



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ACATLÁN

“CONSTRUCCIÓN DE LA PANTALA FLEXP IMPERMEABLE DEL PROYECTO
HIDROELÉCTRICO LA YESCA”

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

CARLOS ALBERTO AYALA AGUILAR

Asesor: Ing. Hugo Damián García.

Fecha: Agosto 2015

Santa Cruz Acatlán, Estado de México



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

Agradecimientos:

Primeramente doy gracias a Dios por permitirme tener una buena experiencia dentro de mi universidad y permitirme en convertirme en un ser profesional en lo que más me apasiona.

A mi familia fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida, y en especial a mi madre: María Eugenia Aguilar García, que sin su amor, apoyo y comprensión durante todo este tiempo hubiera sido imposible culminar mi profesión.

Mi más sincero agradecimiento y reconocimiento al apoyo de mi asesor, el Ing. Hugo Damián G., por su tiempo, sus consejos durante el desarrollo de este trabajo, y sobre todo por su paciencia y alientos a culminar este proceso profesional. Gracias por compartir sus experiencias y anécdotas.

A mis amigos, por sus palabras de apoyo, por su confianza al creer en mí y darme ánimos para seguir adelante con mis sueños.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO.....	3
INDICE DE FIGURAS.....	6
INTRODUCCIÓN.....	8
GENERALIDADES.....	10
1. Capítulo 1.- Definición, Clasificación y Elementos de las presas.	14
1.1. Definición de presa	14
1.2. Clasificación habitual de las presas.....	15
1.3. Elementos de las presas.....	22
2. Capítulo 2.- Consideraciones en el diseño de una presa de materiales graduados	26
2.1. Factores necesarios para la selección de una presa.....	26
2.2. Presa de materiales graduados – Definición de sus elementos	27
2.2.1. Núcleo.....	28
2.2.2. Ancho de la corona	28
2.2.3. Bordo libre	28
2.2.4. Alineamiento del eje de la cortina.....	29
2.2.5. Zona de transición de filtros	29
2.2.6. Taludes.....	29
2.2.7. Cimentación.....	29
2.2.8. Zonificación de materiales.....	30
2.2.9. Control y manejo de filtraciones	30
3. Capítulo 3. Proceso constructivo del muro pantalla	33
3.1. Definición de muro pantalla	33
3.2. Ejecución del Muro milan.	34
3.2.1. Proceso de excavación.....	34
3.2.2. Excavación de la zanja guía y brocal.....	36
3.2.3. Equipo de excavación	37
3.2.4. Limpieza del fondo	40
3.2.5. Relleno de la zanja.....	41
3.2.6. Juntas de colado	41

3.2.7.	Ventajas del Muro Milan	42
3.3.	Lodos estabilizadores.....	43
3.3.1.	Definición de lodos	43
3.3.2.	Características de los lodos estabilizadores	43
3.3.3.	Propiedad de los lodos o mezclas.....	43
3.3.3.1.	Espesor de la costra	44
3.3.4.	Tipos de lodos.....	48
3.3.5.	Elaboración de lodos	49
4.	Tratamientos en rocas.....	50
4.1.	Inyecciones en roca.....	50
4.2.	Clasificación de los tratamientos de inyección.....	51
4.2.1.	Inyecciones por su finalidad	52
4.3.	Técnicas de inyección	52
4.4.	Uso de las inyecciones	54
4.5.	Ensayos que permiten caracterizar el material a inyectar	54
4.6.	Métodos de ejecución de las inyecciones	57
4.7.	Medios inyectables	59
4.8.	Tipos de mezclas	60
4.9.	Diseño de una pantalla de inyectado	62
4.10.	Método GIN.....	63
4.10.1.	Diseño de mezcla	63
4.10.2.	Curva límite	64
4.10.3.	Saturación de la roca	65
4.10.4.	Parada de inyección	65
4.10.5.	Ventajas del Método GIN.....	66
5.	Construcción de la Pantalla Flexo Impermeable del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”.	67
5.1.	Localización	67
5.2.	Geología del sitio.	71
5.3.	Secuencia constructiva de la pantalla flexible	73

5.3.1.	Fabricación de la plataforma de trabajo	73
5.3.2.	Construcción de los brocales guía	76
5.3.3.	Suministro de la mezcla autofraguante.....	77
5.3.4.	Ensayos de los cilindros – Prueba de compresión simple	80
5.3.5.	Excavación del muro pantalla.....	81
5.3.6.	Empotramiento de la pantalla flexible en la roca basal	84
5.3.7.	Retiro de los brocales guía	86
5.3.8.	Maquinaria y Equipo.....	87
5.4.	Tratamientos en el terreno por medio de inyecciones en los muros pantalla del P. H. La Yesca.	90
5.1.1.	Metodología para la ejecución de las inyecciones bajo las ataguías	90
5.2.1.	Saturación previa del terreno.....	95
5.2.2.	Inyecciones de consolidación e impermeabilización	95
5.2.3.	Inyección de barrenos comunicados.....	97
5.2.4.	Inyecciones de Contacto.....	97
5.2.5.	Lavado del barreno.....	97
5.2.6.	Características de las mezclas para inyecciones de impermeabilización y consolidación.....	98
6.	Conclusiones.....	99
7.	Referencias.....	102

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.2.1.- Presa Zicuirán. Michoacán, México.	15
Figura 1.2.2.- Presa Zicuirán. Michoacán (Riego agrícola, control de avenidas, turismo y pesca).	16
Figura 1.2.3.- Central Hidroeléctrica Belisario Domínguez (La Angostura, Chiapas, México). Cortina tipo gravedad.	17
Figura 1.2.4.- Presa Francisco I. Madero, Chihuahua. México.	17
Figura 1.2.5.- Cortina tipo aligerada con contrafuertes. Presa Francisco I. Madero	18
Figura 1.2.6.- Central Hidroeléctrica Gral. Manuel M. Diéguez.....	18
Figura 1.2.7.- Presa de tipo arco. Jalisco, México - Presa Santa Rosa.	19
Figura 1.3.1.- Sección de la boquilla del P.H. La Yesca	22
Figura 1.3.2.- Vaso del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca.....	22
Figura 1.3.3.- C.H. El Cajón, Nayarit.	23
Figura 2.1.- Componentes de una presa de materiales graduados	25
Figura 2.2.- Colocación e incremento de las propiedades de los materiales en el P.H. La Yesca	26
Figura 2.3.- Compactación de material cohesivo del núcleo de la ataguía aguas arriba del P.H. La Yesca	27
Figura 2.4. Líneas de flujo debido al gradiente hidráulico en la presa	29
Figura 2.5.- Pantalla plástica dentro del cuerpo de la presa.	30
Figura 3.1.- Secuencia de avance que debe de llevar la excavación y el empleo del lodo durante su proceso.	34
Figura 3.2.- Excavación de la zanja para alojar el brocal.....	35
Figura 3.3.- Almeja hidráulica de caída libre (Equipos Casa grande y Bauer).....	37
Figura 3.4.- Maquinaria de Kelly corto (Catálogo Soilmec).....	38
Figura 3.5.- Balanza de Baroid.....	44
Figura 3.6.- Embudo tipo Marsh para el cálculo de la viscosidad	45
Figura 4.1- Objetivo de la inyección.	54
Figura 4.2.- Principio en que se basan los Ensayos Lugeon. (Según H. Cambefort 1968)	55
Figura 4.3.- Formas típicas del diagrama gasto-presión del ensayo Lugeon	56
Figura 4.4- Inyección de una perforación por tramos-tipo descendente. (H. Cambefort 1968) ..	57
Figura 4.5- Inyección de una perforación por tramos-tipo ascendente. (H. Cambefort 1968). ...	58
Figura 4.6.- Esquema del sistema de inyección con Tubo Manguito. (H. Cambefort 1968).	59
Figura 5.1.- Mapa de localización del P.H. La Yesca.....	68
Figura 5.2.- Localización de las ataguías en el P.H. La Yesca.	69
Figura 5.3.- Vista en planta de la ataguía aguas arriba – Pantalla Flexible	69
Figura 5.4.- Sección transversal de la ataguía aguas arriba.....	70
Figura 5.5.- Vista en planta de la ataguía aguas abajo.....	71
Figura 5.6.- Sección transversal de la ataguía aguas abajo.	71
Figura.5.7.- Sección transversal Geológica de la ataguía aguas arriba.....	73
Figura 5.8.- Sección transversal Geológica de la ataguía aguas arriba.....	73
Figura 5.9.- Plataforma de trabajo de la primera etapa del muro pantalla en la ataguía aguas arriba sobre la margen derecha del cauce del río.....	74

Figura 5.10.- Plataforma de trabajo en la segunda etapa del muro pantalla en la ataguía aguas arriba sobre la margen izquierda del cauce del río.	75
Figura 5.11.- Plataforma que alojara las instalaciones para la ejecución de la pantalla impermeable aguas abajo de la presa.	75
Figura 5.12.- Instalaciones en campo para la ejecución de la preparación de mezclas para el inyectado y construcción del muro plástico.	76
Figura 5.13.- Excavación del brocal guía para alojar el equipo de excavación (almeja), ataguía aguas arriba.	77
Figura 5.14.- Instalación de la cimbra del brocal guía para alojar el equipo de excavación (almeja), ataguía aguas abajo.	77
Figura 5.15.- Construcción del brocal de la ataguía aguas arriba.	78
Figura 5.16.- Tanques de almacenamiento (costado izquierdo).	79
Figura 5.17.- Equipo de mezclado de la mezcla autofraguante e inyectado.	79
Figura 5.18.- Moldes cilíndricos para la elaboración de las probetas de ensaye.	81
Figura 5.19.- Cilíndricos para la elaboración de las probetas de ensaye en laboratorio.	81
Figura 5.20.- Perfil por el eje de la pantalla impermeable de la ataguía aguas arriba – Primera etapa	83
Figura 5.21.- Perfil por el eje de la pantalla impermeable de la ataguía aguas arriba – Segunda etapa	84
Figura 5.22.- Sección de la excavación de la pantalla aguas abajo P.H. La Yesca	84
Figura 5.23.- Recuperación de núcleo – Barreno Panel 20 pantalla aguas abajo P.H. La Yesca	85
Figura 5.24.- Obtención de muestras de la roca basal	86
Figura 5.25.- Colocación de los tubos guía para los barrenos de perforación.	86
Figura 5.26.- Retiro del brocal guía de la pantalla flexible-ataguía aguas abajo	87
Figura 5.27.- A la derecha equipo Bauer GB 34 de excavación para la pantalla impermeable y a la izquierda equipo Link Belt adicionando con cincel-trepano, ataguía aguas arriba del P.H. La Yesca.	88
Figura 5.28.- Al fondo el equipo Link Belt adicionando con cincel-trepano y al frente el equipo Soilmeac de excavación para la pantalla impermeable. Equipo de excavación y demolición en la pantalla aguas arriba.	88
Figura 5.29.- Equipo Soilmeac utilizado para la construcción de la pantalla aguas abajo.	89
Figura 5.30.- Equipo de mezclado para la elaboración de las mezclas de inyectado y autofraguante.	89
Figura 5.31.- Etapas de inyección del P. H. La Yesca.	94

INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta una perspectiva de los procedimientos constructivos adoptados a lo largo de la construcción de las estructuras que conforman el Muro pantalla del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca (P. H. La Yesca), que en conjunto con los tratamientos especiales en las diferentes estructuras del P.H. “La Yesca”, conforman el plano de estanqueidad del proyecto.

Por ende, se describe un panorama de intervenciones ingenieriles en el tratamiento del terreno, que se consideran como parte de acciones para la modificación de sus propiedades, pero sobre todo una respuesta de su comportamiento frente a acciones interiores y exteriores. Estos tratamientos se realizan con el objetivo de incrementar las propiedades del terreno, garantizando así la seguridad de las obras que en un futuro se construirán en él.

Particularmente estos tratamientos que conforman el plano de estanqueidad se conforman de dos muros pantalla debajo de las ataguías: aguas arriba y aguas abajo respectivamente, inyecciones de impermeabilización dentro de las 4 galerías de cada margen, así como en los taponos dentro de las obras de generación y galerías respectivas. En las diferentes estructuras anteriormente mencionadas, se ejecutaron una serie de inyecciones con el arreglo geométrico adecuado para la conformación del plano de estanqueidad, el cual garantizará la conducción eficiente del flujo de agua que se llegase a presentar durante la vida útil de la presa.

Por tal razón, el presente documento contiene una amplia información acerca de los materiales, equipos y métodos o procesos empleados en la ejecución de los muros flexocompresibles y pantallas profundas de impermeabilización a base de inyecciones dentro de los muros pantallas ejecutados debajo de cada una de las ataguías.

Por otra parte y sin dejar de lado la sustentabilidad de la energía renovable que se produce con este proyecto hidroeléctrico, cabe destacar que esta central hidroeléctrica forma parte del Programa Nacional de Infraestructura 2007 – 2012, el cual está vinculado al Programa Sectorial de Energía de la Secretaría de Energía (SENER) que a su vez proporciona información necesaria para el Programa de Obras e Inversión del Sector Eléctrico (POISE) implementado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), encargada de la infraestructura necesaria para satisfacer las demandas de energía eléctrica del país.

Por consiguiente, la CFE desarrolló los estudios conducentes al aprovechamiento del Río Santiago a través del P.H. La Yesca diversificando así las fuentes renovables del país. Este proyecto hidroeléctrico ocupará el tercer lugar en potencia instalada y generación dentro del sistema hidroeléctrico del río Lerma-Santiago, después de la C.H.

Aguamilpa (960 MW) y la C.H. El Cajón (750 MW), con una potencia instalada de 750 MW con dos unidades generadoras, la cual esta conceptuada como planta de generación, en horas pico de la demanda de energía eléctrica.

GENERALIDADES

Desde tiempos históricos el agua ha sido un elemento indispensable y fundamental para el ser humano por lo que ha tenido que regular los cursos fluviales, asegurándose así del suministro adecuado de agua, que es primordial para la contribución del desarrollo y el bienestar de las distintas civilizaciones, por lo que fue, es y será siempre un recurso vital para el hombre.

El día de hoy, el agua juega un papel muy importante en el progreso de las sociedades, ésta representa un recurso básico para conservar la vida de los seres vivos. A continuación, se menciona la dificultad que se tiene debido a la mala distribución de dicho recurso, tanto en el tiempo como en el espacio: se presentan precipitaciones irregulares, por lo que el hombre tuvo que ingeniárselas para captar y controlar las avenidas satisfaciendo de este modo, sus necesidades.

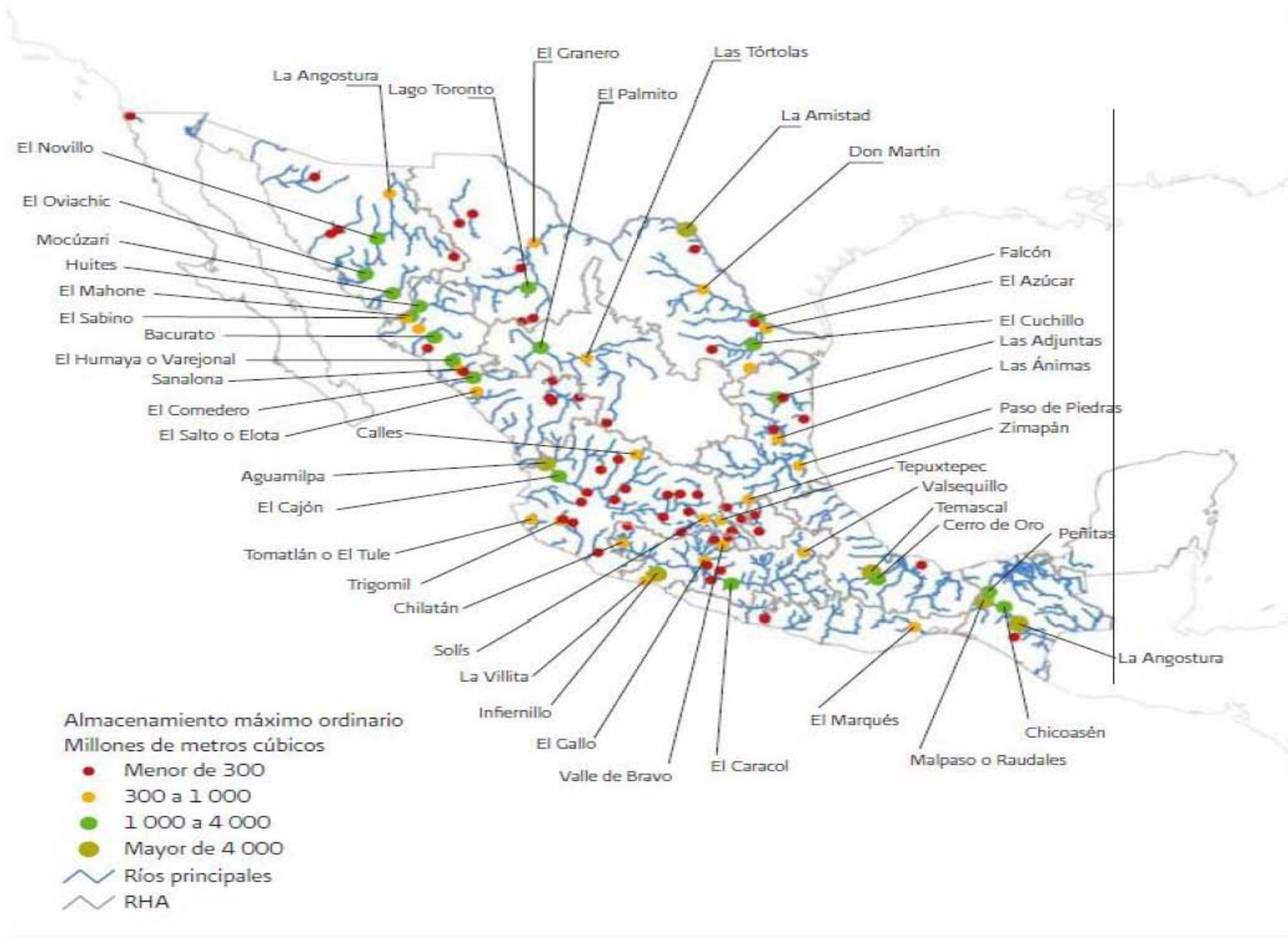
En México existe una mala distribución de disponibilidad de agua, por lo que se agrupa en 2 grandes zonas: La zona norte, centro y noroeste solo cuentan con el 31% del agua renovable y la zona sur y sureste tienen una disponibilidad del 69% del agua renovable. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha dividido a estas dos grandes zonas en: 13 Regiones Hidrológico-Administrativas con el fin de organizar y preservar las aguas nacionales.

Dentro de la infraestructura hidráulica con la que cuenta el país para proporcionar agua destacan 4000 presas de almacenamiento, de las cuales 667 están clasificadas como grandes presas, de acuerdo a la definición de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, por sus siglas en inglés). La capacidad del almacenamiento del país es de 150 mil millones de metros cúbicos, la cual depende de las precipitaciones y escurrimientos en las diferentes regiones.

De las 4000 presas que existen, el 70% del total de almacenamiento lo representan 52 presas, de las cuales 28 presas producen una capacidad efectiva de 10 661.5 MW, y en particular 7 presas destacan por su capacidad de generación, ya que representan el 72% de la capacidad de generación.

De acuerdo con la CONAGUA a continuación se relacionan las presas más representativas de México, así como se menciona el uso, capacidad y localización de cada unas de ellas.

M4.1 Presas principales en México por su capacidad de almacenamiento, 2009



Construcción de la Pantalla Flexo Impermeable del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”.

T4.1 Capacidad de almacenamiento y uso de las principales presas de México, 2007									
No	Nombre oficial	Nombre común	Capacidad total ^P (mil. de m ³)	Altura de la cortina (m)	Año de terminación	Región Hidrológico-Administrativa	Entidad federativa	Usos	Capacidad efectiva (MW)
1	Belisario Domínguez	La Angostura	10 727	143	1974	Frontera Sur	Chiapas	G	900
2	Netzahualcóyotl	Malpaso	9 605	138	1964	Frontera Sur	Chiapas	G	1 080
3	Infiernillo	Infiernillo	9 340	149	1963	Balsas	Guerrero -Michoacán	G, C	1 000
4	Presidente Miguel Alemán	Temascal	8 119	76	1955	Golfo Centro	Oaxaca	G, C	354
5	Solidaridad	Aguamilpa	5 540	186	1993	Lerma-Santiago-Pacífico	Nayarit	G, I	960
6	General Vicente Guerrero	Las Adjuntas	3 900	60	1971	Golfo Norte	Tamaulipas	I, A	
7	Internacional La Amistad	La Amistad	3 887	77	1969	Río Bravo	Coahuila – Texas	G, I, A, C	66
8	Internacional Falcón	Falcón	3 273	50	1953	Río Bravo	Tamaulipas – Texas	A, C, G	32
9	Adolfo López Mateos	El Humaya	3 087	106	1964	Pacífico Norte	Sinaloa	G, I	90
10	Álvaro Obregón	El Oviachic	2 989	90	1952	Noroeste	Sonora	G, I	19
11	Plutarco Elías Calles	El Novillo	2 925	139	1964	Noroeste	Sonora	G, I	135
12	Miguel Hidalgo y Costilla	El Mahone	2 921	81	1956	Pacífico Norte	Sinaloa	G, I	60
13	Luis Donaldo Colosio	Huites	2 908	165	1995	Pacífico Norte	Sinaloa	G, I	422
14	La Boquilla	Lago Toronto	2 903	80	1916	Río Bravo	Chihuahua	G, I	25
15	Lázaro Cárdenas	El Palmito	2 873	105	1946	Cuencas	Durango	I, C	
16	Leonardo Rodríguez Alcaine	El Cajón	2 282	186	2006	Lerma-Santiago-Pacífico	Nayarit	G	750
17	José López Portillo	El Comedero	2 250	134	1983	Pacífico Norte	Sinaloa	G, I	100
18	Gustavo Díaz Ordaz	Bacurato	1 860	116	1981	Pacífico Norte	Sinaloa	G, I	92
19	Carlos Ramírez Ulloa	El Caracol	1 414	126	1986	Balsas	Guerrero	G	600
20	Manuel Moreno Torres	Chicoasén	1 376	261	1980	Frontera Sur	Chiapas	G	2 400
21	Ing. Fernando Hiriart	Zimapán	1 360	203	1996	Golfo Norte	Hidalgo-Querétaro	G	292
22	Venustiano Carranza	Don Martín	1 313	35	1930	Río Bravo	Coahuila de Zaragoza	I, A, C	
23	Miguel de la Madrid	Cerro de Oro	1 250	70	1988	Golfo Centro	Oaxaca	G, I	360
24	Cuchillo-Solidaridad	El Cuchillo	1 123	44	1994	Río Bravo	Nuevo León	A, I	
25	Ángel Albino Corzo	Peñitas	1 091	58	1986	Frontera Sur	Chiapas	G	420
26	Adolfo Ruiz Cortines	Mocúzari	950	62	1955	Noroeste	Sonora	G, I	10
27	Benito Juárez	El Marqués	947	86	1961	Pacífico Sur	Oaxaca	I	
28	Marte R. Gómez	El Azúcar	824	49	1946	Río Bravo	Tamaulipas	I	

Construcción de la Pantalla Flexo Impermeable del Proyecto Hidroeléctrico "La Yesca".

T4.1 Capacidad de almacenamiento y uso de las principales presas de México, 2007 (continuación)									
No	Nombre oficial	Nombre común	Capacidad total ^a (mill. de m ³)	Altura de la cortina (m)	Año de terminación	Región Hidrológico-Administrativa	Entidad federativa	Usos	Capacidad efectiva (MW)
29	Solís	Solís	728	52	1980	Lerma-Santiago-Pacífico	Guanajuato	I	
30	Lázaro Cárdenas	La Angostura	703	73	1942	Noroeste	Sonora	I, A	
31	Sanalona	Sanalona	673	81	1948	Pacífico Norte	Sinaloa	G, I	14
32	Constitución de Apatzingán	Chilatán	601	105	1989	Balsas	Jalisco	I	
33	Estudiante Ramiro Caballero	Las Ánimas	571	31	1976	Golfo Norte	Tamaulipas	I	
34	José María Morelos	La Villita	541	73	1968	Balsas	Michoacán - Guerrero	G, I	280
35	Josefa Ortiz de Domínguez	El Sabino	514	44	1967	Pacífico Norte	Sinaloa	I	
36	Cajón de Peña	Tomatlán	467	68	1976	Lerma-Santiago-Pacífico	Jalisco	I	
37	Chicayán	Paso de Piedras	457	30	1976	Golfo Norte	Veracruz de Ignacio de la Llave	I	
38	El Gallo	El Gallo	441	30	1991	Balsas	Guerrero	G	60
39	Tepuxtepec	Tepuxtepec	425	43	1972	Lerma-Santiago-Pacífico	Michoacán	G, I	79.5
40	Valle de Bravo	Valle de Bravo	418	56	1944	Balsas ^b	México	A	
41	Aurelio Benassini Vizcaino	El Salto	415	73	1986	Pacífico Norte	Sinaloa	I	
42	Manuel M. Diéguez	Santa Rosa	403	114	1964	Lerma-Santiago-Pacífico	Jalisco	G	61
43	Francisco Zarco	Las Tórtolas	365	40	1968	Cuencas Centrales	Durango	C, I	
44	Luis L. León	El Granero	356	62	1968	Río Bravo	Chihuahua	I, C	
45	Plutarco Elías Calles	Calles	350	67	1931	Lerma-Santiago-Pacífico	Aguascalientes	I	
46	Francisco I. Madero	Las Virgenes	348	57	1949	Río Bravo	Chihuahua	I	
47	Manuel Ávila Camacho	Valsequillo	304	85	1946	Balsas	Puebla	I	
48	Guillermo Blake Aguilar	El Sabinal	300	81	1985	Pacífico Norte	Sinaloa	C, I	
49	José López Portillo	Cerro Prieto	300	50	1984	Río Bravo	Nuevo León	A, I	
50	Vicente Guerrero	Palos Altos	250	67	1968	Balsas	Guerrero	I	
51	General Ramón Corona Madrigal	Trigomil	250	107	1993	Lerma-Santiago-Pacífico	Jalisco	I	
52	Federalismo Mexicano	San Gabriel	247	44	1981	Río Bravo	Durango	I, A	
	TOTAL		103 466						10 661.5

NOTA: ^a La capacidad total es al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias o de Operación (NAMO).
^b Esta presa forma parte del Sistema Cutzamala, que es operado por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México
C: Generación de energía eléctrica
I: Irrigación
A: Uso público
C: Control de avenidas
FUENTE: CONAGUA, Subdirección General Técnica.

Tabla 1. Capacidad de almacenamiento y uso de las principales presa de México, 2010. Conagua

1. Capítulo 1.- Definición, Clasificación y Elementos de las presas.

Este capítulo tiene como objetivo dar a conocer una definición de las presas, describiendo brevemente la clasificación de los tipos de presas de acuerdo a su uso, función, tamaño y tipo; así como de los elementos y estructuras básicas que las componen, para finalmente presentar las obras típicas de las que se componen.

1.1. Definición de presa

En esencia una cortina es un muro de mampostería, concreto, tierra u otros materiales que se construye normal al cauce de un arroyo o río impidiendo el paso del agua, con el objetivo de elevar el nivel natural del agua para posteriormente desviarla hacia un cauce o para formar depósitos que retengan los excedentes; obteniendo un aprovechamiento de forma adecuada.

Gracias a su amplio funcionamiento y utilidad que el hombre ha obtenido de las presas, así como de las mejoras que se producen en el sitio de construcción, se han convertido en una de las mejores opciones para el almacenamiento del agua. En la ingeniería de presas, se deben tener muy claros los objetivos a cumplir desde el inicio del proyecto, que son generalmente crear un embalse para la regulación o generación de energía eléctrica. Para cumplir el objetivo del embalse se necesita atender las funciones de resistencia (de la estructura y del cimiento) e impermeabilidad y todo ello con la mejor seguridad posible.

Con el paso de los años la tipología de las presas ha ido en aumento, lo cual ha causado que los trabajos relacionados a la contención, al transporte y al uso de dicho recurso hayan evolucionado con base a la experimentación e investigación de dichos diseños. Gracias a la ayuda de la tecnología han avanzado las técnicas en los procesos constructivos y la mejora de los materiales utilizados para que los proyectos sean viables; con esto se ha podido emplear el agua en la producción de energía hidroeléctrica y aunado a esto en la actualidad se han aprovechado en la generación de empleos turísticos, acuicultura y pesca.

Debido a esto se ha hecho una amplia clasificación de ellas por lo que se pueden clasificar de acuerdo a: uso, función, tamaño, materiales utilizados y entre otras características más.

1.2. Clasificación habitual de las presas

Una forma sencilla de comprender su clasificación de las presas puede ser de acuerdo a: sus dimensiones, como su altura, su volumen y/o contenido de agua que puede llegar a almacenar.

Se clasifican de la siguiente manera:

- ❖ Por su tamaño
 - Presas grandes
 - Deben de tener una altura superior a 15 m. desde su cimentación hasta la coronación.
 - Longitud de la coronación mayor a 500 m.
 - Capacidad embalse mayor a 1 000000 m³
 - Capacidad del desfogue superior a 2 000 m³/s
 - Presas pequeñas
 - Serán todas aquellas que no cumplan con las consideraciones anteriores.

Existe otra clasificación que toma como objetivo principal las diferentes consecuencias que puede llegar a presentarse en el colapso de una presa. A continuación se resumen la clasificación en categorías de acuerdo a su riesgo potencial o por su mal funcionamiento.

- ❖ Por su riesgo potencial
 - Categoría A
 - Presas que por su rotura y mal funcionamiento afectará a poblaciones urbanas y/o servicios esenciales, causando daños materiales y medioambientales muy importantes.
 - Categoría B
 - Presa que por su rotura y mal funcionamiento causarán daños materiales y medioambientales a poblaciones reducidas.
 - Categoría C
 - Presas que por su rotura y mal funcionamiento causarán en moderada importancia y solo de manera incidental pérdida de vidas humanas o todas aquellas que no incluyen las categorías anteriores.

Dentro de las clasificaciones de las presas existen algunos conceptos que toman en cuenta su función al almacenar el agua, por lo consiguiente se presenta la siguiente clasificación.

❖ Por la función al almacenar el agua.

- Presas de Almacenamiento

Su principal característica es almacenar los escurrimientos superficiales de una determinada zona hidrográfica (sub-cuencas) para su aprovechamiento económico y/o recreativo.

- Presas de Regularización de Avenidas

Se caracteriza por retener temporalmente escurrimientos superficiales y torrenciales, descargándolos hacia aguas abajo de manera controlada. Tienen como principal función el proteger zonas urbanas, industriales y agrícolas contra inundaciones, evitando pérdidas humanas y económicas.

- Presas Derivadoras

Tienen la función de elevar el tirante normal de una corriente para conducirlo por las márgenes obteniendo un aprovechamiento económico y recreativo, por ejemplo la Presa Zicuirán, ubicada en el estado de Michoacán.



Figura 1.2.1.- Presa Zicuirán. Michoacán, México.



Figura 1.2.2.- Presa Zicuirán. Michoacán (Riego agrícola, control de avenidas, turismo y pesca).

Algunas de las presas combinan las características anteriormente mencionadas para darle un uso agrícola o de generación de energía.

De acuerdo a las diferentes condiciones en las que se encuentre el terreno, la tecnología, el uso que tenga la presa y algunas circunstancias de poder económico la ICOLD las clasifica en dos grandes grupos.

❖ Presas de fábrica

Estas presas son las más antiguas; construidas en ladrillo, mampostería y contrafuerte como también las modernas construidas de muros de concreto. Dentro de esta clasificación se puede encontrar los siguientes tipos de presas:

- Presas de gravedad

Presas que por su peso propio evitan que el empuje del agua cause volteo y deslizamiento, por lo tanto el peso de la presa es considerable. El empuje del agua se transmite hacia la cimentación de la presa; su perfil de esta es trapezoidal o rectangular en la parte inferior, como por ejemplo la Presa La Angostura, ubicada en el estado de Chiapas.



Figura 1.2.3.- Central Hidroeléctrica Belisario Domínguez (La Angostura, Chiapas, México). Cortina tipo gravedad.

- Presas de contrafuertes o aligeradas:

Esta presa consta de contrafuertes que transmiten las fuerzas del embalse hacia la cimentación, además con esta geometría se logra una mejor distribución del concreto logrando un mayor momento de inercia en la sección horizontal y como consecuencia se reduce el consumo de grandes volúmenes de concreto y de una membrana o pantalla estanca, por ejemplo la Presa Francisco I. Madero situada en el estado de Chihuahua.



Figura 1.2.4.- Presa Francisco I. Madero, Chihuahua. México.



Figura 1.2.5.- Cortina tipo aligerada con contrafuertes. Presa Francisco I. Madero

- Presas de Arco:

Generalmente llamada Presa de bóveda; una de sus características estructurales radica en poder transmitir de forma concentrada la presión del agua hacia su cimentación y apoyos gracias a su geometría. Necesita ser construida en roca sana y resistente. Son muy esbeltas y de formas complicadas; pueden llegar a ser muy altas. (Véase figura 1.2.6)



Figura 1.2.6.- Central Hidroeléctrica Gral. Manuel M. Diéguez.



Figura 1.2.7.- Presa de tipo arco. Jalisco, México - Presa Santa Rosa.

❖ Presas de materiales graduados

Este tipo de presa ha sido preferida por los ingenieros mexicanos ya que su sección es simétrica. En cuanto a su ejecución, depende de que se tenga una buena calidad de materiales, por lo que debe de tener un especial cuidado en su elección, ya que son formadas por materiales naturales, como fragmentos de rocas, gravas, arenas, arcillas, limos y suelos en general.

Gracias a los avances en la tecnología de las grandes máquinas es posible tratar grandes masas de tierra, grava u otro tipo de material; permitiendo preparar una adecuada mezcla para cumplir los fines de su construcción. Este tipo de presa aporta la resistencia necesaria para contrarrestar el empuje del agua, son adaptables a diferentes rangos de asentamiento en los materiales de la cimentación. Dentro de estas presas existe alguna clasificación dependiendo del porcentaje de material utilizado para su construcción.

- Presas de tierra

Se denominan así cuando más del 50% de los materiales utilizados son térreos o mezclados con gravas o arenas, o rocas de un diámetro mayor que sirven como protección contra el oleaje. Dentro de estas presas se pueden tener algunas secciones de diferentes características como la sección homogénea, la cual está compuesta de un solo material; por lo que conviene que sea relativamente

impermeable. Se recomienda que tenga por lo menos una protección contra el oleaje en el talud aguas arriba. En alguna de estas presas se pueden llegar a tener una zona de filtros con el objetivo de que el flujo de agua a través de la masa de tierra no intercepte el talud de aguas abajo para que no cause un deslizamiento de los materiales; en cuanto a la estabilidad de los taludes se requiere que deban ser relativamente tendidos.

- Presas zonificadas

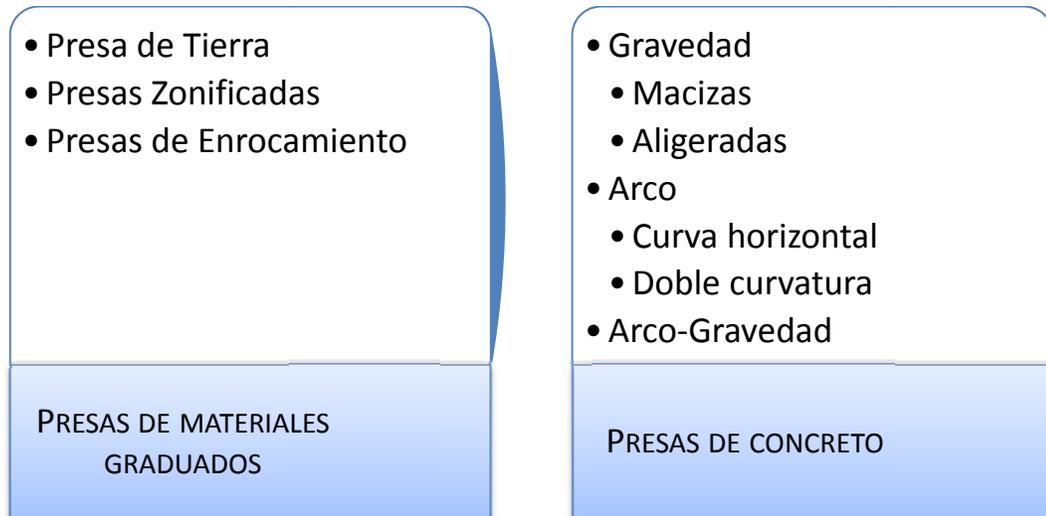
Se le da este nombre, por distribuir de manera gradual los materiales. El tipo más común consta de un núcleo impermeable confinado por zonas de materiales considerablemente más permeables los cuales confinan, soportan y protegen el núcleo. Los taludes están limitados por la estabilidad del terraplén, la resistencia de la cimentación y por su conservación; en general la sección es simétrica por lo que ha sido una de las más seleccionadas por los ingenieros mexicanos.

- ❖ Presas de enrocamiento

Estas presas se caracterizan porque el cuerpo de la cortina está conformado por una combinación de tierra-roca, siendo la segunda en mayor cantidad. Se recomienda dar un tratamiento adecuado a los materiales para poder reducir la permeabilidad. En algunas presas de este tipo se ha colocado una pantalla impermeable de concreto o asfalto en el talud aguas arriba, que pueden recibir el nombre de presas de enrocado con losas de concreto o asfalto, aunque internacionalmente se conocen como CFRD (por sus siglas en inglés Concrete Face Rockfill Dams).

Éstas losas deben quedar cimentadas a la roca para continuar con el plano de estanqueidad de la presa, para tal fin se diseña un elemento de unión llamado plinto, el cual es de concreto armado y se ancla firmemente a la roca, para que sobre él se apoyen las losas. El plinto cubre también la función de ser una plataforma a través de la cual se ejecutan tratamientos de consolidación al terreno y de inyecciones profundas que evite filtraciones a través de la roca, así como las un adecuado plano de estanqueidad de la presa.

En síntesis, estos son los principales tipos de presas que podemos encontrar:



1.3. Elementos de las presas

Se han definido algunas de las clasificaciones de la presas, gracias a esto se tiene un panorama general acerca de lo que es una presa y de sus tipos, razón suficiente para mencionar los diferentes elementos que las componen. Algunos de estos son de condiciones topográficas, otros son de tipo geológico, ambos necesitan un previo estudio, sin embargo otros elementos son estructuras complicadas en su construcción, por lo que requieren un diseño adecuado para su buen funcionamiento.

A continuación se presenta una breve explicación de cada uno de los principales elementos que integran a las presas.

❖ Condiciones topográficas:

- Boquilla: Es la zona del terreno natural en donde se construirá la cortina; se recomienda que esta sea de sección estrecha, en lo posible en ambas márgenes para el aprovechamiento adecuado de los materiales; además de tener ciertas características geológicas adecuadas para el desplante de la presa.



Figura 1.3.1.- Sección de la boquilla del P.H. La Yesca

- Vaso: Es la extensión geográfica que será inundada, el cual formará el embalse de la presa. Esta debe de tener la suficiente superficie territorial para almacenar el volumen de agua proyectada.



Figura 1.3.2.- Vaso del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca

Condiciones estructurales:

- ❖ Cortina: Es el elemento que servirá para contener el agua, con lo cual se formará el embalse. Debe garantizar la estabilidad de la construcción y no permitir filtraciones de agua excesivas. Se diseña considerando la zona y los materiales disponibles, tomando en cuenta las necesidades, el uso, así como la seguridad y el buen funcionamiento.

- ❖ Obra de toma: Es la estructura utilizada para extraer el agua del embalse de manera que efectúe la función para el cual fue diseñada la presa.

- ❖ Obra de excedencias: Es la estructura mejor conocida como vertedor por la cual se derramará el agua excedente una vez alcanzado el nivel máximo de diseño de la presa.



Figura 1.3.3.- C.H. El Cajón, Nayarit.

Existen algunas obras que se ejecutan durante la construcción de la presa las cuales son temporales, y por lo tanto no son muy notables, pero sin embargo desarrollan un papel muy importante dentro del progreso de la obra, garantizando así una zona adecuada donde se desarrollan los trabajos relacionados a su construcción.

- ❖ Obras asociadas

Algunas de estas, son las obras de desvío las cuales ya no darán servicio una vez se inicie el embalse de la presa. Su principal objetivo como su nombre lo menciona, es el de lograr el desvío del cauce del río de forma satisfactoria. Las obras de desvío no solo tiene repercusión en su propio costo, sino en el costo global de la obra por lo que su construcción se debe llevar a cabo con especial cuidado. Dentro de estas obras existe la siguiente clasificación:

- Ataguías: Son elementos que se emplean para encauzar flujos de agua, generalmente son presas de tierra confinadas con algún revestimiento de roca de altura pequeña y un alma de material impermeable. Estas obras permitirán trabajar en un lugar seco donde posteriormente se construirá la Cortina.
- Túneles: estructuras provisionales que se construirán en base a la condición del terreno y del gasto máximo de diseño.
- Canales: estructura provisional utilizada para desviar el cauce del río, la cual se alojará donde se encuentre el escurrimiento mayor; este canal se diseña con el gasto máximo de diseño.

Dentro de las obras de desvío que hemos descrito anteriormente, se lleva a cabo tal y como se mencionó anteriormente la construcción de las ataguías, asociado a esta obra se realiza la ejecución de lo que comúnmente se le conoce como pantalla impermeable (pantalla plástica o flexocompresible), la cual con ayuda de la ataguía (su núcleo) y las inyecciones proporciona la estanqueidad en la zona donde en un futuro se construirá la cortina.

Cabe aclarar que cada elemento es muy particular en cada proyecto, sin embargo, existe una gran semejanza entre algunos proyectos, gracias a esta semejanza se han llevado a cabo una investigación de los elementos anteriormente mencionados, dando como consecuencias el uso de presas de mayor capacidad y con certeza, un gran incremento en la seguridad de las mismas.

En particular para este documento nos enfocaremos en la descripción de una presa de materiales graduados, razón suficiente para describir el criterio de selección y los elementos que conforman dicha presa.

2. Capítulo 2.- Consideraciones en el diseño de una presa de materiales graduados

Este capítulo inicia con algunos de los factores primordiales que influyen en la selección del tipo de presa a construir, para nuestro caso se da énfasis a una presa de materiales graduados en donde se da una breve explicación de cada uno de los elementos que la componen. De igual manera se presenta un inicio del uso, de los tratamientos en el terreno a base de inyecciones y otros procesos utilizados, con la finalidad de evitar la erosión interna debido a las filtraciones de agua que se puedan presentar en el cuerpo de la presa.

Las presas de materiales graduados debido a que su tipología es predominante en el mundo, se han mejorado enormemente los medios de puesta en obra de estas presas, por tal motivo, representan una alternativa a seguir en las futuras obras en México.

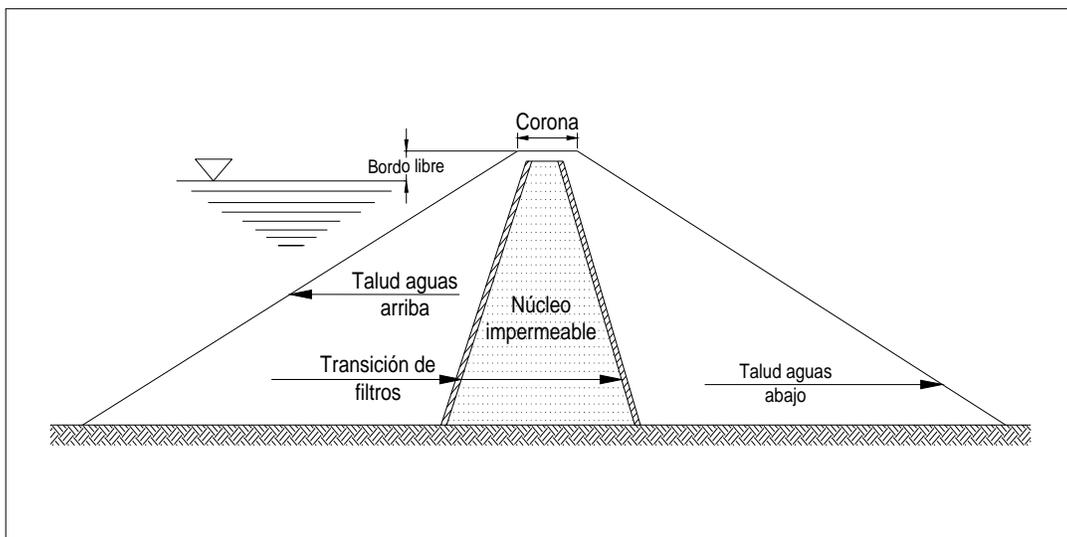


Figura 2.1.- Componentes de una presa de materiales graduados

Es esencial encontrar la solución más favorable tanto en la técnica como en lo económico por lo que es importante conocer todas las alternativas posibles. Se recomienda que la investigación del proyecto cubra algunos factores elementales para la elección de una presa. A continuación se enumeran dichos factores.

2.1. Factores necesarios para la selección de una presa

Además de las características y particularidades de cada sitio, existen una gran variedad de soluciones económicas como funcionales, que influyen en la elección del

tipo de cortina que se vaya a construir. Algunos de estos factores que afectan al diseño son:

1. Función de la obra.
2. Características de la boquilla, cimentación y del vaso.
3. Tipo, calidad y localización de materiales.
4. Desviación del río.
5. Acción probable del oleaje.
6. Características climatológicas de la región.
7. Características geológicas de la región.
8. Importancia de la obra.

2.2. Presa de materiales graduados – Definición de sus elementos

Básicamente se construye por medio de la colocación de capas de materiales que normalmente su explotación se lleva a cabo en los bancos de materiales en las cercanías de la obra, los cuales, llevan una selección cuidadosa y así como un proceso de trituración, obteniendo las dimensiones necesarias para el proyecto; sus propiedades mecánicas son incrementadas con ayuda del equipo adecuado.

La compactación incrementa sus propiedades para tratar de que las filtraciones sean reducidas lo mínimo posible, de modo que se proporcione una estabilidad adecuada.



Figura 2.2.- Colocación e incremento de las propiedades de los materiales en el P.H. La Yesca

2.2.1. Núcleo

Está formado por un material de baja permeabilidad para evitar las filtraciones, se coloca en el centro de la presa con una compactación adecuada. Su tamaño depende de las filtraciones de agua y de la erosión interna, para que una vez que pase a través de él no provoquen su disgregación. Por lo general su espesor debe ser mayor o igual al 25% de la altura del agua a contener. (Véase referencia 1)

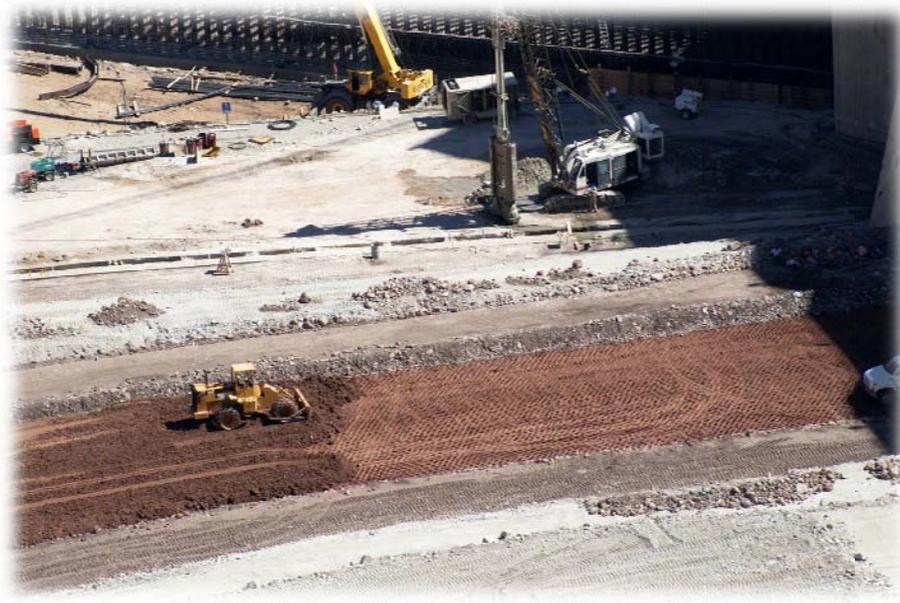


Figura 2.3.- Compactación de material cohesivo del núcleo de la ataguía aguas arriba del P.H. La Yesca

2.2.2. Ancho de la corona

Su diseño depende del uso que vaya a tener la corona, comúnmente es utilizada para el tránsito de vehículos o sólo para mantenimiento por lo que se necesita cubrir de materiales semejantes a los que se utilizan en los caminos para evitar el secado del núcleo. La U.S. Army Engineers ha recomendado un ancho mínimo de 7.5 metros para lograr una adecuada compactación.

2.2.3. Bordo libre

Se define como la distancia vertical entre la corona y el nivel de agua máximo extraordinario (NAME), el cual protege a la presa de los efectos del oleaje provocado por el viento o por sismo, para su diseño se debe de considerar la altura del oleaje

provocada por los efectos antes mencionados, de la misma manera un margen adicional de seguridad si se llegase a presentar un asentamiento en la presa.

2.2.4. Alineamiento del eje de la cortina

Se sugiere que sea lo más recta posible de tal manera que se evite la formación de curvas por que estas presentan grandes concentraciones de esfuerzos y agrietamientos, dentro de la sección de la boquilla se debe cuidar que las pendientes de las laderas sean ligeras o de lo contrario se pueden producir grietas por asentamiento del terraplén, especialmente en la parte más alta.

2.2.5. Zona de transición de filtros

Elementos formados por arena bien graduada que tienen como objetivo coleccionar las filtraciones a través del núcleo y protegerlo de una posible erosión interna, se recomienda que el material filtrante tenga una permeabilidad de 50 a 100 veces mayor al suelo que protegerá para asegurar la permeabilidad y asegurarse de que no exista degradación interna alguna.

2.2.6. Taludes

Son las dos superficies más o menos verticales que limitan el cuerpo de la presa, el talud de aguas arriba recibirá el empuje del agua causado por el oleaje, mientras que el talud aguas abajo confinará el núcleo de la cortina. Estos darán una apropiada estabilidad y permeabilidad a la estructura; deben ser construidos por materiales de buena calidad. No es conveniente utilizar suelo orgánico ya que son muy inestables por el alto contenido de humedad, la utilización de roca es ideal.

2.2.7. Cimentación

El cimiento de la obra es la parte principal del proyecto el cual da un apoyo estable en sus condiciones de carga y saturación, asimismo proporciona la capacidad de soporte contra los esfuerzos cortantes que se producen por el deslizamiento a lo largo de la superficie.

Si las condiciones del terreno no llegasen a ser las adecuadas, se deben tomar las medidas necesarias para incrementar las propiedades mecánicas del suelo o roca con lo que será posible utilizar la cementación de las grietas y el relleno de los sitios débiles con base a las inyecciones de consolidación la cuales tienen el propósito de mejorar el módulo de deformabilidad del terreno.

Otro de los fenómenos a vigilar, son los asentamientos que puede sufrir la presa ya que ponen en riesgo a las estructuras. Este tipo de presas aceptan asentamientos diferenciales que son limitados con núcleos amplios y plásticos, como estos son muy

delicados repercuten en las estructuras superiores por lo que es imprescindible la colocación de filtros para proteger la erosión interna y de la misma forma se deben de evitar las filtraciones; ya que provocan subpresiones en el talud aguas arriba cercanas a su cimentación.

2.2.8. Zonificación de materiales

Puesto que no siempre existen materiales de características adecuadas cerca del proyecto, se debe proporcionar una buena zonificación de materiales para obtener un aprovechamiento en la cantidad de estos que se encuentran cercanos al sitio, con lo que se tendría una economía mayor; en las zonas de transición es necesario poner una zona de filtros de por lo menos 3 metros de espesor para asegurar la permeabilidad y evitar en la manera de lo posible degradación interna.

2.2.9. Control y manejo de filtraciones

Todas las presas presentan filtraciones a través del terraplén, la cimentación y en la zona lateral de la presa, estas se deben de proyectar de tal manera que sean lo menos existentes posibles. La filtración debe analizarse mediante líneas de flujo tratando de evitar: subpresiones que se presentan en la parte baja del talud aguas arriba, inestabilidad, erosión del terraplén aguas abajo y sifonamiento.

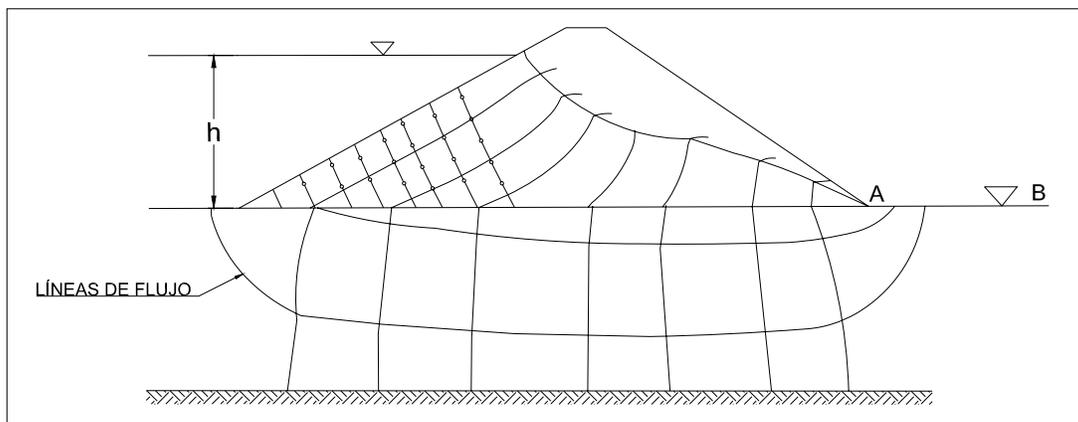


Figura 2.4. Líneas de flujo debido al gradiente hidráulico en la presa

Existen algunos métodos hidráulicos, otros hidromecánicos y algunos más experimentales para el control y el manejo de filtraciones.

Una de las maneras adecuadas para contrarrestar estos fenómenos es la colocación de una zona de filtros ya sea vertical u horizontal, comúnmente conocidos como colchones los cuales obligan a que exista una vía adecuada para guiar el flujo, garantizando el mermado de la presión del agua al permitir su descarga, evitando que se presente la

tubificación a través del terraplén y tratando de abatir la influencia que tiene el gradiente hidráulico en la presa.

Otra de las técnicas utilizadas es creando un pantalla de impermeabilización que puede ser de suelo compactado, relleno fluido o concreto; la cual tiene el propósito de no permitir el paso del agua a través de los estratos superficiales; esta puede ser parcial o total, la primera depende de la profundidad a la que se encuentre un estrato con menor permeabilidad y la segunda atraviesa todo el manto permeable, siendo esta más eficaz.

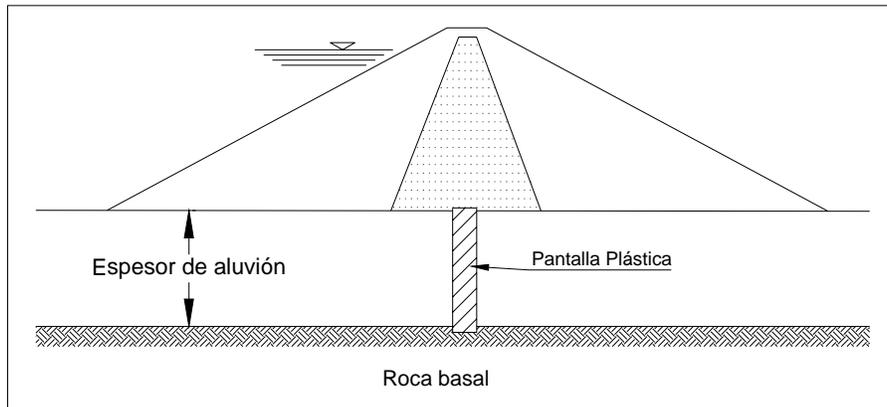


Figura 2.5.- Pantalla plástica dentro del cuerpo de la presa.

Las pantallas plásticas de tipo fluido requieren que su excavación se lleve a cabo con lodos y no se recomienda cuando existe un manto de bloques o aluvión.

Esta técnica en cuanto a los trabajos de aprovechamiento hidroeléctrico de grandes cursos de agua, necesita grandes excavaciones en terrenos permeables para garantizar que se empotere en el fondo. Tales excavaciones no pueden ejecutarse más que al abrigo de una pantalla estanca anclada. Cuando no existe una capa de tales características a una profundidad razonable, es preciso completar la pantalla periférica con un fondo estanco mediante el uso de las inyecciones que comúnmente el conjunto de este trabajo recibe el nombre de cubeta estanca o pantalla estanca.

Dentro de estos métodos también existen, los drenes de zanja al pie de la presa y los pozos de alivio, estos disipan la energía del gradiente hidráulico de una forma eficiente, pero para ello se deben de llevar a profundidades en donde tenga una zona de influencia adecuada; por lo regular se sitúan a un tercio de la cota del embalse, garantizando un correcto funcionamiento contra la subpresión.

Como se ha mencionado anteriormente un método adecuado para el control de filtraciones en las presas es el tratamiento del terreno por medio de inyecciones. Éstas

son una de las técnicas más utilizadas y de mejor comportamiento por lo que han tenido un gran desarrollo en la actualidad. Las inyecciones establecen una manera adecuada de evitar las filtraciones al disminuir el gradiente hidráulico en la zona de la cimentación, laderas o a través del terraplén, también son muy efectivas en el relleno de oquedades y en el relleno de juntas o fisuras que pueden existir en el terreno.

A continuación se da una descripción del proceso de ejecución de la pantalla impermeable que se lleva a cabo en la parte inferior de la ataguía. Esta pantalla estanca se forma de dos estructuras de impermeabilización; tal y como se describe: consta de un muro pantalla que en conjunto con las inyecciones de impermeabilización realizadas representan una de las obras sobresalientes dentro de la construcción de una presa, por lo que se debe tener un especial cuidado en su construcción, gracias a que logra proporcionar una zona seca de trabajo ayudando a garantizar la estanqueidad de la zona.

Cabe resaltar que la función en este documento no es precisar el comportamiento estructural sino solo el funcional de los muros pantalla, ya que evita el paso de filtraciones a través de él y evita daños que el gradiente hidráulico provoca a través del cuerpo de la presa.

3. Capítulo 3. Proceso constructivo del muro pantalla

Este capítulo tiene como principal propósito dar a conocer los elementos principales de un muro pantalla, así como el proceso de su construcción, dando un conocimiento extenso de su funcionalidad y comportamiento dentro de la construcción de las presas presentando sus ventajas de su uso y sus distintas aplicaciones en la rama de la construcción, por lo que el lector tendrá un amplio conocimiento de dicho proceso. Igualmente se describen las técnicas de producción, manejo y control de los lodos, así como de los tipos más frecuentes durante la construcción de estos.

Reseña histórica

La técnica de ejecución de muros pantalla es moderna, ya que sus orígenes se remontan a Italia en los años 50, donde los ingenieros Veder y Marconi lo descubrieron casi simultáneamente. Su idea principal es formar una trinchera profunda sin entibación o armazón en las paredes; esto gracias a la utilización de lodos de perforación. En la actualidad se han creado nuevas técnicas en su ejecución gracias a los avances en la tecnología, por lo que podemos dar una definición clara y objetiva de lo que es un muro pantalla.

3.1. Definición de muro pantalla

Consiste en un muro plástico que pasa el espesor de materiales aluviales hasta hacer contacto con un estrato más resistente o con la roca basal. Está formado por una mezcla de cemento-bentonita-agua. A diferencia de las pantallas de paneles de concreto armado prefabricado éste tipo se realiza in situ.

Como se ha mencionado anteriormente la misión de las pantallas es contener las filtraciones e impermeabilizar los parámetros de una excavación; la cual constituye una solución eficaz para limitar los movimientos del terreno garantizando de esta forma la estanqueidad en la zona.

A continuación se explica de manera extensa la construcción del muro pantalla para tener un conocimiento amplio acerca de su funcionalidad, construcción y del comportamiento que tienen dentro de la construcción de presas.

Por su proceso constructivo se dice que es el de una cimentación profunda; aunque este actúa como un muro de contención por lo que brinda muchos ahorros de costo y un mayor desarrollo de las superficies. El muro pantalla flexible se caracteriza por lograr una estabilidad adecuada cuando existen asentamientos diferenciales en el terreno, logrando bajas deformaciones en el mismo, asimismo trabaja de forma apropiada

contra el volteo transmitiendo las cargas verticales de manera eficiente hacia los elementos estructurales.

El modelo de excavación que se realiza para su construcción es muy parecido el que se lleva a cabo en la ejecución del Muro Milan con avance continuo adoptándose este proceso por sus grandes ventajas y beneficios en su elaboración, aunque dentro de estos mismos procesos existen algunas diferencias importantes entre la ejecución del muro milan y el muro pantalla. Los muros colados en el lugar tienen algunos patrones que sirven para asegurar que se alcance la calidad necesaria para su empleo. Debido a esta gran similitud se da una explicación a detalle de la ejecución de un muro milan.

Procedimientos de construcción adoptados en México

Las técnicas de construcción en los muros milan, han sido un campo muy fértil en el desarrollo innovador, tanto en los equipos de excavación como en los detalles constructivos. Inicialmente se desarrolló solo como elemento de estabilización temporal de excavaciones, tomando un verdadero auge en la actualidad, ya que se amplió hasta transformarse en una forma de construir elementos estructurales o elementos plásticos subterráneos.

Esta técnica fue desarrollada en Francia, por la empresa Soletanche, permitiendo a esta lograr un procedimiento continuo con avances de excavación largos y un aprovechamiento máximo del equipo de construcción.

3.2. Ejecución del Muro milan.

3.2.1. Proceso de excavación

El proceso de excavación es muy simple; siempre y cuando se respete la apertura continua de la zanja, respetando la regla de operación simétrica del equipo de excavación (A, B y C). Se logra avanzando alternadamente con la almeja en dos posiciones; una adelante y una atrás. El lodo fraguante simplemente se agrega en el extremo delantero del tramo en que se está realizando la excavación. Se abre una zanja inicial somera que sirve como canal distribuidor y regulador del consumo; este detalle constructivo asegura que el lodo se consuma gradualmente controlando así la calidad del lodo.

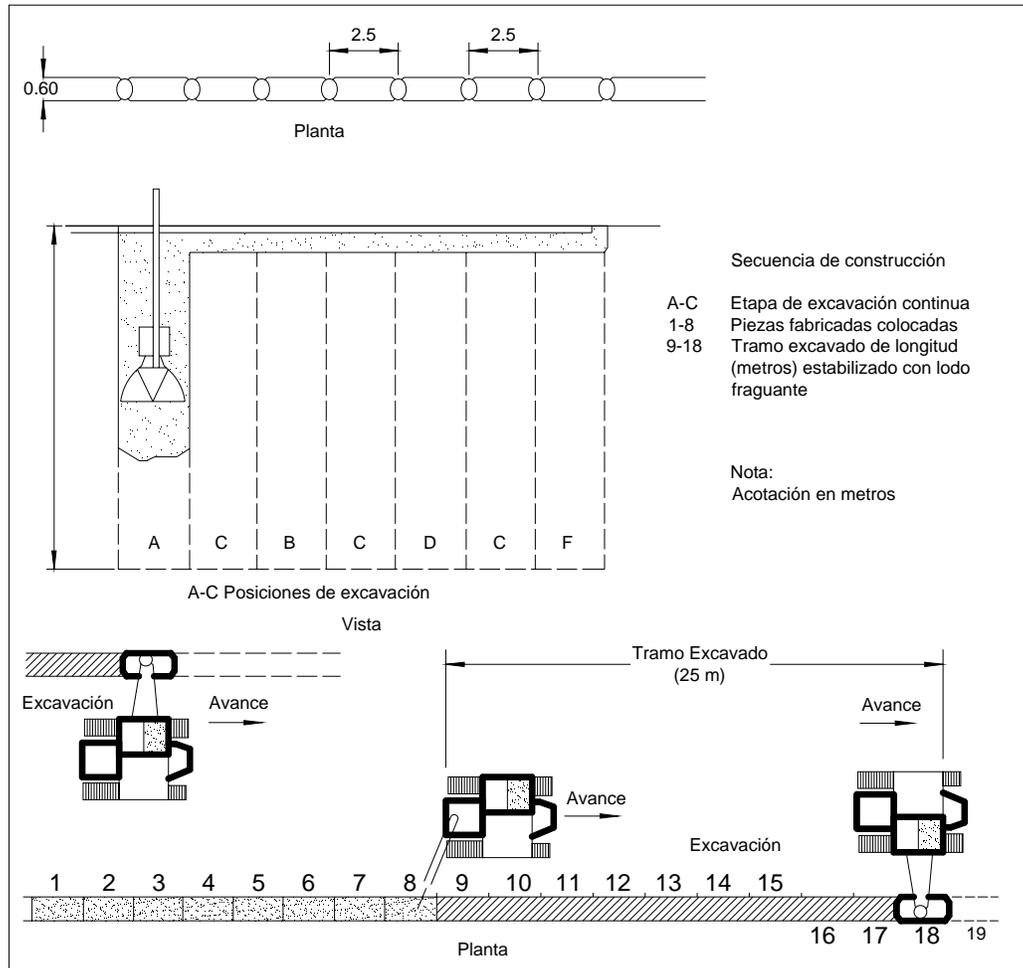


Figura 3.1.- Secuencia de avance que debe de llevar la excavación y el empleo del lodo durante su proceso.

Como la capacidad estabilizadora de los lodos está basada en su mayor densidad, permite excavaciones seguras de una longitud grande, esta esencia conlleva a un procedimiento más ordenado y eficiente. El manejo de lodos en este proceso es más simple que en otros procesos llevados a cabo, por lo que se tiene un desperdicio mínimo. En cuanto al proceso constructivo del muro, se debe de realizar en el menor tiempo posible cuidando las partes en donde se realizarán las juntas para que el muro sea homogéneo y cumpla con la calidad necesaria y a su vez con su objetivo.

El área de desplante al realizar la construcción del muro pantalla debe de ser construida por medio de una plataforma adecuadamente compactada y nivelada para alojar el brocal.

3.2.2. Excavación de la zanja guía y brocal

La zanja guía es una ranura en la superficie del terreno de ancho igual al muro más una tolerancia que permita el paso de la almeja de excavación, esta zanja se protege con un revestimiento comúnmente conocido como brocal, que refuerza la parte superior de la excavación.

Algunas de las funciones que tiene el brocal son:

- Precisar la posición de los muros (incluye ángulos y curvas necesarias)
- Estabilizar la parte superior de la excavación y evitar caídos.
- Controlar la operación de excavación logrando que la almeja entre en la posición correcta.
- Confinar el lodo y facilitar el control de su nivel durante la excavación

Durante su construcción se debe cuidar la dimensión de la zanja y del brocal, porque un brocal corto causa que se produzcan salientes o panzas en el muro terminado. Éste se excava con maquinaria ligera por lo general a una profundidad de 1.5 metros, lo más usual es hacerlo de concreto reforzado con una malla electrosoldada formando una sección de tipo "L" invertida. El orden de la ejecución de los paneles depende del sistema de excavación y del tipo de pantalla a ejecutarse. Por lo regular la longitud de excavación de los paneles es de 1.5 a 3 metros.

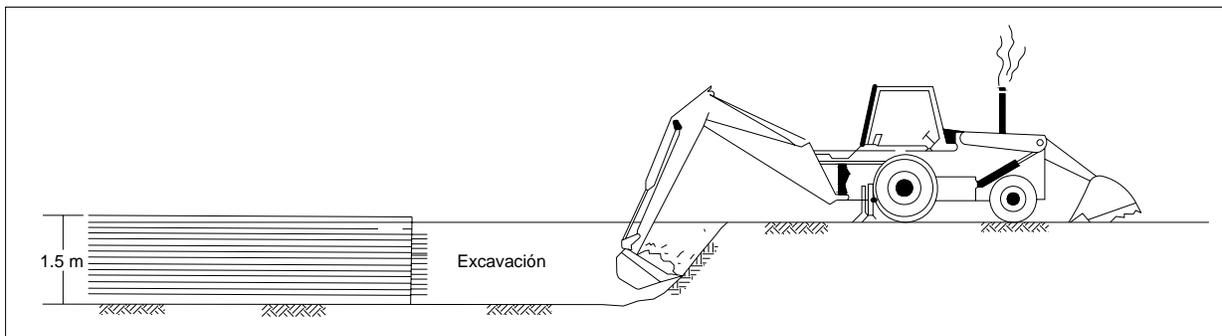


Figura 3.2.- Excavación de la zanja para alojar el brocal

En lo que concierne a la verticalidad, es preciso observar que una tolerancia del 1% se considera como muy severa dentro de su construcción y frecuentemente las exigencias para los muros pantalla son inferiores a estas. Finalmente, en lo que se refiere a la alineación de paneles es evidente que se tiene que tener una perfecta superficie en la parte superior, aunque a veces el problema que se puede llegar a presentar en esta zona, muchas veces producto de una mala ejecución de los muros guía (brocales).

3.2.3. Equipo de excavación

En general las máquinas modernas utilizadas en la excavación de este tipo de muros han tenido que ser diseñadas cada vez más grandes y fuertes para operar en suelos con aluvión grueso y suelos duros, a causa de esto las máquinas para este tipo de excavación son muy excedidas para suelos blandos.

Dentro de toda la maquinaria existente comúnmente utilizada podemos mencionar:

- Retroexcavadora convencional o equipada
- Almejas mecánicas de caída libre
- Almejas hidráulicas de caída libre
- Perforadoras de circulación inversa
- Almejas hidráulicas guiadas con Kelly
- Excavadoras de canchales de corte a profundidad
- Hidrofresa

La selección del equipo adecuado está en función de la profundidad, disponibilidad de la maquinaria, magnitud del proyecto, tiempo y costos disponibles y por supuesto de cada caso en particular. Durante mucho tiempo la excavación del muro milan ha sido descuidada, por lo que se divulgo que la mejor maquinaria eran las almejas por lo que es uno de los equipos más utilizados en su ejecución, por su tiempo y costos óptimos que se obtienen de ella. A continuación se describen algunos de los equipos frecuentemente utilizados en la ejecución de dichas excavaciones.

❖ Almejas mecánicas e hidráulicas de caída libre

Este tipo de equipo ha demostrado que es apto para penetrar todo tipo de suelos, gracias a su funcionalidad existe un gran empleo de esta maquinaria en excavaciones de 50 metros de profundidad, aunque presente algunos problemas por la tendencia al giro.

Su operación consiste, primero en abrir los dos cortes primarios laterales y después el central, esta secuencia es obligatoria para lograr que la almeja opere de manera simétrica y que las dos valvas tengan que aplicar la misma fuerza con el fin de mantener la verticalidad durante la excavación. Es importante hacer hincapié que nunca se deben de realizar dos cortes contiguos, porque la almeja perdería la vertical y por lo tanto se metería en el corte inicial.

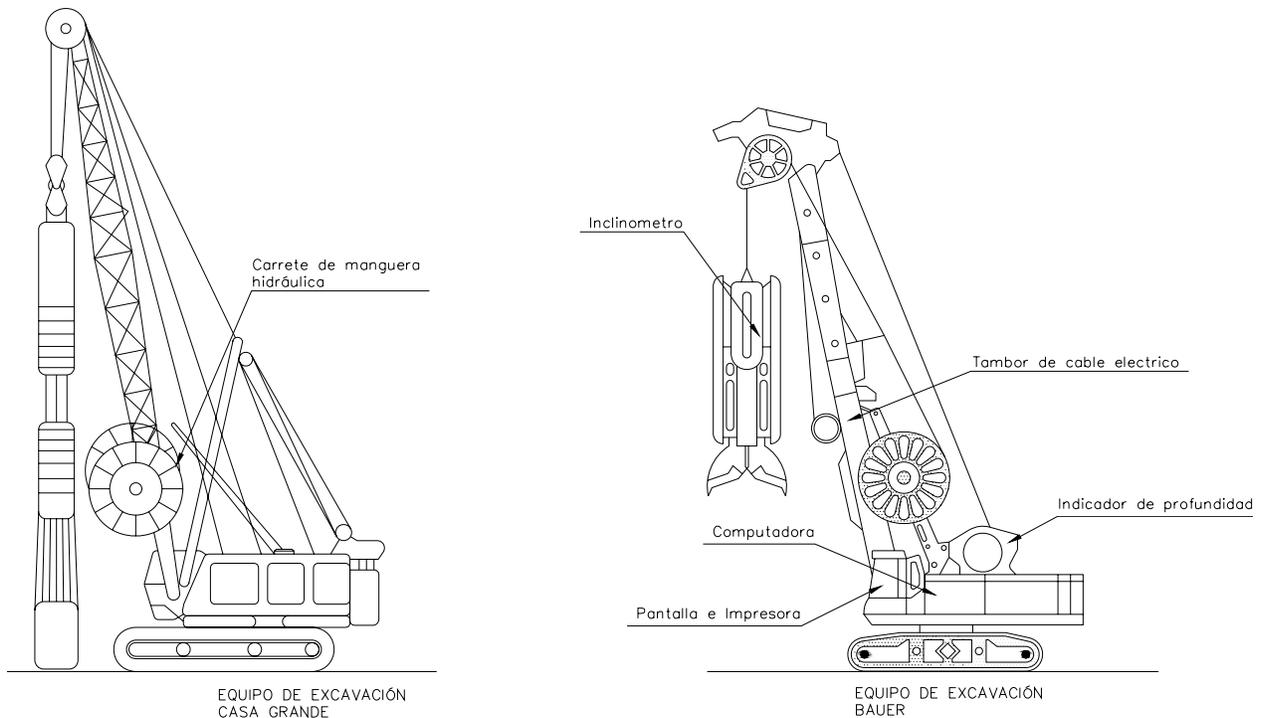


Figura 3.3.- Almeja hidráulica de caída libre (Equipos Casa grande y Bauer)

Dentro del desarrollo y las innovaciones que tuvo este equipo, se dio a conocer la generación de la almeja hidráulica con Kelly, (término muy conocido en campo, la cual consiste en una barra telescópica de sección circular o rectangular con la que se evita el problema del giro), está se conoce por tener almejas unidas en la punta inferior a una pesada columna vertical de acero que guía la caída de la almeja y facilita la penetración en el suelo.

Dentro de este tipo de almejas existe el tipo con Kelly corto y el Kelly telescópico, aunque el más utilizado en la ejecución de la excavación del muro pantalla es el de tipo Kelly corto, motivo por el cual se da una breve descripción de esta última.

❖ Almeja hidráulica con Kelly corto

Permite alinear la almeja al inicio de su caída para penetrar en la zanja con precisión y después operar con mayor velocidad gracias al cable con que cuenta, tanto en el descenso como en el ascenso el Kelly corto es giratorio, por lo que facilita la instalación de la máquina en cualquier ángulo con respecto a la dirección de la zanja.

Dentro de los últimos equipos se han desarrollado algunas innovaciones encontrándose en ellos accesorios electrónicos de control, de esta manera el operador desde su

cabina puede verificar la verticalidad de la almeja y con toda precisión la profundidad a la que se está operando.

Se han adoptado nuevas tecnologías en estos equipos contando así, con cilindros o gatos hidráulicos que corrigen su posición, controlados por sensores electrónicos, giroscopios, acelerómetros e inclinómetros, de este modo puede dar automáticamente giros correctivos en sus ejes (vertical u horizontal).

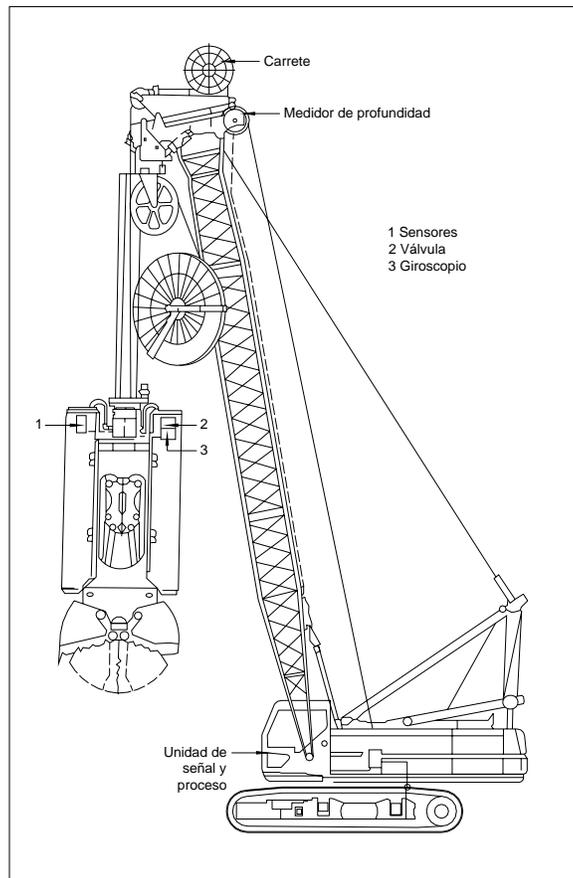


Figura 3.4.- Maquinaria de Kelly corto (Catálogo Soilmec)

El equipo ha sido diseñado para la excavación vertical de paneles de sección rectangular o rectangular-redondeada. Normalmente la excavación de los paneles puede efectuarse en seco, pero con mayor frecuencia se hace mediante el llenado de agua, lodo bentonítico o polímeros, obteniendo con esto una mayor estabilidad en su proceso de construcción. Los paneles acabados se llenan inmediatamente con mezcla plástica.

La excavación se ejecuta mediante un ciclo repetitivo, que se ha adoptado en base a la eficacia que se obtiene durante su proceso, a continuación se describe a detalle:

Secuencia de ejecución de la excavación

- Colocación de la cuchara
- Bajada de la cuchara hasta el contacto con el fondo
- Eventual percusión en el fondo con las valvas completamente abierta
- Excavación y recolección de sólidos
- Subida de la cuchara fuera de la excavación
- Rotación de la torreta hasta la zona de evacuación
- Evacuación de los sólidos
- Vuelta a la posición de excavación
- Eventual rotación de media vuelta de la cuchara

Durante el proceso de la excavación y del ciclo anteriormente mencionado se debe de limpiar periódicamente la zona de evacuación utilizando el equipo adecuado (comúnmente se utiliza una retroexcavadora).

❖ Hidrofresa

Este es uno de los equipos que representan el mejor sistema de excavación por su importante eficiencia que desarrolla, puesto que produce vibraciones muy pequeñas y es muy rápido, este equipo fue diseñado por la empresa Soletanche (Francesa) y Bauer (Alemana), las cuales diseñaron este equipo especialmente para cortar suelos muy duros como rocas de resistencia a la compresión simple de 100 kg/cm² a profundidades de 100 m. Es una maquinaria pesada de excavación continua de zanjas, particularmente para la formación de barreras impermeables, pero presenta el inconveniente de ser muy cara.

Básicamente el equipo consta de una estructura principal en donde se montan todas sus partes, en la parte inferior de la estructura, cuenta con cuatro discos verticales de corte, dos de ellos giran en sentido directo y los otros dos en inverso, el material cortado por los discos es lanzado por una bomba sumergible de fuerza centrífuga a la succión, por medio de una serie de tuberías y mangueras se conduce los residuos del material cortado hasta la superficie donde se separan los sólidos del lodo, para que este último sea reutilizado.

3.2.4. Limpieza del fondo

Una vez concluida la excavación de cada tablero se debe limpiar el fondo de la zanja para eliminar los residuos de roca triturada, esta limpieza se hace extrayendo el lodo del fondo de la zanja para arrastrar los trozos de suelo y el azolve depositado, se debe

utilizar una bomba eléctrica sumergible por un tiempo de 5 minutos para lograr la limpieza del fondo de la excavación.

3.2.5. Relleno de la zanja

Posterior a la terminación de la excavación y de la limpieza de la zanja, esta debe de rellenarse con lodo bentonítico, si esta operación se hace de manera adecuada podrá permitir la formación de muros de buena calidad y exentos de contaminación. El proceso consiste en el vaciado de concreto empezando desde el fondo de la excavación y gradualmente levantarlo manteniendo siempre la punta de descarga dentro de la masa fresca ya colada para evitar la segregación y/o la contaminación de la mezcla.

3.2.6. Juntas de colado

Comúnmente en la ejecución de los muros milan se ocupan juntas de colado las cuales son piezas de acero que permiten confinar temporalmente uno o los dos extremos verticales de un panel durante el proceso del vaciado de la mezcla, permitiendo la unión estructural. Su geometría debe de estar en congruencia con la forma de la almeja utilizada en la excavación.

Estas deben de satisfacer algunos requerimientos como los que se mencionan a continuación:

- Resistir la presión del cemento fresco sin que experimente una distorsión o deformación y no permitir la fuga de cemento por un lado.
- Proteger el panel de los impactos causados por la almeja permitiendo la excavación del panel adyacente.
- El machihembrado que produce, por lo que la junta debe de quedar limpia y ser capaz de soportar cierta fuerza cortante.

Con respecto al desarrollo de las juntas utilizadas, este es muy vasto tanto en número como en geometría, cada una de estas juntas busca resolver las 3 condiciones antes mencionadas, algunas de ellas han buscado dar la continuidad al muro. A continuación se mencionan las más comunes.

Geometría	Identificación
Circular	Tubular simple
	Tubular con separador
Machihembrada	Rectangular simple
	Tipo Soletanche
	Sello doble Bachy
	Catalana triangular
	TGC con separador de lámina
	Con mangueras laterales
Peculiar	Perfil de acero incorporado
	Takenaka
	Placa de acero y membrana de vinil
	Franki con pasadores
	Ensamblada Casagrande
Cuadrada	CITEMEX

Tabla 3.1.- Tipos de Juntas en el muro milan

Para la construcción del primer panel se requiere colocar dos juntas de colado, formando el muro primario con dos lados hembra para que en los muros sucesivos se necesiten únicamente una junta de tipo macho, ya que con ayuda del concreto del panel precedente le servirá de soporte y el muro quedara con la junta hembra de un lado y del otro una junta macho.

3.2.7. Ventajas del Muro Milan

- Debido a que la permeabilidad horizontal es mucho mayor que la vertical, las lechadas de inyección tienen una tendencia clara a repartirse en el terreno en capas horizontales; esto nos dice que es difícil obtener pantallas verticales continuas y estancas; por lo que el manejo de los muros pantalla para realizar las cortinas verticales representa en estas condiciones una solución perfecta tanto desde el punto de vista técnico como del económico.

- Aunque las imperfecciones del muro sean tales como algunas juntas de mala calidad debidas a inclusiones de concreto defectuoso o de bentonita floculada y comparado con las inyecciones, la ventaja de los muros pantalla es la certeza de un cierre sin discontinuidades.

De acuerdo a lo anteriormente presentado, en este momento se posee una perspectiva vasta tanto en generalidades, como en el proceso constructivo de un muro pantalla, por tal motivo, a continuación se presenta de manera amplia la producción, manejo y control de los lodos utilizados durante la construcción de un Muro Milan.

3.3. Lodos estabilizadores

3.3.1. Definición de lodos

Los lodos estabilizantes son suspensiones coloidales de arcilla en agua (bentonita) que tienen un comportamiento semejante al de un líquido cuando está en movimiento y adquiere una cierta resistencia al corte.

Frecuentemente se utiliza bentonita con algunos químicos que acentúan sus propiedades más interesantes en el preparado de estos lodos. Su función principal es la de sostener las paredes de la perforación o las de las excavaciones. Esta suspensión tiene la cualidad de formar sobre una superficie porosa una película prácticamente impermeable, al igual que la de adquirir en estado de reposo una cierta rigidez (tixotropía).

3.3.2. Características de los lodos estabilizadores

Este tipo de lodos tienen la propiedad de formar una delgada costra en contacto con el suelo denominada “*cake*”, cuya doble función es evitar que el lodo penetre en el suelo y formar además una membrana de baja permeabilidad.

De acuerdo a las propiedades de los lodos estabilizadores se pueden definir los siguientes objetivos:

- Equilibrar la presión vertical.
- Actuar como una barrera impermeable para prevenir el flujo del agua y mantener el nivel de excavación.
- Soportar la carga vertical que puede ser originada por la maquinaria.

3.3.3. Propiedad de los lodos o mezclas

Las propiedades que a continuación se describen brevemente influyen en el comportamiento para la estabilización de las excavaciones.

3.3.3.1. Espesor de la costra

Esta se forma adherida a las paredes de la excavación con espesor de unos milímetros y produce el efecto de una pantalla flexible e impermeable. Esta se determina con ayuda de esta prueba:

❖ Cohesión con placa

Se limpia y se seca una placa de acero inoxidable de superficies ásperas y de dimensiones aproximadas de $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ y espesor de 1.5 mm determinando su masa $M1$ y el área As , que estará en contacto con la mezcla. Se emplea un recipiente de capacidad adecuada y suficiente, se introduce la placa para llenarse de mezcla durante 3 a 5 segundos aproximadamente, y se determina su masa $M2$. Durante esta operación se saca la placa para dejarla escurrir e inmediatamente seguir el proceso de pesado (es conveniente emplear un sujetador para que la mezcla cubra en su totalidad la placa), determinándose el valor de la cohesión con placa con la siguiente expresión:

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

Donde:

CP = Cohesión con placa, en $[\text{g}/\text{cm}^3]$

M1 = masa propia de la placa con el sujetador, en [g]

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

As = Área de la placa, en $[\text{cm}^3]$

Para determinar el espesor de la *costra cake*, se procede a vaciar el material de la celda del filtrado y se desarma con cuidado. Una vez hecho esto se retira la malla con el papel filtro y se mide el espesor de la *costra cake* en milímetros [mm]

❖ Densidad

Es la masa por unidad de volumen de lodos. Se determina mediante la balanza de Baroid, la cual consiste en un depósito cilíndrico de 150 cm^3 de capacidad, donde se vacía cuidadosamente una muestra de lodo, en el otro extremo se muestra una balanza cuyo equilibrio marca la densidad. Cabe mencionar que las mezclas menos densas proporcionan productos más porosos y por lo tanto menos resistentes.

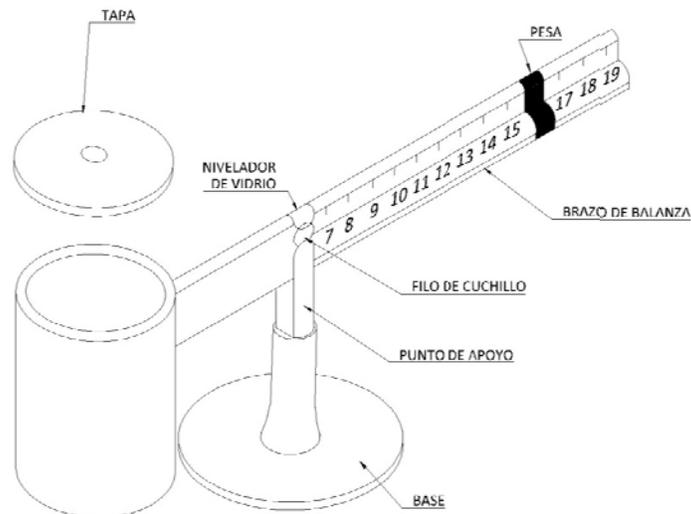


Figura 3.5.- Balanza de Baroid

❖ Viscosidad:

Se define como la medida a la resistencia interna al corte de la mezcla; la cual se puede conocer mediante dos clases de viscosímetro (de cilindros coaxiales o de circulación). El primero permite trazar por puntos en la curva que relaciona la desviación del cilindro interior en función del número de vueltas exterior, encontrándose la viscosidad y la resistencia en el punto de fluencia. El segundo es más utilizado en la práctica midiendo el tiempo que tarda un volumen de mezcla dado. Según la consistencia y los materiales constructivos se podrán utilizar cualquiera de los siguientes conos: Marsh, Mercasol o Prepakt.

Para las mezclas elaboradas a base de agua-cemento el dispositivo más utilizado es el cono Marsh. El cual mide el tiempo necesario para que un volumen de lodo de 946 cm^3 escurra a través del orificio circular de 5 mm de diámetro. El procedimiento de esta prueba en los conos Mercasol o Prepakt es similar, aunque en esos conos el volumen inicial es de 1000 ml. La viscosidad se expresa en segundos.

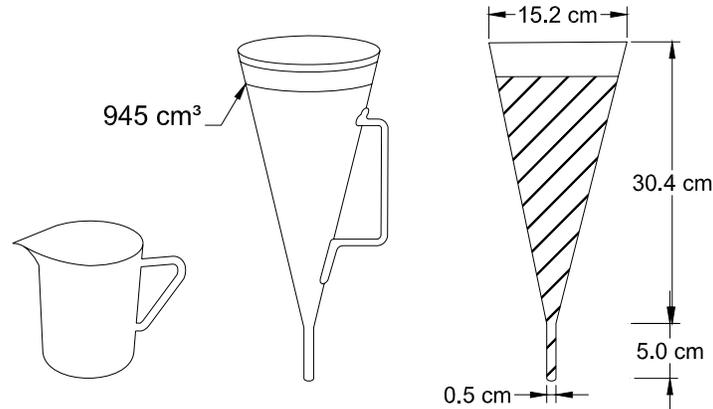


Figura 3.6.- Embudo tipo Marsh para el cálculo de la viscosidad

❖ Contenido de arena o sedimentación

Se designa como la separación de agua, que se produce en la superficie de una suspensión, después de la precipitación de las partículas sólidas. Para la obtención de esta propiedad, se llena con mezcla una probeta graduada de un litro y se anota la altura del agua separada en un tiempo determinado, ya que la separación del agua es una mezcla muy clara; de esta manera se obtiene el tiempo de estabilización, el porcentaje de agua libre y el porcentaje de sólidos sedimentados. Al cabo de 120 minutos se registra la sedimentación calculándose con la siguiente fórmula:

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

Donde:

D= decantación o sedimentación [%]

A= asentamiento [ml]

V_o= volumen original [ml]

Es conveniente que los sólidos finales en la mezcla de inyección sean iguales o mayores al 90%; por lo regular es ocupada en excavaciones o perforaciones, aunque solo en pequeñísimas porciones ya que puede formar una costra de mayor espesor siendo esta quebradiza.

❖ Resistencia al corte

Es importante determinar de manera precisa esta propiedad, ya que las cargas producidas por la estructura y por el gradiente hidráulico que se genera por el embalse puede provocar erosión o tubificación en los productos inyectados, produciendo el paso del agua a través de la barrera impermeable.

En el caso de los lodos fraguantes se debe realizar esta prueba para determinar la dosificación óptima de los componentes agua-cemento-bentonita y aditivos, que mezclados darán la resistencia requerida en obra. Para obtener esta resistencia se obtienen especímenes cilíndricos de 3.6 cm de diámetro y 7.2 cm de altura, estos se ensayarán a edades de 0.5, 1, 7, 14 y 28 días respectivamente para ensayos a compresión simple en las pruebas de deformación controlada a una velocidad de 1mm/min.

❖ Exprimido

Se define como la separación del agua de una mezcla que se filtra a través de un medio poroso cuando está sometida a una presión de inyectado. Esta se conoce en un laboratorio por medio de un filtro prensa. La prueba consiste en colocar una mezcla de volumen conocido en un cilindro provisto de un filtro y se le aplica una presión constante que puede llegar a ser de 9 kg/cm^2 . Las mezclas que presentan una alta resistencia al exprimido tiene la cualidad de conservar más o menos su homogeneidad durante el proceso de inyectado y la estabilidad dura mayor tiempo, su sedimentación se ve reducida.

Por los regular los valores obtenidos más frecuentes durante las pruebas realizadas son:

Densidad: 1.03 a 1.07 t/m³

Viscosidad Marsh: de 28 a 45 segundos

Contenido de arena: menor de 10%

En algunos casos será necesaria la utilización de aditivos, estos son adecuados para cada tipo de mezcla a inyectar tomando en cuenta las características del terreno, pues así se facilita la hidratación de la bentonita y se estabiliza al lodo evitando su sedimentación. Existen varios tipos de lodos utilizados en el proceso de excavación de los muros teniendo como objetivo principal la estabilización de las paredes.

3.3.4. Tipos de lodos

Básicamente estos se pueden clasificar de acuerdo a su uso y propiedades, por lo general se tienen 4 tipos, que a continuación se describen de manera sucinta.

❖ Lodo espontáneo:

El lodo espontáneo se compone de la arcilla encontrada en el sitio durante la excavación de la zanja, tan sólo se forma con agregar agua a la arcilla, por lo cual esta mezcla es de baja viscosidad, pero capaz de obturar y sellar los estratos de arena.

❖ Lodo bentonítico

El lodo bentonítico se obtiene mezclando bentonita con agua y sirve como un fluido estabilizador de la excavación, indispensable en suelos no cohesivos como arenas permeables, eficaz donde se requiere una mayor viscosidad.

❖ Lodo fraguante

El lodo fraguante es muy utilizado en la estabilidad de las excavaciones, se produce por una mezcla de bentonita, cemento y agua en proporciones adecuadas, obteniendo así una determinada resistencia. La proporción de cemento puede variar aproximadamente entre 5 y 20% (por el tipo de cemento utilizado), además normalmente se le adicionan aditivos para incrementar su viscosidad y en ciertos casos algunos agentes retardadores del fraguado.

Estos lodos tienen una densidad mayor que los arcillosos o bentoníticos, útiles cuando se desea incrementar la longitud de las zanjas facilitando de este modo el procedimiento de construcción. La resistencia de este lodo se recomienda que sea 50% menor resistente, que el suelo a nivel de desplante del muro; ya que si llegase a ser mayor provocaría con facilidad fisuras las cuales serían muy susceptibles a presentar filtraciones.

❖ Lodo de polímeros

Los lodos de polímeros sirven también como fluidos estabilizadores de la excavación, los cuales no forman costra en la pared ya que el polímero se infiltra y une las partículas. Los fabricantes aseguran que la viscosidad de estos lodos puede ser de 40 segundos siempre y cuando el potencial de hidrógeno (PH) del agua varié entre 8 y 10.

Los tipos de lodos anteriormente mencionados son esencialmente equivalentes, por lo que sus propiedades más significativas son: densidad, viscosidad y contenido de arena, las cuales necesitan un control y un diseño.

3.3.5. Elaboración de lodos

Es necesario considerar que el consumo de lodos siempre es superior al volumen teórico de la excavación debido a la penetración del lodo, a la perforación irregular con el equipo por el lodo endurecido y por el lodo que envuelve al material excavado, por ello debe tomarse en cuenta las condiciones y los métodos de mezclado en el laboratorio pues son muy diferentes a los que prevalecen en el campo. A continuación se presenta el proceso de elaboración de lodos en campo, comúnmente utilizado en el muro pantalla.

❖ Mezclado e hidratado

El mezclado se inicia en un tanque de preparación utilizando un mezclador, a continuación se vacía bentonita y agua, la mezcla se hace circular durante 15 minutos en el tanque, una vez que se tiene un lodo homogéneo, se deja hidratar estrictamente durante 24 horas, ya que si se dejase menos tiempo se podría presentar el sobre consumo de bentonita y los lodos fraguantes pueden quedar mas dosificados.

❖ Proceso de batido

Una vez realizado el mezclado del lodo ya que ha quedado bien hidratado, se envía a un tanque mezclador donde se le adiciona cemento, se realiza un batido enérgico durante 10 minutos, facilitando de esta forma un mezclado correcto y homogéneo. El cemento debe de agregarse justo antes de la utilización del lodo para disponer del mayor tiempo posible antes de que comience el fraguado. En algunos casos como se ha mencionado anteriormente será necesario el uso de aditivos retardadores del fraguado.

❖ Transporte y colocación

El envío de lodo hacia la zanja se realiza con una mayor eficiencia por medio de tuberías, a mayor o menor presión según la viscosidad de la mezcla y la distancia de bombeo que se requiera.

Conforme a todo lo anteriormente presentado, respecto a la construcción del muro pantalla, sus generalidades, equipo, usos, ventajas, materiales, así como el diseño de las mezclas comúnmente utilizadas para su elaboración y pruebas realizadas enfocadas a la seguridad y calidad de las mezclas, se procede a describir un panorama amplio en los tratamientos en el terreno y las actividades que mejoran las condiciones del mismo, en este contexto estas son muy diversas y amplias, por lo que particularmente el enfoque de este artículo, es exclusivo para el tratamiento de la roca por medio de inyecciones en el terreno.

4. Tratamientos en rocas

Esta sección se enfoca en los tratamientos a base de inyecciones en macizos rocosos, mencionando algunos de los factores que se deben de considerar en el procedimiento. De igual manera se presentan los tipos y técnicas de inyección más utilizados en las obras, destacando de éstas las inyecciones de consolidación e impermeabilización. Complementariamente a lo anterior, se presentan distintas técnicas de inyección, así como las mezclas más recomendables y utilizadas en la ejecución de las inyecciones; además, se describe el método de inyectado en macizos rocosos más exitoso y destacado en la actualidad por sus grandes resultados en su empleo y en su funcionalidad.

Debido a lo anterior, es importante ser capaz de identificar los distintos procesos que se pueden utilizar para el mejoramiento de los terrenos, tomado en cuenta las condiciones geológicas (fisuras u oquedades) que se pudieran llegar a presentar en el terreno.

Por simplicidad de este trabajo, solo se tratará únicamente el inyectado en masas de roca por medio de inyecciones, aunque algunas de las consideraciones presentadas pueden ser también aplicadas a suelos granulares y al inyectado con otros materiales.

Reseña Histórica

La inyección de suelos es un procedimiento de construcción muy importante, reconocido por todos los ingenieros, lo cual no es muy antiguo ya que sus comienzos inician en Francia a principios del Siglo XIX, gracias a Bérigny, que en 1802, inyectó con mortero y en algunas ocasiones con puzolanas teniendo un resultado exitoso. Sin embargo en sus comienzos no se pretendía más que rellenar grandes oquedades inyectando únicamente morteros líquidos por gravedad.

Con el paso de los años se fue perfeccionando, los métodos de inyección y los morteros utilizados, pero el mayor impulso se alcanzó entre los años 1920 a 1930; en donde paso a ser esencial en la construcción de presas haciendo posible la eliminación de infiltraciones de agua en toda clase de obras.

4.1. Inyecciones en roca

El inyectado en masas de roca son procedimientos que se aplican al subsuelo introduciendo en los poros o fisuras del medio a tratar, un producto líquido conocido como mortero o lechada de inyección, que se solidifica y adquiere una resistencia mayor a través del tiempo. Es muy utilizado para la mejora de las propiedades mecánicas del terreno, debido a esto, se ha hecho una práctica bien establecida en la

ingeniería civil, aunque ha estado dominada por mucho tiempo por reglas empíricas y experiencias personales o institucionales.

Éstas, tienen el propósito de modificar las características mecánicas de los suelos y las rocas, aumentando la resistencia a la compresión y al corte, teniendo como objetivo impermeabilizar, rellenar y compactar las zonas en donde se lleven a cabo. Es importante saber identificar los medios en que se pueden utilizar; así como también la identificación de los factores que intervienen para fijar las condiciones del empleo de las inyecciones. Este es un proceso ciego ya que lo único que se sabe es el caudal y la presión de la inyección.

4.2. Clasificación de los tratamientos de inyección

Al momento de seleccionar el sistema de inyección se debe tener en cuenta diversos factores, como el proceso de ejecución, los objetivos del tratamiento, la forma de tratar la zona del terreno que afecta a la cimentación.

Los tratamientos por medio de inyecciones se pueden clasificar de la siguiente forma, no sin antes mencionar que el presente trabajo se enfocará únicamente en las inyecciones de consolidación e impermeabilización.

Principales tipos de inyecciones:



A continuación se dará únicamente una breve definición de los tratamientos de inyección por su finalidad, por ser comúnmente los tipos de inyección más utilizadas en las inyecciones de macizos rocosos y suelos.

4.2.1. Inyecciones por su finalidad

❖ Inyección de consolidación

La inyección de consolidación en rocas fracturadas o terrenos no cohesivos tiene como propósito, mejorar el módulo de deformabilidad en la roca. El inyectado generalmente es de una mezcla de cemento y agua en perforaciones realizadas, a tal efecto que llenen los espacios existente entre diaclasas u oquedades, con el fin de homogeneizar el macizo rocoso.

Este tipo de inyecciones, no son adecuadas para mejorar la resistencia natural de una arcilla o de un limo, ya que la permeabilidad de éstos es demasiado pequeña para introducir un mortero.

Cuando la permeabilidad en el macizo es baja, se pueden utilizar mezclas más penetrantes adicionadas con geles de silicato o resinas. La presión de inyección es variable, dependiendo ésta de las características del macizo rocoso, pero en orden de magnitud se podría establecer una presión de 20 kg/cm^2 para un macizo rocoso.

❖ Inyección de impermeabilización

Las inyecciones de impermeabilización tienen la finalidad de disminuir las filtraciones a través de los suelos y/o macizos rocosos, aumentando de esta forma la seguridad del conjunto y disminuyendo la erosión interna. Son muy utilizadas en presas, para la formación de una pantalla o cortina estanca, disminuyendo de esta forma la cantidad de agua a través de la misma.

4.3. Técnicas de inyección

❖ Inyección de impregnación o rotura

Se denomina así a la inserción de un material (lechada) con densidad similar al agua, inyectada a presión suficientemente baja y/o a veces nula, cuya finalidad es disminuir la porosidad del terreno, aumentando así su comportamiento impermeable y asegurando con ello el que no se produzcan deslizamientos significativos en el terreno.

❖ Inyección por compactación

Es un método de inyección que tiene como finalidad de desplazar al terreno en torno al punto de inyección sin penetrar en sus huecos por medio de la inserción de un material de gran viscosidad. Se aplica a la restauración de la capacidad de carga en suelos sueltos o compresibles, este tipo de inyección ha sido muy utilizada para remediar la densificación del terreno en la cimentación antes de la construcción, previniendo de esta manera asentamientos. El control de la consistencia de la lechada es esencial para el éxito de las operaciones.

❖ Inyecciones de fracturación hidráulica

Es una inyección de lechada de fraguado rápido con una presión de media a alta, que pueda provocar la fracturación del terreno, produciendo un terreno denso y rígido.

❖ Inyección de deestructuración

Es un sistema de mezcla en sitio de suelo con cemento inyectando a muy alta presión a través de un orificio que se encuentra en la barra de perforación, creando columnas de nueva consistencia. Es útil para la construcción de muros de contención y para mejorar la estanqueidad en pilotes o micropilotes, este tipo de inyección tiene un mayor efecto cuando el suelo es más erosionable, es comúnmente conocido como Jet Grouting.

❖ Inyección con productos químicos

Esta técnica es aplicable en terrenos que tienen un pequeño tamaño de huecos, la cual consisten en la incorporación de soluciones que comúnmente están conformadas en silicato de sodio y/o en un reactivo que es una sal de sodio (pirofosfato de sodio), constituyendo los denominados geles blandos. También se pueden llegar a usar algunos reactivos orgánicos como el acetato de etilo, constituyendo de esta forma un gel duro.

Algunas de las técnicas que se han mencionado anteriormente son particulares para el tratamiento de suelos; sin embargo algunas de ellas se han adoptado para el tratamiento por inyección en macizos rocosos, debido a su gran funcionalidad y por los resultados obtenidos en su utilización.

Como se puede observar, los diferentes tipos de inyección tienen diferentes objetivos en su comportamiento y en su tipo de mejora de terreno, tanto como en su proceso de ejecución. Lo que implica que una selección inadecuada pueda ser fatal.

rocoso. Se describe a continuación el ciclo de actividades que se lleva a cabo en dicho procedimiento.

1. Se lleva a cabo una perforación en el macizo a ensayar, en tramos de unos 5 metros aproximadamente.
2. Para aislar el tramo a ensayar se utiliza un obturador de goma o packer que por compresión se expande. El fondo de la perforación actúa como segundo obturador.
3. Se inyecta agua a presión con una bomba.
4. Se dispone un manómetro en la boca del pozo o perforación, un caudalímetro (contador de agua) y una válvula de descarga, que permite los caudales inyectables a una presión dada.

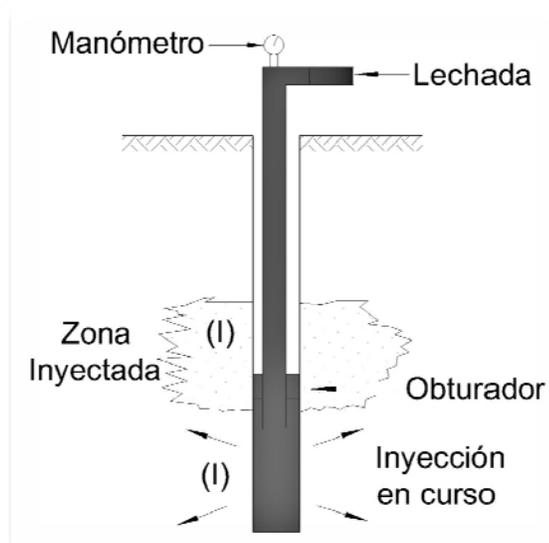


Figura 4.2.- Principio en que se basan los Ensayos Lugeon. (Según H. Cambefort 1968)

La gama de presiones a aplicar depende del estado de fisuración del macizo rocoso. Se comienza aplicando en escalones ascendentes en el orden de: 2.5 – 5.0 – 7.5 – 10 kg/cm². Cuando se alcanza la presión máxima de 10 kg/cm² se procede a aplicar decrementos de presión. Cada incremento de presión se mantiene constante de cinco a diez minutos, durante los cuales se mide el caudal inyectado.

De esto se obtendrá presiones crecientes y decrecientes, por lo que serán muy útiles para caracterizar el comportamiento del suelo. La permeabilidad del terreno se mide en Unidades Lugeon (UL), la cual se conoce cuando en el tramo ensayado (5 metros de longitud) escurre 1 litro por metro perforado en un minuto para una presión de inyección de 10 kg/cm², por lo tanto el valor de la absorción se obtiene dividiendo el gasto

correspondiente a una presión de 10 kg/cm² (expresado en l/min), por la longitud del tramo ensayado (expresada en metros) por la longitud del tramo correspondiente.

En la práctica se suelen trazar para distintos tramos, curvas de caudales de absorción, en función de la presión de inyección. Se recomienda, trazar diagramas a medida que progresa la prueba con el fin de observar las particularidades de la curva obtenida. La curva gasto-presión depende principalmente de las características de fisuración de la masa, es decir, distribución, espesor y tipo de relleno de las fisuras. Al aumentar la presión de inyectado se observa que la variación de gasto no es lineal.

Es frecuente observar pseudo discontinuidades en las curvas gasto-presión, las cuales pueden atribuirse a la abertura y cierre reversible de las fisuras que provocan una variación no lineal del gasto con la presión de inyección. El tapamiento y destapamiento de las grietas con materiales de relleno provocan, a diversas presiones, fenómenos de aumento o disminución de la permeabilidad, esta variabilidad de la permeabilidad de la masa, debe tomarse en cuenta para valorar la permeabilidad de diseño de la misma.

Se presenta como ejemplo dos curvas de gasto-presión. En (1) la primera curva la circulación se realiza en un medio considerado como elástico; mientras que en (2) la segunda se aprecia que las fisuras no vuelven a su espesor inicial, por lo tanto la deformación se considera plástica.

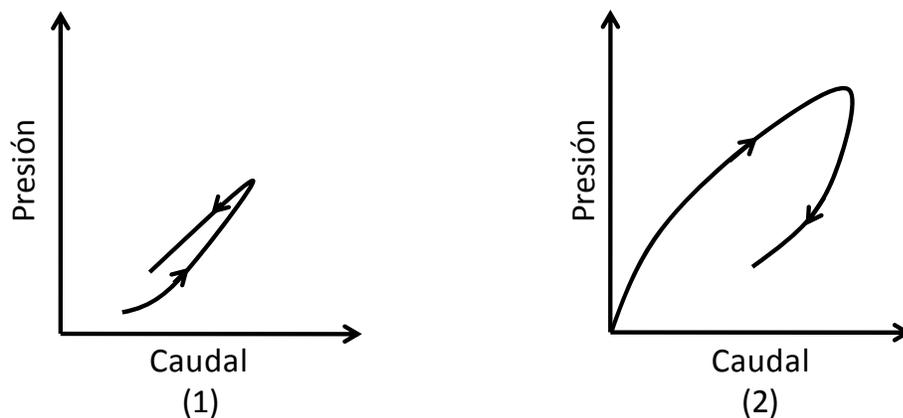


Figura 4.3.- Formas típicas del diagrama gasto-presión del ensayo Lugeon

En macizos cuyas permeabilidades sean inferiores de 1 a 3 unidades Lugeon, es posible que sea innecesaria su inyección.

4.6. Métodos de ejecución de las inyecciones

Existen algunos procesos de ejecución de inyección que se llevan a cabo en el tratamiento del terreno, que a continuación se mencionan los más utilizados.

❖ Inyección por tramos

En este método, la inyección del mortero se hace por tramos de unos 5 metros aproximadamente. Cada tramo está limitado en su parte superior por un obturador y en su parte inferior por el terreno a inyectar. A su vez la inyección por tramos puede hacerse de dos maneras: Descendente y Ascendente.

❖ Inyección descendente

Consiste en una serie de perforaciones en la cual se perfora y se inyecta un tramo de terreno, reperforando e inyectado el tramo inmediato inferior, aquí también se aplica el método con obturadores, frecuentemente aplicada en macizos rocosos estables e inestables si la inyección es de compactación.

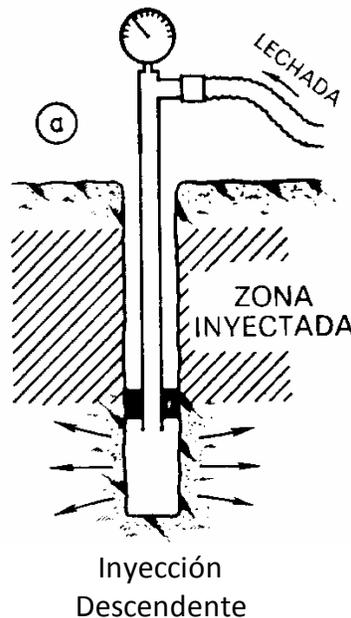


Figura 4.4- Inyección de una perforación por tramos-tipo descendente. (H. Cambefort 1968)

❖ Inyección ascendente

Se trata de un proceso de inyección por tramos sucesivos, en donde se comienza a inyectar en la parte inferior del barreno terminado, este es el método clásico de la inyección en rocas muy utilizado en macizos inestables.

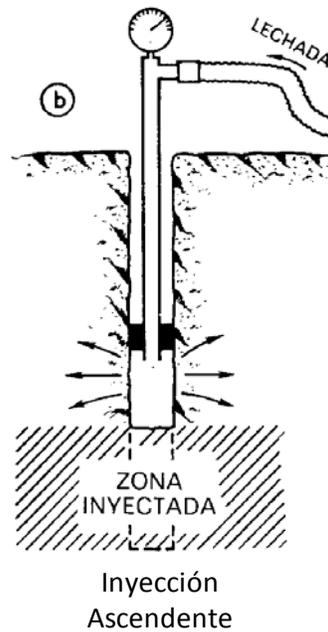


Figura 4.5- Inyección de una perforación por tramos-tipo ascendente. (H. Cambefort 1968).

❖ Inyección por fases repetitivas (tubos manguitos)

El procedimiento de inyección patentado por la Sociedad Soletanche, es un procedimiento en que se trata al terreno repetidamente en distintas fases pero en un mismo punto, sin reperforación. Se perfora un barreno colocando en su interior un tubo de 50 a 60 mm de diámetro a lo largo de toda su profundidad, el cual tiene una serie de agujeros periféricos obturados exteriormente por manguitos de goma que sirven como válvulas antiretorno, por los que sale la lechada. El espacio entre el terreno y el tubo se rellena de una mezcla de baja resistencia denominada comúnmente mezcla vaina.

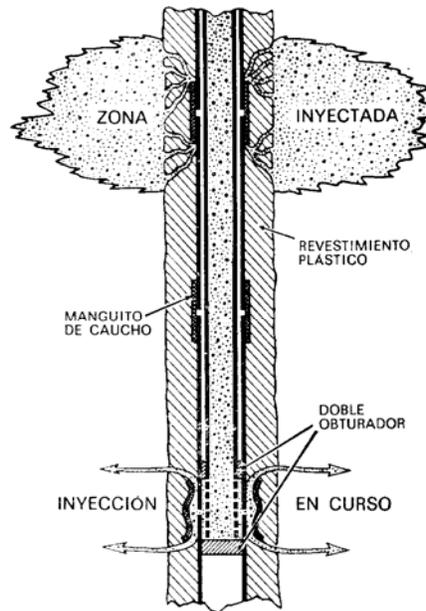


Figura 4.6.- Esquema del sistema de inyección con Tubo Manguito. (H. Cambefort 1968).

4.7. Medios inyectables

El estudio de los medios inyectables se aplica a macizos rocosos fisurados (considera las fisuras como canales) y a macizos granulares porosos (cuyos poros son muy distintos en tamaño).

En la inyección clásica de materiales granulares o rocas fisuradas se hace penetrar una lechada a presión a través de los huecos a tratar. Evidentemente las lechadas de inyección y los métodos serán particulares en cada caso. Las fisuras de los macizos rocosos se rellenan por colmatación hidráulica, con un mortero de cemento y agua, mientras que el relleno de los huecos o poros de un aluvión se produce por impregnación y rotura del macizo.

Existen otros métodos de inyección, pero el inyectado tradicional, consiste en definir una presión de inyectado y el empleo de diferentes tipos de lechada, por lo que será necesario definir el tipo de lechadas más utilizadas en el proceso. En el método tradicional se utiliza el uso de varias lechadas teniendo como diferencia principal el aumento de la cohesión de una a otra. Algunas de las dificultades que presenta este método es que en algún punto la resistencia al flujo por cohesión y la penetración incrementadas detendrán el proceso de inyectado, aunado a esto se perderá tiempo en el cambio de una mezcla a otra.

En el uso de las inyecciones es importante valerse de la mezcla más adecuada de acuerdo a la geología del terreno a tratar, por lo que su elección representa que se lleve a cabo un adecuado inyectado. Con el objetivo de conocer algunas de las mezclas comúnmente utilizadas, se dará una breve descripción del tipo de mezclas manejadas en los procesos de inyección, tanto para impregnación como para consolidación.

4.8. Tipos de mezclas

❖ Suspensiones Inestables

Son aquellas que por su propia naturaleza no mantiene sus partículas sólidas en suspensión. Se componen de cemento, agua y eventualmente arena fina, no llegan a ser homogéneas al menos de que se les agite; estas mezclas podrán emplearse en caso excepcionales como:

- Tratamiento en el macizo rocoso con fisuras de abertura muy pequeña (menor de 0.5 mm)
- Sistemas de anclajes, como relleno de perforaciones
- En fracturas poco abiertas.

❖ Suspensiones Estables

Son las que no producen sedimentación considerable durante el proceso de inyectado, la cual no forma taponamiento en fisuras pequeñas, debido a su alta penetrabilidad; su uso es muy común en la inyección de suelos. Son obtenidas en una combinación de arcilla-cemento y agua. Dentro de estas podemos mencionar:

- Morteros de agua-cemento-arcilla: En la práctica se ha presentado que este tipo de mezcla es difícil de elaborar y son muy costosas, corren el riesgo de sufrir algún deslave, pero con el aumento de cemento se reduce su tixotropía.
- Morteros de agua-cemento-bentonita: Con el uso de bentonita se pueden estabilizar la mezcla agua cemento, dependiendo de la calidad de la bentonita ya que esta aumenta la fluidez, tiempo de exprimido y resistencia al deslave. Los rangos de dosificación de la bentonita varia del 2 al 8%, es frecuente su uso en macizos rocoso que presente un porcentaje grande de vacios, cavernas o grandes fracturas y a veces se le adiciona cierta cantidad de arena para aumentar el contenido de sólidos.
- Morteros de agua-cemento-bentonita-silicato de sodio: Al aumentar el silicato de sodio se le aumenta la permeabilidad para aumentar algunas de sus características como la rigidez y su estabilidad, con la primera se acelera el

fraguado aunque presenta el inconveniente de que la mezcla ya no es homogénea. Esta mezcla se recomienda que se utilice cuando exista circulación de agua en el subsuelo y sea necesario el fraguado rápido para evitar el deslave.

- Morteros de cemento activados: Cuando más fuerte es la dosificación de cemento de un mortero, más débil será su decantación, pero una dosificación muy fuerte permitirá la obtención de una decantación nula. El objetivo de la activación es permitir la obtención de morteros inyectables de elevada dosis en cemento, pero que tengan una ligera sedimentación o en algunos casos nula. Con esta activación se hace que el mortero sea menos deslavable y prácticamente no miscible en el agua. La activación se puede distinguir principalmente por dos vías: vía química y vía mecánica.
 - ✓ Dispersión por vía química: Permite obtener morteros de dosificación relativamente pequeña y sedimentación nula, mediante el empleo de productos que proporcionan plasticidad, fluidez y aumento de volumen. Estos productos generalmente están constituidos por un polvo fino de aluminio que al reaccionar con la cal del cemento desprende burbujas de hidrogeno, indudablemente es la mejor solución siempre y cuando no modifique la resistencia final.
 - ✓ Dispersión por vía mecánica: Esta dispersión se obtiene al pasar un mortero de cemento convenientemente dosificado por un mezclador especial, los cuales provocan una agitación extremadamente violenta. Esta agitación provoca el desprendimiento de los granos de cemento adheridos a la superficie, por lo que la película de hidrato es eliminada precipitando al estado coloidal. Esta técnica es muy empleada.
- Suspensiones líquidas o de productos químicos: Aquellas que tienen la característica de cristalizar dentro de los huecos que se encuentran en una masa sólida. Se utilizan en el inyectado de macizos rocosos que presentan fisuras muy pequeñas y en aluviones con espacios inter-granulares relativamente pequeños. Los productos más utilizados en la actualidad son geles de silicato de sodio y resinas orgánicas.
 - ✓ Geles de silicato de sodio: Este producto puede ser duro o plástico y se puede emplear para impermeabilizar o consolidar los terrenos. Tiene la gran característica de inyectar separadamente en el

terreno una solución de silicato de sodio y posteriormente una solución de cloruro de calcio. El silicato da un gel resistente que consolida al terreno impermeabilizándolo, aunque su endurecimiento casi es instantáneo.

- ✓ Resinas orgánicas: Las resinas orgánicas que se presentan en forma de líquidos se polimerizan al cabo de cierto tiempo para dar un sólido más o menos resistente, el cual puede utilizarse como un mortero de inyección.

4.9. Diseño de una pantalla de inyectado

En el diseño de una pantalla de inyectado se deben de considerar las siguientes características:

- ❖ Mezclas de inyectado
- ❖ Espaciamiento y profundidad de las inyecciones
- ❖ Secuencia de inyectado
- ❖ Procedimiento de inyectado
- ❖ Control de campo

La información obtenida por los estudios de laboratorio de la cohesión y viscosidad de las diferentes mezclas de inyectado utilizadas por estudios teóricos de flujo y penetración de lechada o solo por el monitoreo en campo de presión de inyectado y absorciones, que se han obtenido a lo largo de los años han producido el desarrollo y una mejor comprensión del método número de intensidad de inyectado o GIN (por su siglas en ingles Grouting Intensity Number).

Los resultados y operaciones de inyectado se han vuelto más sencillas y más económicas; por lo que los expertos han sugerido el empleo de este método. Debido a esta afirmación de los expertos, daremos una breve explicación del diseño y del inyectado, utilizando la referencia del método GIN, dando un énfasis a la pantalla de inyectado en presas aunque este método también es utilizado en inyecciones de consolidación o en la construcción de obras subterráneas.

Este método solo emplea una mezcla estable, con esto permite evitar o reducir el riesgo de dañar la roca por hidrofracturamiento, el método reduce grandes errores de inyectado, es más sencillo y rápido ya que no se pierde tiempo en cambiar la mezcla.

4.10. Método GIN

Los excelentes resultados obtenidos hace algunos años en otras presas de México invitan a aprovechar los últimos desarrollos y adelantos del método, por lo que es importante describir a detalle este método, para conocer así sus ventajas y sus deficiencias que se han tenido durante su proceso de ejecución.

En su diseño se requiere tener un buen conocimiento de las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio, para la selección de los parámetros que lo conforman, en especial, las características de las discontinuidades de la masa de la roca que deberá inyectarse. Del mismo modo de deberán considerar las condiciones de aguas subterráneas existentes en el sitio para se tomen en cuenta los cambios producidos por los esfuerzos y presiones hidráulicas con respecto al tiempo.

De todos los tipos de presas la que presenta el gradiente hidráulico más elevado en la roca es la presa de enrocado con cara de concreto (CFRD por sus siglas en inglés Concrete Face Rock Fill), por lo que la inyección en el plinto y en la pantalla de impermeabilización merece un estudio cuidadoso y una atención primordial en su realización. Se darán los principios del método del número de intensidad de inyectado (GIN).

4.10.1. Diseño de mezcla

El diseño de la mezcla es uno de los puntos principales por lo que se necesita definir de forma eficaz, gracias a que si se lleva a cabo de esta manera se podrá tener un mejor conocimiento del comportamiento de la inyección, mejor aprovechamiento tanto en tiempo de realización y por supuesto una mejor ejecución.

Se utiliza solo una mezcla para la totalidad de los trabajos de inyección (consolidación e impermeabilización), la cual debe tener la retracción mínima posible de fraguado ya que podría existir una posible disolución de la lechada, debido a que se forman caminos preferenciales de circulación de agua, aunado a esto la penetración de la mezcla está en función del tamaño de granos del cemento en relación a las fisuras, por lo que la inyección a grandes distancias se obtiene con la misma presión de inyectado con la utilización de súper-fluidificante (reduce su cohesión y viscosidad) a manera de incrementar su penetrabilidad, además de un agente retenedor de agua para reducir la pérdida de agua durante el exprimido.

Para su definición se deben hacer ensayos en los cuales obtendremos la relación agua/cemento y el tipo de súper-fluidificante y retardante que se utilizará, obteniendo con esto las proporciones más favorables. Para que una inyección sea eficiente, la

presión de inyectado debe relacionarse con la presión de agua que en un futuro actuará en la zona considerada, la mezcla fraguada debe tener una resistencia mecánica, pero aun más una resistencia al deslave, las cuales deben ser suficientemente altas, para que tenga una duración de vida semejante a la de una presa.

La controversia de la elección entre lechadas delgadas o espesas (inestables o estables respectivamente) continúa; aunque la mayoría de los autores han expresado en la literatura su preferencia por las mezclas espesas que por las mezclas delgadas, esto debido a las ventajas que proporcionan al ser utilizadas en el proceso de inyectado. Este tipo de lechada (espesa), debido a su cohesión, requiere más presión para alcanzar la distancia de penetración, pero con ayuda de un aditivo súper-plastificante, se puede reducir dramáticamente tanto su cohesión como su viscosidad, factores importantes en el proceso de inyectado.

4.10.2. Curva límite

Esta se define en tres parámetros, los cuales son: la intensidad o número GIN, la presión máxima y la toma máxima. Mencionaré algunas de las cualidades de la curva límite.

Al mantener un GIN constante durante el proceso de inyectado se obtiene una penetración casi constante de lechada y se limita el volumen en fisuras amplias, permitiendo que la presión incremente en zonas apretadas, del mismo modo se elimina la combinación de presión elevada y volumen grande, evitando de esta forma esfuerzos que provoquen el levantamiento o hidropartición. El número GIN está dado por la siguiente expresión:

$$\text{La intensidad o número GIN} = p \cdot V \text{ [bar} \cdot \text{l/m]}$$

Siendo:

$p = \text{presión, [bar]}$

$V = \text{absorción de lechada por metro de perforación; [l/m] o [kg cemento/m]}$

Por lo que: $p \cdot V = \text{GIN} = \text{constante} = \text{"energía específica"}$

Otro de los parámetros importantes para realizar la curva limite es:

La presión máxima, la cual está en función de los equipos de inyección, siendo ésta lo suficientemente alta para que las fisuras no se abran de nuevo por hidrogateo.

La toma máxima no es un límite sino un punto en donde debe tomarse una decisión ya sea, continuar, terminar o dar por terminada, pero decidiendo perforar otro u otros taladros en la cercanía.

En el último parámetro tiene un valor crítico que es general, ya que si cualquier barreno se sobrepasa de este valor, deben de perforarse barrenos cercanos a una profundidad menor o mayor a ese barreno. Para la mayoría de las condiciones, se recomienda una envolvente de intensidad moderada. Un límite de presión neta recomendado sería aproximadamente de 2 veces la carga en el vaso, aunque ésta recomendación fácilmente produciría un hidrofracturamiento no deseado.

4.10.3. Saturación de la roca

Es importante que la roca se encuentre saturada al momento de la inyección por lo que es necesario inyectar un cierto volumen de agua en el barreno, ya que la roca seca puede absorber el agua de la mezcla provocando la penetración por fricción entre los granos de cemento.

4.10.4. Parada de inyección

La inyección se para con un caudal de inyección nulo o muy reducido, o cuando el producto $p \times V$ llega al valor GIN prescrito, obviamente se para de igual forma al llegar a la presión máxima o al volumen máximo (para tomar una decisión).

Para el desarrollo del método GIN se deben considerar las fisuras amplias y finas, con el fin de establecer algunos parámetros prácticos y económicos para reducir la penetración de lechada y el volumen de lechada inyectada; por lo que existen tres maneras de lograrlo como: empleando una lechada menos penetrante, limitando la presión de inyectado o limitando el volumen de lechada siendo está la más recomendable.

En la selección del espaciado de las inyecciones se recomienda que el inyectado de los primeros barrenos o barrenos primarios no interfiera con los siguientes, con un espaciamiento de 10 a 12 metros, la siguiente serie de perforaciones se encontrará a una distancia intermedia (5 a 6 metros) de las perforaciones primarias. Frecuentemente se requieren perforaciones terciarias por lo que nuevamente se encontrara a un espaciamiento intermedio (2.5 a 3 metros). Ya que la roca se hace cada vez más cerrada con cada etapa de perforaciones, las presiones más altas serán benéficas y producirán una operación de inyectado más eficiente.

4.10.5. Ventajas del Método GIN

El método GIN ha sido justificado como una herramienta muy útil en el diseño y control de inyectado y gracias a la experiencia obtenida en los trabajos se recomienda que la selección del valor GIN y el espaciamiento sea de tal manera que el volumen inyectado por metro de progresión se reduzca de una serie a otra de perforaciones alrededor del 50%, tal comportamiento dará seguridad de que está ocurriendo un cierre progresivo en la pantalla.

Así mismo se elige una mezcla única, una presión, un volumen máximo y el número GIN constante, con lo que se puede lograr una distribución bastante aceptable del volumen total inyectado a lo largo de la pantalla, ya que el procedimiento toma en cuenta las irregularidades reales de las condiciones geológicas en la masa de roca, con lo que se puede maximizar la relación beneficio-costos de la pantalla de inyectado.

5. Construcción de la Pantalla Flexo Impermeable del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”.

La Pantalla Impermeable del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca (P. H. La Yesca) está conformada por: un muro pantalla flexible y una pantalla de impermeabilización profunda a base de inyecciones; éstas ejecutadas debajo del cuerpo de las ataguías aguas arriba y aguas abajo respectivamente, las cuales, junto con una serie de tratamientos especiales (pantalla de impermeabilización) llevados a cabo dentro de las 8 galerías de inyección y drenaje en ambas márgenes del proyecto, que complementariamente con el tapete de consolidación por medio de inyecciones en la zona del cauce, así como, de las inyecciones de impermeabilización donde se localiza el plinto, conformarán el plano de estanqueidad del P.H. La Yesca.

Este capítulo tiene como objetivo presentar la secuencia de construcción de los muros de pantalla flexibles en ambas ataguías, así como, de las inyecciones profundas que conformaron la pantalla estanca, construida debajo del cuerpo de las ataguías del P.H. La Yesca, las cuales garantizaron la impermeabilidad durante el proceso de construcción de la Cortina de la futura central hidroeléctrica, por lo anterior, a continuación se presenta una descripción del P. H. La Yesca.

5.1. Localización

El P.H. La Yesca, se realizó sobre el cauce de río Santiago, 4 km aguas abajo de la confluencia del río Bolaños y a 62 km aguas arriba de la cortina de la C. H. El Cajón; este se encuentra localizado a 105 km de la Ciudad de Guadalajara, a 22 km al NW de la población de Hostotipaquillo, Jalisco; y las localidades más cercanas al proyecto son los caseríos Mesa de Flores y Paso de La Yesca, a 6 y 8 km respectivamente. Las coordenadas geográficas del sitio del proyecto son 21° 11' 49" de Latitud Norte y 104° 06' 21" de Longitud Oeste.

El P.H. La Yesca tendrá una cortina de 208 m de altura para regular los escurrimientos del Río Santiago y Bolaños mediante la formación de un vaso de almacenamiento que asciende a 3 492 hectáreas en su nivel máximo extraordinario, cubriendo así una longitud de 54.8 km en el río Santiago y 23.5 km en el río Bolaños, el cual abarcará superficies de los estados de Jalisco y Nayarit respectivamente.

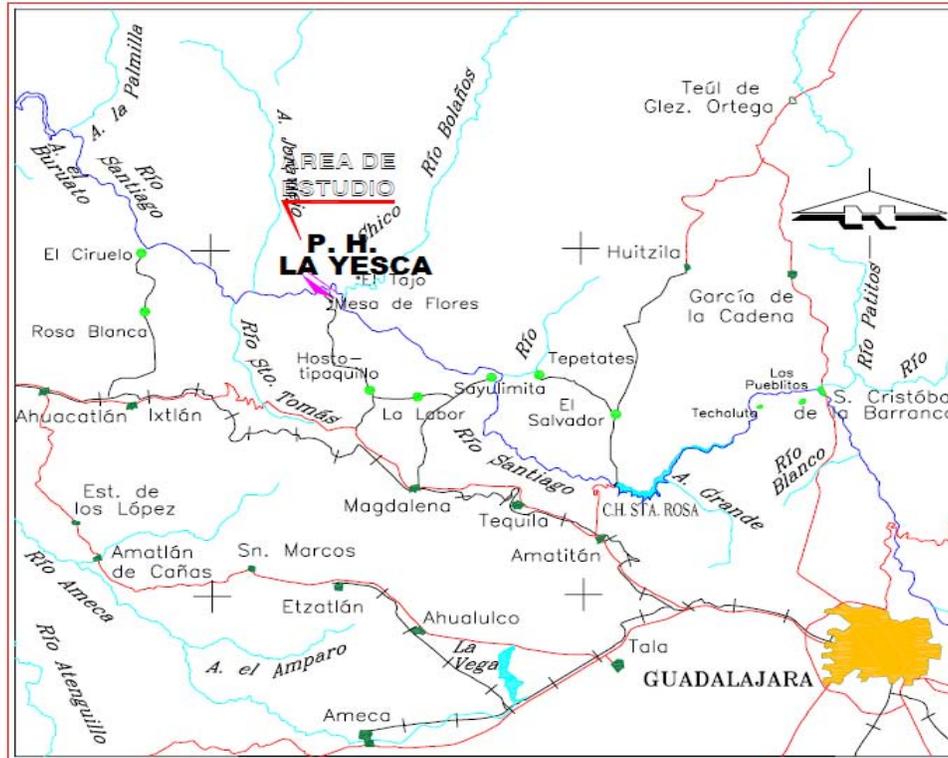


Figura 5.1.- Mapa de localización del P.H. La Yesca

La pantalla flexible realizada en el P.H. “La Yesca”, se encuentra localizada debajo de las ataguías aguas arriba y aguas abajo respectivamente. La primera de ellas se localiza en la prolongación del núcleo impermeable de la ataguía aguas arriba, la cual se desplantó a partir de la El. 397.00 y se prolongó hasta hacer contacto con la roca de cimentación, debido a su longitud y localización consta de dos etapas:

- Primera etapa: se ejecutó en la zona contigua donde el arroyo carrizalillo tiene confluencia con el río Santiago, esto realizado en la margen derecha del río.
- Segunda etapa: se realizó en la margen izquierda del cauce del río, hasta hacer contacto en el respaldo de concreto, el cual se ejecutó como trabajo adicional para la estabilización de la margen izquierda.

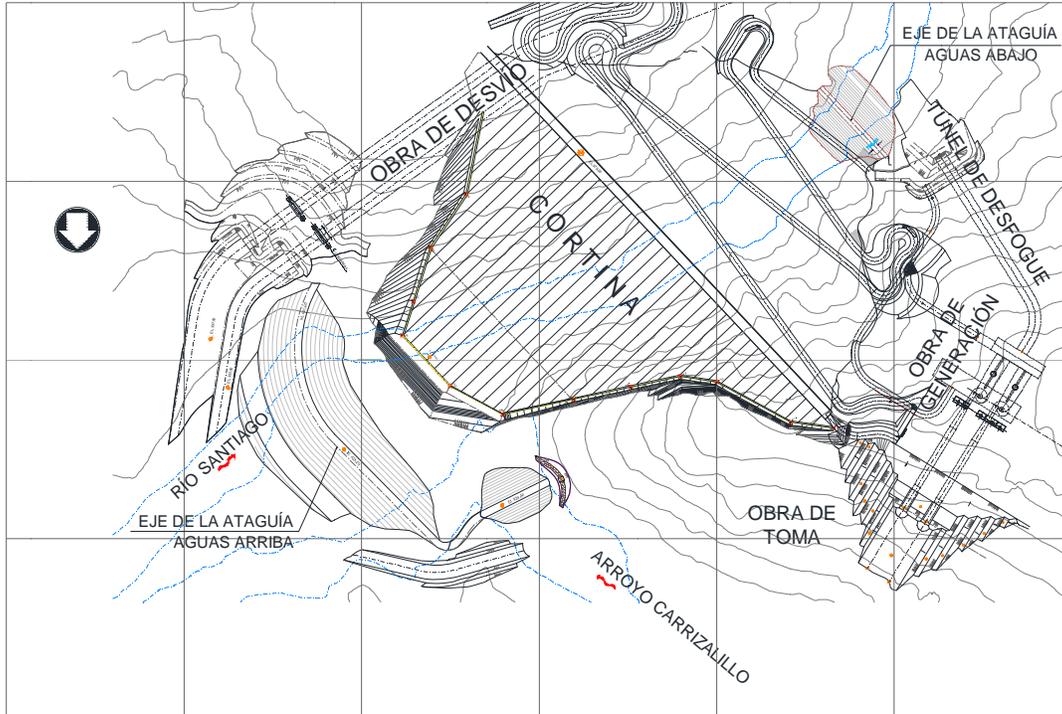


Figura 5.2.- Localización de las ataguías en el P.H. La Yesca.

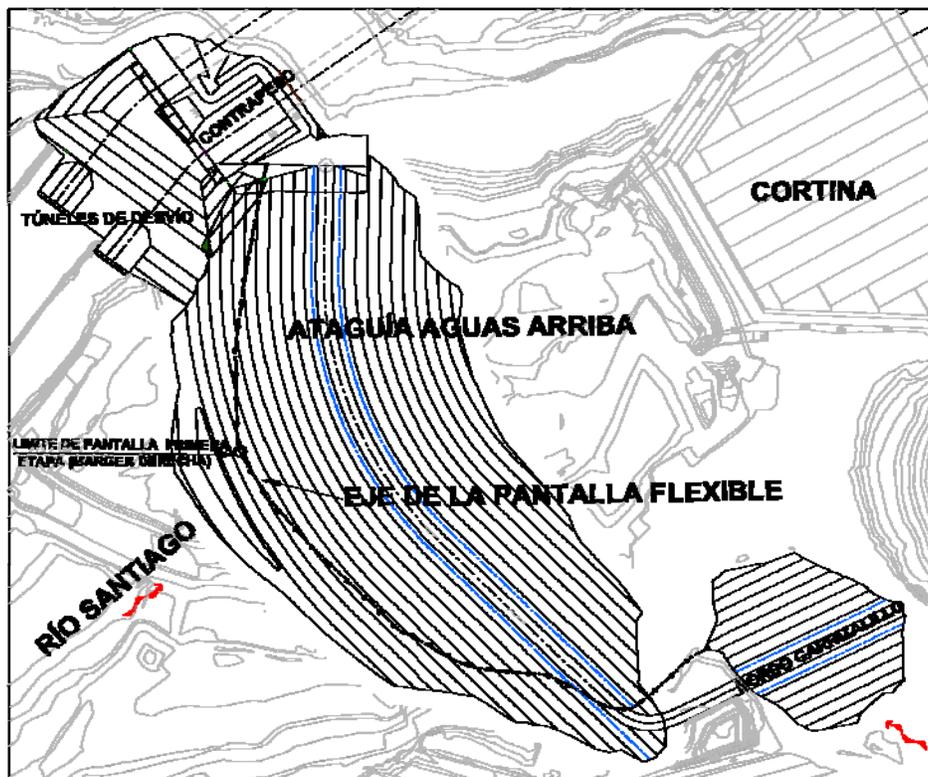


Figura 5.3.- Vista en planta de la ataguía aguas arriba – Pantalla Flexible

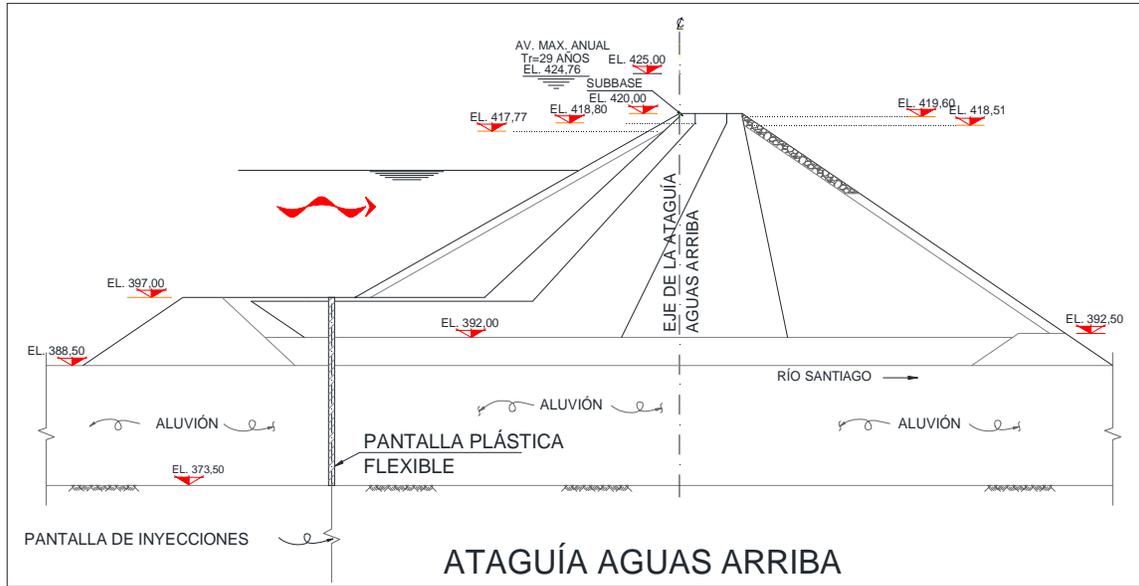


Figura 5.4.- Sección transversal de la ataguía aguas arriba.

Por otra parte el muro pantalla de la ataguía aguas abajo del proyecto, consistió en un sola etapa, localizado debajo del eje del cuerpo de la ataguía sobre la El. 392,00 y se prolongó hasta hacer contacto con la roca basal. Esta última forma parte del cuerpo de la Cortina del P.H. La Yesca. Cabe mencionar que en esta ataguía se aloja la galería de captación de filtraciones del P.H. La Yesca.

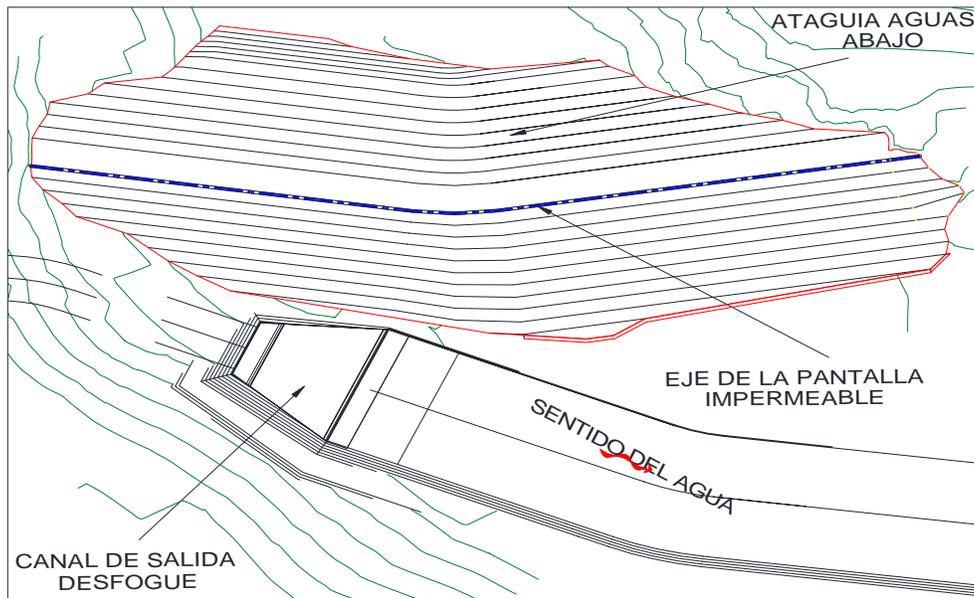


Figura 5.5.- Vista en planta de la ataguía aguas abajo.

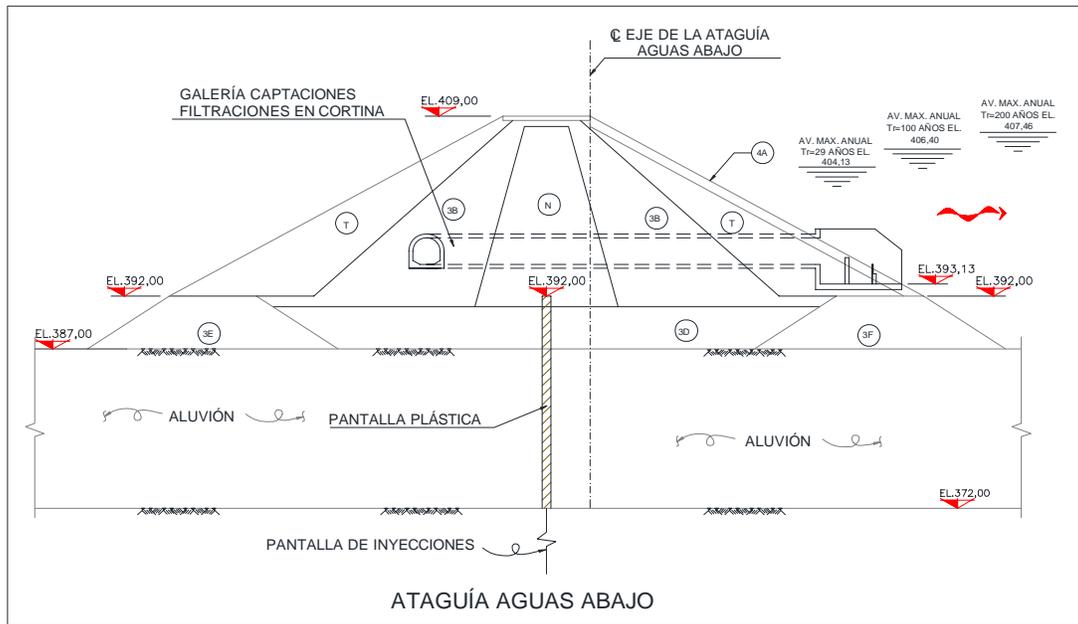


Figura 5.6.- Sección transversal de la ataguía aguas abajo.

5.2. Geología del sitio.

Como se ha dicho anteriormente en el documento, el estudio geológico de la zona juega un papel sumamente importante, debido a esta importancia, se da una breve descripción de la zona en donde se llevó a cabo la construcción de las pantallas flexibles. El primer estudio geológico realizado por CFE data del año 1984, posteriormente se realizó otro estudio en Junio de 1988, completando la información necesaria para el desarrollo del proyecto con los estudios realizados en los años 2005 y 2006.

De manera breve, se describe la geología que arrojaron dichos estudios: En la margen izquierda se localizan dos unidades litológicas, dacita porfídica (Tmid) e ignimbritas riódacíticas (Tmird). La zona descomprimida tiene un espesor de 5.0 a 12.0 metros y corresponde a una roca alterada y fracturada. En esta margen se determinó que el rango de permeabilidad oscila entre 0.24 y 17.0 unidades Lugeon (UL) (Véase punto 4.5), lo que caracteriza un macizo rocoso que varía de impermeable a permeable. En el cauce del río, se encontró un espesor promedio de aluviación de 15 metros, debajo de los cuales existe toba lítica alterada, fracturada y fragmentada, con un RQD aproximado de 50 a 80% y la permeabilidad promedio es del orden de 4.47 UL; sin embargo se obtuvieron valores de hasta 20.0 UL, que corresponden a zonas con cuerpos arenosos asociados a la alteración de zonas de falla y contactos litológicos.

En la margen derecha se encuentran dos unidades litológicas, la parte media superior corresponde a una dacita porfídica (Tmid), mientras que la parte media inferior corresponde a ignimbritas riódacíticas (Tmird). El espesor de la zona descomprimida y fracturada es de 5.0 hasta 70.0 metros y corresponde a una roca muy fracturada y ocasionalmente alterada. En la ataguía aguas arriba, tras remover 15.0 m de aluvión, se excavará en toba lítica y diques pórfito andesítico, a los que se les asocian cuerpos arenosos irregulares muy frecuentes y que deben considerarse para el diseño de la pantalla impermeable.

A continuación se presentan las secciones geológicas de las ataguías aguas arriba y abajo respectivamente, las cuales incluyen la relación litológica y las principales fallas geológicas en las zonas donde quedaron ubicadas las pantallas impermeables.

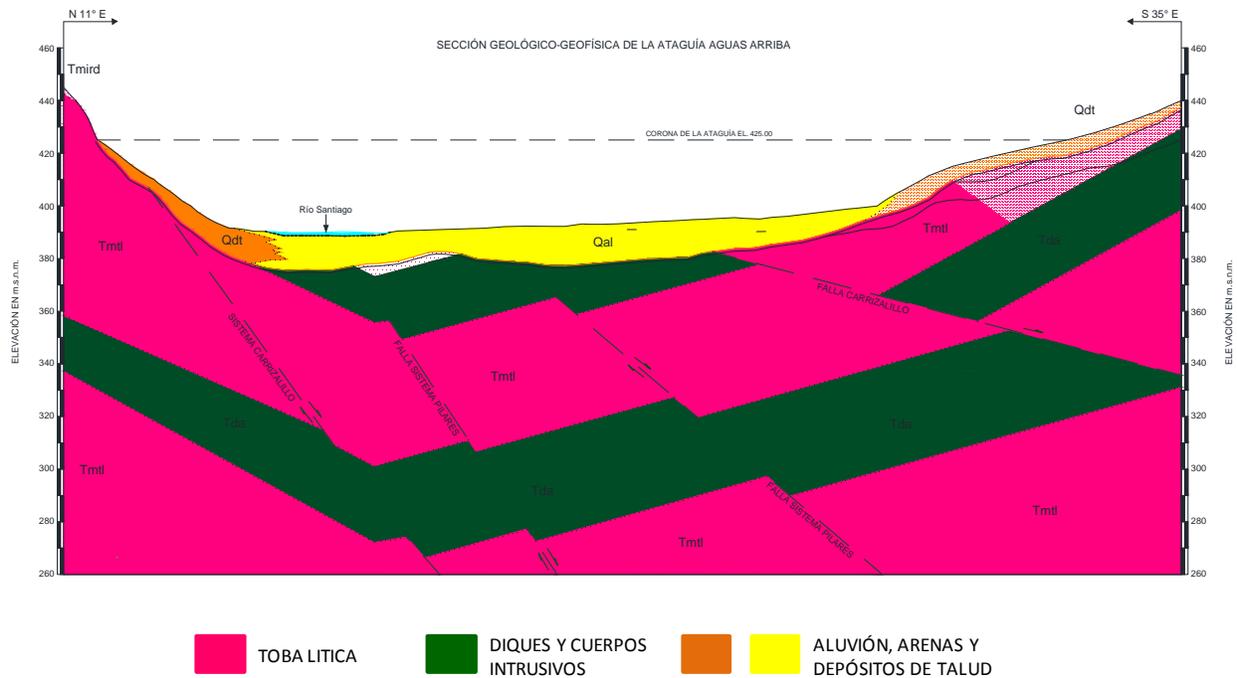


Figura 5.7.- Sección transversal Geológica de la ataguía aguas arriba.

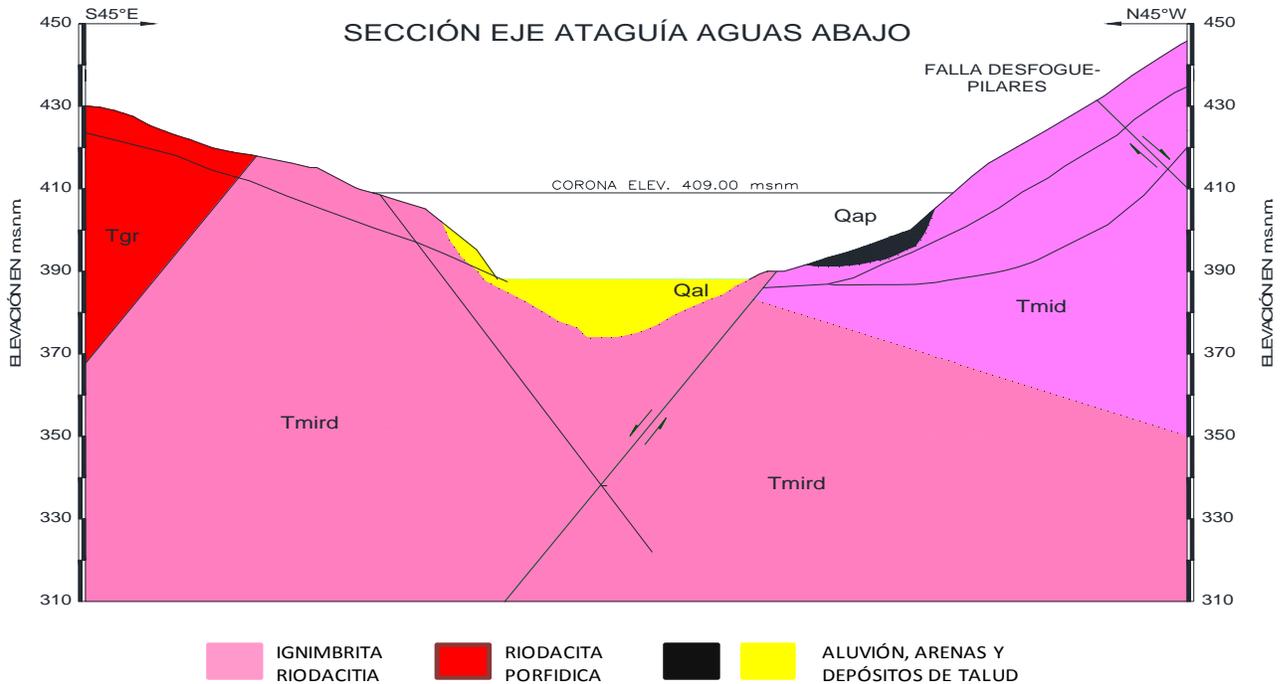


Figura 5.8.- Sección transversal Geológica de la ataguía aguas arriba.

5.3. Secuencia constructiva de la pantalla flexible

5.3.1. Fabricación de la plataforma de trabajo

Los brocales se alojaron sobre plataformas compuestas de aluvión, perfectamente niveladas, compactadas y con área suficiente para la operación de manera simultánea de los equipos de excavación, los camiones de acarreo y las plantas de preparación de lodos y mezclas. Además se formó un núcleo de arcilla a lo largo del eje del muro pantalla para permitir la conexión adecuada al núcleo de la ataguía y conformar una adecuada cimentación de la misma. Cada núcleo de arcilla se conformó, de acuerdo a las secciones presentadas en el apartado 5.1 de este capítulo.



Figura 5.9.- Plataforma de trabajo de la primera etapa del muro pantalla en la ataguía aguas arriba sobre la margen derecha del cauce del río.



Figura 5.10.- Plataforma de trabajo en la segunda etapa del muro pantalla en la ataguía aguas arriba sobre la margen izquierda del cauce del río.



Figura 5.11.- Plataforma que alojó las instalaciones para la ejecución de la pantalla impermeable aguas abajo de la presa.



Figura 5.12.- Instalaciones en campo para la ejecución de la preparación de mezclas para el inyectado y construcción del muro plástico.

5.3.2. Construcción de los brocales guía

El ancho de la excavación que aloja el brocal guía es de 90 cm, esto para dar facilidad a las excavaciones y que exista la menor pérdida de lodo bentonítico por infiltración al terreno. El trazo del eje del muro se realizó con ayuda de un equipo de topografía para situar la pantalla en la zona proyecta en el desplante de las ataguías. A ambos lados de la parte superior de la zanja, se construyeron los brocales de concreto armado, formando una sección “L” invertida, se colocaron referencias de la ubicación de los paneles del muro pantalla y de los barrenos de inyección sobre el hombro del brocal de acuerdo con los planos de ingeniería de detalle (ver anexo). Después de descimbrar los brocales, se colocaron puntales para evitar colapsos y aislar tramos del brocal.



Figura 5.13.- Excavación del brocal guía para alojar el equipo de excavación (almeja), ataguía aguas arriba.



Figura 5.14.- Instalación de la cimbra del brocal guía para alojar el equipo de excavación (almeja), ataguía aguas abajo.



Figura 5.15.- Construcción del brocal de la ataguía aguas arriba.

5.3.3. Suministro de la mezcla autofraguante

El suministro consistió en la adquisición, transporte, distribución, almacenamiento y manejo de los materiales hasta el sitio de preparación. La planta de preparación de lodos contó con dos tanques de almacenamiento de una capacidad de 15 000 litros c/u, con equipo turbo mezclador para la fabricación de la lechada que contó con una malla de retención de grumos, papeles e impurezas. Se utilizó un agitador para la fabricación

de morteros y/o para depositar la mezcla previamente preparada en el turbo mezclador. El objetivo del agitador es mantener las partículas sólidas y eliminar las burbujas de aire de la mezcla, garantizando así una mezcla uniforme y conservadora durante todo el proceso de inyección, desde la planta de preparación hasta su colocación en el tablero del muro pantalla.



Figura 5.16.- Tanques de almacenamiento (costado izquierdo).



Figura 5.17.- Equipo de mezclado de la mezcla autofraguante e inyectado.

La mezcla autofraguante que se utilizó en la construcción de la pantalla flexo-impermeable tuvo las siguientes características:

- ❖ Resistencia a la compresión simple $f'c \geq 0.98 \text{ Mpa}$ (10.0 kg/cm^2), a la edad de 28 días, con un módulo de deformidad de $500 \text{ Mpa} \pm 10\%$.
- ❖ No erosionalidad garantizada por lo menos a seis años (verificada indirectamente mediante los muestreos).
- ❖ Permeabilidad (k) menor a $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ (verificando que la mezcla bentonita/cemento tenga una permeabilidad 10 veces menor en el laboratorio).

CONCEPTO	CANTIDAD
Cemento (<i>kg</i>)	200
Agua (<i>litros</i>)	504
Lodo bentonítico con una relación (Agua/Cemento) 12:1 (<i>litros</i>)	296
Lignosulfito (<i>kg</i>) Como aditivo retardante	2

Tabla 5.1.-Dosificación de la mezcla de diseño utilizada en las pantallas flexo-impermeables.

Características de la mezcla desplazante (concreto plástico)

Se utilizó un concreto plástico con las características siguientes:

- ❖ Resistencia a la compresión simple $f'c \geq 0.98 \text{ Mpa}$ (10.0 kg/cm^2), a los 28 días.
- ❖ Módulo de deformabilidad de $5000 \text{ Mpa} \pm 10\%$.
- ❖ Permeabilidad (k) menor a $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$.

CONCEPTO	CANTIDAD
Cemento (<i>kg</i>)	140
Agua (<i>litros</i>)	85
Arena (<i>kg</i>)	975
Grava (<i>kg</i>)	375
Lodo bentonítico con una relación (Agua/Cemento) 12:1 (<i>litros</i>)	De 300 a 400
Lignosulfito (<i>kg</i>) Como aditivo retardante	0.65

Tabla 5.2.-Dosificación de la mezcla desplazante utilizada en las pantallas flexo-impermeables.

Durante la construcción del muro pantalla y ejecución de las inyecciones profundas realizadas en cada una de las ataguía, se llevó a la par un control de calidad de la elaboración de las mezclas utilizadas durante su construcción; para lo cual se tomaron muestras para la elaboración de 6 especímenes; llenando cada uno de los moldes de 5 centímetros de diámetro y 10 centímetros de altura con la mezcla, los cuales se sometieron a la prueba de resistencia a compresión simple en el laboratorio instalado en obra, tal y como lo indicaban las especificaciones de obra civil del P.H. La Yesca.



Figura 5.18.- Moldes cilíndricos para la elaboración de las probetas de ensaye.

5.3.4. Ensayos de los cilindros – Prueba de compresión simple

Al cumplir con la edad de prueba de los especímenes, estos se ensayaron dentro de las tolerancias siguientes: 24 horas \pm 30 minutos; a 3 días \pm 1 hora; a 7 días \pm 3 horas; a 28 días \pm 12 horas, al sacar los especímenes del curado en todo momento se cubrieron con un paño húmedo verificando la planicidad de las caras de los especímenes con una regla, eliminando los granos sueltos y ensayándolos por las caras planas, posteriormente se colocó cada espécimen en la máquina de prueba, centrándolo entre las placas de ensaye y posteriormente se le aplicó una carga uniforme en un tiempo de 20 a 80 segundos.



Figura 5.19.- Cilíndricos para la elaboración de las probetas de ensaye en laboratorio.

Se tomó el dato de la carga máxima y se realizó el cálculo del área de contacto del espécimen. La resistencia se encuentra dividiendo la carga entre el área, estos resultados deben de promediarse y eliminarse aquél que varié en $\pm 10\%$. Si dos especímenes acusan diferencia en 10%, la prueba debe repetirse.

5.3.5. Excavación del muro pantalla

La excavación del muro pantalla se realizó por tableros primarios y secundarios de manera alterna, debido a que nunca se debe excavar un tablero contiguo a otro que tenga menos de 24 horas de colado (véase punto 3.2.2); esta excavación se ejecutó con ayuda de la mezcla fraguante (cemento-bentonita-aditivos) como un estabilizador de paredes cuidando que, ésta, no se encuentre en ningún momento a más de 80 centímetros de profundidad del nivel del brocal. (Véase punto 3.2.1)

En función del comportamiento de la excavación en campo se definió la longitud de cada tablero (tentativamente tableros con un máximo de 6 metros); por otra lado, cuando el proceso de excavación presentó zona de bloques y/o zonas con material de dureza excesiva, cuya resistencia y/o dimensiones fueron mayores a la capacidad de corte del equipo de excavación, se utilizó un cincel o trépano para romper el terreno o boleas.

En cada panel se verificó la verticalidad y la continuidad de los tableros mediante una plomada en el centro longitudinal del tablero, al presentarse desviaciones se rebajaron las paredes o extremos del tablero de tal forma que no existen huecos o zonas permeables en el muro flexible. A diferencia de los muros milan en los cuales se colocan juntas o encofrados laterales (Véase punto 3.2.6), en este muro plástico se utilizan juntas entre los paneles por medio de una traslape, con un mínimo de 40 centímetros entre tableros. Solo se realiza un empalme en las excavaciones contiguas substituyendo de esta manera la utilización de juntas y realizando la construcción

continua del muro; esto, con el objetivo de impedir las filtraciones que se podrían producir en las juntas como comúnmente pasa en los muros milan.

Como parte del control de calidad y con el fin de garantizar una buena ejecución de los paneles se llevó el registro de la siguiente información:

- ✓ Coordenadas de control de los paneles
- ✓ Profundidad final de cada excavación
- ✓ Descripción de los materiales encontrados
- ✓ Eventos ocurridos durante la excavación (uso del trépano, caídos, etc.)
- ✓ Verificación de los traslapes transversales y longitudinales

Particularmente para la excavación de la pantalla aguas arriba en sus dos etapas no se presentaron mayores problemas para llegar al contacto con la roca o uso de equipo complementario al mencionado anteriormente. La Primera etapa tuvo una longitud de 152.80 metros, desplantándose sobre la elevación 394.20 msnm y se excavó hasta hacer contacto con la roca basal teniendo una volumen de excavación del brocal de 1818.81 m², en la cual cubriendo la zona donde confluye el Arroyo Carrizalillo y el Río Santiago (ver figura 5.3), en la cual se colocaron 53 barrenos correspondientes a cada una de las etapas de inyección y 5 barrenos adicionales para cubrir la zona aledaña al bordo carrizalillo.

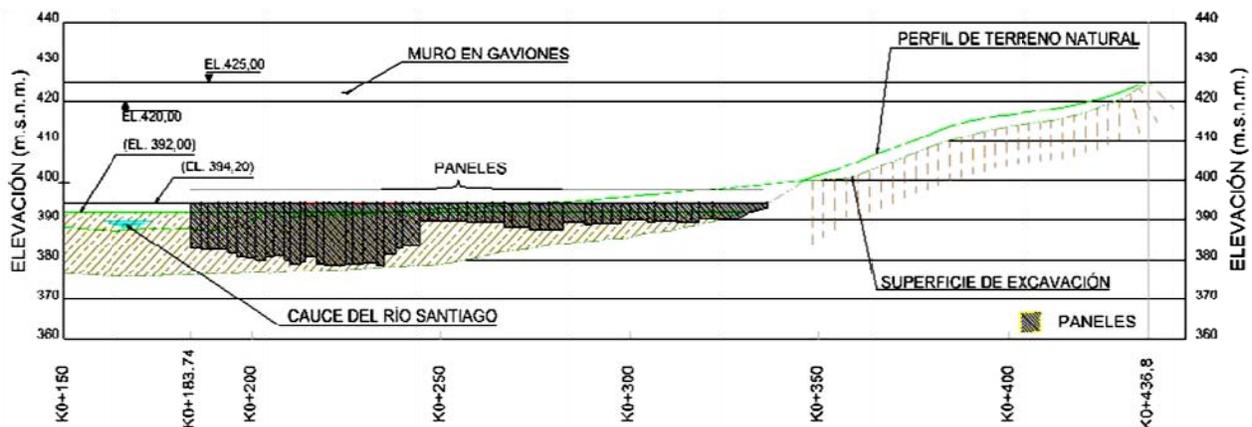


Figura 5.20.- Perfil por el eje de la pantalla impermeable de la ataguía aguas arriba – Primera etapa

La segunda etapa se desplantó en la El. 397.20 msnm, con una longitud de 142.90 m, cubriendo la zona aledaña al Monolito del concreto de la Margen izquierda hasta la zona del cauce y conexión con la primera etapa del muro pantalla. La excavación del brocal cubrió los 142.90 ml y la excavación del Muro Pantalla tuvo un área de 1911.91 m² en la cual se colocaron 46 barrenos correspondientes a cada una de las etapas de

inyección y dos barrenos adicionales para cubrir la zona aledaña al Monolito de concreto.

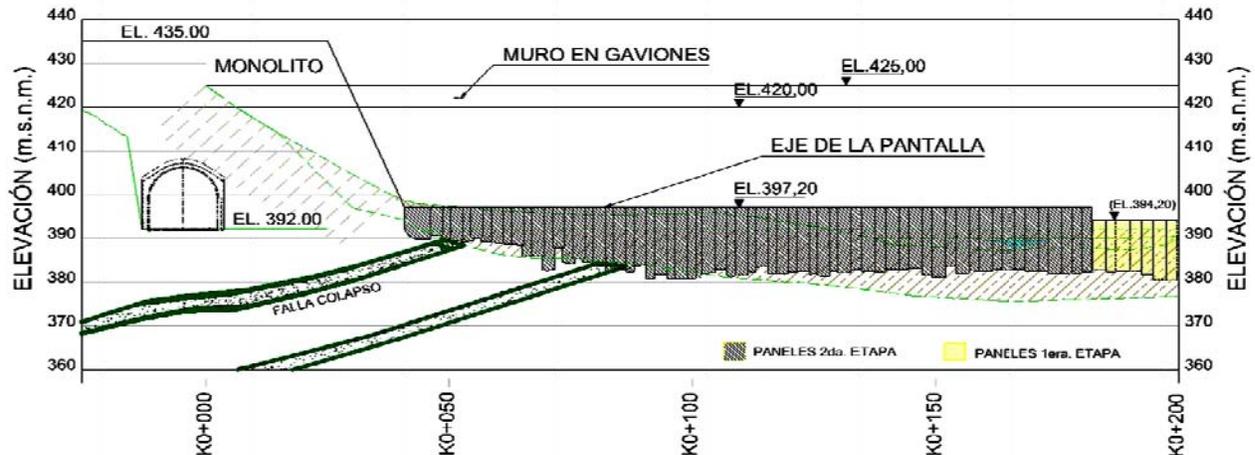


Figura 5.21.- Perfil por el eje de la pantalla impermeable de la ataguía aguas arriba – Segunda etapa

Por otra parte, se destaca que en la ejecución de los trabajos de la ataguía aguas abajo, se tuvieron complicaciones durante el proceso de excavación en la pantalla flexible para llegar al contacto con la roca basal, debido a que después de los primeros 16 paneles excavados, se encontraron bloques de roca de los mismos materiales de las laderas con un diámetro importante que el equipo de excavación (trepano y almeja) no pudo demoler y obtener muestras fehacientes del contacto con la roca, lo que ocasionó un interpretación inicial de una profundidad menor a la que se venía encontrando en los paneles próximos a dicha zona.

Esta zona de bloques encontrados, ocasionó incertidumbre en las muestras obtenidas inicialmente, motivo por el cual fue necesario realizar perforaciones exploratorias que inicialmente se ejecutaron sin recuperación de núcleos por la rapidez y la urgencia de la construcción, ya que dicha construcción del muro pantalla era una estructura que representaba un hito en el inicio de la colocación de los materiales graduados del cuerpo de la Cortina; con esas exploraciones se pudo anticipar una cavidad importante, que los estudios de bases de licitación no pudieron prever.

Por tal motivo, la CFE y Constructora de Proyectos Hidroeléctricos (CPH), encargada de los trabajos de construcción, acordaron realizar perforaciones exploratorias con recuperación de núcleos con la finalidad de determinar la profundidad y longitud de dicha zona o cavidad y tomar la decisión del proceso de ejecución para solucionar dicha problemática. Los barrenos exploratorios ejecutados en dicha zona, dieron como resultado la existencia de una cavidad con una profundidad aproximada de 1.5 a 9 m,

entre los cadenamientos 0+039.10 a 0-034.20 con una longitud aproximada de 74 metros que contempló a los paneles del 17 al 50 (véase figura 5.22).

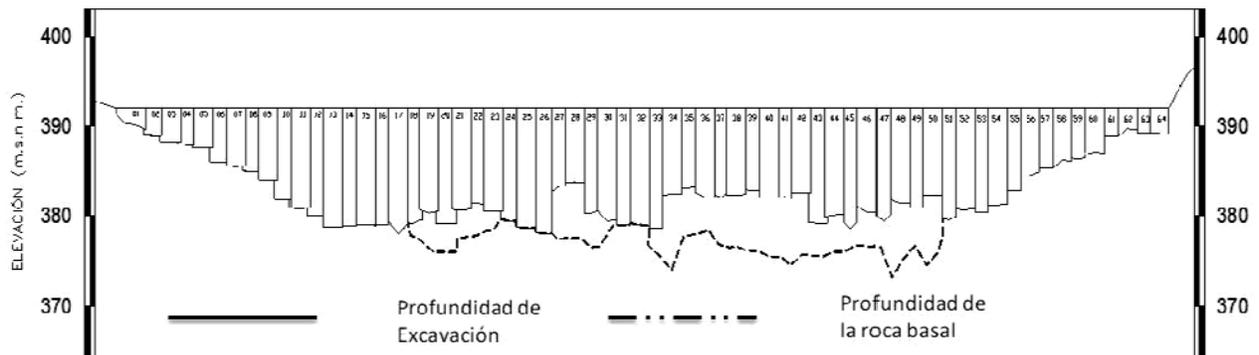


Figura 5.22.- Sección de la excavación de la pantalla aguas abajo P.H. La Yesca



Figura 5.23.- Recuperación de núcleo – Barreno Panel 20 pantalla aguas abajo P.H. La Yesca

Éstas perforaciones, dieron pie a proponer la solución de la ejecución de inyecciones a base de tubos manguitos (véase punto 4.6) en el muro flexible de la ataguía aguas abajo en una longitud aproximada de 74 metros en una zona de aluvión, y garantizar así, la impermeabilidad de dicho muro. Cabe destacar que esta alternativa ocasionó una reprogramación de recursos y trabajos extraordinarios en el frente.

5.3.6. Empotramiento de la pantalla flexible en la roca basal

Como parte del proceso de ejecución de los trabajos durante el proceso de excavación se obtuvieron muestras de roca como evidencia de que la excavación ha llegado a la roca de cimentación, de esta forma se tuvo que prolongar la excavación 50 cm aproximadamente después de haber hecho contacto con la roca, esto para empotrar el

pie de la pantalla en toda su longitud. También fue necesario colocar tubos de PVC que sirvieron como guía para la posterior perforación y ejecución de los trabajos de inyección y conformar así la pantalla de impermeabilización por debajo del muro pantalla. La longitud de estos tubos guías es la que permite llegar desde la superficie hasta la profundidad donde se debe iniciar la inyección, facilitando así la perforación y la adecuada construcción de la pantalla de impermeabilización profunda.



Figura 5.24.- Obtención de muestras de la roca basal

Estos tubos guías se taparon en ambos extremos y se llenaron de agua para que no flotaran, los cuales fueron colocados con la separación y profundidad adecuada conforme a la localización de los barrenos de la pantalla profunda.



Figura 5.25.- Colocación de los tubos guía para los barrenos de perforación

Una vez ejecutados los paneles del muro pantalla se llevó a cabo la construcción de la viga de atado, la cual tiene por objetivo unir a todos los paneles construidos en su parte superior, lo que garantiza el adecuado trabajo en conjunto y a su vez elimina el concreto que pudo haber quedado contaminado con lodo bentonítico en la zona del brocal.

5.3.7. Retiro de los brocales guía

Como una última actividad correspondiente a la construcción del muro o pantalla flexible, se retiró el brocal de las ataguías respectivas, cuidando no dañar el muro y restituyendo la arcilla del núcleo, colocándola y compactándola con rodillo ligero hasta 2 metros arriba de la corona del muro.



Figura 5.26.- Retiro del brocal guía de la pantalla flexible-ataguía aguas abajo

5.3.8. Maquinaria y Equipo

Para la excavación de la pantalla aguas arriba se utilizaron dos equipos provistos de un barretón telescópico tipo Kelly y un cucharón de almeja de 80 centímetros de ancho por 250 centímetros de largo, de accionamiento hidráulico a través de una central montada sobre una grúa tipo Link Belt LS-118. Para demoler bloques y boleos que no pudo extraer el equipo tipo almeja, se contó con un equipo cincel-trepano. Este es un tipo de herramienta metálica cuadrada de 5 metros de altura, con un peso aproximado de 6 toneladas, el cual se dejaba caer de una altura aproximada de 1 a 3 metros o mayor a ésta, con el objetivo de romper el terreno en el fondo de la zanja. En la elaboración de la pantalla impermeable aguas abajo solo se utilizó un equipo de excavación de la empresa Soilmeac y un cincel-trepano de las mismas características. Estos equipos garantizaron la verticalidad y la continuidad del muro pantalla en toda su longitud.



Figura 5.27.- A la derecha equipo Bauer GB 34 de excavación para la pantalla impermeable y a la izquierda equipo Link Belt adicionando con cincel-trepano, ataguía aguas arriba del P.H. La Yesca



Figura 5.28. Al fondo el equipo Link Belt adicionando con cincel-trepano y al frente el equipo Soilmeac de excavación para la pantalla impermeable. Equipo de excavación y demolición en la pantalla aguas arriba



Figura 5.29.- Equipo Soilmeac utilizado para la construcción de la pantalla aguas abajo

Con respecto al equipo empleado para el proceso de elaboración de las mezclas autofraguantes, se contó con 2 tanques contenedores de un volumen de 15 000 litros cada uno para almacenar la mezcla plástica, además de un silo para el almacenamiento de cemento a granel, del mismo modo se contó con una plataforma de almacenamiento de cemento (en sacos) y otra para el almacenamiento del equipo de mezclado y transportadores de gusano para alimentar cemento en forma automática a los agitadores durante la preparación.



Figura 5.30.- Equipo de mezclado para la elaboración de las mezclas de inyectado y autofraguante.

Los tratamientos de inyección que se llevaron en las pantallas flexo impermeables de las ataguías, las cuales conforman la pantalla de impermeabilización profunda, fueron inyecciones de contacto, consolidación e inyecciones de impermeabilización bajo la pantalla flexible e inyecciones tipo manguito las cuales, como bien se mencionan, únicamente se realizaron en el muro pantalla de la ataguía aguas abajo, toda vez que se encontraron bloques de roca como se ha dicho anteriormente.

Por lo anterior, a continuación se da una reseña en la ejecución de los tratamientos a base de inyecciones que se llevaron a cabo para la conformación de pantalla profunda por debajo del muro pantalla de ambas ataguías, destacando que estos trabajos también se aplican en el grupo de obras que conforman el P. H. La Yesca para la conformación del plano de estanqueidad.

5.4. Tratamientos en el terreno por medio de inyecciones en los muros pantalla del P. H. La Yesca.

Las inyecciones que se realizaron bajo los muros pantalla, se ejecutaron de acuerdo a los análisis e interpretación de los estudios geológicos realizados en el sitio donde se emplazaron las ataguías del P.H. La Yesca, lo cual permitió concluir que en el sitio se tienen diversas unidades litológicas con diversos sistemas de fracturamiento (Véase punto 5.2.), dichos estudios tuvieron como objetivo definir las características de la inyección (como intensidad, dirección y profundidad de barrenos).

5.1.1. Metodología para la ejecución de las inyecciones bajo las ataguías

La metodología para la ejecución de los trabajos de inyección está basada en el Método de Inyección de Presión y Volumen Constante, GIN (por sus siglas en inglés Grouting Intensity Number). La inyección en ambos muros pantalla se realizó en tramos de 5 metros y en progresiones ascendentes (Véase punto 4.6). Se monitoreo la evolución de la presión, dando incrementos de 5 kg/cm^2 (0.49 Mpa) y un volumen de mezcla por metro (l/m) hasta interceptar la curva o trayectoria GIN seleccionada.

Curva GIN propuesta:

Esta curva se calculó en función de las cargas hidráulicas que impone el embalse; fue obtenida con base a los resultados de las pruebas realizadas in situ. Cabe destacar que estos parámetros son aplicables para los tratamientos de consolidación e impermeabilización de los diferentes tratamientos a ejecutar en el P.H. La Yesca.

Zona	Elevación (msnm)	Curva GIN (PxV)		Presión máx.		Volumen máximo de mezcla (l/m)
		Mpa (l/m)	kg/cm ² (l/m)	Mpa	kg/cm ²	
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 Elevación 410 a 325	137.3	1400	3.43	35.0	140

Tabla. 5.3.- Valores GIN propuestos - Bases de licitación, Adendum 4.

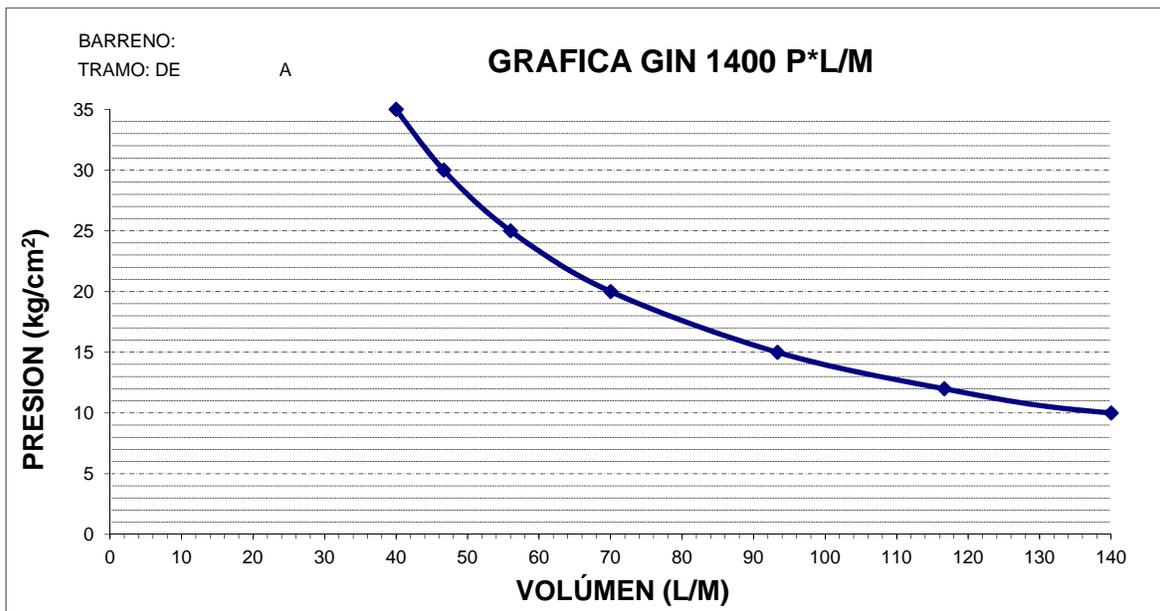


Tabla. 5.4.- Curva GIN utiliza en las inyecciones de los muros pantalla del P. H. La Yesca.

Debido a que las condiciones geológicas fueron distintas a las evaluadas en la etapa de estudio, se pudieron redefinir nuevos parámetros, por lo que se avanzó en las inyecciones de primera etapa, se evaluaron los resultados a fin de hacer los ajustes necesarios durante el proceso constructivo y así garantizar el adecuado funcionamiento de la pantalla de inyecciones.

En donde se cruzó alguna zona de falla o roca de mala calidad que causó inestabilidad en el barreno y que impidió el avance de la perforación, se optó por la inyección anticipada del tramo anómalo y posteriormente la reperforación para continuar con la perforación del barreno hasta la profundidad de proyecto.

Es importante mencionar que el tramo inyectado anticipadamente no se puede inyectar de nuevo cuando se realice la inyección del barreno; al tenerse problemas con la obturación (por las condiciones de roca) se inyectaron tramos menores a los 5 metros, o un poco mayores, siempre que no pasen de 7 metros. Durante todo este proceso se monitoreo la evolución de la presión en el brocal, registrada por medio de un manómetro, de igual forma se llevó el registro del volumen acumulado que se consumió en el tramo del barreno (litros por metro) hasta interceptar la curva GIN, presión máxima o volumen máximo.

Para el sellado del tramo se tomó en cuenta que el gasto mínimo debió ser menor de 5 litros/minuto/tramo, para tramos de 5 metros de longitud, o bien se redujo el tiempo de inyección para evitar el exprimido prematuro de la mezcla, lo que provocaría taponamientos en la tubería de inyección, aunque estos taponamientos se evitan cuando los incrementos de presión se realizan de manera lenta, con esto se genera la certeza de que el tramo fue sellado correctamente.

A continuación se presentan las inyecciones para cada una de las etapas de la ataguía aguas arriba y aguas abajo, en donde se presentan los consumos de mezclas para cada uno de los barrenos en sus distintos tramos de inyección.

Construcción de la Pantalla Flexo Impermeable del Proyecto Hidroeléctrico "La Yesca".

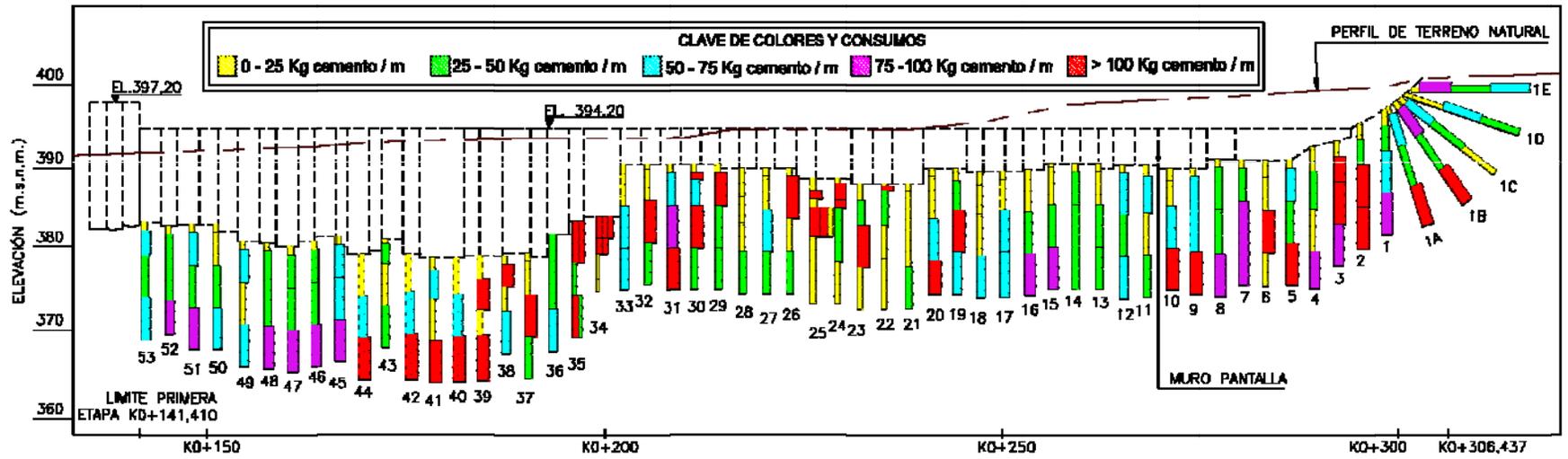


Figura 5.31.- Consumos de inyectado en los barrenos de inyección de la 1era. etapa en la ataguía aguas arriba.

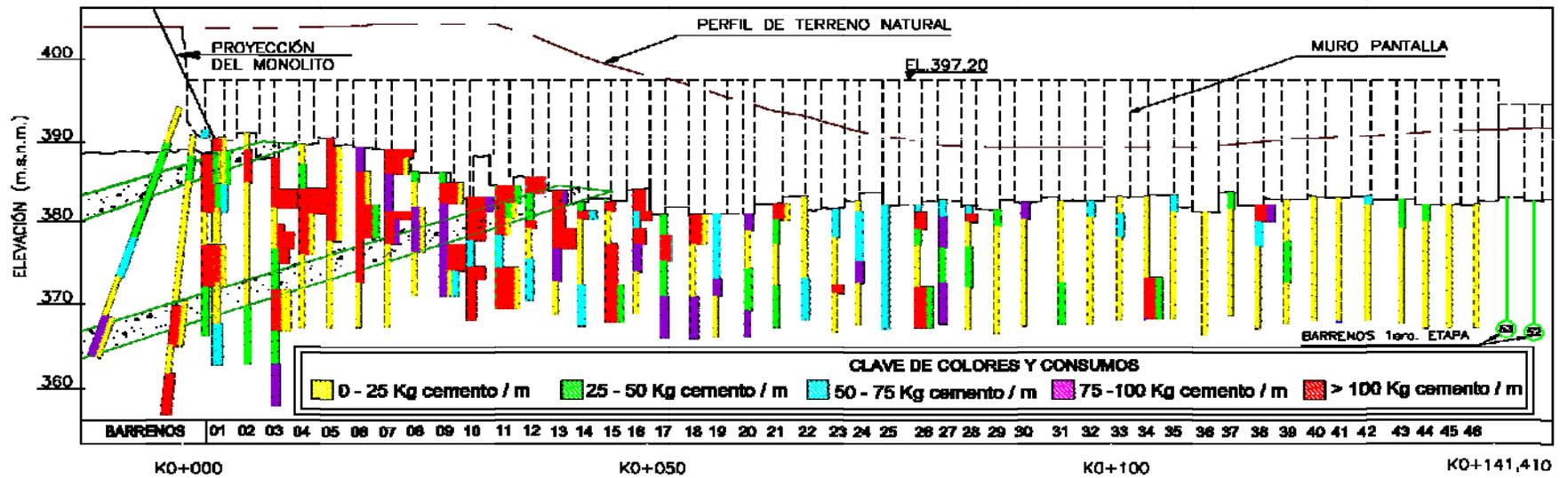


Figura 5.32.- Consumos de inyectado en los barrenos de inyección de la 2da. etapa en la ataguía aguas arriba.

Construcción de la Pantalla Flexo Impermeable del Proyecto Hidroeléctrico "La Yesca".

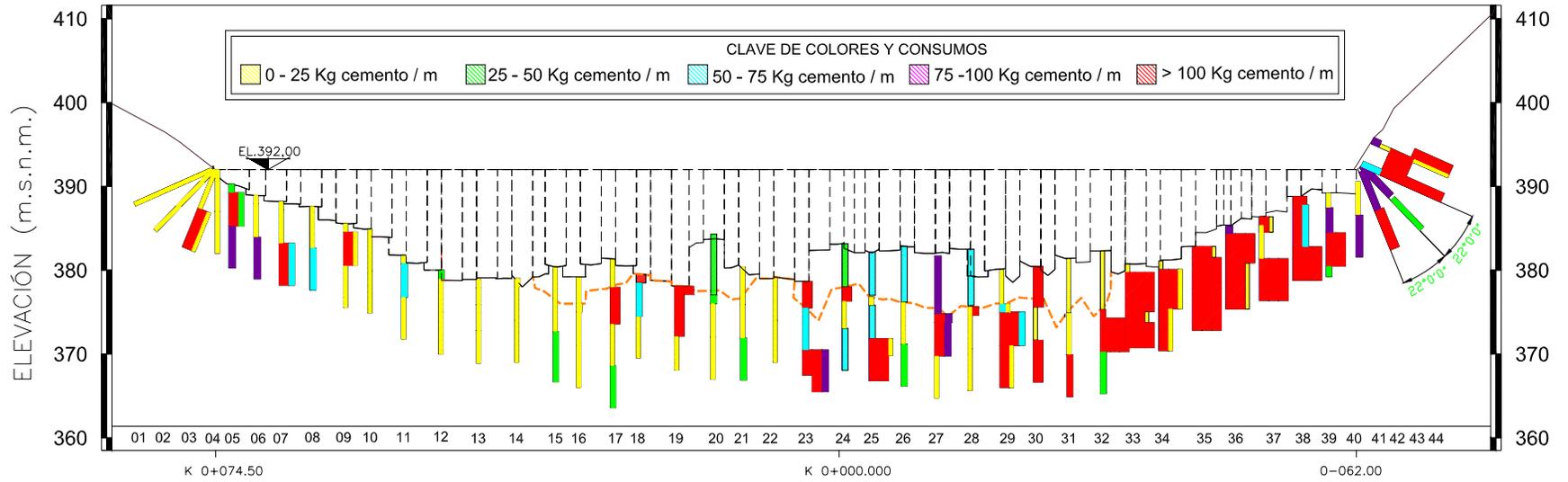


Figura 5.33.- Consumos de inyectado en los barrenos de inyección en la ataguía aguas abajo.

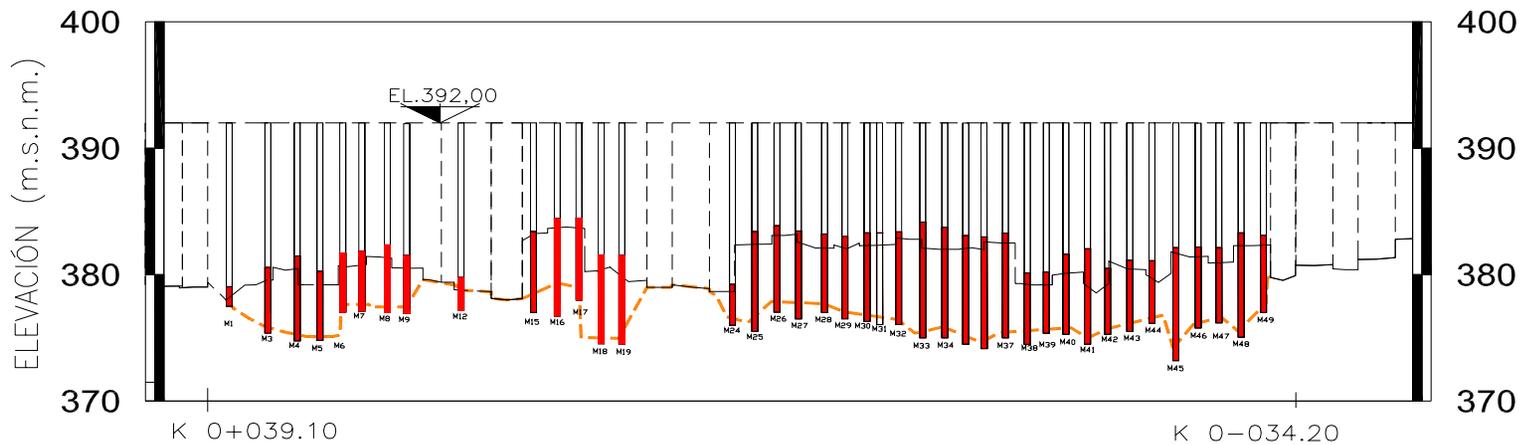


Figura 5.33.- Inyectado en la zona de bloques a base de la inyección de tubo manguito.

Del mismo modo, en la ejecución de los trabajos también se tomaron decisiones conforme a lo realmente encontrado en el sitio, por lo cual, en la ataguía aguas abajo se implementó a parte de la inyección por el método GIN, la inyección a base de tubos manguitos debido a la presencia de bloques entre los paneles #17 a #50, aproximadamente entre los cadenamientos 0+039.10 a 0-034.20 con una longitud aproximada de 74 metros.

Particularmente se destaca que esta técnica se implementó únicamente en la zona donde se realizaron los barrenos exploratorios que determinaron la zona de bloques. Debido a la premura y toda vez que en los estudios presentados en la ingeniería básica del proyecto no se conocía dicha zona, los tubos manguitos se tuvieron que conformar en obra, debido al poco tiempo que se tenía para la adquisición de los mismos (tubos manguitos) y la urgencia de terminar dicha excavación para emplazar la galería de captación de filtraciones e iniciar la conformación de la cortina de materiales granulares del P. H. La Yesca, esto por ser un hito en el inicio de dicha estructura. (Véase figura 5.34.)

En seguida se hace una descripción de la metodología de la ejecución de los trabajos realizados para la conformación de la pantalla profunda de impermeabilización debajo de las ataguías del P. H. La Yesca así como de las inyecciones por medio de los tubos manguitos.

5.2.1. Saturación previa del terreno

La saturación se realizó a través de los barrenos por donde se inyectaron las mezclas de cemento. Se hicieron en tramos de 20 m, inyectando agua a presión con una presión de 0.98 MPa (10.0 kg/cm²) durante 30 minutos, o en dado caso con un volumen máximo de 200 litros por metro de barreno. La saturación se inicio de manera ascendente. Para los tramos en donde se alcanzó la presión máxima se siguió el criterio de gasto constante, el cual consiste en aplicar la presión de 0.98 MPa (10.0 kg/cm²) y medir el gasto cada 3 minutos, cuando el gasto se estabilizó, se continuó la inyección de agua por espacio de otros 5 minutos más, hasta que se llegue a los 30 minutos y en este punto se da por saturado el tramo.

Esta saturación se realizó previo al proceso de inyección para el tratamiento de discontinuidades geológicas, sin embargo en la pantalla de impermeabilización inmediatamente cuando el tramo se saturó, se procedió con la inyección de la mezcla.

5.2.2. Inyecciones de consolidación e impermeabilización

Las inyecciones de consolidación e impermeabilización que se llevaron a cabo para formar la estanqueidad necesaria en el muro flexible y la pantalla profunda del P. H. La Yesca, con el objetivo de que en un futuro las estructuras no sufran daños, consistió en

introducir dentro del macizo rocoso, de manera controlada, tanto a presión como en volumen, mezclas fabricadas con cemento, agua y aditivos, con la finalidad de reducir la permeabilidad del terreno mejorando así sus propiedades mecánicas. (Para más detalles véanse puntos 4.2.1.1 y 4.2.1.2.)

El diseño de estos tratamientos, contempló en forma general la ejecución de 4 etapas de inyección, iniciando como se describe a continuación:

- ❖ Etapa I, tuvo una separación de barrenos a cada 12 metros.
- ❖ Etapa II, tuvo una separación de barrenos a cada 6 metros.
- ❖ Etapa III, tuvo una separación de barrenos a cada 3 metros.
- ❖ Etapa IV o adicional, tuvo una separación de barrenos a cada 1.5 metros.

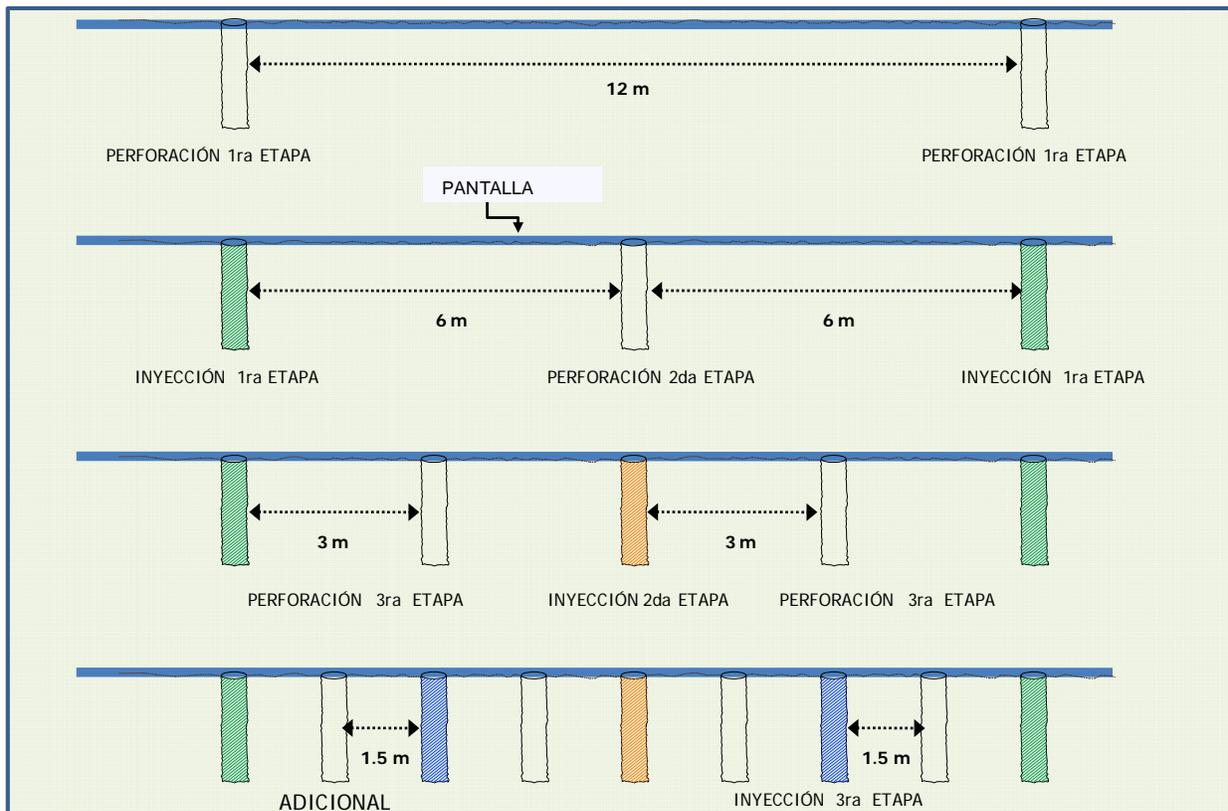


Figura 5.31.- Etapas de inyección del P. H. La Yesca.

Este arreglo se ejecutó con ayuda del equipo de topografía y se tuvo un especial cuidado en él, para formar un adecuado cuerpo de la pantalla impermeable, evitando de esta manera tener perforaciones en los barrenos en las obras vecinas.

Las inyecciones se llevaron a cabo sobre la línea central de pantalla de impermeabilización, esta tuvo una profundidad del orden de 50 metros de longitud y otros llamados de exploración, que alcanzaron longitudes de hasta 80 metros (profundidad definida por necesidades geológicas).

5.2.3. Inyección de barrenos comunicados

Durante el proceso de inyección se presentaron barrenos comunicados con uno o varios barrenos, por esta razón se equipó, con obturados y manómetros, él o los barrenos comunicados y se continuó con la inyección por el barreno de origen hasta llegar a la presión máxima. Durante el período que dura la comunicación entre los barrenos, se llevó el control del comportamiento de cada uno de los barrenos comunicados y se verificó que cuando el barreno de origen alcanzó la presión máxima, los barrenos comunicados también la hayan alcanzado.

En algunos casos no sucedió lo anterior por lo tanto se inyectó cada uno de los barrenos hasta alcanzar la presión máxima y solo así se dio por sellado y terminado la inyección del barreno comunicado.

Un barreno comunicado que no llegó a la presión máxima, se consideró como no inyectado por lo que se sustituyó por los mismos datos de proyecto, cambiando únicamente el punto de aplicación con un radio no mayor de 50 cm del barreno original.

5.2.4. Inyecciones de Contacto

Estas inyecciones tuvieron como objetivo garantizar el correcto contacto entre la pantalla flexible y la roca basal. Se realizan por lo menos en un metro (1,0 m), la inyección de contacto se realizó colocando el obturado en el tubo guía a 20 cm aproximadamente por arriba del contacto con la roca, se inyectó el volumen máximo que se alcanzó a inyectar de la mezcla especificada a una presión efectiva de 0.29 Mpa (3.0 kg/cm^2).

Este trabajo se puede realizar posteriormente o en forma simultánea al tratamiento de consolidación y/o pantalla, después de terminar con la inyección del último tramo superior.

5.2.5. Lavado del barreno

Este procedimiento se ejecutó cuando por alguna causa se interrumpió la inyección de una perforación. Consiste en la limpieza del barreno de un tramo que previamente fue inyectado. La limpieza se debe ejecutar previamente al fraguado de la mezcla de cemento, utilizando un chiflón que lance agua a una presión suficiente para disolver o remover la mezcla y extraerla disuelta a la superficie.

5.2.6. Características de las mezclas para inyecciones de impermeabilización y consolidación

Las mezclas que se empleen para todos los tratamiento de inyección deben cumplir con las características que se presentan a continuación.

- ❖ Viscosidad al cono Marsh entre 29 y 33 segundos, constante durante una hora.
- ❖ Densidad o peso volumétrico entre 1.47 y 1.55 g/cm³.
- ❖ Decantación (sedimentación) menor o igual a 4% en dos horas.
- ❖ Cohesión (con placa) menor o igual a 0.33 g/cm³ ó 0.2 milímetros.
- ❖ Coeficiente de filtrado menor o igual a 0.6.
- ❖ Costra Cake obtenida de la prueba de filtrado menor o igual a 15 milímetros.
- ❖ Resistencia a la compresión simple a la edad de 28 días mayor o igual a 9.8 MPa (100 kg/cm²).

Por otra parte durante la producción de la mezcla anteriormente descrita, se tomaron muestras aleatorias por cada 5 barrenos inyectados, para la ejecución de las pruebas de: Viscosidad, Densidad, Decantación, Cohesión de placa, Coeficiente de exprimido y Resistencia a la compresión simple tal y como se describen en el punto 3.3.3 del presente documento; con el fin de que cada una de esas producciones de mezcla cumplan con los parámetros mencionados anteriormente de control de calidad, tal como se realizó con las muestras de mezclas de la pantalla flexocompresible descrita en el punto 5.3.3 y 5.3.4. del presente documento.

Al término de los trabajos de inyección de la pantalla de impermeabilización se verificaron los tramos para su próxima liberación, tomando en cuenta los consumos de mezclas obtenidos en las diferentes etapas. Se tomaron para revisión y liberación tramos que abarcaran por lo menos 4 barrenos de la primera etapa, con sus respectivas etapas intermedias y adicionales si fuera el caso. En algunos casos se requirió la verificación por medio de pruebas de permeabilidad. Así mismo, dentro del trabajo realizado en campo, se llevó un control a base de formatos para el control del volumen de inyectado, presión durante la inyección, consumo de mezcla y poder realizar la interpretación, conciliación y previa aceptación por parte de la supervisión de la CFE y ratificar de esta manera la adecuada ejecución de los trabajos de impermeabilización.

6. Conclusiones

Los trabajos realizados durante la construcción de la pantalla impermeable del P. H. La Yesca, se ejecutaron con un cierre progresivo, una adecuada seguridad en el proceso, y conforme a los índices de calidad pactados en el proyecto; del mismo modo, gracias al uso de la mezcla única, la presión, volumen máximo y GIN constante como lo indica el método GIN, el cual ha sido ampliamente útil en el diseño y control de inyectado, permitieron lograr una distribución óptima del volumen total de inyectado y tomar en cuenta las irregularidades de las condiciones geológicas realmente encontradas en el sitio de construcción de las pantallas impermeables del P. H. La Yesca, con este método adoptado y con la calidad de los trabajos, se logró maximizar la relación beneficio-costo de la pantalla impermeable y de la inyección de la pantalla profunda debajo de las ataguías.

De la misma manera y sin dejar de lado la seguridad y calidad de los trabajos realizados durante su construcción, así como los retos encontrados y mencionados anteriormente, se logró ejecutar de manera exitosa la inyección a base de inyección de tubos manguitos, contrarrestando la problemática que se presentó en la ejecución de los trabajos de excavación del muro pantalla de la ataguía aguas abajo, gracias a estas soluciones y trabajos ejecutados en tiempo y forma, así como de las pruebas de permeabilidad realizadas para la satisfacción del cliente, se obtuvo la certeza de la adecuada ejecución de la impermeabilización de los muros pantalla, la cual permitió llevar a cabo la conformación del cuerpo de la presa y la ejecución de los trabajos sucesivos en el tiempo previsto, alcanzando así el objeto del contrato realizado entre la Comisión Federal de Electricidad y la Constructora de Proyectos Hidroeléctricos.

Por otra parte, gracias a la construcción de este proyecto se logran encender 7.5 millones de focos de 100 Watts, lo que abastecería a todo el estado de Nayarit o satisfacer la demanda en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), con lo que se obtiene un ahorro anual de 2 millones de barriles de petróleo, lo que equivale aproximadamente a 178 millones de dólares.

Además, este tipo de proyectos son detonadores de progreso y desarrollo económico en los lugares de afectación, se consigue el aprovechamiento de los recursos hidráulicos del país y un manejo integrado de la cuencas hidrológicas, promoviendo así el uso de los recurso renovables que no contaminan, lo que hoy en día con la política mundial actual y el abatimiento del calentamiento climático, cobra relevancia como la generación de energía eléctrica más fuerte en México.

Sin embargo, considero necesario que se debe de dar más importancia al uso de energías renovables en el país, ya que debido a las condiciones actuales hacen que la generación de energía en México retome un enfoque sustentable y se deban de equilibrar y diversificar para no solo tener la dependencia de los combustibles fósiles, por lo que los organismos gubernamentales que se ocupan de los aprovechamientos de fuentes renovables deben de estar conscientes de la importancia del medio ambiente.

Por lo tanto, es necesario concientizar al ámbito político mexicano que se tenga un panorama claro de los beneficios del potencial hidroeléctrico que posee nuestro país y se autoricen las inversiones necesarias para llevar a cabo los proyectos a corto plazo que se tienen en la cartera, para así fomentar la utilización de los recursos económicos, con el objetivo de que los proyectos de energías renovables sean un detonante en el desarrollo sustentable y con ello cubrir la demanda de energía eléctrica y sobre todo generar un progreso en México de una manera sustentable.

Nota aclaratoria

Debido a un error involuntario en la captura del título de este documento se emite la siguiente nota aclaratoria:

En el título dice: “**Pantala**” y debe de decir: “**Pantalla**”.

7. Referencias

- [1] Presas de Tierra y Enrocamiento. Raúl J. Marsal y Daniel Resendiz Nuñez- Editoriales Limusa. México, 1975.
- [2] Geotecnia en Ingeniería de Presas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Raúl Flores Berrones, Vangel Hristov Vassilev, Xiangyue Li Liu. México 2001.
- [3] Manual de construcción geotécnica - Tomo II. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C. México 2002.
- [4] Comisión Federal de Electricidad (CFE). www.cfe.gob.mx
- [5] CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). www.conagua.com.mx
- [6] Oferta Técnica OT-12. Descripción de los procedimientos constructivos y de montaje para las obras electromecánicas, civiles y asociadas. Bases de Licitación, Proyecto Hidroeléctrico La Yesca.
- [7] Muros Pantalla - Técnicas de realización - Métodos de cálculo. Editores Técnicos y Sociales S. A. Maignón, 26 - Barcelona, España, 1971.
- [8] Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional de Buenos Aires. Cátedra de Cimentaciones. Inyección en suelos. Eliana C. Carluccio. Enero 2005.
- [9] Presas de enrocado con cara de concreto - Uso de los criterios GIN para consolidación e impermeabilización de la roca, octubre 2001. G. Lombardi.
- [10] Pantallas de impermeabilización en cimiento de presas para cierre de estratos permeables. Eduardo Quiles Aparisi. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Revista de Obras Publicas. Mayo 1987. Pág. 317 a 324.
- [11] Especificaciones de Construcción de Obra Civil del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca. Capítulo 6. Tratamientos Especiales.
- [12] Estudio de ingeniería "Diseño y Control de inyectado empleando el Método GIN. Water Power & Dams Construction, Junio 1993. G. Lombardi y D. Deere.
- [13] Tecnología y Ciencias del Agua, vol. III abril-junio 2012. Instituto Mexicano del Agua. Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro.