



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS GEOTÉCNICO DEL MACIZO ROCOSO DE LA MARGEN  
DERECHA DE LA C.H. LA YESCA PARA EL DESPLANTE DEL PLINTO**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN GEOTECNIA**

PRESENTA:

**ING. LISA MARÍA GARCÍA CABRERA**

DIRECTOR DE TESINA: **M.I. REGINALDO JOSÉ HERNÁNDEZ ROMERO**

MÉXICO, D.F.

SEPTIEMBRE 2019

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1 Antecedentes.</b> .....	<b>3</b>
1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA PRESA ECC.....	5
1.1.1 Zonificación de una presa ECC según ICOLD .....	6
1.2 FUNCIONES DEL PLINTO .....	8
<b>CAPÍTULO 2 Descripción del proyecto.....</b>	<b>11</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DEL PROYECTO. ....	12
2.1.1 Ubicación de la Central Hidroeléctrica La Yesca .....	13
2.1.2 Geología del lugar .....	14
2.1.3 Rocas ígneas extrusivas .....	15
2.1.4 Rocas ígneas intrusivas.....	16
2.1.5 Geología estructural de la zona de la boquilla.....	19
2.2 CONDICIONES GEOLÓGICAS EN LA ZONA DE LA CORTINA .....	22
2.2.1 Espesores de roca de mala calidad en el margen derecha .....	25
2.3 CONDICIONES GEOTÉCNICAS .....	27
2.3.1 Condiciones geológicas detectadas .....	27
2.3.2 Afloramientos en la Margen derecha del plinto .....	30
2.3.3 Barreno BYSKD-34 .....	37
2.3.4 Permeabilidad del macizo en el eje del plinto .....	43
2.3.5 Parámetros del macizo rocoso.....	43
<b>CAPÍTULO 3 Diseño geotécnico del plinto. ....</b>	<b>46</b>
3.1 REQUISITOS GEOMÉTRICOS .....	47
3.1.1 Ancho del plinto .....	47
3.1.2 Definición del eje del plinto .....	48
3.1.3 Disposición geométrica del plinto.....	49
3.2 DISEÑO GEOTÉCNICO DEL PLINTO DE LA C.H. LA YESCA.....	49
3.2.1 Traza del eje del plinto .....	50
3.2.2 Nivel de desplante y diseño de excavación.....	52
3.2.2 Diseño del ancho del plinto.....	55
3.3 TRATAMIENTO DEL TERRENO .....	57
3.3.1 Tratamiento superficial .....	57
3.3.2 Tratamientos especiales.....	58

3.3.3 Pantalla de Margen Derecha (MD).....	64
<b>CAPÍTULO 4 Filtraciones en el punto de inflexión P-12 del plinto.....</b>	<b>65</b>
4.1 ANALISIS PRELIMINAR .....	65
4.1.1 Galerías de la margen derecha.....	67
4.1.2 Filtraciones en los ramales de las galerías de margen derecha .....	67
4.1.3 Cortina .....	71
4.1.4 Cara de concreto .....	72
4.1.5 Zona de filtración .....	73
4.2 REFUERZO DE PANTALLA (1ER. ETAPA).....	74
4.2.1 Tratamientos de inyección GD-2.....	74
4.2.2 Inyección de barrenos ascendentes y descendentes GD-2.....	74
4.2.3 Inspecciones salinas .....	77
4.2.4 Colocación de concreto dental y Plataforma +580 .....	77
4.2.5 Inspecciones subacuáticas y boquillas .....	79
4.2.6 Rodamina 6G.....	81
4.2.7 Trabajos de limpieza subacuáticos.....	82
4.2.8 Terminación de vertido de materiales .....	83
4.3 SEGUNDA ETAPA DE TRATAMIENTO.....	83
4.3.1 Berma +525 .....	84
4.3.2 Reinspección subacuática .....	89
4.3.3 Reparación de la losa del plinto .....	89
4.3.4 Instrumentación .....	90
4.4 FILTRO INVERTIDO.....	91
4.4.1 Inspección subacuática en la zona del agrietamiento del punto P-12 del plinto .....	95
4.4.2 Inspección subacuática sobre puntos de vertido de materiales previos.....	96
<b>CAPÍTULO 5 Conclusiones y recomendaciones. ....</b>	<b>99</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	99
5.2 RECOMENDACIONES .....	101
<b>Referencias .....</b>	<b>102</b>

# INTRODUCCIÓN

---

El presente trabajo nace de la importancia de dar a conocer otra área donde el Ingeniero Civil enfocado a la Geotecnia pueda desenvolverse y aplicar los conocimientos adquiridos.

La Central Hidrológica La Yesca es una obra de gran magnitud para la ingeniería; en obras de gran importancia como ésta los imprevistos se presentan durante las diferentes etapas del proyecto; por lo que es importante dar una pronta solución a cualquier tipo de problema que se presente.

De abril de 2012 a julio de 2013, durante el proceso de llenado del embalse del C.H. La Yesca se observaron filtraciones, las cuales fueron en aumento gradual hasta septiembre de este mismo año, durante ese mes las filtraciones fueron diarias hasta llegar a 540 litros/segundo.

Tomando en consideración las evidencias de filtración en el sistema de drenaje de las galerías y de acuerdo a los resultados de otras investigaciones realizadas en el sitio, se identificó un sector de la margen derecha del proyecto donde sería necesario reforzar los tratamientos de impermeabilización de la roca, así como aplicar otras medidas de remediación.

En este trabajo se aborda el proceso mediante el cual se localizó el origen de las filtraciones en el desplante del plinto de la margen derecha, así como las medidas que fueron necesarias para poder dar solución a las filtraciones.

## OBJETIVOS

---

- Realizar el análisis de la información para determinar las condiciones geotécnicas del macizo rocoso de margen derecha de la C.H. La Yesca.
- Analizar la problemática de filtraciones presentadas en el desplante del plinto en el punto P-12 de la margen derecha de la C.H. La Yesca y las medidas implementadas para su solución.
- Emitir las conclusiones y recomendaciones del análisis del caso de estudio.

## CAPÍTULO 1

---

### ***Antecedentes.***

Las primeras presas de enrocamiento con cara de concreto (PECC), fueron construidas a principios del siglo pasado por las empresas mineras de California para almacenar agua, aprovechando su experiencia en voladuras y la disponibilidad de roca sana. Estas primeras presas se construyeron colocando el enrocamiento a volteo en alzadas de hasta 25 m. Como elemento impermeable utilizaron tablonces de madera apoyados directamente sobre una "piel" de roca colocada prácticamente a mano. Posteriormente la madera se sustituyó por una cara de concreto. El diseño, por supuesto, fue completamente empírico.

Este procedimiento se siguió utilizando hasta los años cincuenta en presas de hasta 70-80 m de altura, las cuales se comportaron satisfactoriamente. Sin embargo, a medida que las presas se fueron haciendo más altas se presentaron problemas de altas filtraciones, lo que motivó que las presas de tipo ECC fueran perdiendo popularidad, aunque la seguridad nunca estuvo comprometida, era un hecho que la deformabilidad del enrocamiento colocado a volteo no era compatible con la rigidez de la cara de concreto.

Ante este problema y puesto que la necesidad de presas era cada vez más alta seguía presente, se comenzaron a construir presas de enrocamiento con núcleo impermeable, las cuales, con el desarrollo de la mecánica de suelos, fueron cada vez más altas y seguras. Durante los años 40's-60's sólo se construyeron algunas presas de ECC de más de 80 m de altura y en general presentaron problemas de altas filtraciones. La última presa de más de 100 m construida con enrocamiento colocado a volteo fue New Exchequer, en California, con 150 m de altura, la cual presentó filtraciones de hasta 4 m<sup>3</sup>/s.

A partir de los años 60's, con el advenimiento de los compactadores de rodillos vibratorios se hizo evidente que la compactación mejoraba notablemente las características de deformabilidad y resistencia de los enrocamientos, permitiendo, además, utilizar rocas menos competentes en el cuerpo de la presa. Esto permitió retomar las presas de ECC como una opción viable para alturas mayores que 80 m.

Durante este nuevo periodo (comenzado con la presa Cethana en Australia, en 1971, de 110 m de altura), se introdujeron cambios en el diseño del plinto, las juntas impermeables, y se comenzó a colocar como soporte de la losa de concreto un enrocamiento de pequeño tamaño con un cierto porcentaje de finos, proporcionando una superficie lisa y una zona semipermeable que reducía de manera importante las filtraciones aun cuando se presentaran agrietamientos en la cara de concreto.

Conforme se fue adquiriendo experiencia se comenzaron a construir presas de ECC cada vez de mayor altura, como Alto Anchicaya (1974, 140 m), Foz Do Areia (1981, 160 m), Aguamilpa (1994, 190 m) y Tiangshenqiao (1997, 180 m), siguiendo un diseño empírico y basado en el comportamiento de los proyectos precedentes.

Parecía que los criterios para el diseño y construcción de presas de mayor altura ya estaban definidos, sin embargo, la falla de dos presas de ms de 180 m de altura en Brasil (Campos Novos y Barra Grande, 2005), sembraron dudas sobre el límite de altura de este tipo de presas, afortunadamente, el excelente comportamiento de la presa El Cajón, terminada en el 2006, permitieron afirmar que era posible diseñar este tipo de presas de manera confiable, combinando la experiencia con estudios de campo y laboratorio detallados y análisis numéricos que permitan predecir el comportamiento esfuerzo deformación de la estructura.

El diseño de las presas de enrocamiento con cara de concreto (PECC) ha sido generalmente empírico, basado únicamente en experiencias pasadas, sin realizar estudios de campo o pruebas de laboratorio detalladas para determinar las características de esfuerzo-deformación de los materiales a utilizar, del mismo modo no se realizaron análisis numéricos que puedan ayudar a predecir el posible comportamiento de la estructura.

Esta práctica funcionó medianamente bien durante muchos años, pero era común que algunas presas presentarían asentamientos excesivos, daños en la cara de concreto y filtraciones considerables que generalmente eran aceptados y reparados.

Afortunadamente, el excelente comportamiento de las presas Aguamilpa, El Cajón, y La Yesca, han permitido confirmar que es posible diseñar este tipo de presas de manera confiable, siempre que se realicen estudios de campo (estudios de los bancos de materiales, pedraplenes de prueba) y laboratorio (odómetros gigantes) en los materiales que se utilizaran en las diversas zonas de las pruebas, y se realicen análisis numéricos esfuerzo-deformación que permitan predecir su comportamiento durante la construcción.

### **1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA PRESA ECC**

Los elementos principales de una presa de enrocamiento con cara de concreto son: el plinto, el terraplén, la cara de concreto y el parapeto.

El terraplén es básicamente el cuerpo de la presa, el material de enrocamiento puede ser de cualquier tipo siempre y cuando esté constituido de partículas duras, preferentemente con una granulometría bien graduada.

La cara de concreto está integrada por la losa y el sistema de sellos en las juntas. Es práctica que el ancho de los tableros que constituye la losa se defina por las cimbras deslizantes empleadas para su colocado de 12 a 18 metros.

El parapeto es un elemento cuya función es reducir el volumen del terraplén de la presa, normalmente su altura no es mayor de 5 metros y en zonas de alta sismicidad su altura es menor.

El plinto es la estructura de concreto reforzado que se encuentra apoyado sobre la roca base de la presa en todo su perímetro por medio de barras de anclaje, sobre estas se apoyan las losas de cara de concreto de la cortina que en forma conjunta actúan como un elemento impermeable.



### 1.1.1 Zonificación de una presa ECC según ICOLD

Para presas de enrocamiento con cara de concreto es común usar, de acuerdo a la nomenclatura internacional, la zonificación y recomendaciones de construcción de acuerdo al International Committee of Large Dams (ICOLD, 2010) como se muestra en la figura 1 y figura 2.

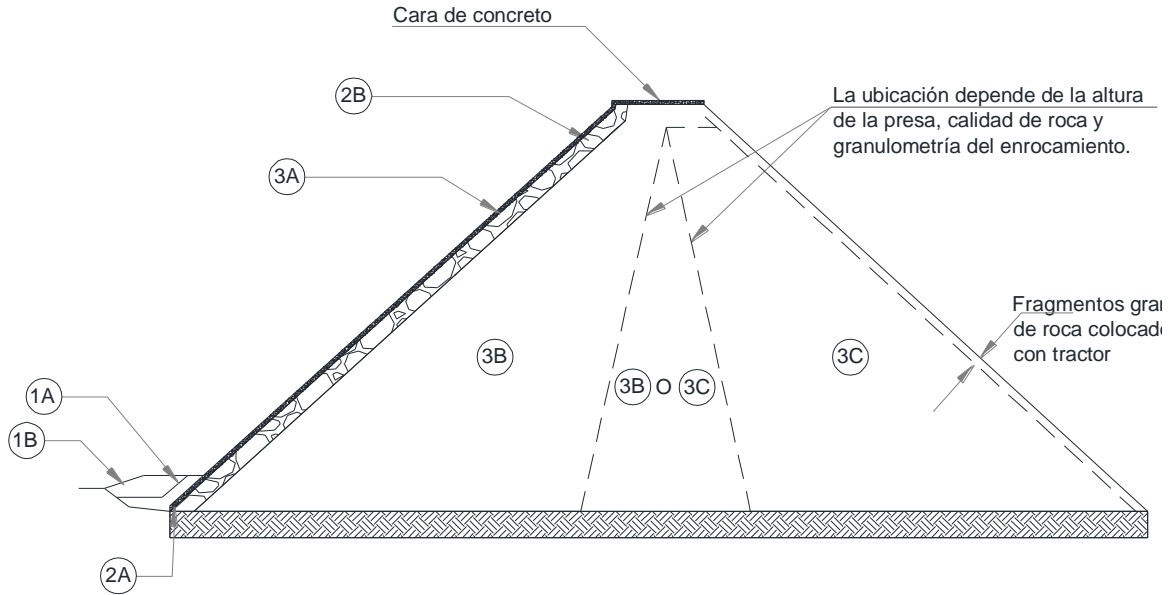
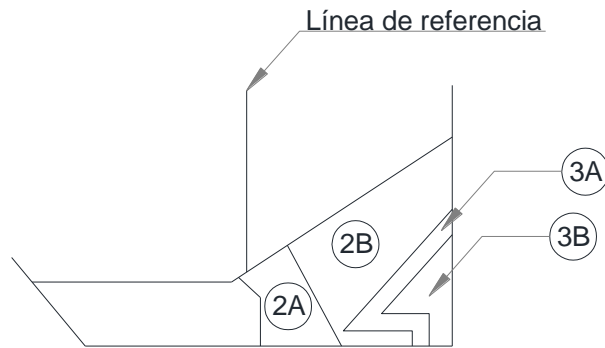


Figura 1. Zonificación y nomenclatura propuesta por ICOLD, 2010.



Zona	Material	Granulometría	Capa (m)
2A	Filtro	<36 mm	0.4
2B	Roca triturada	<75 mm	0.4
3A	Enrocamiento	<0.4 m	0.4
3B	Enrocamiento	<1 m	1
3C	Enrocamiento	< 2 m	2

Figura 2. Detalle de zonificación de materiales en junta perimetral Plinto-losa.

## Zona 1

Se compone de las zonas 1A y 1B, los cuales se colocan en el tercio o mitad inferior de la cara de concreto.

La zona 1A consiste en un limo no plástico o arena fina limosa no plástica compactada ligeramente, se coloca en la zona de tensiones en dirección del talud, con el propósito de tener un material que pueda migrar fácilmente y sellar las grietas que pudieran producirse en la cara de concreto, se coloca en capas de 20 a 40 cm de espesor y se compacta ligeramente con un rodillo ligero o con las orugas del tractor.

La zona 1B generalmente se trata de una regaza mixta compuesta de gravas-arenas fragmentos de roca, limo, etc. y se usa para dar estabilidad y proteger a la zona 1A contra erosión por efecto de la lluvia y el oleaje durante el llenado del embalse. Se coloca en capas con espesor similar al 1A y se compacta con 4 pasadas de rodillo liso vibratorio.

## Zona 2

Los materiales de esta zona proporcionan apoyo uniforme y firme a la losa de concreto y funcionan, al mismo tiempo, como una barrera semi-impermeable contra la posible filtración de agua y se compone de las zonas 2A y 2B.

La zona 2A debe ir colocada debajo de la junta perimetral losa-plinto, como se muestra en la figura 2. Sirve como una zona con un módulo alto para limitar la deformación de la losa en el perímetro y una permeabilidad relativamente baja para reducir filtraciones. Esta zona actúa también como filtro para retener limos en caso de que las juntas perimetrales se abran y los sellos fallen. El tamaño máximo de partícula se ubica entre 19 y 37 mm, y corresponde a grava arena con limo bien graduada, GW-GM. Se coloca en capas de 0.3 m de espesor.

La zona 2B está formada por arena poco limosa, producto del procesamiento de aluvión o de trituración de roca, y en caso necesario, mezclado con limo o arena limosa, para obtener la granulometría especificada. Debe ser bien graduada con limo GW-GM y colocada en capas con espesores de 0.3 a 0.4 m como mínimo.

### Zona 3

Es la zona principal de la cortina y consiste en enrocamiento y aluvión. Generalmente se divide en cuatro subzonas: 3A, 3B, 3C y 4, aunque dependiendo de los materiales disponibles del sitio, pueden ser eliminadas algunas de ellas.

La zona 3A es la transición entre la zona 2 y el cuerpo principal de enrocamiento. Está constituida por aluvión o roca de cantera procesada de tamaño pequeño o gravas que permiten el libre drenaje del enrocamiento y funcionan como filtro del material 2B. Se coloca en capas de espesor similar al del material 2B (0.3 – 0.4 m). Esta zona se debe compactar de manera similar al material 3B para alcanzar altos módulos de rigidez y contribuir de manera eficiente al soporte de la cara de concreto, limitando su deformación.

La zona 3B consiste comúnmente en enrocamiento con tamaño máximo de 1 m, colocado en capas de 1 m de espesor y generalmente compactado con 4 pasadas de un rodillo liso vibratorio de 10 t de masa en el tambor.

La zona 3C está conformada por enrocamiento con tamaño máximo de 2 m colocado en capas de 2 m de espesor y compactado con 4 pasadas de un rodillo liso vibratorio de 10 t de masa en el tambor. Esta zona prácticamente solo toma la carga debido a su peso propio, sin embargo, puede influir en la deformación de la cara de concreto si su asentamiento ante carga sostenida es excesivo, por lo que es recomendable que su deformabilidad no sea extremadamente diferente a la del material 3B para evitar agrietamientos en la cara de concreto.

La zona 4 consiste de fragmentos de roca de gran tamaño (mayor a 1 m), colocados con grúa o retroexcavadora. Su función principal es de proteger de la erosión contra lluvias o viento al material 3C.

## 1.2 FUNCIONES DEL PLINTO

El plinto es la zapata de desplante que liga a la losa de concreto con la roca de cimentación, es una losa sobre la roca de un ancho de 5 a 8 m y un espesor de 40 a 80 cm, a través de la cual se realizan las inyecciones de consolidación e impermeabilización de la roca.

El plinto se construye perimetralmente, después se coloca el material del cuerpo principal de cortina y finalmente se cuela la losa, el contacto entre ésta y el plinto se

denomina junta perimetral y es de especial cuidado para evitar cualquier tipo de filtración de agua una vez que la presa esté llena.

Es importante desplantar el plinto sobre roca sana para garantizar su continuidad con la losa de concreto, en el caso de encontrar irregularidades importantes que puedan afectar la estabilidad de la presa deberán ser tratadas con concreto dental. Se debe garantizar una correcta limpieza de las laderas antes de la construcción del plinto. Sin embargo, existen casos, como son las presas de Santa Juana y Puclaro en Chile, en dónde se ha adoptado un diseño exitoso basado en desplantar el plinto sobre aluvión en el fondo del cauce, lo cual resulta sumamente exitoso en casos en que el espesor del aluvión es tal que la excavación para encontrar roca sana resulta económica o técnicamente inviable.

La geometría y el trazo del plinto están definidos por las condiciones topográficas y geológicas del sitio del proyecto.

Debido a las condiciones topográficas de cada lugar, la construcción del plinto presentará diversas problemáticas que tendrán que ser resueltas. Lo más común y recomendable es que la cimentación del plinto se encuentre desplantada en roca sana no erosionable. En este caso se tiene la facilidad que al excavar la base para el plinto se pueden colocar directamente las anclas, lo que permite que la estructura sea monolítica con la cimentación, pudiendo ver casos como Aguamilpa, México y Santa Juana, Chile. Otro método sería colocar sobre la superficie limpia concreto dental, lo que facilitaría el acceso para la colocación del acero de refuerzo y la colocación de las anclas. Este método fue aplicado en Brasil, en especial en la presa de Xingó.

Desde hace ya varios años se ha podido desplantar el plinto sobre material de aluvión mediante la compactación de la grava protegido debidamente por filtros. La característica de este plinto es que es articulado y se encuentra conectado a un muro pantalla.

En el plinto se llevan a cabo las inyecciones de consolidación y de impermeabilización, las cuales varían en cantidad y longitud según las características propias del proyecto. Actualmente se llevan a cabo las inyecciones mediante el uso del método GIN (Grout Intensity Number) y con el uso de sistemas electrónicos, los cuales solamente hay que alimentar con la información de cada barreno y tramo a inyectar y el dispositivo controlará

automáticamente la presión y volumen necesario para sellar el tramo, con base a las especificaciones de cada proyecto.

## CAPÍTULO 2

### ***Descripción del proyecto.***

El sitio propuesto para la construcción de la P.H. La Yesca corresponde a un estrechamiento ligeramente asimétrico de topografía irregular, conformada por zonas con paredes de roca muy continuas de fuerte pendiente, que contrastan con superficies escalonadas de pendiente suave y uniforme, sobre todo hacia la margen izquierda. En la margen derecha, entre las elevaciones 400 y 580 msnm, abundan zonas escarpadas en la ladera; en esa margen el rasgo topográfico más importante es el parteaguas que limita la subcuenca del arroyo Carrizalillo a la cota 575m, definido también por el contacto geológico entre dos unidades de roca.



Figura 3. Vista general de la zona de la boquilla (CFE,2007).

## 2.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DEL PROYECTO.

La Central Hidroeléctrica La Yesca, forma parte del sistema hidrológico Santiago, que comprende a 27 proyectos con un potencial hidroenergético de 4 300 MW. La Yesca ocupa el tercer lugar en potencia y generación dentro del sistema.

Desde la década de los sesentas se estudiaron varios sitios para ubicar las obras, seleccionando finalmente el sitio actual en el cual se encuentra la construcción.

La C.H. La Yesca tiene 210 m de altura, (en su tipo la segunda más alta del mundo, superada por la cortina de la presa Shibuya en China) para regular los escurrimientos del Río Santiago y Bolaños mediante la formación de un vaso de almacenamiento que permite la generación hidroeléctrica; la superficie inundable asciende a 3492 ha, en su nivel máximo extraordinario. La Yesca ocupa el tercer lugar en potencia instalada y generación dentro del sistema hidrológico del Río Santiago y está conceptuada como planta de generación para horas pico de consumo de energía eléctrica, con una potencia total instalada de 750 MW con dos unidades generadoras para una generación total anual estimada de 1210 GWh.

El embalse ayuda a regular los escurrimientos de la cuenca del Santiago y beneficia a las centras hidroeléctricas Aguamilpa y El Cajón, actualmente en operación, ya que al recibir su vaso las aportaciones reguladas del río incrementarán su generación firme y se reducirán las posibilidades de derrama por el vertedor. Los sectores principales que comprende la presa son:

- Desvío (túneles y ataguías),
- Contención (cortina)
- Excedencias (vertedor),
- Generación (obra de toma, casa de máquinas, galería de oscilación, desfogue y subestación eléctrica).

Las obras principales están relacionadas entre sí en la operación.

La zona de inundación del embalse de la presa La Yesca abarca partes de los municipios de La Yesca, Nayarit y Hostotipaquillo, Magdalena, Tequila y San Pedro Anasco en el estado de Jalisco y las características de diseño se describen en la tabla 1.1:

<b>Tabla 2.1 Datos técnicos del embalse del C.H. La Yesca (CFE, 2007).</b>	
<b>CARACTERISTICA</b>	<b>DIMENSIONES</b>
Área al NAME	3 348,00 has
NAME	578,00 msnm
NAMO	575,00 msnm
Nivel de diseño	571,00 msnm
NAMINO	518,00 msnm
Nivel del umbral de la obra de toma	95,50 msnm
Nivel de desfogue	391,00 msnm
Capacidad al NAME	2 392,90 Mm3
Capacidad al NAMO	2 292,90 Mm3
Capacidad al NAMINO	900,90 Mm3
Capacidad para regular avenidas	100,00 Mm3
Capacidad útil	1 392,00 Mm3
Capacidad al umbral de toma	556,80 Mm3

Con el dato del NAME se estableció un área aproximada de 170,00 km<sup>2</sup> para realizar el mapeo geológico semiregional, verificación de geoformas y lineamientos estructurales y la identificación de zonas inestables en la zona de afectación del embalse, sobre los cauces de los ríos Grande de Santiago, Bolaños y Chico.

### **2.1.1 Ubicación de la Central Hidroeléctrica La Yesca**

La presa La Yesca se localiza en las coordenadas UTM 2 344 050 mN, 292 815 mE y a una elevación promedio de 390,0 msnm, se encuentra en la porción limítrofe entre las entidades federativas de Nayarit y Jalisco, aproximadamente a 3,5 Km aguas abajo de la confluencia de los ríos Bolaños y Santiago, sobre el cauce de éste último, a 105,00 Km al noroeste de la Ciudad de Guadalajara y a 22,00 Km al NNO de la población de Hostotipaquillo, cabecera municipal en esta zona del estado de Jalisco (Figura 3).



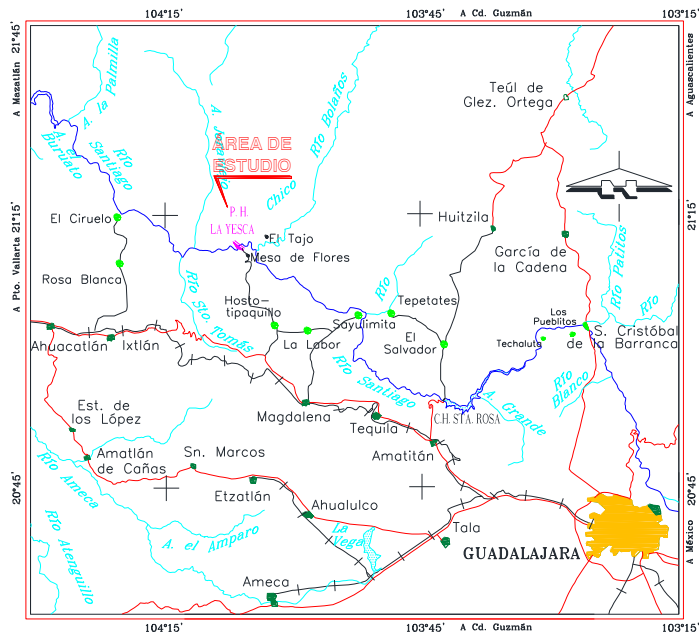


Figura 4. Localización de la presa La Yesca (CFE,2007).

### 2.1.2 Geología del lugar

Considerando diversos esquemas se realizó exploración geológica, geotécnica y geofísica del sitio de la boquilla de donde se obtuvo información de los macizos rocosos.

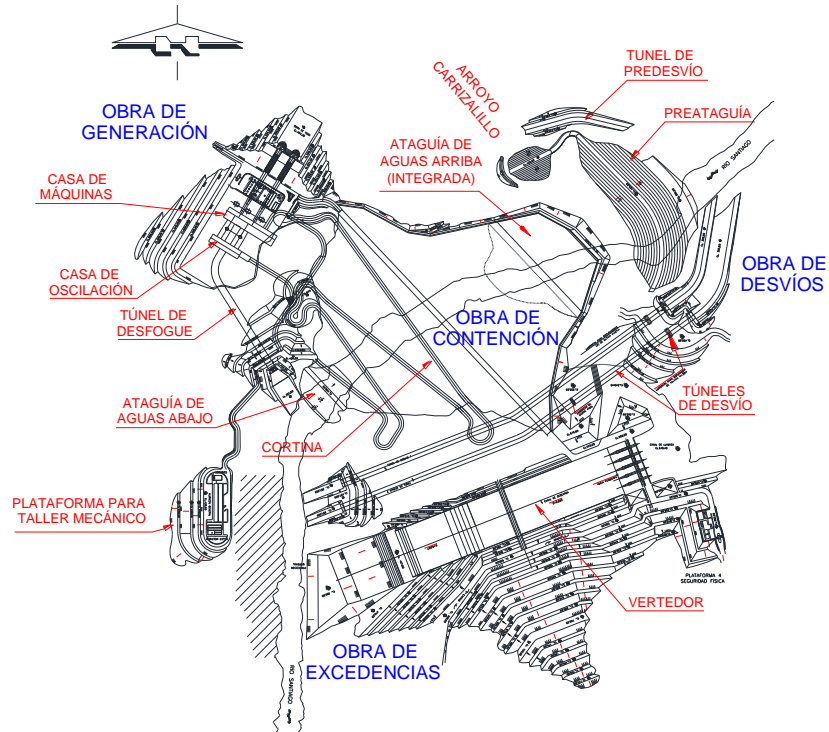


Figura 5. Esquema de obras de la presa La Yesca, que estarán alojadas en la zona de la boquilla (CFE, 2007).

El sitio en el que se encuentra la presa La Yesca, está conformado por un grupo de rocas volcánicas del Cenozoico (Figura 5), que incluye andesitas (Tomata), tobas líticas cristalinas riolíticas muy silicificadas (Tmtl), ignimbritas riodacíticas de textura fluidal (Tmird) e ignimbritas dacíticas porfídicas (Tmid), que conforman ambas márgenes, afectadas por cuerpos intrusivos que van desde pórfidos riolíticos (Tgr) y cuarzomonzoníticos (Tqm) a pórfidos andesíticos (Tda) y diques diabásicos (Qdd); toda esta variedad litológica se encuentra parcialmente cubierta por depósitos lacustres y pumicíticos (Qlp), terrazas aluviales (Qta), depósitos de talud (Qdt) y aluviones recientes (Qal).

A continuación, se describen las unidades litológicas de la más antigua a la más reciente en la margen derecha.

### **2.1.3 Rocas ígneas extrusivas**

#### **Toba lítica (Tmtl)**

Es una roca de origen volcánico, de color gris muy claro a verde claro, piroclástica pseudoestratificada, con textura ligeramente porfídica y brechoide, está constituida por una gran cantidad de líticos subangulosos a subredondeados, principalmente andesíticos, que varían entre 0,01 y 2,5 cm de diámetro y abundantes cristales de cuarzo, contenidos en una matriz afanítica muy silicificada.

Conforme se profundiza, presenta una variación textural gradual hasta manifestarse como una toba cristalina riolítica de estructura masiva, como unidad de roca acusa una intensa silicificación, que le confiere una fuerte compacidad y una alta competencia geomecánica, sus pseudoestratos tienen espesores que van de 0,15 a 0,40 m y en ocasiones hasta mayores a 1,00 m.

En la margen derecha, su mejor exposición se encuentra en la confluencia del arroyo El Carrizalillo con el Río Santiago y hasta un poco aguas arriba del eje de la cortina.

#### **Ignimbrita dacítica porfídica (Tmid)**

Está representada por una roca de color gris claro a gris oscuro cuando está inalterada y verdosa o rojiza por alteración, es de textura porfídica, con abundantes cristales bien

desarrollados de plagioclasa de 0,001 a 0,004 m de diámetro, contenidos en una matriz afanítica y silicificada, mostrando en algunos sitios sulfuros diseminados; hacia la porción basal, cerca del contacto con la unidad riodacítica infrayacente, en algunos sitios son apenas identificables líneas de fluidez y fiammes.

A esta unidad se le atribuye por correlación una edad miocénica, debido a la posición que guarda con respecto a las otras unidades, ya que sobreyace a la ignimbrita riodacítica fluidal (Tmird), en ocasiones se encuentra cubriendo en discordancia a la toba lítica (Tmtl), está intrusionada por diques riodacíticos, andesíticos y diabásicos (Tgr, Tda y Qdd) y se encuentra parcialmente cubierta por brechas volcánicas riolíticas (Tmbr), tobas vítreas desvitrificadas (Tmts), depósitos lacustres y pumicíticos (Qlp).

En margen derecha esta unidad se encuentra ampliamente distribuida, ya que se tiene expuesta desde el eje Juanepanta, donde está suprayaciendo al paquete de tobas líticas de la cima de la ignimbrita riodacítica fluidal, asimismo, constituye la base de lo que se ha denominado “Circo de Erosión”, que es una gran masa de roca extremadamente fracturada como producto de diferentes etapas de fallamientos gravitacionales diferenciales y, también conforma superficialmente el macizo rocoso donde se pretenden excavar las obras de generación. La unidad de ignimbrita dacítica porfídica es la de mayor distribución en el sitio del Proyecto, sin embargo no se conoce su espesor, aunque se estima que es de aproximadamente 200,00 m; por otra parte, el fallamiento y fracturamiento de esta unidad se atribuye a esfuerzos de distensión y a movimientos gravitacionales de acomodamiento de bloques de carácter local, siendo relevante que asociados con los principales patrones de fallas y fracturas se tiene una serie de diques riodacíticos, andesíticos y diabásicos que intrusionan a estas ignimbritas.

#### **2.1.4 Rocas ígneas intrusivas**

La secuencia volcánica Cenozoica ya descrita que aflora en el sitio de la boquilla está intrusionada en ambos márgenes por diques cuya composición varía desde ácida hasta ultrabásica, predominando en número los cuerpos diabásicos sobre los pórfidos andesíticos, cuarzomonzoníticos y riodacíticos, estos últimos con afloramientos muy importantes.

### Pórfidos riódacíticos (Tgr)

Son cuerpos de forma irregular que se presentan en ambas márgenes, afectando a las ignimbritas riódacíticas fluidales y a las ignimbritas dacíticas porfídicas, sobre todo en la zona de empotramiento del cuerpo de la cortina.

Superficialmente presentan un color rosáceo a gris claro y su dureza es muy alta por lo que son muy resistentes al intemperismo, muestran una textura porfídica con fenocristales de cuarzo contenidos en una matriz afanítica y muy silicificada, tienen espesores que varían desde 1,50 hasta 30,00 m, llegan a extenderse en superficie hasta 150,00 m de longitud y el contacto con la litología encajonante es de tipo roca a roca, aunque en algunas partes el contacto presenta arcilla y roca fracturada en forma de brecha.

### Pórfidos cuarzomonzoníticos (Tqm)

Son cuerpos intrusivos irregulares a nivel de afloramiento, sin embargo, en lo general adoptan formas tabulares, sus manifestaciones superficiales más importantes se localizan en la margen derecha, aguas arriba de la preatagüa, se encuentran intrusionando a tobas líticas (Tmtl), estrechamente relacionados con fallas y fracturas de orientación preferencial N20°W/60-75°NE, aunque también se asocian a los sistemas Pilares y Carrizalillo.

Se trata de rocas de color blanco a crema claro cuando están inalteradas y adquieren tonalidades amarillentas por intemperismo, son de textura porfídica, con cristales tabulares de feldspatos bien desarrollados de color blanco a ligeramente rosáceos de hasta 0,15 x 0,25 cm, contenidos en una matriz de color blanco, afanítica o microporfídica, presentan una silicificación intensa y caolinización débil a moderada.

En la vecindad de los contactos con la roca encajonante, en las porciones marginales, los cuerpos muestran un fracturamiento muy intenso, típico de brechamiento hidrotermal, por otra parte, se ha podido establecer que estos intrusivos están invariablemente vinculados con la diseminación y emplazamiento de sulfuros en esta zona.

## COLUMNA GEOLÓGICA DE LA ZONA DE LA BOQUILLA DE LA PRESA LA YESCA

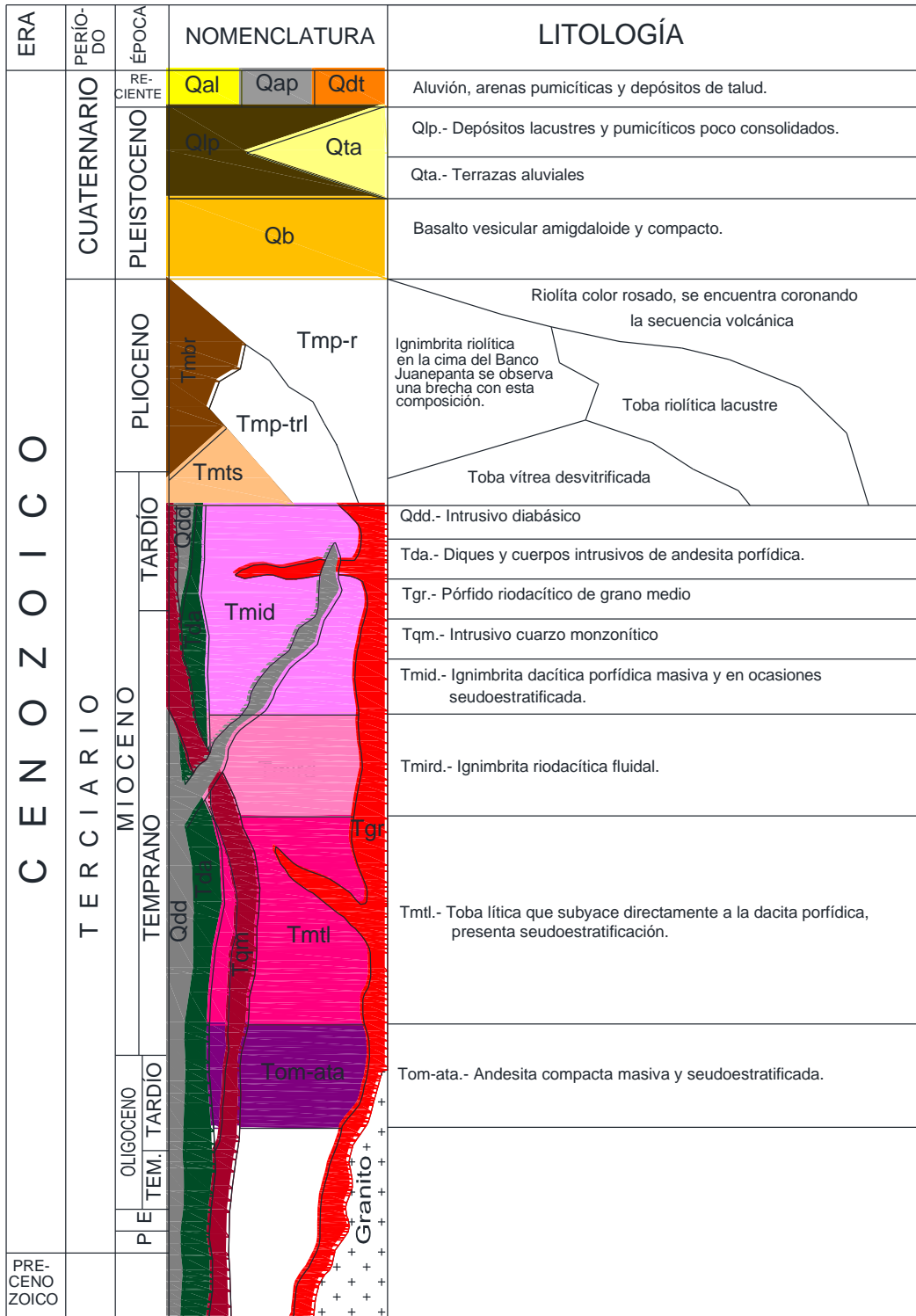


Figura 6. Columna estratigr3fica de la zona de la boquilla de la presa La Yesca (CFE,2007).

### 2.1.5 Geología estructural de la zona de la boquilla

#### Margen derecha

Topográficamente está constituida por zonas escarpadas y pendientes muy fuertes que alcanzan hasta 45° de inclinación, destacando una gran masa deslizada a través de fallas gravitacionales diferenciales, conocida como “Circo de Erosión”, cuyas dimensiones aproximadas son 400,00 x 250,00 m, evidenciada por una traza semi circular escarpada, que marca la porción alta de la zona media central y por la presencia de crestones de roca que por su alto grado de silicificación sobresalen topográficamente debido a la erosión diferencial.

Las principales discontinuidades geológicas identificadas en esta zona son fallas, fracturas y pseudoestratificación; por lo general las fallas son de tipo normal, con relleno de material cataclástico que varía de compacto a deleznable, acompañado de cantidades diversas de arcilla como relleno y en algunos casos presentan emplazamiento de diques diabásicos, andesíticos o riolíticos alterados, propilitizados y en algunas ocasiones con vetillas de calcita.

Mediante el análisis de 1 824 datos, se determinaron los principales sistemas estructurales que afectan al macizo rocoso en esta margen, como se muestra en el estereograma de la figura 6:

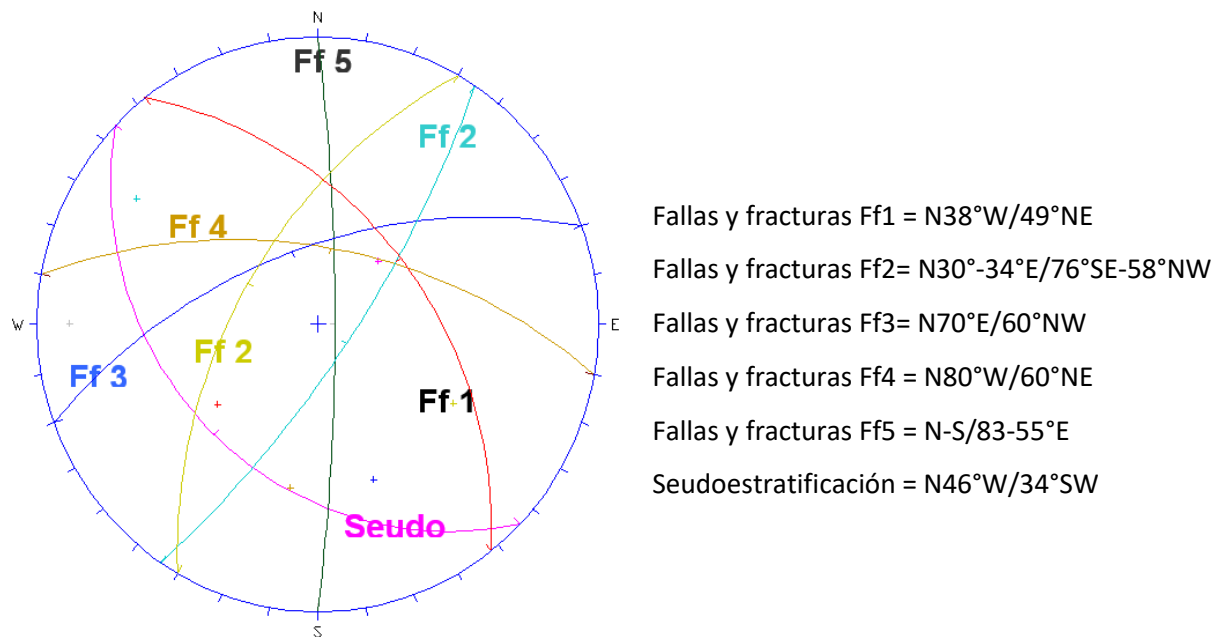


Figura 7. Principales sistemas estructurales de la margen derecha de la presa La Yesca (CFE,2007).

Cabe mencionar que la fallas Carrizalillo y Rodaderos pertenecen al sistema Ff1, cuyas discontinuidades, llegan a presentar orientaciones de hasta N60°W/35°NE. Las fallas Crucero-Pitayo y La Sabanilla ejemplifican el sistema Ff2 y se caracterizan por tratarse de fallas de tipo lístrico que llegan a exhibir echados de bajo ángulo de hasta 35°; por otra parte, las fallas Pilar, La Esperanza y Desfogue–Pilares están representadas en el sistema Ff3, que también se caracteriza por estructuras lístricas de bajo ángulo.

Las Estructuras correspondientes a las fallas geológicas F-11, F-180 y Colapso norte se agrupan en el sistema Ff4, mientras que las fallas El Casquete, El banco, El descanso, El Escalón, Murciélago y La Rodilla son representativas del sistema Ff5 y la pseudoestratificación exhibe una actitud general N46°W/34°SW, mostrando un claro basculamiento de la secuencia hacia el SW.

Destaca en el límite norte del circo de erosión, la zona denominada Colapso sur, como reflejo geomórfico orientado N45°W/65° SW, al que se asocian planos con estrías de deslizamiento de bloques de roca, estrechamente relacionados con un intenso fracturamiento. Las características del fracturamiento de la margen derecha se mencionan en la tabla 2.2, mientras que las fallas más importantes se resumen en la tabla 2.3 siguiente:

<b>Tabla 2.2 Características de pseudoestratificación y fracturamiento de la margen derecha (CFE,2007).</b>				
<b>Sistema</b>	<b>Continuidad (m)</b>	<b>Frecuencia (fracturas por metro lineal)</b>	<b>Ru = Rugosidad Ab = Abertura (cm)</b>	<b>Observaciones</b>
Seudo N46°W/34°SW	>60,0 m	1 a 5 y en ocasiones hasta 7	Ru = Planas-ond. y planas-rug Ab = Cda. a 0,05	Presente en las unidades Toba lítica (Tmtl), Riodacita fluidal (Tmird) y dacítica porfídica (Tmid).
Ff1 N38°W/49°NE	Fracturas 3,0 a 30,0 m Fallas 50,0 a >500,0 m	1 a 10	Ru = Planas-rug. y rug.-ond. Ab = Cda. a 0,05	Planos rellenos con calcita y arcilla.
Ff2 N30°E/58°NW o 76°SE	Fracturas 3,0 a 30,0 m Fallas 50,0 a 800,0 m	1 a 3 y en ocasiones hasta 7	Ru = Planas- ond. y ond.-rug. Ab = Cda. a 0,03.	Algunos planos rellenos con calcita y arcilla.
Ff3 N70°E/60°NW	Fracturas 3,0 a 20,0 m Fallas 50,0 a >500,0 m	1 a 3 y en ocasiones hasta 7	Ru = Ond.-lisas, planas-rug Ab = Cda. a 0,05	Rellenos principalmente de arcilla y en ocasiones con materiales arenosos
Ff4 N80°W/60°NE	Fracturas 2,0 a 10,0 m Fallas 20,0 a 600,0 m	1 a 4	Ru = Planas-rug. y rug.-ond. Ab = Cda. a 0,03	Rellenos principalmente de arcilla y en ocasiones con materiales arenosos
Ff5 N-S/83-55°E	Fracturas 3,0 a 15,0 m Fallas 50,0 a 400,0 m	1 a 6 y en ocasiones hasta 10	Ru = Planas-rug. y rug.-ond. Ab = Cda. a 0,1	Fracturamiento parcialmente abierto, pero en general predomina el relleno arcilloso acompañado de una considerable cantidad de material arenoso.

Tabla 2.3 Características de las fallas principales de la margen derecha (CFE,2007).

Falla	Actitud	Espesor (m)	Continuidad (m)	Relleno	Observaciones
<b>CARRIZALILLO</b>	N25-60°W/ 35-55°NE	0,60 – 0,70	200,0	Roca fracturada y arcilla	Zona de cizallamiento de hasta 60,0 m. Afecta Ataguía El Carrizalillo y su canal de desvío.
<b>RODADEROS</b>	N40-65°W/ 55-63°NE	0,15 a 0,60	70,0	Roca fracturada y arcilla	Plano de falla asociado a intenso fracturamiento. Probable incidencia en codos superiores de Tuberías a presión.
<b>CRUCERO-PIYAYO</b>	N30-40°E/ 63-37°SE	5,00 a 12,00	250,0	Brecha y arcilla	Afecta obra de toma, taludes de subestación, codos superiores de tuberías a presión, Lumbreras de buses y ventilación, tímpanos orientales de cavernas de casa de máquinas y galería de oscilación y desfogue. Zona de cizallamiento de 5,0 a 35,0 m de espesor.
<b>LA SABANILLA</b>	N22-26°E/ 60-62°SE	0,30 a 0,60	200,0	Brecha silicificada y arcilla	Afecta los taludes poniente de la plataforma de la subestación, codos superiores de tuberías a presión, Lumbreras de buses y ventilación y desfogue. Zona de cizallamiento de hasta 5,0 m.
<b>PILAR</b>	N58-70°E/ 56°SE	0,20 a 0,60	120,0	Brecha y arcilla	Incide en el pilar entre casa de máquinas y galería de oscilación, probable afectación sobre techo de los túneles de aspiración.
<b>LA ESPERANZA</b>	N77°E/57°NW	0,30 a 0,80	150,0	Brecha, arcilla y óxidos	Roca triturada con arcilla de hasta 0,20 m de espesor; zonas de cizalla al alto y al bajo, se estima que afecta en bóveda y tímpano poniente de casa de máquinas.
<b>DESFOGUE-PILARES</b>	N83-88°W/ 50-63°NE a N83°E/62°NW	0,30 a 2,80	300,0	Brecha, Roca fracturada y arcilla	Zona de roca brechada con abundante caolín entre planos de intenso fracturamiento. Afecta el Túnel de desfogue.
<b>F-11,</b>	N80°W/43°NE N75°E/60°NW	0,60 a 2,00	300,0	Roca cizallada, arcilla	Afecta el portal de salida del desfogue, continúa hacia la margen izquierda y corresponde con el sistema Pilares.
<b>F-180</b>	N70°W/54°NE	0,60 - 1,00	450,0	Roca cizallada, arcilla	Afecta el desfogue, continúa hacia la margen izquierda y corresponde con el sistema Pilares.
<b>COLAPSO NORTE</b>	E - W/70°N	N.D.	600,0	-	Falla gravitacional que afecta a los taludes frontales de la obra de toma y plataforma de operación de compuertas y de ventiladores.
<b>EL CASQUETE</b>	N08°W/65°NE	1,2 a 4,5	1 200,0	Brecha silicificada y arcilla	Zona de cizallamiento asociada de hasta 15,0 m, es la estructura geológica que marca el límite oeste de la zona conocida como circo de erosión.
<b>EL BANCO</b>	N08°W/58°NE	0,3 a 0,8	200,0	Brecha silicificada y arcilla	Zona de cizallamiento asociada de hasta 5,0 m, posible vía de agua perpendicular al plano de estanqueidad.
<b>EL DESCANSO</b>	N10°E/81°SE	0,30	120,0	Brecha, roca cizallada, arcilla	Con las fallas Sabanilla y Crucero-Pitayo define un gran bloque que alojará casa de máquinas y galería de oscilación.
<b>EL ESCALÓN</b>	N10°E/82°SE	0,30	120,0	Brecha, roca cizallada, arcilla	Zona de cizallamiento asociada de hasta 3,0 m, posible vía de agua perpendicular al plano de estanqueidad.
<b>MURCIÉLAGO</b>	N03-20°W/ 88-75°NE	5,00 a 6,00	170,00	Brecha cementada con sílice	Presenta huecos importantes, posible vía de agua perpendicular al plano de estanqueidad, Afecta Excavación del plinto.
<b>LA RODILLA</b>	N70°E/61°NW	0,60	170,00	Brecha y arcilla	Puede constituir una vía franca de agua. Su traza disecta la morfología de la margen derecha produciendo una zona crítica a la cota 580,0 m directamente aguas arriba del eje de cortina. Afecta excavación del plinto y taludes izquierdos de obra de toma.
<b>COLAPSO SUR</b>	N45°W/65°SW	N.D.	400,0	Roca cizallada, arcilla	Planos estriados asociados a un intenso fracturamiento. Afecta a la zona SE de la subestación, zona de talleres y salida del desfogue.



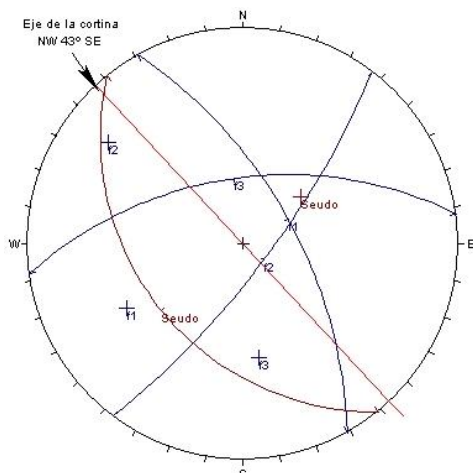
## 2.2 CONDICIONES GEOLÓGICAS EN LA ZONA DE LA CORTINA

La secuencia litológica donde está empotrada la cortina está constituida por toba lítica (Tmtl), riocacita fluidal (Tmird) y dacita porfídica (Tmid), así como por diques pórvido andesíticos (Tda), diabásicos (Qdd) y de composición ácida (Tgr), sobre de estos se tienen materiales no consolidados, tales como depósitos de talud (Qdt), arenas pumicíticas (Qap) y terrazas aluviales (Qta).

En la zona donde está colocado el cuerpo de la cortina, la masa rocosa se encuentra afectada por algunas fallas que disminuyen su calidad, en la tabla 2.4 se presentan las características principales de esas estructuras.

<b>Tabla 2.4 Características de las principales fallas geológicas (CFE,2007).</b>					
<b>Margen izquierda</b>					
<b>Falla</b>	<b>Orientación</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Relleno</b>	<b>Continuidad (m)</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Colapso 1</b>	N 15° W / 75° NE	0,20 - 0,70	Arcilla	300,00	Fracturamiento intenso. Se observa una cubierta de suelo y roca descomprimida.
<b>Colapso 2</b>	N 75° E / 75° NW	0,50 - 1,5	Arcilla	250,00	Presenta una zona en donde se observa el relajamiento de la roca y la formación de bloques de roca con salida hacia el río
<b>Pilares</b>	N-S / 50 a 75° W	0,50-1,00	Brecha de falla	600,00	Se caracteriza por presentar una roca muy fracturada, brechada y silicificada, asociada a esta se presentan numerosos planos de falla con tendencia de la estructura mayor.
<b>Margen derecha</b>					
<b>Pilar</b>	N88° W/63° NE	0,30	Roca brechada con abundante caolín entre planos de fractura. Intenso fracturamiento.	300,00	Afecta en forma perpendicular, el túnel de desfogue
<b>Esperanza</b>	N 59° E / 5° NW	0,80	Arcilla y óxido s de hierro	100,0	Se tiene un intenso fracturamiento paralelo, así como una zona de roca de mala calidad.
<b>Murciélagos</b>	N -25° W / 72° NE	5,0	Brecha de falla	170,0	Afectará a la cortina y la excavación del plinto en su parte superior.
<b>La Rodilla</b>	N 20° E / 61° SE	0,60	Brecha de falla y arcilla	170,0	Esta discontinuidad afectará la excavación del plinto.

Mediante el análisis de 628 datos estructurales se determinaron los sistemas principales de discontinuidades que afectan el macizo rocoso, destacando por su densidad estadística las fracturas y pseudoestratificación (Figura 9), sus características más relevantes se resumen en la tabla 2.5.



#### Sistemas de fracturas

f1= N 30° W / 64° NE

f2= N 37° E / 76° SE

f3= N 82° E / 56° NW

f4= N 40° W / 38° SW (Seudoestratificación)

Figura 8. Principales sistemas estructurales de la zona de la cortina (CFE, 2007).

Tabla 2.5 Características de las discontinuidades en la zona de la cortina (CFE,2007).				
Orientación	Continuidad (m)	Frecuencia (m)	Rugosidad	Observaciones
N 30° W / 64° NE	0,6 a 10,0	1 a 5	Planas-rugosas y escalonadas-rugosas cerradas a 0,01	Es abundante y continuo. En algunos planos óxidos de Fe y arcilla.
N 37° E / 76° SE	0,3 a 7,0	1 a 3	Ondulada-lisas. Cerradas hasta 0,03	Es importante por su abundancia. En algunos casos, impregnaciones de arcilla, óxidos de Fe y suelo orgánico.
N 82° E / 56° NW	0,02 a 8,0	1 a 3	Ondulada-lisas, planas-rugosas cerradas a 0,07	Se observan impregnaciones de arcilla, óxidos de Fe y suelo orgánico.
N 40° W / 38° SW	10,0 a 60,0	1 a 5	Planas-onduladas y planas-rugosas cerrada a 0,05	No es abundante pero sí continuo, principalmente en la dacita fluidal y en la toba lítica.

En la margen derecha, los materiales no consolidados de talud (Qdt) y aluvión (Qal) alcanzan espesores máximos de 14 y 19 m, respectivamente, los afloramientos tienen una velocidad de onda compresional  $V_p$  que varía de 0,5 a 2,0 km/s y una resistividad entre 48 y 407  $\Omega$ -m. La roca descomprimida se caracteriza por velocidades de 0,5 a 1,4 km/s y sus resistividades de 45 a 1185  $\Omega$ -m, su espesor máximo es de 26 m. Se tiene roca de mala a regular calidad, ubicada bajo la capa de roca descomprimida, con espesores de 12 a 62 m, con velocidades de 1,8 a 2,3 y resistividades entre 38 y 763  $\Omega$ -m. Debajo de las unidades anteriores se encuentra la roca de regular a buena calidad, las velocidades varían de 2,6 a

4,0 km/s. Los resultados obtenidos con la aplicación de los métodos indirectos se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Unidades geofísicas en el cuerpo de la cortina (CFE,2007).						
UNIDAD GEOFÍSICA	VELOCIDAD (Km/s)	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ -M)	ESPESOR MÁXIMO (m)	CORRELACIÓN GEOLÓGICA	CALIDAD ESTIMADA	
U1	A	1,3 - 2,0	48 - 407	19	Qal	Mala
	B	0,5 - 1,7	40 - 1480	48	Qdt	Mala
	C	0,55 - 0,92	69 - 389	7	Qta	Mala
	D	0,3 - 1,5	33 - 1185	27	Tmid, Tmird, Tmtl, Tgr, Tda	Mala
U2	A	1,7 - 2,45	714 - 1100	25	Tgr	Regular
	B	1,6	150	8	Tda	Regular
	C	1,7 - 2,3	38 - 763	62	Tmid	Mala a Regular
	D	1,7	87 - 188	43	Tmird	Mala a Regular
		1,5 - 2,5	177 - 1700	49		Regular
E	1,6 - 2,3	80 - 182	15	Tmtl	Mala a Regular	
U3	A	2,7 - 3,5	87 - 1530	Indefinido	Tgr	Buena
	B	2,6 - 2,7	--	Indefinido	Tda	Buena
	C	3,0 - 3,6	29 - 286	100	Tmid	Regular a Buena
		2,7 - 3,5	187 - 3856	175		Buena
	D	2,4 - 3,8	87 - 220	68	Tmird	Buena
		2,5 - 4,7	99 - 3200	165		Regular a Buena
E	2,5 - 3,6	88 - 1150	Indefinido	Tmtl	Buena	

Tabla 2.7 Características de los barrenos del plinto-cauce (CFE,2007).								
Barreno Núm.	Prof. (m)	Elev. (msnm)	Litología	RQD (%)	Calidad de roca	U. L.	Unidad geofísica	Descripción
BYSKI-17	0,0-25,5	369,4	Tmtl	10,0	MM		U2	Toba lítica afectada por varias zonas de falla
	25,5	369,4	Tmtl-Tda	0,0	MM		U3	Contacto geológico
	25,5-58,0	336,9	Tda	5,0	MM	1,0-1,68		Pórfido andesítico
	58,0-96,5	298,4	Tmtl	15,0	MM			Toba lítica muy fracturada
	96,5-122,5	272,4	Qdd	55,0	R	5,0		Dique diabásico alterado
122,5-150,0	244,9	Tmtl	10,0	MM	4,76		Toba lítica muy fracturada	
BYSK-08	0,0-11,5	378,5	Qal				U1a	Aluvión
	11,5-33,0	358,0	Tda	19,0	MM	9,7	U3	Dique pórfido andesítico
	33,0	358,0	Tda-Tmtl	0,0	MM			Contacto geológico
	33,0-110,0	280,5	Tmtl	18,0	MM	11,0-20,0		Toba lítica muy fracturada
	110,0	280,5	Tmtl-Qdd	0,0	MM			Contacto geológico
	110,0-132,0	258,5	Qdd	66,0	R	12,0-17,0		Dique diabásico alterado
	132,0	258,5	Qdd-Tmtl	62,0	R			Contacto geológico
132,0-147,5	243,0	Tmtl	18,0	MM		Toba lítica muy fracturada		
BYSK-08A	0,0-16,5	374,0	Qal				U1a	Aluvión
	16,5-25,8	364,7	Tda	0,0	MM		U3	Dique andesítico propilitizado
	25,8	364,7	Tda-Tmtl	0,0	MM			Contacto geológico
	25,8-50,0	340,5	Tmtl	41,78	M	10,0-12,0		Toba lítica afectada por fracturamiento moderado

Continuación Tabla 2.7. Características de los barrenos del plinto-cauce (CFE,2007).								
Barreno Núm.	Barreno Núm.	Barreno Núm.	Barreno Núm.	Barreno Núm.	Barreno Núm.	Barreno Núm.	Barreno Núm.	Barreno Núm.
BYSKD-46	0,0-16,2	377,2	Qal				U1a	Aluvión
	16,2-32,0	361,4	Tmtl	18,0	MM		U3	Toba lítica muy fracturada
	32,0-86,0	307,4	Tmtl	51,0	R	15,8		Toba lítica alterada, fracturada con óxidos
	86,0-100,0	293,4	Tmtl	6,0	MM			
BYSKD-36	0,0-5,0	393,9	Qal				U1a	Aluvión
	5,0-40,0	358,9	Tmtl	50,2	R		U3	Toba cristalina riolítica
Calidad de la roca: <b>MM</b> = Muy mala; <b>M</b> = Mala; <b>R</b> = Regular; <b>B</b> = Buena								

### 2.2.1 Espesores de roca de mala calidad en el margen derecha

Con el objeto de establecer diferencias en la calidad del macizo rocoso se consideraron los siguientes valores basados en la velocidad de onda compresional Vp.

Vp < 1,4                      roca descomprimida o alterada

Vp de 1,5 a 2,3              roca de mala a regular calidad con relleno arcilloso

Vp de 2,4 a 3,9              roca de regular a buena calidad

En función de los valores obtenidos por los resultados de geofísica para la margen derecha, se obtuvo que entre las elevaciones 400 a 475 msnm se encuentra la roca de mejor calidad, debido a que los afloramientos son de riolita fluidal (Tmird), poco fracturada (Tabla 2.8).

Tabla 2.8 Espesor de roca de mala calidad margen derecha (CFE,2007).		
Elevación	Espesor de roca descomprimida (m)	Velocidades promedio de roca descomprimida Vp (km/s)
575	Máx 74 - Mín 8	0,68 -1,40
550	Máx 60 - Mín 4	0,68 -1,20
525	Máx 40 - Mín 12	1,20 -1,80
500	Máx 24 - Mín 0	1,00 -1,80
475	Máx 8 - Mín 0	1,00 -1,80
450	Máx 16 - Mín 0	1,80 -1,90
425	Máx.12 - Mín 0	1,00 -1,90
400	Máx 14 - Mín 0	1,80 -1,90

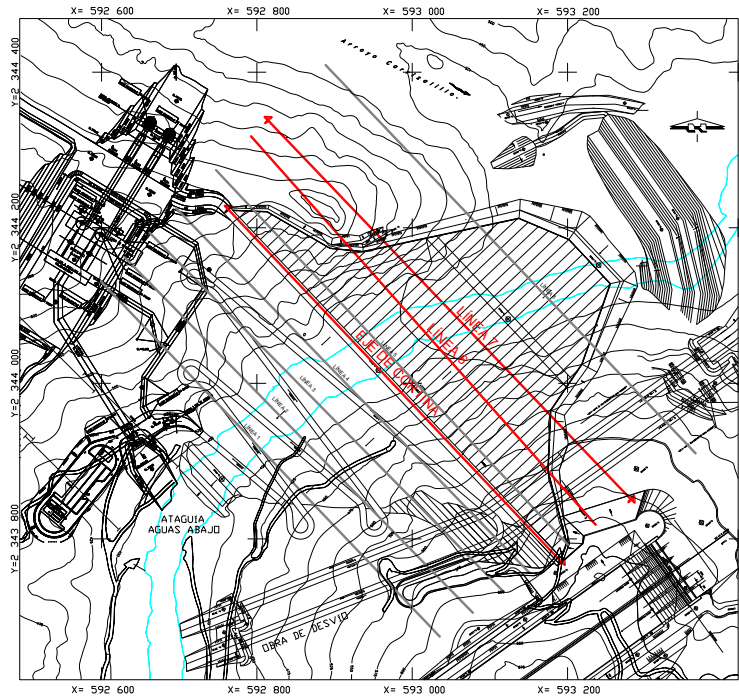


Figura 9. Líneas de secciones para exploración geológico-geofísica (CFE, 2007).

Al pasar el contacto geológico entre la riodacita fluidal a la dacita porfídica, en la elevación 500 msnm, la capa descomprimida se incrementa, tal y como se muestra entre las cotas 500 a 575 m; además, esta zona se encuentra afectada principalmente por el cruce de fallas importantes, tales como la Murciélago, Esperanza y La Rodilla. En la cota 500 m, en la zona de aguas arriba, limitada entre las secciones 6 y 7, se observa un fuerte espesor de roca descomprimida, en la nariz topográfica que forma la ladera, en la convergencia con la zona del Carrizalillo. El límite estructural de esta capa son las fallas El Chivo y La Rodilla.

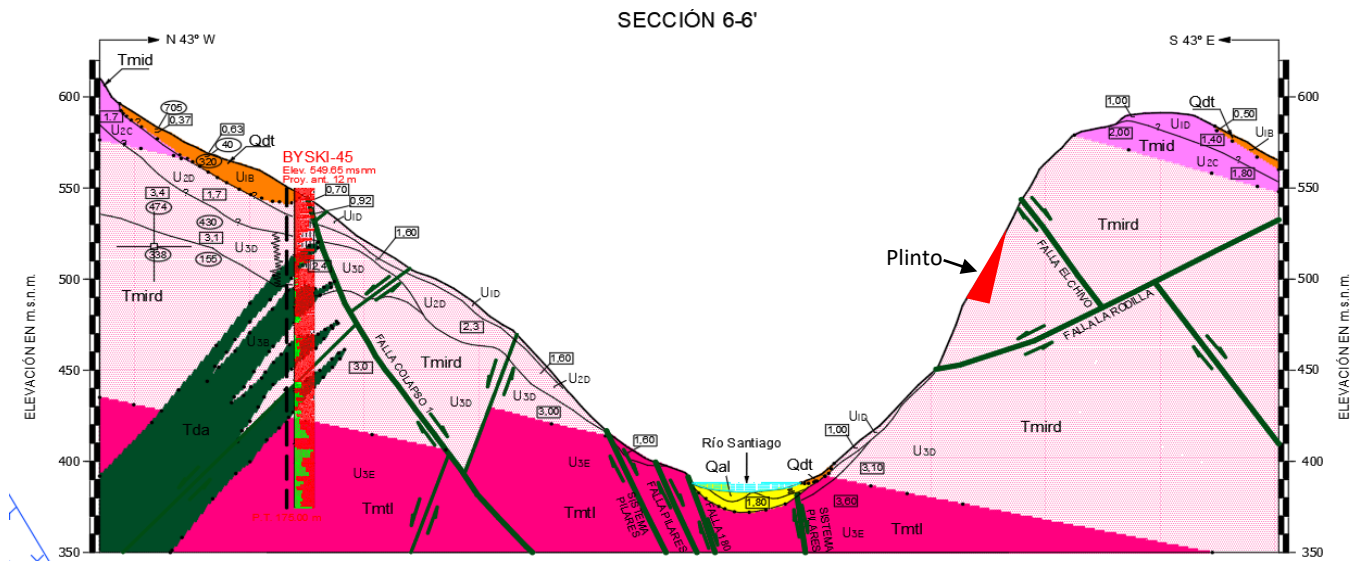


Figura 10. Sección geológico-geofísica 6-6' de la cortina (CFE, 2007).

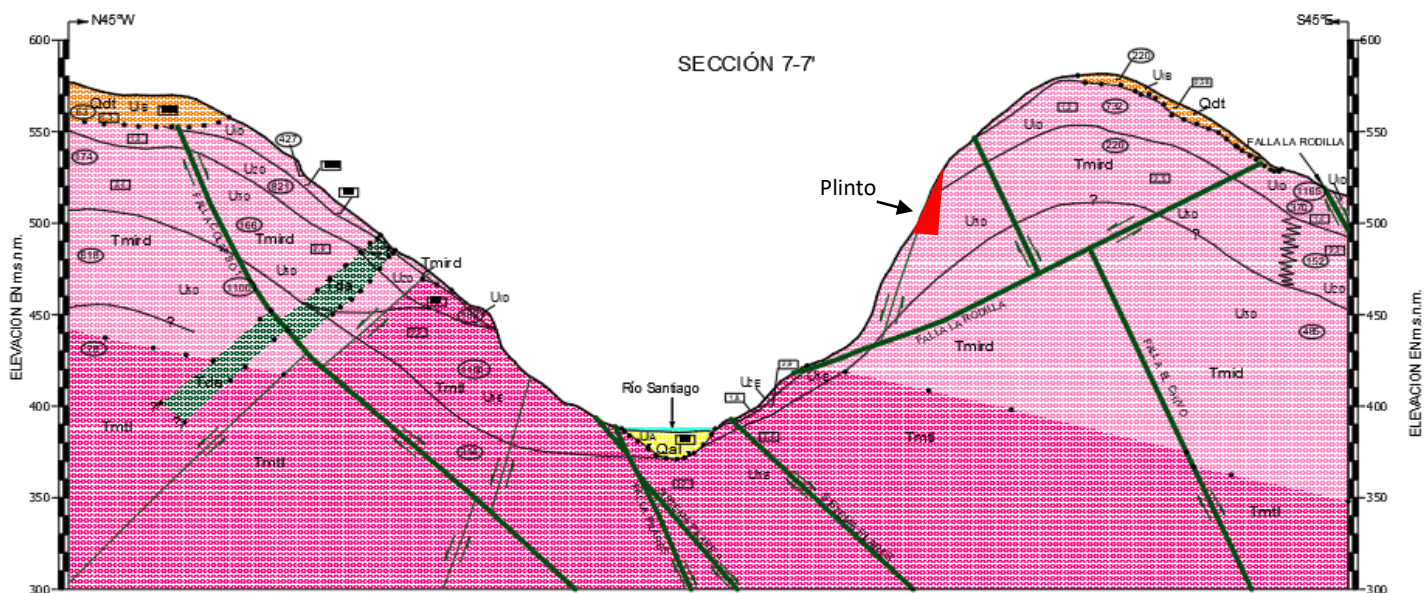


Figura 11. Sección geológico-geofísica 7-7' de la cortina (CFE, 2007).

## 2.3 CONDICIONES GEOTÉCNICAS

El Plinto es la estructura de concreto reforzado que se encuentra apoyado sobre la roca base de la presa en todo su perímetro por medio de barras de anclaje, sobre este se apoyan las losas de la cara de concreto de la cortina que en forma conjunta actúan como un elemento impermeable, para su construcción se distribuyeron 14 puntos en ambas márgenes del río Santiago, el Pto.1 inicia en la margen izquierda, del Pto.8 al Pto.9 cruzan el cauce del río y finaliza con el Pto.14 en la margen derecha, su longitud es de 878,432 m y el ancho es variable, el punto más bajo tiene una elevación de 375,00 msnm, mientras que el punto más alto se encuentra en la elevación 576,00 msnm, con una altura de 201,00 m.

### 2.3.1 Condiciones geológicas detectadas

Se realizó una excavación a cielo abierto para el perfilado de la rasante de la obra del plinto en ambas márgenes, y el cauce del río Santiago entre la elevación 576 msnm y la elevación 375 msnm, durante el proceso de limpieza para el desplante del plinto se realizó el levantamiento geológico a detalle en el cual se reconocieron rocas de tipo piroclástico clasificadas como Toba lítica (Tmtl), ignimbrita riodacítica (Tmird) e ignimbrita dacítica (Tmid), así como rocas ígneas intrusivas, clasificadas como pórfido andesítico (Tda) y dique diabásico (Qdd), estos cuerpos intrusivos se emplazaron a través de planos de debilidad,

afectando al macizo rocoso, cubriendo a estas unidades se removió una cubierta parcial de depósitos de talud no consolidados (Qdt) y aluvión (Qal), sobre el trazo geométrico del plinto, se identificaron discontinuidades geológicas que afectaron en mayor o menor grado a la roca (Tabla 2.9), son importantes por su continuidad, por su frecuencia o por el material de relleno que contienen, entre estas discontinuidades destacan las fracturas, la pseudoestratificación, las fallas y los diques, a continuación se describen las características más sobresalientes entre los puntos de la traza del plinto:

<b>Tabla 2.9 Principales estructuras identificadas en el Plinto (CFE,2007).</b>			
<b>Fallas</b>	<b>Cadenamiento</b>	<b>Orientación</b>	<b>Observaciones</b>
Colapso	0+040,00-0+080,00	N49°W/40°NE	Espesor de la falla 2 m, se caracteriza por una franja de arcilla rojiza con espesor de 2 a 3 cm de arcilla color ocre.
Vertedor 2	0+113,00	N10°E/48°SE	El espesor de la falla es de aproximadamente 2,00 m y pone en contacto litológico la ignimbrita dacítica (Tmid) y la ignimbrita riodacítica (Tmird).
15 Bis	0+198,50	N36°E/34°SE	Corresponde a una falla paralela a la Falla Colapso, su espesor varía de 0,50 cm a 1,50 m.
Sistema Pilar	0+400,00-0+590,00	N65°E/30-60°NW	Corresponde a un conjunto de falla asociadas a la Falla Pilar y se presentan principalmente entre los puntos 8 y 10.
PLD 4	0+565,00	N29°E/33°NW	Falla con un espesor entre 0.3 y 0.5 m y material arcilloso y brecha, es continua por más de 50 m.
PLD 5	0+574,00	N42°E/70°NW	Espesor de falla 1 m con material de brecha y arcilla, es una falla muy continua y se requirió de tratamiento.
La Espinada	0+640,00-0+660,00	N65-59°E/42°-24° NW	Espesor de falla de 0,1 a 0,2 m con material de brecha y arcilla, esta falla se extiende por la margen derecha.
La Esperanza	0+670,00-0+680,00	N80°E/36° NW	Falla continua hacia la margen derecha sin embargo se encuentra seccionada en varios tramos sobre el plinto.

Puntos 1 a 5 (0+000,00 - 0+167,63)

Debido a la presencia de la falla Colapso, la ignimbrita dacítica (Tmid) se encuentra muy afectada por fracturamiento y oxidación, por lo que su compacidad es muy baja, debido a esto, se realizó una excavación hasta encontrar el contacto con una ignimbrita riodacítica (Tmird) y reponer con concreto el macizo rocoso por medio de un muro a partir del cual se desplantó el plinto.

## Puntos 5 a 7 (0+167,63 – 0+342,26)

Entre estos puntos se excavó en una ignimbrita riodacítica (Tmird) la cual muestra una estructura compacta y masiva con bajo fracturamiento, algunas de las fracturas muestran rasgos de alteración propilítica, entre las estructuras más importantes se mapeo la falla 15 Bis con una orientación N36°E/34°SE y espesor de 0,50 a 1,50 m. La ignimbrita riodacítica (Tmird) es afectada por dos cuerpos intrusivos, uno de composición diabásica (Qdd), entre los cadenamientos 0+191,00 a 0+195,00 es un cuerpo tabular cuyo espesor varía de 0,50 a 2,00 m; y otro andesítico (Tda) de mayor dimensión, se identificó entre el cadenamiento 0+200,00 a 0+315,00 siendo la falla 15 Bis el límite superior del dique, esta roca se encuentra sana y es de mayor competencia, en el cadenamiento 0+315,00 se identificó el contacto litológico concordante con una toba lítica (Tmtl).

## Puntos 7 a 10 (0+342,26 – 0+590,01)

La excavación del Plinto entre estos puntos se realizó en la toba lítica (Tmtl) la roca expuesta es compacta muy resistente, se caracteriza por una pseudoestratificación bien definida con orientación general N25°W/ 42SW, en el mapeo a detalle se reconocieron 4 fallas principales así como fallas secundarias asociadas al sistema de la falla Pilar, entre estas estructuras es importante resaltar la presencia de la Falla PLD-5, la cual presentó un espesor promedio importante de 0,50 m muy continua, por lo que fue necesario realizarle un tratamiento especial a esta estructura ubicada entre los cadenamientos 0+570,00 a 0+580,00, aproximadamente en el cadenamiento 0+591,00 se ubicó el contacto litológico con una ignimbrita riodacítica (Tmird).

## Puntos 10 a 12 (0+590,01 – 0+736,26)

El Plinto en este sitio fue excavado en una ignimbrita riodacítica (Tmird) con variaciones texturales a fluidal, la roca es de estructura compacta y dura debido a una intensa silicificación, sin embargo la influencia de esfuerzos regionales provocaron una mayor densidad de fallas entre los cadenamientos 0+652,00 a 0+713,00 en los que se



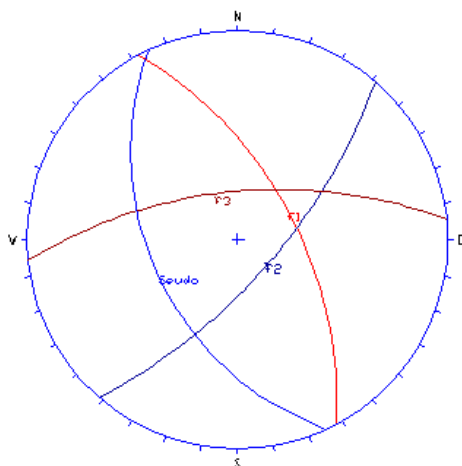
reduce la compacidad del macizo rocoso, en esta zona convergen las fallas La Esperanza y La Espinada adicionalmente los sistemas de fracturamiento asociados a las fallas Pilar y Crucero-Pitayo e incluso la seudoestratificación con una orientación general N16°W/ 47° SW permiten la presencia de fracturas abiertas y/o rellenas de arcilla o brecha de falla.

Puntos 12 a 14 (0+736,26 – 0+878,44)

En este último tramo de excavación se mapeo el contacto litológico de la ignimbrita riódacítica (Tmird) con una ignimbrita dacítica (Tmid) en el cadenamiento 0+767,40, la ignimbrita riódacítica (Tmird) es una roca muy competente y resistente, el fracturamiento es moderado, continuo y las fracturas se encuentran cerradas, otro rasgo importante es la presencia de la seudoestratificación con una orientación general de NW 37°/ 50° SW, entre los cadenamiento 0+767,40 a 0+878,44 la excavación se realizó en la ignimbrita dacítica (Tmid), la roca es de estructura compacta sin embargo el fracturamiento varía de fuerte a intenso, con generación de bloques tabulares pequeños, el fracturamiento se asocia principalmente a los sistemas de las fallas Rodaderos y Crucero-Pitayo.

### **2.3.2 Afloramientos en la Margen derecha del plinto**

En la margen derecha los afloramientos de roca se hallan mejor expuestos, determinándose que sobre la traza del plinto la masa de roca se encuentra afectada por tres sistemas estructurales principales, que de acuerdo con el procesamiento estadístico de 476 datos se representan en el estereograma de la figura 12, en tanto que las características de las discontinuidades se mencionan en la tabla 2.10 siguiente:



Fallas y fracturas Ff1 = N28°W/59°NE  
 Fallas y fracturas Ff2 = N41°E/69°SE  
 Fallas y fracturas Ff3 = N83°E/64°NW  
 Seudoestratificación = N35°W/ 45°SW

Figura 12. Patrones estructurales determinados en la margen derecha del plinto (CFE, 2007).

Tabla 2.10 Sistemas estructurales sobre la traza del plinto, en margen derecha (CFE,2007).				
Sistema	Continuidad (m)	Frecuencia (fracturas por metro lineal)	Ru = Rugosidad de los planos Ab = Abertura de la discontinuidad (m)	Observaciones
f1 N28°W/59°NE	10,0 m	1 a 2 y en ocasiones hasta 10	Ru = Ondulada-pulida y ondulada-rugosa. Ab = Cerradas. Entre las superficies de contacto se observan óxidos.	No es abundante
f2 N41°E/69°SE	3,0 a 15,0 m,	1 a 3 y en ocasiones hasta 8	Ru = Plana-lisa, plana-rugosa, en ocasiones ondulada-lisa Ab = 0,001 a 0,02 En roca sana fracturas cerradas.	Es abundante y continuo. En algunos planos se tiene impregnaciones de óxidos de hierro y arcilla.
f3 N83°E/64°NW	2,0 a 30,0 m,	1 a 3 y en ocasiones hasta 6	Ru = Ondulada-lisa, plana-rugosa, en ocasiones ondulada-rugosa Ab = 0,001 a 0,005 En roca sana fracturas cerradas.	Es abundante y continuo. En algunos planos se tiene impregnaciones de óxidos de hierro, calcita y arcilla.
Seudoestratificación N35°W/45°SW	2,0 a 12,0 m	1 a 4	Ru = Ondulada-lisa, plana-rugosa Ab = En ocasiones hasta 0,15, este último valor en roca descomprimida Las superficies de algunos planos contienen óxidos	Se observa de manera esporádica

Para complementar y determinar las condiciones geológicas que predominan en la zona de estudio, se llevaron a cabo trabajos complementarios de geofísica y perforación. Con los métodos geofísicos de Tendidos de Refracción Sísmica y Sondeos Eléctricos Verticales, se determinó que a profundidad el macizo de roca se encuentra caracterizado

por tres unidades geofísicas, a las que se les denominó: U1, U2 y U3. En la tabla 2.11 se resumen las características que definen a cada una de las unidades.

Tabla 2.11 Unidades geofísicas diferenciadas para la zona del plinto (CFE,2007).					
UNIDAD GEOFÍSICA	VELOCIDAD (km/s)	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ -m)	ESPESOR MAX. (m)	DESCRIPCIÓN	
U1	A	0,6 a 1,9	199 a 403	14	Material de aluvión (Qal) que se presenta en el cauce del río. Las velocidades altas se atribuyen a la saturación. Su remoción puede realizarse con medios mecánicos.
	B	0,6 a 1,3	257 a 1772	13	Material correspondiente a depósito de talud (Qdt). Se considera de mala calidad de fácil remoción con medios mecánicos.
	D	0,3 a 1,4	83 a 615	22	Material que involucra a afloramientos de la Tda, Tmid, Tmird y Tmtl, muy fracturados, alterados y descomprimidos.
U2	B	1,7 a 2,2	30 a 124	variable	Roca fracturada y descomprimida, asociada con el pórfido andesítico (Tda). Se interdigita con la Tmird y La Tmtl, por lo que su espesor es variable.
	C	1,9 a 2,3	72 a 505	48	Roca moderadamente fracturada y descomprimida de la dacita porfídica (Tmid).
	D	1,7 a 1,8	30 a 305	36	Roca moderadamente fracturada y descomprimida de la riodacita fluidal (Tmird); Los mayores espesores se localizan hacia la parte alta de margen izquierda.
	E	2,2 a 2,5	167 a 283	10.5	Roca moderadamente fracturada y descomprimida de la toba lítica (Tmtl).
U3	B	2, 4 a 3,3	124 a 1400	variable	Roca regular a sana, asociada con el pórfido andesítico (Tda). Se interdigita con la Tmird y La Tmtl, por lo que su espesor es variable.
	C	3,0	46 a 295	25	Roca poco fracturada de la Tmid, se localiza únicamente en la parte alta de margen derecha.
	D	2,4 a 3,2	85 a 922	No definido*	Roca poco fracturada de la Tmird. Presenta mejor calidad en la margen derecha, pues en la izquierda es intrusionada por los diques pórfido andesíticos (Tda) los que disminuyen la calidad de las rocas que los encajonan.
	E	3,0 a 3,3	101 a 1570	No definido*	Roca poco fracturada de la Tmtl. Presenta buena calidad en ambas márgenes. En la margen izquierda es intrusionada por diques pórfido andesíticos (Tda) que disminuyen la calidad de la roca que los encajona.

En ambas márgenes del río, en las inmediaciones a la traza del plinto, se llevó a cabo la ejecución de barrenos exploratorios, de los cuales cinco fueron realizados en la margen derecha, y los resultados se sintetizan en la tabla 2.12 siguiente:

Tabla 2.12 Resultados obtenidos de los sondeos exploratorios en la zona del plinto (CFE,2007).				
Barreno *Posición Prof. total	Litología / intervalo en m	Intervalo en m/ Rec % / RQD%	Estructuras / intervalo (m)/ características	Permeabilidad / intervalo en m / U.L y/o absorción en lts/min/m/
<b>BYSKD-34</b> * vertical Prof. Total <b>101,5 (M D)</b>	Dacita porfídica / 0,0 a 75,3 m Riodacita fluidal / 75,3 a 101,5 m	De 0,0 a 32,1 m / 73,59 / 7,03 De 32,1 a 63,3 m / 56,0 / 6,23 De 63,3 a 75,4 m / 100 / 38,0 De 75,4 a 101,5 m / 96,0 / 81,6	<b>Fallas</b> /17,2 a 19,3 m (La Rodilla); 54,5 a 60,3 m; 58,0 a 59,8 m; 62,6 a 64,3 m; 68,0 a 69,0 m; 70,5 a 73,0 m; 74,8 a 76,3 m/ Brecha en partes silicificada, deleznable y fragmentada, poca arcilla. <b>Arenas</b> /0,0 a 1,6 m; 3,2 a 4,65 m; 14,2 a 17,2 m; 40,0 a 45,0 m; 47,0 a 48,3 m; 53,5 a 54,5 m/ se asocian a fallas, grano fino a grueso.	Impermeable / a partir de los 20,0 m al fondo / 0,32 a 2,7 U.L.
<b>BYSKD-36</b> * vertical Prof. Total <b>50,30 (M D)</b>	Aluvión/ 0,0 a 5,3 m Toba cristalina / 5,3 a 50,3 m Arena / 40,0 a 40,5 m	De 5,2 a 50,3 m / 94 / 51	<b>Fallas</b> /9,0 a 9,5 m; 14,5 a 14,75 m y 18,1 a 18,3 m/ Roca deleznable con arcilla. Se relacionan con el sistema Pilares. <b>Arenas</b> en el intervalo de 40,0 a 40,5 m	Impermeable/ 20,0 a 25,0 m y 30,0 a 45,0 m/ 1,0 U.L. Permeable/ 15,0 a 20,0 m y 25,0 a 30,0 m/ 5,0 U.L.
<b>BYSKD-46</b> * vertical Prof. Total <b>100,30 (M D)</b>	Aluvión/ 0,0 a 16,2 m Toba lítica / 16,2 a 100,3 m	De 16,2 a 31,6 m/ 77,6 / 18,1 De 31,6 a 52,8 m/ 96 / 36 De 52,8 a 86,0 m/ 96,7 / 59,9 De 86,0 a 100,3 m/ 38,0 / 6,28	<b>Fallas</b> /16,2 a 18,0 m/ brechas con arcilla plástica; 26,7 a 30,0 m/ zona de cizalla; 30,5 y de 40,5 a 46,9 m/ planos estriados; 51,5 a 52,8 m/ brecha; 61,7; 70,45; 72,1; 84,0 y 84,2 m/ planos con estrías y arcilla (sistema Pilares). <b>Arenas</b> / 25,0 a 26,7 m y 86,0 a 91,05 m/ asociadas a fallas del sistema pilares o alteraciones hidrotermales.	Poco permeable/ 20,0 a 30,0 m / 5,86 U.L Permeable/ 30,0 a 35,0 m/ 5,84 U.L. Impermeable/ 35,0 a 100,3 m / 0,16 a 2,40 U.L.
<b>BYSKD-08</b> * Inclinado 60° al S60°E Prof. Total <b>147,8 (MD)</b>	Aluvión/ 0,0 a 12,1 m Pórfido andesítico/ 12,1 a 33,2 m Toba lítica cristalina/ 33,2 a 110,5 y de 132,5 a 147,8 m. Dique diabásico/ 110,5 a 121,0 m Arenas/ 25,7 a 33,2 m	De 12,1 a 33,2 m/ 75 / 19 De 33,2 a 110,5 m/ 82 / 18 De 110,5 a 132,5 m/ 87 / 66 De 132,5 a 147,8 m/ 59 / 13	<b>Fallas</b> /14,9, 15,5, 17,5 m/ planos estriados. Falla/ 50,0; 54,4; 58,0; 62,0 (los intervalos anteriores se relacionan al sistema de la falla Pilares), 84,0; 89,7; 90,3; 95,3; 97,0; 102,3; 108,5, 110,5; 113,5; 114,1; 116,5 a 117,3; 118,1; 119,7, 120,8 y de 126,5 a 132,5 m/ contienen arcilla. <b>Arenas</b> / 32,2 a 33,2 m/ se encuentran asociadas a la presencia de fallas y a diques porfídico andesíticos.	Poco permeable a permeable / 35,0 a 65,0m/18,0 lts/min/m. Impermeable a poco permeable/ 65,0 a 70,0 m/ 1,8 lts/min/m. Poco permeable/70,0 a 90,0 m/ 3,8 U.L Poco permeable/ 90,0 a 100,0 m/ 3,3 lts/min/m. Poco permeable a permeable /100,0 a 105,0 m/ 17 lts/min/m Impermeable a poco permeable/ 105,0 a 110,0 m/ 12,74 U.L Impermeable/110,0 a 130,0 m/ 1 U.L.

Continuación Tabla 2.12 Resultados obtenidos de los sondeos exploratorios en la zona del plinto (CFE,2007).				
Barreno *Posición Prof. total	Litología / intervalo en m	Intervalo en m/ Rec % / RQD%	Estructuras / intervalo (m)/ características	Permeabilidad / intervalo en m / U.L y/o absorción en lts/min/m/
<b>BYSKD-08A</b> * Inclinado <b>60° al N45°W</b> Prof. Total <b>50,25 (M D)</b>	Aluvión/ 0,0 a 16,2 m Pórfido andesítico/ 16,2 a 25,8 m Toba lítica / 25,8 a 50,25 m	De 16,2 a 25,8 m/ 21/ 0 De 25,8 a 50,25 m/ 90 / 43	<b>Zonas de falla</b> / 28,15; 36,80; 38,15; 40,60; 42,45 a 43,40; 44,90 y de 48,45 a 50,25 / contienen brecha de falla, arcilla y roca deleznable. Estas estructuras se relacionan con las fallas de los sistemas Pilares y Carrizalillo.	Impermeable / En los tramos de 18,0 a 23,0; 38,0 a 43,0 y de 45 a 50 con 1,5 U.L. Poco permeable a permeable / De 26,0 a 35,0 con 11,0 U.L.

Considerando los resultados obtenidos con los métodos de exploración geológico-geofísica y de perforación, se describirán las condiciones geológicas que prevalecen en la zona, de la margen derecha en el cual está enfocado el presente trabajo.

#### Tramo 8 – 12 (Cadenamiento 0+547,50 a 0+922,0 m)

Del cadenamiento 0+547,50 m, en la cota 405,0 m, hasta el cadenamiento 0+610,0 m, en la cota 452,0 m, se presenta una cubierta de materiales de mala calidad con espesor de entre 3,0 y 8,0 m que se prolonga del intervalo inmediato anterior, constituidos por tobas líticas descomprimidas, fracturadas y en algunas partes silicificadas, entre los planos de varias fracturas se tienen impregnaciones de oxidación y calcita principalmente, en otras se exhiben rellenos de arcilla y arenas; considerando los patrones de discontinuidades, se originarán bloques que van de 1,0 a 4,0 m, pero algunos pueden alcanzar dimensiones de 5,0 x 3,0 x 1,8 m.

En este intervalo se observa una cubierta de suelo residual con espesor máximo de 0,70 m que enmascara el contacto entre la toba lítica y la riodacita fluidal; sin embargo, la riodacita que se encuentra próxima a la zona de contacto con la toba lítica se presenta desvitrificada, en partes silicificada, intemperizada y con impregnaciones de óxidos entre los planos de fracturas, por lo que adquieren una tonalidad ocre; la velocidad compresional obtenida varía de 1,4 a 1,8 km/s, con resistividades de 207 a 345  $\Omega$ -m.

Por debajo de esta zona se estimó con los datos de geofísica una roca moderadamente fracturada, su espesor obtenido varía de 5,0 a 12,0 m, este último valor se determinó entre los cadenamientos de 0+557,0, en la cota 413,0 y el cadenamiento 0+572,0 m, en la cota 432,5 m y entre los cadenamientos 0+604,0 m en la cota 447,0 m a 0+615,0 m, en la cota 0+446,0 m, la velocidad obtenida varía de 2,4 a 2,9 km/s y su resistividad va de 167 a 169  $\Omega$ -m. En este tipo de materiales se encontrará alojado la mayor parte del piso de la excavación.

Por debajo de la zona moderadamente fracturada se encontrarán rocas que han sido determinadas con geofísica como de buena calidad, con espesor indefinido, pero mostrando variaciones resistivas que pudieran asociarse a zonas de menor calidad y que van de 117 a 597  $\Omega$ -m, su velocidad es de 3,0 km/s que reflejan la presencia de rocas con fracturas escasas y cerradas. Entre los cadenamientos 0+562,0 m, en la cota 422,0 m y 0+610,0 m, en la cota 447,0 m, se determinó una anomalía geofísica que se correlaciona con estructuras que obedecen a la actitud del sistema Pilares.

Entre los cadenamientos 0+610,0 m, cota 452,0 m y 0+796,0 m, cota 543,0 m, aflora la riodacita fluidal intemperizada y ligeramente silicificada y pseudoestratificada; únicamente hasta el cadenamiento 0+673,0 m, cota 485,0 m, se realizaron trabajos de exploración geofísica debido a lo escarpado del terreno; en esta parte, la capa de roca de mala calidad refleja espesores promedio de 4,0 m y velocidades sísmicas de 1,8 km/s y resistividades de 207 a 310  $\Omega$ -m.

Por debajo de la zona de mala calidad, se encontrarán rocas moderadamente fracturadas y ligeramente descomprimidas, su espesor promedio determinado con geofísica es de 7,0 m y su velocidad de 2,4 km/s, que caracteriza a rocas de regular calidad, mientras que la resistividad varía de 169 a 512  $\Omega$ -m ; la rasante del proyecto se alojará en esta unidad de rocas únicamente hasta el cadenamiento 0+613,0 m. Debajo de la unidad de rocas moderadamente fracturadas se determinó la presencia de una roca más competente, con fracturas escasas y cerradas, su velocidad de onda compresional es de 2,9 km/s y su resistividad es de 512  $\Omega$ -m.

Los datos plasmados desde el cadenamiento 0+673,0 m, en la cota 485,0 m, hasta el contacto entre la riodacita fluidal y la dacita porfídica en el cadenamiento 0+796,0 m, cota 543,0 m, fueron proyectados hacia la sección. En esta misma zona se expone la riodacita fluidal muy fracturada y descomprimida, originando la formación de bloques prismáticos con longitudes mayores de 8,0 m y anchos de 2,0 a 6,0 m; entre los cadenamientos 0+736,0 y 0+796,0 m, algunos planos de pseudostratificación presentan arena y zonas fracturadas, con espesores de hasta 0,30m, considerándose como fallas secundarias.

En la vecindad del contacto entre riodacita fluidal y dacita porfídica, en la zona del talud de aguas arriba de la excavación para cimentar al plinto se observan grandes bloques prismáticos sueltos de más de 15,0 m de longitud que se forman al conjugarse las discontinuidades del sistema de fracturamiento  $N78^{\circ}E/71^{\circ}NW$  con la pseudostratificación, que adopta una actitud general  $N23^{\circ}W/47^{\circ}SW$ . El contacto entre la riodacita fluidal y la dacita porfídica, en el cadenamiento 0+796,0 m, a la cota 543,0 m es de tipo roca a roca, mediante una superficie rugosa – ondulada.

Desde el cadenamiento 0+796,0 hasta 0+922,0 m, entre las cotas 543,0 y 592,0 m, se encuentra aflorando la dacita porfídica, caracterizada por una roca de mala calidad; la velocidad sísmica obtenida es de 1,4 km/s, con resistividades de 112 a 275  $\Omega$ -m, con espesores que varía de 11,0 a 18,0 m, este último determinado entre 0+886,0 y 0+922,0 m, cotas 571,5 a 592,0 m respectivamente. Desde el cadenamiento 0+796,0 hasta el extremo final, la rasante de excavación se encontrará en el límite entre rocas de mala y regular calidad.

La dacita porfídica se halla muy descomprimida e intensamente fracturada por la interacción de los sistemas de fracturas  $N83^{\circ}E/64^{\circ}NW$ ,  $N41^{\circ}E/69^{\circ}SE$  y  $N28^{\circ}W/59^{\circ}NE$  y la pseudostratificación  $N23^{\circ}W/48^{\circ}SW$ , lo que origina la formación de pequeños bloques cuyo tamaño oscila entre 0,20 y 0,40 m. Por debajo de esta capa se determinó la presencia de una roca de regular calidad, con velocidad compresional de 2,0 a 2,3 km/s y con resistividades de 72 a 505  $\Omega$  m, su espesor se infiere que será el contacto entre la riodacita fluidal y la dacita porfídica.

En este intervalo, el contacto litológico con las fallas Rodilla y Murciélagos generan la presencia de grandes bloques. Con el barreno BYSKD-34 perforado a partir de la elevación





Por medio de este barreno se encontraron las unidades litológicas: Ignimbrita dacita porfídica (Tmid) la cual se encuentra de 0,00 a 75,30 m de profundidad; y la ignimbrita riodacita fluidal (Tmird) que va de 75,30 hasta los 101,50 m.

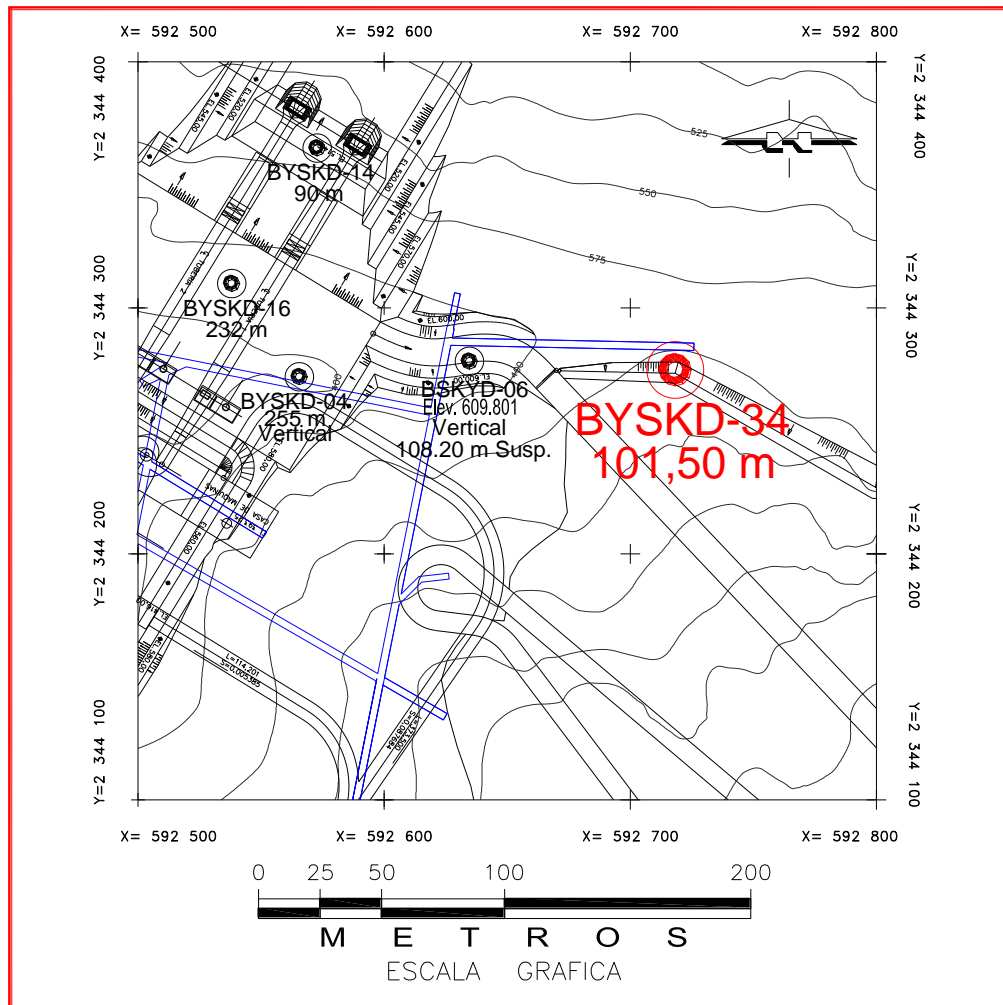


Figura 14. Localización del Barreno BYSKD-34 (CFE, 2007).

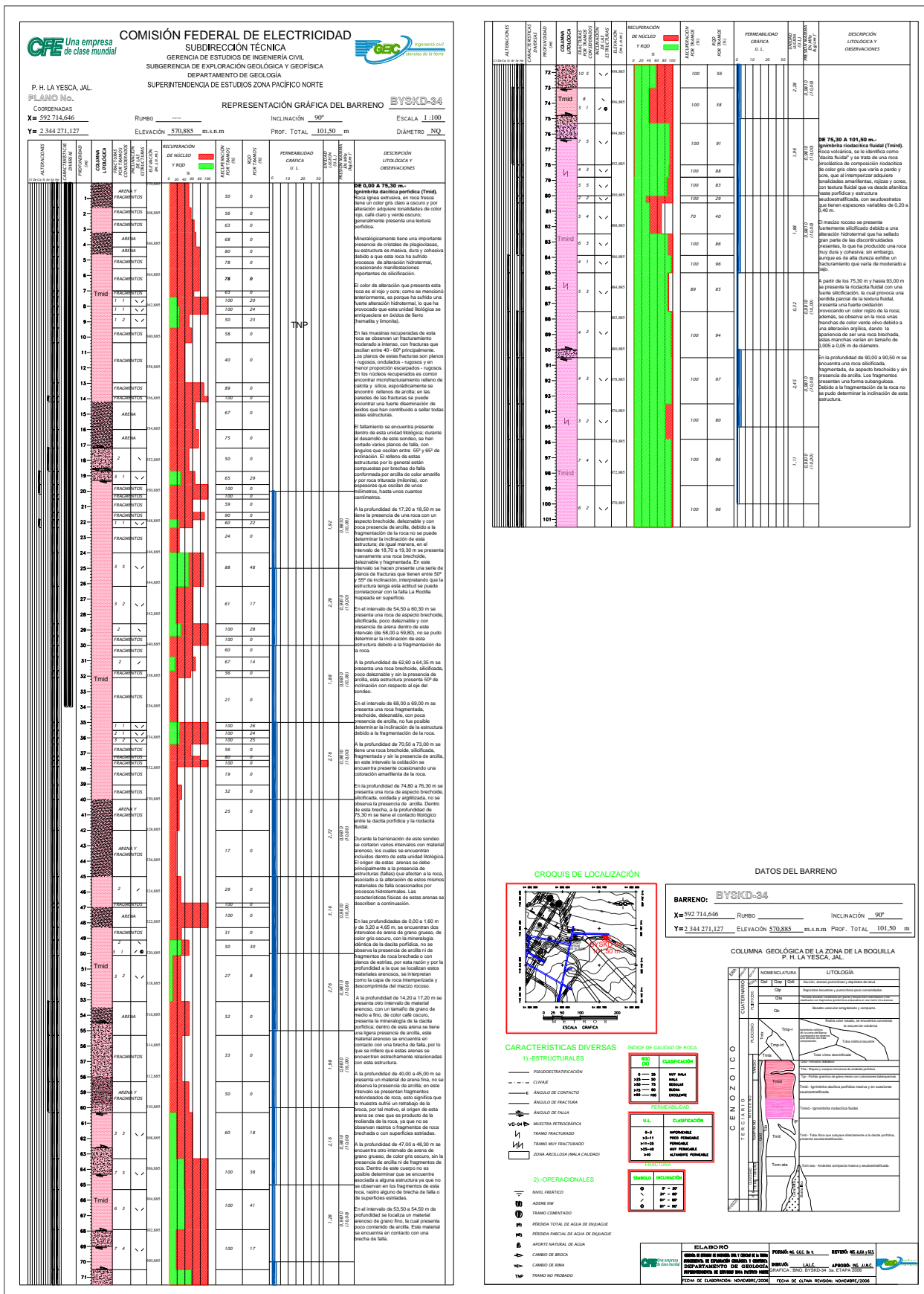


Figura 15. Representación gráfica del barreno BYSKD-34 (CFE, 2007).

Por este barreno se pudo observar que el macizo rocoso es de muy mala calidad en la primera unidad litológica, en donde los valores de RQD varían de 0 a 40%, para la segunda unidad litológica se tiene una roca de buena y excelente calidad, cuyos valores de RQD son de 80% a 95%.

De igual forma se hace notar que durante su desarrollo ocurren algunas fallas que afectan al macizo rocoso con la presencia de óxidos ferrosos y seiricta principalmente y en menor proporción se hacen presentes minerales arcillosos; de estas estructuras se pueden mencionar como importantes una zona de falla a la profundidad de 17,20 a 18,50 m, en donde se tiene la presencia de una roca con un aspecto brechoide, deleznable y con poca presencia de arcilla, debido a la fragmentación de la roca no se puede determinar la inclinación de esta estructura.



Figura 16. Muestra del núcleo seco del tramo 14,00 a 27,30 m (CFE, 2007).

Igualmente, en el intervalo 18,70 a 19,30 m se vuelve a presentar roca brechoide, deleznable y fragmentada, sin embargo, en este intervalo si se hacen presentes una serie de planos de fracturas que tienen entre  $50^\circ$  y  $55^\circ$  de inclinación, con lo cual se puede interpretar que el resto de la estructura tiene esa actitud y se correlaciona con la falla La Rodilla mapeada en la superficie.

En el intervalo de 54,50 a 60,30 m se tiene una roca de aspecto brechoide silificada, poco deleznable y con presencia de arena dentro del intervalo 58,00 a 59.80 m, en este caso no se pudo determinar la inclinación de la fractura debido a la fragmentación de la roca.



Figura 17. Muestra del núcleo seco de 45,20 m a 63,50 m (CFE, 2007).

En la profundidad de 74,80 a 76,30 m se presenta una roca de aspecto brechoide, silicificada, oxidada y argilitizada, no se observa la presencia de arcilla. Dentro de esta brecha, a la profundidad de 75,30 m se tiene el contacto litológico entre la dacita porfídica y la riodacita fluidal.



*Figura 18. Muestra del núcleo seco de 73,20 m a 82,45 m (CFE, 2007).*

A lo largo del barreno se encontraron cuerpos de arena que forman parte de la dacita porfídica. Su origen se debe principalmente a la presencia de fallas que afectan a la roca debido a la alteración de los materiales por procesos hidrotermales.

Los resultados de las pruebas de permeabilidad que se realizaron, indican un macizo rocoso impermeable, en el cual desde la profundidad de 20,00 y hasta los 100,00 se presentan valores menores a 3,00 U.L.

### 2.3.4 Permeabilidad del macizo en el eje del plinto

En la Tabla 2.13 se presenta un resumen de los resultados de las pruebas Lugeon de todos los barrenos realizados en la margen derecha e izquierda, así como en el cauce, tanto de la campaña de exploración 2006 como de los barrenos adicionales en la zona del cauce en el 2007. Se definen además la Recuperación (REC) y el RQD para cada material, de donde se puede señalar que la peor recuperación y el peor RQD pertenecen a al Dique Andesítico (Tda) de la zona del cauce (REC = 58 % y RQD = 5 %), mientras que la mejores Recuperaciones pertenecen a la Ignimbritas Riodacíticas (Tmird) de las márgenes Izquierda y Derecha (REC = 99% y 97% respectivamente) y el mejor RQD le pertenece a la Ignimbrita Riodacítica (Tmird) de la margen Derecha (RQD = 82%).

Respecto a las Unidades Lugeon la más alta le corresponde a la Ignimbrita Riodacítica (Tmird) de la Margen Izquierda (U. L. = 16 l/min/m) y la más baja corresponde a la Ignimbrita Riodacítica (Tmird) de la Margen Derecha (U. L. = 1,5 l/min/m). Es necesario aclarar que la estadística presentada en la Tabla 2.13 sólo pudo considerar un Barreno para la Margen Derecha (Barreno: BYSKD-34).

<b>Tabla 2.13 Resumen de los resultados de las pruebas Lugeon de los barrenos en la zona del plinto (CFE, Informe 07-37-SGM/R).</b>				
<b>ZONA</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>RECUPERACIÓN PROMEDIO REC (%)</b>	<b>CALIDAD DE LA ROCA PROMEDIO RQD (%)</b>	<b>UNIDADES LUGEON PROMEDIO U.L (l/min/m)</b>
<b>Margen Izquierda</b>	Ignimbrita Riodacítica (Tmird)	99	42	16
	Toba Lítica (Tmtl)	78	29	9.6
	Dique Andesítico (Tda)	91	25	2.8
<b>Cauce</b>	Toba Lítica (Tmtl)	80	22	6.7
	Dique Andesítico (Tda)	58	5	6.3
	Dique Diabásico (Qdd)	95	58	3.8
<b>Margen Derecha</b>	Ignimbrita Dacítica (Tmid)	67	9	2.1
	Ignimbrita Riodacítica (Tmird)	97	82	1.5

### 2.3.5 Parámetros del macizo rocoso

La clasificación geomecánica: RMR (Rock Mass Rating) desarrollada por Bieniawski, Z. T en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del

macizo rocoso, así como de la excavación o del sostenimiento en túneles por realizarse. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa por ensayo de compresión simple o de carga puntual.
- Grado de fracturación en términos del RQD (Rock Quality Designation)
- Espaciado o separación de las discontinuidades.
- Condiciones o estado de las discontinuidades; en donde se califica su longitud, abertura, rugosidad, relleno y alteración.
- Condiciones hidrogeológicas en el macizo rocoso.
- Se realiza además una corrección por la orientación de las discontinuidades (dirección y buzamiento) con respecto a la excavación, dependiendo del tipo de obra que se realizará en el macizo; túnel, cimentación o talud.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR (Rock Mass Rating), que varía de 0 y 100, correspondiendo la puntuación de 0 a una roca de calidad muy mala (clase V) y la de 100 a una roca de calidad muy buena (clase I).

En la Tabla 2.14 se presenta la determinación del RMR para los materiales bajo el plinto en la Margen Izquierda y en la Margen Derecha de la P. H. La Yesca, resultando para la Ignimbrita Dacítica (Tmid) un valor de RMR = 59 (Clase III, Calidad Media). Para la Ignimbrita Riodacítica (Tmird) un valor de RMR = 64 (Clase II, Calidad Buena). Para la Toba Lítica (Tmtl) un valor de RMR = 64 (Clase II, Calidad Buena). Para el Dique Andesítico (Tda) un valor de RMR = 35 (Clase IV, Calidad Mala).

Tomando en cuenta todo lo anterior se obtuvo que la clasificación de las rocas que se localizan bajo el plinto para la P. H. La Yesca, son de Clase II a IV, correspondiendo a una calidad de roca de Buena a Mala (RMR de 64 a 30).

**Tabla 2.14 Determinación del RMR para los materiales bajo el plinto en la MI y MD C.H. La Yesca (CFE, Informe 07-37-SGM/R).**

Ignimbrita dacítica (Tmid)		Ignimbrita riódacítica (Tmird)		Toba lítica (Tmtl)		Dique andesítico (Tda)	
Parámetros de clasificación	Puntuación	Parámetros de clasificación	Puntuación	Parámetros de clasificación	Puntuación	Parámetros de clasificación	Puntuación
1.- Resistencia de la matriz rocosa Compresión simple Rc (MPa) <i>Rc= 76 Mpa</i>	7	1.- Resistencia de la matriz rocosa Compresión simple Rc (MPa) <i>Rc= 124 Mpa</i>	12	1.- Resistencia de la matriz rocosa Compresión simple Rc (MPa) <i>Rc= 122 Mpa</i>	12	1.- Resistencia de la matriz rocosa Compresión simple Rc (MPa) <i>Rc= 79 MPa</i>	7
2.- RQD <i>RQD= 40%</i>	6	2.- RQD <i>RQD= 40%</i>	6	2.- RQD <i>RQD= 40%</i>	6	2.- RQD <i>RQD= 20%</i>	3
3.- Separación entre diaclasas <i>(0.2-0.6 m)</i>	10	3.- Separación entre diaclasas <i>(0.2-0.6 m)</i>	10	3.- Separación entre diaclasas <i>(0.2-0.6 m)</i>	10	3.- Separación entre diaclasas <i>(&lt;0.06 m)</i>	5
4.- Estado de las discontinuidades <i>Longitud (&gt; 1m)</i> <i>Abertura (0.1 a 1 mm)</i> <i>Rugosidad (muy rugosa)</i> <i>Relleno (ninguno)</i> <i>Alteración (inalterada)</i>	6 4 6 6 6 <b>28</b>	4.- Estado de las discontinuidades <i>Longitud (&gt; 1m)</i> <i>Abertura (0.1 a 1 mm)</i> <i>Rugosidad (muy rugosa)</i> <i>Relleno (ninguno)</i> <i>Alteración (inalterada)</i>	6 4 6 6 6 <b>28</b>	4.- Estado de las discontinuidades <i>Longitud (&gt; 1m)</i> <i>Abertura (0.1 a 1 mm)</i> <i>Rugosidad (muy rugosa)</i> <i>Relleno (ninguno)</i> <i>Alteración (inalterada)</i>	6 4 6 6 6 <b>28</b>	4.- Estado de las discontinuidades <i>Longitud (3 a 10)</i> <i>Abertura (0.1 a 1 mm)</i> <i>Rugosidad (ondulada)</i> <i>Relleno (duro)</i> <i>Alteración (muy alterada)</i>	2 4 1 4 1 <b>12</b>
5.- Agua Freática <i>Seco</i>	15	5.- Agua Freática <i>Seco</i>	15	5.- Agua Freática <i>Seco</i>	15	5.- Agua Freática <i>Seco</i>	15
Corrección (Media)	-7	Corrección (Media)	-7	Corrección (Media)	-7	Corrección (Media)	-7
RMR =	59	RMR =	64	RMR =	64	RMR =	35
<b>CALIDAD MEDIA</b>		<b>BUENA CALIDAD</b>		<b>BUENA CALIDAD</b>		<b>MALA CALIDAD</b>	

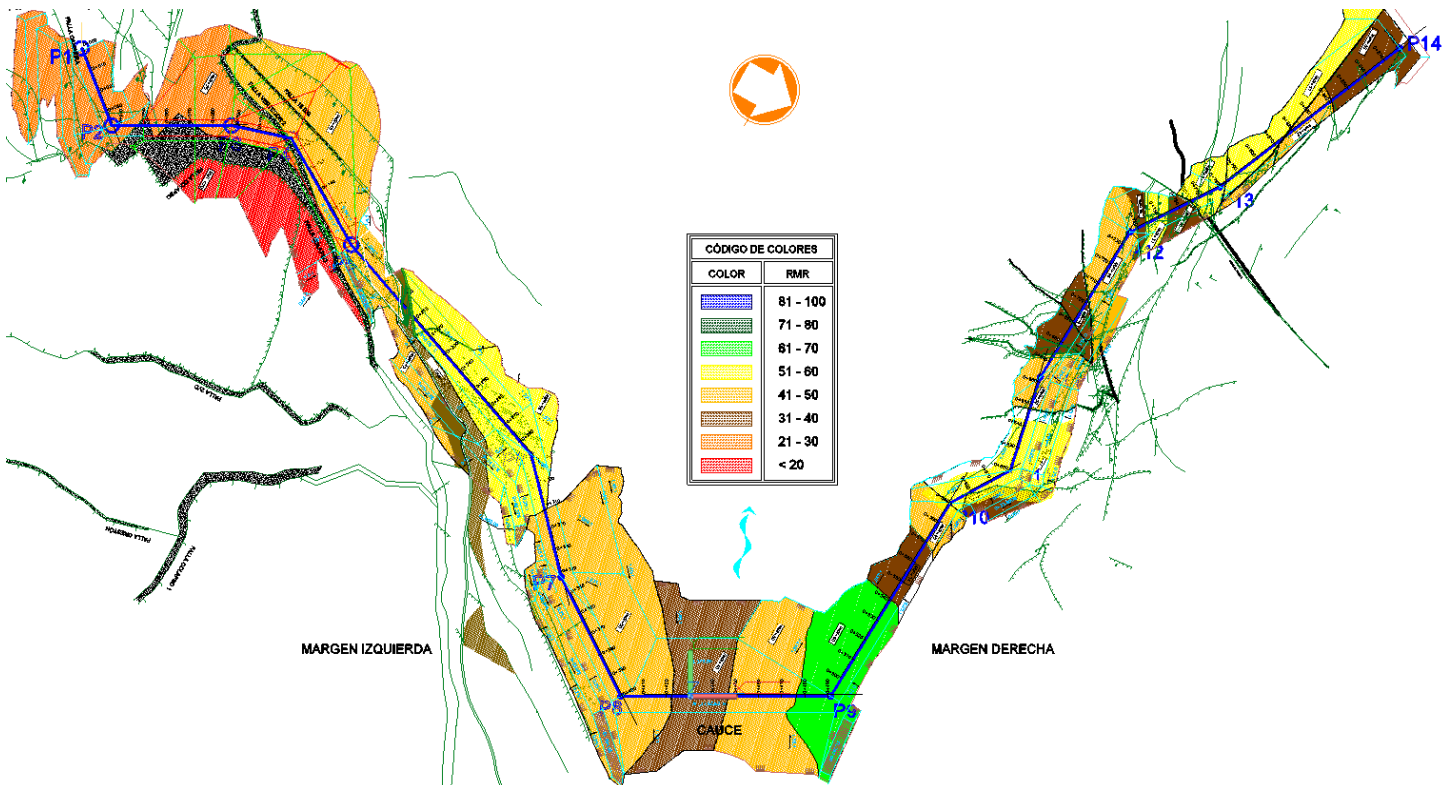


Figura 19. Clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating), valores en todo el desarrollo del plinto (vista en planta) (CFE, 2007).



## CAPÍTULO 3

---

### ***Diseño geotécnico del plinto.***

El plinto como se sabe es uno de los elementos principales que conforman la cortina de enrocamiento con cara de concreto, ya que no solo a partir de él se realiza el tratamiento de consolidación de la roca superficial y la pantalla impermeable a profundidad en el macizo rocoso, sino que también, trabaja como una losa de reacción para resistir la subpresión generada por la inyección de la lechada de concreto utilizada en la consolidación del macizo rocoso, es por eso que requiere de anclajes que lo ayuden a resistir dicha presión, cuya cantidad depende de la calidad de la roca.

El plinto al ser un elemento de apoyo para la losa de concreto, debe incidir en la cara del plinto a 90° para garantizar que la fuerza ejercida por la losa sobre él sea normal. Junto con los sellos de la junta perimetral es la liga entre la losa y el terreno, permitiendo la presencia de una articulación entre estos dos elementos para que, al momento del llenado del vaso, se puedan absorber las deformaciones que se presentan en la losa de cara de concreto.

Debe desplantarse sobre material competente y poco deformable, lo que se puede lograr de manera preliminar considerando el criterio de seleccionar aquellos depósitos con velocidad de onda compresional mayor a 2,0 km/s, para lo cual es necesario contar con la sección Geológico-Geofísica a lo largo del eje del plinto propuesto (Figura 13) y además con secciones transversales Geológico-Geofísicas a éste, debido a que es necesario ajustar al definir su nivel de rasante.

### 3.1 REQUISITOS GEOMÉTRICOS

Para definir el trazo del plinto deben de realizarse inspecciones oculares de las condiciones y calidad del terreno, exploración mediante zanjas, pozos a cielo abierto, sondeos mecánicos y exploraciones geofísicas, para conocer el espesor de material con diferente calidad y la posible presencia de discontinuidades o anomalías en el terreno en las que sea necesario realizar regulación del terreno, tratamiento dental o reposición del material inadecuado con concreto.

Para lograr esta definición y establecer la profundidad de desplante, una vez elegido el trazo más conveniente, es necesario realizar la excavación de la zanja que alojará al plinto y aplicar los trabajos de regularización y tratamiento necesario antes del colado integral del plinto. En ocasiones es conveniente anticipar pruebas de inyectabilidad para conocer la respuesta del terreno a este proceso y poder diseñar adecuadamente el tratamiento de consolidación e impermeabilización del macizo de roca.

La exploración geofísica permite la calificación de la masa de roca en cierta manera en volumen, por lo que se hace una herramienta muy útil, con el apoyo de la exploración directa, con fines de calibración. Generalmente se busca ubicar el desplante del plinto en roca que tenga cuando menos una velocidad de onda de compresión de 2000 m/s, sin que necesariamente sea esta una condición determinante para la elección final del desplante sino más bien que la variabilidad de propiedades no sea amplia en valores y brusca de punto a punto.

#### 3.1.1 Ancho del plinto

Para el diseño del ancho del plinto se utilizó el criterio de B. Marteron, el cual adopta el concepto de plintos externos e internos y aplica el Rock Mass Rating (RMR) desarrollado por Bieniawsky al seleccionar el ancho combinado del plinto externo e interno. A continuación, se resume el método:

- Seleccione un ancho de plinto externo que permita un ancho suficiente para ejecutar la lechada, de 4 a 5 m.
- Clasifique la base del plinto utilizando el sistema RMR.

- Determine el índice de diseño del plinto de la siguiente manera (tenga en cuenta que el índice es igual al gradiente hidráulico,  $H/L$ , donde  $H$  es la altura del depósito en m y  $L$  es la dimensión en m desde el borde de aguas arriba del plinto externo al borde aguas abajo del plinto interno en el contacto del plinto con la base).

Rock Mass Rating, RMR	Índice de diseño del plinto
>80	20
60 – 80	16
40 – 60	12
20 – 40	6
<20	2*

### 3.1.2 Definición del eje del plinto

Anteriormente se consideraba como punto de control para definir el eje del plinto la intersección del plano del lecho inferior de la losa de la cara de concreto con el plano de la cabeza del plinto.

Actualmente se considera el punto de control en el desplante del plinto como se ve en la siguiente figura.

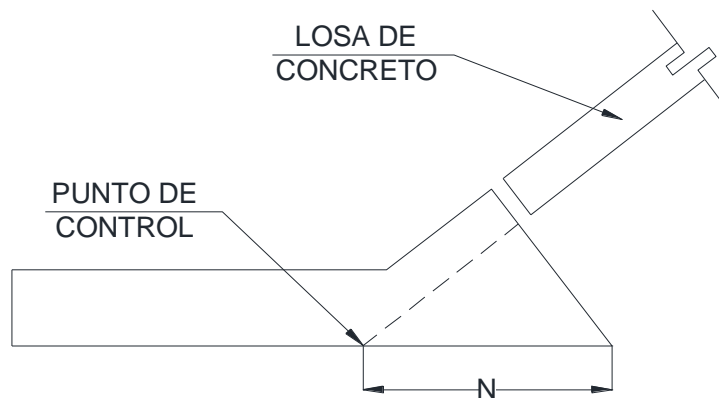


Figura 20. Punto de control para el desplante del plinto.

Un aspecto importante en el diseño del plinto es la determinación de su posición con respecto a la topografía tanto del cauce como en las laderas de la boquilla donde se ubicará la cortina, para lo cual se deben tomar en cuenta aspectos geométricos y geológico-geotécnicos del proyecto y del entorno donde se ubica el plinto.

### 3.1.3 Disposición geométrica del plinto

Las coordenadas que definen cada uno de los puntos en que cambia de dirección el eje del plinto deben conservar la pendiente del cuerpo de la presa y por lo tanto de la losa que constituye la cara de concreto.

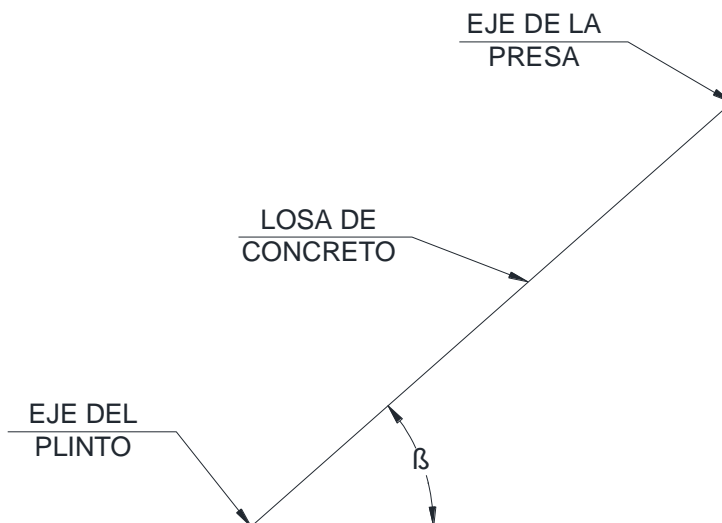


Figura 21. Pendiente de la cortina.

En la figura 21 se observa la pendiente de la cortina en su cara de aguas arriba ( $\beta$ ), en cuya proyección hacia las laderas deben estar ubicados los puntos que definen los cambios de dirección del plinto.

### 3.2 DISEÑO GEOTÉCNICO DEL PLINTO DE LA C.H. LA YESCA

Para realizar la localización y geometría del plinto es necesario hacer una sección del plinto de acuerdo al terreno natural, la cual nos dará una idea de cómo y donde será desplantado de acuerdo a la topografía del lugar, posteriormente de acuerdo a las características geotécnicas obtenidas de los estudios realizados en el macizo rocoso, se hace una segunda sección del eje del plinto de acuerdo al nivel de desplante.

La longitud del eje del plinto se forma por varios tramos rectos, los cuales deben ser lo más largos posible y procurar que los cambios de dirección sean suaves.

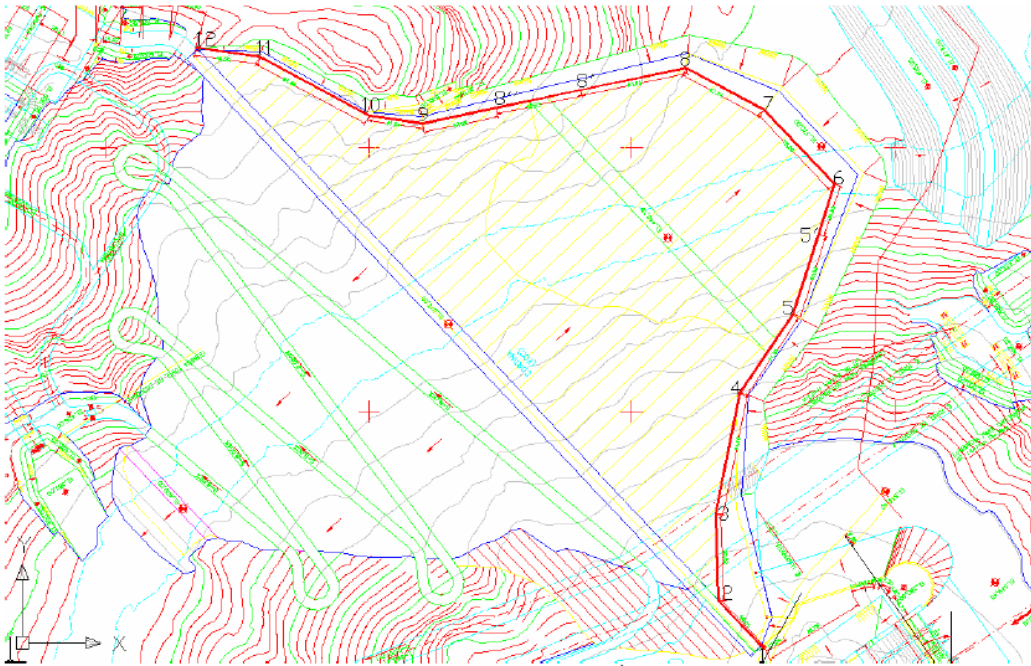


Figura 22. Planta de la delimitación del plinto (CFE, Informe 07-37-SGM/R).

### 3.2.1 Traza del eje del plinto

Sobre la geometría del plinto existen discontinuidades geológicas que afectan en mayor o menor grado la calidad del macizo rocoso, algunas son importantes por su continuidad, otras por su abundancia, algunas más por su persistencia y en ocasiones por el material de relleno que contienen; entre estas destacan las fracturas, pseudoestratificación, las fallas y los diques.

Durante el proceso de excavación en el portal de entrada de los túneles de desvío, se identificó la generación de un bloque inestable ubicado en el margen izquierda cuyo volumen se calculó de  $25 \text{ Mm}^3$  el cual no se movía como un solo cuerpo sino a lo largo de los planos de las fallas Colapso, Colapso 1, Colapso 2 y la descompresión de la roca fracturada en la parte superior, como consecuencia de estas anomalías se modificó la trayectoria de la cortina con un giro de  $14^\circ$  hacia aguas abajo, tomando como apoyo el punto 14 del plinto, por lo que también se modificó el diseño original del mismo.

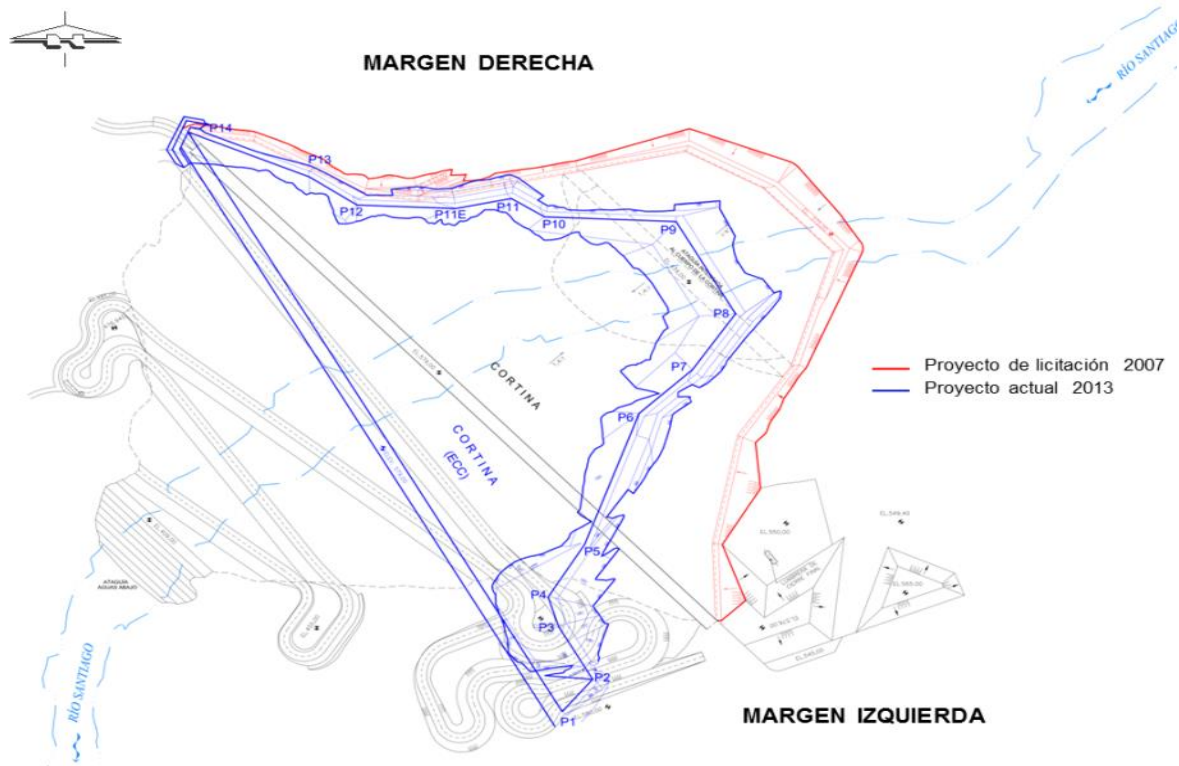


Figura 23. Giro del eje de la cortina y modificaciones en el diseño del plinto (CFE, 2007).

En la margen derecha las fallas Murciélago, Rodilla se rigen bajo los patrones estructurales preferentes, en la siguiente tabla se describen las discontinuidades observadas que afectan la calidad del macizo de roca a lo largo de la geometría del plinto.

Tabla 3.1 Características de las fallas principales que afectan la traza del plinto en la margen derecha (CFE, 2007).			
Estructura Geológica y ubicación por cadenamamiento	Orientación de la discontinuidad y Buzamiento	C=Continuidad e= Espesor (m)	Observaciones
<b>Falla La Rodilla</b> 0+865,0 a 0+875,0 m	N25°E/55-67°SE	C= De 450,0 m e = De 2,0 a 8,0 m	Su comportamiento es de tipo lístrico, su traza se alabea, y su espesor tiende a angostarse y ensancharse, contiene como relleno roca fracturada, material de brecha y arcilla. Esta discontinuidad impactara en la cortina y en la excavación del plinto. Su traza en superficie disecta la morfología de la margen derecha. Al intersectarse con la foliación esta estructura generará inestabilidad.
<b>Falla Murciélago</b> 0+904 a 916,5 m	N15-25°W/72-88°NE	C= De 280,0 m e = 1,80 m	Su influencia afecta un espesor de roca de 5,0 m con roca densamente fracturada (brechada y cizallada), relleno silicificado, también presenta espacios abiertos. Afectará a la cortina y la excavación del plinto.

Tabla 3.2 Resumen de los datos geométricos del plinto C.H. La Yesca con NAME= 578 (CFE, Informe 07-37-SGM/R).							
Tramo	Elevación (m)		Elevación media (m)	Longitud horizontal (m)	Longitud vertical (m)	Pendiente	Carga hidráulica media (m)
	De	A					
1-2	576	576	576	50.54	0	0.0000	2.00
2-3	576	545	560.5	65.62	31	0.4724	17.50
3-4	545	490	517.5	94.10	55	0.5845	60.50
4-5	490	440	465	71.65	50	0.6978	113.00
5-5'	440	400	420	63.93	40	0.6257	158.00
5'-6	400	375	387.5	39.95	25	0.6258	190.50
6-7	375	375	375	78.00	0	0.0000	203.00
7-8	375	390	382.5	67.24	15	0.2231	195.50
8-8'	390	440	415	81.95	50	0.6101	163.00
8'-8''	440	480	460	65.93	40	0.6067	118.00
8''-9	480	515	497.5	57.09	35	0.6131	80.50
9-10	515	533	524	41.04	18	0.4386	54.00
10-11	533	554	543.5	94.48	21	0.2223	34.50
11-12	554	576	565	49.22	22	0.4470	13.00

### 3.2.2 Nivel de desplante y diseño de excavación

La excavación del plinto para la cimentación de la cara de concreto se ejecutó considerando la topografía del terreno en trece segmentos que definen su geometría, la ubicación y características de cada uno de estos se describen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Localización de los puntos de inflexión que definen la geometría del plinto (CFE, 2007).						
Punto de inflexión	Coordenadas (UTM)		Elevación de la rasante	Cota del terreno natural en el punto de inflexión en m	Orientación del segmento	Longitud del segmento (m)
	m E (X)	m N (Y)				
1	El segmento confinado entre los puntos de inflexión 1 y 2, no corresponde a la excavación del plinto, sino a la plataforma que se encontrará a nivel del límite inferior del parapeto, en donde se une este último con el plinto, a la elevación 576,0 msnm; en el segmento se proyecta también la construcción de un talud que limitará al canal de llamada de la estructura de control.					
2 (M I)	593 065, 82	2 343 856, 29	576,0	586,32		
3	593 065, 50	2 343 921, 87	545,0	556,44	De 2 a 3 SE02°NW	De 2 a 3 72,57
4	593 082, 22	2 344 014, 12	490,0	499,89	De 3 a 4 SW12°NE	De 3 a 4 109,0
5	593 122, 37	2 344 073, 53	440,0	450,0	De 4 a 5 SW35°NE	De 4 a 5 87,42
5'	593 141, 84	2 344 134, 42	400,0	407,06	De 5 a 5' SW17°NE	De 5 a 5' 75,41
6 (Cauce)	593 154, 04	2 344 172, 46	375,0	390,0	De 5' a 6 SW17°NE	De 5' a 6 47,13
7 (Cauce)	593 100, 42	2 344 229, 11	375,0	395,29	De 6 a 7 N43°W	De 6 a 7 78,0
8 (M D)	593 041, 29	2 344 260, 95	390,0	400,0	De 7 a 8 SE61°NW	De 7 a 8 68,86
8'	592 961, 07	2 344 243, 97	440,0	454,46	De 8 a 8' NE78°SW	De 8 a 8' 96,0
8''	592 896, 59	2 344 230, 24	480,0	487,48	De 8' a 8'' NE78°SW	De 8' a 8'' 77,11
9	592 840, 76	2 344 218, 35	515,0	525,07	De 8'' a 9 NE78°SW	De 8'' a 9 66,96
10	592 800, 19	2 344 224, 55	553,0	548,63	De 9 a 10 SE81°NW	De 9 a 10 44,81
11	592 717, 12	2 344 269, 56	554,0	566,91	De 10 a 11 SE62°NW	De 10 a 11 96,79
12	592 668, 36	2 344 276, 27	576,0	591,67	De 11 a 12 SE82°NW	De 11 a 12 54,40

Con la información obtenida, se establecen los espesores de roca que se tendrán que desalojar en cada uno de los puntos de inflexión, así como la calidad de la roca que se encontrará al nivel de la rasante de excavación expuesto, en la margen derecha.

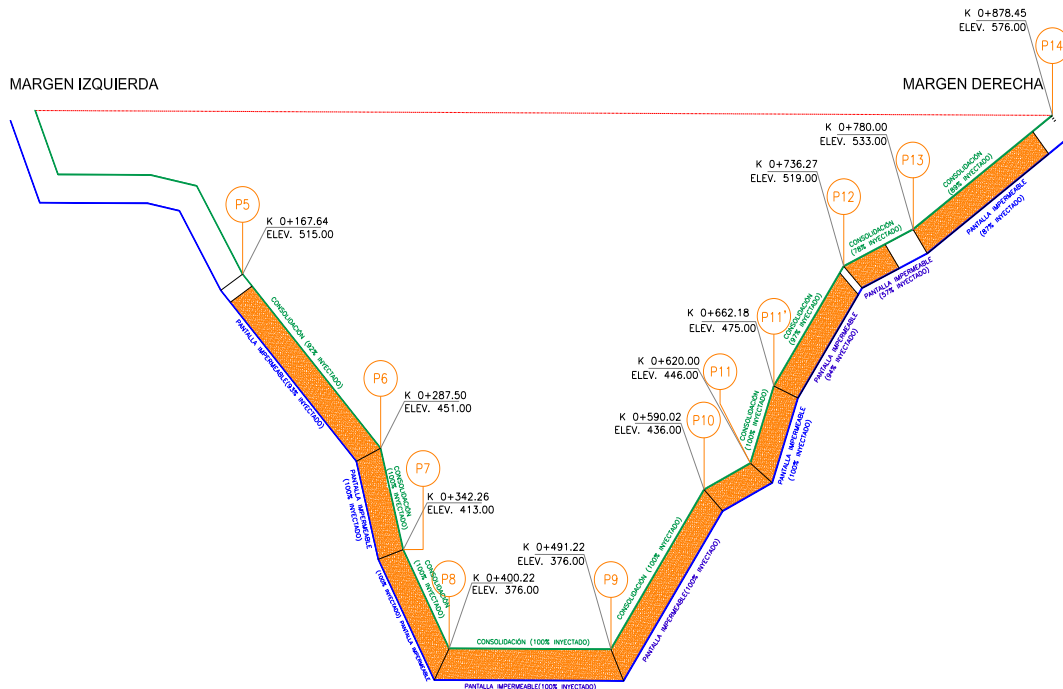


Figura 24. Poligonal del Eje de excavación del plinto (CFE, 2011).

Tabla 3.4 Características geométricas de los tramos del plinto, espesores promedio a remover y condiciones geológicas pronosticadas para la cimentación del plinto en la margen derecha (CFE, 2007).				
Tramos de plinto	Longitud del tramo (m)	Inclinación de la rasante (grados)	Material a remover y espesor promedio (m)	Tipo de roca y condiciones geológicas para la cimentación del plinto
<b>Margen Derecha</b>				
8 - 8'	96,0	30 a 32	Roca 10 a 12	<b>Toba lítica cristalina (Tmtl)</b> , dura de regular a buena calidad; velocidad compresional de 2,4 a 2,9 Km/s; Rec.50 a 95 % y RQD 25 a 70%.
8' - 8''	77,11			<b>Riodacita fluidal (Tmird)</b> intemperizada ligeramente silicificada y pseudoestratificada. Probable formación de cuñas en los taludes del corte, entre planos del sistema 2 y la pseudo estratificación. Esta zona corresponde a la parte más escarpada del trazo del plinto y no se llevó a cabo exploración con geofísica ni barrenos.
8'' - 9	66,96	30	Roca 8 a 17	
9 - 10	44,81	23		
10 - 11	96,79	12	Roca 12 a 17	<b>Dacita porfídica (Tmid)</b> , roca dura, muy fracturada, confinada, planos alterados. Velocidad compresional 1,7 a 2,4 Km/s. Rec. 65%; RQD 25%. Mala a regular calidad de roca cuñas Ídem tramo anterior: requiere estricto control de voladuras debido a lo esbelto del filo topográfico.
11 - 12	54,40	23		



De acuerdo a la orientación de los segmentos que definen la geometría del plinto, el ángulo de los taludes de aguas arriba, la orientación de las discontinuidades que afectan al macizo de roca, en la zona de la traza del plinto se podrán o no generar zonas inestables durante la excavación de la obra; por lo que se hizo un análisis para determinar la posible generación de zonas inestables.

En la margen derecha la traza del plinto presenta cuatro orientaciones preferenciales que se extienden desde el punto de inflexión 8, localizado en la parte más baja, hasta el punto 12 que marca la intersección entre la traza del plinto y la base del parapeto de la cortina en la cota 576,0 m; en esta margen, las orientaciones de los segmentos son: NE78°SW para los segmentos 8 a 9, SE81°NW para el tramo de 9 a 10; SE62°NW en el intervalo de 10 a 11 y SE83°NW para el segmento de 11 a 12, en esta margen tres de las direcciones generales tienen una orientación similar, con una variación máxima de 20° entre sus orientaciones.

En la representación esquemática de la sección 8" a 9 y la actitud preferencial de las discontinuidades, con la orientación de la obra en su sentido longitudinal, se advierte que en el talud de aguas arriba se formaran cuñas con salida hacia la excavación a través de los planos de seudoestratificación limitados por Ff1 y Ff3; en el talud de aguas abajo, los taludes serán menores a los 10,0 m por lo que no se tendrán problemas de inestabilidad; en el piso las cuñas se conformarán a través de los planos de la seudoestratificación y los sistemas de fracturas Ff1 y Ff3.

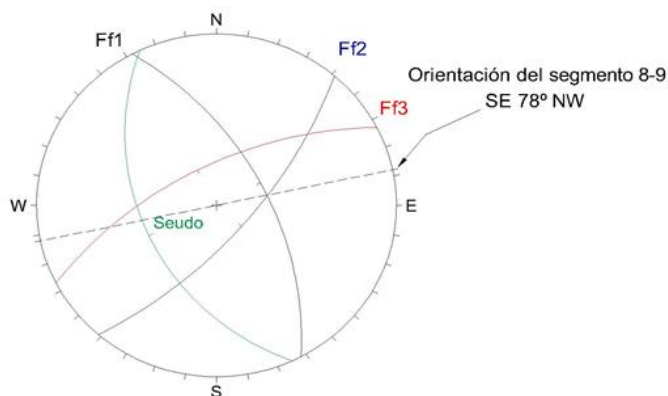


Figura 25. Representación estereográfica de las discontinuidades del intervalo 8" – 9 del plinto (CFE, 2007).

De los intervalos 10 a 11, en el talud de aguas arriba se formarán cuñas con salida hacia la excavación a través de los planos de seudoestratificación limitados por Ff1 y Ff3, mientras

que, en el piso las cuñas se formarán a través de los planos de pseudoestratificación y los sistemas de fracturas Ff1 y Ff3.

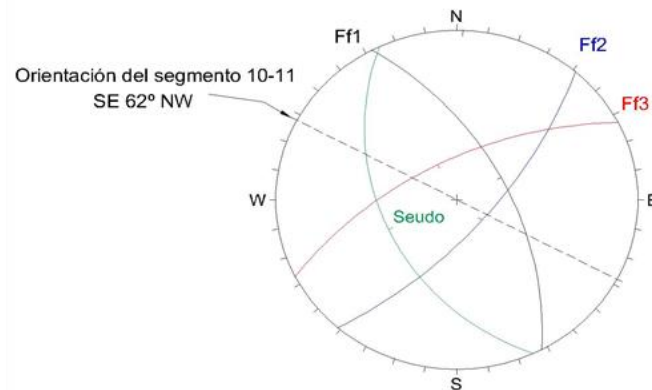


Figura 26. Representación estereográfica de las discontinuidades del intervalo 10 – 11 del plinto (CFE, 2007).

### 3.2.2 Diseño del ancho del plinto

Una vez que se ha definido el eje del plinto se procede a determinar la geometría del mismo, tomando en cuenta las características de la roca como el RQD, el grado de intemperismo de la roca, consistencia de la roca, discontinuidades y método de excavación.

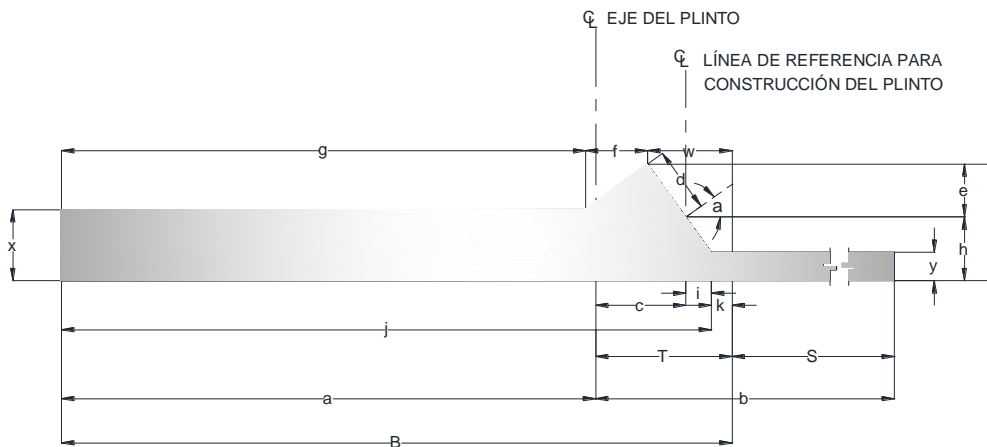


Figura 27. Geometría del Plinto P.H. La Yesca.

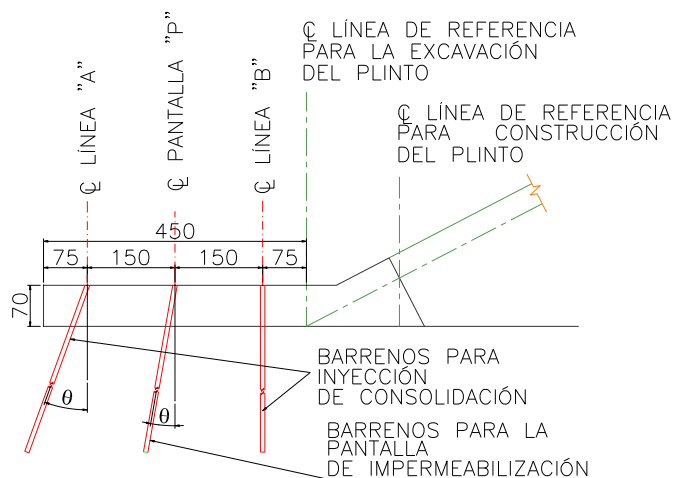
Junto con la modificación de la posición de la cortina, se realizó el replanteamiento de la rasante del plinto y de las galerías para inyección y drenaje, obras indispensables para la formación del plano de estanqueidad. También se rediseñaron los anchos totales de la losa del plinto considerando la clasificación RMR de la roca presente en el nuevo trazo.

Las coordenadas finales de la nueva rasante del plinto se muestran a continuación:

Tabla 3.5 Puntos de construcción de los puntos del plinto y ancho de la losa en los segmentos (CFE).							
Punto	X	Y	Z	Segmento	Plinto externo	Losa interna	Ancho total
1	592 949,35	2 343 778,03	576	1-2	4,50	0	4,50
2	592 972,22	2 343 805,87	552	2-3	4,50	0	4,50
3	592 946,68	2 343 851,16	552	3-4	4,50	0	4,50
4	592 938,79	2 343 876,56	548	4-5	4,50	0	4,50
5	592 966,26	2 343 921,88	515	5-6	4,50	3	7,50
6	693 007,20	2 344 034,55	450	6-7	4,50	7	11,50
7	593 047,16	2 344 072,00	412	7-8	4,50	7	11,50
8	593 079,50	2 344 120,09	375	8-9	7,00	13,50	20,50
9	593 034,80	2 344 199,35	375	9-10	4,50	7	11,50
10	592 936,09	2 344 203,39	435	10-11	4,50	6,50	11,50
11	592 911,12	2 344 219,16	445	11-11'	4,50	5	9,50
11'	592 869,38	2 344 210,54	474	11'-12	4,50	3	7,50
12	592 795,34	2 344 213,56	519	12-13	4,50	0	4,50
13	592 759,11	2 344 237,90	533	13-14	4,50	0	4,50
14	592 668,36	2 344 276,27	576	-	-	-	-

Además de emplearse para la definición de los anchos del plinto, el valor RMR se utilizó como ayuda para emitir recomendaciones para la excavación y tratamientos de soporte de dichos taludes, particularmente los localizados aguas arriba del eje del plinto. A continuación, se muestra una tabla resumen de las recomendaciones emitidas principalmente para la margen derecha.

Tabla 3.6 Tratamientos recomendados para los taludes de la MD del plinto (CFE)				
Tramo	Talud recomendado (horizontal: vertical)	Anclaje de fricción, $f_y = 411,9\text{MPa}$ (4200kg/cm <sup>2</sup> )	Concreto lanzado reforzado con fibras metálicas $f'_c = 20\text{MPa}$ (200kg/cm <sup>2</sup> )	Patrón y longitud de drenaje $\phi = 7,62\text{cm}$ (3")
8-9	1,5:1	-	-	-
9-10	0,25:1	Selectivo en un 15% del área expuesta, de 1" de diámetro, de 6 y 9 m de longitud, en patrón de 2 x 2 m al tresbolillo.	De 10 cm de espesor en el 40% del área expuesta.	Sistemático, patrón de 5 x 5 m y 6 m de longitud.
10-11	0,25:1	Selectivo en un 15% del área expuesta, de 1" de diámetro, de 6 y 9 m de longitud, en patrón de 2 x 2 m al tresbolillo.	De 10 cm de espesor en el 15% del área expuesta.	Sistemático, patrón de 5 x 5 m y 6 m de longitud.
11-11'	0,25:1	Selectivo en un 15% del área expuesta, de 1" de diámetro, de 6 y 9 m de longitud, en patrón de 2 x 2 m al tresbolillo.	De 10 cm de espesor en el 15% del área expuesta.	Sistemático, patrón de 5 x 5 m y 6 m de longitud.
11'-12	0,25:1	Selectivo en un 30% del área expuesta, de 1" de diámetro, de 6 y 9 m de longitud, en patrón de 2 x 2 m al tresbolillo.	De 10 cm de espesor en el 40% del área expuesta.	Sistemático, patrón de 5 x 5 m y 6 m de longitud.
12-13	0,5:1	Selectivo en un 15% del área expuesta, de 1" de diámetro, de 6 y 9 m de longitud, en patrón de 2 x 2 m al tresbolillo.	En toda la superficie expuesta	Sistemático, patrón de 5 x 5 m y 4 m de longitud.
13-14	0,5:1	Selectivo en un 15% del área expuesta, de 1" de diámetro, de 6 y 9 m de longitud, en patrón de 2 x 2 m al tresbolillo.	En toda la superficie expuesta	Sistemático, patrón de 5 x 5 m y 4 m de longitud.



### SECCIÓN TÍPICA

Figura 28. Sección típica del plinto de la Margen Derecha (CFE, 2011).

## 3.3 TRATAMIENTO DEL TERRENO

Una vez construido el plinto se efectuaron inyecciones, los tratamientos son de tres tipos:

- Tratamiento superficial: Este se realiza sobre la roca, bajo el plinto y su vecindad, consiste en rellenar de concreto dental en las oquedades que se localicen en la excavación debido a fallas locales. Cuando se tiene material excesivamente alterado o fracturado se utiliza concreto lanzado que puede ser complementado con malla electrosoldada.
- Inyecciones de consolidación: Son superficiales (hasta 5 m de profundidad) y se diseñan de acuerdo a las condiciones de la roca expuesta.
- Inyecciones profundas: Se realizan en los estratos profundos, entre 1/3 y 2/3 de la altura del embalse, dependiendo de la calidad de la roca.

### 3.3.1 Tratamiento superficial

El tratamiento consiste en la realización de una limpieza superficial hasta encontrar la roca sana en toda el área de desplante, retirando todo el material no apto como los residuos de talud, material aluvial o roca fracturada. Una vez terminada la limpieza de acuerdo a las irregularidades del terreno y donde se encuentren sobre-excavaciones fuertes se colocará

un concreto de nivelación, en los casos donde sea menor se colará monóticamente con el concreto estructural del plinto. Los rellenos se harán con concreto hidráulico o con concreto lanzado según sea necesario, instalando previamente boquillas dirigidas hasta el contacto y las fallas de la roca.

### 3.3.2 Tratamientos especiales

Los tratamientos especiales son las actividades que se llevarán a cabo con dos finalidades, la primera es la de mejorar las propiedades mecánicas de la roca donde se va a desplantar la cimentación de la cortina (plinto) sellando las discontinuidades geológicas y la segunda, crear una pantalla impermeable a través del macizo rocoso por medio de inyecciones de lechada para que junto con la cortina se impida el flujo del agua.

Las actividades a realizar son las siguientes:

#### 1.-Perforación

Los arreglos que se formaron para las perforaciones de consolidación y de pantalla profunda varían en 2 casos según su localización. La sección del plinto que se ubica en el lecho del río se encuentra configurada en cinco líneas, cuatro de ellas eran de consolidación con profundidad de 10 m para las que se ubicaban en los extremos y de 30 m para las de en medio. En el caso de las perforaciones para la pantalla profunda o de impermeabilización la profundidad era de 50 m, aunque podría haber el caso en que pudiera variar según las condiciones de la roca.

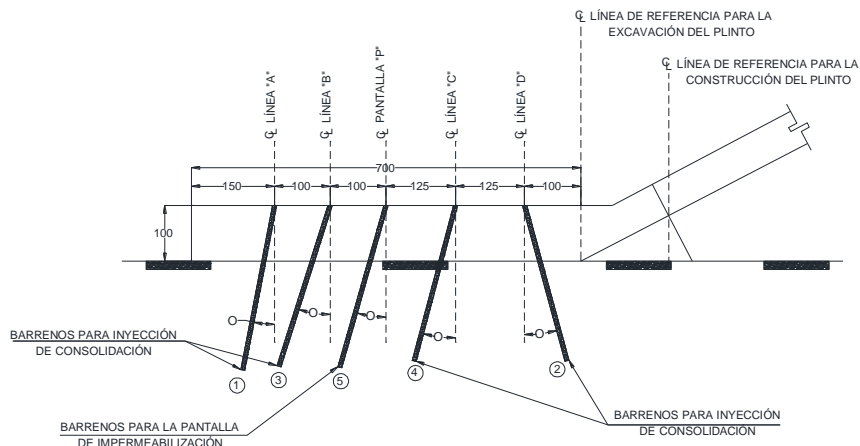


Figura 29. Distribución de los barrenos en el plinto en la sección del lecho del río.

La sección del plinto ubicada en ambas márgenes cuenta con un arreglo diferente, en este caso solo hay dos líneas de perforación para consolidación variando sus profundidades de 10 m para la línea interna y de 20 m para la línea externa. La línea de la pantalla profunda no cambia, sigue con la misma profundidad de 50 m.

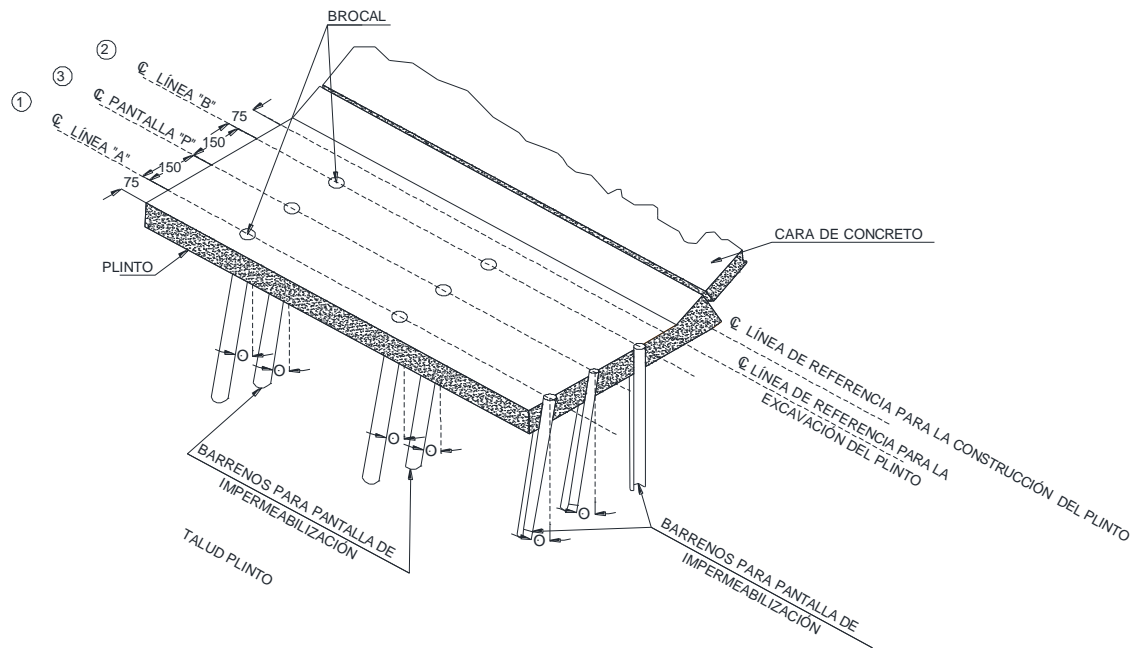


Figura 30. Distribución de barrenos de la sección del plinto en ambas márgenes.

Los barrenos, tanto de las márgenes como del lecho del río, se encuentran ubicados sobre líneas a todo lo largo del plinto y separados a una distancia de 3 m uno de otra organizados en etapas, las cuales son:

- Barrenos de exploración a cada 24 m
- Barrenos de 1ª etapa a cada 12 m
- Barrenos de 2ª etapa a cada 6 m
- Barrenos de 3ª etapa a cada 3 m

La perforación se realizará con equipo track drill con unidad de rotación y martillo de fondo, lográndose en una sola operación desde que se inicia hasta la profundidad de proyecto. En caso de encontrar roca de mala calidad que no permita avanzar en la perforación debido a problemas de inestabilidad, será necesario inyectar la zona y volver a perforar hasta llegar a la profundidad deseada.

## 2.- Lavado de barreno

Esta actividad consiste en introducir agua y aire a presión al barreno mediante el uso de un chiflón o un tubo provisto en la punta de perforaciones que tengan una dirección perpendicular al eje del barreno, pero en el caso de que sea un lavado para un barreno que vaya a ser reinyectado, la dirección del chorro debe de ser paralela al eje. La presión debe ser tal que permita la salida del material producto de la perforación, de inyección, caídos de roca y cualquier otro material hasta que el agua retorne limpia hasta la superficie y el barreno esté libre de toda obstrucción.

## 3.- Saturación previa

La saturación se realizará en la zona de los barrenos que se encuentren por encima del Nivel de Aguas Freáticas (NAF). Se realizará en tramos de 20 m de longitud, iniciando con la parte más baja del barreno y continuando en forma ascendente, colocando el obturador por encima de la sección que se va a saturar y se inyectará agua durante un lapso de tiempo de 30 minutos, o bien hasta llegar a los 200 litros por metro, con una presión de 1 MPa (10 kg/cm<sup>2</sup>). Si en las mediciones efectuadas cada 3 minutos del gasto da como resultado que se ha estabilizado, se puede dar por saturado el tramo.

## 4.- Inyección

En los tramos de inyección para casos de consolidación como de pantalla profunda se usará una lechada de cemento que cumpla con las siguientes características:

- Relación agua/cemento de entre 0.8/1 a 1
- Viscosidad al Cono Marsh de entre 29 y 33 segundos
- Densidad o peso volumétrico entre 1.47 a 1.55 g/cm<sup>3</sup>
- Decantación (sedimentación) menor o igual al 4% en dos horas
- Cohesión (con placa) menor o igual a 0.03 g/cm<sup>2</sup> o 0.2 mm
- Coeficiente de filtrado menor o igual a 0.6
- Cake obtenido de la prueba de filtrado menor o igual a 15 mm
- Resistencia a la compresión simple a la edad de 28 días mayor o igual de 9.8 MPa (100 kg/cm<sup>2</sup>)

La dosificación que se empleaba hasta mayo de 2010 para hacer la lechada de cemento en las inyecciones es la siguiente:

- 50 kg de cemento
- 47 litros de agua
- 1.2 gr de bentonita perfobent
- 0.4 litros de aditivo Rheobuild 716

La elaboración de la mezcla se realizará en sitio a una distancia no mayor de 70 m del barreno a inyectar. La preparación se hará en turbo mezcladores de 1250 r.p.m. adicionando en el siguiente orden los materiales:

- Agua
- Bentonita (1 minuto)
- Cemento (2 minutos)
- Aditivo (1 minuto)

Una vez finalizada la elaboración se procederá a inyectarla en los barrenos en tramos de 5 m, iniciando por el fondo y continuando en forma ascendente hasta llegar al tramo superficial el cual resultará variable, colocando el obturador 0.50 m por debajo del contacto concreto-roca del plinto. El proceso debe de ser en forma continua y no se debe de suspenderse por ningún caso.

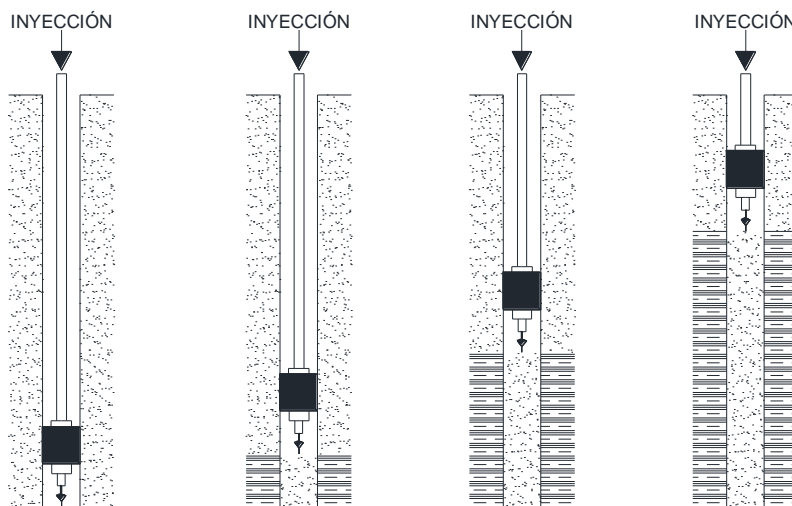


Figura 31. Inyección por progresiones ascendentes de 5 m.



El proceso de inyección se realiza mediante el proceso del método GIN, el cual estará en función de la carga hidráulica a los que estará sometido el embalse obteniendo como resultado los siguientes valores.

Tabla 3.7 Valores GIN de referencia usado en el proyecto P.H. La Yesca			
Curva GIN (PxV)	Elevación	Presión Máxima (Kg/cm <sup>2</sup> )	Volumen Máximo (l/m)
600	580 a 495	15	100
1000	495 a 410	25	125
1400	410 a 325	35	140

El proceso se iniciará con una presión de 0.5 MPa (5kg/cm<sup>2</sup>) e ira incrementándose a medida que va disminuyendo el gasto, es decir, si el gasto en el brocal es menor de 2 l/min se deberá dar un incremento de 0.5 MPa hasta sellar el tramo, existiendo tres diferentes formas: presión máxima especificada, intersección de la curva GIN o volumen máximo establecido. Esta información se podrá visualizar mediante la elaboración de la gráfica de presión vs volumen.

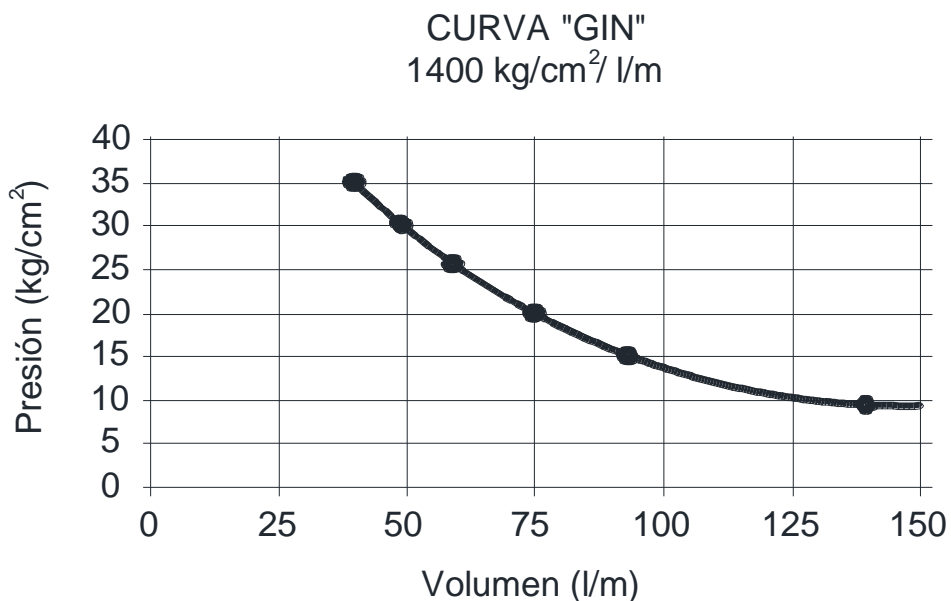


Figura 32. Curva GIN de referencia.

El orden en que se deben realizar las inyecciones de consolidación y de pantalla profunda en los segmentos del plinto 1-5 y 8'-12 (El. 567.00 - 440.00 msnm) es el siguiente:

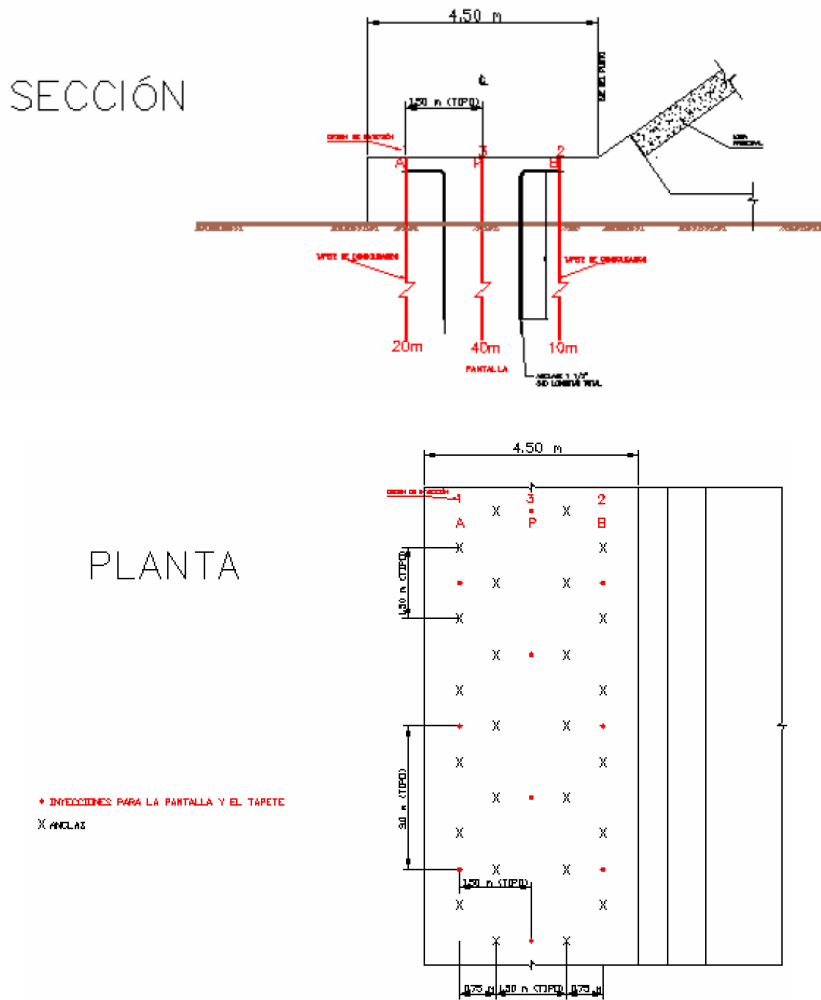


Figura 33. Detalle de inyecciones y anclas en la elevación 567-440 msnm del plinto (CFE, Informe 07-37-SGM/R).

Una vez conocido el orden de las líneas de inyección, se debe calcular la secuencia de las etapas que lleva cada línea, es decir, en la línea A se debe limitar la zona de inyección en secciones de 24 m tomando como extremos dos barrenos de exploración, una vez perforados e inyectados se continua con los barrenos de 1ª etapa ubicados a 12 m (uno entre cada barreno de exploración), posteriormente siguen los de 2ª etapa a cada 6 m (uno entre cada barreno de 1ª etapa) y se termina con los de 3ª etapa, a cada 3 m. Pueden existir casos en los que haya necesidad de realizar de 4ª etapa a cada 1.5 m.

Una vez transcurridas 24 horas de haberse terminado de inyectar el barreno se limpiará con aire a presión y se llenará con mortero, teniendo en cuenta que existirá decantación del material.

### 3.3.3 Pantalla de Margen Derecha (MD)

Se realizó desde el plinto y desde las galerías GD-1, GD-2, GD,3 y GD-4. El plinto en la MD tiene 6 quiebres que se reflejan en las galerías de inyección y, por consecuencia en las pantallas. La geometría del plano estanco es irregular por la presencia de quiebres que requirieron abanicos de inyección para evitar ventanas.

Los tímpanos, de las galerías de inyección MD, se encuentran a la siguiente distancia del plinto:

- GD-1: 38 m; Tímpano bóveda: EL. aprox. 435 msnm, bajo el plinto en el punto P-14.
- GD-2: 10 m; Tímpano bóveda: EL. aprox. 488 msnm, bajo el plinto en el punto P-40 más abajo del P-12.
- GD-3: 35 m; Tímpano bóveda: EL. aprox. 438 msnm, bajo el plinto a 10 m más arriba del punto P-11.
- GD-4: 20 m; Tímpano bóveda: EL. aprox. 410 msnm, bajo el plinto en el punto P-10.

Desde los tímpanos se realizaron abanicos de inyección de cierre de la pantalla ejecutada desde el plinto.

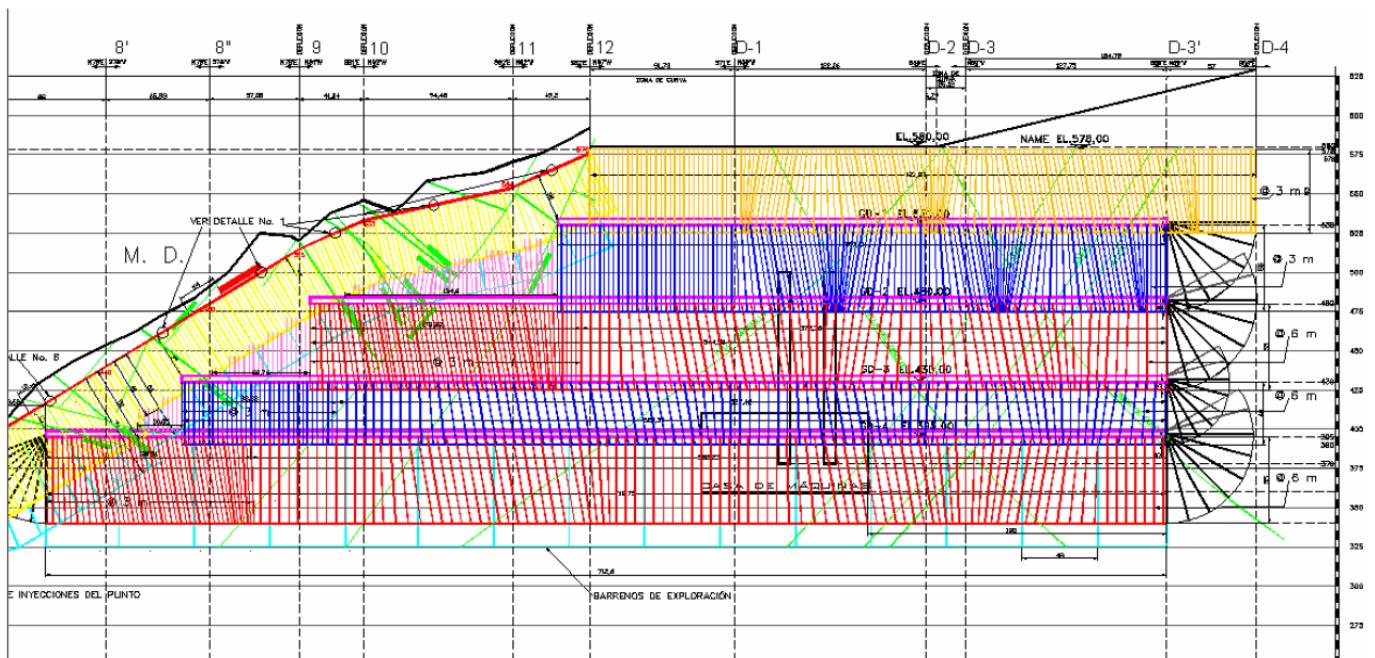


Figura 34. Sección del plano de estanqueidad Margen derecha (CFE, Informe 07-37-SGM/R).

## CAPÍTULO 4

### ***Filtraciones en el punto de inflexión P-12 del plinto.***

El primer llenado del embalse de la C.H. La Yesca se realizó en dos etapas, la primera entre el 13 de abril de 2012 y julio de 2013 en la cual tuvo filtraciones al pie de la cortina; la segunda fue de julio de 2013 a enero de 2014. Durante este tiempo se observaron filtraciones anormales como lo muestra la tabla 4.1 asociadas al descenso del embalse.

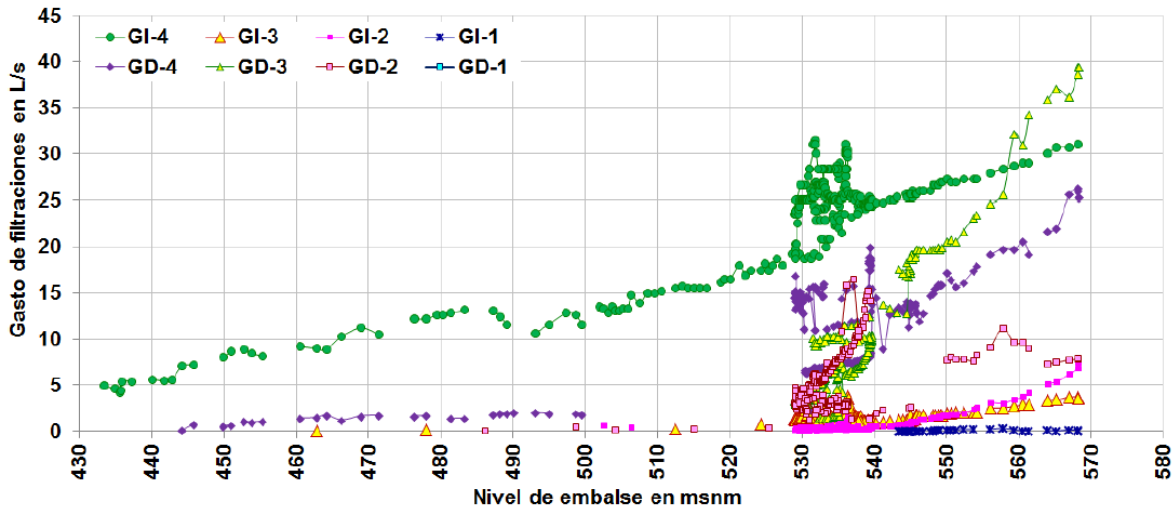
<b>Tabla 4.1 Aumento de filtraciones en el embalse de 2012 a 2014</b>			
<b>Periodo de tiempo</b>		<b>Nivel de embalse</b>	<b>Filtraciones</b>
<b>De</b>	<b>a</b>	<b>msnm</b>	<b>L/s</b>
13 abril de 2012	Julio 2013	542,70	90 >
24 julio de 2013			Aumento gradual
18 septiembre 2013		565,27	Incrementos diarios
28 septiembre 2013		567,02	
24 septiembre	25 septiembre 2013		30,0
Octubre 2013		571,50	540
Enero 2014		573,69	594,80

Si bien la magnitud de las filtraciones no representaba riesgo estructural para la presa, fue conveniente realizar estudios para identificar el origen y las causas de su evolución, a fin de precisar los trabajos a realizar para eliminar o reducir las filtraciones a niveles adecuados para la operación de la Central.

#### **4.1 ANALISIS PRELIMINAR**

Del 23 al 27 de septiembre de 2013 se realizó un recorrido de inspección multidisciplinario de las áreas de Instrumentación, Seguridad de Estructuras, Geología y Mecánica de Rocas, con la finalidad de obtener información del posible origen de las filtraciones.

El análisis de la información obtenida con la instrumentación geotécnica, las inspecciones al sitio y las pruebas realizadas indica que las filtraciones captadas en la galería al pie del talud aguas abajo provienen principalmente de la margen derecha en las zonas cercanas al plinto, donde se identifican sitios poco favorables y el mayor incremento en la tasa de filtraciones al interior de las galerías GD-2, GD-3 y GD-4.



*Figura 35. Detalle de la gráfica de filtraciones en las galerías de inyección y drenaje (Departamento de Seguridad de Estructuras GEIC)*

A partir de estas evidencias observadas se recomienda hacer acciones inmediatas como:

- Hacer una campaña de estudio sobre el comportamiento de las filtraciones y analizar los cambios en la piezometría instalada por el efecto de la obturación de los barrenos de drenaje cercanos al tímpano oriente de las galerías de la margen derecha.
- Inspección de la superficie de la cara de concreto con equipo subacuático ROV, y buzos.
- Diseñar un proyecto de inyecciones de consolidación de refuerzo de pantalla impermeable para el control de filtraciones en la margen derecha.

Dentro de las acciones a corto plazo se encuentran:

- Canalizar las filtraciones de las galerías GD-3 y GD-4.
- Ejecución de tratamientos de inyección de consolidación y refuerzo de la pantalla impermeable de la margen derecha.

- Perforación de drenajes descendentes, con la instalación de filtros en las galerías de la margen derecha.

#### **4.1.1 Galerías de la margen derecha**

Durante julio y en especial la última semana de septiembre de 2013, se presentaron incrementos en las filtraciones de las galerías GD-3 y GD-4, observándose el mayor incremento en GD-3, con un gasto total de 40 L/s al 4 de octubre de 2013 y de 45 L/s el 11 de octubre.

Por tal motivo se colocaron geotextiles en las descargas de los barrenos de la pantalla de drenaje con mayores aportes en el ramal derecho (plinto) con el objeto de verificar el arrastre de material, con resultado positivo. Se tomaron muestras para enviarlas al laboratorio de petrología para su identificación.

#### **4.1.2 Filtraciones en los ramales de las galerías de margen derecha**

La galería GD-2 en su extremo derecho (bajo el plinto) quedó con una cobertura de roca del orden de 6 m, la cual es menor al respecto a la superficie del terreno que el resto de las galerías, debido a que al momento del giro de la cortina ya se encontraba excavada y el nuevo proyecto de galerías se diseñó para aprovechar ese ramal.

Durante el proceso de llenado en el 2012 se mantuvo sin filtraciones y con una carga de agua de hasta 50 m, sin embargo, fueron apareciendo por los barrenos de la pantalla de drenaje y gradualmente fisuras generadas en el revestimiento en prácticamente todo perímetro de la galería, alcanzando un gasto de 18 L/s.

Se revisó su condición geológico-geotécnica y no se detectó un problema regido por alguna estructura geológica mayor, sino por el efecto de llenado abre la masa de roca de mala a regular calidad en el extremo oriente de la galería. Por lo que se recomendó poner un tapón estructural ciego, para restituir las condiciones de cobertura y un casquillo de refuerzo en la zona de influencia de agrietamientos. Posteriormente se realizó una inyección de contacto concreto-roca eliminando prácticamente las filtraciones.

De acuerdo a los registros de instrumentación se observó que la construcción del tapón en la GD-2, sumado al efecto del incremento del embalse, tuvo un efecto en la distribución de las filtraciones al sellar la entrada de agua en barrenos de drenaje y agrietamientos de la zona y el incremento de las filtraciones en los ramales oriente de las galerías GD-3 y GD-4 bajo el plinto.

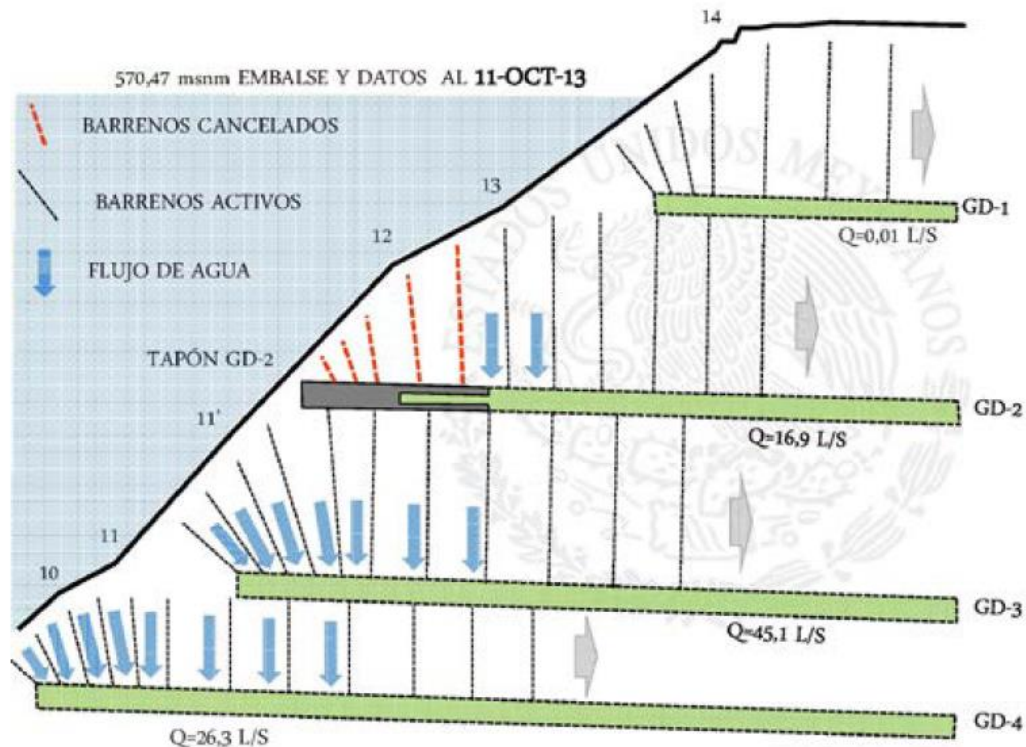


Figura 36. Esquema de la interacción de las galerías y barrenos de drenaje en el sector oriente, próximos al plinto (sección por la pantalla de impermeabilización) (CFE,2013).

En las figuras 37 y 38 se muestra una sección del plinto de la margen derecha, con una longitud aproximada de 140 m, que coincide con la zona de los tímpanos oriente de las galerías derechas, en particular con la GD-2 y GD-3, donde se presenta una condición topográfica abrupta en el talud aguas abajo, generando un pilar de roca reducido respecto a la pantalla de drenaje y coberturas menores respecto a las galerías, como se observa en los perfil de las figura 39.



Figura 37. Vista de MD, trazo del plinto y calidad RMR del macizo rocoso (CFE, 2014).

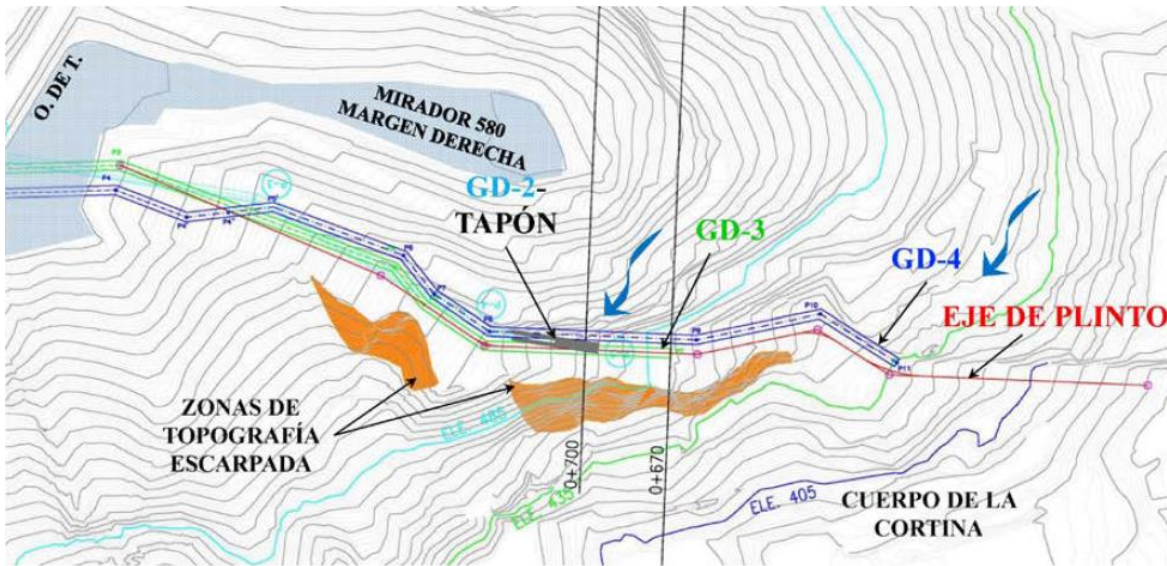


Figura 38. Planta topográfica y su relación con los tímpanos oriente galerías GD-2 y GD-3 (CFE,2013).

La condición geométrica se ilustra en la sección 0+700 del plinto, en el tímpano de la galería GD-2, donde además se ilustra la relación geométrica entre la pantalla impermeable, la pantalla de drenaje y la superficie del terreno escarpada.



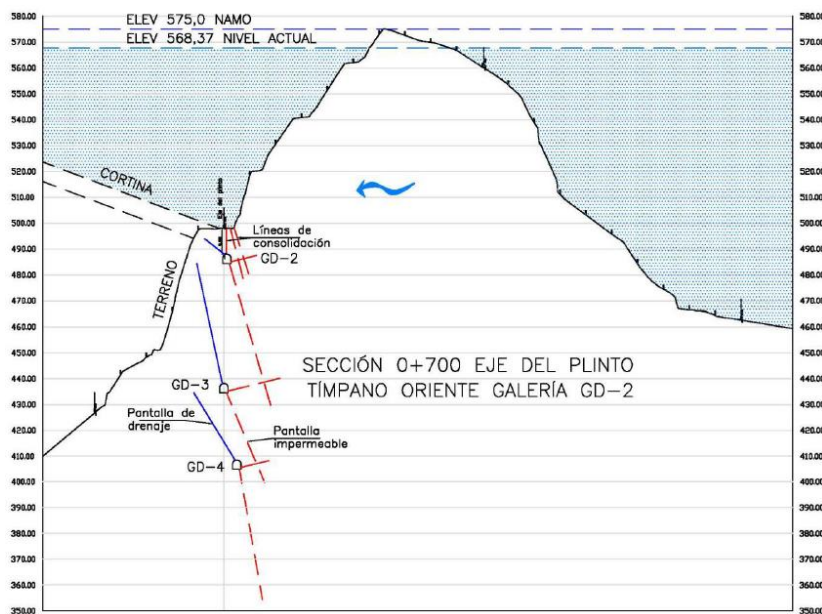


Figura 39. Sección 0+700 del eje del plinto. Por el tímpano oriente galería GD-2 (CFE,2013).

En la galería GD-2, la de menor cobertura, se acentúa el efecto, tanto en piso como en la excavación del plinto, como en el talud de aguas abajo, donde se construyó el tapón. Hacia la GD-4, la topografía se torna más suave, aumentando la cobertura lateral de roca, sin embargo, en todos los casos el fondo de los barrenos de la pantalla de drenaje hacia arriba y hacia aguas abajo, queda relativamente cerca de la superficie del terreno, esta condición es crítica en la zona de los tímpanos reduciendo gradualmente conforme la galería se interna en la ladera derecha, reflejándose en el mayor aporte de filtraciones hacia las galerías, como se observa en el perfil de la figura 36.

Sumado a la condición geométrica, en la zona se presentaron altos consumos durante los trabajos de la pantalla de inyecciones de impermeabilización desde el plinto (figura 40), donde estos se correlacionan con las características de la masa rocosa, la cual consiste en una roca intacta dura compacta, y un alto fracturamiento, con un macizo rocoso de calidad media y algunas franjas de mala calidad asociadas a las estructuras geológicas presentes: subvert subverticales, con trayectorias paralelas y ortogonales al eje del plinto y pantalla, así como el sistema persistente de la familia Pilar.

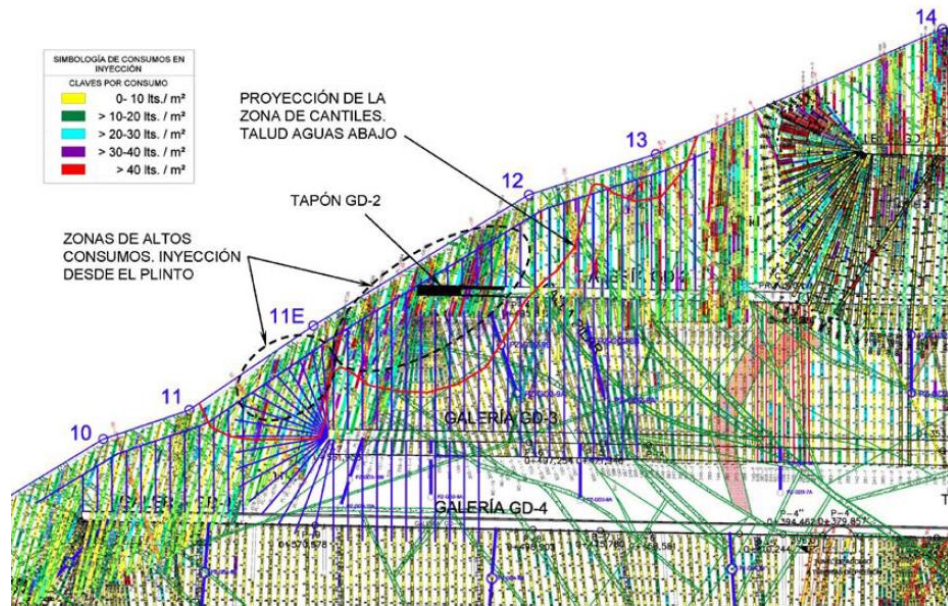


Figura 40. Zona de altos consumos en el plinto margen derecha y su correlación con la zona de topografía escarpada (sección por el eje de la pantalla de impermeabilización) (CFE,2013).

### 4.1.3 Cortina

Las filtraciones medidas en la galería al pie de la cortina siguieron al incremento del embalse, desde que se comenzó el llenado del embalse (abril 2012) hasta finales del mes de septiembre de 2013; alcanzando una filtración total del orden de 80 L/s para un nivel de embalse de 535 msnm; pero cuando el embalse supero la elevación 540 msnm, las filtraciones incrementaron a valores de 8 L/s por m de carga. Para octubre 11 de 2013, las filtraciones aumentaron del orden de 6 veces mayor al gasto de filtración.

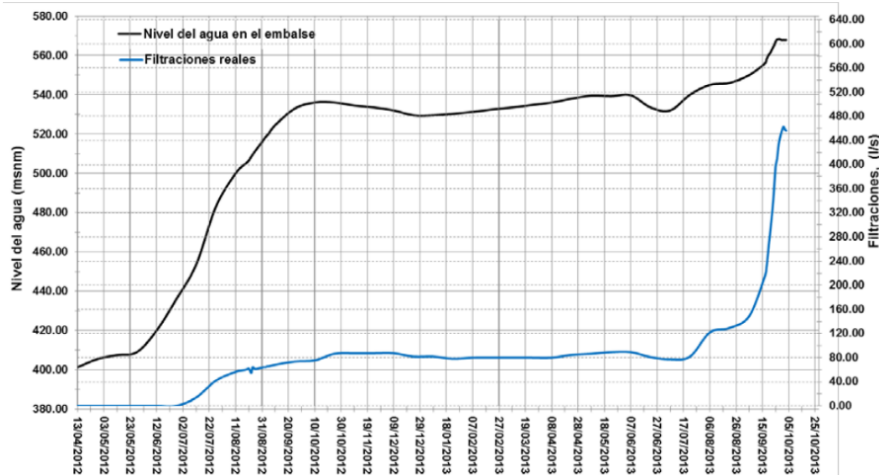


Figura 41. Nivel de agua en el embalse y filtraciones en la galería al pie de la cortina con el tiempo (CFE, Datos al 4 de octubre de 2013).

### 4.1.4 Cara de concreto

Para evaluar el comportamiento de la losa de concreto durante la construcción, primer llenado y operación de la Central, se instalaron instrumentos para conocer la deformación de losas, el cierre o apertura de juntas y la interacción de la losa con el bordillo.

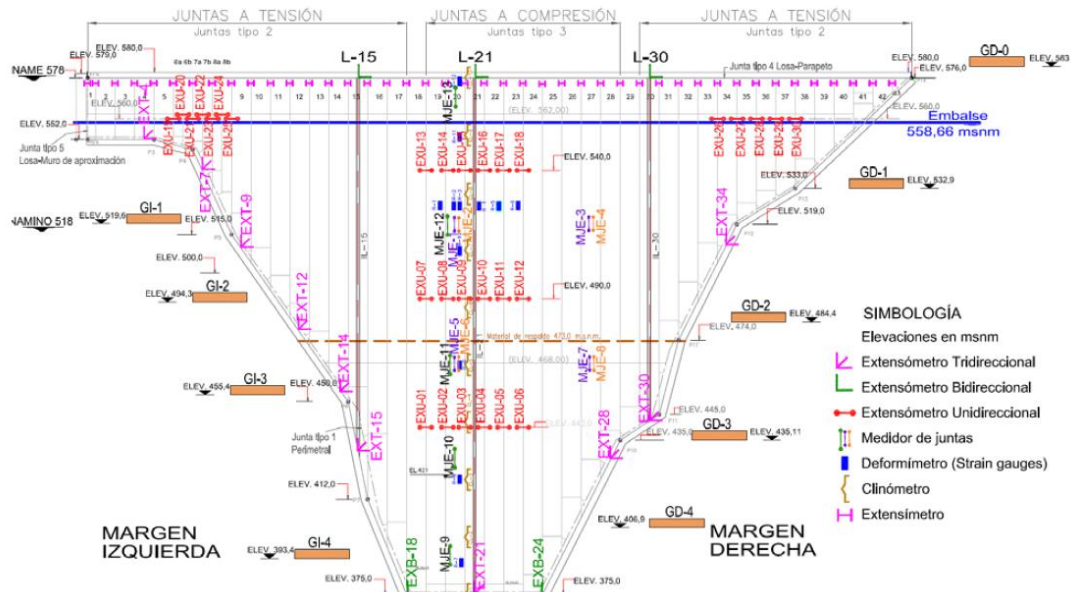


Figura 42. Instrumentación instalada en la cara de concreto (CFE,2013).

Para descartar una posible falla en la cara de concreto se introdujo una cámara de video en los inclinómetros IL-15, IL-21 e IL-30.

Inclinómetro	Longitud de sonda (m)	Elevación del agua (msnm)
IL – 15	184,50	468,57
IL – 21	204,50	457,65
IL – 30	211,70	453,60

Sin embargo, no se observó desacople de los tubos que indiquen ruptura de las losas, pero la integridad de la cara de concreto debía ser verificada con una inspección subacuática.

Los mayores incrementos de desplazamiento en la junta perimetral ocurrieron del 14 de julio al 30 de septiembre de 2012, debido al aumento de carga hidráulica durante la primera etapa del llenado.

A partir del 9 de septiembre de 2013 se observa tendencia al cierre de juntas en la dirección X, excepto en el EXT-34-X que indica una apertura. En la margen derecha los extensómetros

EXT-30 y EXT-34 muestran tendencia a cizallamiento en direcciones contrarias, cabe mencionar que hay arrastre de finos en la galería GD-3 lo que podría estar generando la pérdida de apoyo del plinto, ya que donde está instalado el EXT-30 se registró un pequeño asentamiento súbito del 22 al 23 de septiembre de 2013. Por todo esto es importante monitorear el comportamiento de esta zona y evaluar la posibilidad de reforzar la pantalla de inyección y mitigar la posibilidad de erosión de las estructuras geológicas por el arrastre de material.

De manera particular, el extensómetro EXT-34 registró pequeños desplazamientos de cizallamiento con tendencia contraria a la esperada, además registró deformaciones por los sismos ocurridos en enero y marzo de 2013 (magnitud de 1.7° Richter).

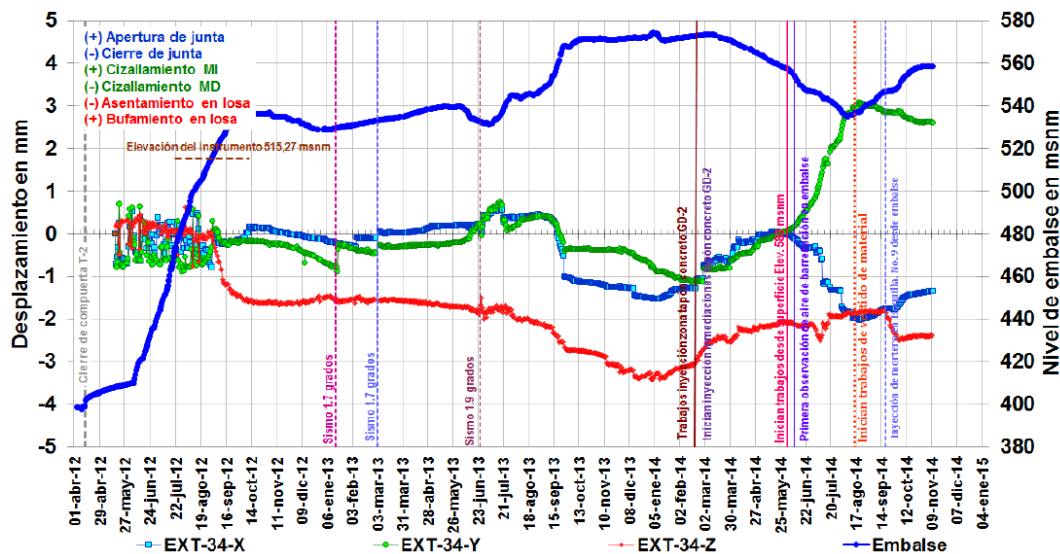


Figura 43. Desplazamiento en el extensómetro EXT-34 de la junta perimetral, Elev. 515 msnm (CFE, 2013).

#### 4.1.5 Zona de filtración

Del 7 al 15 de noviembre de 2013 personal de Mecánica de Rocas obturó algunos barrenos de drenaje para medir las presiones de rechazo y estudiar la redistribución de la presión hidráulica en la ladera y su influencia en el comportamiento de las filtraciones al pie de la cortina. Recomendando el reforzamiento del plano estanco desde las galerías GD-2 y GD-3, además de realizar estudios sísmicos con la inmersión de hidrófonos para detectar zonas de

filtraciones entre los puntos P11 y P13 del plinto y verter materiales para sellar las estructuras geológicas en la zona cercana al plinto.

## **4.2 REFUERZO DE PANTALLA (1ER. ETAPA)**

### **4.2.1 Tratamientos de inyección GD-2**

La realización de los tratamientos de refuerzo de la pantalla en la galería GD-2, se conforma de dos etapas.

La primera etapa inicia en febrero del 2014, con la ejecución de las tres primeras líneas de barrenos que se ubicaron en la zona aguas arriba inmediatamente por detrás de la pantalla de proyecto y forman parte del arreglo integral de inyección que arroparon al tapón de concreto.

Se comienza con estas tres primeras líneas de refuerzo para conocer el estado que guardaba la zona por tratar ante el nivel del embalse con una cota de 571 msnm y un gasto de 577 l/s, y servirían como un tratamiento de exploración, para poder optimizar el tratamiento programado.

### **4.2.2 Inyección de barrenos ascendentes y descendentes GD-2**

Este tratamiento de inyección contemplo la ejecución de ocho paraguas de inyección complementándose con un par de pantallas de refuerzo por detrás de la pantalla impermeable de construcción con una zona de influencia de 24 m hacia la zona de acceso de la galería. La distribución geométrica de este tratamiento, tuvo como objeto cubrir tanto la zona de aguas arriba como aguas abajo de la galería GD-2. En la figura 44 se indica por medio de un perfil, la ubicación de la galería GD-2 y la interacción que se presenta el tratamiento con el plinto y con la galería GD-3.

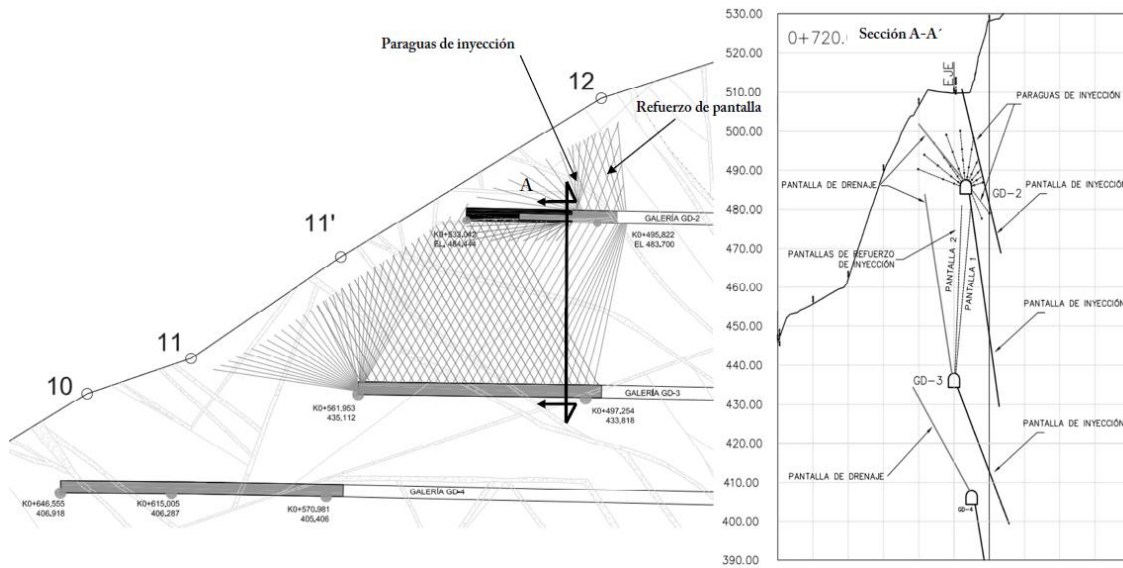
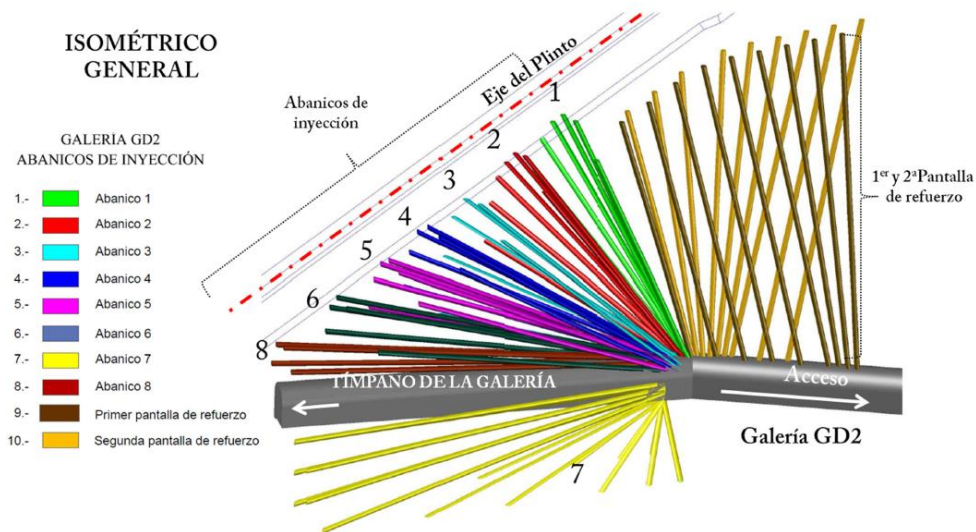


Figura 44. Perfil por eje de las galerías en la margen derecha esquematizando el tratamiento de refuerzo en galerías GD-2 y GD-3 (CFE, 2015).

La configuración geométrica del tratamiento se formó por medio de dos secciones.

- Sección 1. Refuerzo de pantalla por medio de dos líneas de inyección ascendentes ubicadas por detrás de la pantalla original, a 3 m de ésta, con una separación en el fondo de los barrenos a 2.6 m a lo largo de la pantalla. La separación entre la primer y segunda pantalla de refuerzo presentó un arreglo tresbolillo con una separación de 2.5 m entre ellas, limitándose 3 m por debajo del nivel de desplante del plinto.
- Sección 2. Está conformado por un arreglo geométrico de 8 abanicos o paraguas de inyección, de los cuáles 7 arroparon al tapón de concreto en forma ascendente, separados a cada 0.5 m, desde el paño exterior del tapón de concreto hasta el acceso de la galería, distribuidos en una longitud de 3 m; el octavo abanico fue descendente y conectó el tratamiento de la galería GD-2 con el tratamiento de refuerzo ascendente de la galería GD-3. La separación al fondo de los abanicos fue del orden de 3 a 3.5 m, presentando ángulos de inclinación con respecto a la vertical de 23 a 75°, es decir, movilizándose desde aguas abajo hacia aguas arriba del tapón a lo largo de 7 barrenos perimetrales distribuidos uniformemente por abanico desde el nivel de desplante del plinto hacia la clave del tapón de concreto.

El orden de perforación e inyección del tratamiento de la galería GD-2 se basó principalmente en tratar las zonas desde aguas arriba hacia aguas abajo, con la finalidad de atender las principales anomalías o defectos que pudiera presentar la pantalla existente e ir tratando las filtraciones residuales que se generaran conforme se avanzara con el tratamiento.



*Figura 45. Distribución geométrica de los abanicos de inyección y pantallas de refuerzo en galería GD-2 (CFE, 2015).*

Con respecto a los parámetros de inyección fijados en la galería GD-2, se zonificaron en dos partes:

- Zona 1. Comprendida 5 m por debajo del nivel de desplante del plinto e inyectada bajo una presión máxima efectiva de 5 kg/cm<sup>2</sup>. Dicho sector también comprendió los primeros 5 metros sobre el revestimiento de la galería GD-2.
- Zona 2. Comprendida entre los 5 metros por debajo del nivel de desplante del plinto y los primeros 5 metros por arriba del revestimiento de la galería GD-2, para esta zona, la inyección máxima efectiva empleada fue de 10 kg/cm<sup>2</sup>.

Una vez descartadas las filtraciones en la zona de las dos pantallas de refuerzo, se dio inicio con el tratamiento descendiente profundo hacia la galería GD-3. Con ello, se reafirmo que el paso de agua se encontraba en el macizo comprendido entre los puntos P12-P11' del plinto y el tapón de concreto de la galería GD-2.

### **4.2.3 Inspecciones salinas**

Desde el embalse se realizaron pruebas con salmuera para verificar si hay flujos de filtración desde el embalse hacia las galerías GD de margen derecha o hacía la galería GF (pie de la cortina). Esto por medio de 4 puntos en los bordes del plinto entre las elevaciones 475 msnm y 518 msnm.

De este modo se detectó traza de la salmuera vertida en el punto 2, en la galería GD-2 y en las filtraciones al pie de la cortina, lo que indica una comunicación directa entre el embalse a la elevación 490 msnm con la GD-2 y con el terraplén de la cortina.

Desde una lancha se realizaron fotografías del talud del morro sobre las cuales se identificaron y marcaron fracturas subverticales abiertas que podrían ser potenciales vías de filtración. El talud se presenta muy deteriorado, con numerosas fracturas abiertas que delimitan pequeñas rocas, muchas de ellas sueltas.

### **4.2.4 Colocación de concreto dental y Plataforma +580**

Para mitigar las filtraciones en la margen derecha de la C.H. La Yesca, se recomendó que, en las fallas geológicas propensas al paso franco de agua, encontradas en el espolón de roca, se realizará la colocación de concreto dental con la finalidad de impedir el paso de agua del embalse a través de estas hacia el interior de la presa.

La ejecución de los trabajos inició en junio del 2014 en los taludes Sur y Oriente, en estas zonas se realizaron trabajos de limpieza exhaustiva, para retirar el material de depósito alojado dentro de la estructura de falla. Por medio de estos trabajos y a la exploración geológica-geotécnica se identificó en el Talud Sur una estructura subvertical donde se recomendó ejecutar un tratamiento por medio de concreto dental, de igual forma se ejecutaron trabajos de concreto lanzado desde el espolón de roca, para reforzar y dar estabilidad a los taludes y así reducir las posibles infiltraciones originadas por la mala calidad del macizo.





Figura 46. Proyección de sitios donde se ejecutaron tratamientos de concreto dental, vista lateral del Talud Sur del espolón de roca, (CFE, septiembre 2014).



Figura 47. Proyección de sitios donde se ejecutaron tratamientos de concreto lanzado, vista lateral del Talud Sur del espolón de roca, (CFE, agosto de 2014).

Otra alternativa de solución consistió en verter material desde la plataforma +580 msnm con la ayuda de los barrenos con longitudes superiores a los 100 m de longitud direccionados a las zonas de mayor aportación de agua de la galería GD-2, sin embargo, al ejecutar los trabajos de perforación desde superficie, se observaron comunicaciones de aire francas entre el embalse, ocasionados tanto por los trabajos de perforación como por la baja cobertura de roca que presentaba el talud sur del espolón re roca, los cales daban indicios de los dalos generados en la masa. Con base a estos eventos se inyectó aire en los barrenos donde se interceptaron las vías francas de agua más importantes en la galería GD-2. En la figura 48 se

observan los puntos de salida de aire en el embalse inducidos tanto de la galería GD-2 como del proceso de perforación desde la plataforma 580 msnm.

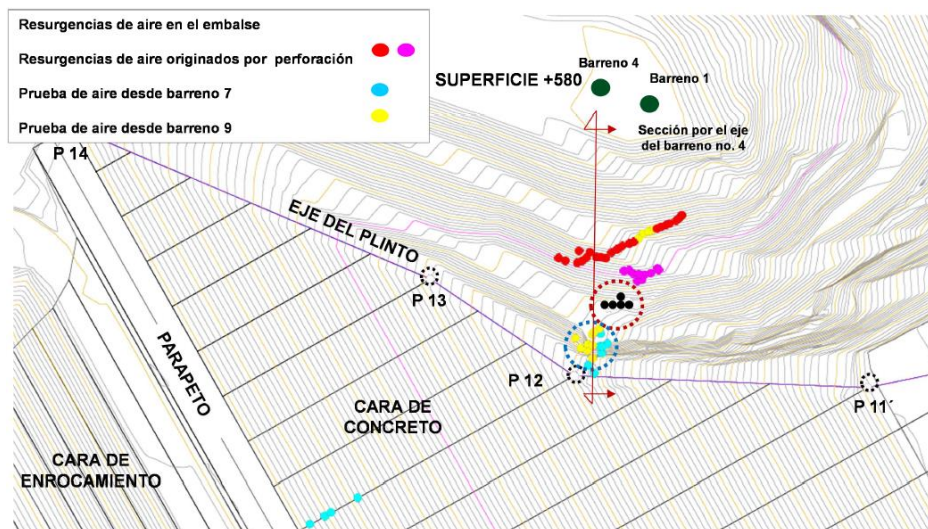


Figura 48. Proyección puntos de resurgencia de aire en el embalse inducidos por la inyección de aire desde GD-2, como por los trabajos de perforación. Vista en planta desde el Talud Sur (CFE, 2015).

#### 4.2.5 Inspecciones subacuáticas y boquillas

Con el objeto de inspeccionar las zonas donde se localizaron y proyectaron los puntos de salida de las resurgencias de aire desde superficie, se recomendó realizar una serie de filmaciones por debajo del nivel del embalse, en las posibles zonas de aportación de filtraciones hacia las principales estructuras de la ladera derecha, en las cuales se incluyen el espolón de roca, la losa del plinto, las juntas de cara de concreto y el socavón minero ubicado en la elevación +502.

Durante el 28 de julio y el 1 de agosto de 2014 se realizaron inspecciones subacuáticas por parte de la brigada de buceo de CFE, con apoyo de la inyección de aire en dos barrenos de la GD-2 se detectó burbujeo en la zona del plinto de la margen derecha en el contacto concreto-roca entre los puntos P11' y P12, así como la presencia de puntos de alimentación de filtraciones (zonas de succión) en el talud de roca de la ladera derecha con apertura de fracturas desde 38 hasta 75 mm (1.5 hasta 3"). Estas se apreciaron más claro cuando se inyectó aire en el barreno GD2-P1-52 de la galería GD-2, observaron salida de aire aproximadamente a la elevación 500,00 msnm. Además de reportar que en la junta de las

losas L-34 y L-35 hay separación entre el marco del contenedor de ceniza y la losa de concreto, aproximadamente entre las elevaciones 518,00 a 530,00 msnm.

Como parte de las medidas necesarias para mitigar las filtraciones se colocaron 11 boquillas para el vertido de materiales, en zonas con fracturamiento abierto que presentaban filtración hacia la ladera, detectadas entre los puntos P11 y P12 del talud aguas arriba, cerca del plinto en la margen derecha, cuatro se localizan entre las elevaciones +498.00 y +499.00 (zona de herradura) y, entre las elevaciones +513.00 y +520.00 cercanas al punto 12 del plinto; las siete restantes se colocaron en el contacto concreto-roca del plinto.

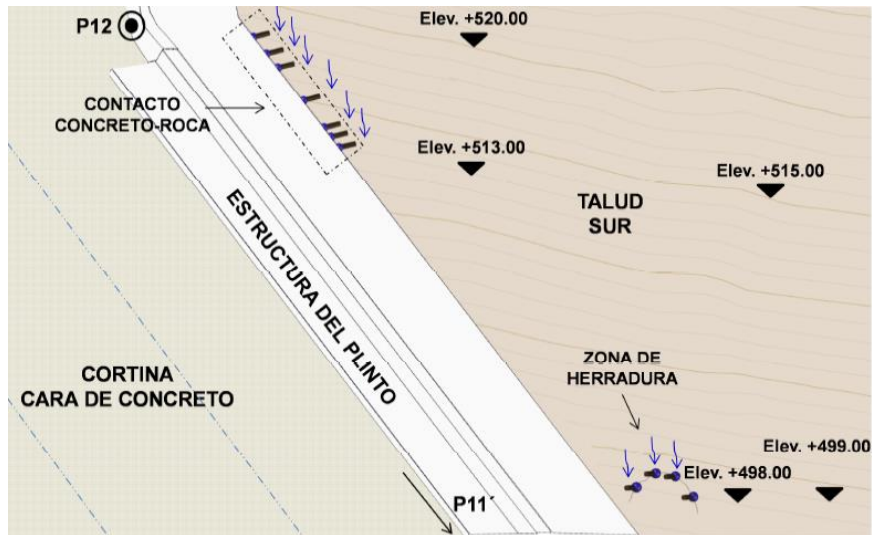


Figura 49. Trabajos de inspección subacuática, proyección de puntos de succión y localización de boquillas (CFE, 2015).

A partir del 11 de agosto de 2014 se comenzó el segundo llenado del embalse, las filtraciones aumentaron conforme el incremento de la carga hidráulica, pero el 15 de agosto de 2014 al iniciar los trabajos de vertido de mortero en las boquillas instaladas en la zona de fracturamiento abierto, detectadas entre los puntos P11 y P12 del talud aguas arriba, cerca del plinto en la margen derecha, las filtraciones disminuyeron.

Derivado de estos trabajos se presenciaron comunicaciones francas de mezcla en la galería GD-2 y en los barrenos de drenaje de la galería GD-3, de igual forma se observaron resurgencias de mezcla por debajo del nivel del embalse donde la brigada de buceo realizó una serie de calafateos para contrarrestar tales condiciones.

#### 4.2.6 Rodamina 6G

Con la finalidad de determinar la trayectoria de las vías francas de agua detectadas en la ladera derecha de la C.H. La Yesca, galerías GD-2, GD-3 y GF, se aplica un trazador mediante la aplicación del reactivo orgánico fluorescente Rodamina 6G desde la superficie +580 hasta una de las boquillas instaladas en la zona de la herradura.

Se determinó realizar la prueba en dos etapas con diferentes cantidades de Rodamina 6G: la primera con una inyección de 50 gr y la segunda con 150 gr. De igual forma se seleccionaron 5 puntos de inyección a diferentes elevaciones (tabla 4.3 y figura 44).

Tabla 4.3 Localización de los sitios de inyección y de medición CFE, 2014.		
SITIO	CADENAMIENTO	COTA (msnm)
GD – 2	0+475	485
GD – 3	0+505	435
C – 9	S/C	457
GDF	S/C	390
GDF	S/C	390

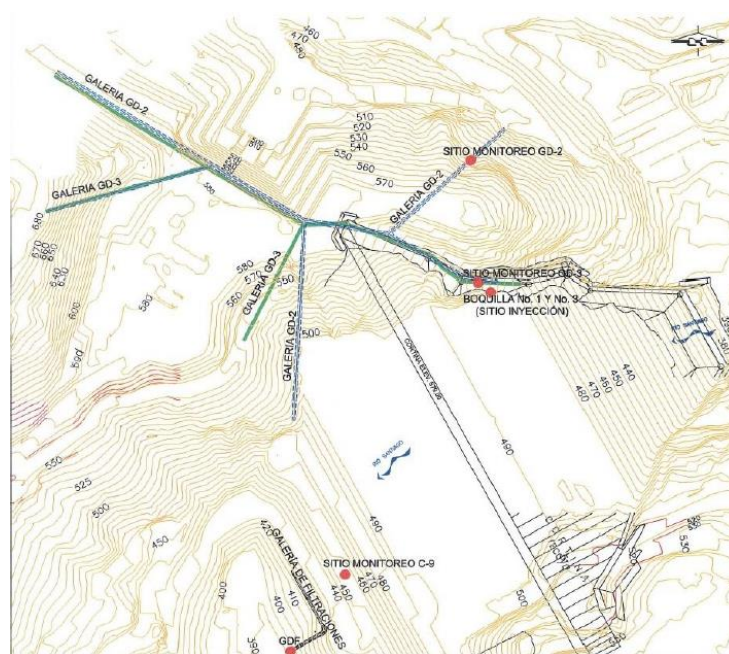


Figura 44. Localización de los sitios de inyección y monitoreo (CFE, 2014).

En los resultados obtenidos en la primera prueba de inyección no se observan cambios en las mediciones, ya que todos los valores se encuentran debajo del límite de cuantificación, por lo que se concluye que ninguno de los equipos recibió alguna señal por la presencia de la Rodamina 6G.

En la segunda inyección se observan un cambio en la conductividad eléctrica los cuales generan picos en las lecturas, los cuales están por debajo del límite de cuantificación.

De lo anterior se reportó disminución de la resistividad en el agua de la galería de filtraciones al pie de la cortina, deduciendo que hay aportación de agua a través de la ladera derecha hacia el cuerpo de la cortina, de igual manera se presentaron puntos de succión importantes.

#### 4.2.7 Trabajos de limpieza subacuáticos

Para complementar las primeras inspecciones subacuáticas y conocer las condiciones de la estructura del plinto, del 22 al 26 de septiembre del 2014, la brigada de buceo realizó trabajos de limpieza removiendo el material alojado sobre la superficie de dicha estructura. Derivado de esto se identificaron varias grietas alrededor de la losa del plinto cerca del punto P12, entre las elevaciones 520 a 523 msnm, la cual tiene 1 cm de abertura, con desnivel y cizallamiento de 0,5 cm aproximadamente, por lo que se instalaron dos medidores de juntas para monitorear su posible evolución. Se desconoce si el agrietamiento es local debido a que el área inspeccionada fue pequeña; por lo que es necesario continuar con las inspecciones subacuáticas de detalle en la zona de la grieta, así como en otros sitios del plinto para verificar su estado físico, además de continuar con el programa de medición y seguimiento de la instrumentación para detectar oportunamente cualquier cambio en las tendencias actuales.

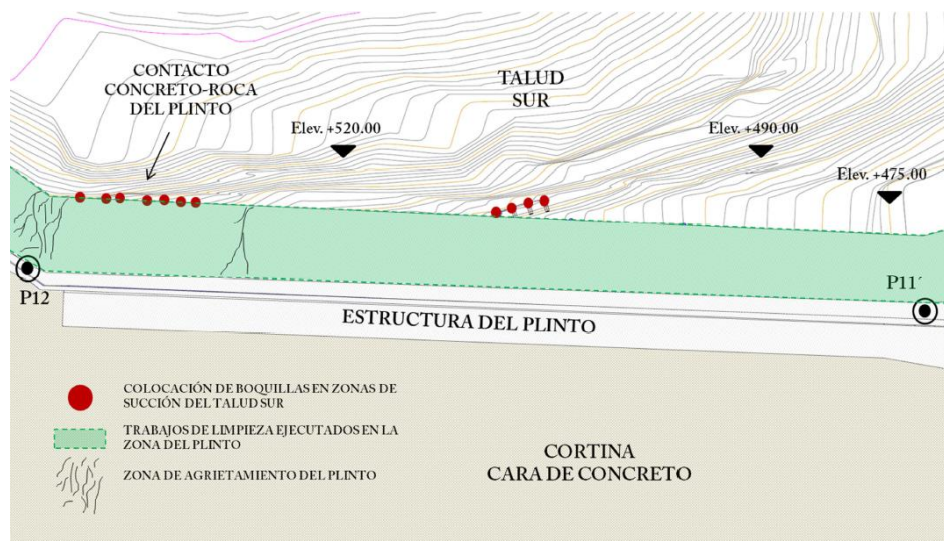


Figura 45. Fractura identificada en la losa del plinto alrededor del punto P12, (CFE, 2014).

#### 4.2.8 Terminación de vertido de materiales

Retomando la ejecución de los trabajos de vertido de material en septiembre del 2014, se inyectaron las boquillas ubicadas entre las elevaciones +513.00 y +520.00 (localizadas en el contacto concreto-roca del plinto y cercanas al punto P12 del plinto), presentando comunicaciones de mezcla entre las estructuras vecinas (figura 46). En octubre del 2014 concluye el primer periodo de vertido, con un total de 11 boquillas vertidas y un volumen de material vertido de 55 m<sup>3</sup> de lechada y 196.5 m<sup>3</sup> de mortero. Fue entonces que se notó una disminución de presiones y gastos en algunos barrenos de la GD-2 y GD-3, así como el valor de las filtraciones medidas en la galería al pie de la cortina.

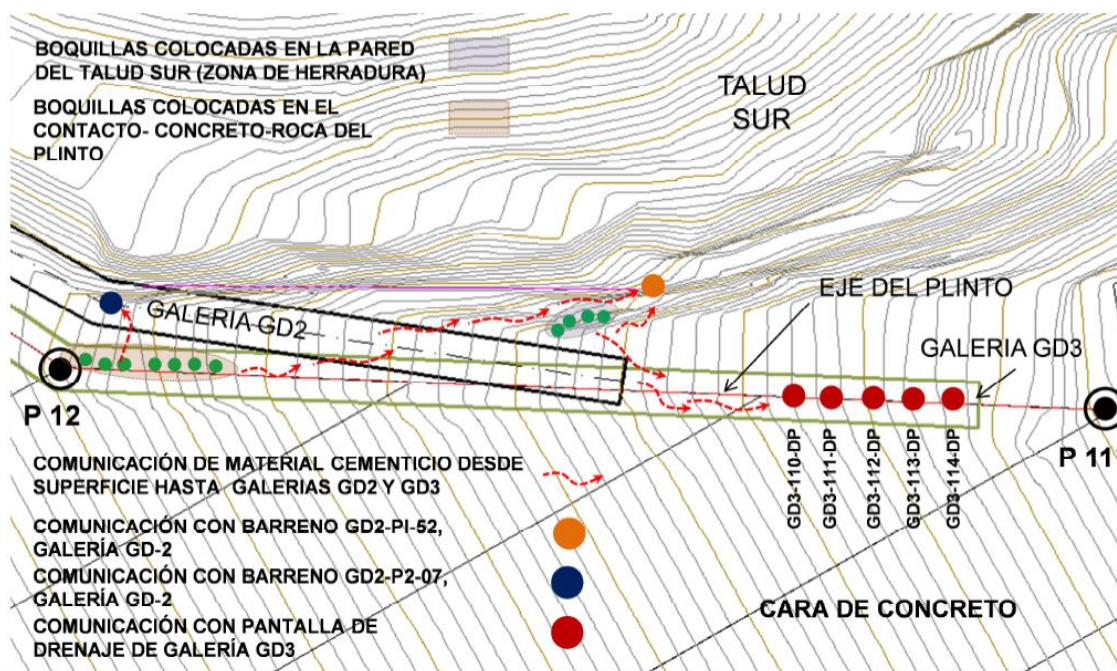


Figura 46. Vertido de material en las boquillas localizadas entre las elevaciones +513.00 y +520.00 (CFE, 2015).

#### 4.3 SEGUNDA ETAPA DE TRATAMIENTO

Como parte de los trabajos realizados en la reducción de filtraciones del embalse hacia la MD, se realizaron perforaciones con recuperación de núcleos de roca para posteriormente ser inyectadas con lechada de cemento, con el objetivo de sellar de las vías de agua conocidas desde la plataforma 525 MD, que tiene una superficie casi paralela al plinto punto 12, así como perforaciones ascendentes y descendentes en los ramales derechos de las GD-2 y GD-3.

### 4.3.1 Berma +525

Este tratamiento por medio de inyecciones desde la berma +525 tuvo como propósito reforzar la pantalla impermeable en la zona indicada en la figura 47 y 48, la cual se encuentra ubicada entre el plinto y el tímpano oriente de la GD-2.

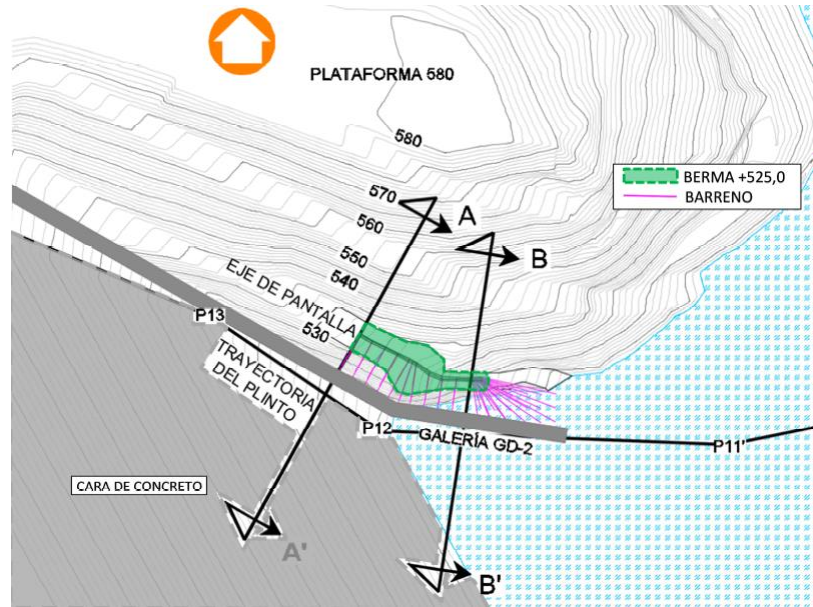


Figura 47. Pantalla de tratamiento de refuerzo desde la berma +525 (CFE, 2015).

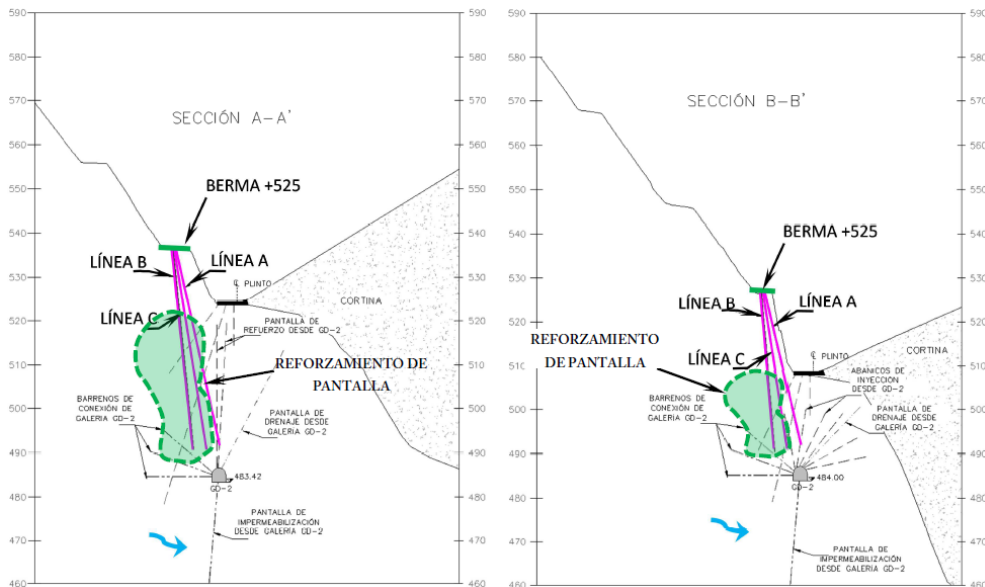


Figura 48. Secciones A-A' y B-B' Tratamiento de refuerzo desde la berma +525 (CFE, 2015).

El arreglo geométrico original de la pantalla de refuerzo se proyectó con tres líneas de 17 barrenos cada una, mismas que se ubicaron sobre el piso de la berma +525. En superficie, fueron ubicadas a una separación de 0.4 m entre línea y línea, mientras que en el fondo fueron proyectados con separaciones de 3 m entre barreno y barreno. La longitud de los barrenos se proyectó a 60 metros, con ángulos de inclinación con respecto a la vertical de hasta 30°. La cantidad total de perforación por ejecutar fue de 51 barrenos, haciendo un total de 2,028 metros de longitud.

El orden de ejecución del tratamiento de refuerzo propuesto, se realizó de la siguiente manera:

1. Perforación e inyección de la línea más cercana al talud sur del espolón de roca (línea A).
2. Perforación e inyección de la línea más lejana al talud sur del espolón de roca (línea B)
3. Perforación e inyección de la línea intermedia (línea C, ubicada entre la línea A y la línea B).

Para cada línea de inyección propuesta, se realizó el tratamiento mediante tres etapas, procurando no tener abiertos más de tres barrenos de I etapa a la vez sobre la misma línea y evitando también perforar barrenos de una línea adyacente cercanos a zonas donde no se hubiesen concluido los tratamientos de inyección de líneas previas.

La inyección de los barrenos, se hizo generalmente en tramos ascendentes de 5 metros de longitud; sin embargo, durante el proceso de perforación, se registraron tramos donde se cruzaron zonas altamente fracturadas que impidieron el avance de la perforación, obligando en estos casos a realizar inyecciones anticipadas y a su vez, limitando o incrementando la longitud de los tramos por inyectar.

El procedimiento de inyección se basó en realizar cambios en el tipo de mezcla empleada, incrementando gradualmente la viscosidad de ésta de acuerdo con el comportamiento observado las dosificaciones de los materiales así como las propiedades físicas y reológicas de cada mezcla empleada; el criterio para definir el cambio de mezcla, se realizó por cada



200 litros inyectados, evaluando tanto la evolución del gasto como la presión con su evolución en el tiempo; finalmente el criterio para dar por concluida una inyección, fue cuando se alcanzó la presión efectiva máxima con un gasto menor o igual a 5 l/min.

La presión efectiva máxima de inyección empleada durante el proceso, tuvo que ser ajustada en un par de ocasiones, debido al comportamiento presentado y a la vulnerabilidad de las estructuras vecinas cercanas a la zona del tratamiento.

Tomando en cuenta que el objetivo del tratamiento fue realizar el reforzamiento de la pantalla impermeable entre el plinto y el tímpano oriente de la galería GD-2, se realizó una zonificación del tratamiento por ejecutar (figura 49) considerándose dos zonas, las cuales, se describen a continuación:

- **ZONA 1.** Sector donde se ejecutó la inyección en progresiones ascendentes de 5 metros de longitud, hasta 10 m por encima del nivel de desplante del plinto. En esta zona se aplicó una presión efectiva máxima de inyección de 10 kg/cm<sup>2</sup>.
- **ZONA 2.** Sector donde la inyección se realizó en una sola progresión, comprendida desde el límite superior de la zona 1 hasta el brocal del barreno. En esta zona se aplicó una presión efectiva máxima de inyección de 3 kg/cm<sup>2</sup>.

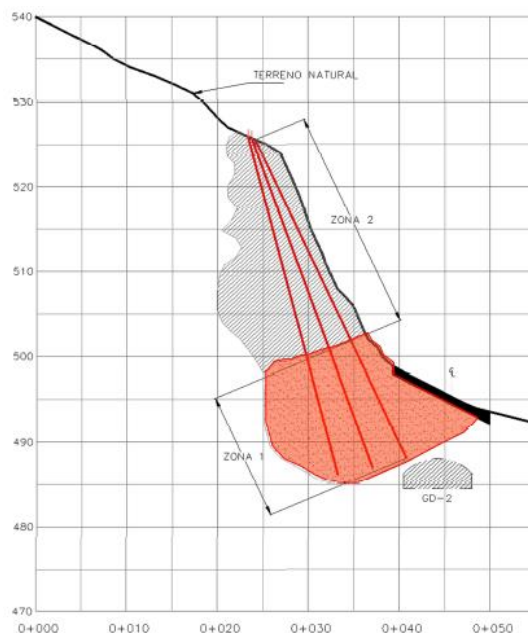


Figura 49. Zonificación del tratamiento ejecutado desde la berma +525 (CFE, 2015).

Debido a un incremento súbito del nivel del embalse fue imposible la ejecución de unos barrenos de las líneas B y C, entre las elevaciones 526.64 y 529.97 msnm; por lo que se decidió reajustar la geometría original lo cual genero un incremento en la longitud de barrenación y en el número de barrenos, teniendo una inyección del orden de 504 m.

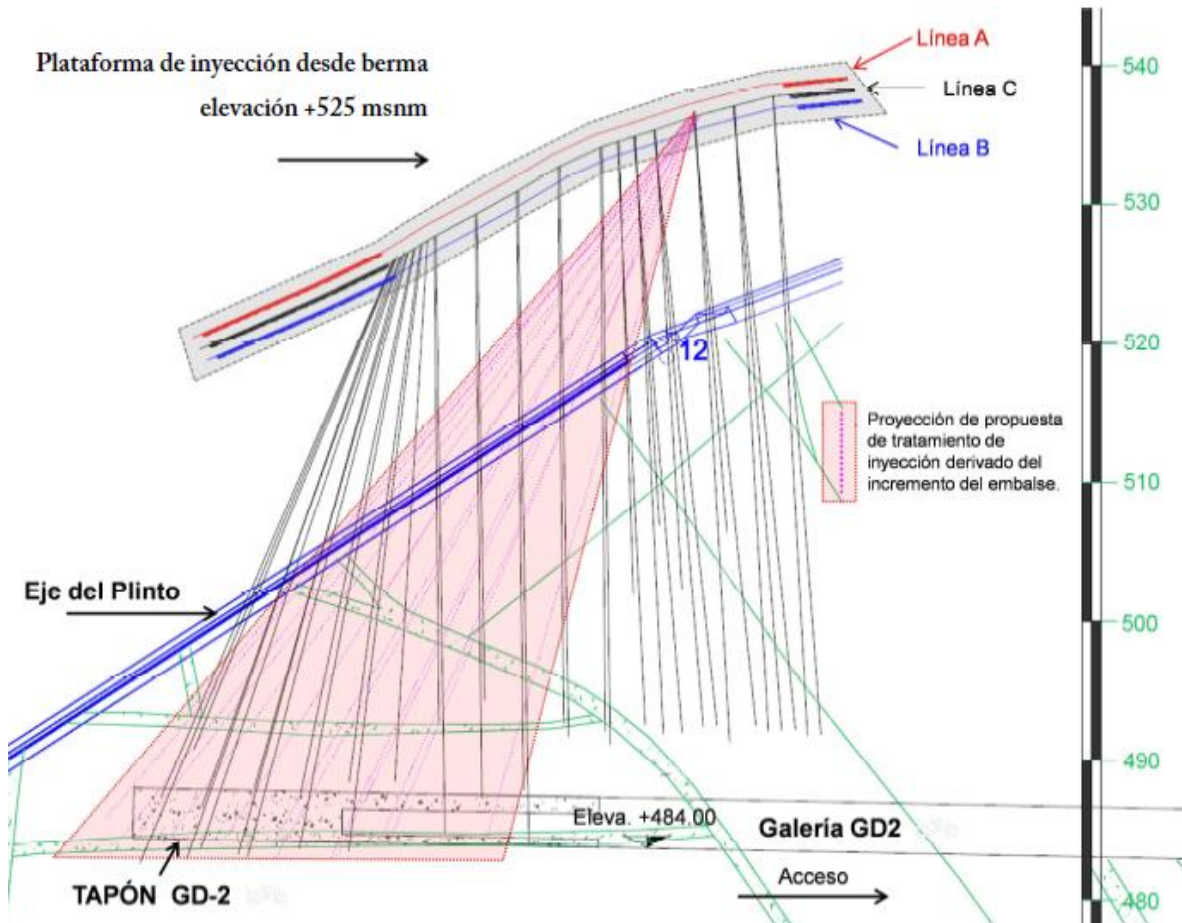


Figura 50. Ajuste geométrico del tratamiento ejecutado desde la berma +525 debido al incremento del nivel del embalse (CFE, 2015).

Durante la ejecución del tratamiento de la berma 525 se presentaron comunicaciones del material inyectable en diversos puntos del tapón de concreto de la galería GD-2. Ante tales eventos, se fortaleció la evidencia de la conexión entre los barrenos ejecutados desde la berma +525 con el tapón de concreto de la galería GD-2. En la figura 5.3.e se observa la distribución de barrenos desde la plataforma +525 y las comunicaciones que se suscitaron a lo largo del tapón de concreto en galería GD-2.

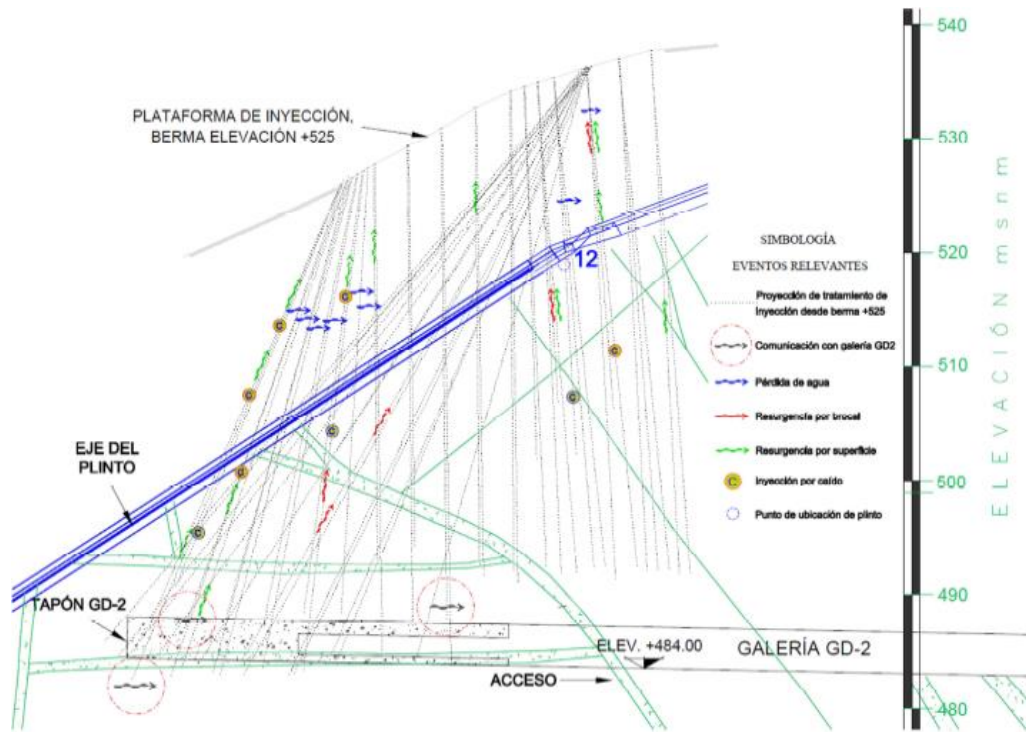


Figura 51. Puntos de comunicación del material inyectable del tapón de concreto en galería GD-2 (CFE, 2015).

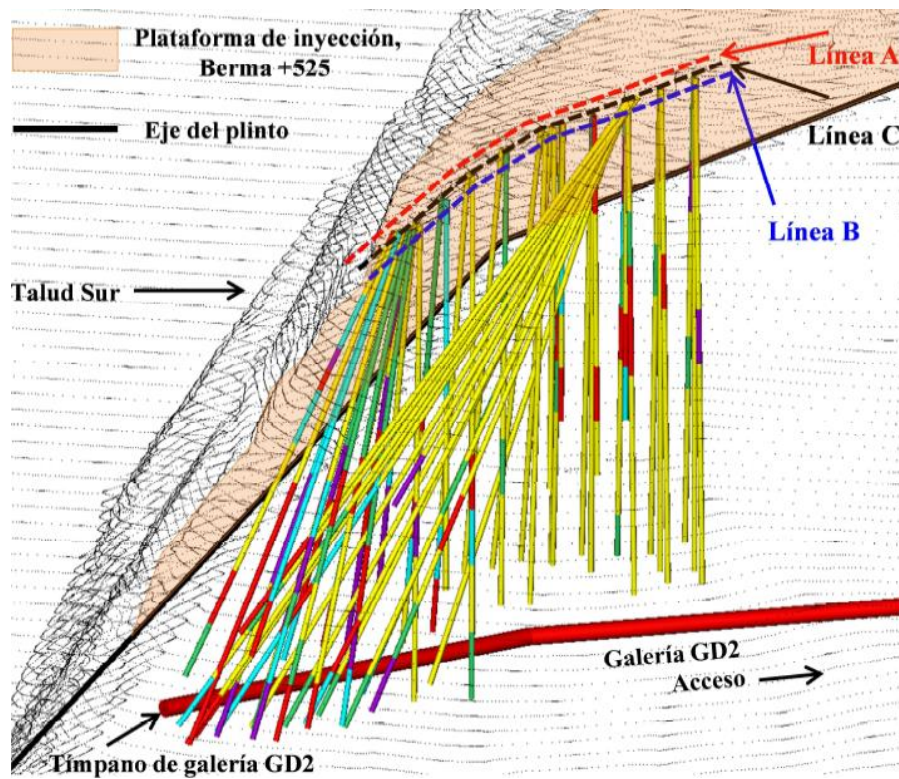


Figura 52. Arreglo tridimensional de las líneas de inyección de la berma +525 (CFE, 2015).

### 4.3.2 Reinspección subacuática

En junio del 2015 se reiniciaron los trabajos de inspección subacuática en la losa del plinto por parte de las brigadas de buceo de CFE, cuyo objetivo era inspeccionar nuevos sitios de interés (zonas de subducción) ubicados entre las elevaciones +480.00 y +500.00. Fue así como se lograron identificar 6 puntos de succión adicionales, los cuales se localizaron entre las elevaciones +480.00 y +495.00 sobre el contacto talud-plinto y sobre el recinto del plinto.



*Figura 53. Reparación de fracturas localizadas en la losa del plinto, vista desde la berma +522, (CFE, agosto 2015).*

### 4.3.3 Reparación de la losa del plinto

Ante las evidencias encontradas en la estructura del plinto en el 2014 por parte de la brigada de buceo donde se identificaron una serie de grietas sobre el punto P-12 de la losa del plinto, en agosto del 2015 se realizó la reparación de la losa del plinto de manera satisfactoria por medio de un tratamiento basado en inyecciones de resina.

#### 4.3.4 Instrumentación

Con el propósito de monitorear el comportamiento del macizo rocoso en la zona donde se efectuaron los tratamientos, se instalaron referencias superficiales, estaciones GPS, medidores de junta en el espolón y plinto, inclinómetros, extensómetros en el espolón de roca y galerías GD-2 y GD-3, así como una línea piezométrica en estas últimas.

Durante la disminución del embalse se instalaron diferentes instrumentos en varios puntos estratégicos del plinto puntos P11' y P12 y galería GD-2. Los medidores de junta se destinaron a fortalecer los posibles desplazamientos que pudiera presentar el agrietamiento de la losa del plinto en el punto P12 y fueron instalados previos a la reparación de la losa del plinto.

Se instalaron cinco extensómetros entre las galerías GD-2 y GD-3, y dos piezómetros, uno en la berma 525 msnm y el otro desde la galería GD-3; con el objeto de conocer los posibles desplazamientos que se pudieran generar en la zona de desplante del plinto entre los puntos P11' y P12, así como para verificar la eficiencia del tratamiento ejecutado en las obras subterráneas.

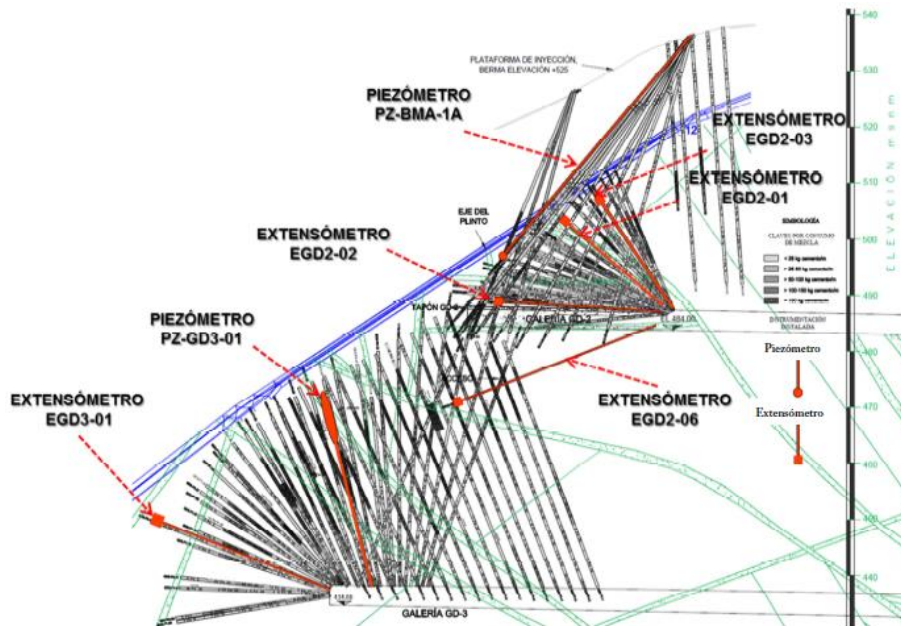


Figura 54. Sección por eje de las galerías GD-2 y GD-3 indicando la ubicación de piezómetros y extensómetros durante el periodo 2015 (CFE, 2015).

#### 4.4 FILTRO INVERTIDO

Como complemento a los trabajos realizados en desde el 2013 al 2015, para reducir las filtraciones en la C.H. La Yesca, se recomendó la ejecución de un sistema de filtro invertido, el cual fue realizado en el 2016 y está conformado por un sistema de tuberías de 8" de diámetro, por las cuales se conducen los materiales que conforman el filtro hacia las diferentes zonas de succión.

Para su ejecución se realizaron las siguientes actividades:

1. Limpieza subacuática sobre la zona comprendida entre los puntos P11' – P12 del plinto.
2. Investigación subacuática tanto en el agrietamiento del plinto en el punto P12 como en la zona de contacto y recinto entre el talud y losa del plinto del punto P12 al punto P11'.
3. Prueba de vertido de materiales en una de las líneas de conducción del sistema del filtro invertido.
4. Ajuste del diseño geométrico del sistema del filtro invertido en función de la investigación subacuática realizada.
5. Descenso de las líneas de conducción sobre los diferentes puntos de interés.
6. Fijación de las líneas de conducción en el talud sur del espolón de roco.
7. Diseño y colocación de los elementos de retención sobre la zona del filtro invertido.
8. Envío y acopio de materiales recomendados para la conformación del filtro invertido.
9. Vertido de materiales sobre los elementos de retención.
10. Acomodo de los materiales del sistema de filtro invertido y verificación de su estado una vez colocado.

El sistema del filtro invertido en la C.H. La Yesca, se conformó por una red de once tuberías distribuidas sobre el talud sur del espolón de roca con una dirección SW y SE, con una longitud promedio de 110m partiendo desde la elevación 580 msnm hacia cinco puntos de

interés, los cuales se reparten en una zona de trabajo que inicia en la elevación 485 msnm y concluye en la elevación 525 msnm (figuras 55 y 56).

En la tabla 4.4 se indican los datos de construcción y cada una de las líneas de conducción que forman el sistema del filtro invertido.

Tabla 4.4 Datos de construcción de las líneas del sistema del filtro invertido (CFE, 2016).									
Boquilla	Rumbo	Longitud (m)	Coordenadas de origen			Coordenadas de llegada			Zona de interés
			X	Y	Z	X	Y	Z	
BVM-01	40°SE	188	592813.86	2344273.87	580.00	592858.59	2344220.54	485.00	Punto P11' del plinto
BVM-02	37°SE	182	592812.88	2344273.69	580.00	592852.65	2344220.50	490.00	Zona de succión registrada en 2015 y agrietamiento en el recinto del plinto
BVM-03	33°SE	174	592811.89	2344273.51	580.00	592847.20	2344220.12	493.00	
BVM-04	29°SE	172	592810.91	2344273.33	580.00	592841.40	2344218.60	496.00	
BVM-05	25°SE	167	592809.92	2344273.15	580.00	592835.68	2344218.39	500.00	
BVM-06	20°SE	155	592809.13	2344273.05	580.00	592828.95	2344218.54	505.00	
BVM-07	23°SE	145	592808.18	2344273.36	580.00	592822.17	2344219.50	510.00	Zona de vertido de materiales en sector de herradura durante el periodo 2014
BVM-08	9°SE	130	592807.23	2344273.67	580.00	592815.43	2344219.89	515.00	Zona de relleno en contacto talud-plinto
BVM-09	2°SE	126	592806.27	2344273.97	580.00	592808.51	2344219.47	519.00	
BVM-10	4°SW	116	592805.32	2344274.28	580.00	592801.51	2344219.61	523.00	Arietamiento en losa del plinto P12
BVM-11	10°SW	113	592804.37	2344274.59	580.00	592794.91	2344221.93	525.00	

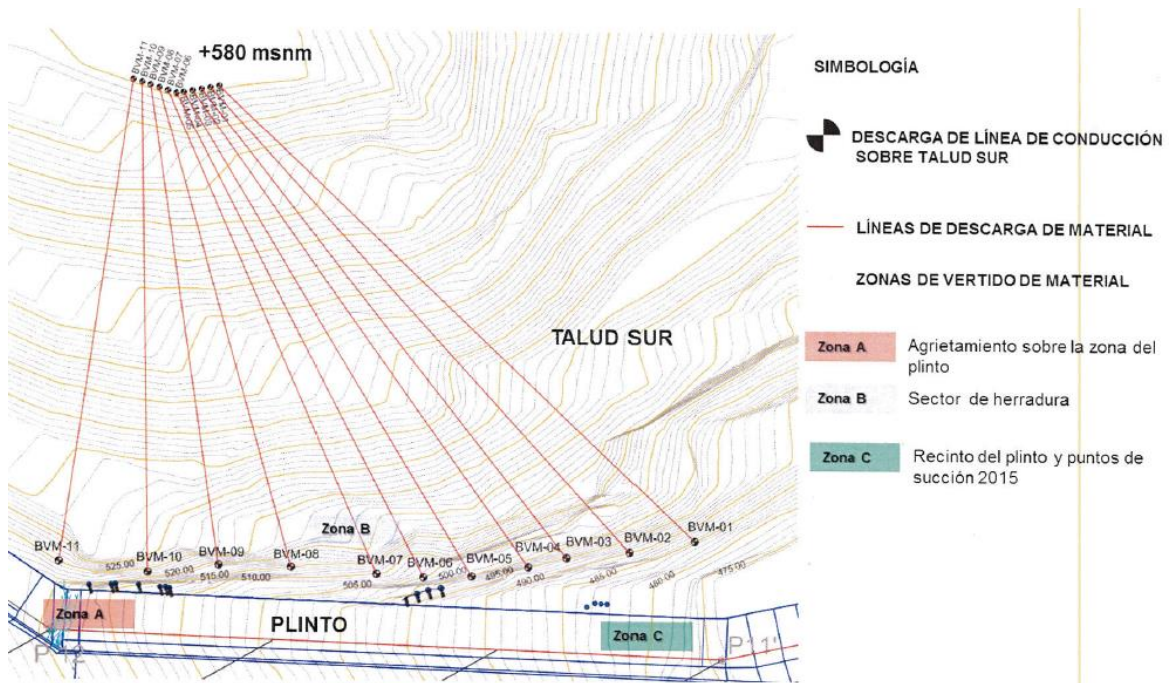


Figura 55. Arreglo en planta del sistema de filtro invertido (GEIC, Mecánica de rocas, Reporte de actividades mayo 2016).

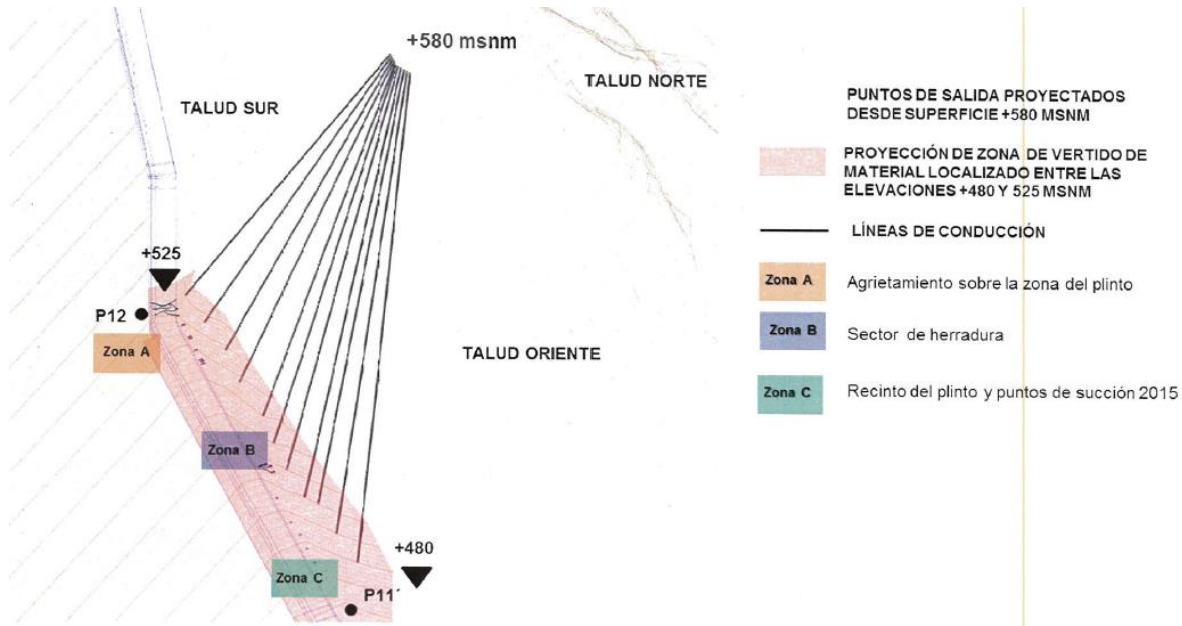
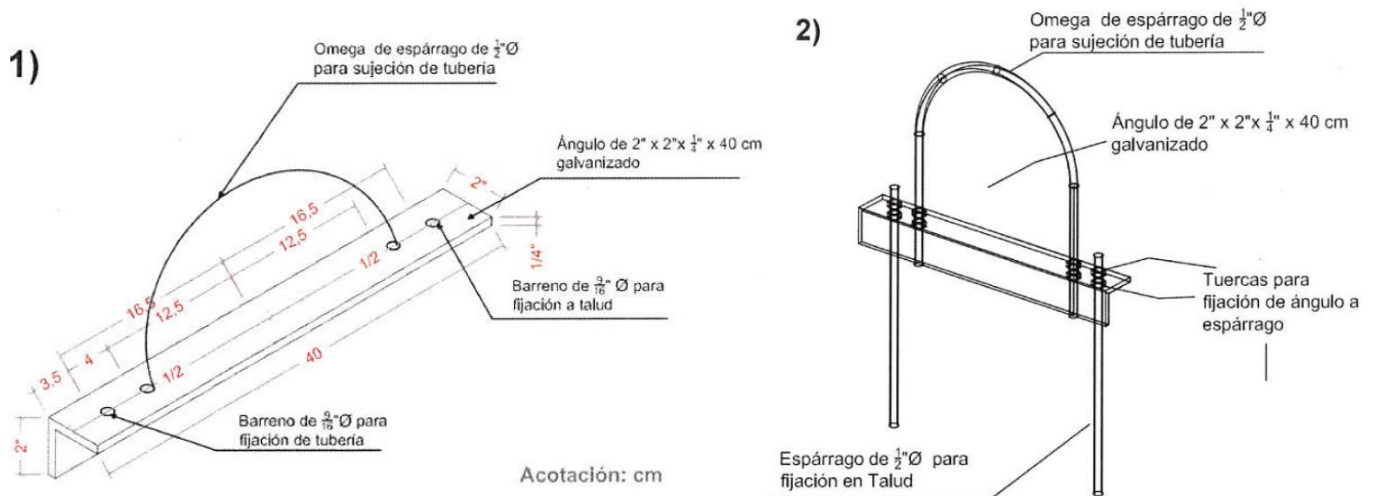


Figura 56. Arreglo en perfil del sistema del filtro invertido (GEIC, Mecánica de rocas, Reporte de actividades mayo 2016).

Para la instalación del filtro se colocaron dos tipos de sistemas que permitieran mantener tanto la seguridad de las líneas de conducción sobre el espolón de roca, como tener la certeza de que los materiales depositados en las zonas de interés se mantengan durante los ascensos y descensos que impere el nivel del embalse sobre la estructura talud-plinto, los cuales son:

1. Sistemas de fijación en talud y berma.





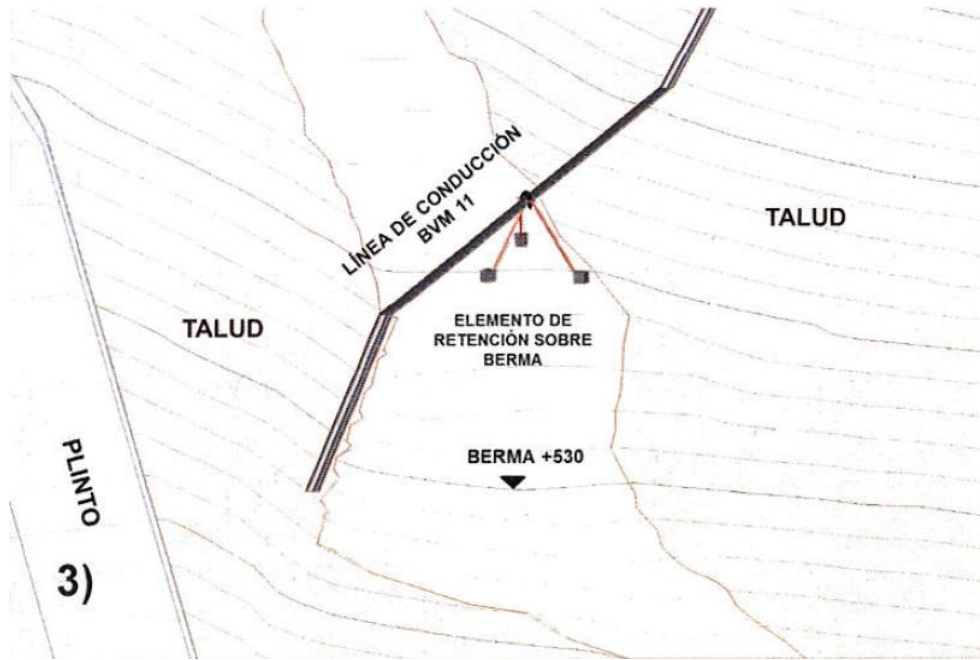
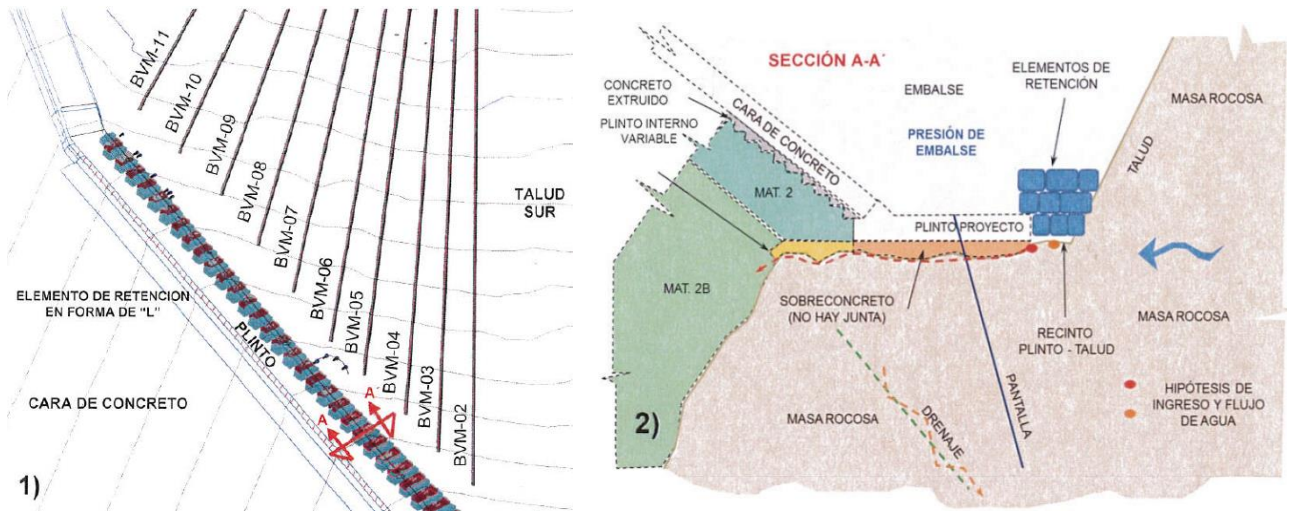


Figura 57. Detalles de los sistemas de fijación en talud y berma. 1) Detalle del soporte de ángulo para omega, 2) Detalle de omega y 3) Fijación de tubería en zonas de berma (GEIC, Instrumentación-Plano de construcción 2015, Mecánica de Rocas-Reporte de actividades julio 2016).

2. Sistema de retención de contacto talud plinto.



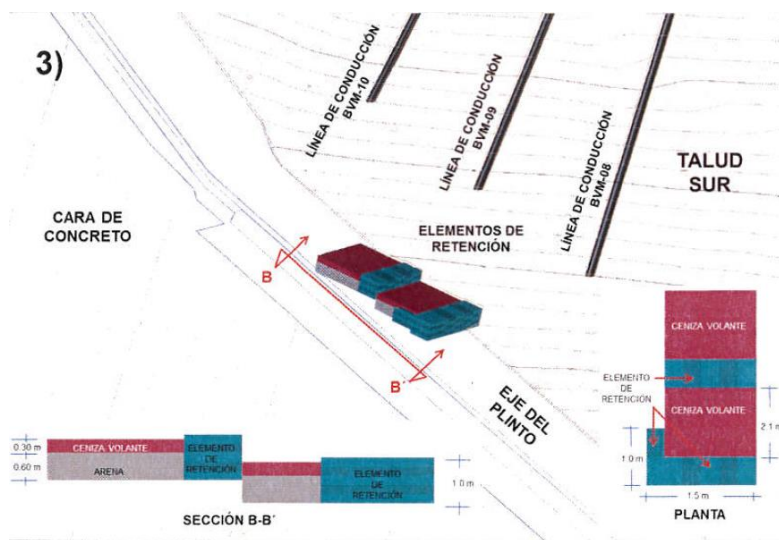


Figura 58. Detalles de los elementos de retención del sistema filtro invertido, 1) Arreglo de las líneas de conducción-talud-plinto, 2) Sección A-A', ubicación de elementos de retención en contacto talud-plinto y 3) Croquis del elemento de retención (GEIC, Mecánica de Rocas, Reporte de actividades diciembre 2014- julio 2016).

#### 4.4.1 Inspección subacuática en la zona del agrietamiento del punto P-12 del plinto

Los trabajos de inspección subacuáticos tuvieron como finalidad el estado actual que guardaba la grieta principal detectada en esta estructura, ya que, por la instrumentación instalada, se reportaba una apertura del orden de 4 mm; por lo que se aprovecho que la carga del nivel del embalse de ese momento era de 30 m y así descartar la posibilidad de encontrar zonas de succión.

Como resultado de esta inspección se tuvo lo siguiente:

1. Se logró identificar nuevos agrietamientos del orden 2 mm con continuidad al interior de la losa sobre la losa del plinto, los cuales parten desde el contacto talud-plinto hacia el contenedor de ceniza perimetral de la cara de concreto.
2. Se corroboró la apertura de la grieta principal tratada durante el periodo 2015, reportada por los instrumentos instalados, en la cual se observa un ligero escalón en la losa y en algunos puntos, la separación entre la resina inyectada y el concreto del plinto.
3. Se descartaron puntos de succión en la grieta principal.

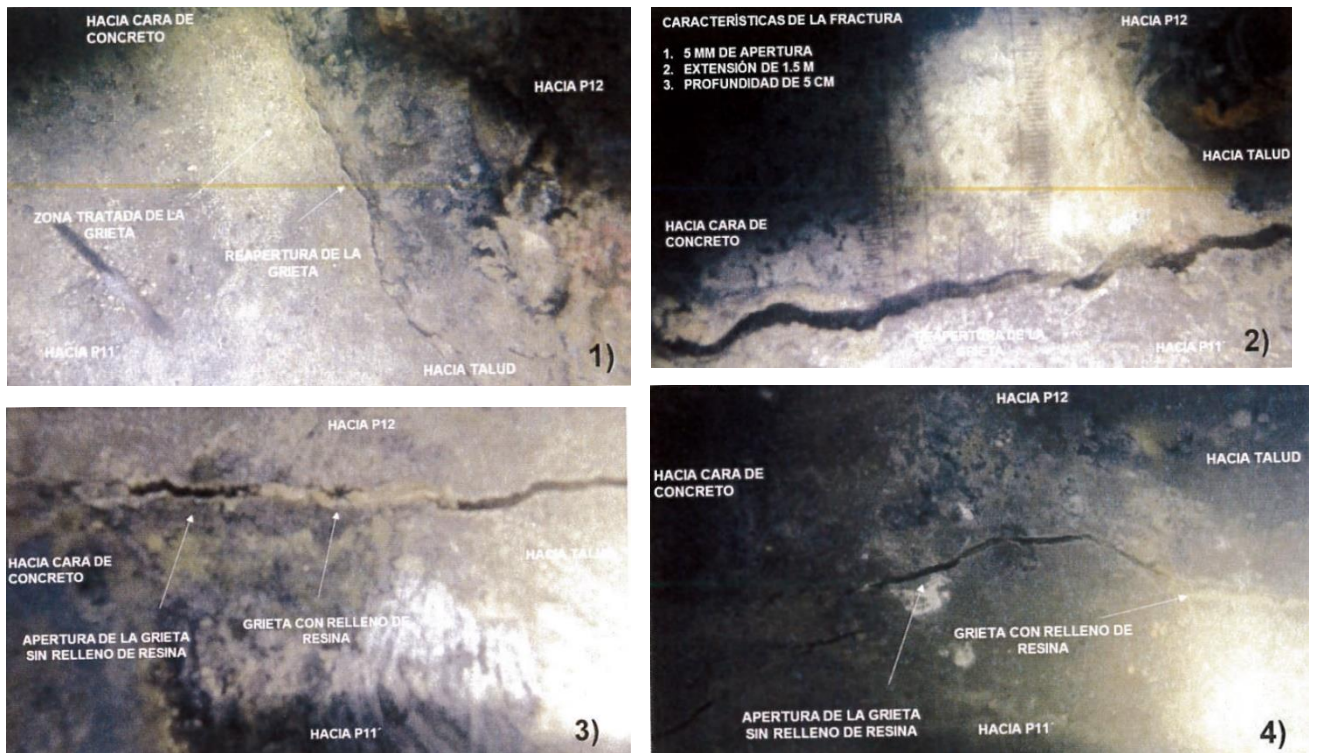


Figura 59. Fotografías de la grieta principal ubicada en el punto P19 del plinto, 1) Detalle de la zona tratada con la grieta principal, 2) Topología de grieta principal, 3 y 4) Aspecto actual de la grieta principal (GEIC, Mecánica de Rocas, Reporte de actividades, abril 2016).

#### 4.4.2 Inspección subacuática sobre puntos de vertido de materiales previos

Después de inspeccionar la zona de agrietamiento del punto P12 del plinto, se revisó la condición actual de las boquillas instaladas durante el 2014 y 2015, para ajustar o redireccionar de ser necesario el rumbo original de las líneas de conducción propuestas. Con esta actividad se logró identificar varios puntos de succión residuales que se encontraban alrededor de la elevación 510 msnm y que mantenían una conexión directa con la galería GD-3, dicha condición se verificó al colocar colorante (anilina) en la boquilla 9, instalada en la elevación 512.50 msnm, la cual fue observada por uno de los piezómetros ascendentes de la galería GD-3, después de 15 minutos de ser inyectada. Con estas evidencias encontradas el sistema del filtro invertido se giró 3° hacia el SE, cubriendo las zonas de mayor atención por medio de las líneas de conducción.

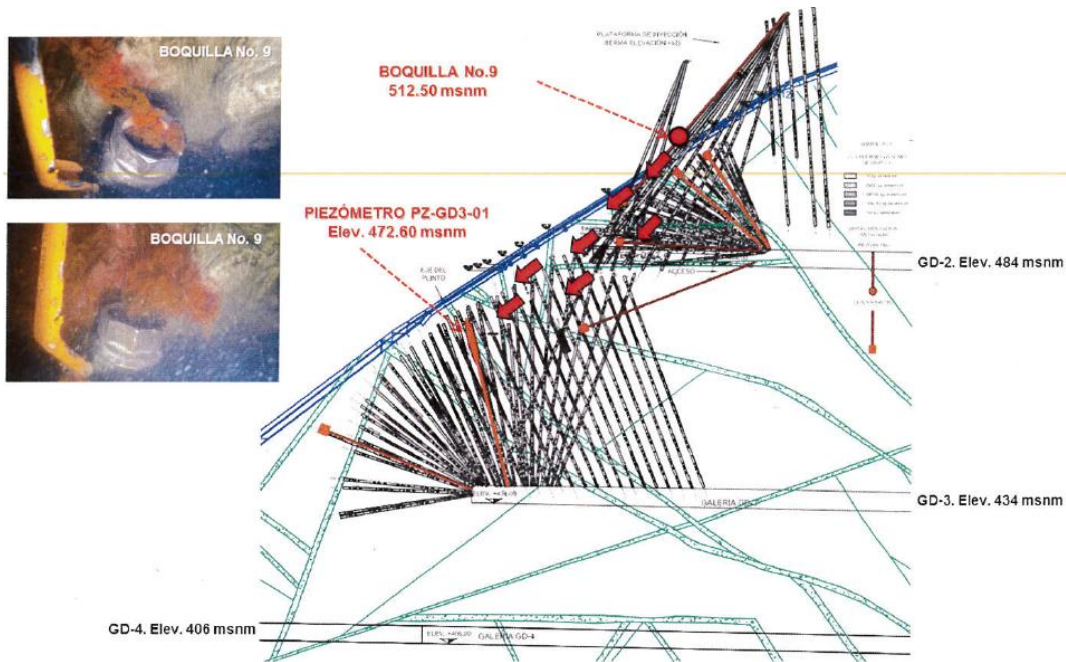


Figura 60. Conexión de trazador entre boquilla de inyección no. 9 y piezómetro ascendente en galería GD-3 (GEIC, Mecánica de Rocas, Reporte de actividades, mayo 2016).

Como parte del desarrollo de actividades se realizó una limpieza exhaustiva en la zona del plinto, mediante una bomba de presión que enviaba una presión y caudal considerables fue posible desplazar los sedimentos originados por la operación normal de la central como los residuos generados por los trabajos de reforzamiento, logrando un volumen de 40 m<sup>3</sup> aproximadamente; todo esto con la finalidad de conocer la trayectoria y continuidad de los principales agrietamientos con ayuda de la presión de agua de la bomba de inyección y preparar la zona para recibir los materiales del sistema de filtro invertido.

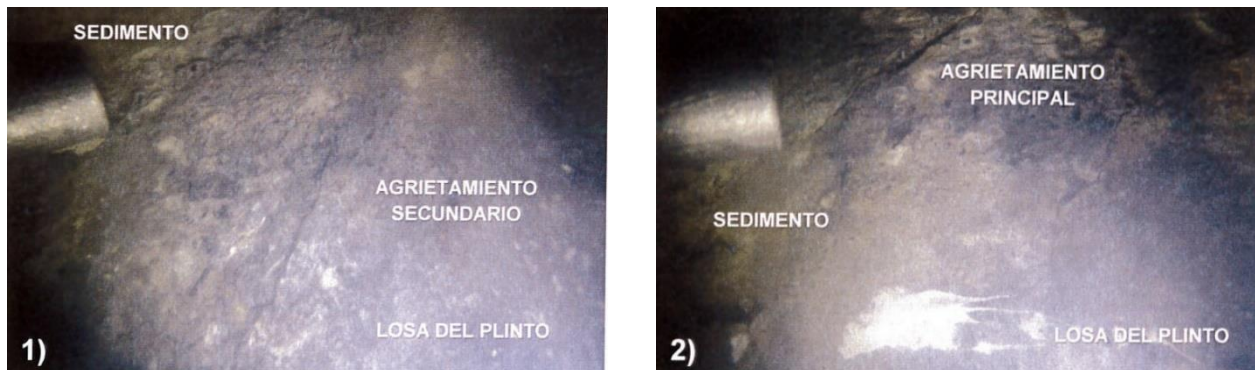


Figura 61. Detalle de la zona de limpieza realizada sobre el agrietamiento de la losa del plinto, 1) Limpieza realizada en el agrietamiento secundario y 2) Limpieza realizada en el agrietamiento primario (GEIC, Mecánica de Rocas, Reporte de actividades, mayo 2016).

Durante el proceso de vertido del material se realizaron inspecciones subacuáticas periódicas, con el objeto de verificar el espesor del relleno y el estado que presentaban los elementos de retención del sistema del filtro invertido. Dando mayor importancia a las zonas donde se presentaron las fallas y a la zona de agrietamiento del plinto ubicada en el punto P12 con elevación 520 msnm, en esta zona se realizó un trabajo adicional al vertido convencional, mediante la protección de los extensómetros unidireccionales instalados sobre el agrietamiento principal del plinto y alrededor de estos, se hizo un encofrado entre los elementos de protección colocados y la estructura de seguridad fabricada para ellos.

En la figura 62 se indica la ubicación de las líneas de conducción del sistema del filtro invertido, sus etapas de colocación, la distribución de cada uno de los elementos de retención sobre la estructura del plinto y la cota del nivel del embalse en el cual se realizaron dichas actividades.

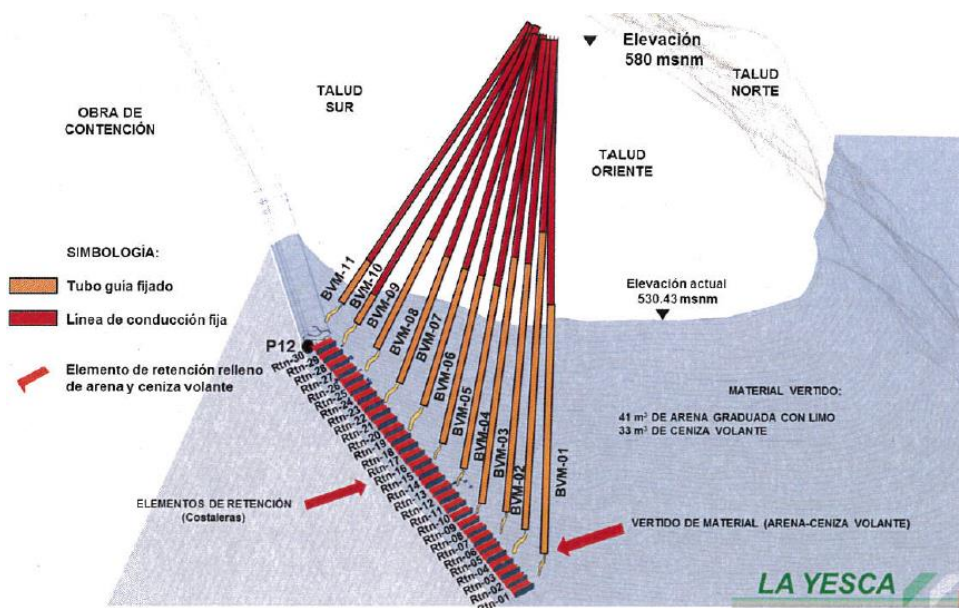


Figura 62. Esquema final del sistema de filtro invertido (GEIC, Mecánica de Rocas, agosto 2016).

Este sistema es una medida de remediación definida por la GEIC para mitigar las filtraciones identificadas en una campaña que duró más de dos años. Y tiene por objeto introducir materiales desde superficie hacia la zona del plinto entre los puntos P11' y P12 para sellar las posibles filtraciones extraordinarias que aparezcan durante las etapas de ascenso y descenso del nivel del embalse.

## CAPÍTULO 5

---

### ***Conclusiones y recomendaciones.***

#### **5.1 CONCLUSIONES**

Del análisis de la información podemos concluir que las posibles causas de las filtraciones en las galerías de inyección y drenaje, y al pie de la presa son:

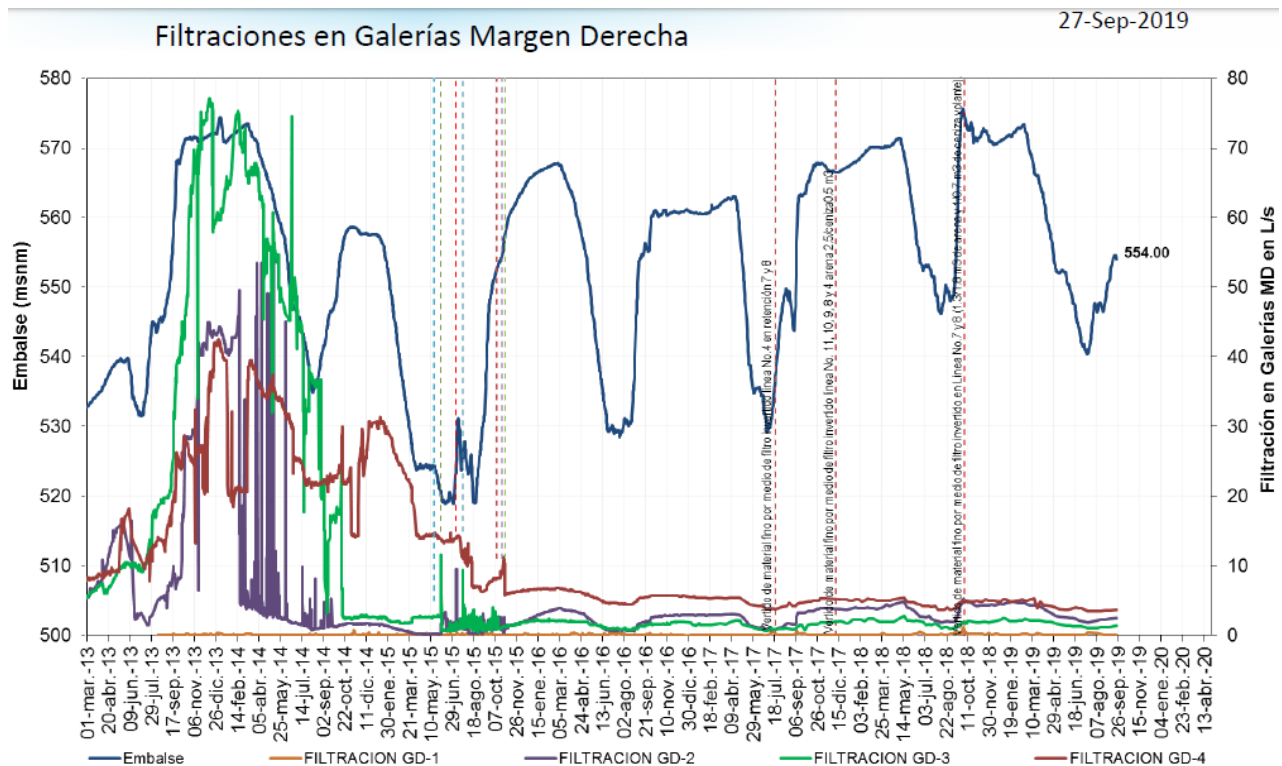
- Condiciones geológicas desfavorables en la margen derecha del proyecto, principalmente entre los puntos P11 y P13, donde el macizo es de calidad regular a mala y se encuentra afectado por la presencia de fallas geológicas continuas y con rellenos arcillosos que cruzan de forma casi ortogonal al plano de estanqueidad.
- La limitada cobertura de roca entre los puntos P11 a P12, que se volvió más crítica luego del giro del eje de la presa, esto facilitó la generación de gradientes hidráulicos elevados en zonas con roca de mala calidad.
- Fracturas propensas a la dilatación y destaponamiento ante el aumento de la carga generada por el embalse.

De la colocación del sistema de filtro invertido y de las actividades que se tomaron para solucionar los problemas de filtración; se puede concluir que:

- Las inspecciones subacuáticas realizadas entre los puntos P11' y P12 del plinto, fueron de suma importancia para conocer el estado actual de las estructuras que recibieron el sistema del filtro invertido y permitieron reajustar del diseño.
- La instalación de los elementos de retención del filtro invertido sobre el contacto talud-plinto y las descargas estratégicas de material por medio de las once líneas de conducción, permiten asegurar tanto la estabilidad del relleno sobre las zonas de

interés como asegurar los puntos de succión residual identificados, así como también la introducción de materiales hacia los diferentes puntos de interés para cualquier nivel de embalse, en caso de que se incrementen las filtraciones fuera del comportamiento normal esperado.

- Las filtraciones identificadas en zonas críticas (puntos P11' – P12 del plinto) durante los periodos 2014 y 2015, se trataron por medio del vertido o inyección de lechadas, morteros y lodos bentoníticos, con lo cual se logró sellarlas, eliminándose la succión inicial que presentaban. Durante los trabajos de colocación de materiales se observó que algunos puntos presentaban succión residual por lo que el vertido de materiales de esta campaña se dirigió a esta zona.
- La instrumentación con la que se cuenta en la C.H. La Yesca nos permite observar cada uno de los cambios en el funcionamiento, es así como se puede apreciar en los resultados observados que el sistema del filtro invertido y la campaña de reinyección han ayudado a la reducción de las filtraciones desde su colocación hasta hoy en día.



## 5.2 RECOMENDACIONES

Actualmente la presa presenta niveles de filtración aceptables, y el comportamiento esperado a una carga mayor al embalse no rebasa los 200 litros/segundo, sin embargo, es recomendable evaluar en cada ascenso y descenso del embalse el comportamiento de estas filtraciones para descartar que evolucionen con el tiempo.

Por lo que de identificarse cambios en la tasa de ascenso del nivel del embalse y éstos se asocien a la zona de los tratamientos ejecutados, se hacen las recomendaciones siguientes:

- Asegurar el correcto funcionamiento en de cada una de las instrumentaciones colocadas en la presa, de este modo será fácil notar cualquier cambio que pueda asociarse a la resurgencia de filtraciones o cualquier otro problema que ponga en riesgo la estructura.
- El sistema del filtro invertido debe ser monitoreado para que ante cualquier cambio de presiones debido al embalse se tomen las medidas necesarias para evitar las filtraciones.
- Debido a que el medio para elaborar con mayor precisión los tratamientos al macizo rocoso, han sido las inspecciones subacuáticas, es importante que estas se realicen de manera constante contemplando condiciones del nivel del embalse alto y bajo. Estas inspecciones se deben realizar con mayor énfasis en las zonas donde se tuvo el agrietamiento de la losa y donde está colocado el sistema del filtro invertido, de esta manera se podrá verificar en qué condiciones se encuentra la estructura y los puntos críticos.



## Referencias

---

CFE, *Informe geológico final de la etapa de la preconstrucción del P.H. La Yesca, Jalisco-Nayarit. Tomo I, Textos, Abril del 2007.*

CFE, *Informe geológico final de la etapa de la preconstrucción del P.H. La Yesca, Jalisco-Nayarit. Tomo II, Planos de Texto, Abril del 2007.*

CFE, *Informe geológico final de la etapa de la preconstrucción del P.H. La Yesca, Jalisco-Nayarit. Tomo III, Abril del 2007.*

CFE, *Informe geológico final de la etapa de la preconstrucción del P.H. La Yesca, Jalisco-Nayarit. Tomo IV, Informes ORR de barrenos exploratorios, Abril del 2007.*

CFE, *Informe geológico final de la etapa de la preconstrucción del P.H. La Yesca, Jalisco-Nayarit. Tomo V, Informes ORR de barrenos exploratorios, Abril del 2007.*

CFE, *Informe geológico final de la etapa de la preconstrucción del P.H. La Yesca, Jalisco-Nayarit. Tomo VI, Informes ORR de barrenos exploratorios, Abril del 2007.*

CFE, *Informe geológico final de la etapa de la preconstrucción del P.H. La Yesca, Jalisco-Nayarit. Tomo VII, Informes ORR de barrenos exploratorios, Abril del 2007*

CFE, *Plinto, P.H. La Yesca, 31 de mayo de 2011.*

CFE, C.H. *Ing. Alfredo Elías Ayub La Yesca Jalisco- Nayarit Octubre de 2013.*

CFE, C.H. *ING ALFREDO ELÍAS AYUB, JAL. Presa La Yesca, Informe de comportamiento del 13 de abril de 2012 al 7 de noviembre de 2014.*

CFE, *Determinación de la continuidad hidráulica de la margen derecha de la C.H. La Yesca, entre las boquillas 1 y 3 ubicadas en el talud sur del espolón de roca y las galerías GD-2 y GD-3 y GDF, mediante la aplicación del trazador Rodamina 6G.*

CFE, *Criterio técnico para el diseño ejecutivo del plinto.*

CFE, *Informe diario de mediciones C.H. La Yesca, 22 de Noviembre del 2016.*

CFE y GEIC, *Informe No. 07-37-SGM/R, Estudio Geotécnico Complementario en el Cauce del Río Grande de Santiago para el Proyecto Hidroeléctrico "La Yesca", Jalisco-Nayarit.*

Dott. Ing. Pier Francesco Berlota, *Proyecto Hidroeléctrico C.H. La Yesca, Jal. -Nay., Filtraciones en la presa, Inspección de las galerías de las márgenes, 19 de junio de 2004.*

CFE y GEIC, *Central Hidroeléctrica La Yesca, Jalisco-Nayarit, "Informe final de la implementación del Plan de Acciones Integral para la reducción de filtraciones en la margen derecha de la C.H. Ing. Alfredo Elías Ayub (La Yesca)", Diciembre 2015.*

CFE y GEIC, *Central Hidroeléctrica La Yesca, Jalisco-Nayarit, "Informe final de la implementación del Sistema del Filtro Invertido entre los puntos P11' y P12 del plinto en la margen derecha de la C.H. Ing. Alfredo Elías Ayub (La Yesca)", Septiembre 2016.*

Profesor Manuel Romana Ruiz, *Informe sobre las filtraciones en la cortina de la presa de La Yesca (Jalisco, México), ICA, Madrid, Junio 2014.*

M.I, Juan de Dios Alemán Velásquez, *Diseño Geotécnico de presas de gran altura de enrocamiento con cara de concreto, Aspectos fundamentales, ai, México.*

ICOLD, *Concrete fase rockfill dams, Concepts for desing and construction, November 2004.*

Dr. Ing. Giovanni Lombardi, *Presas de Enrocado con cara de Hormigón, Usos de los criterios GIN para consolidación e impermeabilización de la roca, Minusio, octubre de 2001.*

Reymundo Vásquez Ortiz, *Tesis "Tratamiento de la roca mediante inyecciones en el plinto del proyecto hidroeléctrico El Cajón", México, Junio del 2006.*

Carlos Barrera López y Jorge Alberto Cortés Alfaro, *Tesis "Construcción de la cortina de enrocamiento con cara de concreto del P.H. La Yesca", Ciudad Universitaria, Febrero 2011.*

Marcelo Emmanuel Sánchez Rodríguez, *Tesis "Diseño del plinto para cortinas de enrocamiento con cara de concreto", Ciudad Universitaria, 2006.*

Ismael Romero Reyes, *Tesis "Aspectos Generales de Diseño de las Cortinas de ECCC aplicado en el P.H. La Yesca, México", México, D.F, Abril 2015.*