



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Algunos Aspectos Sobre
Impermeabilización en Rocas en una
Obra Hidráulica, Mediante la Inyección
de Lechada de Cemento**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Leonardo Sánchez Burguete

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Víctor Franco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------------|
| ÍNDICE GENERAL | i |
| ÍNDICE DE FIGURAS | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | iii |
| AGRADECIMIENTOS | i |
| DEDICATORIA | ii |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS | 4 |
| III. ESTUDIOS PRELIMINARES | 6 |
| IV. GENERALIDADES SOBRE LA GALERÍA NÚMERO 8 | 9 |
| V. TRABAJOS DE PERFORACIÓN | 12 |
| 5.1 Conceptos básicos..... | 12 |
| 5.2. Barrenos de pantalla: espaciamiento, profundidad e inclinación..... | 13 |
| 5.3. Barrenos de consolidación y liga: espaciamiento, profundidad e inclinación..... | 14 |
| 5.4. Barrenos de contacto concreto-roca: espaciamiento, profundidad e inclinación..... | 15 |
| 5.5. Barrenos de drenaje: espaciamiento, profundidad e inclinación..... | 18 |
| 5.6. El equipo de perforación..... | 19 |

| | |
|---|-----------|
| VI. MEZCLAS PARA INYECCIÓN..... | 23 |
| 6.1. Mezclas estables y mezclas inestables | 23 |
| 6.2. Mezclas estables según su relación agua-cemento | 24 |
| 6.3. Mezcladoras y plantas dosificadoras | 25 |
| 6.4. Elaboración de mezclas para inyección..... | 26 |
| VII. TRABAJOS DE INYECCIÓN..... | 28 |
| 7.1. Procedimiento de inyección | 28 |
| 7.2. Equipo de inyección | 31 |
| 7.3. Presiones de inyección..... | 33 |
| VIII. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD | 35 |
| 8.1. Pruebas de permeabilidad tipo Lugeón..... | 35 |
| IX. SOLUCIONES PRÁCTICAS PARA ALGUNOS PROBLEMAS SURGIDOS DURANTE LA PERFORACIÓN E INYECCIÓN..... | 41 |
| 9.1. Durante la perforación..... | 41 |
| 9.2. Durante la inyección | 43 |
| 9.3. Barrenos adicionales en la pantalla principal..... | 45 |
| X. CONCLUSIONES. | 47 |
| REFERENCIAS..... | 49 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. (a) En rojo la ubicación de la presa Hidroeléctrica Chicoasén, mapa base: http://geomapapp.org , (Ryan, y otros, 2009) , (b) vista aérea, en azul se indica la dirección de escurrimiento del Río Grijalva (Google & INEGI, 2018) | 3 |
| Figura 2. Sección máxima de la cortina, en el número 8 se observa la ubicación de la pantalla impermeable. | 8 |
| Figura 3. Sección transversal en donde se observa la ubicación de las galerías, en un recuadro rojo se señala la Galería 8..... | 8 |
| Figura 4. Tipos de barrenos: A) Barreno de pantalla, B) Barreno de liga, C) Barreno de contacto, D) Barreno de drenaje. I) Inclinación | 17 |
| Figura 5. Perforadora Diamec 250 (Atlas Copco). Tomado de (Barriga, 2013) | 19 |
| Figura 6. Perforadora Longyear 34 (U.S.A.) (Longyear, 2018)..... | 20 |
| Figura 7. Corte longitudinal del obturador..... | 30 |
| Figura 8. Bomba de inyección Clivio. (Tecopsa, s.f.)..... | 31 |
| Figura 9. Bomba de inyección marca Moyno. (Moyno, s.f.)..... | 32 |
| Figura 10. Obturadores para Pruebas Lugeón. El obturador simple es muy similar al empleado para inyección de lechada cemento-agua-bentonita. (Maldonado, 2018) | 36 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Barrenos de prueba tipo Lugeón en la Galería 8 | 40 |
|---|----|

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Ing. Víctor Franco por su decidido apoyo para alcanzar esta meta de vida.

Mi agradecimiento eterno a la señora Esperanza Hernández de Sánchez y a su esposo el señor Víctor Manuel Sánchez Robles quienes con sus desinteresados apoyos contribuyeron con mucho a alcanzar esta meta.

DEDICATORIA

A mi compañera, amiga y esposa, Eva Salazar Barqueiro, con todo mi cariño y gratitud.

A mis hijas: Yadira, Araceli y Daniela, con entrañable amor. Han dado a mi vida plenitud y sentido.

A la sagrada memoria de mis padres: María Celia Burguete Reyes y Leonardo Sánchez Castellanos, con mi eterno agradecimiento por su ejemplo y apoyo.

A mis hermanos: Rodrigo (Q.E.P.D.) y Eulises, con afecto fraterno. Son mis mejores amigos.

I. INTRODUCCIÓN

El contenido de este trabajo es el reflejo de experiencias adquiridas durante mi desempeño como “Jefe de Frente” en la Superintendencia de Inyecciones en diferentes proyectos desarrollados por la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.).

Dado lo específico de las actividades que me tocó ejecutar, creo necesario aclarar que el propósito de este trabajo consiste en exponer algunos aspectos sobre impermeabilización en rocas en una obra hidráulica, mediante la inyección de lechada de cemento.

Por otra parte, y en referencia al párrafo anterior, aclaro que no me fue posible conocer a detalle todas las partes de cada proyecto en los que colaboré y tampoco me fue posible conocer todos los frentes en los que se efectuaron

trabajos de inyección. De allí, que lo que aquí presento corresponde a mi experiencia adquirida directamente en obra, por ejemplo, en el Frente de trabajo de la Galería número 8, ubicado en el margen derecho del Río Grijalva durante la construcción de la pantalla principal impermeable de la Central Hidroeléctrica de Chicoasén, de junio a diciembre de 1979 [Figura 1], en ella también se refleja información obtenida de pláticas y exposiciones dadas por los ingenieros residentes de C.F.E. (con muchos conocimientos y experiencia sobre el tema) y se toman en cuenta los informes técnicos presentados por los consultores contratados por la C.F.E. incluyendo los reportes técnicos del Ing. André Pautre (Pautre, 1977), (Pautre A. , 1978).

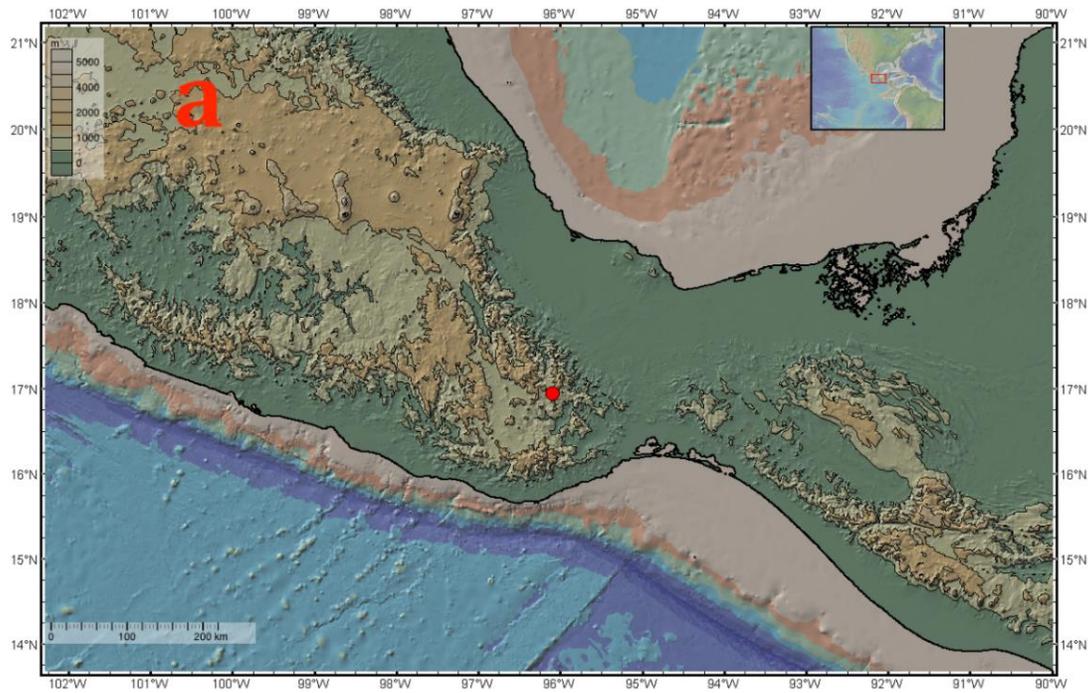


Figura 1. (a) En rojo la ubicación de la presa Hidroeléctrica Chicoasén, mapa base: <http://geomapapp.org>, (Ryan, y otros, 2009), (b) vista aérea, en azul se indica la dirección de escurrimiento del Río Grijalva (Google & INEGI, 2018)

II. OBJETIVOS

En términos generales, los trabajos de impermeabilización tienen como finalidad reducir drásticamente el flujo de agua a través de los cuerpos rocosos adyacentes a la cortina de la presa. En este orden de ideas, la construcción de la pantalla principal impermeable tiene este objetivo.

En general, se dice que la “*pantalla principal impermeable*” es la columna vertebral de los trabajos de impermeabilización en esta Central, se considera como una extensión de la cortina y está contenida en el mismo plano vertical en donde se ubica el corazón impermeable de dicha cortina. La pantalla impermeable de la Central Hidroeléctrica Chicoasén tiene una orientación de este a oeste dado que el sentido del escurrimiento del río es S-N.

Las actividades relacionadas con los trabajos de impermeabilización en suelos rocosos constituyen un área fascinante de la Ingeniería Civil cuya enseñanza no se incluye en los cursos a nivel licenciatura.

Lo anterior ha generado el objetivo de desarrollo del presente trabajo. Esto es, dar a conocer una descripción introductoria de las acciones necesarias para la ejecución de estos trabajos.

III. ESTUDIOS PRELIMINARES

Estos estudios, en el caso que nos ocupa, consistieron en hacer sondeos, tanto superficiales como a diversas profundidades. La información obtenida mediante estos sondeos permitió a los geólogos hacer un mapa lo más pormenorizado posible del estado inicial de los cuerpos rocosos, determinando, por ejemplo, las fallas, la carsticidad de la roca, su permeabilidad y demás propiedades.

Con la información proporcionada por estos estudios fue posible concluir que existe la necesidad de ejecutar los trabajos de tratamiento de la roca, tanto en el área de desplante de la cortina como en los cuerpos rocosos adyacentes a dicha cortina. Después de haberse hecho la obra de desvío, la primera acción fue retirar todo el material suelto que existía en el lecho del cauce del río. También se eliminó todo el material rocoso suelto e intemperizado del área que tendría

contacto con la estructura de la cortina de materiales graduados. Los cuerpos rocosos fueron impermeabilizados por medio de inyección de lechada de cemento.

Los estudios mencionados también sirvieron para hacer el proyecto global del tratamiento de la roca con inyección de lechada de cemento, dado que fueron objeto también de este procedimiento, además de la pantalla principal, la obra de toma, el vertedor de demasías, las laderas y lecho del cauce original del río, la casa de máquinas, etc.

Para ejecutar estos trabajos en particular en la pantalla principal [Figura 2], se abrieron varios frentes de trabajo: 9 galerías, de las cuales 4 están en el margen izquierdo (galerías 1, 2, 3 y 4), otras 4 en el margen derecho (galerías 5, 6, 7 y 8), y una más (galería 9), localizada abajo del lecho del río [Figura 3].

El distribuir las galerías tal como se señaló anteriormente, obedeció a la necesidad de realizar “por partes” la pantalla principal. Este procedimiento podría idealizarse como el que se emplearía para construir una gran barda formada con láminas impermeables, la cual descansaría sobre un marco de material adecuado para tal fin. En este caso, la roca de las laderas de las márgenes serían ese marco.

Dicho de otra manera, los estudios preliminares permiten graduar la cantidad de tratamiento que requiere darse, lo cual va en función de las características geológicas del sustrato y de la ubicación de las estructuras a proteger contra el flujo subterráneo de agua.

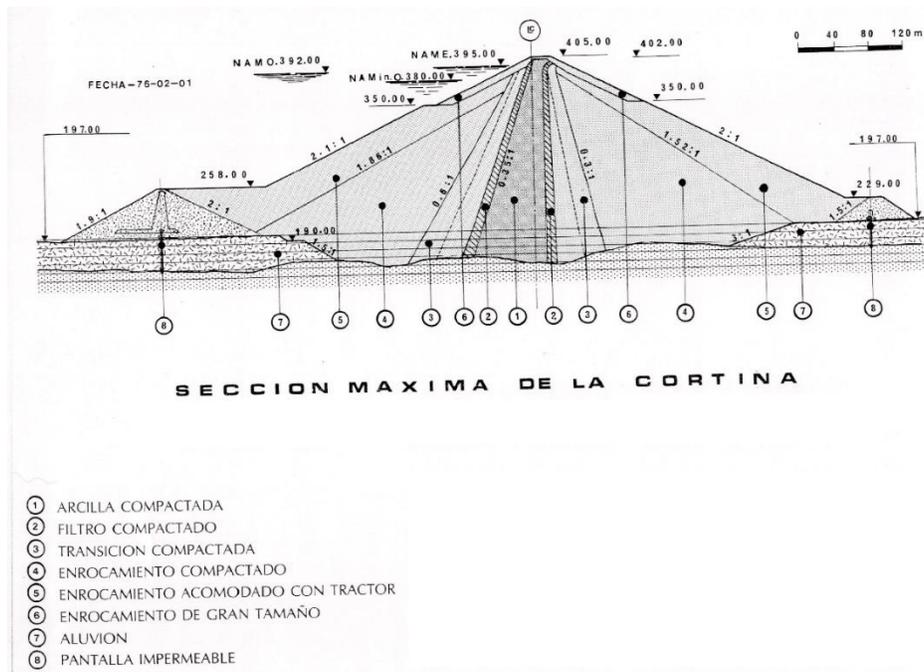


Figura 2. Sección máxima de la cortina, en el número 8 se observa la ubicación de la pantalla impermeable

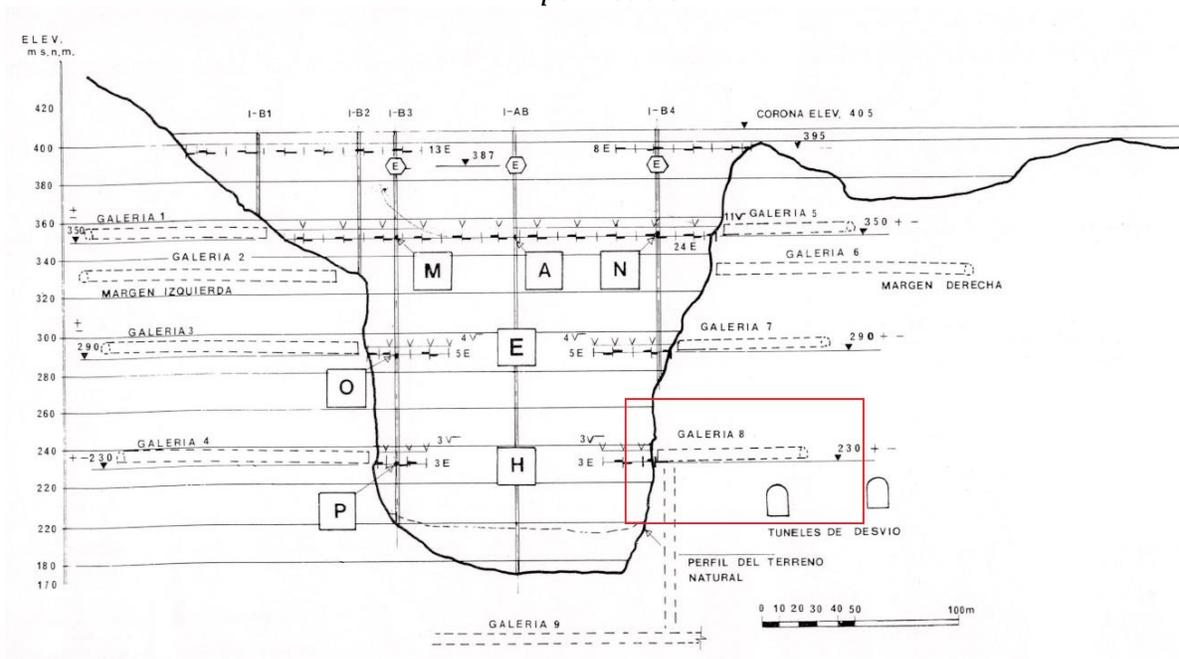


Figura 3. Sección transversal en donde se observa la ubicación de las galerías, en un recuadro rojo se señala la Galería 8

IV. GENERALIDADES SOBRE LA GALERÍA

NÚMERO 8

Habiendo esbozado la distribución de la pantalla principal tomándola en forma integral, es necesario proporcionar un panorama general de la distribución y ejecución de la pantalla desde la galería número 8.

En esta galería los barrenos se distribuyeron en tres líneas, llamadas b, c y a; esto con la finalidad de poder clasificarlos o identificarlos a través de una clave, la cual está formada básicamente por dos letras y un número asociados a un cadenamiento. Así, por ejemplo:

| Clave del barreno | Cadenamiento | Profundidad [m] |
|-------------------|--------------|-----------------|
| Pa8-3 | 0 - 047.57 | 70 |

Esto indica que el barreno es el número 3 de la línea “a” y que está ubicado en el cadenamiento 0 - 047.57 de la galería número 8 y tiene una profundidad de 70 m.

Existen diferencias entre las tres líneas; la más notoria es la que corresponde al número de barrenos y su distribución en el cadenamiento. De tal situación resulta que la línea “b” recorre a todo lo largo de la galería y tiene 70 barrenos, a lo largo de 320 m. La línea “c” tiene 42 barrenos ubicados en una longitud de 204.3 m; la línea “a” tiene únicamente 28 distribuidos a lo largo de 122.3 m. Estas distancias son medidas a partir del inicio de la galería, muy cercana al cantil del cauce, como se aprecia en el párrafo anterior, la zona que más profusamente se inyectó fue la cercana al cauce del río.

En los “datos de ejecución” proporcionados a este frente de trabajo se especificaron dos conceptos que caracterizan a cada barreno; estos son: “dirección” y “ángulo”. La dirección es proporcionada por medio de dos magnitudes medidas sobre el plano horizontal; una es colineal con el eje de la galería y, la otra, perpendicular a dicho eje. Para ejemplificar, considérese que la magnitud perpendicular al eje es un vector que va con dirección hacia aguas arriba; de la punta de este vector, se traza otro, colineal con el eje de la galería; la resultante de la suma de estos dos vectores marca la dirección del barreno. El “ángulo” se mide con respecto a la vertical por medio de una brújula.

Los dos datos mencionados en el párrafo anterior ubican a cada barrenos en una trayectoria determinada, lo cual obedece a los resultados obtenidos de los estudios geológicos hechos con anticipación. Es decir, se trata de que, al efectuar la inyección, la penetración de la mezcla sea óptima, a través de los fracturamientos localizados.

V. TRABAJOS DE PERFORACIÓN

5.1 Conceptos básicos

Para la perforación se emplean básicamente dos sistemas. Uno es el de “percusión”, el cual puede ejemplificarse por el realizado por una pistola neumática, ya que es el aire comprimido la fuente básica de energía y se utiliza en perforaciones de poca profundidad (hasta 15 m). Para profundidades mayores, como las alcanzadas en la pantalla principal (hasta 140 m), el equipo es de mayor potencia para lo cual se utiliza el sistema de “rotación”. Este es el sistema que se empleó mayoritariamente en la galería número 8; la fuente de energía es un motor eléctrico, del cual, por medio de un sistema de transmisión, se produce la perforación con broca de diamante de 1 7/8” de diámetro. Esta

broca se instala en un extremo de la tubería de perforación la cual está formada por tramos roscados de 1.5 m cada uno, lo que permite ir incrementando la longitud de la tubería al ritmo del avance de la perforación.

Además de la perforación para formar la pantalla principal, se realizaron otros tipos de perforaciones que se describen a continuación:

A) Barrenos de consolidación y liga: cuya función es unir la sección de pantalla construida desde la galería número 7, la cual se encuentra ubicada a más o menos 60 m arriba de la galería número 8. El direccionamiento de estos barrenos es hacia aguas arriba de la galería.

B) Barrenos de contacto concreto-roca: su función es rellenar las posibles oquedades entre el concreto y la roca, después de realizar el colado del revestimiento de la galería.

C) Barrenos de drenaje: estos tienen como fin captar el agua freática para canalizarla hacia la galería. El direccionamiento de estos barrenos es hacia aguas abajo de la galería.

5.2. Barrenos de pantalla: espaciamiento, profundidad e inclinación

Para la determinación de estos parámetros se tomaron en consideración los resultados de los estudios preliminares, así como la experiencia de los

ingenieros, tanto de la C.F.E. como la de los consultores contratados con esa finalidad.

En realidad, la separación entre barrenos fue menor en las cercanías de la cortina y fue creciendo cuando más se va alejando de ella; esto en respuesta a que la magnitud de la carga hidrostática decrece con la distancia al embalse de la presa.

Las profundidades de barrenación en la pantalla principal variaron desde 60 m hasta 140 m, siendo las más profundas las perforaciones más cercanas a la cortina.

La inclinación de los barrenos fue variable; esta variación dependió de varios factores, entre ellos la necesidad de impermeabilizar las fracturas de la roca, con la incidencia más favorable.

5.3. Barrenos de consolidación y liga: espaciamiento, profundidad e inclinación

La ejecución de estos barrenos responde a la necesidad de darle continuidad a la pantalla principal. Une a la sección construida desde la galería número 7 con la de la galería número 8, solucionándose de esta manera el problema resultante de la ejecución “por partes” desde las diferentes galerías.

Estos barrenos se perforan en la pared aguas arriba de la galería, haciéndose tres por cada estación. Entre estaciones contiguas hay una separación de 5 m.

Los barrenos de cada estación se designan con los números 1, 2 y 3, y están colocados, respectivamente, a 0.5 m, 1.5 m y 2.5 m de altura, con respecto al piso de la galería.

En cada estación, los barrenos de liga, igual que los de la pantalla principal, están orientados según un rumbo y un ángulo. Los tres están contenidos en un plano vertical el cual forma un ángulo de 35° respecto a la normal al eje de galería y con dirección hacia el fondo de la misma; esta orientación proporciona el rumbo de cada barreno. Además, el barreno número 1 forma un ángulo de 30° con respecto a la horizontal y apunta hacia abajo; el número 2 es horizontal y, el 3 forma también un ángulo de 30° con respecto a la horizontal, pero apuntando hacia arriba.

La longitud de cada barreno es de 15 m, cuya perforación se realizó por medio del sistema de “percusión”, esto es, utilizando equipo neumático.

Con la ejecución de este tratamiento se considera que la continuidad de la pantalla está garantizada.

5.4. Barrenos de contacto concreto-roca: espaciamiento, profundidad e inclinación

Las especificaciones de proyecto indicaron que la galería número 8 fuera revestida en su totalidad con concreto hidráulico armado. Como resulta obvio intuir, el contacto entre la roca y el concreto no es total, no obstante, el empleo

de vibradores neumáticos. Por otra parte, el proceso de excavación, basada en su totalidad en el empleo de explosivos produjo, inevitablemente, un cierto grado de fracturamiento artificial en las proximidades del túnel. Estos problemas se resolvieron haciendo el tratamiento llamado “inyección del contacto concreto-roca”.

Los barrenos están distribuidos en estaciones con una separación de 5 m entre estaciones consecutivas. En cada estación se perforaron ocho barrenos, los cuales se numeraron del 1 al 8 en las posiciones mostradas en la Figura 4.

A) Los barrenos 1, 2 y 3 están colocados, respectivamente, a 0.5 m, 1.5 m y 2.5 m de altura con respecto al piso de la galería y están ubicados en la pared aguas arriba. El rumbo y el ángulo de estos tres barrenos son los mismos que el de los de liga, ya mencionados. Es necesario aclarar que, en el proceso de ejecución, corresponde el primer lugar a los barrenos de contacto concreto-roca, siendo los barrenos de liga, una prolongación de estos primeros barrenos.

B) El número 4 está en la parte más alta de la galería (en la clave), siguiendo la dirección de la plomada, esto es, su dirección es perpendicular al eje de la galería.

C) Los barrenos 5, 6 y 7 están en la pared aguas abajo y tienen una altura de 2.5 m, 1.5 m y 0.5 m, respectivamente, respecto al piso de la galería. Estos son perpendiculares a la pared.

D) El 8 se encuentra en la plantilla de la galería, perpendicular al eje de ésta y equidistante de sus paredes.

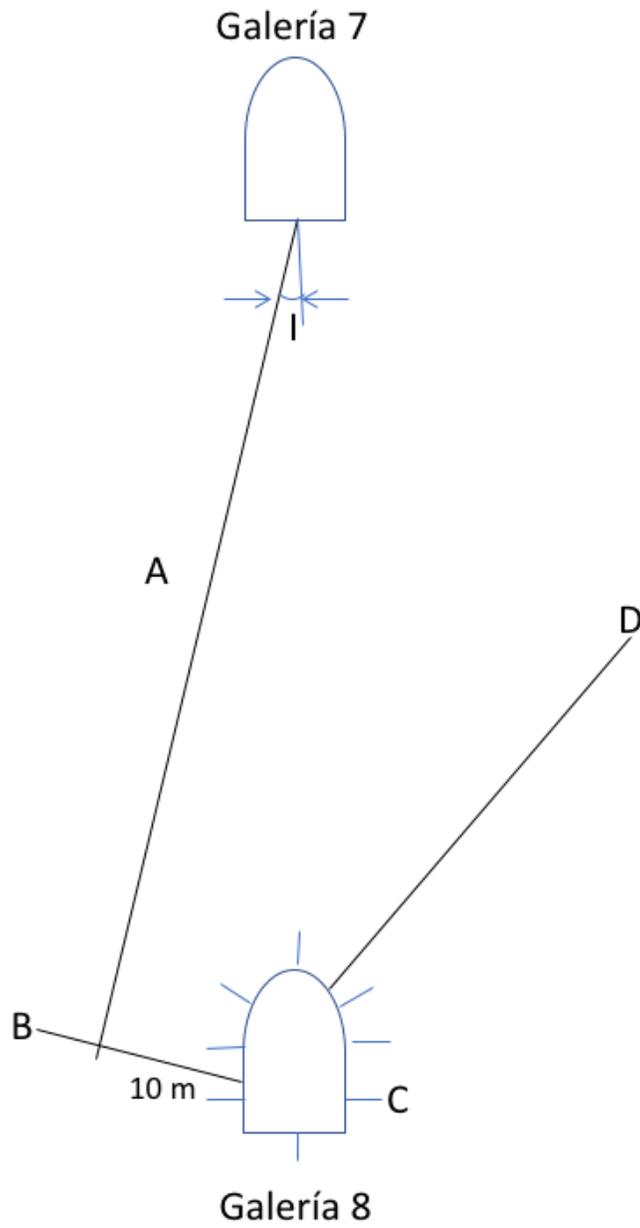


Figura 4. Tipos de barrenos: A) Barreno de pantalla, B) Barreno de liga, C) Barreno de contacto, D) Barreno de drenaje. I) Inclinación

La perforación de estos barrenos se hace por medio del procedimiento de percusión y su profundidad es de 3 m en roca, es decir, no se toma en cuenta los 0.25 m aproximados del espesor promedio del revestimiento.

De lo expuesto al principio de este subtema hago nuevamente hincapié en las razones de ser de este tratamiento, estas son: permitir un contacto homogéneo entre la roca y el concreto y el de consolidar la zona circunvecina al túnel. Además, como un comentario adicional, es conveniente resaltar la importancia que tiene el que esta galería se encuentre ubicada por debajo del nivel freático de la ladera en donde se ubica. Esta característica permitió observar de una manera directa el progreso del tratamiento de inyección, pudiéndose así tomar las medidas necesarias en los lugares donde hubo deficiencias; todo esto es posible a través de la observación de las filtraciones, tanto antes como después del tratamiento.

5.5. Barrenos de drenaje: espaciamiento, profundidad e inclinación

Desafortunadamente no he tenido la oportunidad de ejecutar este tipo de perforación.

5.6. El equipo de perforación

Los equipos de perforación utilizados en la galería número 8, para la formación de la pantalla principal, fueron tres del tipo rotatorio. Dos de ellos de la marca Atlas Copco, perforadora Diamec 250 [Figura 5] y el tercero es Longyear 34 (U.S.A.) [Figura 6].

Una breve descripción del equipo Diamec 250 [Figura 5]: Compuesta de una bomba accionada por un motor eléctrico pone en circulación, a través de mangueras, el aceite hidráulico que mueve al motor rotatorio de la perforadora. La tubería de perforación va colocada al centro del motor rotatorio y lleva, en un extremo, una broca diamantada de 1 7/8" de diámetro, que es la que produce la perforación y, en el otro extremo, en el superior, lleva un swivel o cabeza giratoria que es por donde se inyecta agua a presión durante el proceso de perforación.



Figura 5. Perforadora Diamec 250 (Atlas Copco). Tomado de (Barriga, 2013)



Figura 6. Perforadora Longyear 34 (U.S.A.) (Longyear, 2018)

La broca diamantada, de forma cilíndrica llena, tiene una longitud aproximada de 4", de las cuales la mitad es cilíndrica pura y, la otra, tiene la forma de una pirámide cónica truncada.

El círculo que genera el truncamiento de la pirámide cónica de la broca contiene dos canales de sección rectangular colocados en "cruz", que es el espacio por donde fluye el agua inyectada a presión durante el proceso de perforación.

El agua de perforación llega a la galería número 8 por medio de tubería de fierro, la cual desciende desde la superficie del terreno natural a más de 100 m sobre el nivel del piso de esta Galería 8.

En realidad, no tengo el dato del valor de la presión a la que se inyectaba el agua de perforación; lo que si es cierto es que dicha presión era mayor de los 10 kg/cm² que le imprimía una columna de agua equivalente a 100 m, ya que no se trabajó con la presión hidrostática de la columna de agua sino con la que le imprimía una bomba hidráulica de alta presión ubicada en la Galería 8. El operador del equipo de perforación debería estar muy atento que la presión se mantuviera más o menos uniforme, apoyándose en un manómetro colocado estratégicamente en los controles de operación. Si llegase a producirse una súbita disminución de la presión en el agua de perforación, bastaban unos pocos segundos para que la broca se “quemase” y prácticamente se desintegrara por el calor producido por la rotación sobre la roca, aun estando inmersa en el manto freático.

Descartando la posibilidad de una probable ruptura de la tubería de conducción del agua, lo más probable es que una repentina disminución de la presión del agua de perforación o “perdida de agua”, como se le llama en obra, se deba a que la broca diamantada haya caído en una fisura de la roca con lo cual el agua inyectada ya no encuentra la resistencia que le opone la roca más o menos sana.

Con respecto a la perforadora Longyear 34 [Figura 6], la diferencia con la Diamec 250 es el sistema de transmisión. La Longyear tiene como fuente de fuerza un motor eléctrico la cual se transmite al sistema de perforación por medio de un mecanismo de embrague.

Para los trabajos de perforación de los barrenos de contacto y también para los barrenos de consolidación y liga, se utiliza el sistema de perforación por

percusión, para la cual se empleó una maquina tipo bbr4, de la marca Atlas Copco. La eliminación del material producido al perforar se hace con aire durante la perforación y alternativamente con agua y aire a cada metro perforado.

VI. MEZCLAS PARA INYECCIÓN

6.1. Mezclas estables y mezclas inestables

Se han clasificado en dos clases principales de mezclas:

A. Las mezclas estables son aquellas en las que las partículas de cemento no se asientan antes del fraguado y cuando este fraguado sucede, el producto es una masa sin agua libre por encima de ellas.

B. Por el contrario, las mezclas inestables si contienen agua en exceso, la cual debe eliminarse a través de la filtración en el terreno o por decantación, antes del fraguado y endurecimiento.

Para la obtención de mezclas estables se utilizaron varios procedimientos, entre ellos:

A. Balanceando la relación agua-cemento

B. Agregando bentonita en una proporción del 2% del peso del cemento.

6.2. Mezclas estables según su relación agua-cemento

Según su proporcionamiento se utilizan tres tipos de mezclas estables; estas se designan con las letras a, b o c. Para dar una idea numérica se utiliza como parámetro el volumen de cada una de ellas, que se obtiene al mezclarse cierta cantidad de cemento con agua. Por cada saco de cemento (50 kg), en números redondos, se obtienen 118 litros de mezcla "a", 96 litros de "b" y 72 de "c". La densidad de las mezclas utilizadas va de 1.28 ton/m³ de la mezcla "a" hasta 1.55 ton/m³ para la "c". La fluidez de estas mezclas varía de acuerdo a la densidad y es del orden de 39 segundos a través del cono de marsh.

Para el caso de la mezcla "a", el proporcionamiento es el siguiente:

Agua: 850 l - Bentonita: 35 kg - Cemento: 425 kg

La utilización de un determinado tipo de mezcla depende principalmente de la cantidad de absorción de lechada por cada metro lineal de barreno inyectado. Regularmente se inicia inyectando mezcla tipo "a" y se continúa con la misma si las presiones de proyecto son alcanzadas con relativa rapidez. Si las absorciones son altas (mayores a 200 kg de cemento por metro lineal

inyectado) se cambia a la lechada tipo “b” y, de ser necesario, se utiliza la tipo “c”.

6.3. Mezcladoras y plantas dosificadoras

Se distinguen dos tipos de mezcladoras:

La mezcladora común: la cual consiste en un tanque en forma de cilindro con capacidad de 200 litros, cuya altura es aproximadamente el doble del diámetro. Este tanque contiene en su interior un juego de aspas que giran a baja velocidad (agitadoras); a más o menos a 60 r.p.m. Las aspas son movidas con un motor eléctrico acoplado a un reductor de velocidad.

La mezcladora de alta velocidad, la cual consiste en un tanque cilíndrico de 160 litros de capacidad, en las que el mezclado se hace por medio de una bomba centrífuga especial de alta velocidad.

Cuando se iniciaron los trabajos de inyección de este proyecto hidroeléctrico, en cada nuevo frente que se abría era necesario improvisar una pequeña planta de mezclado. Se podía hablar, en esa época, de una “producción doméstica” de mezclas.

Lo anterior adolecía de algunas desventajas, principalmente en lo relacionado con las limitaciones de espacio, dificultades en la distribución de los insumos para las mezclas y operación del equipo, y su correspondiente mantenimiento. Esto produjo la necesidad de unificar las plantas domésticas en dos centrales

productoras; una para cada margen del río, siendo ubicadas en lugares estratégicos en la superficie.

Cada una de estas plantas tenía la capacidad de operación automatizada, siendo esta característica una verdadera novedad. El pesado del cemento, la cantidad de lodo bentonítico y todo el proceso en general se controlaba electrónicamente desde un tablero aledaño a la planta.

Además, en cada uno de los frentes se contaba con un teléfono que permitía comunicarse desde la Galería 8 con la planta de mezclado y solicitar los volúmenes y tipos de mezclas requeridas.

6.4. Elaboración de mezclas para inyección

El proceso para la elaboración de una mezcla para inyección inicia con el mezclado de la bentonita con el agua.

Durante este primer paso, se mezcla la bentonita con agua fresca utilizando mezcladora de baja velocidad (aproximadamente a 60 r.p.m.), hasta hacer un lodo, el cual debe mantenerse en reposo durante 12 horas para permitir la completa hidratación de la bentonita. Este lodo se almacena en tanques de gran capacidad en donde se recircula cada determinado tiempo por medio de una bomba centrífuga común.

La elaboración de las mezclas de tipo “estables” se hacen con mezcladoras de “alta velocidad” (a 1600 r.p.m.). Se procede de la manera siguiente:

Se vierte en la mezcladora, en primer lugar, el lodo bentonítico; después se agrega agua adicional, si es necesario. El siguiente paso es agregar el cemento.

El tiempo normal de mezclado es de dos minutos, después de que el cemento ha sido agregado a la mezcla de bentonita-agua. Después del mezclado, el producto se canaliza, por medio de las tuberías de conducción, hasta los diferentes frentes de inyección. En estos frentes de trabajo, la mezcla se deposita en una mezcladora tipo común en donde la mezcla continúa en movimiento para evitar la segregación.

Las características físicas de la mezcla dependen de manera directa de la proporción agua-bentonita-cemento. De ésta depende su viscosidad antes del fraguado, y su resistencia a la compresión, así como su deformabilidad cuando haya fraguado, entre otras.

Este proporcionamiento es el resultado de ensayos de laboratorio y pruebas de campo realizadas con las mezclas. Es necesario hacer notar que el proporcionamiento guarda, en forma implícita, una relación óptima entre los objetivos que se buscan y las limitaciones inherentes a la consecución de dichos objetivos. Es decir, se necesita que la pantalla tenga una respuesta adecuada ante los esfuerzos a que estará sometida cuando el embalse esté lleno; pero es necesario también que la mezcla tenga una fluidez que permita su difusión a través del fisuramiento de la roca; que sea manejable, tanto en su preparación como en su conducción desde las plantas de mezclado hasta el lugar de su inyección.

VII. TRABAJOS DE INYECCIÓN

7.1. Procedimiento de inyección

La inyección de lechada de cemento es la actividad que mayor importancia tiene en trabajos de impermeabilización de rocas en una obra hidráulica. De su correcta ejecución depende mayoritariamente la eficiencia de la pantalla impermeable.

En términos generales este procedimiento consiste en introducir lechada de cemento-agua-bentonita, a presión, en el lecho rocoso. Además de la mano de obra, tres son los elementos principales que intervienen en este proceso:

- A. La tubería de conducción.
- B. Dispositivo obturador.

C. Equipo mecánico para inyección.

La tubería de conducción se introduce hasta el fondo del barreno previamente perforado y en su extremo inferior lleva adaptado el dispositivo obturador. La tubería tiene un diámetro de 3/4", cedula 80 y se encuentra en el mercado en tramos de 21 pies, por lo que es necesario cortarla en secciones de 7 pies, para poderse manejar en el restringido espacio de la galería; así mismo, es necesario hacerle el forjado de "cuerda derecha" en sus dos extremos para hacer las uniones entre las secciones de tubería por medio de la utilización de coples metálicos.

En cuanto al dispositivo obturador, y para mayor objetividad, he dibujado un croquis [Figura 7]. Como dije en la sección anterior, el sistema tubería-obturador se introduce hasta el fondo del barreno y después el personal obrero hace girar la tubería de conducción en una operación de "atornillamiento"; esto hace que la camisa metálica presione sobre la copa superior móvil, la que a su vez comprime al tubo de hule, el cual se expande y con ello se "amarra" a las paredes rocosas del barreno. En una primera etapa, el amarre debe hacerse sólo parcialmente para permitir que el personal obrero pueda regresar el sistema hasta dejar el obturador ubicado en los primeros 5 m, en donde se hace el amarre total.

En estas condiciones ya es posible iniciar el proceso de inyección de la lechada de cemento-agua-bentonita en ese primer tramo. Después se afloja el obturador por medio de una operación de "desatornillamiento" y se recorre al siguiente tramo y así sucesivamente en tramos de 5 m cada uno.

Al método de inyección anteriormente esbozado se le conoce como “inyección por tramos de regreso” y fue el utilizado para los trabajos de impermeabilización de la galería número 8.

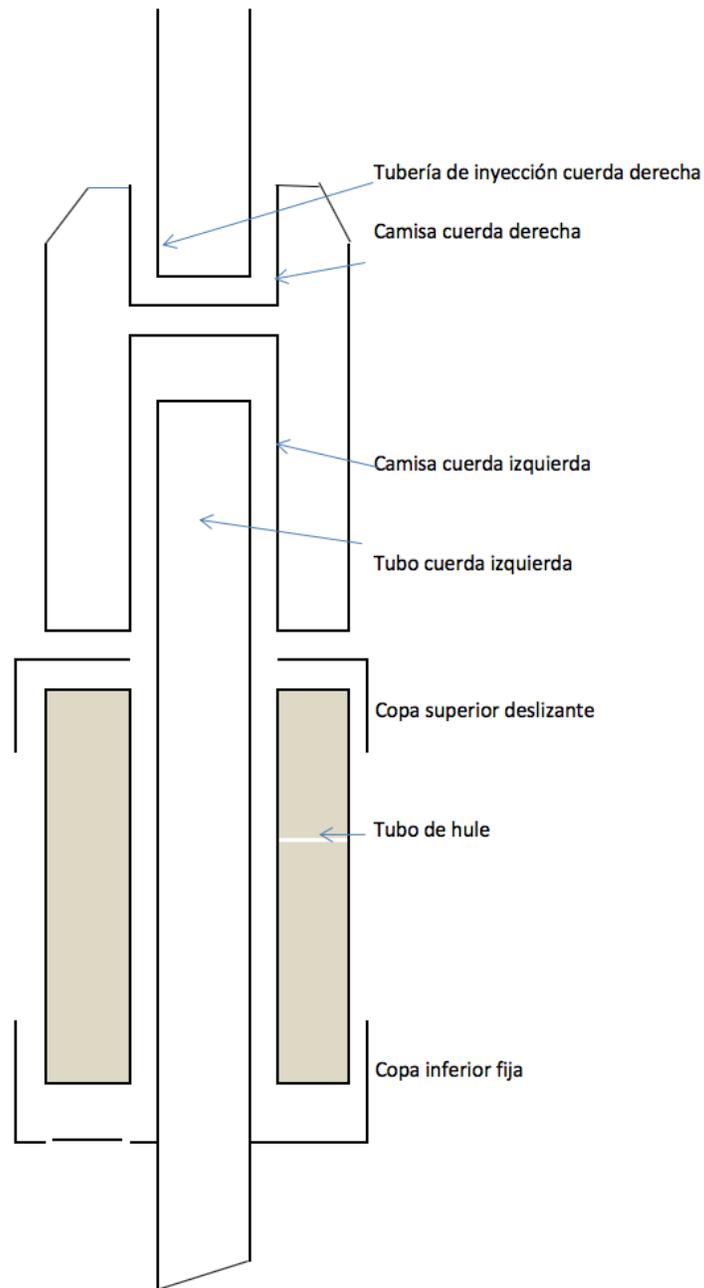


Figura 7. Corte longitudinal del obturador

7.2. Equipo de inyección

El equipo principal para inyección estaba formado por las bombas tipo Clivio [Figura 8], las cuales son bombas de doble pistón y están diseñadas específicamente para trabajos de inyección.



Figura 8. Bomba de inyección Clivio. (Tecopsa, s.f.)

Los pistones son accionados por un gato hidráulico. El movimiento de aceite que mueve al gato hidráulico se hace con una bomba hidráulica accionada por un motor eléctrico. La presión y el caudal de aceite pueden ser reguladas por medio de válvulas de operación manual. Esto permite regular la presión y la velocidad del pistón, lo que permite a su vez regular la presión de inyección y el caudal de la mezcla.

De manera específica, con el equipo Clivio utilizado para la inyección de la Galería 8, se podían obtener presiones de hasta 50 kg/cm² y un flujo de lechada de hasta 60 litros por minuto.

Otro equipo utilizado, pero con menor frecuencia, fueron las bombas tipo Moyno [Figura 9]. Este tipo de equipo no está diseñado para inyección de lechada sino, más bien, para bombear y transportar mezclas espesas y pesadas o morteros. El mecanismo impulsor consiste en una especie de tornillo de Arquímedes el cual es accionado por un motor eléctrico a una velocidad constante, lo cual produce un caudal constante pero no tiene un mecanismo propio para regular tanto las presiones como el caudal de lechada.



Figura 9. Bomba de inyección marca Moyno. (Moyno, s.f.)

La regulación de las presiones y los volúmenes de inyección en las bombas Moyno se logró por medio de la instalación de un mecanismo de retorno y un juego de válvulas colocadas estratégicamente a lo largo de este mecanismo de retorno. Es así como, por medio de una derivación se canalizaba la lechada hacia el barreno y, el resto, regresaba a la mezcladora de baja velocidad ubicada junto al equipo de bombeo.

El equipo Moyno es útil para inyectar gastos altos de lechada, ya que con velocidad de giro de 350 r.p.m. son capaces de movilizar 240 litros de lechada por minuto. La máxima presión alcanzada es de 15 kg/cm².

7.3. Presiones de inyección

En este aspecto, el sistema europeo tiene una regla que se enuncia como: la presión expresada en bars, es igual a la profundidad del tramo, expresado en metros (Pautre & Sabarly, 1978). En este proyecto hidroeléctrico de Chicoasén se aplicó una modificación a esta regla. En tal virtud el criterio que se utilizó fue: aplicar 50 kg/cm² como presión máxima y de allí venir disminuyendo la presión hasta llegar al tramo superior, de 0 m a 5 m, con una presión de 5 kg/cm². Aquí menciono nuevamente que la máxima profundidad de perforación en la galería número 8 fue de 140 m.

Además del concepto de “presiones de inyección”, se maneja el concepto de “presión de rechazo”. La presión de rechazo es la máxima presión alcanzada cuando el flujo de lechada es prácticamente nulo.

Con respecto a la presión de rechazo citaré textualmente la opinión del Ing. Francis Sabarly (Pautre & Sabarly, 1978), quien era uno de los ingenieros consultores contratados por la C.F.E.:

“Es peligroso inyectar un gran flujo a la presión de rechazo, especialmente cerca de los cantiles o cerca del corazón de la presa. Para conseguir un buen tratamiento es necesario tener una presión de rechazo tan alta como sea posible, pero tal presión puede ser perjudicial si una gran cantidad de lechada es inyectada bajo esta presión”.

Continúo con la cita: “en un tramo dado, al principio de la inyección, el flujo de la lechada está en función de la presión aplicada. La presión debe ser tal que se obtenga un flujo “razonable” de la lechada. Por ejemplo, en un tramo donde la presión de rechazo sea de 10 bars (1000 kPa), un flujo de 100 litros por minuto a 1 bar (100 kPa) o 2 bars (200 kPa) es “razonable”. No es si es inyectado a 5 bars (500 kPa) y es totalmente irrazonable si es inyectado a 10 bars (1000 kPa)”

Sigue la cita: “digamos que mientras menor sea la presión de inyección con respecto a la presión de rechazo, mayor puede ser el flujo, y mientras más cercana sea la presión de inyección a la presión de rechazo, menor debe ser el flujo” ... “normalmente, según progresa la inyección, la presión aumenta y el flujo disminuye hasta alcanzar la presión de rechazo prácticamente sin flujo”.

VIII. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD

8.1. Pruebas de permeabilidad tipo Lugeón

Después de haberse concluido los trabajos en la pantalla principal de impermeabilización, es necesario comprobar qué tan efectivo ha resultado tal tratamiento.

Los aditamentos básicos para la ejecución de esta prueba son los siguientes:

- Un manómetro para control de las presiones.
- Un contador de agua (medidor de agua)
- Una válvula de descarga.
- Un obturador [Figura 10]

- Tubería de conducción
- Un depósito para el agua
- El equipo de bombeo.

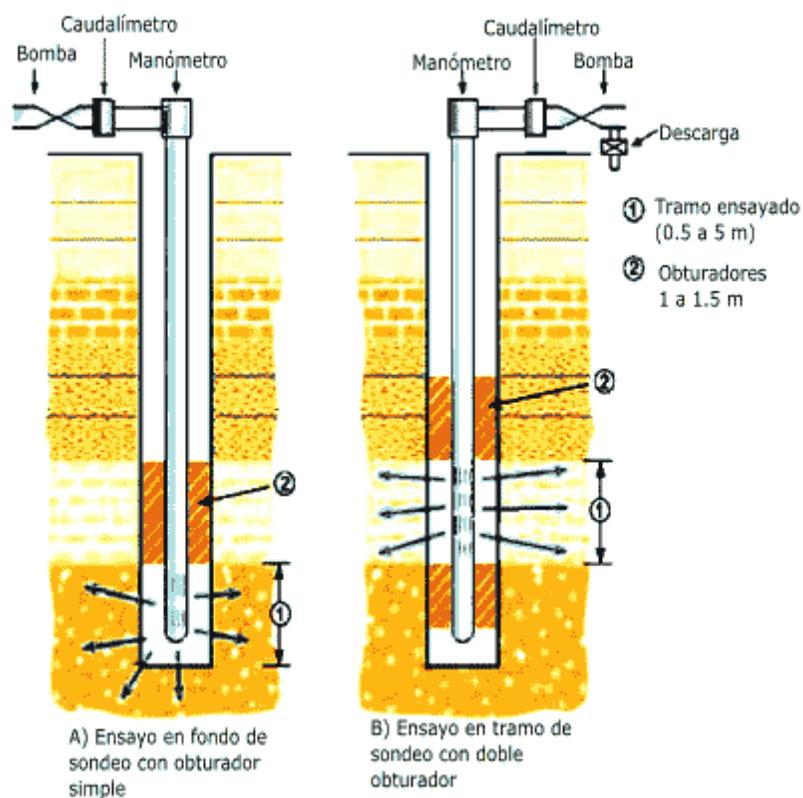


Figura 10. Obturadores para Pruebas Lugeón. El obturador simple es muy similar al empleado para inyección de lechada cemento-agua-bentonita. (Maldonado, 2018)

Una prueba de permeabilidad consiste, básicamente, en inyectar agua en un tramo de barreno de dimensiones conocidas. La absorción (volumen) de agua, unida a la presión aplicada durante un determinado tiempo, nos proporciona

un cierto parámetro. Para la prueba tipo Lugeón se ha tomado como parámetro de comparación a la Unidad Lugeón (U. L) la cual se define como: la absorción de 1 litro de agua cuando a un tramo de barreno de 1 m se le aplica una presión de 10 kg/cm^2 durante 1 minuto.

El procedimiento de campo para la ejecución de la prueba es el siguiente:

Primero se perfora un tramo de 5 metros de barreno. Después se coloca el obturador en la parte superior del tramo.

La “presión base” aplicada es aproximadamente igual a la de inyección de pantalla. Es así como, por ejemplo, para el tramo de 15 m a 20 m, la presión base deberá ser de 20 kg/cm^2 . Esta presión se divide en cuatro partes iguales; por lo que resulta que la prueba completa consta de mediciones para cinco niveles de presión: $1/4p$, $2/4p$, p , $2/4p$ y $1/4p$.

En estas condiciones, empezamos inyectando agua con una presión igual a $1/4$ de la presión base; es decir que, si seguimos el ejemplo numérico arriba mencionado, deberá aplicarse 5 kg/cm^2 . Esta presión se mantiene constante en 5 minutos, durante los cuales se toman, a cada minuto, las medidas de las diferencias del nivel de un recipiente que contiene el agua a inyectarse y se corrobora con el gasto proporcionado por el contador de agua.

Después de transcurridos los primeros 5 minutos, se incrementa la presión hasta $2/4$ de la presión base, es decir, hasta 10 kg/cm^2 ; durante otros 5 minutos se mantiene esta presión, haciendo las correspondientes medidas de los niveles del recipiente del agua.

Después se hace el mismo procedimiento, pero aplicando 4/4 de la presión base, o sea 20 kg/cm².

Creo oportuno aclarar que, para hacer la Prueba a lo largo de un barreno, por ejemplo, de 100 m de profundidad, se procede de la siguiente manera:

Primero se perforan los primeros 5 metros y se hace la prueba. Después se perfora de 5 m a 10 m y se hace de nuevo la prueba y así sucesivamente.

Posteriormente se continúa aplicando presiones en forma descendentes, o sea 2/4 y 1/4 de la presión base, haciéndose las lecturas correspondientes. Quiero decir con esto que el procedimiento es el mismo, solo que en este caso las presiones van decreciendo.

Los valores obtenidos nos permiten cuantificar numéricamente la permeabilidad del tramo probado, con lo que podrá decirse que, para este tramo, la permeabilidad es de “x” Unidades Lugeón.

La permeabilidad se calcula con la fórmula:

$$k = \frac{Q}{2\pi LP} * \log_e \frac{L}{r}$$

En donde:

Q = caudal $\left[\frac{cm^3}{s}\right]$

r = radio del barreno [cm]

L = longitud del tramo probado [cm] P = Presión aplicada [cm]

El equipo utilizado es el mismo que se necesita para la inyección de la mezcla de cemento-agua-bentonita utilizada en la pantalla. Como este equipo utiliza un sistema de pistones para impulsar el líquido, las presiones que produce no son del todo estables, por lo que es necesario emplear un dispositivo (tanque) estabilizador de presiones entre la bomba y el barreno, con lo cual se logran presiones casi uniformes.

Se debe procurar que el agua utilizada tenga la menor cantidad de impurezas, así como también es necesario que el sistema de conducción no tenga fugas, para evitar que los resultados resulten alterados.

Por otra parte, cabe aquí hacer algunos comentarios con respecto a la realización de esta prueba, veamos: el aplicar presiones, primero ascendentes y después descendentes nos sirve para obtener una mayor gama de datos para determinar los valores, también para comprobar que, en todo momento, la ejecución ha sido correcta. Ordinariamente para trabajos de campo se considera que la absorción es proporcional a la presión aplicada, a condición de que permanezcan constantes los otros parámetros; esto difiere ligeramente con lo rigurosamente observado, según lo cual las absorciones varían exponencialmente con respecto a la presión.

También al aplicar presiones similares a las de inyección, es posible hacer una comparación aproximada entre las absorciones de agua y las de lechada de cemento.

En la galería número 8 se han ejecutado un total de 9 barrenos de prueba tipo Lugeón cuya distribución se puede consultar en la [Tabla 1].

Las absorciones altas en determinadas zonas de la galería indicaron que era necesario la ejecución de algunos barrenos adicionales.

Los resultados de las pruebas de permeabilidad fueron procesadas y estudiadas por el departamento técnico del proyecto en estudio. Evidentemente, lo anterior, sólo proporcionó una base sólida para determinar si el tratamiento fue satisfactorio o si tendría que ser reforzado con barrenos adicionales.

| Línea | Clave | Cadenamiento | Profundidad (m) |
|--------------|--------------|---------------------|------------------------|
| C | Pc8-l-1 | 0-020.00 | 70 |
| B | Pb8-l-1 | 0+039.00 | 115 |
| | Pb8-l-2 | 0+016.50 | 85 |
| | Pb8-l-3 | 0+030.50 | 100 |
| | Pb8-l-4 | 0+163.00 | 105 |
| | Pb8-l-5 | 0+254.00 | 90 |
| | Pb8-l-6 | 0+345.00 | 90 |
| | Pb8-l-7 | 0+052.00 | 115 |
| | Pb8-l-8 | 0+119.00 | 105 |

Tabla 1. Barrenos de prueba tipo Lugeón en la Galería 8

IX. SOLUCIONES PRÁCTICAS PARA ALGUNOS PROBLEMAS SURGIDOS DURANTE LA PERFORACIÓN E INYECCIÓN.

9.1. Durante la perforación

Una de las razones por las cuales es necesario construir una pantalla de impermeabilización en un proyecto hidroeléctrico, es la que corresponde, entre otras, al fisuramiento y la carsticidad de la roca en la zona aledaña a la cortina.

Por ejemplo, es normal encontrar estratos de arcilla de entre 10 a 20 centímetros de espesor, así como mantos de lutita durante los trabajos de

perforación. Por estas razones es común que, al atravesar estas zonas de fallas, el gasto de agua a través del brocal del barreno aumente considerablemente, es decir, sucede una “resurgencia”, además de esta señal, se observa una disminución en la presión del agua inyectada al barreno lo cual se detecta a través del manómetro instalado para tal propósito. Por tal motivo, el operador del equipo deberá llevar una bitácora diaria donde asiente estos eventos y deberá comunicar toda la historia del barreno perforado o en proceso de perforación, anotando con especial interés las profundidades a las que se presentaron dichos eventos.

Con esa información se puede tomar la determinación de suspender la perforación e inyectar lechada de cemento para consolidar la fractura y la resurgencia de agua, para luego continuar con la perforación. La reperfusión de estos tratamientos por lo regular se hace después de 24 horas de la inyección, con la finalidad de permitir el fraguado de la mezcla inyectada.

La ejecución de la perforación tiene que sujetarse a cierta secuencia, para prevenir otros incidentes secundarios.

En el caso de la galería número 8, en la zona donde se intercalan las tres líneas de perforación, primero se trabajó sobre una de ellas (la b). En esta línea, como en las otras dos, la perforación se hizo en dos etapas; a los barrenos pares se les llamó de “primera etapa”, que fueron los primeros en inyectarse, y a los nones, de “segunda etapa”. Esto se hace con la finalidad de que haya una distancia considerable entre el barreno en proceso de perforación con el que está en proceso de inyección; aun así, hay ocasiones que, al estar inyectando un

barreno, la mezcla salga por otro cercano en proceso de perforación o con perforación ya concluida pero aún no inyectado. Por lo que en esta zona es necesario aumentar el espaciamiento para después ir cerrando con los barrenos intermedios.

Distribuida así la ejecución del trabajo, por lo regular una máquina de perforación va adelante haciendo las primeras etapas y otra, las segundas.

Además, con respecto a la “resurgencia” quiero comentar que por el solo hecho de estar ubicada debajo del nivel freático (en la galería número 8), desde el inicio de la perforación de un barreno, empieza a producirse resurgencia. La imagen de este fenómeno tal vez no diga mucho para un observador ocasional. Pero después de observaciones repetidas, tanto el personal obrero como técnico se familiarizan con ello y, por tanto, “aprenden” a distinguir “a ojo” entre una resurgencia “normal” y otra que es producto de un fisuramiento o falla importante en los mantos de roca.

9.2. Durante la inyección

No todas las fallas pueden detectarse durante las acciones de perforación. Existen ciertos fisuramientos que no provocan las señales a las que me referí en la sección anterior. Esto se debe a que están restringidos a una pequeña sección de la roca o porque son muy pequeños.

Es durante el descenso (o bajada) del obturador cuando son más notables estos fallamientos de la roca. En ocasiones, cuando se atraviesa por una de estas

fallas, puede suceder que haya un fragmento de roca medio suelto, pero que no pudo detectarse durante la perforación. Entonces al sacar la herramienta de perforación, ese fragmento se mueve, quedando atorado en el carril del barreno. De ahí resulta que no es posible bajar el obturador con su tubería hasta el sitio deseado. Por lo regular este “caído” (así se le llama en obra) se empuja hasta el fondo por medio de la tubería de inyección para lo cual no se le pone el obturador, sino otro aditamento que resista pequeños golpes. En otras ocasiones es necesario volver a instalar el equipo de perforación para “moler” el caído. Pero también sucede que aun después nuevamente surja el problema, por lo que hay necesidad de inyectar desde esa profundidad, para luego re perforar el barreno y, de esa manera, poder inyectarlo totalmente.

Por otra parte, también es común que al estar inyectando un barreno la mezcla salga por otro barreno perforado o en proceso de perforación. Cuando esto sucede se procede de la siguiente manera: si la mezcla se “comunicó” hacia un barreno totalmente perforado, se suspende la inyección del tramo que se está inyectando para luego empezar el barreno hacia el cual se comunicó la mezcla; cuando se haya llegado a la profundidad de comunicación se continúa inyectando el barreno suspendido, pero ahora la inyección se hace simultáneamente en los dos barrenos. Cuando la comunicación es hacia un barreno en proceso de perforación, se suspende la inyección, hasta que el barreno sea totalmente perforado, para luego proceder como se describió para el primer caso. Por supuesto, estas no son soluciones únicas, ya que todo depende de las circunstancias existentes durante el desarrollo de la obra en un momento determinado.

9.3. Barrenos adicionales en la pantalla principal

Este tipo de tratamiento también es de gran importancia y es el resultado de lo que a continuación se expresa.

La Superintendencia de Inyecciones, en su sección correspondiente a trabajo de gabinete, va llevando un control de avances diario por medio de gráficas, las cuales se presentan sobre un plano de la pantalla principal de cada frente. Allí se marca por medio de colores, las distintas absorciones de los barrenos, en tramos de 5 m; de esta representación se observa que a determinada profundidad y, por lo regular, siguiendo un determinado plano, las absorciones son elevadas. Se considera que una absorción es elevada cuando sobrepasa a los 200 kg de cemento por metro lineal de barreno.

De lo anteriormente expuesto se deduce que existe la necesidad de perforar e inyectar barrenos adicionales en esa zona. Esto deja de hacerse hasta que las absorciones están dentro de lo aceptable.

De este tipo de barrenos se perforaron e inyectaron las cantidades siguientes:

En la línea "a": 10 barrenos, ubicados entre el cadenamiento 0032.00 y el 0+022.50

En la línea "b" son 11, comprendidos entre los cadenamientos 0+070.00 y 0+150.00

En la línea "c" solamente un barreno adicional, ubicado en el cadenamiento 0+020.00.

El número de barrenos adicionales y su ubicación en cada una de las líneas puede servir como un indicador de cómo va progresando la impermeabilización; ya que fue la línea “c” la última en ejecutarse.

X. CONCLUSIONES.

Al final de este trabajo basado en la práctica profesional, se puede concluir que el tratamiento de la roca por medio de la inyección de lechada de cemento dio resultados satisfactorios, como pudo comprobarse por medio de las Pruebas Tipo Lugeón. Es decir, se logró proteger las estructuras que integran la obra hidráulica contra el flujo subterráneo de agua hasta un grado “razonable” de eficacia. Como referencia se han establecido valores estándares a nivel internacional para este tipo de mediciones.

Como un breve repaso: además de la pantalla principal, fueron objeto del tratamiento: la obra de toma, el vertedor de demasías, la cámara de oscilación, etc. Pero aquí cabe reflexionar acerca de lo que sucederá en la muy amplia superficie que ocupará el embalse.

Cuando al inicio de este trabajo se habló de los “Estudios Preliminares” se trató de explicar básicamente lo relativo a los estudios geológicos tendientes a solucionar el problema que tienen que ver con la permeabilidad de los cuerpos rocosos aledaños a las estructuras principales de la obra hidráulica.

Aquí cabe mencionar que, durante el proceso de selección del sitio más conveniente para desplantar las estructuras de la obra, se llevaron a cabo otros tipos de estudios, en los que se puede mencionar: el estudio topográfico, el geofísico, el hidrológico, el batimétrico, etc., esto permitió actuar con mayor certidumbre al decidir acerca de la ubicación de la obra.

La técnica aplicada para la ejecución de trabajos de impermeabilización de rocas es un tema fascinante de la Ingeniería Civil que no está incluida de manera específica dentro del Plan de Estudios de la licenciatura de ingeniero civil en nuestra Facultad. Ojalá que en el futuro pueda incluirse en dicho plan, aunque fuese de manera breve, tal vez dentro del área de Geotecnia y/o Mecánica de Suelos.

REFERENCIAS

Barriga, J. (2013). *Atlas Copco Craelius Diamec 250-252*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=KOvDiLkXUUE>

Google, & INEGI. (2018). *Google Earth*.

Longyear. (2018). *Máquina perforadora longyear 34*. Obtenido de https://http2.mlstatic.com/S_19089-MLM20165387181_092014-Y.jpg

Maldonado, Y. (2018). *Geología y Ciencias de la Tierra*. Obtenido de Ensayo Lugeon: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/estudios-geotecnicos/ensayo-lugeon/>

Moyno. (s.f.). *Bomba Moyno Sanitaria De Cavidad Progresiva*. Obtenido de https://http2.mlstatic.com/bomba-Moyno-sanitaria-de-cavidad-progresiva-D_NQ_NP_811305-MLM25011987442_082016-F.webp

Pautre, I. A. (1977). *Informe R-17-77, Observaciones relativas al proyecto y ejecución del tratamiento de la roca*, . México: Departamento de Estudios Experimentales, Subgenerencia de Plantas Hidroeléctricas; Generencia General de Construcción de la Comisión Federal de Electricidad.

Pautre, I. A. (1977). *Observaciones generales sobre el tratamiento de la roca*. México: Departamento de Estudios Experimentales, Subgenerencia de Plantas Hidroeléctricas; Generencia General de Construcción de la Comisión Federal de Electricidad.

Pautre, I. A. (1977). *Recomendaciones generales sobre el tratamiento de la roca, relativas a proyecto y ejecución*. México: Departamento de Estudios Experimentales, Subgenerencia de Plantas Hidroeléctricas; Generencia General de Construcción de la Comisión Federal de Electricidad.

Pautre, I. A. (1978). *Informe de visita de enero de 1978*. México: Departamento de Estudios Experimentales, Subgenerencia de Plantas Hidroeléctricas; Generencia General de Construcción de la Comisión Federal de Electricidad.

Pautre, I. A. (1978). *Informe de visita no. 3, de junio 1978*. México: Departamento de Estudios Experimentales, Subgenerencia de Plantas Hidroeléctricas; Generencia General de Construcción de la Comisión Federal de Electricidad.

Ryan, W., Carbotte, S. M., Coplan, J. O., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., . . . Zemsky, R. (2009). Global Milti-Resolution Topography systhesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol. 10, Issue 3*.

Tecopsa. (s.f.). *INYECTORES ELECTRO HIDRÁULICOS AP/OL-S – AP/OL-90S, MP/OL-2*.
Obtenido de <https://www.tecopsa.com/productos/inyectores-electro-hidraulicos-apol-s-apol-90s-mpol-2/>.