



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA  
REALIZAR INYECCIONES EN MACIZOS  
ROCOSOS: CASO DE ESTUDIO PROYECTO  
HIDROELECTRICO LA YESCA”

## TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

EDUARDO ORTÍZ GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:  
LUIS FERNANDO ZARATE ROCHA



MÉXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

# DEDICATORIAS

A mis padres:

Ma. De Lourdes García Flores.

Por darme la mejor educación y siempre alentarme a terminar mis estudios, dándome los recursos y sobre todo el cariño de una excelente madre.

Otilio Ortiz García

Por siempre mostrarme el lado alegre de la vida sin dejar de ver para adelante, por enseñarme a ser una buena persona, por ser un excelente padre y un excelente amigo.

A mis hermanos:

Otilio Ortiz García.

Por ser ejemplo, hacer que siempre siga sus buenos pasos y ser el mejor hermano.

Cristhian Ortiz García.

Por siempre tener un buen consejo, apoyarme en mis decisiones y ser la mejor hermana.

A mi Familia:

Elías Méndez Ortiz:

Por quitarme los malos ratos y darme alegría.

Ing. Filiberto Ortiz Galindo:

Por haberme enseñado esta maravilla de carrera desde niño y siempre alentarme a estudiarla.

María Teresa Ortiz García:

Por ser mi segunda madre, quererme tanto sin medida y con cariño.

María Esther García Flores:

Por las experiencias y consejos de una buena abuela que a compartido conmigo.

María de los Ángeles Gallegos +:

Por que el amor de una verdadera abuela nunca se olvida.

Ramón Kado Valdez e Indrani Kado Ortiz:

Por siempre contar con su ánimo.

A mis amigos:

Eliud García, Luis Yáñez, Rodrigo Cantú:  
Por su incondicional amistad y ser tan leales perros.

Lissette Andrade:  
Por darme su sincera amistad y ayudarme en la redacción de esta tesis.

Ana Karen Navarrete y Familia:  
Por el todo el tiempo que recibí su importante apoyo y cariño.

En general a todos mis amigos (secundaria, preparatoria o universidad):  
Por que siempre es bueno tener personas que te apoyen y crean en ti.

A dios:

Estad siempre gozosos. Orad sin cesar. Dad gracias a dios en todo, por que esta es la voluntad de Dios para con vosotros en Cristo Jesús. (1 TESALONICENSES, 5:16-18).

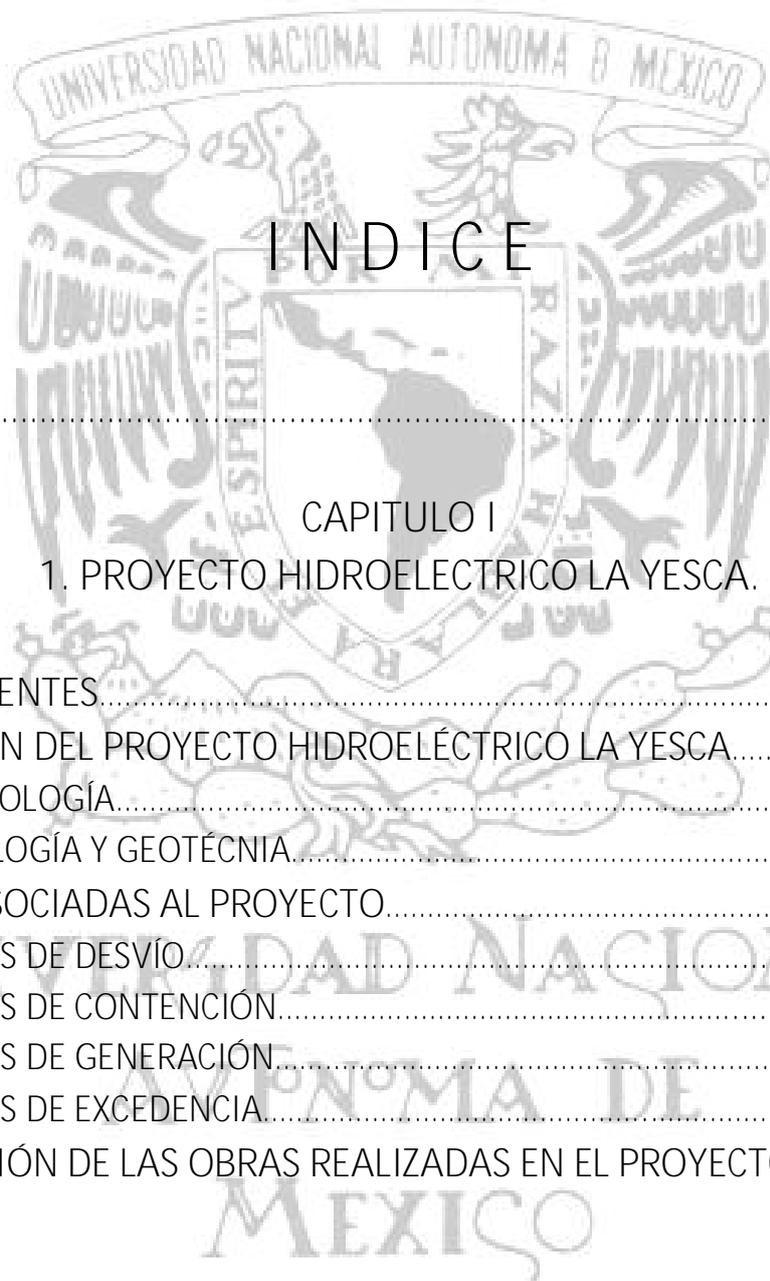
A mi jurado:

Por la dedicación que siempre han tenido para que el estudiante siga por el camino de la superación.

Ing. Sergio Macuil Robles:  
Por su importante tiempo y ayuda en la realización del servicio social y tesis.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MEXICO



# INDICE

	PÁG.
PRÓLOGO.....	1
CAPITULO I	
1. PROYECTO HIDROELECTRICO LA YESCA.	
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA.....	6
1.2.1 HIDROLOGÍA.....	7
1.2.2 GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA.....	7
1.3 OBRAS ASOCIADAS AL PROYECTO.....	12
1.3.1 OBRAS DE DESVÍO.....	13
1.3.2 OBRAS DE CONTENCIÓN.....	15
1.3.3 OBRAS DE GENERACIÓN.....	16
1.3.4 OBRAS DE EXCEDENCIA.....	17
1.4 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS REALIZADAS EN EL PROYECTO.....	20

## CAPITULO II

2. DISEÑO DE TRATAMIENTOS		PAGS
2.1	PRUEBAS DE INYECCIÓN.....	23
2.1.1	TRATAMIENTO SUPERFICIAL DEL TERRENO.....	23
2.2	TRATAMIENTOS DE INYECCIÓN POR CONSOLIDACIÓN.....	24
2.2.1	INYECCIONES DE CONSOLIDACIÓN.....	24
2.2.2	CARACTERISTICAS DE LAS LÍNEAS DE LOS BARRENOS DE CONSOLIDACIÓN.....	24
2.2.3	ETAPAS DE INYECCIÓN.....	25
2.3	PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACIÓN.....	25
2.3.1	INYECCIÓN DE IMPERMEABILIZACIÓN.....	25
2.3.2	CARACTERÍSTICAS DE UNA PANTALLA.....	26
2.3.3	ETAPA DE INYECCIONES.....	27
2.4	EQUIPO.....	28
2.4.1	EQUIPO MEZCLADOR.....	28
2.4.2	TUBERÍAS.....	28
2.4.3	MANGUERAS.....	29
2.4.4	MEDIDORES DE GASTO.....	29
2.4.5	MANÓMETROS.....	29
2.4.6	TANQUE DE AFORO.....	30
2.4.7	OBTURADOR.....	30
2.5	PLANTA PARA LA REALIZACIÓN DE MEZCLA Y ESTACIONES DE INYECCIÓN.....	32

## CAPITULO III

### 3. INYECCIONES EN ESTRUCTURAS DEL PROYECTO HIDROELECTRICO LA YESCA.

	PAGS
3.1 TRATAMIENTO MEDIANTE INYECCIÓN.....	34
3.1.1 COMPORTAMIENTO DE INYECCIONES.....	34
3.1.2 VOLÚMENES MÁXIMOS DE MEZCLA EN TRAMAS DE ALTO CONSUMO QUE JUSTIFICAN BARRENOS ADICIONALES.....	36
3.1.3 ACTIVIDADES DE CONTROL DURANTE TRATAMIENTOS DE INYECCIÓN.....	37
3.1.4 CRITERIO PARA EVALUAR LA LIBERACION DE ZONAS INYECTADAS.....	37
3.1.5 SISTEMA DE CONTROL DE INYECCIONES.....	39
3.1.6 SISTEMA DE REPRESENTACION GRÁFICA DE INYECCIONES.....	40
3.2 PERFORACIÓN.....	41
3.2.1 PERFORACIÓN DE CONSOLIDACIÓN.....	41
3.2.2 PERFORACIÓN PARA PANTALLA PROFUNDA.....	42
3.3 LAVADO DE BARRENOS.....	44
3.4 SATURACIÓN PREVIA.....	44
3.5 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD (LUGEON).....	46
3.6 METODO GIN.....	50
3.6.1 CARACTERÍSTICAS.....	50
3.6.2 METODOLOGÍA.....	52
3.6.3 CURVAS GIN PROPUESTAS.....	53
3.7 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA PARA INYECCIÓN.....	54
3.7.1 MEZCLA DE INYECCIÓN.....	55

### CAPITULO III

PAGS

3.8 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA.....	55
3.8.1 PRODUCTOS EMPLEADOS EN INYECCIONES (MEZCLAS FABRICADAS CON CEMENTO).....	55
3.8.2 MEZCLA ÚNICA DE INYECCIÓN P.H. YESCA.....	55
3.8.3 CEMENTO.....	56
3.8.4 AGUA (RIO SANTIAGO Y BOLAÑOS).....	57
3.8.5 ESTABILIZANTE (BENTONITA).....	57
3.8.6 ADITIVO (RHEOBUILD716).....	58
3.9 TIPOS DE PRUEBAS REALIZADAS A LA MEZCLA (LECHADA).....	59
3.10 INYECCIONES EN LA ROCA POR CONSOLIDACIÓN.....	65
3.10.1 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN.....	66
3.11 INYECCIÓN PARA PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACIÓN.....	67
3.12 RETAQUE DEL BARRENO.....	70
CONCLUSIONES.....	71
ANEXOS.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	75

## PRÓLOGO

Al término de mi carrera, tuve la oportunidad de llevar mis conocimientos a la práctica, pues fui invitado a formar parte del proyecto de construcción de una presa hidroeléctrica ubicada en el Estado de Nayarit, que lleva por nombre “La Yesca”. Así que tome mis cosas y me fui.

Al llegar ahí, fui ubicado en el laboratorio de control de calidad, cuya función era llevar el control de los materiales utilizados en la construcción de la presa, me asignaron el en frente de inyecciones bajo el cargo del Ing. Ibu Baji Sane. Fue en ése momento cuando me involucre y tuve la oportunidad de conocer los procesos de inyección y los controles de calidad que se le da a la lechada que se inyecta.

Desde ese día me comprometí a siempre exigirme mas y dejar en alto el nombre de la casa de estudios que me vio crecer como estudiante y convertirme en profesionista y comprometerme con la calidad de la obra teniendo una participación siempre activa en la misma, como en todo, claro que existieron roces por celos profesionales de parte de ingenieros que por supuesto, no querían que nos involucráramos demasiado en asuntos internos y importancia de la presa, pues como ellos decían somos apenas egresados. Es importante para mí, dar mérito y recalcar lo motivador que fue el ingeniero con quien yo estaba a cargo, siempre me ofreció su apoyo y me animó a resolver activamente los inconvenientes que se me presentaron al paso del tiempo.

Así que aquí plasmo lo que recabe y aprendí de esa experiencia.

¡GRACIAS!

# CAPITULO I

## PROYECTO HIDROELECTRICO LA YESCA.

- 1.1. ANTECEDENTES.
- 1.2. UBICACIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA.
- 1.3. OBRAS ASOCIADAS AL PROYECTO.
- 1.4. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS REALIZADAS EN EL PROYECTO.
- 1.5. ESTRUCTURAS DEL CONSORCIO.

## 1.1. ANTECEDENTES

Desde 1961 se iniciaron los estudios de pre factibilidad para el desarrollo de un proyecto aguas abajo de la confluencia de los ríos Santiago y Bolaños, con la finalidad de aprovechar en forma integral la cuenca del río Santiago para generación hidroeléctrica.

Por las características orográficas de la región, este proyecto hidroeléctrico involucra afectaciones socio ambientales menores a las de otros proyectos ya construidos en el país. La superficie a inundar será de 3,825 Hectáreas, de esta superficie, 940 Hectáreas son terrenos nacionales, 146 Hectáreas corresponden a régimen agrario y 2,739 Hectáreas a la pequeña propiedad. Se han censado 20 familias con un total de 110 habitantes afectados, de los cuales 23 se encuentran en áreas inundables y los restantes se ubican en la zona cercana a los campamentos.

La Yesca será el segundo proyecto hidroeléctrico que construye CFE bajo el esquema de obra pública financiada por un privado. Los trabajos de construcción en general del proyecto, tendrán una duración hasta el año 2012. La vida útil del proyecto es mayor a los 50 años, que lo traduce en un activo rentable.

El P.H. La Yesca ocupará el segundo lugar en potencia y el tercer lugar en generación dentro del sistema, después de la Central de Aguamilpa-Solidaridad y de El Cajón. En la fig.1.1.1. se muestra la ubicación de la cortina en el cauce del río Santiago en la P.H. La Yesca.

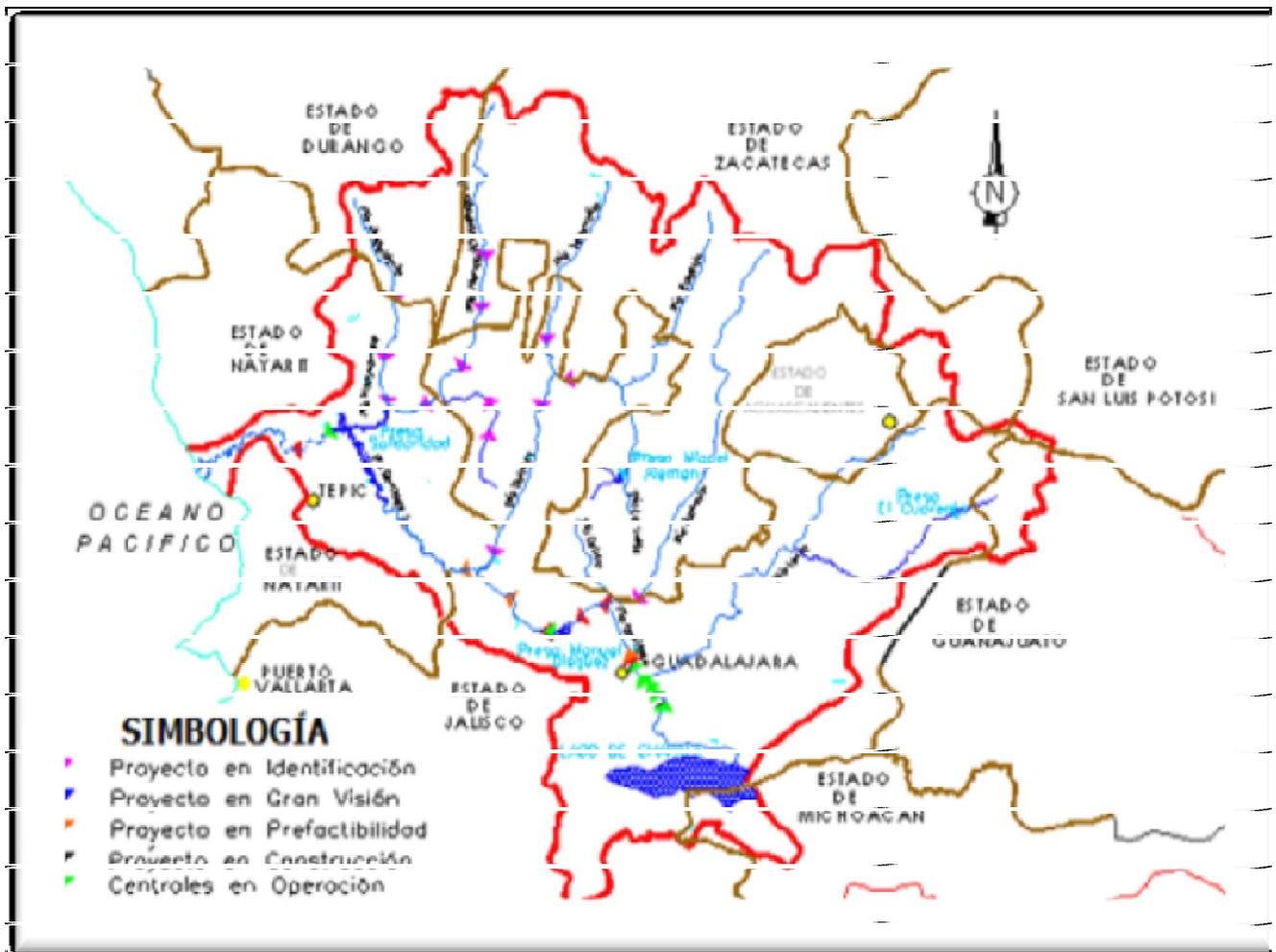
Fig. 1.1.1. ubicación de la cortina P.H. Yesca



Los estudios básicos en el sitio demostraron la factibilidad del proyecto y condujeron a la realización de estudios específicos para precisar el conocimiento topográfico, geológico, geotécnico, social y ambiental del área. (ver fig. 1.1.2.)

Su embalse contribuirá a regular los escurrimientos de su cuenca y beneficiará a las Centrales Hidroeléctricas de El Cajón y Aguamilpa, ya que al recibir su vaso las aportaciones reguladas del río, incrementará su generación firme y se reducirán las probabilidades de derrama por el vertedor.

Fig.1.1.2. Mapa de simbología de factibilidad



El aprovechamiento permitirá la generación de energía eléctrica mediante dos turbinas tipo francis de 375 MW cada una. Como se muestra en la fig. 1.1.3

Fig. 1.1.3 turbina tipo Francis



Se tiene prevista una generación media anual de 1,210 GWh y beneficios atribuibles por 203 GWh en El Cajón y Aguamilpa

#### SISTEMA HIDROELÉCTRICO RIO SANTIAGO

El Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, forma parte del Sistema Hidrológico del río Santiago, que comprende a 27 proyectos con un potencial hidro-energético de 4,300 MW, del cual sólo se ha desarrollado el 32% mediante la construcción de seis Centrales.( ver Fig. 1.1.4.)

Fig. 1.1.4. Perfil del río Santiago.

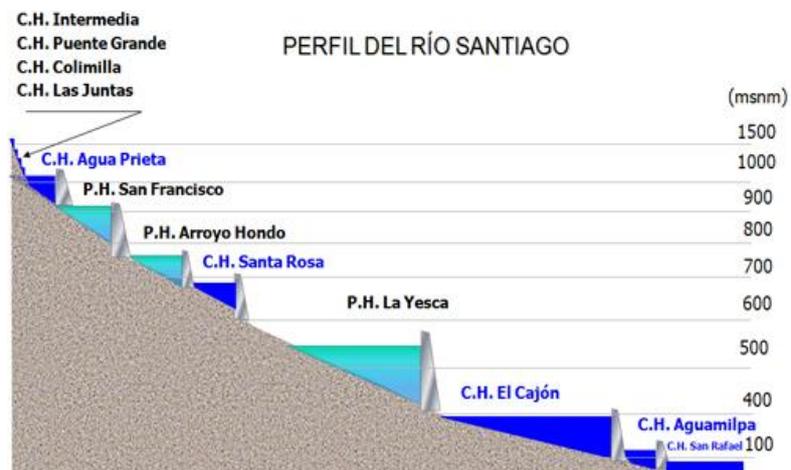


TABLA 1 Generación río Santiago

Nombre	Nivel	Potencia Instalada MW	Generación Media Anual GWh
C.H. Intermedia	OP	5.32	4.41
C.H. Puente Grande	OP	17.40	12.72
C.H. Colimilla	OP	51.20	40.48
C.H. Las Juntas	OP	15.00	16.90
C.H. Agua Prieta	OP	240.00	462.53
C.H. Santa Rosa	OP	61.20	195.90
P.H. La Yesca	C	750.00	1 413.00
C.H. El Cajón	OP	750.00	1 228.00
C.H. Aguamilpa	OP	960.00	2 133.00

## 1.2. UBICACIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA

El P. H. La Yesca, se localiza sobre el río Santiago a 105 Km. al NW de la Ciudad de Guadalajara y a 22 Km. al NW de la población de Hostotipaquillo, Jal. Forma parte del límite entre los estados de Nayarit y Jalisco, constituido legalmente por el cauce del río Santiago. La boquilla del P. H. La Yesca se localiza a 90 Km., en línea recta, al noroeste de la ciudad de Guadalajara, a 4 Km. aguas abajo de la confluencia de los ríos Bolaños y Santiago y sobre el cauce de este último; sus coordenadas geográficas son: 21° 11' 49" Norte 104° 06' 21" Oeste. Para llegar al sitio hay que ir rumbo a Tepic por la carretera de cuota; en Magdalena (60km) salir hacia la libre (15km) hasta encontrar la desviación a Hostotipaquillo, bonito pueblito (8km) en donde se inicia la desviación (en construcción) hacia el conjunto del proyecto (7km). (Ver Fig. 1.2.1)

### 1.2.1. Hidrología

- Temperatura máxima promedio en verano 37.5°C durante mayo, y mínima de 12°C en enero.
- Humedad relativa en verano 36.4%, y de 48.6% en invierno.
- Zona climática ambiente: calido sub-húmedo/rural.
- En la zona de las obras, la temporada de lluvias se presenta muy marcada de junio a octubre, y el estiaje entre noviembre y mayo.
- Durante el invierno se presentan lluvias en un porcentaje ligeramente mayor a 5% de la media anual.
- Presión barométrica 98 kPa.

### 1.2.2. Geología y geotecnia

La geología del sitio es una masa rocosa afectado por un fracturamiento de origen tectónico con orientaciones NW y en menor proporción EW y NE.

El patrón sísmico predominante en la región es de tipo enjambre y se asocia principalmente con las fosas tectónicas de Tepic-Chapala y Chapala-Colima. Existe conocimiento de la geología del sitio y de las discontinuidades estructurales Se han llevado a cabo 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.

Fig. 1.2.1. Localización de la Presa Hidroeléctrica La Yesca, entre los estados de Jalisco y Nayarit.



Se han realizado estudios y de análisis geológico-geotécnico para prediseñar las obras civiles estimando las cantidades de obra y costo con mayor certidumbre.

Tabla 2  
 Características Meteorológicas P.H. La Yesca.

Meteorológicos	
Temperatura máxima/mínima	46.9/ 12 °C
Temperatura de diseño máxima/mínima	37.5/ 20.6 °C
Temperatura de bulbo seco promedio	37,0 °C
Humedad relativa verano/invierno	36,4/48,6 %
Humedad relativa promedio	38%
Aceleración horizontal máxima del terreno	0,2g Gals
Presión barométrica	98 kPa
Velocidad del viento	110 km/h
Temperatura promedio del agua	27,18 °C
Temperatura mínima del agua	23,83 °C
Zona climática/Ambiente	Cálida subhúmeda/Rural

Tabla 3 Generación

Generación	
Factor de planta	0,19
Energía firme	943,00 GWh
Energía secundaria	267,00 GWh
Incremento de energía firme en El Cajón/Central Hidroeléctrica Aguamilpa, atribuible al proyecto hidroeléctrico La Yesca	118.5/22.7 GWh
Generación media anual total	1 210,00 GWh

Tabla 4 Datos Hidrológicos

Hidrológicos	
Área de la cuenca	51,990 km <sup>2</sup>
Escorrentamiento medio anual	3,088.2 hm <sup>3</sup>
Avenida máxima registrada	7,191 m <sup>3</sup> /s
Gasto medio anual	97.86 m <sup>3</sup> /s
Gasto medio aprovechable	92.05 m <sup>3</sup> /s
Periodo de registro	54 años

Tabla 5

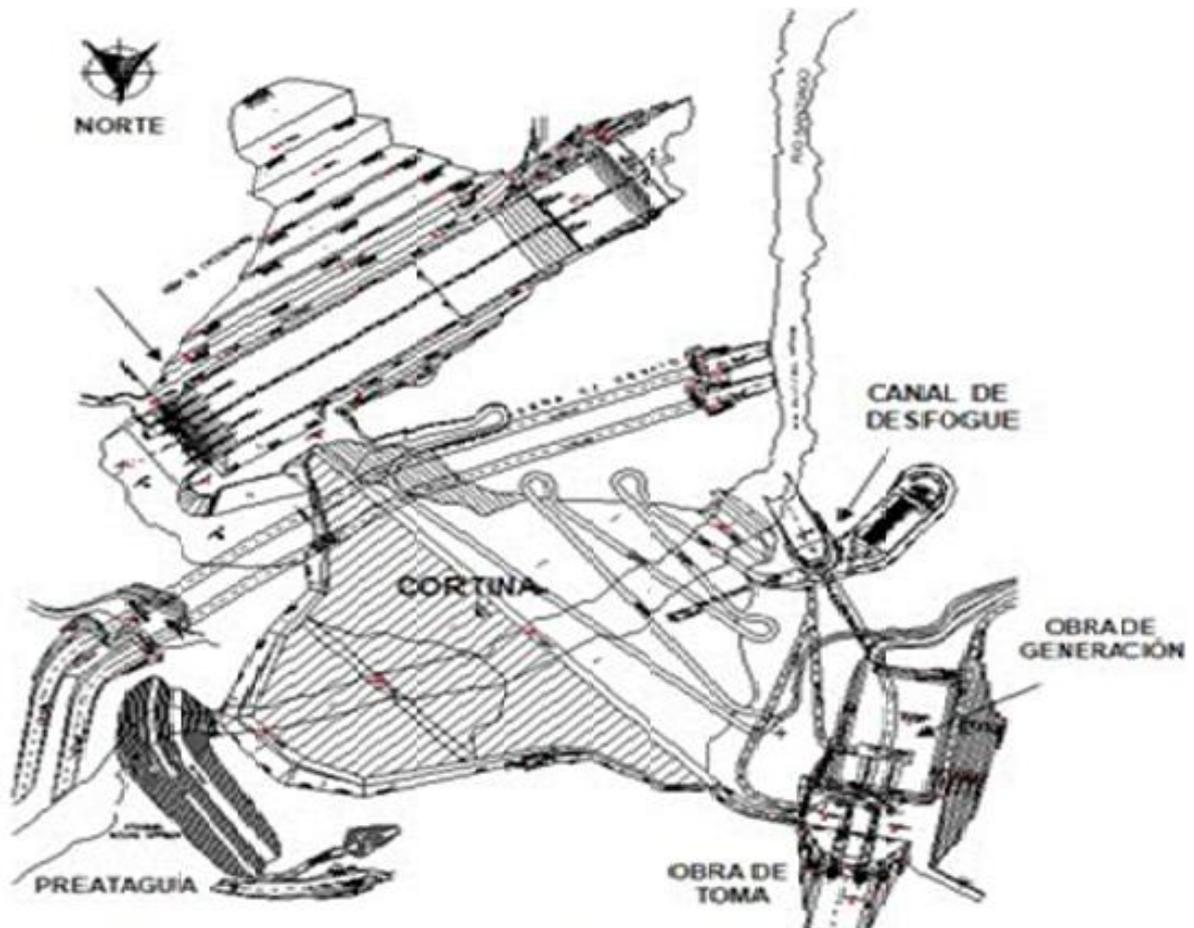
Vaso de almacenamiento

Vaso De Almacenamiento	
Elevación al NAMINO (nivel mínimo de obra)	518 m
Elevación de diseño (corresponde a la carga de diseño de la turbina)	556,49 m
Elevación al NAMO (nivel máximo de obra)	575 m
Elevación al NAME (nivel máximo de estructura)	578 m
Capacidad útil para generación	1 392 Mm <sup>3</sup>
Capacidad de control de avenidas	100 Mm <sup>3</sup>
Área al NAME (nivel máximo de estructura)	33,40 km <sup>2</sup>
Área al NAMO (nivel máximo de obra)	32,50 km <sup>2</sup>
Área al NAMINO (nivel mínimo de obra)	17,60 km <sup>2</sup>

### 1.3. OBRAS ASOCIADAS AL PROYECTO

El esquema general del proyecto como se muestra en la figura 1.3.1. se describe de la siguiente manera: Obra de contención de tipo enrocamiento con cara de concreto de 220m de altura, medidos desde el desplante del plinto hasta el parapeto; obra de desvío con 2 túneles de sección portal de 14m de alto en la Margen Izquierda.

Fig. 1.3.1 Arreglo general de las obras principales.



### 1.3.1. Obras de desvío.

Consiste en dos túneles (14mX14m) localizados en la margen izquierda del río, excavados en roca y revestidos de concreto hidráulico en la plantilla y paredes y concreto lanzado en la bóveda. Fueron diseñados para transitar la avenida de diseño (5,730.60 m<sup>3</sup>/s) y cada uno cuenta con una lumbrera revestida de concreto para alojar y operar los obturadores accionados por malacates estacionarios para el control del flujo de agua. La compuerta se deslizará por una lumbrera vertical revestida de concreto por medio de un malacate y el mecanismo instalado estará en la plataforma junto al marco que soportará la compuerta durante el cierre final. Los portales de entrada y salida serán excavados en roca. (Ver Fig. 1.3.2.)

La obra de desvío 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 del fondo del cauce del río, para evitar filtraciones hacia la zona de construcción de la cortina, garantizando la correcta construcción del núcleo y pantalla impermeables. Para tener las condiciones adecuadas para el desplante del plinto -consistente en mantener seca dicha zona- es conveniente realizar la construcción de las ataguías antes del período de lluvias.

Fig 1.3.2. Construcción de dos túneles de desvío de 14m x 14m cada uno; longitud T1= 693.35m, longitud T2= 750.57m. (lado izq. Dimensiones, lado der. Entrada túnel de desvío)

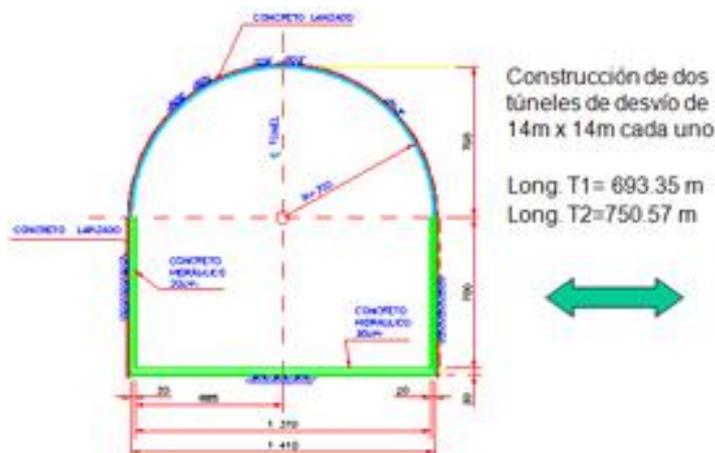


Tabla 6 Características túnel de desvío

Número de túneles	2
Sección portal	14x14 m
Longitud túnel 1	693.35 m
Longitud túnel 2	750.57 m
Gasto máximo de la avenida	7,578 m <sup>3</sup> /s
Gasto máximo de diseño	5,737,78 m <sup>3</sup> /s
Velocidad máxima de descarga	16.40 m <sup>3</sup> /s
Volumen de la avenida	2,250.94 Mm <sup>3</sup>
Elevación de entrada t1	392 msnm (metros sobre el nivel del mar)
Elevación de salida t1	387 msnm
Elevación de entrada t2	397 msnm
Elevación de salida t2	387 msnm
Elevación máxima de descarga	438.27 / 406.40 msnm

<u>Aguas arriba / aguas abajo</u>	
Obturadores 2 para t1 (ancho x alto)	6X14 m
Obturadores t2 (ancho x alto )	14X14 m
Carga hidráulica máxima ( t1 / t2 )	27 / 38 m
Masa estimada de cada	80 / 220 t

elemento	
Periodo de retorno (Tr)	100 años
<u>Atagüía aguas arriba</u>	
Elevación de la corona	439,00 msnm
Ancho de la corona	12,00 m
Longitud de la corona	229,49 m
Talud aguas arriba y aguas abajo	1.4:1

<u>Atagüía aguas abajo</u>	
Elevación de la corona	409.00 m
Ancho de la corona	8,00 m
Longitud de la corona	107.71 m
Talud aguas arriba y aguas abajo	1.8:1

### 1.3.2. Obra de contención

La cara de concreto contará con un sistema de sellos y juntas de cobre y PVC que también irán en la junta perimetral plinto-cara de concreto. Estas protecciones garantizarán que las filtraciones sean mínimas. Para medir éstas, se ubicará una galería filtrante al pie de la cortina en la zona aguas abajo, de tal manera que se capten todas las que ocurran por el cuerpo de la presa y se pueda medir el gasto de filtración en cualquier época del año. (Ver Fig.1.3.3.)

• Cortina Tipo	Enrocamiento con cara de concreto
• Elevación de la corona	579 m
• Elevación máxima del parapeto	580,50 m
• Elevación máxima de terracerías	576 m
• Longitud de la corona	628,77 m
• Altura total al desplante (incluye parapeto)	220m
• Elevación de desplante	375 m
• Altura bordo libre	2,50 m
• Ancho de la corona	11 m
• Talud aguas arriba	1,4 :1
• Talud aguas abajo	1,4 :1

### 1.3.3. Obra de Generación

Se localiza en la margen derecha del río y consiste en una obra realizada de concreto reforzado y rejillas metálicas. La estructura de control cuenta con dos compuertas deslizantes de servicio operadas con servomotores. Su conducción de agua hacia la casa de máquinas se hace mediante dos túneles circulares a presión, hechos de concreto reforzado en su primera parte y posteriormente revestidos con camisa metálica.

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

La subestación se ubicará en una plataforma exterior y contará con blindaje tipo SF6. (Fig.1.3.4.)

#### 1.3.4. Obra de excedencias

Diseñada para un gasto máximo de 15,915 m<sup>3</sup>/s; inicia en un "canal de llamada" excavado a cielo abierto en la margen izquierda. Su zona de control está formada por el cimacio (remate de columna en forma de "S") y pilas de concreto reforzado para conformar seis vanos (huecos en los muros), los cuales están equipados con compuertas radiales operadas por servomotores. Y el canal de descarga (de 95m de ancho) es de sección rectangular revestido con concreto reforzado y aireadores en el piso, rematando en una cubeta deflectora tipo salto de ski. (Fig.1.3.5.)

La obra de excedencias consiste en un canal de llamada a cielo abierto, un canal de descarga en tres secciones por las características topográficas del terreno con capacidad para conducir un caudal de hasta 15,915 m<sup>3</sup>/s, que corresponden a un período de retorno de 10,000 años, es decir, un evento que podría producirse, al menos una vez dentro de ese período. Como dato de comparación, este gasto es igual a 250 veces la dotación de agua para la zona metropolitana de la Ciudad de México y área conurbada.

Obra De Control Y Excedencias	
Tipo	Canal
Gasto máximo de diseño	15 915 m <sup>3</sup> /s
Gasto unitario máximo de descarga	209,86 m <sup>3</sup> /s/ m
Volumen de la avenida de diseño	5 283 hm <sup>3</sup>
Período de retorno de la amp (Tr)	10,000 años
Velocidad máxima en la descarga	40 m/s
Carga sobre la cresta	22 m
Elevación de la cresta	556 m
Longitud total de la cresta	72 m
Carga hidráulica máxima	22,04 m

Compuertas radiales	6 piezas
Dimensiones (ancho x alto)	12 x 22,40 m
Masa estimada de cada compuerta	150 t
Relación alto / ancho	1,87
Mecanismos para izaje-	servomotores
Elementos de cierre auxiliar	tablero de agujas
Dimensiones (ancho x alto)	12,0 x 22,08
Carga hidráulica máxima	22,06 m
Mecanismos para izaje	grúa pórtico

Fig.1.3.3. Obra de contención: Cortina.



Fig. 1.3.4. Obra de generación: diseño de tuberías a presión

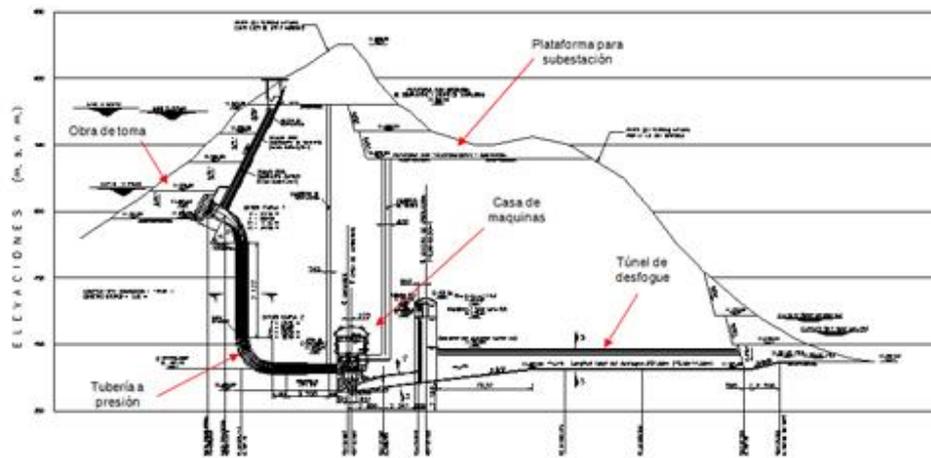
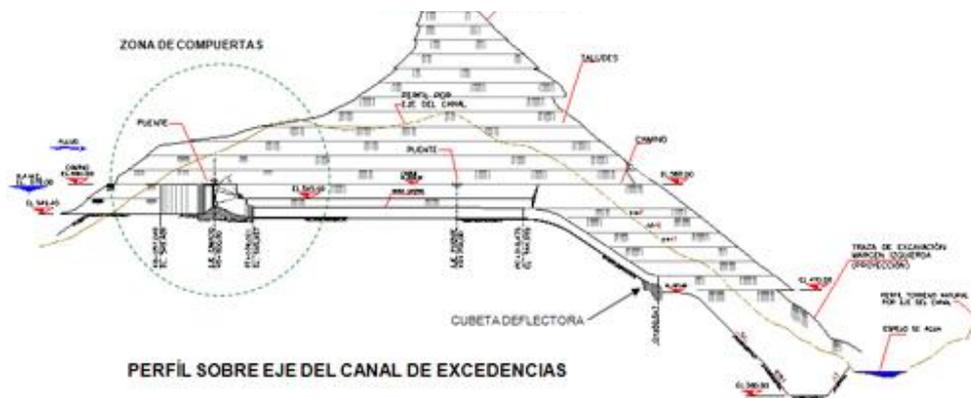


Fig. 1.3.5. Obra de excedencias: Perfil canal de excedencias



#### 1.4. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS REALIZADAS EN EL PROYECTO.

Las obras asociadas corresponden esencialmente a las vialidades definitivas, las plataformas de operación, una clínica del IMSS, campamento (dormitorios, unidades deportivas, comedor, almacén y oficinas) y se suman a las obras de compensación y beneficio social en las que destacan el puente de Analco (Paso del Rosario), 3 puentes sobre el río Bolaños; 25 Km. del camino.

de Hostotipaquillo a la presa; 40 Km. del que unirá la presa con la cabecera municipal de la Yesca; 35 Km. que unirán definitivamente a Hostotipaquillo y Magdalena con San Pedro Analco, mas la ampliación y modernización del que une la carretera federal No. 15 con el acceso al Proyecto, así como el nuevo libramiento de Magdalena que vendrá a resolver el grave problema de tránsito por el centro de la población al margen de facilitar el acceso de equipo y materiales para la instalación permanente en la futura Central Hidroeléctrica y, finalmente el reacomodo de todos los afectados en el Paso de la Yesca.

Beneficios del proyecto

1. Incremento en la generación de El Cajón/Aguamilpa (2/9GWh).
2. Cambio de energía secundaria a firme en El Cajón/Aguamilpa (118.5/22.7 GWh).
3. Permitirá la diversificación de fuentes de energía.
4. Creación de 5,000 empleos directos e igual cantidad de indirectos durante su construcción, estimada en 54 meses.
5. Construcción del puente Analco, sobre el río Bolaños.
6. Restitución y mejora del acceso a La Yesca.
7. Importante derrama económica en la región.
8. Capacitación de los lugareños en diversas actividades productivas.
9. Mejoras sociales en los poblados Mesa de Flores, Hostotipaquillo y La Yesca.
10. Mejora en las vías de acceso terrestre de la región.
11. Propiciará la actividad pesquera, comercial y turística.
12. Interconexión fluvial a lo largo del embalse, mejorando la comunicación de la zona.

## CAPITULO II

### 2. DISEÑO DE TRATAMIENTOS

- 2.1. PRUEBAS DE INYECCIÓN.
- 2.2. TRATAMIENTOS DE INYECCIÓN POR CONSOLIDACIÓN.
- 2.3. PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACIÓN.
- 2.4. EQUIPO.
- 2.5. PLANTA PARA LA REALIZACIÓN DE MEZCLA Y ESTACIONES DE INYECCIÓN.

## INTRODUCCION:

Las inyecciones consisten en un conjunto de operaciones necesarias para rellenar huecos o fisuras no accesibles en el terreno. Su objeto fundamental es mejorar las características mecánicas del suelo (incremento de resistencia, disminución de la deformabilidad, etc.) así como la disminución de la permeabilidad. El fluido de inyección es variable, pudiendo ser exclusivamente químico (resinas y mezclas). Las presiones en las inyecciones convencionales no suelen sobrepasar los 50 bar.

La técnica del Jet-Grouting tiene múltiples aplicaciones (mejora del terreno, impermeabilización, túneles, etc.), siendo el fluido de perforación también variable (cemento, bentonita, mezclas químicas, etc.)

Su ejecución se desarrolla en dos fases, la primera la perforación hasta la cota final y la segunda la inyección del fluido y la recuperación de la tubería simultáneamente. En este caso las presiones de inyección son elevadas, ent. Las variables en la ejecución son presión, velocidad de rotación, velocidad de avance y consumo de cemento, fundamentalmente. El radio final de la inyección dependerá de dichas variables y de las características geotécnicas del terreno.

### Aplicaciones

- Pantallas de contención de excavaciones.
- Refuerzo de cimentaciones.
- Cimentaciones de edificios o estructuras.
- Paraguas para el emboquille de túneles.
- Recalces de edificios con patologías.
- Compensaciones de subpresiones en cimentaciones

## 2.1. PRUEBAS DE INYECCIÓN.

Este procedimiento aplica para los tratamientos de inyección de consolidación pantalla profunda y drenaje que se realizan o se realizaron desde el plinto y las galerías de inyección inspección y drenaje para el proyecto Hidroeléctrico la yesca.

El tratamiento de la roca tiene la finalidad de garantizar la estabilidad del macizo rocoso y de las obras que ahí se construyan, por lo cual el Contratista tiene la responsabilidad de conocer la naturaleza geológica de la zona de las obras, con la que obtenga como resultado de su visita a la obra, con la información previa del concurso y con la que obtenga por otros medios. Comisión ha realizado estudios geológicos y geotécnicos para el desarrollo del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, Jal-Nay., tanto en su etapa de estudios de pre factibilidad como en su etapa de pre construcción. El primer estudio geológico data del año 1984, y posteriormente se hace otro en junio de 1988 que se complementa con información de los años 2005 y 2006. Los resultados de estos estudios se entregan al Contratista como información de referencia, con la advertencia de que las conclusiones que de dicha información obtenga, serán de su exclusiva responsabilidad. Comisión no asume compromiso alguno de las consecuencias y costos económicos que se deriven de conclusiones equivocadas de estos estudios. Por tanto, el Contratista tiene la obligación de verificar la información que se le entrega y de realizar los estudios geológicos y geotécnicos complementarios, si así lo considera necesario; para garantizar la estabilidad de las excavaciones en roca con los tratamientos de la roca que así se requieran, por lo cual debe considerar en su oferta los costos que implican estos trabajos.

### 2.1.1 Tratamiento superficial del terreno

Consiste en realizar una limpieza superficial del terreno, de manera minuciosa, hasta encontrar roca sana o competente en toda el área de desplante de las diversas estructuras, retirando todos los materiales indeseables como son depósitos de talud, material aluvial, roca intemperizada, fisurada y/o altamente fracturada. Las actividades que comprende el tratamiento superficial de la roca, son:

- Limpieza y amacice hasta el nivel de desplante.
- Tratamiento de las discontinuidades geológicas 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.

## 2.2. TRATAMIENTOS DE INYECCIÓN POR CONSOLIDACIÓN.

### 2.2.1. INYECCIONES DE CONSOLIDACIÓN:

Tienen como propósito mejorar el módulo de deformabilidad de la roca de cimentación, mediante la inyección de mezclas a presión, a través de barrenos perforados previamente en un arreglo geométrico definido.(como se muestra en la figura 2.2.1.)

Con esta inyección se trata de sellar las fisuras o grietas existentes en la masa de roca. Este tratamiento generalmente se aplica en el terreno de cimentación de la cortina y en la roca circundante a las tuberías a presión.

### 2.2.2. LAS CARACTERISTICAS DE LAS LINEAS DE LOS BARRENOS DE CONSOLIDACION:

Las líneas de los Barrenos de consolidación de caracterizan por:

La profundidad.

La profundidad de los barrenos de consolidación depende de las condiciones geológicas del terreno.

Separación de barrenos:

La separación entre las perforaciones también depende de las condiciones geológicas del terreno.

En macizos rocosos muy fracturados la separación entre los barrenos se reduce a 3 metros, ya que no es posible aplicar presiones de inyecciones muy elevadas pues se corre el riesgo de fracturar más el terrenos y llegar a hacer una condición llamada hidrofracturamiento. Mientras que en terrenos fracturados la separación puede ser de 5 a 6 metros de separación

## ETAPAS DE INYECCIÓN

La perforación e inyección de los barrenos se realizan por etapas con el objeto de lograr la consolidación progresiva de las fracturas en el terreno.

En la primera etapa la separación de los barrenos es de aproximadamente 12 metros dependiendo de la zona donde se va a inyectar y de las características del terreno. Los barrenos se inyectan en toda su longitud en tramos de 5 metros de profundidad.

En la segunda etapa los barrenos se colocan entre los barrenos de primera etapa ósea que quedan la mitad entre barrenos de primera etapa de separación. La tercera etapa es de igual manera entre barrenos de segunda y primera etapa. Por lo general esta etapa es la última que se realiza de forma sistemática. Solo se perforan e inyectan barrenos adicionales en aquellas zonas donde los consumos de mezcla hayan sido altos.

Se considera que un consumo es alto cuando en la curva que se maneja se vayan estos por alto consumos las cifras varían dependen de la curva empleada y la calidad del terreno aproximadamente es cuando se a inyectado 30 kilogramos de cemento pero esto es variable.

### 2.3. PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACIÓN.

#### 2.3.1. INYECCION DE IMPERMEABILIZACION:

Consiste en la impermeabilización de la roca mediante inyecciones a través de perforaciones profundas, sellando fracturas o discontinuidades geológicas (fallas, diques, etc.) existentes, con el propósito de reducir la permeabilidad del terreno al formar una barrera lo suficientemente profunda para garantizar la estanqueidad de la obra. Inyección del contacto entre la roca in situ y el límite inferior de la pantalla flexible o muro plástico de las ataguías, para lograr la continuidad de la pantalla flexible, y garantizar la estanqueidad del terreno.

La inyección de pantalla en túneles se efectúa a efectos de estabilización o para sellar las fugas o grietas visibles. La inyección se realiza radialmente en forma de abanico, ya sea perpendicular al eje longitudinal o en una dirección que cruce tantos planos de grietas y fisuras como sea posible, La presión de la mezcla utilizada es limitada.

La inyección de pantalla también se efectúa para impedir que el túnel se convierta en una tubería de drenaje en la roca al cabo de algunos años cuando las grietas rellenas con carácter temporal vuelvan a quedar limpias. También tiene por objeto reducir la permeabilidad del macizo rocoso y las potenciales filtraciones a través de sus discontinuidades. Una pantalla se forma por medio de las perforaciones e inyecciones de una serie de barrenos dispuesta en una o más líneas paralelas. Las pantallas para presas se extienden por debajo del cuerpo de la cortina desde el fondo del cauce hasta la parte alta de las laderas de apoyo o empotramiento de la estructura.

### 2.3.1. LAS CARACTERÍSTICAS DE UNA PANTALLA SE DEFINEN POR:

**Numero de líneas:** Es el numero de líneas que forman la pantalla de impermeabilización. El cual depende de la resistencia mecánica, fractura miento y permeabilidad del terreno. Cuando es difícil aplicar altas presiones para realizar la inyección por que el terreno es débil. Se proyectan dos o más líneas paralelas.

**Profundidad:** Depende generalmente de las condiciones geológicas del terreno, existen casos extremos donde la roca presenta muy baja permeabilidad y no se requiere de pantalla. Mientras que en otros las condiciones geológicas son muy desfavorables que involucran zonas profundas con alta permeabilidad que resulta la profundidad de pantalla mayor que la misma cortina.

Cuando existen dudas a cerca de la permeabilidad del terreno a profundidad se proyectan las pantallas de tal forma que las primeras perforaciones sean mas profundas que las siguientes con separación de 12 o 24 metros entre ellas para que sirvan como barrenos exploratorios. En ellos se efectúan pruebas de permeabilidad antes de ser inyectadas y en casos necesarios, los barrenos subsecuentes se profundizan hasta las zonas de altas permeabilidad.

**Inclinación del plano de pantalla:** Estas características de la pantalla dependen de la densidad, rumbo y echado de las discontinuidades.

La dirección de las perforaciones de proyecta de tal forma, que estas crucen el mayor numero de discontinuidades y en la forma mas apropiada para que la mezcla de inyección penetre en los huecos con facilidad. El ideal seria que las perforaciones atravesaran los planos en forma normal, lo cual es poco factible de lograr en todos los casos, pero en los ángulos de hasta 60° entre las discontinuidades y el barreno. Son aceptables.

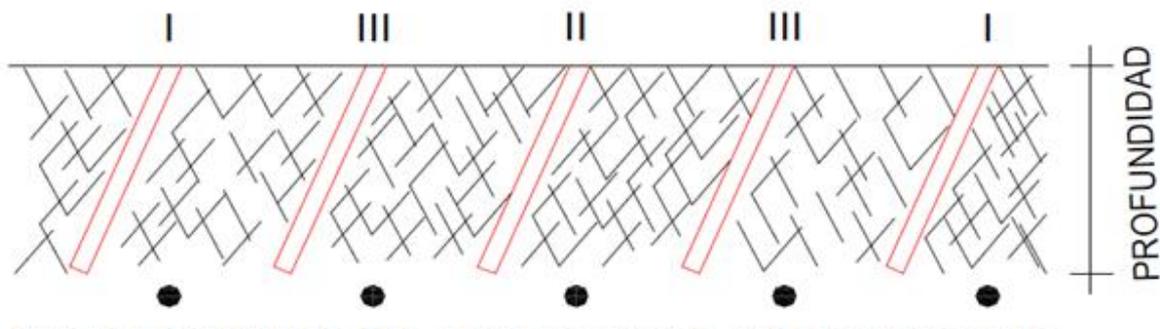
Separación de barrenos: La separación entre las perforaciones se establece en función de la penetración de la mezcla y de la resistencia mecánica del macizo rocoso. En rocas muy fracturadas la separación entre los barrenos se reduce, ya que no es posible aplicar presiones de inyección altas sin correr el riesgo de provocar un hidrofracturamiento. Valores típicos de separación final de los barrenos son de 2 a 3 metros con fractura miento regular.

## ETAPA DE INYECCIÓN

La perforación e inyección de los barrenos se realizan por etapas con el objeto de lograr la consolidación progresiva de las fracturas en el terreno. En la primera etapa la separación de los barrenos es de aproximadamente 12 metros dependiendo de la zona donde se va a inyectar y de las características del terreno. Los barrenos se inyectan en toda su longitud en tramos de 5 metros de profundidad. En la segunda etapa los barrenos se colocan entre los barrenos de primera etapa ósea que quedan la mitad entre barrenos de primera etapa de separación. La tercera etapa es de igual manera entre barrenos de segunda etapa. Por lo general esta etapa es la última que se realiza de forma sistemática. Solo se perforan e inyectan barrenos adicionales en aquellas zonas donde los consumos de mezcla hayan sido altos.

Se considera que un consumo es alto cuando en la curva que se maneja la grafica siga cruzando la curva PxV (presión contra volumen) y alcanzar la presión mínima ni reducir su gasto, entonces se van estos por alto consumos las cifras varían dependen de la curva empleada y la calidad del terreno aproximada mente es cuando se a inyectado 30 kilogramos de cemento pero esto es variable.

Fig 2.2.1. Etapas de inyección por consolidación e impermeabilización.



## 2.4. EQUIPO.

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

Equipo mezclador

- Turbo mezclador de altas revoluciones (1250 rpm) 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.
- Agitador o mezclador de bajas revoluciones (60 rpm). Se utiliza para fabricar morteros o para depositar la mezcla previamente preparada en el turbo mezclador, manteniendo en suspensión las partículas sólidas y eliminando las burbujas de aire de la mezcla, de tal manera que la operación o proceso de inyectado sea continua. Se recomienda que la capacidad mínima de estos agitadores sea de 200 litros. (Ver Fig. 2.4.1.)

Tuberías:

Las tuberías que se utilicen deben ser metálicas, con el diámetro, acoplamientos y cambios de dirección adecuados para disminuir en lo posible las pérdidas por fricción; con las válvulas adecuadas para el tipo de fluido que transporten y las protecciones contra la intemperie, contra las voladuras y el paso de vehículos de transporte.

Es particularmente importante utilizar válvulas de diafragma en los circuitos de aire comprimido.

En las conducciones de mezclas, es obligado el uso de válvulas de esfera o bola, ya que permite el paso en toda la sección de la conducción, y por su construcción se pueden desmontar sus partes rápidamente sin necesidad de desmontar la carcasa y dar el mantenimiento requerido, sin causar retrasos cuando suceda un taponamiento durante el proceso de inyección.

Las tuberías de inyección en operación y expuestas a la intemperie, deben protegerse del sol para evitar que aumente la temperatura de las mezclas de cemento, ocasionando una aceleración en el fraguado de las mismas. Deben protegerse cubriéndolas con un material aislante de fibra de vidrio y aluminio.

#### Mangueras

Las mangueras que se utilicen deben ser capaces de resistir un tratamiento rudo, para lo cual deben seleccionarse las que estén reforzadas por capas helicoidales de trenzado de alambres de acero, que las hagan resistentes a las sobrepresiones y paso de vehículos pesados y cuya capacidad mínima a la rotura sea de cinco veces la presión de trabajo.

Las mangueras para la conducción de la mezcla hacia la boca del barreno no deben tener normalmente un diámetro interior mayor de 25mm. Esto se debe a la necesidad de mantener una velocidad adecuada de circulación en el sistema, para evitar obstrucciones y el riesgo de que la lechada permanezca demasiado tiempo en el sistema y así evitar que fragüe la mezcla.

#### Medidores de gasto

Deben ser sistemas registradores automáticos de presión y del caudal de inyecciones, dotados de un registrador de línea continua para la presión y el caudal, así como también de un totalizador para la cantidad consumida.

#### Manómetros

Los manómetros son dispositivos para medir la presión, deben tener una capacidad de 1,5 veces la presión máxima especificada de operación, estar protegidos contra el golpe hidráulico (de glicerina) y utilizar protectores de membrana plana o de membrana tubular; además, deben estar debidamente calibrados y certificados por un laboratorio de calibración acreditado. Los manómetros en uso deben revisarse frecuentemente y reemplazarse inmediatamente todo aquel que muestre indicios de inexactitud. El contratista debe contar con medios o Dispositivos para verificar y calibrar los manómetros de la obra. (Fig. 2.4.2.)

Tanque de aforo.

Este debe de contener sin ningún problema por lo menos para la preparación de dos lechadas continuamente, es de suma importancia el tenerlo en optimas condiciones teniendo cuidado de no golpearlo pues esto haría que el volumen del miso cambiara y es una parte fundamental para la preparación de la mezcla de inyección, se debe de revisar por lo menos una vez por mes o a l realizar alguna maniobra o cambiarlo de lugar.

Se recomienda colocarle una rejilla en la base de mismo para retener particular de diámetro considerable se tiene que lavar después de cada jornada de trabajo por turno. Es responsabilidad del personal de calidad tener el mismo perfectamente bien aforado.

Obturador.

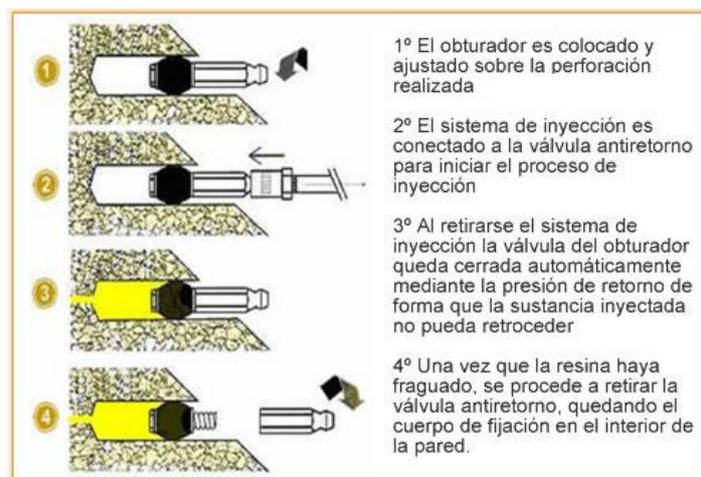
Son dispositivos que se colocan dentro del barreno al final de la tubería de inyección, cuya finalidad es la de aislar el tramo que se vaya a inyectar. Pueden ser neumáticos, mecánicos o de copas de cuero, dependiendo de las condiciones del sitio de inyección y deben tener la capacidad de soportar la presión máxima de trabajo; el Contratista es responsable de su elección, y de cualquier cambio que se haga. (Fig. 2.4.3.)



Fig. 2.4.2. Manometro.



Fig. 2.4.3. Obturador.



## 2.5. PLANTA PARA LA REALIZACIÓN DE MEZCLA Y ESTACIONES DE INYECCIÓN.

Consisten en las instalaciones apropiadas con los equipos e instrumentos necesarios y suficientes para la dosificación automatizada o manual, fabricación, almacenamiento y envíos de las mezclas ya preparadas a través de las conducciones hasta las plantas de inyección y/ola boca del barreno de inyección. Deben estar ubicadas en sitios accesibles para el fácil aprovisionamiento de materiales, estar techadas, y contar con espacios suficientes para alojar una cabina de control, y tanques de agua provistas 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 tarima de madera o metálicas sobre elevadas de 0.30 a 0.50. 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 alas estaciones de inyección con el menor recorrido posible de las mezclas (menos de 70m) Es conveniente que desde estas plantas se puedan enviar las mezclas por gravedad o por bobeo hacia las estaciones se inyección, las cuales se instalan cerca del barreno.

## CAPITULO III

### 3. INYECCIONES EN ESTRUCTURAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA.

- 3.1 TRATAMIENTO MEDIANTE INYECCIÓN.
- 3.2 PERFORACIÓN.
- 3.3 LAVADO DE BARRENOS.
- 3.4 SATURACIÓN PREVIA.
- 3.5 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD (LUGEON).
- 3.6 METODO GIN.
- 3.7 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA PARA INYECCIÓN
- 3.8 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA
- 3.9 TIPOS DE PRUEBAS REALIZADAS A LA MEZCLA (LECHADA)
- 3.10 NYECCIONES EN LA ROCA POR CONSOLIDACIÓN
- 3.11 INYECCIÓN PARA PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACIÓN.
- 3.12 RETAQUE DEL BARRENO.

### 3.1 TRATAMIENTO MEDIANTE INYECCIÓN.

#### 3.1.1. Comportamiento de las inyecciones

El proceso de inyección de cada tramo o progresión puede interceptar la envolvente GIN, en cualquiera de sus tres fronteras: presión máxima, intersección de la curva PxV y por volumen máximo acumulado. Para cada comportamiento, la forma de proceder, para decidir si el tramo ha sido sellado o requiere de reinyecciones subsecuentes, es la que se describe a continuación:

Al alcanzar la Presión máxima:

- a) Cuando se llegue a la presión máxima especificada, ésta se deberá mantener constante durante 3 a 5 minutos y se deberá medir el gasto.
- b) Si este gasto es menor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), la inyección se da por concluida y el tramo se considera sellado.
- c) Pero, si dicho gasto es mayor a 5 litros /minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), se debe realizar un decremento de la presión de 0,49 MPa (5,0 Kg/cm<sup>2</sup>) y mantenerse durante 3 a 5 minutos, para medir nuevamente el gasto.
- d) Si este nuevo gasto resulta menor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), la inyección se da por terminada y el tramo por sellado.
- e) Pero, si el nuevo gasto sigue siendo mayor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), se debe aplicar ahora un incremento de la presión de 0,49 MPa (5,0 Kg/cm<sup>2</sup>) y mantenerla durante 3 a 5 minutos, y medir el gasto nuevamente.
- f) Si ahora el gasto medido es menor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), la inyección se da por terminada y el tramo por sellado.
- g) Pero si este último gasto continúa siendo mayor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), se repiten los pasos c, d, e y f, hasta dos veces como máximo para dar por terminada la inyección del tramo.

Intersección con la curva P x V:

a) Cuando el proceso de inyección registre un incremento rápido de la presión (múltiplo de 0,49 MPa ó 5,0 Kg./cm<sup>2</sup>) y en su trayectoria intercepta la curva PV, se continuará la inyección durante 3 a 5 minutos a la presión a la que llegó después de haber intersecado dicha curva y se medirá el gasto.

b) Si el gasto medido es mayor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), se disminuirá la presión hasta intersecar la curva, manteniéndola durante 3 a 5 minutos y se medirá el gasto.

c) Si el gasto resulta todavía mayor a 5 litros/minuto/tramo, se disminuye la presión hasta intersecar nuevamente la curva, y así sucesivamente hasta cumplir con el gasto menor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), o hasta llegar al gasto mínimo requerido para darlo por sellado o hasta llegar al volumen máximo acumulado especificado, en litros/metro.

d) Al llegar al volumen máximo acumulado se deberá suspender la inyección, se aplicarán los 200 litros de agua para lavar el tramo y el carril del barreno, y se dejará en reposo durante seis horas, para que después de este lapso se prosiga con la inyección como un tramo nuevo. Se deberán considerar solo 3 inyecciones por tramo como máximo.

Al llegar al Volumen máximo:

a) Al llegar al volumen máximo en una primera inyección, sin haberse alcanzado la presión máxima especificada, se suspende la inyección y se bombean 200 litros de agua para lavar el tramo y el carril del barreno y dejarlo en reposo durante 6 horas.

b) Pasadas las seis horas de haberse suspendido la inyección, se reinicia como un tramo nuevo.

c) Si con las dos inyecciones anteriores no se logra el sellado del tramo se debe aplicar una tercera inyección, siguiendo las operaciones indicadas en los puntos a) y b).

d) Si después de la tercera inyección continúa el alto consumo sin llegar a la presión máxima especificada, se ejecutarán barrenos adicionales, como se describe más adelante.

En cualquiera de las tres condiciones anteriores, a juicio de Comisión, si el gasto es cercano al mínimo indicado para dar por sellado un tramo (5 litros/minuto/tramo), se podrá continuar la

inyección manteniendo la presión que se esté aplicando por un lapso de 6 a 10 minutos, con el propósito de comprobar si el tramo está a punto de alcanzar el sellado.

Para casos excepcionales, en donde no se registre presión y se alcance rápidamente el volumen máximo, podría obedecer a oquedades grandes con o sin agua en circulación o a fallas geológicas abiertas, para lo cual será necesario usar mezclas de fraguado rápido, compuestas principalmente de agua, cemento, aditivos fluidificantes, silicato de sodio, y/o morteros, las cuales deben ser diseñadas por el Contratista y verificadas por Comisión.

### 3.1.2. Volúmenes máximos de mezcla en tramos de alto consumo que justifican barrenos adicionales

- Como se mencionó en los casos donde se alcanza el volumen máximo acumulado en una primera inyección de un barreno, sin tener evidencia de hidrofracturamiento o des taponamiento del terreno, se aplicará un volumen máximo de mezcla de 700, 625 o 500 litros, según la curva GIN que se esté utilizando, y se suspenderá la inyección por un lapso de 6 horas, lavando el tramo inyectado y el carril del barreno al suspender la inyección; y después del tiempo señalado, se debe volver a inyectar como un nuevo tramo o progresión. De ocurrir lo mismo en la 2ª reinyección del tramo, se reanuda la inyección bajo el mismo criterio; solo permitiéndose una última 3ª reinyección; en esta última es indispensable la adición de acelerante para el fraguado de la mezcla, pudiendo ser silicato de sodio cuya densidad debe ser de 40° Brumé descrito en el inciso ó aplicar morteros con resistencia a la compresión simple compatible con la mezcla; es decir, solo se aplicará un volumen máximo por tramo o progresión de 2100, 1875 o 1500 litros, según la curva GIN utilizada.
- En la inyección del tramo inmediato superior, al descrito en el párrafo anterior, si se tiene un comportamiento similar (con altos consumos), se podrá iniciar la 2ª reinyección con la aplicación de mezclas con acelerante de fraguado o con morteros.
- En barrenos de tercera etapa (con espaciamiento @ 3 m), en el caso específico de que ocurra hidrofracturamiento o des taponamiento sistemático del terreno en tres inyecciones sucesivas de uno o varios tramos será necesario ejecutar dos barrenos adicionales de cierre, uno a cada lado del barreno en cuestión, quedando éstos a 1,50 m de separación (barrenos de 4ª etapa). La profundidad de los barrenos adicionales será 5 m mayor respecto al tramo más profundo donde se haya registrado el alto consumo.

### 3.1.3. Actividades de control durante los tratamientos de inyección (procesos de producción)

El Contratista debe mantener una estrecha vigilancia de los procesos de producción y/o construcción establecidos en el proyecto y las especificaciones; para tal efecto debe verificar la orientación e inclinación de los barrenos, tal como lo indique el proyecto, haciendo los ajustes por condiciones geológicas, y supervisando los consumos, gastos, presión, tiempo de aplicación de las mezclas que consume el terreno, con apego al método GIN especificado. Deberá también asegurar un adecuado retaque final del carril de los barrenos.

El Contratista está obligado a tener actualizados los planos de avance y de consumo de mezcla durante todo el proceso de inyección. Estos planos deben contener las secciones longitudinales del tramo inyectado y la información geológica que permita interpretar y correlacionar el comportamiento y los consumos registrados, para la toma de decisiones de manera oportuna.

El Contratista deberá implementar un sistema automatizado para el control y el registro de las mediciones de los parámetros establecidos en el criterio GIN, con la finalidad de tener la información del comportamiento de las inyecciones en tiempo real. El software deberá estar diseñado para reproducir las gráficas indicadas en la especificación

### 3.1.4. Criterio para evaluar la liberación de zonas inyectadas

Al término de los trabajos de inyección de la pantalla de impermeabilización, del tapete de consolidación y del contacto concreto-roca; que incluye invariablemente a todos los barrenos de las distintas etapas, inclusive la etapa adicional de inyección (si fuese requerida) por consumos excesivos; se deben verificar y liberar tramos inyectados, juzgando los consumos de mezcla de cemento obtenidos en las diferentes etapas. Solo en casos específicos podría requerirse la verificación por medio de pruebas de permeabilidad.

La revisión y liberación mencionada, se debe realizar por tramos que abarquen por lo menos 4 (cuatro) barrenos de primera etapa con sus respectivas etapas intermedias y adicionales. Para fines de oferta, el Contratista debe considerar que cada tramo de tratamiento por liberar será de una longitud de 36 m lineales.

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

Comisión únicamente aceptará barrenos debidamente inyectados y con adecuado retaque final, a plena satisfacción; solo bajo estas condiciones liberará los tramos.

En casos específicos, podrá requerirse la ejecución de barrenos de verificación para evaluar directamente la efectividad del tratamiento aplicado en una zona determinada del plano de estanqueidad.

Los consumos máximos aceptables, para dar por concluida la inyección de una zona, son los que se indican en la Tabla

Elevacion.	Consumo de mezcla.	
	Kg/m	litros/m
580 a 495	<31	<40
495 a 410	<27	<35
410 a 325	<23	<30

Los valores de consumo en kg/m de la tabla fueron calculados considerando una mezcla con relación agua/cemento (A/C) igual a: 0,95/1,0 + 0,5 a 1,0% de aditivo fluidizante. De considerar otra dosificación, los valores en kg/m deben modificarse en consecuencia.

### 3.1.5. Sistema de control de inyecciones

Este sistema debe recabar la información que genere el “sistema de diseño” y controlar de forma automática el proceso y equipos de inyección, para lo cual el sistema debe tener la capacidad de controlar y/o ejecutar desde una computadora principal lo siguiente:

- Controlar automáticamente el arranque y paro de la bomba al cumplir con los criterios de inyección del proyecto, indicándole al operador de forma instantánea que el tramo inyectado ha sido terminado.
- Las bombas de inyección deben estar equipadas con sensores de presión, caudal electrónicos que envíen la información de forma instantánea a la computadora de control de inyecciones.
- Mostrar gráficamente y de forma instantánea los parámetros de diseño (del sistema de diseño) y previamente programados como: presión, caudal y volumen teóricos.
- Mostrar gráficamente y de forma instantánea los parámetros reales de ejecución como son: presión, caudal y volumen real inyectado.
- Tener un sistema automático de almacenamiento de la información de las inyecciones realizadas y por realizar.
- Reportar de forma instantánea los posibles problemas que se generen durante un proceso de inyección (comunicación con otra perforación, resurgencias, problemas con la bomba de inyección, taponamientos, etc.) indicándolo en el reporte que debe ser generado de forma automática.
- Generar reportes impresos, con toda la información de las inyecciones terminadas y en curso, en cualquier momento que sea solicitado y de forma instantánea desde el sitio de obra.
- Controlar de 2 a 12 bombas de inyección desde un solo punto de trabajo.
- Transferir la información de forma diaria de los trabajos terminados a una memoria para utilizar dicha información y realizar los análisis requeridos.

### 3.1.6. Sistema de representación gráfica de inyecciones

Este sistema debe tomar la información proveniente de los sistemas de diseño y control; y debe tener la capacidad de poder representar de forma gráfica y en 3 dimensiones los parámetros registrados por el sistema de control.

La información proveniente del sistema de control debe ser transferida de forma diaria a la computadora con el sistema de representación gráfica.

El sistema de representación gráfica y en 3 dimensiones debe mostrar los valores siguientes:

- Presiones teóricas
- Presiones reales de inyección (media y final)
- Volumen teórico
- Volumen final
- Tiempo de inyección
- Fecha y horas de los tramos inyectados
- Profundidades inyectadas por tramo

El sistema debe permitir la representación de los valores en colores según los rangos deseados de tal forma que el análisis de zonas de bajo, medio y alto consumo se puedan visualizar de forma rápida y exacta.

### 3.2. PERFORACIÓN.

Debe seleccionarse el diámetro óptimo del barreno, de tal forma que se obtenga un eficiente proceso de inyección. Hasta su longitud de proyecto, respetando el orden o 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 los planos de proyecto.

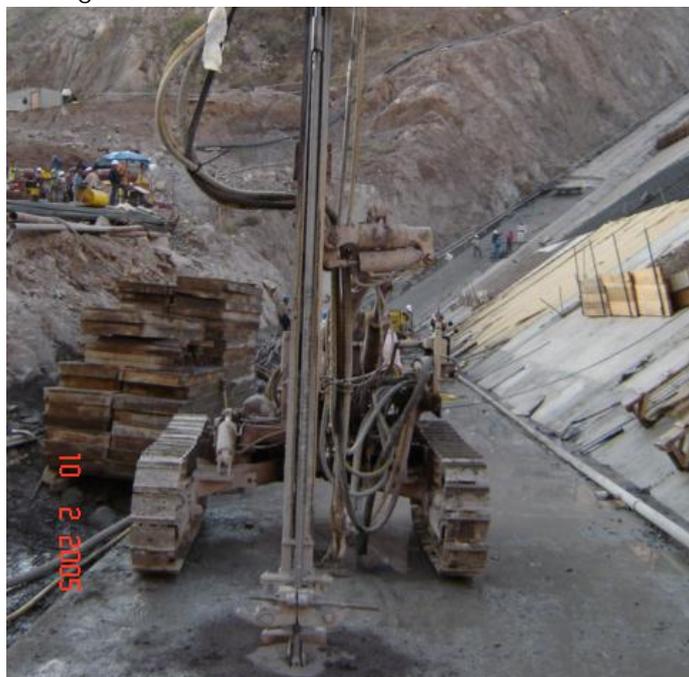
#### 3.2.1. PERFORACION DE CONSOLIDACIÓN:

La perforación para la consolidación, se realiza con equipos de roto percusión con el martillo integrado en la parte superior y/o con martillo de fondo, con dispositivo alimentador de agua para disipar el polvo que genera la propia perforación las perforadoras serán alimentadas por un compresor de aire comprimido. La profundidad, rumbo e inclinación de los barrenos será la que se indique en los planos del proyecto. (Ver Fig.3.2.1.)

La perforación, se realiza en una sola operación desde que se inicia hasta la profundidad que indique el proyecto. El diámetro de los barrenos de consolidación es 2 ½”, esto debido a que no se fallan los barrenos. Los tratamientos de consolidación se realizan en cortes (entre 8 y 20 m).



Fig. 3.2.1. Perforación de consolidación



### 3.2.2. PERFORACION PARA PANTALLA PROFUNDA:

La perforación para la pantalla profunda de inyección, se realiza con un equipo track drill o similar, con unidad de rotación y martillo de fondo puede usarse también equipo con solo sistema de rotación( La profundidad de estos barrenos, es del orden de 50 m, y de los barrenos de exploración pueden alcanzar longitudes de 80 m. de acuerdo a como se presenten las condiciones geológicas. (Fig. 3.2.2.)

Para el caso de la pantalla de inyecciones se tienen considerados barrenos del orden de 50 m de longitud, y otros, llamados de exploración, que pueden alcanzar longitudes hasta de 80 m (profundidad definida por necesidades de índole geológico).

Estos barrenos están ubicados sobre una línea a todo lo largo del plinto y separados 2.0 metros uno de otro, para mayor facilidad, se identifican de la siguiente manera.

Barrenos de exploración	a cada 24 mt.
Barrenos de 1 fase	a cada 8 mt
Barrenos de 2 fases	a cada 4 mt
Barrenos de 3 fases	a cada 2 mt

El diámetro de la perforación para unos barrenos de pantalla es de 3”.

Consultar anexos para ver el arreglo de los barrenos en pantalla de impermeabilización galería GD3.

Criterio para definir la prolongación de la pantalla de impermeabilización

En la tabla, se proporcionan los valores de consumo de mezcla que justifican la profundización de la pantalla de impermeabilización, desde las galerías inferiores de ambas márgenes.

Valores de consumos de mezclas que definirán la necesidad de prolongar la Pantalla de impermeabilización.

ELEVACIÓN.		CONSUMO DE MEZCLA.		COMENTARIOS
DE	A	Kg/m	l/m	
580	495	>39	>50	Se debe prolongar la pantalla hasta 5m por debajo del tramo mas profundo que tuvo el consumo mayor a los limites establecidos.
495	410	>31	>40	
410	325	>23	>30	

Los valores de consumo en Kg./m de la tabla fueron calculados considerando una mezcla con relación agua/cemento (A/C) igual a: 0,95/1,0 + 0,5 a 1,0% de aditivo fluidizante. De considerar otra dosificación, los valores en Kg./m deben modificarse en consecuencia.

Fig. 3.2.2. Perforación para pantalla profunda



### 3.3. LAVADO DEL BARRENO.

Esta actividad se debe realizar previa al equipamiento del barreno, para la inyección de la mezcla, o para la instalación de pernos de anclaje o cuando se requiera la reinyección de un tramo por alto consumo de mezcla.

Consiste en la limpieza del barreno utilizando un chiflón de agua y aire que consiste en un tubo con orificios deben estar orientados hacia las paredes y con la presión necesaria para poder desalojar el detritus de la perforación, así como las partículas que se encuentren sueltas en las grietas, esta limpieza se considera concluida cuando el agua retorna limpia del fondo del barreno, esta actividad es independiente de la que se realiza durante la barrenación.

### 3.4 SATURACIÓN PREVIA.

En la zona que se encuentra por arriba del NAF y antes de iniciar la inyección, se debe saturar la roca. El NAF se podrá medir mediante la utilización de una sonda piezométrica. (Ver Fig. 3.4.1.)

Se debe realizar en tramos de 20 m colocando el obturador en la parte superior de la progresión por saturar, inyectando agua a una presión de 1MPa. La saturación se inicia por el tramo mas profundo del barreno y se continúa en forma ascendente hasta los tramos superiores.

Para los tramos donde se alcance la presión de 1MPa (10kg/cm<sup>2</sup>), se debe seguir un criterio basado en el gasto constante, que consiste en aplicar la presión de 1MPa (10kg/cm<sup>2</sup>), medir el gasto cada 3 minutos. Cuando el gasto se estabilice se continuara la inyección de agua por espacio de 5 minutos mas, en este punto se da por terminada la saturación del tramo.

Fig. 3.4.1. Saturación previa: Ayudante general bombeando agua al barreno.



### 3.5 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD (LUGEON).

Esta prueba tipo lugeon consiste en a inyección de agua a presión ascendente y descendente dentro de una perforación en roca, para la cual mediante un obturador se aísla el tramo que se desea probar y se registra la absorción durante intervalos regulares de tiempo.

La absorción (la absorción es la cantidad de agua, que toma la roca por inyección, en litros por minuto por metro) de 1.0(L/min)/m) de agua, inyectada a una presión efectiva de 0.981Mpa. Así se encuentra la conductividad hidráulica que es la facilidad de los materiales para permitir el paso del agua y un coeficiente de correlación entre presión y absorción que puede ir desde 1 hasta -1 y cuyo valor absoluto define la relación de correspondencia entre las presiones y absorciones. (Fig.3.5.1.)

Clasificación.

Para calificar la conductividad hidráulica (permeabilidad) de cada tramo probado se adoptan los siguientes parámetros:

ABSORCION	UNID. LUGEON	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.
0.0 a 3.0	UL	Tramo n conductivo (impermeable)
>3.0 a 11.0	UL	Tramo poco conductivo (poco permeable)
>11.0 a 25.0	UL	tramo conductivo (permeable)
>25.0 a 40.0	UL	Tramo muy conductivo (muy permeable)
>40.0	UL	Tramo altamente conductivo (altamente permeable)

Descripción del método.

La perforación donde se efectúa la prueba preferentemente debe ser echa con brocas con insertos de diamante o impregnada de 3" de diámetro y se debe usar agua limpia, el agua del río Santiago cumple con las cualidades requeridas bajo algunas características que se deben de mejorar.

Antes de la primera prueba el barreno debe ser lavado cuidadosamente e intensamente. Con agua, el tramo de prueba a realizar no debe ser mayor de 5 metros. En los tramos muy fracturados es preferible una menor longitud, siempre y cuando el tiempo y los recursos disponibles lo permitan.

Previo a la prueba es necesario conocer la litología, recuperación, RQD, si existe o no el NAF y la evolución del nivel de agua de la perforación, ya que dichos elementos son la base para la base para determinar la longitud del tramo de prueba, la presión inicial, los requerimientos de la misma y en general para prevenir y tomar decisiones durante la ejecución de la prueba.

El tiempo óptimo para cada observación es de 10 minutos y se recomienda que no sea menor de 5 minutos tanto, para las presiones ascendentes como para las presiones descendentes. Siempre que sea posible se recomienda efectuar cuando menos 5 observaciones a cada gama.

Las pruebas deben hacerse conforme avanza la perforación, dejando para condiciones especiales probar una vez que el barreno ha concluido.

El resultado se da en unidades lugeon.

De acuerdo con la definición de la prueba, cuando no se conoce suficientemente las características geotécnicas del tramo a probar, se puede iniciar la prueba con una presión efectiva de 0.196 Mpa. Con incrementos similares hasta llegar a 0.981 Mpa.

En caso de detectar que el terreno se deteriora de manera inconveniente con los incrementos de presión, se puede reducir estos a 0.1Mpa En caso de que la obra por concluir se proyecta a mas de 100 metros de altura, si el terreno se presenta, se puede incrementar la presión hasta simular en lo posible la presión a la que se estima estará el terreno incrementando todavía 0.1 o 0.2 Mpa por arriba de dicha presión. El calculo de las UL, para una evaluación representativa, tiene como base la obtención del lugar geométrico determinado por las condiciones iniciales  $p=0$   $A=0$  y los puntos de observación, con un ajuste basado en el metodo de los mínimos cuadrados.

Resultados.

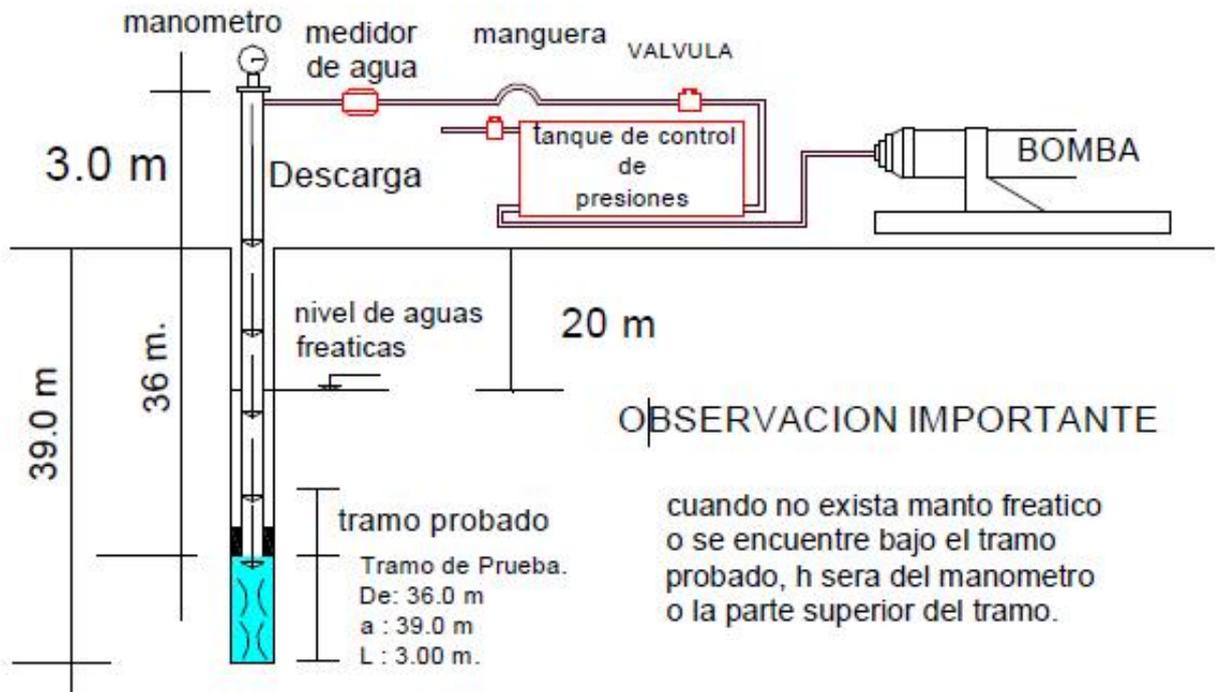
Se debe llevar a cabo un registro de campo con los datos de la prueba, para el cual se anexa formato que es necesario llenar

El reporte de calculo contiene los datos generales de la prueba, las presiones manométricas aplicadas, perdidas por fricción y presiones efectivas en (litros/minutos)/metro. Debe contener una grafica en donde en el eje de las abscisa se indiquen las presiones efectivas y las absorciones en as ordenadas, esto es con el fin de facilitar la comparación entre graficas de diferentes pruebas, en el eje de las presiones se representan hasta 1.5 Mpa y en las ordenadas 40 (litros/minutos)/metro. Para casos con presiones mayores, se duplican la escala y se representa 3.0 Mpa y 80 (litros / minutos)/metro, en el eje de las presiones y las absorciones respectivamente. También, contiene la ecuación del lugar geométrico que den los puntos de as observaciones, las UL calculadas, litología, fracturamiento, recuperación, RQD, así como la información que se considere fundamental para el análisis e interpretación de la prueba.

La conductividad hidráulica (permeabilidad) de cada barreno indicado en la “anatomía” final, es la base para relaciones en secciones geológicas o en bloques geológicos diafragmáticos, la conductividad hidráulica entre los diferentes barrenos.

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 se podrán emplear las pruebas lugeon en las perforaciones exploratorias primarias para tener 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 acabo como comprobación o barrenos de control después del inyectado, para ver si se ha logrado una reducción suficiente en la permeabilidad.

Fig. 3.5.1. PRUEBA DE PERMEABILIDAD (LUGEON)



## 3.6 MÉTODO GIN

La metodología que se propone para la ejecución de los trabajos de inyección, está basada en el Método de Inyección de Presión y Volumen Constante, denominado GIN (por sus siglas en inglés Grouting Intensity)

Este método permite reducir y evitar casi totalmente el problema de hidrofracturamiento si se establece adecuadamente los parámetros de control. Las pruebas de inyectabilidad permiten conocer aproximadamente estos parámetros. Junto con la información geológica y de mecánica de rocas del sitio. Para que los límites de presión y volumen de la curva GIN sean apropiadas a las características del terreno y también para evaluar la necesidad de diferentes curvas GIN en diferentes partes de la obra. (Ver Fig. 3.6.1.)

### 3.6.1. Características.

- Una sola mezcla de inyección estable para todo el proceso de inyección con una relación de agua/cemento por peso (0.65 a 0.90) con un aditivo super fluidizante para reducir la cohesión y la viscosidad y para aumentar la permeabilidad.
- Una velocidad constante de baja a mediana de bombeo de la lechada, que con el tiempo se incrementa gradualmente conforme la lechada penetra más dentro de las fracturas de la roca como se muestra en la figura 3.6.2.
- El monitoreo de la presión. La velocidad del flujo inyectado y la penetrabilidad contra el tiempo, en tiempo real. Por medio gráficos en una computadora PC.
- La terminación del inyectado cuando la trayectoria de la lechada registrada sobre el diagrama de presiones contra volumen total (por metro de intervalo inyectado) intercepta a una de las curvas de volumen limitante, presión límite o intensidad de inyectado limitante como queda dado por la curva de volumen limitante.

Fig. 3.6.1. Inyección de una Fractura.

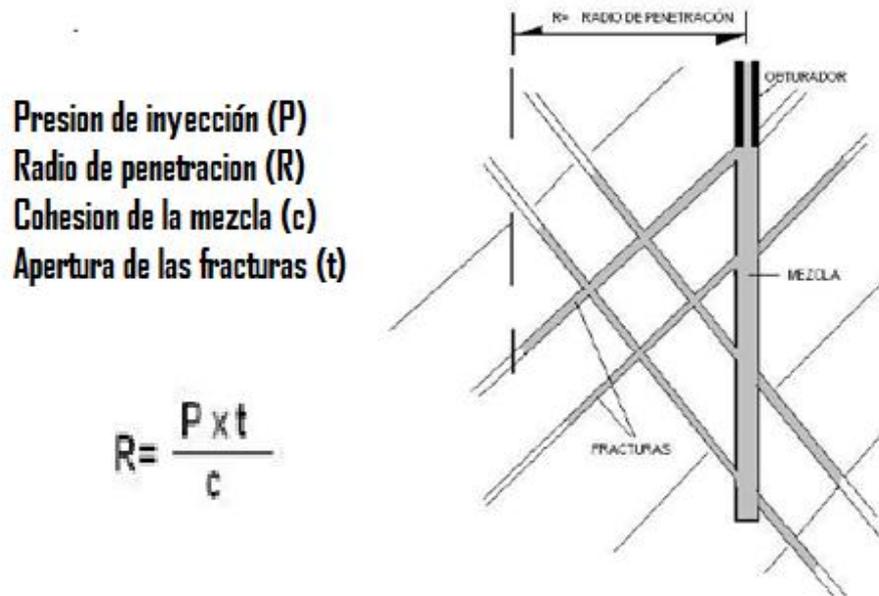
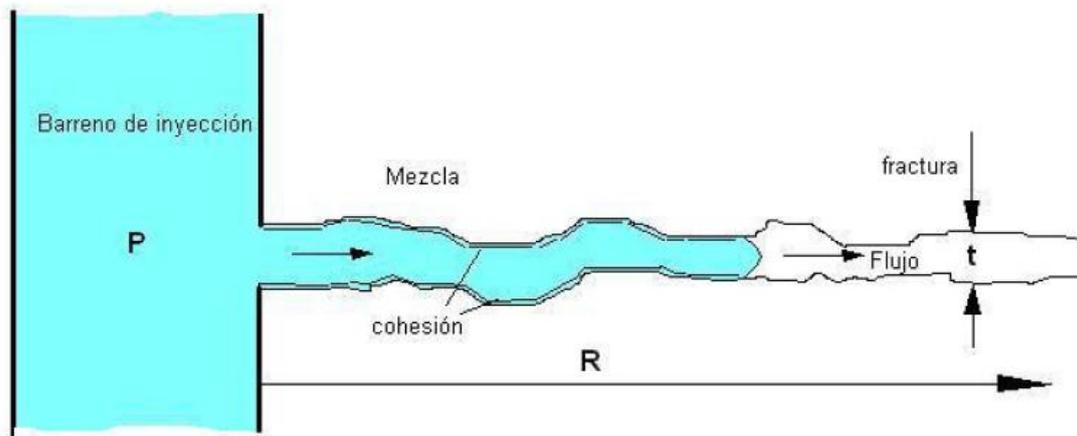


Fig. 3.6.2. Penetración de la lechada.



### 3.6.2. Metodología.

La inyección debe hacerse en tramos de 5 m y en progresiones ascendentes. Durante el proceso se debe monitorear la evolución de la presión, dando incrementos de 0,49 MPa (5 Kg./cm<sup>2</sup>) y el volumen de mezcla por metro (l/m) hasta interceptar la curva o trayectoria GIN seleccionada. La intersección de la curva PV puede darse por las siguientes condiciones: por presión máxima especificada, por intersección de la propia curva GIN, o por volumen máximo establecido.

Para evaluar el comportamiento del terreno, desde el inicio y hasta el final de cada una de las progresiones o tramos inyectados de cada barreno, el Contratista debe llevar un registro continuo de la evolución de la inyección, utilizando 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 gráficas de control de inyección siguientes:

- Presión efectiva (MPa) vs. Volumen acumulado (l/m)
- Presión efectiva (MPa) vs. Tiempo (min.)
- Gasto (l/min.) vs. Tiempo (min.)
- Volumen acumulado (l/m) vs. Tiempo (min.)
- Gasto/Presión (l/m / MPa) vs. Tiempo (min.) (Penetrabilidad)
- Gasto/Presión (l/m / MPa) vs. Volumen acumulado (l/m) (Penetrabilidad)

Los valores b y c deben registrarse en una misma gráfica para visualizar simultáneamente la evolución de la presión y del gasto respecto al tiempo; asimismo, los valores e y f registrados en un mismo gráfico, nos proporcionarán la penetrabilidad o inyectabilidad del terreno.

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

### 3.6.3. Curvas GIN propuestas

En función de las cargas hidráulicas que impondrá el embalse y con base en los resultados de las pruebas de inyección realizadas in situ, se propone de manera tentativa emplear los valores GIN indicados en la tabla.

Estos parámetros son aplicables para los tratamientos de consolidación y pantalla de impermeabilización:

Zona	Elevación (msnm)	CURVA GIN (PxV)		PRESIÓN MAX.		VOLUMEN MAXIMO DE MEZCLA L/m
		Mpa l/m	Kg/cm2 l/m	Mpa	Kg/cm2	
Alta.	Elevación 580 a 495	58,8	600	1,47	15,0	100
Media.	Elevación 495 a 410	98,1	1000	2,45	25,0	125
Baja.	Cauce Elevacion 410 a 325	137,3	1400	3,43	35,0	140

En caso de encontrarse condiciones geológicas distintas a las evaluadas en la etapa de estudios, se podrán redefinir los parámetros arriba asignados; por tanto, conforme se avance en las inyecciones de primera etapa, se evaluarán los resultados obtenidos a fin de hacer los ajustes necesarios, los cuales deben ser aceptados por la Comisión.

Para el caso del tratamiento de fallas geológicas o diques, en principio, podrán aplicarse estos valores, pero podrán modificarse en función del comportamiento particular que se observe.

### 3.7. PREPARACIÓN DE LA MEZCLA PARA INYECCIÓN.

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

Para que la mezcla sea la adecuada, requerida en el proyecto para la inyección es necesario que se ponga bastante atención con todos los componentes de la misma así como su dosificación.

Es necesario que se le de el tiempo suficiente de mezclado, a cada uno de los componentes de la misma, ya que de ello depende para que la mezcla este lo mejor homogénea

La fabricación de la mezcla debe efectuarse con turbo mezcladores de altas revoluciones (mayores a 1250 rpm) colocando los materiales componentes, con base en la dosificación de proyecto, en el orden siguiente: agua, aditivo estabilizador de volumen, cemento, arena (en el caso del mortero) y por último el aditivo fluidificante. Una vez que haya sido adicionado el último componente de la mezcla, ésta debe mantenerse en agitación dentro del turbo mezclador de 1 a 3 minutos, dependiendo de los resultados de pruebas preliminares; después de esto, se envía a los agitadores de bajas revoluciones (60 rpm, como mínimo) de las estaciones de inyección, en las cuales debe mantenerse en agitación durante 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 y tengan una temperatura entre 36 y 38 °C deben desecharse, ó 45 minutos cuando la temperatura de la mezcla 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 del Contratista, bajo su responsabilidad, siempre y cuando cumpla con las propiedades especificadas.

### 3.7.1. Mezcla de inyección:

Se utilizara una mezcla única para todos los tratamientos de consolidación e impermeabilización del macizo rocoso. Dicha mezcla, esta constituida con una relación de agua/cemento (A/C) variable de 0.8/1 a 1/1, en peso de cemento, aditivos súper fluidizantes y estabilizador es de volumen, ambos dosificados al peso del cemento.

Para casos excepcionales, en donde no se registra presión y se alcance rápidamente el volumen máximo, se usan mezclas de fraguado rápido, compuestas principalmente de agua, cemento, aditivos fluidificantes, silicato de sodio, y/o morteros.

## 3.8. DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA.

### 3.8.1. Productos empleados en la inyección (mezclas fabricadas con cemento):

**LECHADA:** Formada por agua cemento y bentonita o puede tener algún aditivo químico para fluidizarla y mejorar su resistencia.

**MORTERO:** Formado por agua, cemento, arena y puede o no tener algún aditivo químico para fluidizarlo y mejorar su resistencia.

**CONCRETO:** Formado por agua, arena, grava y puede o no tener algún aditivo químico para fluidizarlo y mejorar su resistencia.

### 3.8.2. Mezcla única de inyección P.H. YESCA

En lo que respecta a la mezcla única de inyección de la presa hidroeléctrica la yesca se componía por 47 litros de agua, 0.4 kilogramos de bentonita, un bulto de 50 kilogramos de cemento y 0.4 litros de aditivo (RHEOBUILD 716)

### 3.8.3. Cemento

Existen diversos tipos de cemento Pórtland para propósitos específicos. La norma C-150 “Especificación estándar para cemento Pórtland” de la American Society for Testing and Materials (ASTM) estipula ocho tipos de cementos Pórtland:

Tipo I Normal

Tipo IA Normal inclusor de aire

Tipo II De resistencia moderada a los sulfatos

Tipo IIA De resistencia moderada a los sulfatos, inclusor de aire

Tipo III De alta resistencia a edad temprana

Tipo IIIA De alta resistencia a edad temprana, inclusor de aire

Tipo IV De bajo calor de hidratación

Tipo V De resistencia elevada a los sulfatos

Para la presa su utilizo como mezcla única de inyección se utilizo una lechada compuesta de:

Cemex cpp 30r Pórtland (Ver Fig. 3.8.3.)

Desarrollo de mayor resistencia a los 3 días. Este cemento esta elaborado principalmente con clinker gris, yeso natural, y puzolanas naturales. Este cemento corresponde a la clasificación de CPP (Cemento Pórtland Puzolánico) de la actual norma mexicana para cementos en México, NMX-C-414-ONNCCE. El nivel de resistencias a la compresión de nuestro CPP 30R, sobrepasa los límites mínimos de la clase resistente 30 de la norma mencionada.

Resistencia a...		
3 días	28 días	
Mín	Mín	Max
204 kg / cm <sup>2</sup>	306 kg / cm <sup>2</sup>	510 kg / cm <sup>2</sup>
20 N / mm <sup>2</sup>	30 N / mm <sup>2</sup>	50 N / mm <sup>2</sup>

Por su tamaño de partículas resulta conveniente para dar acabados finos o tersos a tus obras y su tiempo de fraguado te permitirá realizar con comodidad las operaciones de transporte, colocación y acabado. La incorporación de puzolanas naturales en su formulación mejora la



Cp: centipoise

Vp: viscosidad plástica

### 3.8.6. Aditivo (RHEOBUILD 716):

Para las mezclas de inyección a base de lechadas debe utilizarse un aditivo súper fluidizante, reductor de agua de alto rango y retardante de fraguado, que al agregarse a la mezcla fresca le provea de una consistencia superfluidad y de alta trabajabilidad, o un aditivo adicionado de estabilizadores especiales, que además de lo anterior, sea acelerante de resistencia. En caso de requerirse, puede emplearse Silicato de sodio (concentración a 40° Baumé) para acelerar el fraguado de la mezcla.

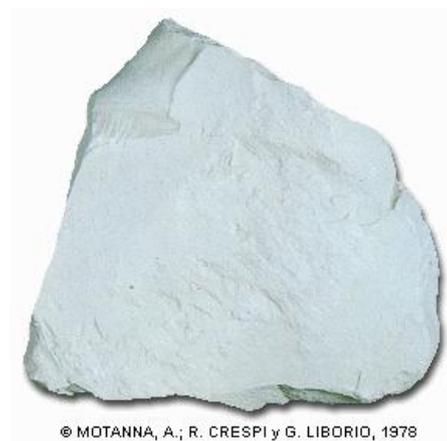
RHEOBUILD 716 asegura que el concreto rheoplástico se pueda seguir trabajando por aproximadamente 1 a 2 horas a 20°. La duración precisa para poder trabajar la mezcla no solo depende de la temperatura, sino también del tipo de cemento, la proporción agua/ cemento, el contenido de aire, la naturaleza de los agregados y del método de transporte. Es altamente recomendable que el concreto se cure adecuadamente especialmente en climas calientes y secos.

## MATERIALES

Fig.3.8.3. Cemento



Fig.3.8.4. Estabilizante (bentonita)



[Fig. 3] Agua (rio santiago y bolaños)



### 3.9. TIPOS DE PRUEBAS REALIZADAS A LA MEZCLA (LECHADA).

El Contratista 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. Estas muestras deben tomarse preferentemente en la válvula de purga ubicada en el brocal del barreno, y se les debe practicar pruebas índice y de resistencia mecánica bajo los métodos indicados en el inciso 6.4.14, para verificar el cumplimiento de los requisitos especificados. Comisión se reserva el derecho de efectuar verificaciones intermedias de estas propiedades, y en caso de existir diferencias importantes o incumplimiento de los requisitos, podrá rechazar las mezclas durante el proceso de inyectado y exigir su corrección y/o ajuste. Las mezclas que se empleen para todos los tratamientos de inyección de impermeabilización y consolidación de la roca, deben cumplir con las características que se describen a continuación.

La relación agua/cemento (A/C) con relación al peso del cemento será variable de 0,8/1 a 1,0/1, dependiendo de los ensayos de laboratorio, adicionando el porcentaje de aditivo súper fluidificante y estabilizador de volumen con relación al peso del cemento. Con estas dosificaciones se deben cumplir las propiedades siguientes:

- Viscosidad al cono Marsh entre 29 y 33 segundos, constante durante una hora.
- Densidad o peso volumétrico entre 1,47 a 1,55 g/cm<sup>3</sup>
- Decantación (sedimentación) menor o igual a 4 % en dos horas
- Cohesión (con placa) menor o igual a 0,03 g/cm<sup>2</sup> ó 0,2 Mm.
- Coeficiente de filtrado menor o igual a 0,6.
- 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 9,8 MPa (100 kg/cm<sup>2</sup>).

Durante los procesos de inyección, las propiedades físicas antes especificadas, deben ser verificadas por el Contratista, para asegurar su cumplimiento. De obtenerse parámetros fuera de los aquí establecidos, el Contratista debe realizar los ajustes necesarios y presentar los resultados a la Comisión. Los métodos de prueba que debe emplear para tal fin son los siguientes:

Viscosidad con cono Marsh.

Se define como el tiempo en segundos que tarda en escurrir 946 ml de mezcla, de un embudo de dimensiones estándar (denominado cono Marsh), de un total de 1500 ml de mezcla depositada en el embudo. (Fig. 3.9.1.)

Densidad aparente.

Se obtiene mediante la balanza de lodos y consiste en llenar con mezcla la copa de la balanza cuyo volumen es de 200 ml golpeándola ligeramente para eliminar burbujas de aire, se tapa dándole un ligero movimiento de rotación. Se coloca la balanza sobre su base y se equilibra, obteniéndose directamente el valor en la escala correspondiente. (Fig. 3.9.2.)

Decantación o sedimentación.

Consiste en vaciar 200 ml de mezcla en una probeta de vidrio de 250 ml, colocándola en una superficie lisa y nivelada, anotando las lecturas del nivel de sólidos a cada 15 minutos durante la primera hora y media, y después a cada 30 minutos, hasta obtener por lo menos dos lecturas iguales, con lo que se obtiene el % de Decantación y el tiempo de estabilización de la mezcla. (Fig. 3.9.3.)

Cohesión.

Se obtiene por medio de una placa de acero inoxidable de 100 x 100 mm y un espesor del orden de 1,5 mm, debe ser lo suficientemente rugosa, por lo cual deberá estar rayada en ambas caras y sentidos @ 5 mm. El ensaye consiste en pesar primero la placa en una balanza de precisión, sumergir la placa en la mezcla dejándola escurrir libremente y pesar nuevamente, la diferencia obtenida se divide entre el área de ambas caras de la placa, y se obtiene la cohesión en g/cm<sup>2</sup>; y dividiendo este valor entre la Densidad de la mezcla, se obtiene la Cohesión en Mm., que sería el espesor de la película de mezcla adherida en la placa. (Fig. 3.9.4.)

Coeficiente de filtrado.

Se obtiene mediante el aparato denominado filtro-prensa y consiste en determinar la cantidad de líquido que se extrae de un volumen determinado de mezcla (200 ml), a presiones de 0,2; 0,4 y 0,7 MPa, durante 30 minutos o en el momento que empieza a salir aire exclusivamente, obteniéndose el volumen de agua filtrada, espesor del "cake" (sólidos retenidos), así como dureza, textura y flexibilidad de los sólidos. (Fig. 3.9.5.)

Resistencia a la compresión simple.

Es el esfuerzo máximo que se aplica a una muestra cilíndrica con relación de esbeltez (H/D) de 2,5 a 3,0 ó cúbica, aplicando incrementos de carga constante de 200 kg/min, hasta llegar a la ruptura o falla. Las probetas deben ensayarse a edades de 7; 14 y 28 días. Previo al ensaye se debe verificar que las caras estén completamente paralelas, en caso de existir alguna desviación pulir las superficies en un vidrio, utilizando polvos abrasivos. (Fig. 3.9.6.)

FIG.

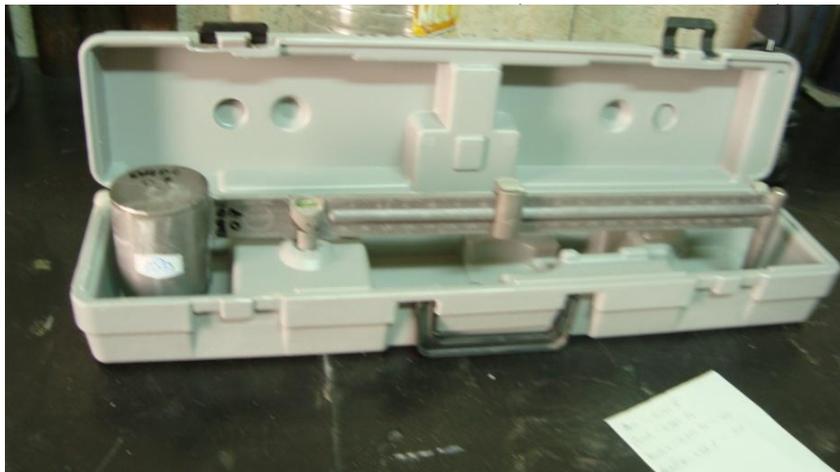


FIG. 3.9.3. Decanta (probeta graduada)

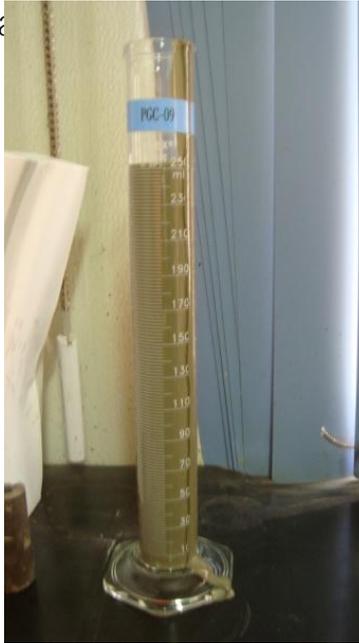


FIG. 3.9.4. (oxidable)



FIG. 3.9.5. (Mesa Baroid)



Fl... on



### 3.10 INYECCIONES EN LA ROCA POR CONSOLIDACIÓN.

El análisis y la interpretación de los estudios geológicos y geotécnicos realizados por Comisión en el sitio de la boquilla del P. H. La Yesca, enfocados a la caracterización del macizo rocoso (mediante barrenos de exploración, pruebas de permeabilidad, pruebas de inyección, etc.) permiten concluir que en el sitio se tienen diversas unidades litológicas (tales como intrusivos de composición granítica, andesitas, ignimbritas de composición dacítica, riódacítica), las cuales se encuentran afectada por diversos sistemas de fracturamiento, fallas, diques y contactos geológicos; por lo cual, se juzga necesario realizar tratamientos por medio de inyecciones que garanticen la estanqueidad del terreno para evitar o reducir en lo posible las filtraciones de agua hacia las zonas de estructuras.

En este inciso se describen los criterios y metodología que se proponen para efectuar los tratamientos de la roca por medio de inyecciones, que servirán para conformar el plano de estanqueidad del proyecto, así como para los tratamientos de consolidación de la roca.

De forma genérica, el alcance de esta especificación comprende los tratamientos siguientes:

- Tratamientos desde el plinto (tapete de consolidación y pantalla de impermeabilización).
- Tratamientos en superficie en ambas márgenes para dar continuidad al plano de estanqueidad (pantalla de impermeabilización).
- Tratamientos desde galerías (pantalla de impermeabilización, consolidación y conexión).
- Tratamientos en tuberías a presión (consolidación de la roca y liga con pantalla de impermeabilización).
- Tratamientos en los tapones de concreto de túneles de desvío (consolidación de la roca y liga con pantalla de impermeabilización).
- Tratamiento de estructuras geológicas en las diferentes obras del proyecto (costureo de fallas).

Los tratamientos antes mencionados, están indicados de forma esquemática en los planos de proyecto que proporciona Comisión a los licitantes, para efectos de evaluación y cuantificación de volúmenes que debe considerar en su oferta. El desarrollo de la ingeniería de detalle, bajo los

lineamientos establecidos en el proyecto, será responsabilidad del Contratista, pero que deberá someter a la revisión y aceptación de la Comisión.

En el plinto, los barrenos de primera etapa que se localicen a 24m de separación deberán profundizarse hasta 70 m en la zona del cauce y hasta 60 m en la porción media a alta de ambas laderas, como se muestra en el plano de proyecto, a fin de explorar las condiciones de la roca a profundidad para confirmar el límite de la pantalla bajo el plinto. Con este mismo propósito, para el caso de las galerías inferiores de ambos márgenes se debe considerar de manera selectiva la profundización de barrenos de primera etapa que se ubiquen a 48 m.

### 3.10.1 Procedimiento de ejecución.

La inyección debe hacerse en tramos de 5 m y en progresiones ascendentes, iniciando a partir del tramo más profundo del barreno, por tanto, el barreno deberá perforarse hasta su profundidad de proyecto, y posteriormente inyectarse.

En casos donde se crucen zonas de fallas o de cuerpos intrusivos (rocas de mala calidad) que induzcan inestabilidad en el barreno y que impidan el avance de la perforación, podrá optarse por la inyección anticipada del tramo anómalo (de acuerdo con la metodología establecida) y posteriormente re perforarse para continuar con la perforación del barreno hasta la profundidad especificada.

- Es importante mencionar que los tramos inyectados anticipadamente, no deberán inyectarse de nuevo cuando se realice la inyección del barreno en tramos ascendentes. De tenerse problemas de obturación, por condiciones de la roca, se puede optar por inyectar tramos menores a 5 m, o un poco mayores (hasta de 7 m); esto será aceptable, siempre que esté debidamente justificado por el Contratista y avalado por la Comisión.
- Una vez iniciada la inyección, no debe detenerse por ninguna causa, siendo un proceso continuo de principio a fin; sin embargo, si esto llega a ocurrir, se debe lavar el carril del barreno empleando un volumen del orden de 200 litros de agua, utilizando el procedimiento del lavado del barreno. Posterior a esto, se deberá iniciar nuevamente la inyección del tramo.
- Durante el proceso se debe monitorear la evolución de la presión registrada en el manómetro instalado en el brocal del barreno, dando incrementos de 0,49 MPa (5 kg/cm<sup>2</sup>), así como registrar el volumen de mezcla acumulado que ha consumido el tramo del barreno en litros por metro (l/m), hasta interceptar la curva o trayectoria GIN seleccionada.

- El gasto mínimo para considerarse sellado un tramo debe ser menor de 5 litros/minuto/tramo, es decir, 1litro /minuto/metro, para tramos de 5 metros de longitud.
- El tiempo entre lecturas podrá ser de 3 a 5 minutos de acuerdo al comportamiento de la inyección; pero podrá reducirse a 2 minutos cuando el gasto ya sea cercano a 5 litros/minuto/tramo inyectado (1litro /minuto/metro).
- El criterio de reducir el tiempo de inyección cuando se esté llegando al gasto mínimo con una presión alta, es con la finalidad de evitar el exprimido prematuro de la mezcla, lo cual provoca taponamientos en la tubería de inyección, principalmente en el extremo inferior del obturador.
- Para evitar estos taponamientos durante el proceso de inyección de un tramo, los incrementos de presión se deben aplicar en forma lenta y no bruscamente, para evitar el exprimido de la mezcla, y en consecuencia generar un falso sellado del tramo.

### 3.11. INYECCIÓN PARA PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACIÓN.

En general las inyecciones deben ejecutarse por progresiones ascendentes, iniciando a partir del tramo mas profundo y continuar ascendiendo en subtramos cuya longitud lo indica el proyecto, nunca mayores de 5mt, salvo los casos en que las condiciones de la roca obliguen a ejecutarlas de otra forma, tal es el caso de presencia de fallas o fracturas francamente abiertas, en este caso se debe tratar de la siguiente. Forma se debe inyectar con el obturador colocando a un metro, por arriba del punto donde se presenta la falla o facturas hasta alcanzar la presión máxima especificada, terminando la inyección, se debe remover el obturador y lavar todo el barreno.

El proceso de inyección se realiza con el criterio GIN, adoptando una constante (PV) de 1500y parámetros máximos de presión y volumen indicados en la siguiente tabla.

ZONA	LOCALIZACION ELEV.MANM.	GIN MPA (l/m)	PRESION MAX (MPA)	PRESION MAX (kg/cm2)	VOLUMEN MAX (LT)
ALTA	330 A 390	1500	2	20	200
MEDIA	275 A 330	1500	2.5	25	200
BAJA	180 A 275	1500	3	30	200

Una vez iniciada la inyección no debe detenerse por ninguna causa, siendo un proceso continuo de principio a fin, sin embargo si esto llega a ocurrir se suspende la inyección y se lava el barreno con agua a presión, posterior mente se reinicia con la inyección del tramo completo véase figura 3.11.1.

La inyección de pantalla lleva el siguiente orden:

- Se limita la zona de inyección en tramos de 24 metros tomando como extremos dos barrenos de exploración.
- Una vez perforados, realizadas las pruebas lugeon e inyectados, se continua con el barreno de 1<sup>ra</sup> etapa a 12 metros, siguiendo con los intermedios de 2<sup>da</sup> etapa, a cada 6 metros y cerrando con los de 3<sup>ra</sup> etapa, a cada 2 metros: en caso de ser necesario, se realiza una 4<sup>ta</sup> etapa a cada 1.0 metros
- Para la pantalla profunda, desde el inicio hasta el final de cada barreno inyectado, se lleva un registro detallado del comportamiento de cada progresión y 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, el numero de GIN utilizada es 150MPA con las presiones máximas indicadas anteriormente y en las específicamente, esta información es recabada por el registro electrónico de parámetros con los cuales deben elaborarse las siguientes tres graficas de control de inyección:
  - 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 constituirse de tal forma que puedan cobrarse de esta manera podrá visualizarse simultáneamente la evolución de la presión y el gasto respecto al tiempo.

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

La presión de inyección medida en el brocal el 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, es cuando el gasto de mezcla sea prácticamente nulo.

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

Fig 3.11.1 inyectando lechada en barreno.



### 3.12. RETAQUE DEL BARRENO

Después de 24 horas de haberse terminado la inyección de un barreno, ya que la lechada se ah decantado se debe proceder a sopletear el tramo con aire a presión; posteriormente, se debe rellenar con mortero de cemento como el especificado. Finalmente, lo que llegara a decantarse en barrenos hacia abajo se debe rellenar con un mortero de cemento seco, utilizando la misma relación cemento/arena pero agregando el agua hasta hacerlo trabajable, introduciéndolo con un fainero.

En 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 fainero sin que llegue a escurrirse.

## CONCLUSIONES

En esta experiencia me pude percatar la importancia de nunca dejar el conocimiento tal cual esta pues esta técnica es muy reciente en México tiene aproximadamente 30 años que se viene aplicando teniendo muy buenos resultados, pues no modificamos el suelo lo mejoramos para tener una mejor resistencia .

Aparte el costo que tiene es bajo para el beneficio que se tiene pues por el peso de la presa se tiene que reforzar el suelo y sellar o intentar sellar las fallas que tiene el mismo, podemos también formar el plano de estanqueidad de una manera eficiente, eficaz y segura haciendo el suelo menos permeable, la inyección del macizo rocoso es también una manera no tan complicada para hacer la cimentación de la obra pues siguiendo el método GIN y teniendo las curvas correctas la inyección es fácil y rápida.

El control que se debe de tener con todos los materiales y sustancias debe de ser exageradamente riguroso pues las pruebas en el laboratorio nos dicen una cosa, pero las pruebas en campo nos dicen otras así que si tenemos una dosificación optima, materiales y equipo de buena calidad no debemos tener problema, si se les da un cuidado bueno. Pues con una variación o falla de algún componente la inyección no va a ser la adecuada y tener fallas en el momento a largo plazo. Ya que tenemos que tratar con algunos ayudantes que no tienen precaución y pueden hacer variar la calidad de la lechada ya sea poniendo le mas agua para que el tiempo en la conducción sea mayor o quitándole agua para que pasen pruebas como la decantación modificando así otros parámetro importantes para la inyección. Así que todas las pruebas nos sirven para tener el control de la calidad.

El equipo para hacer las pruebas de calidad es importante tenerlo siempre en muy buen estado y calibrarlo en periodos no muy largos pues estamos a cargo de para la inyección, y si nuestro equipo esta mal los resultados obtenidos estarán mal, desperdiciando así lechada y esto se refleja en los costos de la obra. O quitándole vida útil a la misma.

El ser siempre honestos y llevar un control confiable del los datos pues hay muchas personas que para ahorrarse un regaño, modifican los datos o resultados.

Es por esto que es una técnica excelente si se utiliza y aplica de una manera correcta.

Se debe de seguir invirtiendo en este tipo de obras pues el beneficio es muy alto el cambiar por métodos de menos agresivos con la naturaleza (si se tiene un buen cuidado con las zonas que se van a inundar y el reubicar a las especies afectadas por este tipo de obras), estaremos con un buen nivel de infraestructura para que el país se ponga a la vanguardia en métodos de generación de electricidad y tendremos mas trabajo para todo tipo de personas haciendo así girar el reloj del dinero y hacer que la gente tenga un mejor nivel de vida.

El no dejar a un lado las investigaciones que se deben de hacer para tener equipos de generación con mas eficiencia, generando materiales que sean mas rápidos mas baratos y mas armónicos con la naturaleza, teniendo.

Anexos no incluidos porque el autor no los autorizó por ser confidenciales

## BIBLIOGRAFIA:

Comisión Federal de Electricidad, Especificación de obra, capítulo 6, Nayarit, 2006.

Ing. Yuriana Escobedo Jiménez, Manual de calidad de laboratorio, CPH, Nayarit, 2007.

Atlas copco, Diseño y Control de inyecciones empleando el principio GIN, Atlas Copco.

Sten-ake pettersson, Hans Molin, Inyección de cemento y perforación para inyección, atlas copco, 1999

Página web de la Comisión Federal de Electricidad

<http://www.cfe.gob.mx/yesca/es/Paginas/Inicio.aspx>

Página Web de: Aranda Carrillo Jesús Iram, Gómez Romero Javier.

<http://ingenieriaciviluam.blogspot.com/>