de perforadoras ligeras con acero de barrenación integral para barrenos cortos como los utilizados para barrenos de consolidación o para el contacto concreto-roca.

En algunas zonas de la obra se requiere la recuperación de núcleos de roca o incluso de concreto, por lo que se debe contar en la obra con máquinas perforadoras rotatorias equipadas con todos sus implementos para alcanzar profundidades de hasta 80 m.

Para garantizar la correcta ejecución, se deberá tomar en cuenta lo siguiente:

- Longitud. Las perforaciones se deben ejecutar tanto a cielo abierto como desde galerías o túneles, por lo cual el tamaño del equipo y del acero de barrenación debe ser el adecuado a los espacios disponibles (reducidos dentro de las galerías y/o túneles).
- Alineación. Debe conservarse la dirección de la perforación en toda la longitud del barreno, por lo tanto debe considerarse el peso del varillaje o acero de barrenación que seleccione; sobre todo en barrenos inclinados.

Finalmente, cabe indicar que es fundamental que el barreno permanezca limpio durante el proceso de perforación para optimizar el avance; sin embargo, se pueden presentar zonas donde el terreno esté muy fracturado y sea necesario ademar las paredes del mismo, por lo cual se deberá considerar la utilización de ademes metálicos para estabilizar las paredes del barreno.



**Fig. III.2.6.a Track Drill**



**Fig. III.2.6.b Core Drill**



---

### III.3 Plantas para la Preparación de Mezclas de Inyección y Estaciones de Inyección

Las plantas para la preparación de mezclas de inyección consisten en las instalaciones apropiadas con los equipos e instrumentos necesarios y suficientes para la dosificación automatizada o manual, fabricación, almacenamiento y envío de las mezclas ya preparadas a través de las conducciones hasta las plantas de inyección y/o la boca del barreno de inyección.

Deben estar ubicadas en sitios accesibles para el fácil aprovisionamiento de materiales, estar techadas, contar con espacio suficiente para alojar una cabina de control, silos y tanques de agua provistos preferentemente de sistemas automatizados de dosificación.

En caso de optarse por estos sistemas automatizados deberán ser calibrados y certificados de acuerdo a la periodicidad prevista en la norma. Dado el caso, debe contar con tarimas de madera o metálicas sobreelevadas de 0,3 a 0,5 m del piso, así como en condiciones ambientales adecuadas para almacenar y conservar en buen estado los materiales que se utilicen para la fabricación de mezclas.

Las plantas se deben localizar en sitios estratégicos que permitan surtir a las estaciones de inyección con el menor recorrido posible de las mezclas (menos de 70 m). Es conveniente que desde estas plantas se puedan enviar las mezclas por gravedad o por bombeo hacia las estaciones de inyección, las cuales se instalan cerca del barreno, de tal manera que la circulación de las mezclas a través del sistema de inyección sea continua y permita un control sensible de las presiones mediante una válvula de alivio colocada cerca del barreno.

En algunos casos, a juicio del proyectista, en longitudes cortas (menos de 15 m) puede eliminarse la tubería de retorno con la condición de que se tenga una inyección continua en los barrenos. Las mezclas pueden prepararse en las estaciones de inyección, si éstas reúnen las características y condiciones mencionadas para las plantas.



Fig. III.3 Planta de inyección (Plinto margen derecha)

### III.4 Procedimiento en la Ejecución de la Inyección

En esta sección se describen los diferentes procedimientos a fines de la inyección tanto de contacto, consolidación e impermeabilización, al realizar el proceso de los tratamientos de los macizos rocosos en el P.H. El Cajón.

#### III.4.1 Localización y Trazo del Barreno

Son las actividades necesarias para ubicar, con base en los datos de proyecto y mediante el auxilio de trazos topográficos, el barreno en el sitio previo a la perforación del mismo.

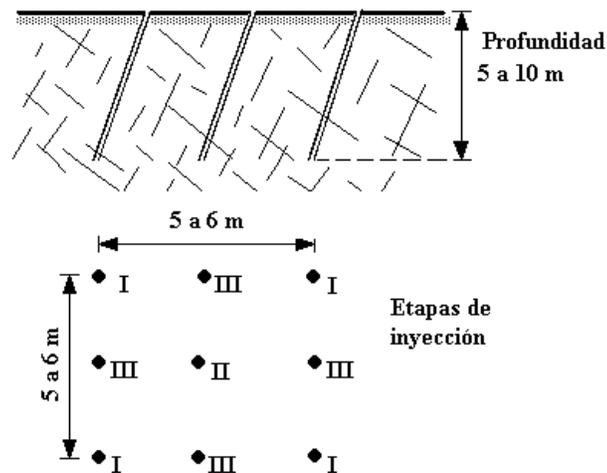


Fig. III.4.1 Ejemplo de serie de localización y trazo de barrenos de inyección

### III.4.2 Instalación de tubos guía

Para iniciar la perforación de un barreno desde la profundidad requerida y ejecutar un tratamiento de inyección sin problemas de obstrucción, es necesario dejar instalados tubos guía previamente a la colocación del concreto lanzado, al colado del concreto hidráulico, a los colados de concreto plástico y/o al fraguado de la lechada autofraguante de los muros pantalla. La instalación de estos tubos guía debe garantizar que la perforación del barreno cumpla con los datos de proyecto, para tal efecto, es indispensable fijarlos firmemente y vigilar que durante las actividades de los revestimientos y los colados no sufran movimientos indeseables. Deben estar protegidos por ambos extremos del tubo para conservar todo el carril vacío, evitando obstrucciones internas. La longitud de los tubos es la que permite llegar desde la superficie hasta la profundidad donde se debe iniciar el tratamiento. Se debe tener especial cuidado en la instalación de los tubos guías en el muro de la pantalla plástica, con la separación y profundidad adecuada, colocando tapones en ambos extremos y llenándolos de agua para que no floten.



**Fig. III.4.2 Preparación para la perforación de barrenos en plinto**

### III.4.3 Perforaciones en Roca

El procedimiento de perforación elegido y de limpieza deberá asegurar la viabilidad del proceso de inyección futuro, en especial cuando se pueda incurrir en modificaciones de la permeabilidad de los puntos de inyección.



En el caso de inyección de un macizo rocoso se deberá tener en cuenta la disposición de los planos de estratificación, diaclasas y fracturas, debiéndose ajustar las perforaciones a la orientación y espaciamiento de las principales juntas abiertas.

Las perforaciones se realizarán de acuerdo con los ángulos, orientación y espaciamiento incluidos en el proyecto.

No se permitirán desviaciones, con relación al eje de la perforación prevista, superiores a un tres por ciento ( $> 3\%$ ) para profundidades de hasta veinte metros (20 m). En el caso de perforaciones más profundas la distancia entre perforaciones contiguas se deberá ajustar para tener en cuenta posibles desviaciones.

En el caso de que la inyección no se realice inmediatamente después de la perforación, se deberá proteger ésta para evitar su contaminación.

Las perforaciones, deben ejecutarse sin interrupción en toda su longitud, incluyendo la reperforación del tramo empleado en los casos en que previamente se hubiera inyectado el contacto concreto-roca, o detectado alguna falla de importancia y que se haya tenido que inyectar.

Si durante el proceso de perforación se presentan pérdidas de agua o se detecta alguna fractura o falla de importancia, se debe suspender temporalmente la perforación para proceder a sellar el barreno; éste se debe inyectar con el obturador colocado a 1.00 m por arriba del punto donde se presente la fuga de agua, hasta alcanzar la presión máxima especificada. Terminada la inyección, se debe remover el obturador y lavar todo el barreno (más adelante se explicará tal procedimiento), o reperforar el tramo para continuar la perforación del barreno hasta su profundidad total.



**Fig. III.4.3 Perforación de consolidación en galerías**

#### ***III.4.3.1 Perforaciones para la Consolidación e Impermeabilización***

Debe seleccionarse el diámetro óptimo del barreno de tal forma que se obtenga un eficiente proceso de inyección.

Los barrenos se deben perforar hasta su longitud de proyecto, respetando el proceso de perforación que se ejecutará por etapas y fases, según como se indica en el proyecto.

Las longitudes de cada barreno se indican en el proyecto, dichas longitudes pueden variar; para el caso de la pantalla profunda son de hasta 50 m de profundidad en forma sistemática, sin embargo, pueden ser de 80 m en aquellas zonas donde la exploración profunda lo indique; para el caso de las inyecciones de consolidación la longitud puede ser del orden de 20 m, esto según el análisis geológico del sitio en estudio, por lo que cabe aclarar que estas profundidades son las requeridas para el proyecto de El Cajón y estas profundidades varían según la geología del sitio como ya antes se explico.

#### ***III.4.3.2 Perforación para la consolidación***

Se realiza con equipos de rotopercusión con el martillo integrado en la parte superior y/o con martillo en el fondo del barreno.

La profundidad para los barrenos del tapete de consolidación es de 20 metros de profundidad en la roca y se realizan en las preparaciones dejadas durante el colado del plinto. El rumbo y la



inclinación de cada barreno pueden ser variables por cada reflexión del plinto y según la geología del sitio en estudio.

La perforación, se realiza en una sola operación desde que inicia hasta la profundidad que indique el proyecto.

El diámetro de la perforación, es de 2 ¼” en los casos que se use perforadora con martillo top hammer y en los casos de usar martillo de fondo, de 2 ½” a 3”, esto debido a que no se fabrican martillos de fondo de menor diámetro.

### ***III.4.3.3 Perforación para la impermeabilización***

Esta se realiza con equipo track drill o similar, con unidad de rotación y martillo de fondo, puede usarse también equipo de rotación.

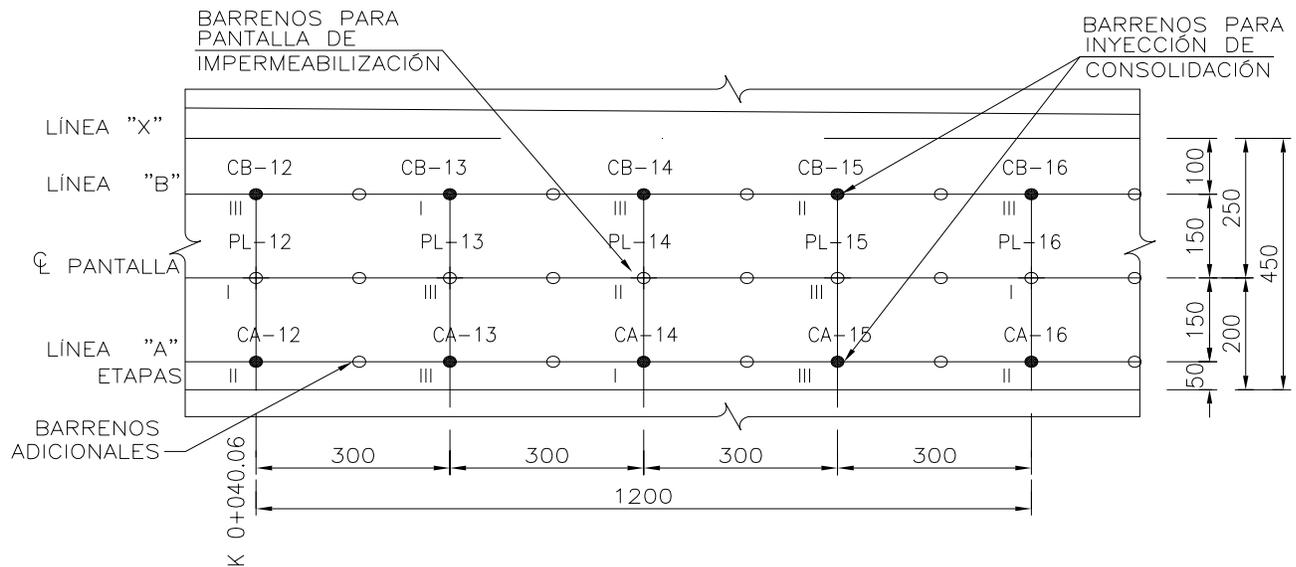
La profundidad de estos barrenos, es de 40 a 75 metros y ocasionalmente pueden ser de hasta 80 metros.

Estos barrenos están ubicados sobre una línea a todo lo largo del plinto y separados 3 metros uno de otro, para mayor facilidad, se identifican de la siguiente manera.

Barrenos de perforación	A cada 24 metros.
Barrenos de 1ª. Fase.	A cada 12 metros.
Barrenos de 2ª. Fase.	A cada 6 metros.
Barrenos de 3ª. Fase.	A cada 3 metros.

El diámetro de la perforación indicado es de 2 ¼”, pero debido a las limitaciones en la fabricación de la herramienta, la barrenación se hará de 2 ½” a 3”.

Otro factor importante en el caso del plinto, es que la línea CA no se podrá perforar si no se ha inyectado hasta la cuarta etapa de la línea CB, y de la misma manera no se perforarán los barrenos de pantalla si estas líneas no llegan a la quinta etapa si fuese el caso. A continuación se muestra un esquema de perforación en el plinto margen izquierda del P.H. El Cajón.



SEPARACIÓN ENTRE BARRENOS DE PANTALLA:

- I ETAPA @ 12.00 m
- II ETAPA @ 6.00 m
- III ETAPA @ 3.00 m
- IV ETAPA ADICIONAL @ 1.50 m INTERCALADOS ENTRE LAS ETAPAS I, II Y III ( O DONDE SE INDIQUE EN LOS PLANOS)
- BARRENOS DE EXPLORACIÓN DE I ETAPA @ 24.0 m LA LONGITUD SE INDICA EN LOS PLANOS

**Fig. III.4.2.3 Esquema de perforación en plinto margen izquierda**

### III.4.4 Lavado del Barreno

Esta actividad se debe realizar previa al equipamiento del barreno, para la inyección de la mezcla; consiste en la limpieza del barreno utilizando agua y aire a presión mediante la introducción de un chiflón o tubo cuyas boquillas o perforaciones estén orientadas en dirección perpendicular al eje del barreno, la presión debe ser tal que permita la salida del material producto de la perforación, de la inyección, de caídos de roca y de cualquier material que se encuentre rellenando las grietas hasta que el agua retorne limpia a la superficie y el barreno esté libre de obstrucciones en toda su longitud. Esta actividad es independiente del sopleteo o lavado que se haga durante el proceso de barrenación.

Para el caso de lavado de barrenos en las inyecciones de contacto concreto-placa, se refiere a la limpieza de la oquedad y no únicamente a la del barreno. Este procedimiento se debe ejecutar hasta haber perforado y equipado todos los barrenos correspondientes a la cavidad a empacar, y se da por terminada cuando salga agua limpia por todos los barrenos.

### III.4.5 Pruebas de Agua a Presión

Se debe realizar en los sitios seleccionados por la geología, ya sea para conocer la permeabilidad inicial de la masa de roca o bien para verificar la eficacia del tratamiento en la misma.



Fig. III.4.4 Instalación de bomba moino para prueba Lugeon y saturación del barreno

#### III.4.5.1 Prueba Lugeon

Los ensayos Lugeon son análogos a los Lefranc. Lo mismo que estos, se ejecutan según avanza la perforación, se hace en rocas de baja permeabilidad en pequeño volumen; pero más o menos fisuradas, es necesario ejercer presiones relativamente grandes para inyectar el agua en las fisuras. Así pues se calcula la permeabilidad en grande. Supongamos una perforación invadida hasta una cierta profundidad. A partir de ella se perforan unos 5 metros. A continuación se fija un obturador en la parte superior de este tramo virgen y se inyecta agua a presión con una bomba. Un manómetro colocado en la boca del barreno, un contador de agua y una válvula de descarga, permiten medir los caudales inyectados a una presión dada.

En general, se mide durante cinco o diez minutos el caudal inyectando a una presión constante. Después se trabaja con una presión mayor. La gama de presiones a emplear depende del estado de fisuración, pero al menos se emplean tres o cuatro valores que se volverán a utilizar cuando se haya alcanzado la presión máxima. Esta raramente es mayor a 10 kg/cm<sup>2</sup>, ya que existe un límite a causa de la presencia del obturador y de la potencia de las bombas. Por otra



parte, se corre el riesgo de producir una facturación artificial y trastornos del terreno que falsearían los resultados.

La comparación de los resultados obtenidos con presiones crecientes y decrecientes es muy instructiva en lo que concierne al comportamiento del terreno. A menudo se comprueba que, cuando las presiones disminuyen, los caudales son mas elevados que cuando aumentan a consecuencia del lavado de las fisuras.

Lugeon preconiza expresar los resultados evaluando la absorción con una presión de 410 kg/cm<sup>2</sup> en litros por minuto y por metro, con una duración del ensayo de 10 minutos. En su honor se suele denominar Lugeon a esta unidad.

Si se expresa en unidades más consistentes, es decir, calculando el coeficiente de permeabilidad equivalente, se comprueba que un Lugeon vale de 1 a  $2 \times 10^{-7}$  m/s.

Esta equivalencia solo tiene valor para un determinado grado de fisuración que justifique un cálculo de este tipo, si los caudales inyectados son pequeños. En efecto, Lugeon considera únicamente las presiones indicadas por el manómetro que se coloca en la superficie. Como las perforaciones y la tubería de conducción del agua son de pequeño diámetro, si los caudales inyectados son grandes y el tramo ensayado es un poco profundo, las pérdidas de carga en la tubería son del mismo orden de magnitud que las presiones medidas en el manómetro.

Para poder evaluar correctamente el coeficiente de permeabilidad de las formaciones que hay que determinar la presión de inyección que existe en el centro de la cavidad. Por consiguiente, hay que tener en cuenta la profundidad del nivel estático del manto acuífero y calcular la pérdida de carga debida a la línea de conducción.

Si no se toma esta precaución, las gráficas del ensayo, expresadas en lugeones brutos, representan casi exclusivamente la ley de variación de las pérdidas de carga en la tubería de conducción. No pueden suministrar ninguna indicación sobre el estado de fisuración de las rocas.

La prueba consiste en inyectar agua a presión en tramos de perforación, lo cual tiene por objeto tener una idea aproximada de la permeabilidad en grande, o sea debida a las fisuras de la roca o del material granular cementado estudiado. Se varía la longitud de los tramos probados, así

como la presión a la que se inyecta el agua, La llamada unidad Lugeon corresponde a una absorción de 1 litro de agua por minuto, por metro de sondeo, con una presión de inyección de 10 kg/cm<sup>2</sup>.

En la práctica, la prueba consiste en obtener, para distintos tramos, curvas de gastos de absorción en función de la presión de inyección.

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



**Fig. III.4.5 Bomba Moino**

### **III.4.5.1 Procedimiento**

#### **III.4.5.1.1.a Verificación del sello**

La colocación de los empaques en la perforación, con objeto de sellar el tramo por probar, puede resultar muy delicada. Para apreciar la calidad del sello, se inyecta agua y se observa si sube por la perforación, Si el agua sube, esto puede deberse a dos causas.

La perforación no es regular y el empaque no ajusta.

El terreno está muy fisurado y se establece un corto circuito alrededor del empaque.



En el primer caso es necesario desplazar el empaque algunos centímetros y en ocasiones algunos metros, hasta poderlo ajustar perfectamente o aumentar la longitud del empaque para lograr un mejor sello. En el segundo, resulta difícil la realización de la prueba, y se debe pensar en efectuar otro tipo de ensaye.

#### *III.4.5.1.1.b Realización de la prueba*

Verificando el sello, se anotan los datos correspondiente al tramo probado: profundidad del nivel freático (obtenida después de estabilizarse el nivel de agua en la perforación), profundidad y longitud del tramo probado, diámetro y longitud de la tubería de inyección.

Se aplica el primer incremento de presión de inyección, se observa el gasto correspondiente, y se espera de 5 a 10 min. A que se estabilice. Se anotan los valores del gasto y de la presión correspondiente en el registro de prueba.

Se repite el paso anterior hasta llegar a un presión máxima de 10 kg/cm<sup>2</sup>. y se procede, entonces, a aplicar decrementos de presión, anotando asimismo los valores de la presión y del gasto correspondiente. La secuencia de presiones aplicadas puede ser, por ejemplo, de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 6, 4, 2, 1,kg/cm<sup>2</sup>. Es conveniente trazar el diagrama gasto-presión conforme progresa la prueba para ir observando las particularidades de la curva obtenida. La presión considerada debe e ser la presión efectiva, P, en la zona de prueba, y obtenerse a partir de la presión leída en la superficie, P<sub>m</sub>, tomando en cuenta las pérdidas de carga en la tubería y en el obturador, P<sub>c</sub>, así como la profundidad del nivel freático con respecto al plano de lectura del manómetro, H<sub>m</sub>,

$$P = P_m - (H_m / 10) - P_c$$

Resulta delicado valorar P<sub>c</sub>, sobre todo en lo referente a pérdidas de carga en el obturador; las pérdidas de carga en tuberías pueden calcularse con nomogramas adecuados, tomando en cuenta la naturaleza del material que las constituye. Es deseable que se desarrolle un sistema de medición directa de la presión en la cámara que elimine las graves incertidumbres en cuanto a estas correcciones.

Se calcula el valor de la absorción, en unidades Lugeon, dividiendo el gasto correspondiente a una presión de 10 kg/cm<sup>2</sup>, expresado en lt/min, entre la longitud de la zona probada, expresada



en metros. Para dar una idea aproximada de lo que representa una unidad Lugeon, se puede establecer que, si se tuviera un medio poroso y homogéneo, en lugar de roca fisurada, sometido a una prueba de inyección, que diera una absorción igual a una unidad Lugeon, su permeabilidad sería:

$$k = 1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/seg}$$

#### *III.4.5.1.1.c Interpretación de la prueba*

El valor de la absorción en unidades Lugeon no es la única información que se puede obtener de esta prueba. La forma de las curvas gasto-presión es muy variable y depende esencialmente de las características de fisuración de la masa: distribución y espesor de las fisuras, tipo de relleno de estas, etc. Al aumentar la presión de inyección, se puede observar que la variación del gasto no es lineal, salvo en contados casos. El tapamiento y destapamiento de las grietas con materiales de relleno provocan, a diversas presiones, fenómenos de aumento o disminución de la permeabilidad. Esta variabilidad de la permeabilidad en grande de la masa debe tomarse en cuenta para valorar la permeabilidad de diseño de la misma.

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

#### **III.4.6 Saturación Previa**

La saturación se realiza en tramos de 20 m inyectando agua a una presión constante de 10 kg/cm<sup>2</sup> durante 30 min. ó un volumen máximo de 200 litros/m. la saturación se realiza sólo en tramos localizados por encima del nivel de aguas freáticas (NAF)

La saturación del terreno se debe realizar a través del barreno por inyectar, iniciando por el tramo más profundo en forma ascendente a partir del nivel de aguas freáticas (NAF). La longitud de los tramos está definida según sean barrenos para inyección de pantalla profunda o para consolidación.

La inyección de agua debe hacerse con el obturador puesto como límite superior de cada tramo por saturar. El agua empleada para la saturación del terreno debe ser limpia.



La condición para saturar el terreno se rige por la posición del nivel de aguas freáticas debiendo saturarse únicamente los tramos localizados por encima de este nivel, para lo cual se debe contar con equipo de detección del mencionado nivel (sonda eléctrica) y establecer dicho nivel para cada barreno antes de iniciar la saturación del terreno.

Inmediatamente después de saturado un tramo de barreno se debe proceder a inyectar el mismo con la mezcla.

### **III.4.7 Preparación de la Mezcla**

El proceso de la preparación de la mezcla de inyección debe llevarse a cabo en instalaciones apropiadas que cumplan con los requisitos indicados anteriormente para que la calidad de la mezcla se conserve desde la planta de preparación hasta la boca del barreno.

La fabricación de la mezcla debe efectuarse con turbomezcladores de altas revoluciones (mayores a 1250 r.p.m.) colocando los materiales componentes, con base en la dosificación de proyecto, en el orden siguiente: agua, estabilizador de volumen, cemento y por último el aditivo. Una vez que haya sido adicionado el último componente de la mezcla, ésta debe mantenerse en agitación dentro del turbomezclador de 1 a 3 minutos, dependiendo de los resultados de pruebas de la mezcla preliminares, después de esto se envía a los agitadores de bajas revoluciones (60 r.p.m. mínimo) de las estaciones de inyección, en las cuales debe mantenerse en agitación mientras dure el proceso de inyectado o durante la vida útil de la mezcla.

Las mezclas que permanezcan en los agitadores durante un tiempo superior a 60 minutos con temperatura ambiente menor a 35 °C deben desecharse, ó 45 minutos cuando la temperatura ambiente sea mayor, sin embargo, el tiempo de permanencia en los agitadores y la temperatura máxima permisible de las mezclas pueden ser modificados en el sitio de acuerdo a las disposiciones de laboratorio de mezclas de inyección, siempre y cuando cumpla con las propiedades especificadas, atendiendo las responsabilidades al permitirlo.

Condiciones para la correcta utilización de la lechada para inyección:

- Los componentes de la lechada deberán almacenarse de tal manera que sus propiedades no se vean alteradas por los efectos de la climatología, en especial de la temperatura y de la humedad.



- Se deberá impedir la contaminación de la lechada y de sus componentes durante el almacenaje, manipulación y entrega.
- La dosificación de los componentes de la lechada se deberá efectuar con dispositivos homologados, con tolerancias que no sobrepasen, en ningún caso, el cinco por ciento (5%), debiendo respetarse, para valores inferiores, el nivel de tolerancia estipulado por los fabricantes.
- Se deberán utilizar procesos de batido y/o mezclado automáticos.
- Los equipos de mezclado deberán seleccionarse para garantizar la homogeneidad de la muestra.
- Las bombas y los equipos de inyección se deberán seleccionar de acuerdo con la técnica de inyección elegida.
- La presión de inyección se medirá lo más cerca posible del punto de tratamiento.
- Los sistemas de inyección deberán eliminar aumentos bruscos de presión con el objetivo de impedir la iniciación no intencionada y no detectada de fracturas hidráulicas.
- Las tuberías de suministro de lechada deberán ser capaces de soportar la presión máxima de bombeo con un margen suficiente de seguridad. Su diámetro deberá permitir caudales suficientemente elevados para impedir la separación de los componentes de la lechada mezclada (suspensiones).
- Las tuberías de distribución para el suministro de lechadas de resina deberán ser resistentes y se limpiarán inmediatamente después de realizar la inyección.
- Las suspensiones deberán agitarse hasta el momento en que se inyecte la lechada, para impedir su sedimentación.
- Los sistemas de inyección deberán eliminar aumentos bruscos de presión con el objetivo de impedir la iniciación no intencionada y no detectada de fracturas hidráulicas.
- Las tuberías de suministro de lechada deberán ser capaces de soportar la presión máxima de bombeo con un margen suficiente de seguridad. Su diámetro deberá permitir caudales suficientemente elevados para impedir la separación de los componentes de la lechada mezclada (suspensiones).
- Las tuberías de distribución para el suministro de lechadas de resina deberán ser resistentes y se limpiarán inmediatamente después de realizar la inyección.
- Las suspensiones deberán agitarse hasta el momento en que se inyecte la lechada, para impedir su sedimentación.

- Si se utilizan tubos manguito, el interior del tubo de inyección se deberá lavar al final de cada fase de inyección.

Para el caso de este proyecto en especial del P.H. El Cajón, la lechada para inyección es una mezcla única para todas las actividades de impermeabilización y consolidación de la roca (ver capítulo IV); la relación de agua/cemento (A/C) será variable de (0,65 a 0,9)/1, dependiendo de los ensayos de laboratorio, adicionando el porcentaje de aditivo superfluidizante y estabilizador de volumen, con relación al peso del cemento, necesarios para la que mezcla cumpla con las siguientes propiedades:

- Viscosidad al cono Marsh. Entre 29 y 31 segundos, constante durante una hora.
- Decantación (sedimentación). Menor o igual a 3% en dos horas.
- Cohesión con placa. Menor o igual a 0,03 g/cm<sup>2</sup>.
- Coeficiente de filtración. Menor o igual a 0,06
- Espesor de la Costra Cake obtenido de la prueba de filtrado. Menor o igual a 15 mm.
- Resistencia a la compresión simple a la edad de 28 días. Mayor o igual a 10 MPa.

Finalmente, se debe adicionar a la mezcla un acelerante de fraguado (silicato de sodio a 40° Be) cuando así se requiera, es decir cuando se requiera un fraguado rápido de la mezcla en el caso de que el barreno acepte demasiada mezcla y este llegando a los límites permisibles de cierre de inyección.

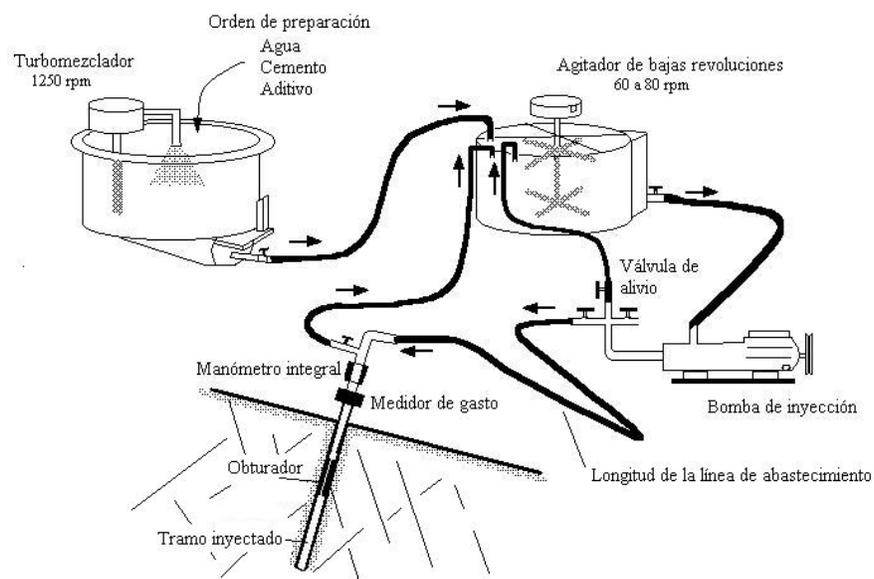


Fig. III.4.7 Esquema de inyección



### III.4.8 Colocación y Secuencias de la Inyección

El desarrollo de una obra de inyección es un proceso interactivo y continuo, que exige una supervisión "in situ".

- El proceso de inyección se rige por:
- El volumen de lechada por fase.
- El caudal.
- La presión de inyección.
- La viscosidad de la lechada.

La elección del método de colocación de la lechada dependerá de las características del terreno, de los objetivos a conseguir con el trabajo y del tipo de lechada a emplear.

Los huecos y cavidades grandes suelen rellenarse por gravedad, directamente o bien, mediante un tubo tremie que alcance la base del hueco o de la cavidad.

La inyección por fases descendentes es el método clásico de inyección de rocas, en especial si se trata de macizos rocosos inestables.

La inyección por fases ascendentes se aplica en macizo rocoso estable, así como en terrenos inestables si el objetivo es una inyección de compactación.

La inyección por fases repetitivas mediante tubos manguito tiene su campo de aplicación principal en suelos y en terrenos rocosos inestables. Esta técnica permite inyectar, en diferentes fases, sin reperforación, un mismo punto de tratamiento.

Los obturadores podrán ser pasivos, mecánicos o hidráulicos y deberán tener una longitud suficiente para minimizar el riesgo de fuga de lechada de la zona tratada, debiendo garantizar, asimismo, la estanqueidad entre la pared y el tubo de inyección cuando la presión alcance su valor máximo.

La longitud máxima de tramo de tratamiento, en macizos rocosos, no deberá sobrepasar el intervalo de cinco (5) a diez (10) metros, debiendo, en caso de estar la roca alterada o fisurada, ajustarse dicho intervalo.



En suelos, la longitud máxima de tramo de tratamiento no deberá ser mayor de un (1) metro de longitud.

### III.5 Inyecciones en Roca

El análisis y evaluación de la exploración geotécnica realizada por la Comisión en el plano de estanqueidad cercana a la trayectoria del plinto, que comprende un desarrollo del orden de 880 m con quince (15) cambios de dirección tomando como base una cortina con una inclinación de 1.4 : 1 en el paramento de aguas arriba, indica la presencia de sistemas de fracturamiento, fallas, diques y contactos geológicos en la masa de roca.

La verificación de la calidad y permeabilidad de la roca la debe llevar a cabo el responsable mediante barrenos de exploración adicionales a los ya realizados, los cuales se deben ejecutar en la etapa de construcción inmediatamente después de la cimentación del plinto y previo a los tratamientos de inyecciones a realizarse desde éste y de las galerías.

Los barrenos de exploración y de investigación de la permeabilidad se deben localizar a cada 24 m de separación horizontal entre barreno y barreno, prolongándose hasta 70 m de longitud en la parte media a baja y hasta 60 m de longitud en la parte media a superior, a partir de la rasante y siguiendo el desarrollo del plinto. Los barrenos de exploración hacia el interior de las laderas se deben ejecutar desde la superficie y desde las galerías de inyección y drenaje. Todos estos barrenos formarán parte de los requeridos para el inyectado de la pantalla impermeable. Para el caso de galerías y superficie, la longitud se regirá por la galería inmediata inferior y la exploración se debe llevar a cabo por debajo de la elevación 395 que corresponde al nivel más alto del plano de estanqueidad.

En cada barreno de exploración y verificación se deben de realizar ensayos de permeabilidad Lugeon en tramos de 5 m en progresión descendente.

Después de concluidas las pruebas de permeabilidad Lugeon, se debe iniciar el tratamiento de la roca mediante la inyección del barreno en tramos de 5 m en progresión ascendente, empleando el método GIN (Grouting Intensity Number) aplicable para pantalla impermeable, con una intensidad de inyección moderada y presiones máximas de 3,0, 2,5 y 2,0 MPa para las zonas baja, media y alta, respectivamente, definidas de acuerdo a la Tabla III.4.8.a

Tabla III.4.8.a Zonas y presiones de inyección aplicables para pantalla impermeable y tapete de consolidación

ZONA	LOCALIZACIÓN	GIN MPa. L/m	PRESIÓN MÁX. MPa	VOLUMEN MÁXIMO L/m
Alta	Elevación 330 a 390	1500	2,0	200
Media	Elevación 275 a 330	1500	2,5	200
Baja	Elevación 180 a 275	1500	3,0	200

El plano de estanqueidad en el plinto y galerías de inyección se debe prolongar si el resultado de la prueba de permeabilidad y el consumo de la mezcla de cemento que se presente en cada tramo probado e inyectado son superiores a los que se indican en la Tabla III.4.8.b

Tabla III.4.8.b Valores de Permeabilidad y consumos de mezcla de cemento que requerirán prolongar tratamientos

Elevación		Plinto y galerías	* UL	Consumo de mezcla Kg/m
De	A			
50	50	P7 a P11 GI-3 y GD-3	5	30
50	90	P1 a P7 P11 a P15 GI-1 y GI-2, GD-1 y GD-2	5	50

\* Permeabilidad Lugeon

Se debe prolongar la pantalla hasta 5 m por debajo del tramo que tuvo el consumo y permeabilidad mayor a los límites establecidos en las dos primeras columnas.

La exploración y verificación se efectuará a cada 24 m de longitud horizontal entre barreno y barreno.



Se deberán actualizar los planos de avance y de consumo de mezcla durante todo el proceso de inyección.

### III.5.1 Inyecciones en la Roca para Consolidación

En general las inyecciones deben ejecutarse por progresiones ascendentes en subtramos cuya longitud se indica en el proyecto; nunca mayores de 5 m, salvo en los casos en que las condiciones de la roca obliguen a ejecutarlas en otra forma, tal es el caso de presencia de fallas o fracturas francamente abiertas, en este caso se deberá tratar como ya se mencionó anteriormente. Una vez iniciada la inyección no debe detenerse por ninguna causa, siendo un proceso continuo de principio a fin, pero si esto llega a ocurrir se debe proceder de la manera siguiente: limpiar con agua a presión utilizando el procedimiento de “lavado del barreno”.

Para las tuberías a presión se debe seguir el siguiente procedimiento:

La perforación y tratamiento de consolidación deberán de iniciarse después de 14 días de edad mínima del concreto de empaque.

Los barrenos serán de 2 ¼”, de 10 m de longitud, distribuidos en secciones de 8 barrenos, a cada 3 m entre sección y sección.

El tramo de contacto concreto-roca incluye una perforación en concreto y 0,20 m en roca y se ejecutará después de la consolidación.

La consolidación se inyectará en 2 progresiones, obturando a 5,0 m de profundidad y a 0,20 m después del contacto concreto-roca.

El avance de la inyección será de los barrenos inferiores a los superiores, manteniendo abiertos sólo los barrenos alternados en los dos sentidos (primera etapa). Los barrenos inmediatos se ejecutarán en una segunda etapa.

En lugares de mayor consumo podrán inyectarse barrenos adicionales a juicio del Residente de Inyecciones.

La presión de inyección de la mezcla será de 5,0 Kg/cm<sup>2</sup>, hasta el imite permisible por zona de ejecución.

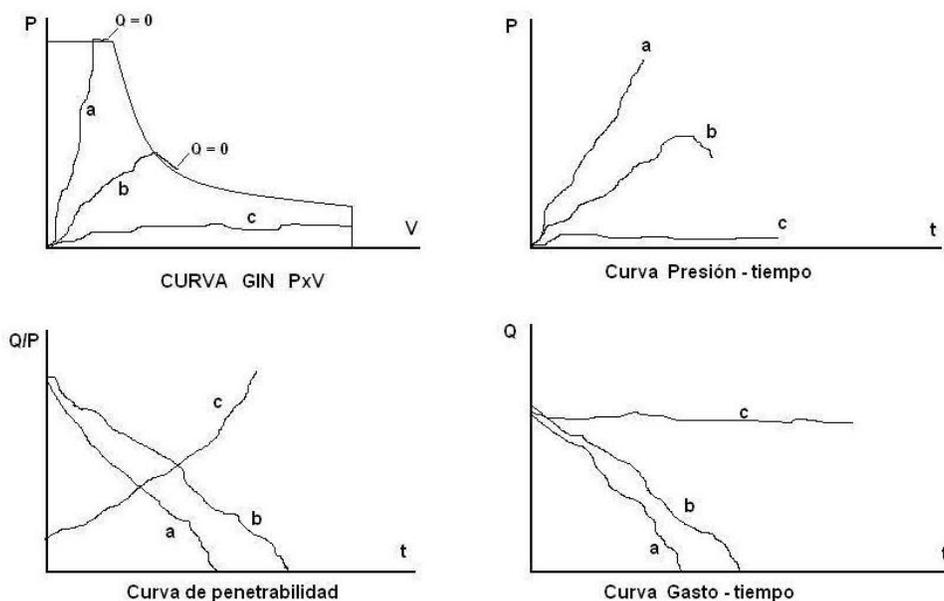
### III.5.2 Inyecciones en la Roca para Pantallas de Impermeabilización

Se deberá proceder como se ha indicado en las inyecciones de consolidación, salvo con algunas restricciones que a continuación se especifica.

Desde el inicio hasta el final de la inyección, se debe llevar un registro continuo de la evolución en cada tramo de los siguientes parámetros: presión de inyección medida en el brocal del barreno en MPa, volumen total inyectado de lechada (consumo) en litros y el tiempo en minutos. Con estos parámetros deben elaborarse las siguientes 3 gráficas de control de inyección (Fig. III.5.2.a):

- a) Presión MPa vs. Volumen (L/m)
- b) Presión MPa vs. Tiempo (min)
- c) Gasto L/min vs. Tiempo (min)

Las gráficas b) y c) deben construirse de tal forma que puedan superponerse; de esta manera podrá visualizarse simultáneamente la evolución de la presión y del gasto respecto al tiempo.



**Fig. III.5.2.a Gráficas de control de inyección**

La gráfica para el control de la inyección debe contener la curva PRESION x VOLUMEN = CONSTANTE cuyo valor fue definido previamente por el proyectista. En el PH El cajón, se utilizó GIN=1500

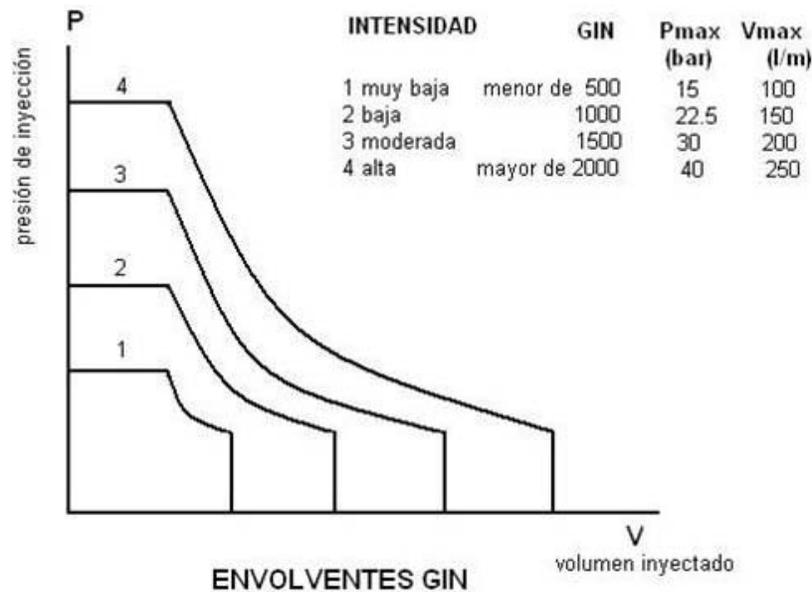


Fig. III.5.2.b Grafica del valor GIN

Todas las gráficas deben estar identificadas claramente y conservarse en la memoria de tratamientos.

La presión de inyección medida en el brocal del barreno debe aplicarse en incrementos de 0,5 MPa cada 3 a 5 minutos hasta alcanzar la presión máxima. Si durante estos incrementos se presenta un aumento notable en el consumo de mezcla, que indique el hidrofracturamiento de la roca, se debe disminuir gradualmente la presión hasta sellar el tramo, esto es cuando el gasto de mezcla sea prácticamente nulo.

El volumen y la presión máxima dependen, en cada caso, del comportamiento del terreno cuyo valor se determina mediante las pruebas de inyectabilidad.

El comportamiento de la inyección debe seguirse a través de la gráfica  $PV = Cte.$  medido en MPa/L/m, de acuerdo con el método de inyección GIN, utilizando un equipo automático de registro de presión y gasto, y de preferencia elaborar las gráficas mediante equipo de cómputo (Fig. III.5.2.d)

Para casos excepcionales, de cavidades muy grandes con o sin agua en circulación, es necesario usar mezclas de fraguado rápido, compuestas principalmente de agua, cemento, aditivos fluidizantes y silicato de sodio, las cuales deben ser diseñadas y aplicadas por el encargado de la inyección.



Fig. III.5.2.c CPU LOGAC para medir el flujo de inyección de lechada

### III.6 Actividades de Control durante los Tratamientos de Inyección

Se debe mantener una estrecha vigilancia de los procesos de producción y/o construcción establecidos por el diseño, verificando la orientación e inclinación de los barrenos tal como lo indique el proyecto y supervisando los consumos, gastos, presión, tiempo de aplicación de las mezclas que toma el terreno, y el apego al método GIN; asegurando un adecuado retaque final de barrenos.

Se debe establecer un muestreo aleatorio y selectivo de los componentes empleados en los procesos de producción y/o construcción con pruebas de laboratorio, bajo el siguiente esquema:

Obtener muestras de lechada por cada 5 barrenos inyectados, a las cuales se les debe practicar pruebas índice y de resistencia mecánica, cuyos resultados deberán cumplir con los requerimientos del proyecto.

### III.7 Verificación Después de Terminar los Tratamientos de Inyección

Al término de los trabajos de inyección y del contacto concreto-roca, que incluye invariablemente a todos los barrenos de las distintas etapas inclusive la adicional de inyección debido a consumos excesivos, se deben verificar y liberar tramos inyectados juzgando los consumos de mezcla de cemento y mediante pruebas de permeabilidad donde se requiera.



La revisión y liberación se debe realizar por tramos que abarquen por lo menos 4 (cuatro) barrenos de I etapa con sus respectivas etapas intermedias y adicionales. (Se estiman del orden de 36 m).

En los sitios o tramos donde se presenten dudas por consumos decrecientes de mezclas, taponamientos repentinos o la presencia de zonas de alta permeabilidad, será necesario un reforzamiento del tratamiento de inyecciones con mayor cantidad de barrenos inyectados, orientados o con dirección a zonas de altos consumos de mezcla, buscando siempre la optimización de la barrenación hacia los sistemas de discontinuidades.

Los barrenos de exploración para verificar el tratamiento de la roca se realizarán después de concluidas las operaciones de inyectado, y tendrán un espaciamiento no mayor a 48 m en longitud horizontal. Con los resultados que se obtengan, se evaluará y asegurará el tratamiento de la roca verificando la efectividad del plano de estanqueidad.

Para que un tramo inyectado se considere aceptable, se deben obtener como máximo los resultados de permeabilidad y consumos de agua y de mezcla que se indican en la Tabla III.7

*Tabla III.7 Permeabilidad y consumo máximos de mezcla para aceptación de tramos tratados de roca.*

Elevación		Plinto y Galerías	UL	Consumo de Mezcla kg/m
De	A			
150	270	P7 a P11 GI-3 y GD-3	5	30
270	390	P1 a P7 P11 a P15 GI-1 y GI-2; GD-1 y GD-2	5	50

### III.7.1 Inyecciones de Contacto

Estas inyecciones se deben ejecutar para asegurar el contacto del concreto a la roca y con ello garantizar un apoyo uniforme y/o rellenar vías permeables. Estas inyecciones se realizan



equipando los tubos guía, dejados previamente a los colocados como se especifica en el inciso III.4.2, e introducir el volumen necesario de lechadas y de morteros hasta lograr el llenado completo de la oquedad, vigilando que la presión máxima de inyección no sobrepase la presión que se especifica, para cada caso, según el proyecto. Tanto para este caso como para los muros pantalla con mezcla autofraguante, esta actividad debe realizarse en forma sistemática.

El procedimiento para la ejecución de estas inyecciones es el siguiente:

- La inyección de contacto concreto-roca debe ejecutarse posterior a la consolidación.
- Los barrenos serán de 2 ¼", penetrando 0,20 m después del contacto concreto-roca.
- El contacto concreto-roca se inyectará en una sola progresión, obturando 0,20 m antes del contacto concreto-roca.
- El avance de la inyección será de los barrenos inferiores a los superiores, manteniendo abiertos los barrenos y emboquillados con válvula o manguera flexible, los de la sección y secciones anterior y posterior.
- El tratamiento de contacto concreto-roca se debe ejecutar en todo el desarrollo blindado de las tuberías a presión.
- La presión de inyección de la mezcla debe ser de 3,0 Kg/cm<sup>2</sup>.
- Después de realizar la inyección de contacto concreto-roca, se debe retacar con mortero seco la longitud del barreno, dejando espacio para colocar y soldar el tapón metálico.

### III.7.2 Retaque Final de Barrenos

Después de 24 horas de haberse terminado la inyección de un barreno, se debe proceder a sopletear el tramo por retacar con aire a presión; posteriormente, se debe rellenar con mortero de cemento, finalmente lo que llegara a decantarse en barrenos hacia abajo o los barrenos hacia arriba en donde es difícil el retaque, se debe rellenar con un mortero de cemento seco, utilizando la misma relación cemento/arena, pero agregando el agua hasta hacerlo trabajable de manera que pueda introducirse con un faenero sin que llegue a escurrirse.

En el caso del P.H. El Cajón, la resistencia a la compresión simple a 28 días deberá ser  $f'c = 17.66$  MPa (180 kg/m<sup>2</sup>) mínimo.



A reserva de que el Contratista proporcione la dosificación final, de acuerdo a los materiales del sitio para cumplir con las propiedades especificadas del mortero a utilizar, se propone la siguiente:

- Agua 27 L
- Cemento 50 kg
- Arena 26 kg

### **III.8 Problemas que se presentan durante el proceso de Inyección**

#### **III.8.1 Inyección de Barrenos Comunicados**

Si durante el proceso de inyectado de un barreno éste se comunica con uno o varios, se debe proceder a equipar, con obturador o manómetro, él o los barrenos comunicados y continuar la inyección por el barreno de origen hasta llegar a la presión máxima. Durante el período que dure la comunicación entre los barrenos, debe llevarse un control del comportamiento de cada uno de los barrenos comunicados y verificar que cuando el barreno de origen haya alcanzado la presión máxima, los barrenos comunicados también la hayan alcanzado, de no ser así se debe proceder a inyectar cada uno de ellos hasta alcanzarla y sólo entonces dar por sellado y terminada la inyección del barreno comunicado.

Debe preverse el equipamiento de todos los barrenos que presumiblemente vayan a comunicarse para evitar que al suspender la inyección la mezcla fragüe y se pierda el barreno de origen y/o alguno de los comunicados.

Un barreno comunicado que no llegue a la presión máxima se da como no inyectado y debe sustituirse con los mismos datos de proyecto, cambiando únicamente el punto de aplicación con un radio mayor de 50 cm del origen.

#### **III.8.2 Calafateo de Grietas**

El calafateo es un taponamiento superficial y provisional que consiste en la limpieza de la grieta con herramientas manuales y/o mecánicas, en retirar todo el material suelto con agua y aire a presión y en taponar con cuñas de madera y con morteros de yeso y de cemento toda la grieta

hasta una profundidad que depende del tipo de la grieta, del tipo de terreno y de la presión a que está sujeto dicho tapón.



**Fig. III.8.2 Calafateo en grieta**

### **III.8.3 Lavado de Mezclas en el Barreno**

Esta operación se ejecuta cuando por alguna causa se interrumpa la inyección de una perforación.

Consiste en la limpieza del barreno en el tramo que se estaba inyectando. La limpieza se debe ejecutar previamente al fraguado de la mezcla de cemento, utilizando un chiflón que lance agua a una presión suficiente para disolver la mezcla y extraer la mezcla disuelta a la superficie, tal como se especifica en el inciso III.4.4

### **III.8.4 Taponamiento de tubería y bombas de inyección**

Si la mezcla se mantiene por un tiempo prolongado en la tubería o en las bombas durante el procedimiento de inyección, esta tenderá a fraguar dentro de las bombas y las tuberías, lo que provocaría el taponamiento del equipo, por lo que se tendría que suspender la inyección hasta habilitar el equipo taponado por la mezcla, o en el peor de los casos sustituir bombas y mangueras para la correcta ejecución de la inyección.

De acuerdo a lo anterior, la mezcla deberá ser monitoreada constantemente con pruebas de laboratorio en campo, la viscosidad se revisará 45 minutos después de su fabricación y

posteriormente cada 5 minutos hasta que la mezcla haya sobrepasado los parámetros permisibles (Ver pruebas de control de calidad) y en el momento que haya pasado los límites, se tendrá que desechar la mezcla, lavar el equipo y volver a fabricar nueva mezcla de inyección, para evitar el fraguado en el equipo de trabajo.



Fig. III.8.4.a Taponamiento la fontanería



Fig. III.8.4.b Taponamiento del cabezal de descarga

### III.9 Suministro de Mezclas de Inyección

El suministro de mezclas de inyección consiste en la adquisición, transporte, montaje y puesta en servicio de todo el equipo para instalar las plantas de preparación y de inyección, así como de su completa operación para cumplir con los requisitos especificados, referente a las conducciones desde las plantas hasta la boca del barreno, incluyendo las instalaciones auxiliares como tanques de almacenamiento, cárcamos para lodos, bombeo y conducciones internas necesarios para cubrir la demanda de las mezclas y cumplir con el programa.

La localización de las plantas de preparación con respecto a las estaciones de inyección ubicadas en los frentes de trabajo merece una atención especial en estos trabajos, ya que de esto depende del volumen de desperdicio de la mezcla utilizada para llenar las conducciones.

La calidad de la mezcla debe ser uniforme y conservarse durante todo el proceso, desde la planta de preparación, a través de las conducciones hasta su inyección en el barreno; consecuentemente las conducciones a través de las cuales se envía la mezcla al sitio deben protegerse y tener un desarrollo óptimo tanto de longitud como de cambios de dirección.



Verificar durante la fabricación y el transporte hasta su inyección en el barreno, el comportamiento de la mezcla, certificando que la dosificación, la viscosidad, la sedimentación, el tiempo de fraguado, la fluidez, la densidad, y la rigidez cumplen con la calidad especificada. Debe incluir el muestreo y sus ensayos mediante pruebas de laboratorio como parte del aseguramiento de la calidad de la mezcla.

### **III.10 Telecomunicaciones en los Frentes de Trabajo**

Debe preverse la instalación de un sistema adecuado de intercomunicación, ya sea por radio o por teléfono entre las estaciones de preparación y de inyección de mezclas, el laboratorio de control de calidad, los frentes de inyección y el módulo de procesamiento de información computarizada.

### **III.11 Limpieza en el Sitio de Trabajo**

Durante la ejecución de todas y cada una de las actividades correspondientes a los tratamientos de la roca, tomar las precauciones necesarias para impedir que los desechos propios de la construcción causen interferencias, entorpezcan otras actividades, disminuyan la calidad de los trabajos o dañen estructuras permanentes.

Igualmente se mantendrá en todo momento el frente de trabajo libre de desechos; también, que todo desperdicio sea cargado, transportado y depositado en los bancos de almacenamiento determinados o aceptados por la CFE. Después de la determinación de todos los trabajos, debe efectuarse una limpieza general de los desperdicios de materiales y de las mezclas fraguadas.



# ***CAPITULO IV***

## ***CONTROL DE CALIDAD***



## IV.1 Importancia del control de calidad

Un conjunto de especificaciones, no es más que el resultado del trabajo en equipo de unos cuantos hombres señalados por sus conocimientos y experiencia. Es lógico pensar que este grupo humano realice un excelente trabajo, produciendo normas razonables y ajustadas a la impresión del momento.

Pero sin duda esta en la mente de cada uno de ellos la idea de que su recomendación final ha de aplicarse a una obra cuyas características y circunstancias reales son desconocidas por el grupo. Esta idea ha de forzarlo a ser prudente, por lo que no es raro que la obediencia ciega de normas técnicas preestablecidas a nivel internacional o nacional conduzca a trabajos conservadores y no óptimos, desde el punto de vista economía.

El ingeniero que juzga pecaminoso apartarse una mínima parte de las normas y especificaciones de su institución, esta reconociendo implícitamente que un grupo de hombres distinguidos, reunidos años atrás, es capaz de dar criterios de mayor validez a su propia obra, a la que se enfrenta hoy, y de lo que es capaz de hacer el actual grupo de trabajo con quien comparte responsabilidades.

Es claro que cualquier institución puede manejar las aparentes contradicciones anteriores de un modo lógico. Las especificaciones institucionales deben manejarse, en primer lugar, como el marco legal de la actividad técnica y en segundo, como la referencia última de la propia actividad técnica, válida en tanto no se le señalen limitaciones, variaciones o ajustes de detalle.

Para todo esto último, cada proyecto importante deberá contener sus propias especificaciones complementarias, nacidas de sus propias características específicas; no debe tener miedo en producir unas especificaciones complementarias audaces, novedosas y ajustadas a los últimos datos de la experiencia y el conocimiento de la institución de que se trate.

Un conjunto de especificaciones técnicas, rector último de cualquier programa de control de calidad, debe ser competente, en el sentido de garantizar las normas esenciales de la calidad de la obra; debe ser también ajustado a las necesidades sociales y económicas de la nación que lo utiliza y también a sus características topográficas, climáticas, de tránsito, etc.



En este sentido, la transcripción ciega de normas producidas por instituciones de otros países, por avanzadas que parezcan en el campo estrictamente tecnológico, suele conducir sistemáticamente a políticas inadecuadas. Las especificaciones deben ser muy realistas, ajustadas a lo que debe lograrse dadas las características de un proyecto determinado y a lo que puede lograrse, dado el nivel tecnológico (personal obrero especializado, laboratorios de obra, equipo de construcción, etc.) del país que vaya a usarlas.

También deben ser capaces de garantizar que los materiales de calidad aceptable no sean rechazados. Este es uno de los aspectos importantes que hacen que al seguir en muchos países las normas producidas por otros, conduzca a errores de política.

Es común, que las naciones cuyas especificaciones institucionales se transcriben en países en desarrollo, sean no sólo avanzadas en el terreno técnico, sino también en el económico; como consecuencia, sus caminos, ferrocarriles y aeropuertos, trabajan con volúmenes excepcionales o desconocidos en el país que adopta las normas.

Esto conduce a que se rechacen muchas técnicas, procedimientos y materiales de uso económico, que sus vías con niveles de tránsito muy inferiores, podrían utilizar perfectamente. Lo que en realidad va a suceder, es que el país menos desarrollado económicamente va a descubrir, lo inapropiado para su propio consumo de las normas que esta siguiendo, lo cual conducirá a violarlas sistemáticamente, generándose la consiguiente confusión. En consecuencia, éste será el precio que se pague por el uso de especificaciones no realistas.

Otra condición básica de un conjunto de especificaciones, es contener tolerancias apropiadas, que dependen de un conocimiento completo de los factores que contribuyen a las variaciones de los diferentes conceptos. Debe existir una valuación de las consecuencias de no exceder tales tolerancias. Puede ayudar el establecer una clasificación de los criterios que pueden resultar de las desviaciones y defectos que puedan presentarse, una clasificación de tales conceptos podría ser, por ejemplo, la que se menciona a continuación:

**Crítico.**- El defecto que puede hacer al concepto muy peligroso, de no corregirse.

**Importante.**- El defecto que puede afectar al comportamiento en forma seria.

**Poco importante.**- El defecto que puede afectar al comportamiento en forma poco seria.



De contrato.- La transgresión del contrato que no tendrá consecuencias de importancia.

En el caso de productos que son mezcla de otros, las especificaciones deben permitir reconocer con facilidad cual es el componente responsable de las principales características que puede exhibir la muestra,

Otro aspecto importante en todo programa de control de calidad lo constituye el conjunto de pruebas de laboratorio, que proporciona lo que pudiera considerarse la base metodológica y técnica del programa. Las pruebas de laboratorio con fines de control deben cumplir algunas características, fáciles de comprender:

- Estar dirigidas a la comprobación de las características esenciales.
- Ser sencillas y rigurosamente estandarizadas.
- Ser rápidas en su realización.
- Ser de fácil interpretación.
- Requerir equipos económicos, fáciles de corregir y calibrar y de manejo simple.

Sólo así se podrán tener resultados confiables en los laboratorios de pie de obra, que son los que han de realizar el control, sin interferir o frenar los programas de construcción.

## IV.2 Requisitos Previos de los Equipos de Laboratorio

Es requisito indispensable que el laboratorio de campo trabaje bajo los lineamientos de la Entidad de Mexicana de Acreditación (E.M.A.). Por lo cual los equipos e instrumentos de laboratorio que se utilizan para ensaye y medición deben estar debidamente calibrados por un laboratorio de metrología que cuenten con equipos con trazabilidad a patrones reconocidos

La calibración de los equipos en el laboratorio de obra, se logra mediante la acción del conjunto de operaciones que bajo condiciones específicas, establecen la relación entre los valores indicados por un instrumento o sistema de medición y los valores correspondientes de un patrón de referencia.

La calibración de cada equipo que así lo requiera debe estar manifiesta mediante la evidencia documental. Así también, se tiene en el laboratorio de obra una bitácora de equipos e instrumentos de laboratorio. La bitácora contendrá: nombre del equipo, fecha de adquisición,



identificación, proveedor o fabricante, capacidad, estado físico y fechas de calibración y/o verificación entre otros.

## **IV.3 Mezclas de inyección fabricadas con cemento**

### **IV.3.1 Mezclas**

#### **IV.3.1.1 Mezclas estables**

Son aquellas en que los granos de cemento se mantiene en suspensión por un periodo de tiempo prolongado. Se mide la estabilidad por la cantidad de agua libre que se acumula en la superficie de la mezcla para un determinado tiempo. Cuando el porcentaje de agua libre es igual o menor que 3 % en dos horas, se dice que la mezcla es estable.

- Propiedades más importantes:
- Decantación (Estabilidad)
- Viscosidad al cono Marsh (fluidez)
- Cohesión con placa (penetrabilidad)
- Resistencia a la compresión uniaxial (deslave).

#### **IV.3.1.1 Mezclas inestables**

Son aquellas en que los granos de cemento no se mantiene en suspensión por un periodo de tiempo prolongado. Su estabilidad se mide por la cantidad de agua libre que se acumula en la superficie de la mezcla para un determinado tiempo. Cuando el porcentaje de agua libre es mayor que 3 % en dos horas, se dice que la mezcla es inestable.

### **IV.3.2 Lechada**

Se denomina lechada a un material bombeable que se inyecta en el terreno modificando las características físicas del medio. Las lechadas se clasifican como:



### **IV.3.3 Suspensiones**

Son las lechadas que contienen agua y productos sólidos no disueltos, pudiendo incluir también aditivos. Durante el flujo presentan el comportamiento de un fluido de Bingham.

En las suspensiones se debe tener en cuenta la tendencia que presentan los sólidos en suspensión a sedimentar (por efecto de la acción de la gravedad), y a perder agua bajo presión, lo que deberá ser considerado con relación a la naturaleza y propiedades de los materiales existentes.

A estos efectos se considerará que una suspensión es estable si cuando se coloca un litro en un cilindro graduado, al cabo de cuatro horas (4 h), el volumen superior de agua clara que sobrenada es inferior al cuatro por ciento (4%) del volumen total.

### **IV.3.4 Disoluciones**

Las disoluciones que se emplean como lechadas se caracterizan por la ausencia de partículas sólidas, al disolverse los componentes químicos en el agua.

Se caracterizan por presentar un comportamiento de fluido Newtoniano.

## **IV.4 Equipo e Instrumentos de Medición**

El equipo utilizado en el laboratorio para las pruebas de calidad de la lechada, se deberán calibrar constantemente, con una verificación periódica que podrá detectar algún error en las mediciones para que de esta manera se pueda reparar o reemplazar el equipo o instrumento que se encuentre alterado, esto con el fin de mantener la calidad de las pruebas de laboratorio para que sean resultados fieles de la mezcla de inyección.

Se puede decir que hay de dos tipos de equipo, los que son operados en forma manual, o instalados en algún equipo, los cuales deben cumplir con las mismas calidades y normas aplicables a estos.

A continuación se muestra una lista de equipos e instrumentos de medición, empleados para el control de calidad de lechada.



- Mezclador del tipo multimixer con una sola propela en la parte inferior.
- Báscula eléctrica de 0.01g de aproximación.
- Cronómetro.
- Moldes de acero con altura y diámetro que cumplan con la relación 2:1.
- Probeta de 1000 ml graduada.
- Probeta de 250 ml graduada.
- Probeta de 100 ml graduada.
- Probeta de 50 ml graduada.
- Espátula de cuchillo.
- Balanza baroid o equivalente.
- Cono y vaso Marsh.
- Filtro prensa baroid o equivalente.
- Equipo para aplicar presión (nitrógeno o compresor de aire).
- Termómetro graduado.
- Vasos de precipitados.
- Placa de 100 x 100 x 1.5 mm de acero inoxidable.
- Pipeta graduada.
- Retorta (equipo).
- Succionador - gotero de plástico.
- Papel filtro whatman número 41 de 9 cm de diámetro o equivalente.

#### **IV.5 Dosificación de la mezcla**

Para poder obtener una buena penetrabilidad de la mezcla en las grietas de la roca, es necesario contar con una mezcla que cuente con las características necesarias para poder cumplir con las especificaciones de cada proyecto en especial. Por lo que es recomendable el uso de los aditivos correctos para cada caso en especial.

De acuerdo a las pruebas del laboratorio de los materiales estudiados y a las características especiales del terreno donde se construirá el P.H. "El Cajón", se optó por el uso de un aditivo estabilizador, un aditivo superfluidificante, cemento y finalmente agua proveniente del Río Santiago, para la dosificación final a utilizar para las inyecciones de consolidación e impermeabilización.



Cabe mencionar que para obtener la dosificación final, se tuvieron que realizar exhaustivas pruebas (que en breve serán explicadas) con materiales de diversas características así como diferentes marcas comerciales. Las cuales fueron rechazadas por no cumplir con las especificaciones que indica el proyecto. Ya sea que se rechace por no cumplir con la viscosidad, la sedimentación, la resistencia a la compresión simple, etc.

Como resultado de las pruebas de laboratorio previas a la inyección, se obtuvo la siguiente dosificación:

- Cemento Tolteca - 50 Kg.
- Aditivo superfluidificante (SIKAMENT-100) – 0.750 lts.
- Aditivo estabilizador (Bentonita) – 1.00 Kg.
- Agua del río Santiago – 47.50 lts.

Con esta dosificación se cumple con todas las características de la mezcla que requiere este proyecto en especial que mas adelante serán indicados.

## **IV.6 Procedimiento de Mezclado de la Lechada para Diseño de Laboratorio y Campo**

Se verifica que el equipo mezclador este limpio y purgado, es decir que no contenga agua de lavado o residuos de lechada que puedan afectar el mezclado de esta, en el interior del equipo mezclador, así mismo la limpieza del agitador, al concluir esto se conecta a la corriente eléctrica.

Se preparan los materiales de acuerdo a la mezcla de diseño y se enciende el mezclador.

Se vierte el agua al vaso de la mezcladora, ya con la cantidad de agua del río Santiago necesaria (47.50 lts.), se adiciona el aditivo estabilizador (Bentonita-1.0 Kg.) y se procede a mezclar por un minuto.

Enseguida se incorpora el cemento (Tolteca 50Kg.) y se procede a mezclar por un minuto.

Finalmente, se adiciona el aditivo superfluidificante (SIKAMENT-100 0.75 litros) y se mezcla por un periodo de 2 minutos.



El tiempo de mezclado será de cuatro minutos aproximadamente.

Se detiene el mezclador para tomar la muestra y ejecutar las pruebas inmediatamente, antes de pasar al agitador y comenzar a inyectar (esto último será durante el mezclado en campo).

Cabe aclarar que el tiempo de mezclado no es una regla debido a que en otras ocasiones los materiales no son siempre de la misma manufactura o calidad, en el proyecto del P.H. El Cajón se utilizó bentonita como estabilizador, pero existen un sin fin de aditivos químicos que tienen la misma función, pero diferentes reacciones al mezclado, lo mismo con el aditivo fluidificante, es por eso que se realizan las pruebas pertinentes previas a la inyección con lo que se ve la compatibilidad de los materiales para así obtener el mezclado final.

#### **IV.7 Pruebas de Laboratorio y límites de la mezcla a utilizar para las inyecciones de consolidación e impermeabilización**

Las propiedades de la lechada se supervisarán mediante los ensayos de control que indique el Proyecto, o en su defecto mediante los que establezca el Director de las Obras, para asegurar, durante el transcurso de la inyección, el cumplimiento permanente de las características exigidas.

Como control mínimo rutinario se deberá realizar los siguientes ensayos:

- Viscosidad al cono Marsh. Entre 29 y 31 segundos, constante durante una hora.
- Decantación (sedimentación). Menor o igual a 3% en dos horas.
- Cohesión con placa. Menor o igual a 0,03 g/cm<sup>2</sup>.
- Coeficiente de filtración. Menor o igual a 0,06
- Espesor de la Costra Cake obtenido de la prueba de filtrado. Menor o igual a 15 mm.
- Resistencia a la compresión simple a la edad de 28 días. Mayor o igual a 10 MPa.

Las propiedades resistentes de las lechadas se determinarán mediante la realización de ensayos de compresión simple y/o de resistencia al corte.

### IV.7.1 Viscosidad Marsh

El cono y el vaso Marsh deberán estar limpios sin mezcla seca en las paredes de estos, lo que evitaría la fluidez de la mezcla, ya limpio el equipo se humedece, se cubre con un dedo el orificio del cono y pasando la mezcla a través de la malla del cono Marsh, se llena hasta el nivel de la parte inferior de la malla, con lo que la lechada en este nivel tiene un volumen de 1500 cm<sup>3</sup>.

En un mismo tiempo se retira el dedo y se acciona el cronómetro, midiendo el tiempo necesario para que la mezcla proveniente del cono llene el vaso hasta el nivel indicado con un volumen de 946 cm<sup>3</sup>, el recipiente al que se vacía está graduado.

El valor de la viscosidad Marsh para esa mezcla, será el tiempo promedio medido en segundos observado en tres pruebas. Este valor se registra en los formatos asignados.

Con la mezcla en el vaso Marsh se mide la temperatura de la misma, para también registrar la lectura en los formatos.



Fig. IV.7.1 Vaso y Cono Marsh

### IV.7.2 Decantación ó Sedimentación

Se agita en el recipiente la mezcla obtenida y se vacía la muestra de mezcla en una probeta graduada de 250 mililitros, hasta el límite de la probeta y se anota el tiempo.

Se toman lecturas a cada 15 minutos durante la primera hora, después a cada 30 minutos hasta completar 120 minutos, se registra la sedimentación y se calcula con la siguiente formula:

$$D = \frac{A}{V_o} \times 100$$

En donde:

D= Decantación o Sedimentación. %

A= Asentamiento, ml

Vo= Volumen Original, ml

Otra manera de calcular la sedimentación es calculando a que porcentaje equivale cada 2 mililitros, que es lo que equivale cada división de la probeta graduada, y así basándose en la observación se podrá determinar el porcentaje sedimentado.



**Fig. IV.7.2 Probeta graduada**



### IV.7.3 Cohesión con Placa

Esta se realiza con apoyo de una placa acero inoxidable de superficies ásperas con dimensiones aproximadas de 100 mm x 100 mm y un espesor de 1.5 mm.

Una vez teniendo la placa preparada limpia y seca, se determina su masa “M1” y el área “As” que estará en contacto con la mezcla.

Se emplea un recipiente de capacidad adecuada y suficiente para sumergir la placa, llenándose de la mezcla.

Posteriormente se introduce la placa, durante 3 a 5 segundos aproximadamente, y se determina su masa “M2”. Durante esta operación cuando se saque la placa esperar hasta que se deje de escurrir la placa e inmediatamente pesar la placa con el peso adicional de la mezcla. Es conveniente emplear un sujetador para que la mezcla cubra en su totalidad la placa.

Se determina el valor de la “Cohesión con placa” como sigue:

$$CP = \frac{M2 - M1}{As}$$

En donde:

CP= Cohesión con placa, el valor obtenido estará dado en g/cm<sup>2</sup>

M1= Masa propia de la placa con el sujetador, en g.

M2= Masa de placa con el sujetador cubierta con mezcla, en g.

As = Área de la placa, en cm<sup>2</sup>.



Fig. IV.7.3.b Báscula electrónica

#### IV.7.4 Coeficiente de Filtrado y Espesor de Costra Cake

El equipo deberá estar limpio.

De la muestra obtenida de la lechada, se procede a vaciar 200 ml en la celda de filtrado Baroid, previamente preparada con el papel filtro.

Se coloca en la armadura y se conecta al sistema de presión de 100 lb/pulg<sup>2</sup> (7 kg/cm<sup>2</sup>).

Se aplica la presión y paralelamente se acciona el cronometro.

Se para el cronometro cuando deja de filtrarse el agua y empieza a salir aire. Se mide el valor del agua filtrada en mililitros en una probeta graduada.

Se quita la presión, se abre la válvula de alivio y se cerciorará que la presión este descargada.

Se calcula el coeficiente de filtrado como sigue:

$$CF = \frac{VF}{VT} \times T^{-0.5}$$

En donde:

CF= Coeficiente de Filtrado

VF= Volumen Filtrado

VT= Volumen Total

T= Tiempo

Para determinar el espesor de COSTRA CAKE, se procederá a vaciar el material de la celda del filtrado, que será una pastilla la lechada y se desarma con cuidado. Una vez hecho esto se retira la malla con el papel filtro y se mide el espesor de la Costra Cake en mm, la cual deberá cumplir con el espesor especificado.



**Fig. IV.7.4 Celda de filtrado**

#### **IV.7.5 Resistencia a la Compresión**

Una vez elaborada la mezcla se toma una porción suficiente para elaborar seis o nueve cilindros

Elaboración de especímenes: Se llena cada uno de los moldes con la mezcla.

Se podrán emplear moldes de H/D de 2.5 a 3

Ensayos. Al cumplir con la edad de prueba los especímenes se ensayan dentro de las tolerancias siguientes: a 24 horas  $\pm$  30 minutos; a 3 días  $\pm$  1 hora; a 7 días  $\pm$  3 horas; a 28 días  $\pm$  12 horas. Sacados los especímenes del curado en todo momento deben cubrirse con un paño húmedo.

Verificar la planicidad de las caras de los especímenes con una regla eliminando los granos sueltos y ensayándolos por las caras planas.

Colocar el espécimen en la máquina de prueba centrándolo entre las placas de ensaye y aplicar la carga uniforme y en un tiempo de 20 a 80 segundos.

Registrar la carga máxima y calcular el área de contacto del espécimen. Obtener la resistencia dividiendo la carga entre el área promediando dos resultados. Si dos especímenes acusan diferencia en 10 %, la prueba se debe repetir.



**Fig. IV.7.5 Moldes para cilindros de prueba**

#### **IV.7.6 Densidad del lodo con balanza Baroid**

El depósito cilíndrico de la Balanza Baroid, seco y limpio, se llena con la mezcla hasta enrasar, posteriormente se coloca la tapa cuidadosamente haciendo presión en el centro.

Se limpia cuidadosamente la balanza, tapando el orificio central. Se coloca la balanza en su base y se mueve la pesa corrediza, hasta que la balanza quede totalmente horizontal, comprobándose esto mediante el nivelador de burbuja que tiene la balanza sobre su punto de apoyo.

Se lee la densidad de la mezcla en la orilla de la pesa corrediza, dicho valor es el buscado en este ensaye y se puede obtener de la balanza con aproximación de  $0.01 \text{ gr/cm}^3$ . Este valor se registra en el anexo Formato correspondiente.



Fig. IV.7.3.a Balanza Baroid

## IV.8 Formatos para las pruebas índice y de resistencia para la inyección de roca

Es importante llevar un control de las pruebas de la mezcla, esto con el fin de detectar a tiempo cualquier problema de la mezcla durante el inyectado o después de este, por ejemplo las pruebas de resistencia se efectúa a los 7 días de inyectado un barreno y se debe saber la ubicación de la inyección si la resistencia no es la adecuada, lo mismo pasa con las demás pruebas antes descritas, y de esta manera tomar la medidas correspondientes.

## IV.9 Materiales y especificaciones de los productos

### IV.9.1 Requisitos Generales

Se estará, en todo caso, a lo dispuesto en la legislación vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de productos de construcción.

Se deberá evaluar la compatibilidad de todos los componentes de la lechada. Asimismo se deberá evaluar la interacción entre la lechada y el terreno a tratar.

Una vez aprobados los materiales a utilizar no deberán modificarse, salvo autorización del Director de las Obras, con previa realización de ensayos de conformidad.



Los materiales que se utilicen en la ejecución de los conceptos de trabajo propios del tratamiento de la roca, deben ser de las características especificadas y cumplir con las normas aplicables.

Cada frente de trabajo deberá contar con una bodega para almacenar y conservar los materiales con las características de calidad hasta su utilización final.

Es importante poner especial cuidado en el almacenamiento de todos aquellos materiales que pudieran perder su calidad al estar expuestos a la humedad, a los rayos directos del sol, a la contaminación con aceites, a una rotación de uso deficiente y a un maltrato, entre otras. Se debe demostrar la aplicación del sistema de aseguramiento de calidad, que se está cumpliendo en todo momento con este requisito.

## **IV.9.2 Materiales usados para la lechada de Inyección**

### **IV.9.2.1 Agua**

El agua deberá ser compatible con el cemento a emplear, debiendo realizarse ensayos del agua obtenida "in situ", para determinar el contenido de cloruros, sulfatos y materia orgánica antes de su aprobación.

El agua que se utilice para la fabricación de las mezclas de lechada de cemento debe ser suministrada, en el proyecto P. H. El Cajón el agua se obtuvo del río Santiago, verificando que cumpla con lo siguiente.

El agua debe estar limpia y libre de sólidos en suspensión; para tal fin, se construyen cárcamos debidamente preparados con materiales granulados filtrantes para extraer el agua y conducirla a tanques de almacenamiento cubiertos, con capacidad suficiente, ubicados estratégicamente en la obra para poder realizar una distribución adecuada del líquido, con acceso para su limpieza y retiro de sedimentos depositados en los mismos.

El agua que se utilice debe ser captada, extraída, procesada, conducida y en general suministrada y analizada por el laboratorio a su cargo. También el agua debe estar libre de aceites, álcalis, sales, materia orgánica, grasas o impurezas que puedan afectar el fraguado de la mezcla y reducir la resistencia o la durabilidad de la misma.



Se debe verificar la calidad del agua una vez por mes mediante pruebas realizadas por el laboratorio.

El agua que se utilice debe ser ensayada de acuerdo a los métodos establecidos por las normas ASTM que a continuación se indican y a los requerimientos establecidos en la especificación según sea el caso.

Concepto	Método de Prueba	
	ASTM	Especificación CFE (partes por millón)
Cationes en forma de:		
CaO (óxido de calcio)	D-511	
MgO (óxido de magnesio)	D-511	
Na <sub>2</sub> O (óxido de sodio)	D-1428	
K <sub>2</sub> O (óxido de potasio)	D-1428	
Aniones:		
HCO <sub>3</sub> (bicarbonatos) + CO <sub>3</sub>	D-513	600 máx.
CO <sub>3</sub> (carbonatos)	D-513	
OH (hidróxidos)	D-513	
SO <sub>4</sub> (sulfatos)	D-516	1000 máx.
Cl (cloruros)	D-512	600 máx.
NO <sub>3</sub> (nitratos)	D-992	
CO <sub>2</sub> (bióxido de carbono)	D-513	Trazas o pH no menor de 6
O <sub>2</sub> (oxígeno consumido en medio ácido)	D-1252	20 máx.
Sólidos disueltos	Por conductividad	2000 máx.
Sólidos en suspensión:		
PH	D-1293	6 mín.

Cuando los resultados de los ensayos del agua no sean satisfactorios, y no sea posible utilizar agua de otra fuente, se deberá efectuar pruebas en probetas de concreto elaboradas de acuerdo con la norma ASTM C-109, fabricados con el agua de la cuál se tengan dudas, y



verificar que las resistencias a compresión a 7; 28 y 90 días sean mayores o iguales al 90% de las resistencias a las mismas edades de los especímenes testigos fabricados con agua que cumpla con especificaciones. Además, se deben efectuar los ensayos de acuerdo a la norma ASTM C-191 que aseguren que las impurezas en el agua no afectan el tiempo de fraguado del concreto acortándolo o prolongándolo.

#### **IV.9.2.2 Cemento**

Los conglomerantes hidráulicos incluyen los cementos y productos similares que se emplean suspendidos en el agua para la preparación de las lechadas.

En la selección del conglomerante hidráulico para la lechada se deberá considerar su granulometría con relación a las dimensiones de las fisuras o huecos existentes en el terreno a tratar. Se podrán utilizar todos los tipos de cemento que sean compatibles con la lechada y el terreno a tratar. El cemento a utilizar se almacenará en lugar seco, ventilado y protegido de la humedad e intemperie, y con la capacidad suficiente para satisfacer el consumo máximo requerido.

El cemento deberá ser suministrado en cantidad y calidad especificada, a granel o envasado. El cemento que se utilice debe estar libre de grumos o piedras que sean el resultado de su hidratación. Por lo que no se permite la utilización de cemento húmedo o con grumos (Hidratado). El cemento debe estar protegido contra los agentes atmosféricos para evitar su fraguado prematuro.

Se verificará la calidad del cemento que se utilice en la obra, por lo que es obligatorio contar con los certificados de calidad de cada lote emitidos por el fabricante. En caso de que esto no sea posible, debe presentar certificados de calidad de cada lote emitidos por un laboratorio que cumpla con los lineamientos de la Entidad Mexicana de Acreditación A. C. (EMA).

El lote de cemento almacenado cuyas pruebas no hayan resultado satisfactorias, y en consecuencia, haya sido rechazado, debe ser retirado de la bodega y trasladado fuera de la obra.

La temperatura máxima permisible del cemento es de 55°C en el momento de fabricar la mezcla. El cemento debe ser almacenado en sitios herméticos con dispositivos convenientes



para cargarlos sin que el cemento se disperse o contamine y que permita su descarga uniforme sin que se produzcan almacenamientos muertos, con fácil acceso para su muestreo e inspección.

Cuando el cemento se maneje en sacos, éstos deben llevar el nombre, marca y tipo de cemento, y su peso nominal (50 kg). El cemento debe almacenarse en un local que lo proteja de la humedad y los agentes atmosféricos. Los sacos deben colocarse sobre tarimas de madera separadas del suelo 10 cm, formando lotes individuales y dejando pasillos de por lo menos 60 cm de ancho entre las pilas de sacos, cuya altura debe limitarse a 10 sacos para evitar la excesiva compactación del cemento colocado en el lecho inferior.

No debe utilizarse cemento que permanezca almacenado por más de 60 días, a menos que se demuestre mediante los resultados de ensayos físicos y químicos obtenidos en laboratorio que el cemento se encuentra en buenas condiciones. El cemento utilizado en el proyecto se ajustó a lo siguiente:

El cemento Portland puzolánico tipo IP que cumpla con los requisitos físicos y químicos indicados en la norma ASTM C-595 (CPP ó CPC 30 RS/BRA y NMX-C-414-ONNCCE-1999).

- Tiempo de fraguado Gillmore 6,0 h, máximo (final)
- Superficie específica Blaine 4500 cm<sup>2</sup>/g, mínimo

Para el caso de la preparación de las mezclas, puede optar por utilizar cemento envasado en sacos de 50 kg, para lo cual tiene que hacer los ajustes necesarios en la dosificación por este método.



**Fig. IV.9.2.2 Cemento Tolteca**

### **IV.9.2.3 Aditivos**

Se podrán utilizar productos químicos tales como los silicatos y sus reactivos, resinas acrílicas y epoxy, materiales hechos a partir de lignina y poliuretanos, siempre que cumplan la legislación ambiental vigente.

Se deberá considerar, a la hora de evaluar su utilización, el conjunto de reacciones que puedan producirse tanto entre los productos empleados y sus derivados, como con otros componentes de la lechada y con el suelo existente.

Los aditivos son productos orgánicos e inorgánicos que se añaden, en general en cantidades reducidas, a la lechada con el objetivo de modificar sus propiedades y controlar sus parámetros, tales como viscosidad, tiempo de fraguado y estabilidad, durante el proceso de inyección, además de la resistencia, cohesión y permeabilidad una vez colocada la lechada. Como aditivos se podrán utilizar, entre otros, superplastificantes, productos para retener agua y productos para arrastrar aire.

Se debe determinar si los aditivos se consideran materiales peligrosos, o bien si los aditivos contienen materiales peligrosos, de acuerdo con la norma aplicable, además verificar su calidad, presentando los certificados de calidad de cada lote de aditivo que emplee, los certificados de calidad deben contener los resultados de las pruebas indicadas en la norma ASTM correspondiente, y deben ser emitidos por el fabricante, el proveedor, o por un laboratorio particular que cumpla con los lineamientos de la EMA.



Se debe disponer de bodegas adecuadas para almacenar aditivos, de manera que los recipientes no estén expuestos a la acción directa de los rayos solares y no se produzcan confusiones en su utilización.

Todos los aditivos deben identificarse con la fecha de llegada a la obra, y utilizarse según el orden cronológico de su recepción. además de tener cuidado con el manejo de los aditivos

Todo lote de aditivos que permanezca almacenado en la obra por más de seis meses no debe ser utilizado, a menos que se demuestre mediante ensayos realizados por el laboratorio que el aditivo se encuentra en buenas condiciones.

Antes de utilizar un aditivo se debe realizar las siguientes actividades:

Evaluar las condiciones ambientales y de trabajo en obra, así como las acciones dañinas a que puede estar expuesta la estructura en servicio.

Determinar el comportamiento y las propiedades que se obtienen en la lechada sin aditivos, con los componentes y el diseño de mezcla idóneos, y confrontarlos con los requerimientos impuestos por las condiciones y acciones previamente valuadas en el primer punto.

Ensayar el aditivo específicamente seleccionado, con el objeto de definir la dosificación apropiada para producir el efecto requerido, y para comprobar que no produzca efectos secundarios indeseables en la lechada.

De lo anterior, se presentará un informe para aceptar el uso del aditivo propuesto, verificando la calidad de este

Los certificados de calidad deben contener los resultados de las pruebas indicadas en la norma ASTM correspondiente, y deben ser emitidos por el fabricante, el proveedor, o por un laboratorio particular que cumpla con los lineamientos de la EMA.



Fig. IV.9.2.3 Aditivo Sikament-100

#### IV.9.2.4 Bentonita

Podrán utilizarse materiales arcillosos en las lechadas hechas a partir de cemento, con el fin de reducir la sedimentación, y variar la viscosidad y la cohesión de la lechada, consiguiéndose, además, una mejora de la bombeabilidad.

Se podrán utilizar arcillas naturales de carácter eminentemente plástico y estructura laminar, siendo conveniente el empleo de arcillas de tipo bentonítico, activadas o modificadas, por su mejor calidad en cuanto al efecto superficie de sus partículas, así como por la mayor regularidad de sus propiedades.

En todo caso deberá conocerse la mineralogía, granulometría, humedad y límite líquido del material arcilloso que se utilice.

La bentonita es para utilizarse en forma de lodo como estabilizador. Esta debe cumplir con las normas API-SPEC-13 A y API-RP-13 B, y garantizar la uniformidad de los límites de consistencia para evitar ajustes innecesarios de la mezcla; debe tener además las siguientes características:

Viscosidad plástica en viscosímetro

- |   |    |    |        |
|---|----|----|--------|
| • Fann a 600 r.p.m.                         | 30 | cp | mínimo |
| • Punto de fluencia, lb/100 ft <sup>2</sup> | 3  | vp | máximo |

---

• Filtrado a 7 MPa	15	ml	máximo
• Humedad (a la salida de la fábrica)	10	%	máximo
• Residuo vía húmeda en malla No. 200	4	%	máximo
• pH	10		máximo

En donde:

cp = centipoise

vp = viscosidad plástica

Es condición que el lodo bentonítico se prepare por lo menos 12 horas antes de utilizarse, para garantizar una hidratación eficiente.



**Fig. IV.9.2.4 Bentonita**



# ***CONCLUSIONES***



**PRIMERA.** Al escribir este trabajo de titulación, se pensó en mostrar el método de inyección de lechada desde el plinto y galerías para consolidar e impermeabilizar la cortina de la presa, y en base a la experiencia adquirida en el sitio, se observa que con una correcta supervisión, construcción y control de calidad, el procedimiento de inyección puede tener resultados favorables. Por lo que se demuestra la gran importancia de este tratamiento de roca para la construcción de una presa, pues sin esta no se aseguraría la estanqueidad del agua en el vaso de regulación, así como una buena cimentación para la cortina de la presa.

**SEGUNDA.** Durante la redacción del presente trabajo, se presentaron las características principales del método GIN para la inyección de roca, y de acuerdo a mis experiencias en el P.H. El Cajón, puedo decir que este método puede ser más eficiente en combinación con otro método de inyección, debido a que el subsuelo es una incógnita.

Es decir, la estratigrafía del subsuelo es diferente en cada zona, con grietas de diferentes espesores, longitudes y características, por lo que en ocasiones, el inyectar con lechada podría ser insuficiente, puesto que las grietas tardarían más en rellenarse con esta mezcla, es decir, sería conveniente tener una mezcla adicional en la que se incluya un agregado fino, es decir un mortero que sea capaz de sellar grietas o cavidades grandes de una manera más rápida, sin embargo, esto implicaría realizar sondeos en cada barreno de inyección para poder preveer el volumen aproximado que absorberá cada barreno, pudiendo provocar mayores costos y tiempos de inyección.

Sin embargo, lo mencionado anteriormente, debe analizarse perfectamente, debido a que cada sondeo en los barrenos tiene un cierto costo y se tendría que hacer el equilibrio entre los materiales de inyección, las pruebas en cada barreno y sobre todo la calidad del trabajo, y esto último conlleva a un trabajo bien ejecutado evitando mantenimientos correctivos constantes.

Por lo que este punto básico del método GIN de utilizar una sola mezcla no podría llevarse a cabo como regla.

**TERCERA.** El conocer los verdaderos problemas durante la inyección de lechada y conocer los procedimientos necesarios para dar solución a estos, nos da un panorama más amplio para futuros trabajos similares al que se desarrollo en el P.H. El Cajón, pues con esto se esta



previniendo a futuros constructores y porque no, a los actuales constructores como recordatorio a las fallas que se pueden presentar durante dicho procedimiento y mejorar en trabajos futuros.

**CUARTA.** No cabe duda que la importancia del control de calidad durante el procedimiento de inyección, es primordial durante la construcción, pues sin este factor, no se podría tener un avance significativo en la inyección, debido a que si la lechada no es estable, o no alcanza los límites de resistencia adecuados para lograr el objetivo general, existirán problemas de infiltración o fallas en el macizo rocoso; por lo que en ningún caso deberá ser omitido el control de calidad.

**QUINTA.** Durante el proceso de la construcción de la presa El Cajón, se desarrollaron diferentes tipos de tratamiento a la roca, con el fin de garantizar la seguridad e inversión de la obra, por lo que en la práctica, se demuestra que dichos tratamientos, son vitales para la obra, por lo que este trabajo de titulación, describió de manera breve cada uno de los diferentes tratamientos de roca que se ejecutaron, hasta lograr desarrollar de manera particular la inyección de lechada para consolidar e impermeabilizar la cortina de dicha presa.

**SEXTA.** Considero que durante un proceso constructivo, se tendrán que hacer mejoras constantes, debido a que las condiciones de trabajo son muy variables, por lo que durante la obra, se podría invertir en un proyecto alternativo para poder disminuir costos de materiales y tiempos de ejecución, sin embargo deberá ser analizado para poder lograr el equilibrio.

**SEPTIMA.** Finalmente, considero que una obra grande debe ser llevada con responsabilidad y ética, y esto se logra colocando a la gente adecuada y con experiencia en cada frente de trabajo, un frente de trabajo no puede ser encargado a personas sin experiencia para poder supervisar o ejecutar la obra solo para cubrir el frente, aun no entiendo el porque, gente con amplia experiencia y las aptitudes adecuadas para generar un trabajo, se encuentran por debajo de gente sindicalizada, emparentada o amistada, provocando pérdidas económicas y deficiencias en los trabajos. Por lo que no siempre se puede culpar al proyecto ejecutivo de una falla en obra, concluyendo en que el constructor debe tener un equipo con la capacidad de desarrollar el trabajo indicado en los planos ejecutivos.



# ***ANEXOS***



Proyecto Hidroeléctrico "El Cajón" SP-DP-LAB-PRO-0027 r01 A.01

Mezclas para las inyecciones de consolidación y de impermeabilización

Sistema de Gestión



PRUEBAS EN TRATAMIENTOS

Revisión: "1"	Fecha de revisión: 19/07/04	Elaboro: ACLP
FRENTE : <b>OBRAS DE CONTENCIÓN</b>	CANTIDAD MUESTRA: _____	
PROCEDENCIA: _____	MEZCLA PARA: <b>INYECCIÓN</b>	
PROVEEDOR: <b>CECSA</b>	FECHA DE ENSAYE: _____	
LUGAR DE MUESTREO: <b>TURBOMEZCLADOR</b>	LABORATORISTA: _____	
FECHA DE MUESTREO: _____	CALCULISTA: _____	

VALORES OBTENIDOS

CONCEPTO	UNIDAD	RESULTADO FINAL				VALORES LIMITE	DOSIFICACIÓN		
		PBA 1	PBA 2	PBA 3	PROM.				
VISCOSIDAD INICIAL MARSH	seg					29 - 31	CEMENTO		
							<b>TOLTECA TIPO 1P</b>	50	kg
VISCOSIDAD MARSH ____ min	seg					29 - 31	AGUA		
							<b>RIO SANTIAGO</b>	47.5	lt
DENSIDAD	g/cm <sup>3</sup>					-----	ADITIVOS:		
COEFICIENTE DE FILTRACIÓN	ml					0.06	ESTABILIZADOR		
							<b>BENTONITA</b>	1.0	kg
ESPESOR DE LA COSTRA (CAKE)	mm					15	SUPERFLUIDIFICANT		
							<b>SIKAMENT 100</b>	0.750	lt
ESTABILIDAD (DECANTACIÓN)	%	15	30	45	60	3.0	REDOSIFICACIÓN		
		75	90	120	150		ADITIVOS:		
		180	210	DECANTACIÓN, %			PERIODO:		
COHESIÓN CON PLACA	g/cm <sup>2</sup>					0.03	MUESTRA ENSAYE A COMPRESIÓN		
TEMPERATURA, °C	AMBIENTE					-----	IDENTIFICACIÓN:		
	AGUA								
	MEZCLA								
HORA	HRS:MIN					-----	EDAD DE ENSAYE	3 DÍAS	<input type="checkbox"/>
		7 DÍAS	<input type="checkbox"/>						
		14 DÍAS	<input type="checkbox"/>						
		28 DÍAS	<input type="checkbox"/>						

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

REFERENCIAS:	LUGAR	FECHA DE EMISIÓN	FOLIO:
ESENCIFICACIONES CFE CAP. 6	<b>PH " EL CAJÓN "</b>		<b>LCECSA -</b>
	EL LABORATORIO	CONTROL DE CALIDAD CIISA	ENTERADO
	NOMBRE Y FIRMA	NOMBRE Y FIRMA	NOMBRE Y FIRMA
			FORMATO No. PHC-74
			ENTREGA:

ABARCA LAS MUESTRAS DE REFERENCIA

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DE LA COORDINACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD



Proyecto Hidroeléctrico " El Cajón "

Mezclas de pruebas para inyección

CONTROL DE CALIDAD

MEZCLAS DE PRUEBA PARA INYECCIÓN EN PLINTO Y GALERÍAS

FECHA:	<input type="text"/>	PRUEBA:	<input type="text"/>
--------	----------------------	---------	----------------------

DOSIFICACIÓN		
CEMENTO	<input type="text"/>	kg
	<input type="text"/>	
AGUA	<input type="text"/>	lt
	<input type="text"/>	
ESTABILIZADOR	<input type="text"/>	kg
	<input type="text"/>	
SUPERFLUIDIFICANTE	<input type="text"/>	lt
	<input type="text"/>	

PRUEBAS	INICIAL	15 MIN	30 MIN	45 MIN	60 MIN	75 MIN	90 MIN	120 MIN
VISCOSIDAD	<input type="text"/>							
	PROMEDIO	<input type="text"/>						
DENSIDAD	<input type="text"/>							
DECANTACIÓN	<input type="text"/>							
COHESION CON PLACA	<input type="text"/>							
ESPESOR DE COSTRA	<input type="text"/>							
COEFICIENTE DE FILTRACIÓN	<input type="text"/>							
TEM. AMBIENTE	<input type="text"/>							
TEM. MEZCLA	<input type="text"/>							
TEM. AGUA	<input type="text"/>							

MEZCLADO	<input type="text"/>
----------	----------------------

HORA DE INICIO	<input type="text"/>	HORA FINAL	<input type="text"/>
----------------	----------------------	------------	----------------------

REFERENCIAS	LUGAR	FECHA DE EMISIÓN	FOLIO:
ESPECIFICACIONES CAPITULO 6	<input type="text"/>	<input type="text"/>	LCECSA -
	LABORATORIO	CONTROL DE CALIDAD CIISA	ENTERADO
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	NOMBRE Y FIRMA	NOMBRE Y FIRMA	NOMBRE Y FIRMA
			FORMATO No. PHCL-01 CONTROL DE ENTREGA



ANEXOS



Proyecto Hidroeléctrico "El Cajón"  
Procedimiento Operativo de Control de Calidad Sistema de Gestión



REGISTRO DE TEMPERATURA

Revisión: "3" Fecha de revisión: 31/01/04 Elaboro: VCH

FECHA	HORA	TEMPERATURA AMBIENTE °C	TEMPERATURA AGUA °C	TEMPERATURA CEMENTO °C	TEMPERATURA MEZCLA °C	UBICACIÓN	REALIZO
	7:00						
	8:00						
	9:00						
	10:00						
	11:00						
	12:00						
	13:00						
	14:00						
	15:00						
	16:00						
	17:00						
	18:00						
	19:00						
	20:00						
	21:00						
	22:00						
	23:00						
	00:00						
	01:00						
	02:00						
	03:00						
	04:00						
	05:00						
	06:00						

OBSERVACIONES:

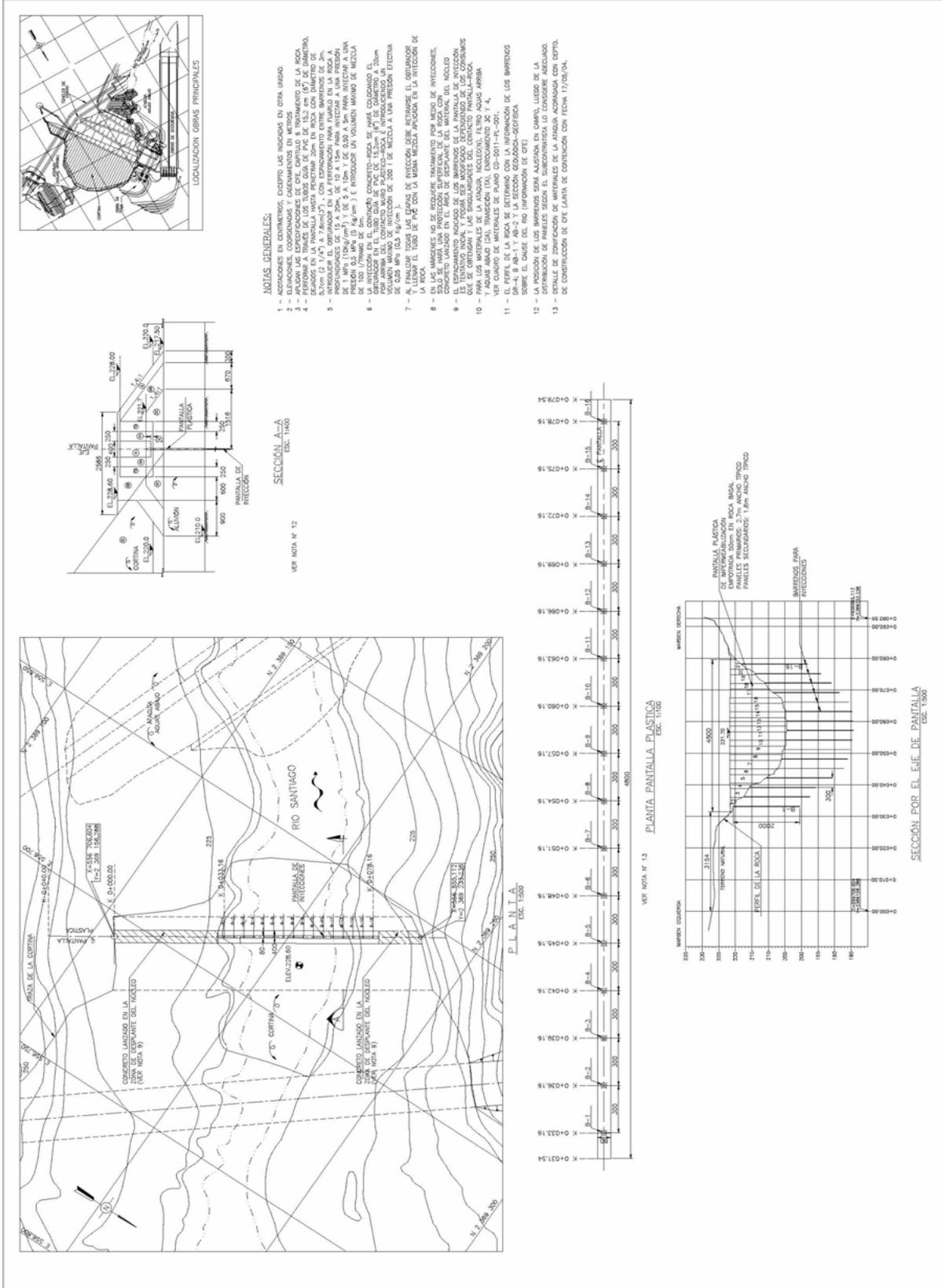
INSTRUCCIONES PARA EL LLENADO DEL FORMATO  
1.- LLÉNESE CON TINTA NEGRA Ó MÁQUINA  
2.- CUANDO NO SE LLENEN LOS RENGLONES TRAZAR LÍNEA  
3.- INDICAR EN OSERVACIONES LOS HORARIOS DE ACTIVIDAD

REFERENCIAS: ASTM C-191 ASTM C-109 ASTM C-511	LABORATORIO	REVISÓ
	_____ NOMBRE Y FIRMA	_____ ING. AGUSTÍN PEDRO MORALES J. NOMBRE Y FIRMA

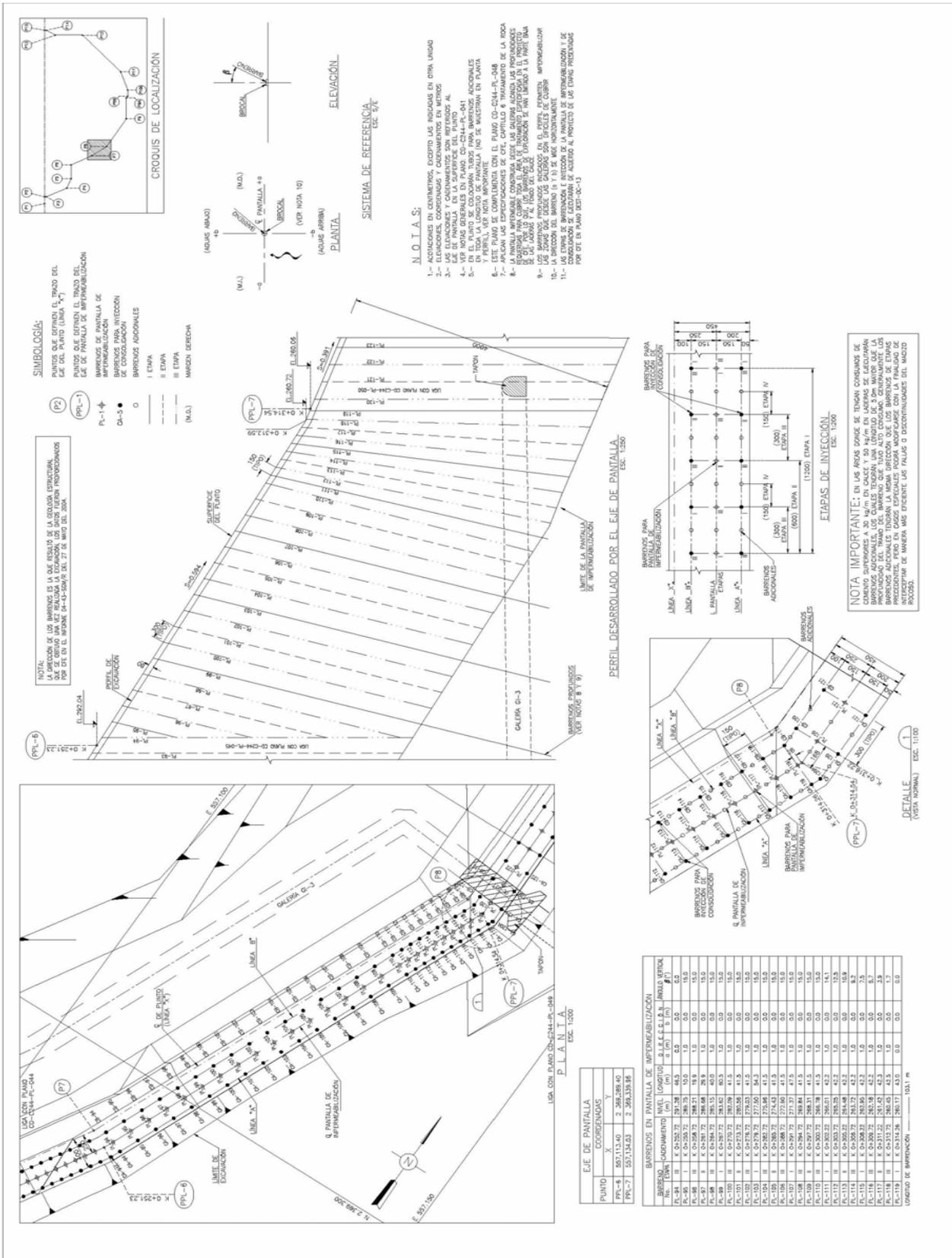
LABORATORIO  
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DE LA COORDINACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD











Inyección de lechada para la consolidación e impermeabilización de la cortina perteneciente al P.H. "El Cajón"





---

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- **PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO**  
Autor: Raúl J. Marsal y Daniel Resendiz Núñez  
Editorial Limusa
  
- **ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN DE OBRA CIVIL DEL P.H. EL CAJÓN**  
Capitulo 4 Concretos, sección 4.2 Materiales
  
- **ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN DE OBRA CIVIL DEL P.H. EL CAJÓN**  
Capitulo 6 Tratamientos de la Roca
  
- **DISEÑO DE PRESAS PEQUEÑAS**  
Autor (traductor). José Luis Lepe, Ingeniero Civil  
Compañía Editorial Continental, S. A., México
  
- **LIBRO TÉCNICO, PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL CAJÓN, NAY**  
Coordinación general: Dr. Humberto Merengo Mogollón  
Coordinación editorial: Dr. Gustavo Paz Soldán Córdoba
  
- **MECÁNICA DE SUELOS TOMO 3, FLUJO DE AGUA EN EL SUELO**  
Autor: Juárez Badillo y Rico Rodríguez  
Ed. Limusa
  
- **FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA**  
Autor: Braja M. Das  
Thomson Learning
  
- **TRABAJOS DE CONSTRUCCIÓN EN ROCA**  
Robert Crimmins, Reuben Samuels, Bernard Monahan  
Ed. Limusa