



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**USO DE PANTALLAS DEFLECTORAS EN LA CONSTRUCCIÓN
DE PRESAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

ADRIÁN SÁNCHEZ GARCÍA

DIRECTOR: M. EN I. PATROCINIO ARROYO HERNÁNDEZ

San Juan de Aragón, Edo. De México Septiembre de 2011





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

D E D I C A T O R I A S
Y
A G R A D E C I M I E N T O S

Dedico este trabajo a DIOS por darme la vida y rodearme de gente tan buena para obtener este logro tan importante de mi vida.

A mis padres.

“Jorge y Carolina por ser el sostén de una familia llena de valores y principios, por darme su apoyo total e incondicional, por estar en las buenas y en las malas siempre con un gesto de ánimo y esperanza que me alientan para seguir adelante.”

A mi Mamá Caro.

“Que con su amor y cariño tan cálido e incomparable llena mi vida de felicidad.”

A mi hermana Araceli.

“Por toda su compañía a lo largo de mi vida.”

A todos mis familiares.

“Mi abuelo Manuel, mis tíos y primos todos y cada uno de ellos, gracias por existir.”

A mi tía María de Jesús

“Que en la gloria disfruta de este momento conmigo.”

A mis amigos

“Por su amistad y compañía luchando juntos en este camino de formación profesional.”

A mi Director de Tesis M. en I. Patrocinio Arroyo Hernández, por su apoyo y asesoría brindada para la elaboración de este trabajo.

“Agradezco la Universidad Nacional Autónoma de México” por haberme dado la oportunidad de estudiar en sus aulas y aprender de todos sus profesores, así como de formar parte también de sus prestigiadas filas deportivas de “Taekwondo”, actividad que tantas satisfacciones me dio.

Doy un agradecimiento especial a la empresa ICA por dejarme formar parte de tan importante Proyecto para el país, y del cual extraigo mi tema.

“El éxito no consiste en ser mejor que los demás, si no el lograr lo mejor de uno mismo...”

Adrián Sánchez García.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| INTRODUCCIÓN | 6 |
| CAPÍTULO I | 9 |
| CONSIDERACIONES GENERALES | 9 |
| 1.1. PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA..... | 10 |
| 1.2. ANTECEDENTES..... | 10 |
| 1.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA..... | 13 |
| 1.4. VIAS DE COMUNICACIÓN..... | 14 |
| 1.5. OROGRAFÍA REGIONAL..... | 14 |
| 1.6. HIDROLOGÍA..... | 16 |
| 1.7. GEOLOGÍA..... | 18 |
| 1.8. DATOS PRINCIPALES DEL PROYECTO..... | 19 |
| CAPÍTULO II | 23 |
| ESTUDIOS BÁSICOS | 23 |
| 2.1. OBJETIVO DE LOS ESTUDIOS..... | 24 |
| 2.2. ESTUDIO GEOLOGICO..... | 24 |
| 2.3. SISMICIDAD Y RIESGO SÍSMICO..... | 28 |
| 2.4. GEOLOGÍA DE LA ZONA DEL EMBALSE..... | 30 |
| 2.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL EMBALSE..... | 35 |
| 2.6. GEOLOGÍA GENERAL DE LA BOQUILLA..... | 37 |
| 2.7. GEOLOGIA DE LA ZONA DE OBRAS..... | 52 |
| CAPÍTULO III | 80 |
| PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO | 80 |
| 3.1. TRATAMIENTOS DE LA ROCA..... | 81 |
| 3.2. GENERALIDADES..... | 84 |
| 3.3. INYECCIÓN DE SUELOS EN ROCA..... | 86 |
| 3.4. EQUIPO..... | 92 |
| 3.5. MATERIALES..... | 97 |
| 3.6. ACTIVIDADES DE EJECUCIÓN..... | 102 |
| 3.7. CONSTRUCCION DE PANTALLA FLEXIBLE EN ATAGUÍAS..... | 126 |
| CAPÍTULO IV | 133 |
| CASO DE ESTUDIO: | 133 |
| “PANTALLA PLÁSTICA DE LAS ATAGUÍAS EN LA PRESA LA YESCA” | 133 |
| 4.1. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PANTALLA FLEXOIMPERMEABLE..... | 134 |
| 4.2. OBJETIVO..... | 134 |
| 4.3. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO..... | 137 |
| 4.5. SEGURIDAD..... | 166 |
| 4.6. MEDIO AMBIENTE..... | 166 |
| CAPÍTULO V | 167 |
| CONCLUSIONES | 167 |
| BIBLIOGRAFÍA | 169 |

PIC. Adrián Sánchez García.

No. cta.:40409299-5.

Teléfonos: Casa: 5649 - 4100

Celular: 04455 - 2200 - 8970

email: ing_adrian_sanchezg@live.com.mx

M. en I. Patrocinio Arroyo Hernández

Laboratorio de Hidráulica 5623-1076

Oficina 8590-5546

Celular 04455-1838-3470

email: est2001in@yahoo.com.mx

INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo está dirigido en primer término a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, como complemento para su formación académica dentro del área de la construcción; en segundo término pero no menos importante, para todos los Ingenieros Civiles y profesores que imparten cátedra en las asignaturas de ésta carrera y a todas aquellas personas que cuyo interés está directamente relacionado con estas áreas de la Ingeniería Civil, y que necesiten conocer con mayor detalle el tema de las inyecciones en roca.

En la actualidad en nuestro país y en el mundo, los recursos naturales constituyen la materia prima más preciada para la supervivencia del ser humano, por ello, es imprescindible implementar estrategias, programas y acciones necesarias para la conservación y el aprovechamiento equilibrado de éstos, ya que mantener en armonía los recursos naturales, representa garantizar su utilización de manera racional, debido a que en la actualidad se está perdiendo el equilibrio de los ecosistemas, por una sobre explotación de los mismos.

Existe una necesidad importante de hacer llegar servicios como lo es la energía eléctrica, que mejora sensiblemente la calidad de vida de la sociedad, por esta razón es importante identificar y evaluar sitios factibles, así como definir las condiciones geológicas, hidrológicas, climatológicas, entre las más sobresalientes, para que se construya la infraestructura necesaria que permita aprovechar los recursos naturales y generar beneficios para los mexicanos.

Por los motivos antes mencionados, es importante la creación de proyectos como la construcción de presas hidroeléctricas que benefician desarrollo de los mexicanos, así como el progreso regional y nacional, poniendo como ejemplo y por su grado de importancia El Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, el cual se considera como una de las mayores aportaciones en infraestructura para la generación y aprovechamiento de energía eléctrica en la zona Centro-Occidente del país.

Por esta razón se ha tomado parte de la información generada en este proyecto para la presentación del trabajo de investigación que nos ocupa, desarrollado con el fin de describir y dar a conocer de forma detallada los procedimientos y actividades de mayor importancia, como los estudios y trabajos preliminares, los procesos de construcción y los trabajos de detalle que deben llevarse a cabo para realizar inyecciones en roca dentro de la construcción del Proyecto Hidroeléctrica La Yesca.

ALCANCES

A continuación se comenta brevemente el contenido de cada uno de los capítulos de los cuales consta este trabajo.

El primer capítulo comprende los antecedentes de la obra; es decir, todos los estudios geológicos preliminares que se realizaron para establecer cuál de las diferentes alternativas era la mejor opción para establecer el sitio de la boquilla y el embalse de la presa; así mismo da a conocer la problemática que dio origen a la obra y cuáles eran las necesidades a cubrir para las poblaciones más cercanas a la demarcación de las obras, el marco físico el cual lo conforman la ubicación, orografía, hidrografía, clima y la geología física de la región. Sin dejar de lado los accesos a la obra y los datos básicos de proyecto.

El capítulo dos de este documento es un informe de las exploraciones geológicas, geotécnicas y geofísicas, que con mayor conocimiento aporta características geológico estructurales del macizo rocoso donde se desarrollan cada una de las obras que componen el proyecto, desde la etapa preliminar de construcción de los trabajos desarrollados en el sitio de la boquilla y durante las excavaciones en el sitio, de forma general se explican los estudios para las obras que componen el proyecto, pero de forma más detallada se describen para las obras de generación siendo estas el albergue principal de los trabajos de excavación subterránea, comprendiendo así, la información que permite garantizar la estructura integrada del sitio e identificar zonas en las que se puedan presentar bloques inestables que representen un riesgo para la seguridad de la presa durante los trabajos de construcción.

En el capítulo tres se describen las especificaciones relativas a las actividades que deben ejecutarse para el tratamiento de la roca en los sitios donde se construyan diversas obras superficiales y subterráneas del proyecto. Desde trabajos previos de limpieza y amacice superficial del terreno; ejecución de tratamientos de estabilización y soporte y la ejecución de tratamientos de consolidación e impermeabilización por medio de inyecciones.

En el capítulo cuatro se explican los trabajos de inyecciones, en donde se describe la responsabilidad al ocupar este tipo de métodos para la construcción de una pantalla de impermeabilización o pantalla deflectora, poniendo como ejemplo la realizada en el Proyecto Hidroeléctrico La Yesca utilizando los criterios para la selección de material, clasificación, accesorios y el procedimiento detallado para obtener los mejores resultados con la mayor calidad posible.

OBJETIVO.

Debido fundamentalmente, que acerca del tema tratado en el presente trabajo, no existe la suficiente información al respecto, la búsqueda de la misma es en cierta forma una justificante para poder incursionar más detalladamente en el tema de Inyecciones en roca en el Proyecto Hidroeléctrico La Yesca.

Por eso la necesidad de mostrar el procedimiento para realizar los trabajos de construcción de las pantallas deflectoras o flexibles para las ataguías de la Obra de Desvío excavadas en material aluvial y empotradas en roca, donde se contemplan las actividades de excavación, colocación del concreto plástico y la perforación e inyección de la pantalla de impermeabilización en roca por medio de los tratamientos especiales a base de inyección de roca. Todo esto para garantizar la estanqueidad de la cimentación de las ataguías sellando fracturas o discontinuidades geológicas y por lo cual para todo esto no existe información suficiente y disponible para ejecutar dichos trabajos, por lo que se considero necesario abundar en una investigación que nos lleve a la recopilación de información más precisa que sirva como apoyo al conocimiento de la fuente académica.

Durante la realización del presente trabajo se pudo observar un sistema de fallas geológicas que se presentan en la zona, específicamente en el área de las obras de desvío que fue lo que invariablemente condujo a la realización y enfoque principal de la investigación pues la geología física del área, presento una problemática específica que debió atenderse oportunamente y a la brevedad posible; una observación de importancia es que los estudios de geotecnia no contaron con la actualización correspondiente a los trabajos requeridos pues estos resultaron con desfase importante por la diferencia existente entre los resultados obtenidos del último reporte al arranque de los trabajos preliminares del proyecto.

Con la finalidad de estructurar adecuadamente la información recopilada, fue necesario conjuntar todos los elementos recabados previamente al proyecto con los que se generaron durante la ejecución de la obra, para poder obtener como resultado los conocimientos reunidos en este documento de investigación.

CAPÍTULO I.

CONSIDERACIONES GENERALES.

1.1 PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA

INFORMACIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) requiere atender la demanda de energía eléctrica diversificando las fuentes de generación y eligiendo entre sus opciones, aquéllas que optimicen la relación beneficio costo para la economía nacional. Las características técnicas y económicas del proyecto hidroeléctrico (P.H.) denominado “La Yesca”, fueron determinadas para considerarlo en los planes de construcción de la CFE, proponiendo iniciar en agosto del año 2007 y disponer de las condiciones de entrar en operación en enero de 2012.

1.2 ANTECEDENTES

El proyecto hidroeléctrico La Yesca forma parte del Sistema Hidrológico Santiago, que comprende 27 proyectos con un potencial hidroenergético de 4 3000 Megawatts. La Yesca ocupará el segundo lugar en potencia y el tercero en generación dentro del sistema, después de la Central Aguamilpa-Solidaridad y El Cajón, este último en construcción. Con el desarrollo de este proyecto, se avanzará significativamente en el aprovechamiento integral del agua del cauce principal de la cuenca del río Santiago, ya que se localiza entre la Central Santa Rosa y El Cajón.

El proyecto de La Yesca se empezó a estudiar en el año de 1967 por la extinta Comisión Lerma-Chapala-Santiago, y posteriormente en 1965 por el Departamento de Planeación y Estudios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), aunque ya desde 1961 esta Entidad había iniciado algunos reconocimientos geológicos.

Fue en 1980 cuando se inicio una campaña más intensa para estudiar en forma integral la zona aledaña a la confluencia de los ríos Santiago y Bolaños. La campaña la realizó Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) a través de la Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte SEZPN y la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (CPH); ambas de Comisión Federal de Electricidad; la primera realizó los estudios geológicos y la coordinación de estudios del anteproyecto en su nivel de Prefactibilidad. Después de analizar cinco ejes alternativos, se llegó a la conclusión de que el eje denominado La Yesca presentaba las mejores condiciones geológicas y topográficas.

Entre los años 1984 y 1991 la CPH, a través del Centro de Anteproyectos Pacífico Norte (CAPS) se dio a la tarea, en dicho eje, de realizar estudios de hidrogenación y esquemas de anteproyecto con diferentes tipos de cortina. En el año 2001 se realizó una revisión de todos los estudios anteriores, llegando a la conclusión de que la solución más factible consistía en una presa de enrocamiento con cara de concreto.

En esta revisión, se disponía del Estudio de Factibilidad geológica emitido en agosto de 1991, sin embargo, se planteaba todavía algunas dudas de índole geológica, que la SEZPN requirió aclarar mediante una nueva campaña de exploraciones y tendidos geofísicos, misma que no se realizó por la falta de recursos financieros. En el primer semestre del 2004, la SEZPN desarrollo un programa de trabajos de campo encaminado a proporcionar la topografía de detalle de la boquilla y la geología de detalle tanto en la boquilla como en toda la zona de obras, incluyendo la zona identificada alternativa Juanepanta, unos centenares de

metros aguas abajo del eje de La Yesca. Posteriormente se realizó una campaña de trabajos geológicos adicionales enfocados principalmente el eje de La Yesca.

A principio del año 2004, a recomendación del grupo de asesores de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos y por indicación del titular de dicha Coordinación, el grupo de anteproyectos reinició los trabajos, elaborando esquemas en los ejes La Yesca y Juanepanta, separados unos 400 metros uno de otro. En ambos casos los esquemas estuvieron basados en una cortina de enrocamiento con cara de concreto. Las obras complementarias de las alternativas estuvieron compuestas con desvío de túnel, vertedores en canal a cielo abierto y planta hidroeléctrica con casa de máquinas subterránea y a cielo abierto.

Antes de continuar con las exploraciones de campo de Juanepanta, los ingenieros de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil GEIC expusieron que se prevenían los grandes problemas de geología estructural asociados en condiciones de inestabilidad de las laderas de la margen derecha, donde se alojarían las obras de generación y excedencias, y concluyeron que desplantar obras en esta zona tendría grandes complicaciones constructivas con sus consecuencias económicas, por lo que recomendaron ubicar las obras del proyecto en el eje de La Yesca, en donde las condiciones no son tan adversas (julio 2004).

Para la selección del arreglo de obras se revisaron 4 alternativas que son las siguientes:

1. Casa de máquinas subterránea en Margen Derecha (MD), desvío en túneles en Margen Izquierda (MI) y vertedor en túneles en Margen Izquierda.
2. Casa de máquinas subterránea en Margen Derecha (MD), desvío en túneles en Margen Izquierda y vertedor a cielo abierto en Margen Izquierda (MI).
3. Casa de máquinas exterior y vertedor a cielo abierto en MI desfasados del eje de la cortina, desvío en túneles en Margen Izquierda (MI).
4. Casa de máquinas exterior, vertedor a cielo abierto y túneles de desvío en Margen Izquierda (MI) alineados al eje de la cortina.

El esquema que adquirió relevancia fue el caso de la alternativa 1, considerando que la roca de la MD era dacita silificada de buena calidad, afectada por la Falla Pitayo que se ha tomado en cuenta para evitar su incidencia en las excavaciones de la obra de generación. Por otro lado, con la casa de máquinas ubicada en la margen derecha se distribuyen las obras en los dos márgenes, aspecto atractivo desde el punto de vista de la construcción. Además se construyen una preatagüa para un Tr de 30 años y una atagüa alta dentro del cuerpo de la cortina para un periodo de retorno alto. Del análisis de las cuatro alternativas, surgió una quinta alternativa, la cual presentaba un esquema de obras con casa de máquinas subterránea en MD, obras de excedencia a cielo abierto y túneles de desvío en MI.

El esquema correspondiente a la alternativa 2 (Figura 1), fue el que finalmente se aceptó, quedando de la siguiente manera: obra de contención de tipo enrocamiento con cara de concreto de 205.50 m de altura, medidos desde el desplante del plinto hasta el parapeto; obra de desvío con dos túneles de sección portal de 14,00 m de alto en la MI; una preatagüa aguas arriba de 36,5 m de alto (incluye 5,0 m con gaviones) y atagüa aguas debajo de 22,0 m de altura; vertedor a cielo abierto con 6 vanos para compuertas en la zona de control localizado en margen izquierda y planta hidroeléctrica subterránea con casa de máquinas en caverna en la MD que aloja 2 unidades turbogeneradoras de 375 MW cada una.

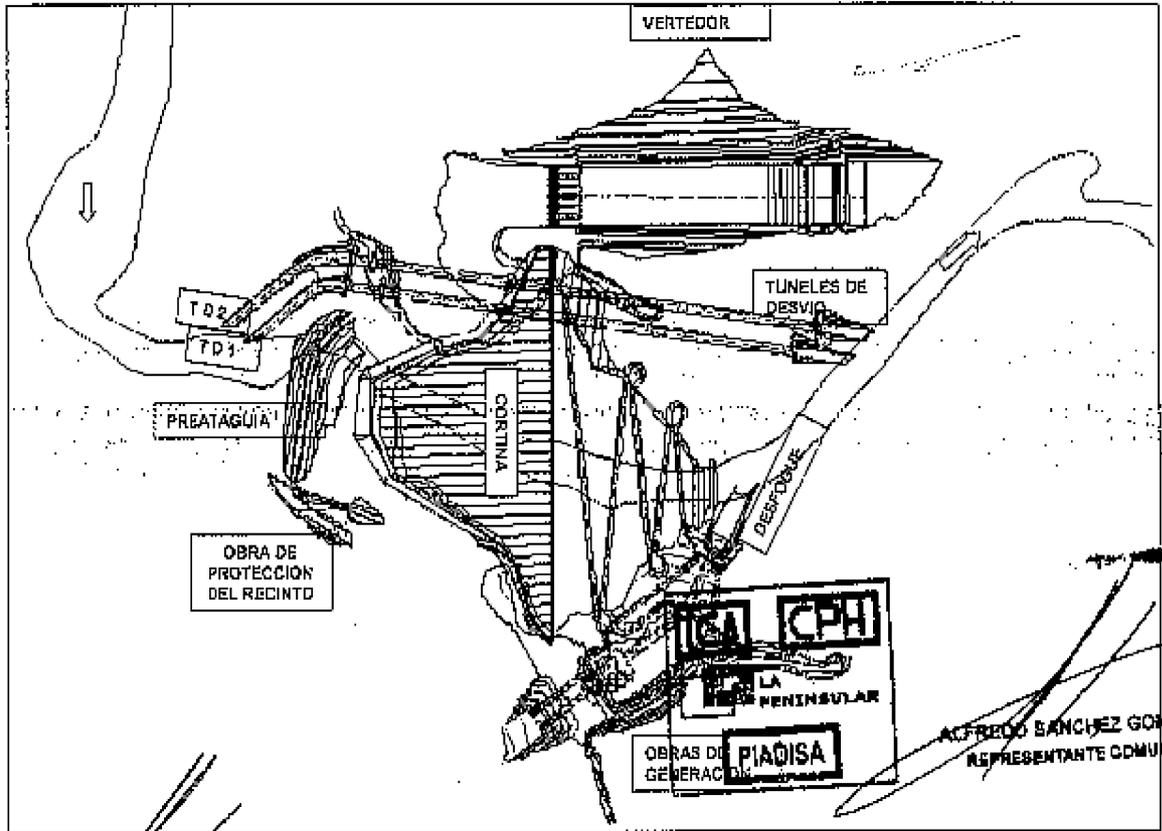


Figura 1. Plano General del P.H. La Yesca.

1.4 VIAS DE COMUNICACIÓN

El acceso al sitio se hace por la autopista Guadalajara-Tepic, recorriendo 60 km desde el anillo periférico de Guadalajara, hasta la desviación al poblado de Magdalena, Jal. y de allí se recorre un tramo de 15 km por la carretera federal No. 15 hasta el entronque con el camino que lleva al pueblo de Hostotipaquillo, al cual se llega por una carretera pavimentada de 8 km. Desde este último poblado parte una terracería, en regulares condiciones y transitable la mayor parte del año, de 20 km de longitud hasta el caserío conocido como Mesa de Flores. Se llega a la boquilla por la margen izquierda del río, transitando por la terracería de 6 km habilitada recientemente por la Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte (SEZPN), dependiente de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC). Una ruta terrestre alternativa, consiste en transitar 75 km desde Guadalajara, Jal., por la carretera libre No. 15 hasta la desviación al poblado de Hostotipaquillo, Jal., de allí se continua como se indica en el párrafo anterior.

1.5 OROGRAFÍA REGIONAL

Los eventos volcánicos que sucedieron en la región occidental de México, desde el Cretácico Tardío hasta el actual, muestran evidencia de actividades magmáticas diferentes en un mismo período de tiempo, dependiendo de la localización geográfica en la que se presenten, lo que a su vez determina el ambiente geodinámico al que se relacionan.

En el Cretácico Tardío, la República Mexicana se encontraba representada por una cordillera pacífica, que ocupaba la parte occidental de lo que ahora es el territorio mexicano, ya que toda la porción oriental se encontraba entonces inmersa, mientras que las intrusiones batolíticas del Noroeste y las manifestaciones volcánicas caldialcalinas de Sonora-Sinaloa se asocian a la subducción de la placa Farallón.

Durante la fase de movimientos orogénicos del Albiano Cenomaniano, se produjo la emersión de la zona central de la cordillera occidental y un vulcanismo andesítico del Oligoceno se desarrolló a lo largo de toda la costa del Océano Pacífico, constituyendo el basamento de la Sierra Madre Occidental; después, en la Provincia occidental se desarrollaron grandes emisiones ignimbríticas ácidas que cubrieron progresivamente la topografía preexistente, encontrando que en algunos sitios, estos paquetes volcánicos superan los mil metros de espesor.

La región Noroeste de México se interpreta como típica de zona de "Rift", detrás de un arco insular de composición andesítica, originado por la reacción de la corteza a los movimientos de subducción, por lo que un origen similar se puede asumir para la Faja Volcánica Transmexicana.

Por lo que respecta a la zona de estudio, regionalmente convergen las provincias geológicas de la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana, ambas de origen volcánico, de edad Cenozoica, y ambiente geotectónico de arco continental. La Sierra Madre Occidental está representada en el área por el Súper Grupo Volcánico Superior, cuya composición esencialmente ácida contrasta con la naturaleza básica de la secuencia de la Faja Volcánica Transmexicana; además de que aquella es más antigua que la segunda.

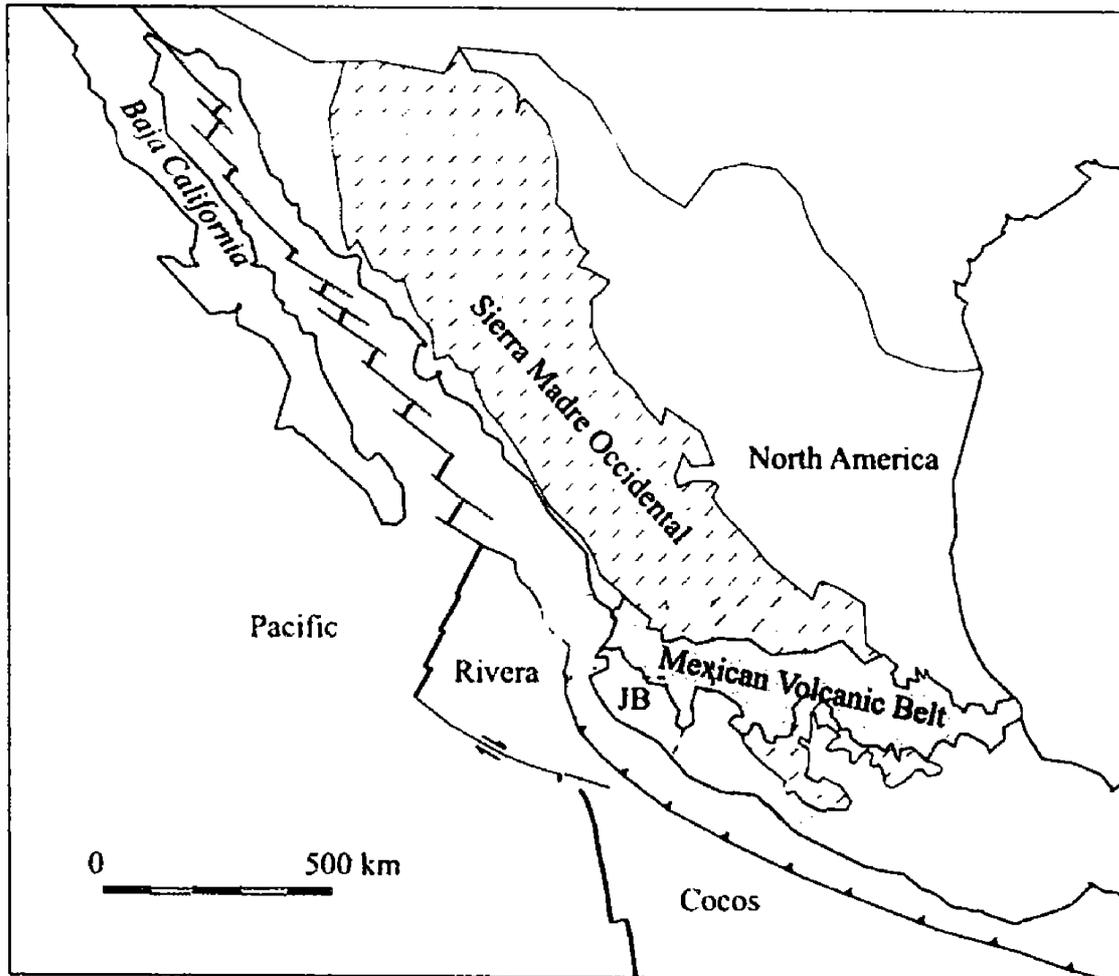


Figura 3. Geometría de las Placas Oceánicas y Continental.

La Faja Volcánica Transmexicana contiene grandes espesores y volúmenes de materiales ígneos extrusivos, que fueron emplazados durante tres episodios volcánicos, desarrollados en el Eoceno, Oligoceno y Mioceno temprano, separados por depósitos vulcanosedimentarios o por discordancias; además, la Faja Volcánica Transmexicana se observa claramente separada de la Sierra Madre Occidental por una discordancia tectónica producida durante el Mioceno medio.

El primer episodio de la Faja Volcánica Transmexicana es un vulcanismo máfico ⁽¹⁾ de significativa volumetría y espesor, en ocasiones alcalino, ocurrido entre 11 y 8 millones de años (Ma), en la zona central de Nayarit y en la región de Guadalajara, luego, durante el Plioceno temprano, entre 7,2 y 5,5 millones de años tuvo lugar un periodo de reducida actividad volcánica, seguido por el emplazamiento de grandes volúmenes de riolitas y cantidades menores de ignimbritas; posteriormente, entre 4,5 millones de años y el presente, domina nuevamente un vulcanismo alcalino intermedio a básico y grandes domos riolíticos y dacíticos complejos son emplazados entre Guadalajara y Tepic; final Plioceno tardío y Cuaternario, aparecen grandes estrato-volcanes en la porción norte del arco, mientras que escudos volcánicos y conos cineríticos de composición basáltica caracterizan el frente volcánico. Ortega, et.al., (1992), sugiere la probabilidad de que las rocas más jóvenes de la región Jalisco-Nayarit, sean producto de un evento geológico independiente relacionado con la apertura del Protogolfo de California y no con la colisión y consumo de la Placa Farallón ⁽²⁾ bajo el continente americano, que es señalada como la causa principal de la génesis de la unidad volcánica ácida más extensa de México y del mundo, que es la Sierra Madre Occidental.

1.6 HIDROLOGÍA

El río Santiago, con una longitud aproximada de 560 km, tiene su origen en el lago Chapala, el cual es un vaso regulador de las aportaciones de la cuenca del río Lerma, cuya superficie tiene cerca de 50,000 km².

La cuenca del río Santiago, ubicada al occidente del país, en la región central de la vertiente del Océano Pacífico, se localiza entre los meridianos 101°14' y 105°26' de longitud oeste y entre los paralelos 20°19' 23'25' de latitud norte.

La mayor parte de la cuenca se desarrolla en noroeste del río, por regiones montañosas y de acceso relativamente difícil.

Desde su origen, a la elevación 1 525 msnm, el río Santiago fluye en dirección general SE-NW, relativamente próximo y paralelo al límite suroccidental de su cuenca y al trazo de la carretera federal No.15 Guadalajara-Tepic. En sus primeros 60 km recorre los valles de Poncitlán y Atequiza, en el Estado de Jalisco, para bajar después por una abrupta barranca de más de 400 km de longitud con profundidades de alrededor de los 500 m.

⁽¹⁾ De la roca en cuya composición abundan los minerales de colores oscuros.

⁽²⁾ La Placa Farallón es una antigua placa tectónica oceánica. Esta placa presentaba subducción bajo el margen occidental de América del Sur entre los 28 y 72 millones de años.

Los principales tributarios del río Grande Santiago son los ríos Verde, Juchipila, Bolaños y Huaynamota. Al iniciar el Río Santiago su recorrido a partir del lago de Chapala hasta su desembocadura al mar, sigue la dirección de alineamientos estructurales E-W y NW-SE.

Los escasos escurrimientos procedentes de la margen izquierda son atribuidos en su mayoría manantiales, ya que las superficies de las mesetas basálticas que cubre esta margen presentan una topografía irregular y sin drenaje bien definido.

El sitio del proyecto se ubica sobre el cauce principal del río Santiago, 4 km aguas debajo de la confluencia con el río Bolaños, en las coordenadas geográficas 21°11'49" de la latitud norte y 104°06'21" de la longitud oeste.

Las características más relevantes de la cuenca son las que se mencionan a continuación.

- El área de la cuenca drenada es de 51 990 km², medida desde la presa Corona hasta la boquilla de estudio.
- El área de la cuenca que drena los escurrimientos del río Santiago hasta el P.H. La Yesca es de 37 173 km².
- El área de la cuenca que drena los escurrimientos del río Bolaños hasta el P.H. El Caimán es de 14 755 km².
- La superficie que se forma entre la unión de los ríos Santiago y Bolaños hasta el sitio del P.H. La Yesca es de 62 km².
- La pendiente media, en el tramo C.H Las Juntas-desembocadura al mar, es de 0.22% y, la pendiente del río en el tramo de Santa Rosa-El Cajón, en donde se encuentra el proyecto, es de 0.31%.

1.7 GEOLOGÍA

Los estudios que ha realizado la Comisión Federal de Electricidad, a través de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC), con el apoyo de la Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte en el Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, no han tenido la continuidad conveniente y se han desarrollado en diferentes etapas. La Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (CPH) decidió en el año 2004, llevar este proyecto a la etapa de construcción sin tener en ese momento el nivel de conocimiento de ingeniería básica para la construcción del mismo, por tal motivo, solicitó a la GEIC realizar los estudios necesarios para obtener el nivel de información requerido.

El área del P.H. La Yesca tiene diversas unidades litológicas, tales como intrusivos de composición granítica, andesitas, ignimbritas de composición dacítica, riódacítica, basaltos, diques de composición diabásica y pórfido andesíticos; depósitos de paleocauce, lacustres, pumicíticos, de talud y aluvión.

Las obras estarán alojadas en ignimbritas de composición riódacítica. Desde el punto de vista geológico estructural, el macizo rocoso se encuentra intrusionado y afectado por fallas regionales escalonadas, que por lo general delimitan bloques basculados hacia el noreste; además, se reconocieron dos sistemas de fallas geológicas orientados al NE-SW y N-S. Las fallas más importantes que afectan las obras de la margen izquierda son las fallas Vertedor 1, Vertedor 2, Mogote, Mirador, Socavón y Olga; en tanto que las obras ubicadas en la margen derecha estarán afectadas por las fallas Pilar, Crucero-Pitayo y Esperanza.

La columna geológica regional establecida para el sitio, está conformada por rocas Cenozoicas, que incluyen de las más antiguas a las más recientes: Andesitas y tobas andesíticas Oligo-Miocénicas, depósitos de origen Vulcano sedimentario, ignimbritas dacíticas, rocas ígneas intrusivas ácidas, intermedias y diabásicas, ignimbritas riolíticas, tobas lacustres, conglomerados rojos, basaltos, depósitos de talud, terrazas aluviales y aluviones.

En el embalse no se prevén condiciones de inestabilidad, ya que algunos bloques se encuentran en su máximo nivel de erosión y reposo, no obstante se recomienda monitorear estas áreas durante el llenado. En la zona inmediata a la boquilla en ambos márgenes se tienen rasgos geológicos importantes representados por una topografía estrecha en la margen derecha y por cañadas asociadas a fallas en la margen izquierda en donde se tiene pendiente la realización de sondeos exploratorios con piezómetros para monitorear la evolución de los niveles durante el llenado.

El sitio que alojara las obras civiles, está formado por rocas volcánicas cenozoicas que incluyen andesitas y una secuencia basculada hacia el SW de tobas líticas riolíticas, riódacitas y dacitas, intrusionadas por pórfidos riolíticos o andesíticos y diques diabásicos y cubierta parcialmente por tobas, ignimbritas riolíticas brechoides, terrazas aluviales, depósitos lacustres y pumicíticos, depósitos de talud y aluviones.

1.8. DATOS PRINCIPALES DEL PROYECTO

En las tablas 1, 2, 3, 4 y 5 se describe a manera de resumen principales datos del P.H. La Yesca:

| Localización | |
|-------------------------|--|
| Estado | Jalisco |
| Municipio | Hostotipaquillo |
| Río | Santiago |
| Coordenadas geográficas | 21°11' 49" Norte 104°06'21" |
| Ubicación | La boquilla de la Yesca se localiza a 90 km, en línea recta, al noroeste de la ciudad de Guadalajara, a 4 km aguas debajo de la confluencia del río Bolaños y Santiago y sobre el cauce de este último |
| Tabla 1. | |

| Generación del Proyecto | Dato | Unidad |
|--------------------------------|-------------|---------------|
| Generación media anual | 1 210.00 | GWh |
| Generación media anual total | 943 | GWh |
| Generación media anual firme | 267 | GWh |
| Tabla 2. | | |

| Clima | Dato | Unidad |
|--|--------------------------|---------------|
| Temperatura máxima /mínima (ambiente) | 46.9 / 12.00 | C° |
| Temperatura de diseño máxima / mínima (ambiente) | 37.50 / 20.60 | C° |
| Temperatura máxima promedio verano (ambiente) | 37.5 | C° |
| Temperatura mínima promedio verano (ambiente) | 22.7 | C° |
| Temperatura promedio del agua | 27.18 | C° |
| Temperatura máxima del agua | 31.77 | C° |
| Temperatura mínima del agua | 23.83 | C° |
| Zona climática ambiente | Cálido subhúmedo / rural | |
| Humedad relativa verano / invierno | 36.40 / 48.60 | % |
| Humedad relativa promedio | 38 | % |
| Presión barométrica | 98 | KPa |
| Velocidad del viento | 110 | Km / h |
| Tabla 3. | | |

| Hidrológicos | Dato | Unidad |
|--------------------------------|----------|-------------------|
| Área de la cuenca | 51 990 | Km ² |
| Escorrentamiento medio anual | 3 088.20 | Mm ³ |
| Escorrentamiento medio mensual | 257.35 | Mm ³ |
| Avenida máxima registrada | 7191 | m ³ /s |
| Gasto medio anual | 97.86 | m ³ /s |
| Gasto medio aprovechable | 92.05 | m ³ /s |
| Periodo de registro | 54 | años |

Tabla 4.

| Vaso de almacenamiento | Dato | Unidad |
|---|--------|-----------------|
| Nivel de diseño (correspondiente a la carga de la turbina) | 556.49 | msnm |
| Elevación al Nivel de aguas mínimas de operación (NAMINO) | 518 | msnm |
| Elevación al Nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) | 575 | msnm |
| Elevación del Nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) | 578 | msnm |
| Capacidad útil para generación (NAMO-NAMINO) | 1392 | Mm ³ |
| Capacidad de control de avenidas (NAME-NAMO) | 100 | Mm ³ |
| Capacidad muerta (capacidad al NAMINO) | 900 | Mm ³ |
| Área al NAME | 33.4 | Km ² |
| Área al NAMO | 32.5 | Km ² |
| Área al NAMINO | 17.6 | Km ² |

Tabla 5.

La obra dio inicio en septiembre de 2007, proyecto que servirá para incrementar la capacidad de generación de energía. El alcance del proyecto cuenta con: ingeniería, procura, construcción, equipamiento, montaje y puesta en servicio. Para su construcción se divide en:

- **Obras de desvío.-** Dos túneles de sección portal de 14 metros de altura cada uno y una atagüa de 43 metros de alto con 900,000m³ de volumen.
- **Obras de contención.-** Cortina de enrocamiento con cara de concreto y altura de 205 m, dentro de estas obras se incluyen más de 5,200 m de galerías de inyección y drenaje.
- **Obras de generación.-** Más de 3000 m de túneles y 2 cámaras principales, casa de máquinas con una altura de 50 m y galería de oscilación de 60 m de altura, dos turbinas de 375 Mw de potencia cada una, las cuales en conjunto montadas e instaladas tendrán más de 120,000 toneladas de peso ya colocadas.

Obras de excedencias.- Vertedor con 6 compuertas de regulación de 230 m de altura máxima y 9000,000 de m³ de material desplazado para su construcción

- **Obras asociadas.**- Estas obras son necesarias para la construcción de la obra pero que no están directamente relacionadas de la construcción del proyecto.

Estas obras son:

| Polígonos en la superficie para obras e infraestructura | | |
|---|-------------------------|------------------|
| Polígono | Uso del suelo | Superficie en ha |
| 1 | Habitacional | 45 |
| 2 | Industrial | 150 |
| 3 | Almacén de desperdicios | 3 |
| 4 | Caminos | 2 |

Tabla 6.

Obras de infraestructura

La infraestructura es indispensable para la operación de las obras de proyecto. Estas obras se refieren a las vialidades que comunican las obras principales del proyecto y a todas las edificaciones que se van a requerir para la operación comercial de la planta. Para integrar esta información se desarrollo el plano Superficiales para Obras e Infraestructura.

Vialidades internas

En el caso de La P.H. La Yesca, la vialidad para la construcción representa una gran importancia para la obra debido a lo accidentado del terreno donde se ubican las estructuras y la infraestructura necesaria para el desarrollo del proyecto, por lo cual se requiere de una adecuada planeación de la logística para contar con accesos oportunos a los diferentes frentes de trabajo que de acuerdo al programa deban atacarse.

Además de las especificaciones de construcción del proyecto, se contará con planos de vialidades que serán aplicados por el contratista para que la construcción de caminos siga un plan bien trazado y se aprovechen al máximo los accesos como vialidades definitivas de la planta una vez que entre en operación.

Campamentos, dormitorios y comedores

De acuerdo con el análisis de personal para la construcción del proyecto, se contempló un máximo de trabajadores de 5 100, de los cuales 4 910 corresponden a personal operativo y 190 a supervisión; de este personal se estima que el 70% estarán acampamentados. Lo cual da un aproximado de 3 600 personas; para esta cantidad se prevén instalaciones recuperables de multipanel construidas sobre losas de concreto simple. Estas instalaciones son:

- 30 casas móviles para ejecutivos con capacidad de 90 personas en total.

-
-
- 5 naves de dormitorios para personal técnico con capacidad para 250 personas en total.
 - 40 naves para obreros, con capacidad para 80 personas cada nave.
 - 2 comedores para ejecutivos y personal técnico con capacidad para 350 personas en total.
 - 3 comedores para obreros con capacidad para 3000 personas en total.

Instalaciones sanitarias

De acuerdo con el ordenamiento territorial se prevén 3 sistemas de tratamiento de aguas residuales, por la ubicación de las instalaciones, un sistema se ubicará en la zona industrial, otro sistema se va a instalar en la zona de campamentos y comedores y uno más en la zona de oficinas. Para estos tres sistemas de tratamiento, el contratista ganador de la licitación debe presentar el proyecto ejecutivo, incluyendo ubicación de edificios, red de drenaje, sistema de colectores y colector principal, también debe incluir el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales.

La culminación del proyecto está proyectada para el año 2012.



CAPÍTULO II.

ESTUDIOS BÁSICOS.

2.1. OBJETIVO DE LOS ESTUDIOS

La finalidad del presente estudio, es adquirir un mayor conocimiento de las características geológico-estructurales del macizo rocoso en donde se desarrollarán cada una de las obras que componen este proyecto, para de esta manera garantizar la capacidad de estanqueidad del vaso de almacenamiento. Lo anterior se logrará mediante actividades de mapeo geológico de superficie de los socavones de exploración y de información obtenida de los barrenos, complementando así el modelo geológico de la zona de interés.

2.2. ESTUDIO GEOLOGICO.

ANTECEDENTES

Los eventos volcánicos que sucedieron en la región occidental de México, desde el Cretácico Tardío hasta el actual, muestran evidencia de actividades magmáticas diferentes en un mismo período de tiempo, dependiendo de la localización geográfica en la que se presenten, lo que a su vez determina el ambiente geodinámico al que se relacionan.

En el Cretácico Tardío, la República Mexicana se encontraba representada por una cordillera pacífica, que ocupaba la parte occidental de lo que ahora es el territorio mexicano, ya que toda la porción oriental se encontraba entonces inmersa, mientras que las intrusiones batolíticas del Noroeste y las manifestaciones volcánicas calcialcalinas de Sonora-Sinaloa se asocian a la subducción de la placa Farallón.

Durante la fase de movimientos orogénicos del Albiano-Cenomaniano, se produjo la emersión de la zona central de la cordillera occidental y un vulcanismo andesítico del Oligoceno se desarrolló a lo largo de toda la costa del Océano Pacífico, constituyendo el basamento de la Sierra Madre Occidental; después, en la Provincia occidental se desarrollaron grandes emisiones ignimbríticas ácidas que cubrieron progresivamente la topografía preexistente, encontrando que en algunos sitios, estos paquetes volcánicos superan los mil metros de espesor.

La región Noroeste de México se interpreta como típica de zona de "Rift", detrás de un arco insular de composición andesítica, originado por la reacción de la corteza a los movimientos de subducción, por lo que un origen similar se puede asumir para la Faja Volcánica Transmexicana. Por lo que respecta a la zona de estudio, regionalmente convergen las provincias geológicas de la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana, ambas de origen volcánico, de edad Cenozoica, y ambiente geotectónico de arco continental (Ortega et al. 1992).

La Sierra Madre Occidental está representada en el área por el Súper Grupo Volcánico Superior, cuya composición esencialmente ácida contrasta con la naturaleza básica de la secuencia de la Faja Volcánica Transmexicana; además de que aquella es más antigua que la segunda.

La Faja Volcánica Transmexicana contiene grandes espesores y volúmenes de materiales ígneos extrusivos, que fueron emplazados durante tres episodios volcánicos, desarrollados en el Eoceno, Oligoceno y Mioceno temprano, separados por depósitos vulcanosedimentarios o por discordancias; además, la Faja Volcánica

Transmexicana se observa claramente separada de la Sierra Madre Occidental por una discordancia tectónica producida durante el Mioceno medio.

El primer episodio de la Faja Volcánica Transmexicana es un vulcanismo máfico de significativa volumetría y espesor, en ocasiones alcalino, ocurrido entre 11 y 8 Ma, en la zona central de Nayarit y en la región de Guadalajara, luego, durante el Plioceno temprano, entre 7,2 y 5,5 Ma tuvo lugar un periodo de reducida actividad volcánica, seguido por el emplazamiento de grandes volúmenes de riolitas y cantidades menores de ignimbritas; posteriormente, entre 4,5 Ma y el presente, domina nuevamente un vulcanismo alcalino intermedio a básico y grandes domos riolíticos y dacíticos complejos son emplazados entre Guadalajara y Tepic; finalmente, en el Plioceno tardío y Cuaternario, aparecen grandes estrato-volcanes en la porción norte del arco, mientras que escudos volcánicos y conos cineríticos de composición basáltica caracterizan el frente volcánico.

Ortega, et. al., (1992), sugiere la probabilidad de que las rocas más jóvenes de la región Jalisco-Nayarit, sean producto de un evento geológico independiente relacionado con la apertura del Protogolfo de California y no con la colisión y consumo de la Placa Farallón bajo el continente americano, que es señalada como la causa principal de la génesis de la unidad volcánica ácida más extensa de México y del mundo, que es la Sierra Madre Occidental (Figura 4).

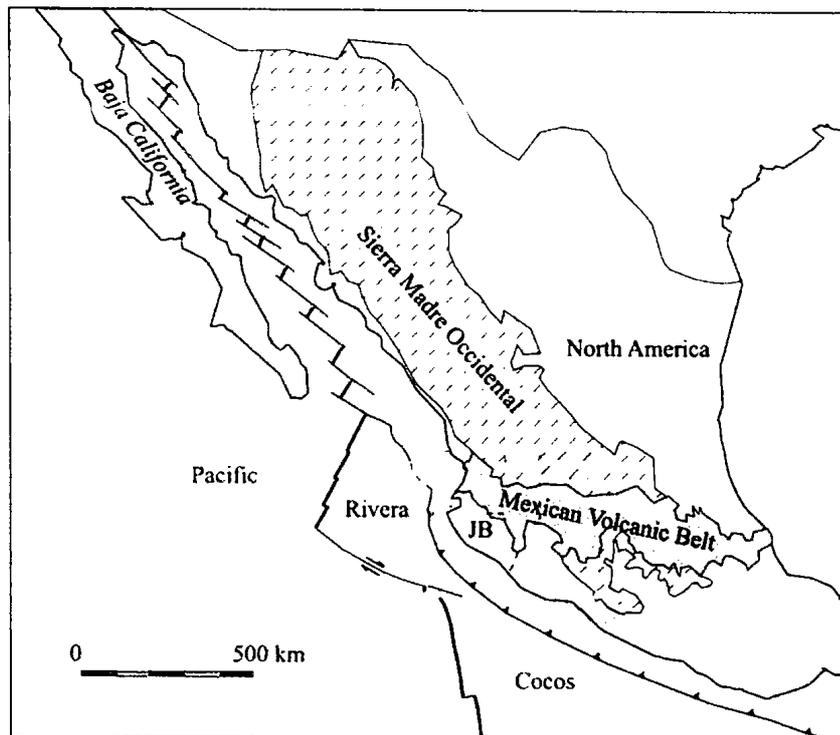


Figura 4. Geometría de las placas Oceánicas y continental.

El P.H. La Yesca se localiza sobre el río Santiago, entre las centrales hidroeléctricas “Manuel M. Diéguez” (Santa Rosa) y El Cajón, ocupando el área que pertenecen a dos

provincias geológicas que son: La Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y la Faja Ignimbrítica Mexicana (FIM), ambas de edad Cenozoica, origen volcánico y ambiente geotectónico del arco continental.

El proyecto se ubica al norte del batolito del bloque Jalisco y al sur de la provincia de la Sierra Madre Occidental, en la frontera de la Faja volcánica Transmexicana y el límite sur de la provincia volcánica silícica de la Sierra Madre Occidental en el límite noreste del Graben Tepic Zacoalco, donde han predominado las manifestaciones volcánicas durante la era cenozoica y cuya composición varía de calciocalina a alcalina. (Figura 5).

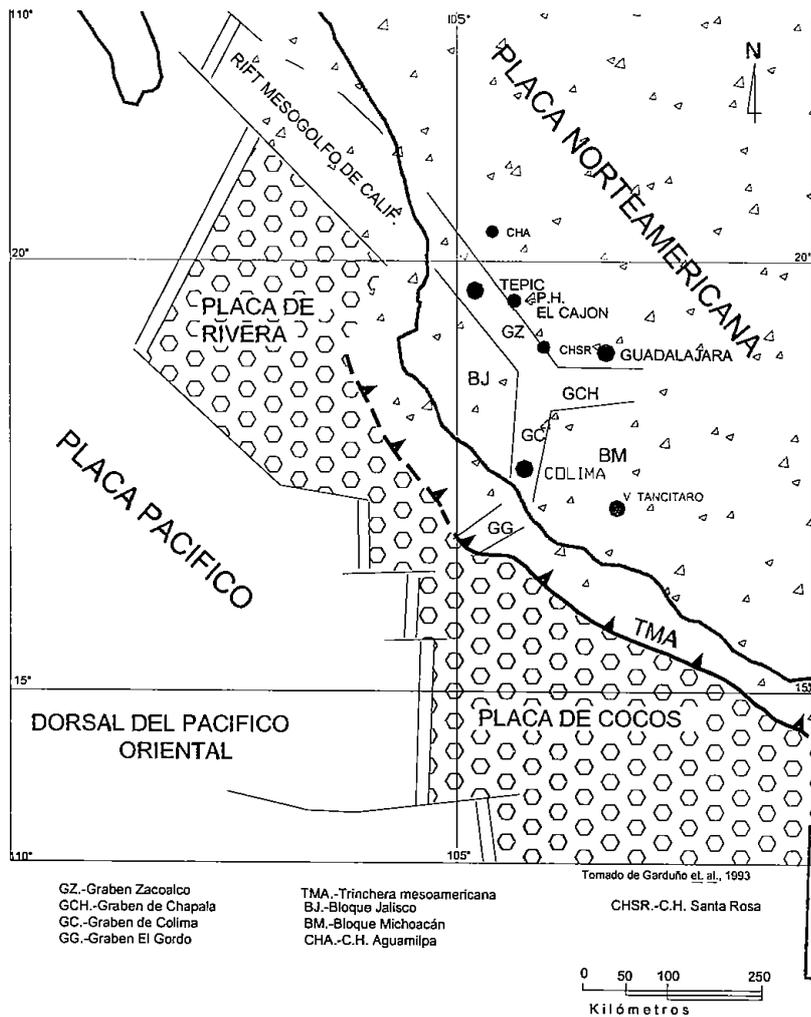


Figura 5. Ubicación del Proyecto en el marco tectono-estructural regional.

Los rasgos estructurales lineales principales se agrupan en cuatro sistemas, el primero NW-SE, al que pertenece el Graben Tepic-Zacoalco, el segundo orientado E-W, representado por el Graben de Chapala y también controla el cauce del Río Santiago en la confluencia del Bolaños, un tercero N-S, correspondiente al Graben de Colima y por último el sistema NE-SW, relegado en los tributarios de los ríos Santiago y Ameca.

El marco estructural regional en el que se encuentra ubicado el sitio del P.H. La Yesca, está dominado bajo la dinámica de la tectónica actual del occidente de México, influenciado por la interacción de las placas tectónicas de Rivera, Cocos y Norteamérica, que actúan de forma oblicua y con diferentes ángulos de subducción a lo largo de la trinchera Mesoamericana, afectando al bloque Jalisco.

Las hipótesis acerca del movimiento del bloque de Jalisco, ayudan a conocer más las características estructurales que dominan al Río Grande Santiago, ya que se considera que este bloque está controlado en su límite norte por un sistema transcurrente lateral derecho que corresponde al cauce del río Ameca, por lo que el bloque Jalisco estaría derivado hacia el NW; por otra parte, dos sistemas de fallamiento regional en el río Grande de Santiago, uno normal de dirección N 40°-75' y otro de tipo transcurrente, que corta al anterior con una dirección N 110°-150', donde las fallas laterales izquierdas son miocénicas y las derechas Pliocuaternarias; por lo que se considera que los cauces de los Ríos Grande de Santiago y Ameca, se encuentran controlados por grandes fallas geológicas, en virtud de que estos se presentan una gran similitud en la traza de sus cauces; también se debe considerar, que la profundidad del cauce del Río Santiago es considerablemente mayor a la del río Ameca, por lo que se asume que el fallamiento que controla los cauces de estos ríos, es más reciente hacia el sur, sin embargo, se considera que la fase tectónica más reciente para esta zona corresponde a un trend estructural de actitud NW-SE, con una marcada distensión en dirección NE.

Por otra parte, la porción Occidental de La Faja Volcánica Transmexicana tiene gran influencia en el área de estudio, ya que presenta una serie de cuencas tectónicas y cadenas montañosas de gran extensión, destacando las depresiones tectónicas del Graben de Chapala, con una orientación preferencial E-W, el Graben de Colima con una actitud N-S y el Graben de Tepic orientado NW-SE, cuyas expresiones morfológicas son muy características, ya que se presentan lagos elongados y colinas alineadas, que se encuentran limitando las partes Norte y Este lo que se conoce como bloque Jalisco.

Un aspecto interesante radica en la presencia de secuencias vulcanosedimentarias de origen lacustre a lo largo de la Faja volcánica Transmexicana, ubicadas a diferentes elevaciones actuales, con distintos espesores y extensiones, lo que sugiere que los paleopatrones de drenaje fueron obturados, ya sea por emisiones volcánicas, por tectonismo o tal vez por la acción combinada de ambos fenómenos.

La tectónica regional a nivel de placas, involucra las del Pacífico, Cocos, Rivera y de Norteamérica, delimitadas por la Dorsal Pacífico Oriental de carácter divergente, además de la zona de subducción de la Trinchera Mesoamericana como límite convergente, Tanto en la Sierra Madre Occidental como en la Faja Volcánica Transmexicana, se encuentran vigentes sistemas de esfuerzos distensivos y, en la frontera entre la placa instrumentalmente en el país en 1932 con 8.2° Richter (Singh, et al., 1985), por otra parte una clara expresión de inestabilidad tectónica actual se muestra cerca de Ixtlán del Río Nayarit, donde una falla con componente lateral derecho, tiene efectos sobre la autopista Guadalajara-Tepic en el km 93.7.

2.3 SISMICIDAD Y RIESGO SÍSMICO

Históricamente, en 1875 se refiere la ocurrencia de un sismo que destruyó la población de San Cristóbal de la Barranca, Jai. (Acosta y Suárez, 1996), al que se estima magnitud no mayor de 6.5° y profundidad menor de 15 km. (Delgado V., et al 2001), alcanzando para el P.H. La Yesca una intensidad de VII en la escala de Mercalli modificada y siendo la fuente sísmica más peligrosa para el proyecto y en 1932, en la frontera entre la Placa de Rivera y el Bloque Jalisco se localizó un macrosismo de 8.2° Richter.

Con la finalidad de observar y analizar la distribución y comportamiento de la sismicidad en el área de estudio, y posteriormente poderla correlacionar con las estructuras geológicas locales, se consultaron los catálogos del Servicio Sismológico Nacional (SSN) con datos del año 1900 a la fecha y de la Comisión Federal de Electricidad, dentro de un radio de 60 Km con centro en la cortina del proyecto; además, con la ampliación de la cobertura de la Red Sismológica en el 2006, a la fecha se tiene localizado un sismo de magnitud 2,9° Mc a 3 km. hacia el SW de la cortina, de tal manera que con la información obtenida se establece que el 85% de los epicentros se ubican dentro de la Fosa Tepic-Chapala, asociados con un régimen tectónico distensivo y patrones estructurales NW-SE y NE-SW.

El catálogo del SSN tiene un nivel mínimo de detección de 4.8° de magnitud Richter y no reporta ningún evento dentro de la zona mencionada, sin embargo, en el catálogo de la CFE se reportan 100 eventos sísmicos con magnitudes menores a 4.63° de Magnitud de Coda (Mc), no obstante el sismo de mayor magnitud reportado es de 4.63° Mc., se localizó entre los volcanes Tepetitlic y Ceboruco; por otra parte, la estación sismológica El Carrizo, localizada a unos 12 km del eje del proyecto, registró sismos locales entre los años 1994 y 2000. Durante los primeros meses de 1994 se registraron en todas las estaciones sismológicas de las cuencas de los Ríos Santiago, Ameca y Mascota, varios tipos de eventos sísmicos: el más notorio tanto por su amplitud como por su duración, es el clasificado por su forma como tipo "B" de baja frecuencia, que pudiese estar asociado a la presencia en el subsuelo de gases magmáticos.

En esta región destacan dos concentraciones de eventos sísmicos, una en torno a la estructura geológica conocida como Caldera de Santa María del Oro, aproximadamente a 55 Km., hacia el noroeste del proyecto y asociada con emisiones geotérmicas (Delgado et al 1992), cuyas magnitudes no rebasan los 3.0° de magnitud de coda, mientras que la segunda se localiza sobre la población Pie de la Cuesta, cerca de Amatián de Cañas, Nayarit, en margen derecha del río Ameca, aproximadamente a 55 Km. hacia el suroeste del proyecto, con magnitudes de 3.5° Mc y a profundidades menores a 10 Km., relacionados con la depresión de Cañas, formada por una gran falla lístrica de tendencia estructural general NW-S

Para estimar las intensidades a que ha estado sometida el área de la cortina, se concentraron efectos de los macrosismos históricos de 1875, 1911 y 1932, resultando que en esta área no varía el grado de intensidad sísmica.

Las fuentes sismogeneradoras consideradas para el cálculo de peligro sísmico para el P.H. La Yesca (Figura 6) son:

1. Subducción, que comprende los sismos generados en la zona de acoplamiento entre las placas, está caracterizada por megasismos a lo largo de la costa del Pacífico.

2. Intraplaca, que incluye sismos de mecanismo normal generados por la placa subducida.
3. Faja volcánica Transmexicana (Eje neovolcánico), con predominancia de sismos corticales, como el de 1911.
4. Sismicidad aleatoria. Comprende sismos dispersos, incluye los sismos inducidos por el llenado del embalse de Aguamilpa.
5. Zona del sismo de 1875, que comprende el área calculada para la fuente del sismo de 1875.

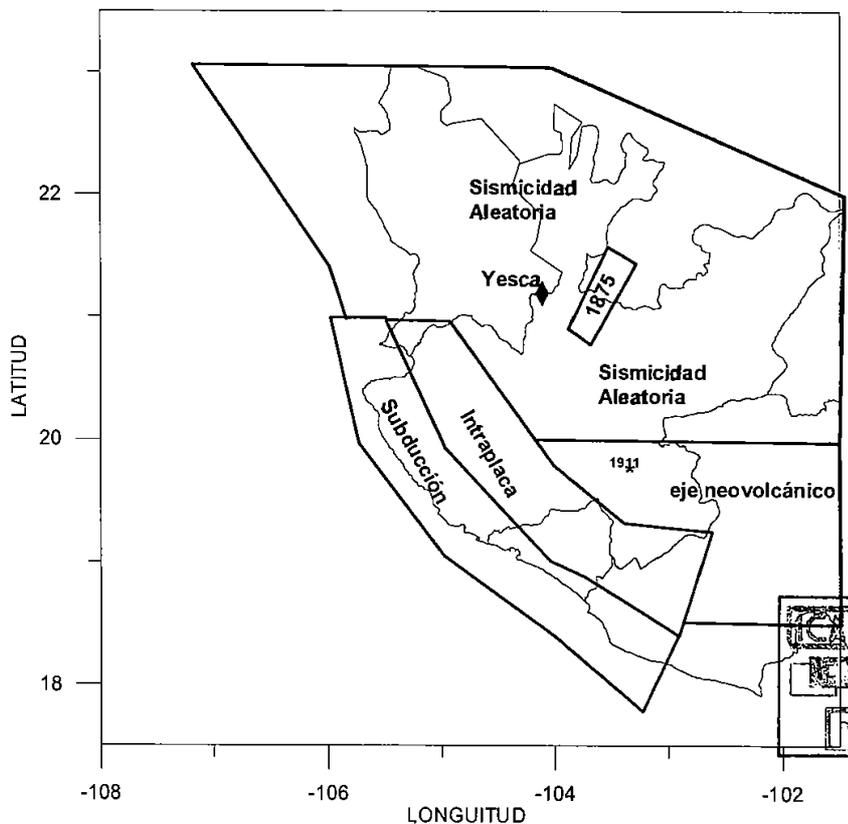


Figura 6. Fuentes utilizadas para calcular el peligro de sismo en el P.H. La Yesca.

El cálculo del periodo fundamental arroja un valor entre 0,01 y 0,15 s y la respuesta teórica del sitio ante un sismo moderado usando el programa EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Análisis) determina un valor de periodo fundamental teórico de 0.1 s. La velocidad de onda de corte promedio resulta de 1 159.88 m/s, la amplificación máxima teórica es igual a 1.0 u, la frecuencia teórica de amplificación máxima es de 0,0 Hz y la frecuencia fundamental teórica se ha calculado en 5.23 Hz; asimismo, mediante la relación de atenuación de Atkinson y Balare se calculó la aceleración teórica máxima del sismo de 1875 ($M_c = 6.5$), misma que arrojó un valor de 0.106 g para el sitio (Vargas H. 2001 et. Al.). Finalmente, el resultado de los cocientes espectrales determinó para el vertedor un periodo

predominante T_0 de 0.12 s, mientras que para las ataguías de aguas arriba es de 0.17 s, recomendando niveles de aceleración horizontal de 1.02 g para el MDE, 0.38 g para el OBE y 0.52g para un periodo de 1,000 años.

2.4. GEOLOGÍA DE LA ZONA DEL EMBALSE

Datos técnicos de diseño

La zona de inundación del embalse del P.H. La Yesca abarcará partes de los municipios de La Yesca, Nayarit y Hostotipaquillo, Magdalena, Tequila y San Pedro Analco en el estado de Jalisco y las características de diseño se describen en la tabla 3.4.1 siguiente:

| CARACTERÍSTICA | DIMENSIONES | UNIDADES |
|---|-------------|-----------------|
| Área al NAME | 3348,00 | 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 | 2392,90 | Mm ³ |
| Capacidad al NAMO | 2292,90 | Mm ³ |
| Capacidad al NAMINO | 900,90 | Mm ³ |
| Capacidad para regular avenidas | 100,00 | Mm ³ |
| Capacidad útil | 1392,00 | Mm ³ |
| Capacidad al umbral de toma | 556,80 | Mm ³ |
| Datos técnicos de embalse del P.H La Yesca | | |

Con el dato del NAME se estableció un área aproximada de 170,00 km² 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.

Geología del Vaso

Las rocas que afloran en el embalse corresponden a una serie de eventos volcánicos, vulcanosedimentarios e intrusiones de cuerpos ígneos que se desarrollaron del Oligoceno al Cuaternario y la litología, los patrones estructurales regionales y la incidencia de los agentes

erosivos han modelado un relieve caracterizado por altas mesetas densamente disectadas por corrientes que han labrado profundos y estrechos cañones, cuyas corrientes tributarias son de tipo dendrítico. El cañón del Río Santiago es el más profundo, ya que entre las mesetas y la elevación promedio del cauce se representan desniveles de 500,00 a 800,00 m; por otra parte, en las laderas que bordean a este colector principal se presentan las mayores pendientes topográficas, las cuales oscilan entre 45° y 60° hasta la cota 650,00 m, mientras que desde los 650 msnm y hacia mayores elevaciones, las pendientes de las laderas oscilan desde 60° hasta verticales, asociadas principalmente con zonas de fallas gravitacionales y con los bordes de erosión de las mesetas de basalto.

Estratigrafía

La columna litoestratigráfica de embalse (figura 7), establecida de forma preliminar con base en la información y datos geológicos obtenidos durante las observaciones de campo y de acuerdo con los antecedentes bibliocartográficos de que se dispone hasta la fecha es la siguiente:

COLUMNA GEOLÓGICA DE LA ZONA DE EMBALSE P.H. LA YESCA

Figura 7. Columna estratigráfica de la zona del embalse del P.H La Yesca

| ERA | PERÍODO | ÉPOCA | NOMENCLATURA | | | LITOLOGÍA | | |
|---------------|-------------|-------------|--------------|----------|-------|--|--|---|
| | | | Qal | Qap | Qdt | | | |
| CENOZOICO | CUATERNARIO | PLEISTOCENO | | | | Aluvión, arenas pumicíticas y depósitos de talud. | | |
| | | | | | Qta | Qlp.- Depósitos lacustres y pumicíticos poco consolidados. Qta.- Terrazas aluviales | | |
| | | | | | | Basalto vesicular amigdalóide y compacto. | | |
| | | | | | Tpc | Conglomerados de paleocauces | | |
| | | | | | Tmp-t | Toba lacustre Conglomerados rojos | | |
| | TERCIARIO | MIOCENO | PLIOCENO | | | | Secuencia riolítica con alternancia de ignimbritas, tobas y flujos riolíticos | |
| | | | | | | | Qdd.- Intrusivo diabásico | |
| | | | | | | | Tda.- Diques y cuerpos intrusivos de andesita porfídica. | |
| | | | | | | | Tgr.- Pórfido riodacítico de grano medio | |
| | | | | | | | Secuencia de ignimbrita dacítica-riodacita con estructura masiva y en ocasiones seudoestratificada. Roca de color gris a gris oscuro en su parte inferior y media, mientras que en la parte superior es de color rosado. | |
| | | OLIGOCENO | MIOCENO | TEMPRANO | | | | Secuencia vulcanosedimentaria seudoestratificada presenta alternancia de tobas líficas y vítreas con horizontes intercalados de tobas arenosas. |
| | | | | | | | | Tom-ata.- Andesita compacta masiva y seudoestratificada. |
| | | | | | | | | Granito |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| PRE-CENOZOICO | | | | | | | | |

Andesitas y tobas andesíticas (Tomata)

La base de la columna estratigráfica regional de la zona de embalse se ha reconocido parcialmente en un pequeño afloramiento en el arroyo Carrizalillo, se trata de andesitas que se pueden correlacionar con unidades similares encontradas en la presa Aguamilpa, donde se realizaron dataciones radiométricas, obteniéndose valores de 22,00Ma, por lo que su edad se sitúa en el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano.

Debido al modo de ocurrencia de este afloramiento, puede tratarse de un bloque flotado, arrastrado por el empuje ascendente de un cuerpo intrusivo de estructura cómica propio de una zona de colapso de margen de caldera.

Depósitos vulcanosedimentarios (Tmvs)

Sobreyaciendo discordantemente a las andesitas antes referidas, se encuentra una secuencia de origen vulcanosedimentario (Tmvs), compuesto en su parte por basal por una alternancia de tobas cristalinas y tobas pseudoestratificadas con horizontes de tobas vítreas arenosas intercalados.

Ignimbrita serie dacítica (Tmid).

Cubriendo concordantemente a las tobas antes referidas, la secuencia varía gradualmente a un paquete radioactivo-dacítico, que conforma los macizos rocosos del sitio de la boquilla y se halla ampliamente distribuido en la zona del embalse, por correlación de unidades similares de la presa Aguamilpa, en donde se realizaron dataciones radiométricas con valores de $19,40 \pm 1,90$ Ma, se le asigna una edad del Mioceno Temprano.

Rocas ígneas intrusivas (tgr, Tqm, Tda y Qdd).

Las secuencias vulcanosedimentaria y volcánica descritas están por cuerpos ígneos ácidos (Tgr y Tqm, básicos (Tda y ultrabásicos (Qdd), emplazados en forma de diques, apófisis y estructuras cómicas.

Los diques y apófisis son indistintamente riolíticos, cuarzomonzoníticos, andesíticos y diabásicos, mientras que las estructuras cómicas son de composición intermedia y los intrusivos mayores son por lo general ácidos, como el intrusivo de granodiorita-tonalita que aflora en el Río Bolaños, a 4.00 km al NE de la confluencia con el Río Santiago.

Hasta la fecha no se tiene conocimiento de dataciones radiométricas de estos intrusivos, pero por posición estratigráfica y relaciones estructurales se les asigna una edad entre el mioceno Tardío y Plioceno.

Ignimbrita serie riolítica (Tmp-lgr).

En discordancia y sobre las rocas antes descritas se tiene una serie riolítica, compuesta de paquetes intercalados de ignimbritas, tobas y riolitas, que afloran en las partes altas de la zona de la boquilla y del embalse cubriendo la secuencia dacítica-radiodacítica.

Por correlación de rocas similares que afloran en la presa de Aguamilpa y en Manga Larga, Nayarit, a las que se le realizaron dataciones radiométricas que reportan edades de 12,00 a 10,00 Ma respectivamente, se consideran del Mioceno Tardío-Plioceno.

Tobas lacustres (Tmp-tl).

Cubriendo también en discordancia a las rocas preexistentes, se encuentran depósitos vulcanosedimentarios pseudoestratificados de origen lacustre (Tmp-tl) intercalados con derrames riolíticos, como se observa en la margen izquierda del Río Santiago y el arroyo Las Juntas.

La edad de esta unidad no está definida, pero por su posición estratigráfica se infiere que son posteriores a la secuencia riolítica y se atribuyen al Plioceno tardío.

Conglomerados rojos (Tp-cg).

Distribuidos de forma errática y discorde sobre la secuencia preexistente, se encuentran depósitos de antiguas cuencas marginales y de paleocauces del Río Santiago, estos depósitos afloran en áreas restringidas en ambas márgenes del río y por su composición estratigráfica y de corto tiempo de formación se les asigna una edad de finales del Plioceno.

Conglomerados en paleocauces. (tpc)

Son materiales conglomeráticos de paleocauces, que incluyen grandes bloques y clastos bien redondeados y mal, riolíticas y dacíticas, granodioritas y pórfidos andesíticos, contenidos en una matriz de gravas, arenas y limos, con moderado grado de consolidación, dispuestos en capas subhorizontales o de forma lenticular, acusando espesores que varían de 2,00 a 35,00 m. Constituyen la cima del Terciario, cubren en discordancia erosional y angular a ignimbritas, radiodacíticas y dacíticas, así como a los cuerpos intrusivos y se encuentran por debajo de las coladas de basalto, depósitos acustres pumicíticos y depósitos de talud.

Basaltos (Qb)

La columna estratigráfica también incluye coladas de basaltos columnares y amigdalares que conforman mesetas y se encuentran principalmente en la margen derecha del Río Santiago, descansan sobre la unidad dacítica y en ocasiones sobre paleocauces.

Los más cercanos al proyecto se localizan en margen izquierda del río, entre Mesa de Flores y la zona de la boquilla, hasta el momento no se tiene datación

radiométrica de estas rocas, pero por su posición estratigráfica se les asigna una edad cuaternaria, se encuentran cubiertos por depósitos pumicíticos lacustres.

Tobas pumicíticas y depósitos pumicíticos (Qlp).

Esta litología tiene una amplia distribución en la zona, conformando extensas mesetas en las partes altas, como remanentes de erosión o cubriendo a las mesetas de basaltos en elevaciones medias, está conformada por pumicitas contenidas y cementadas por una matriz tobácea de grano fino, cubierta por una mezcla heterogénea de fragmentos líticos y pómez, compactados pero no cementados, contenidos en una matriz arenosa-arcillosa, que constituyen delgadas capas horizontales continuas o de forma lenticular.

Su espesor varía de 2,00 a 40,00 m, cubriendo en forma discordante a ignimbritas dacíticas y riódacíticas, ignimbritas riolíticas brechoideas, tobas lacustres y basaltos, en algunas localidades tienen intercalados paleocauces y se hallan parcialmente cubiertas por depósitos de talud por correlación se les asigna una edad Holocénica, contemporánea a los basaltos recientes.

Terrazas aluviales y paleocauces (Qta)

Están conformadas por materiales conglomeráticos que incluyen grandes bloques y clastos bien redondeados y mal clasificados de 0,25 a 1,50 m de diámetro, derivados principalmente de ignimbritas y tobas riolíticas, riódacíticas y dacíticas, fragmentos de granodioritas, de pórfido andesítico y de basaltos, contenidos de una matriz de gravas, arenas y limos, con moderado grado de consolidación, dispuestos en capas subhorizontales o de forma lenticular, acusando espesores que varían de 2,00 a 5,00 m.

Se encuentran intercaladas entre las tobas pumicíticas y los depósitos pumicíticos lacustres, sobre las coladas basálticas y en ocasiones directamente encima de las ignimbritas riódacíticas y dacíticas, se diferencian de los paleocauces terciarios, por que los del reciente contienen fragmentos basálticos.

Depósitos de talud (Qdt)

Ocupan las laderas y zonas de cambio de pendiente abrupta, están compuestos por fragmentos de roca de forma angulosa y granulometría heterogénea, los fragmentos y bloques están contenidos en un material limoso o arcilloso producto del intemperismo de las rocas existentes en las partes altas. El espesor de estos depósitos es variable pero se estima que no rebasa los 30.00 m.

Depósitos aluviales (Qal)

Se encuentran ocupando los cauces de las corrientes superficiales principales y sus afluentes, están compuestos por fragmentos y bloques de rocas volcánicas e ígneas, bien redondeados y mal clasificados, contenidos en una matriz no consolidada de gravas, arenas y limos. Estos materiales acusan espesores que van de 0.6 hasta 20.00 m.

2.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL EMBALSE

Derivado del análisis de la imagen de satélite, fotografías aéreas y modelos digitales de elevación, se estableció que la región se encuentra controlada por cuatro patrones estructurales.

El primer sistema muestra una orientación general NE-SW, tiene una concentración y distribución importante y controla los cauces de los ríos Bolaños y Chico, mientras que el segundo sistema es de dirección NW-SE, presenta una mayor continuidad que el anterior y controla el cauce del Río Santiago.

Un tercer sistema, exhibe una orientación general N-S, muestra una continuidad importante y se le atribuyen los cambios repentinos de los cauces de los ríos antes mencionados y, por último se reconocen curvilineamientos con dirección preferente E-W, que corresponde a rasgos asociados con controles estructurales de origen tectónico, a los que están vinculadas a las estructuras más jóvenes, las cuales, en combinación con los sistemas anteriores forman bloques con evidencias de deslizamientos hacia el norte.

En la verificación de campo se observó que los lineamientos regionales corresponden a fallamiento de tipo normal y, del análisis estadístico estructural realizado se derivan los cuatro sistemas principales que se muestran en el estereograma siguiente (figura 8).

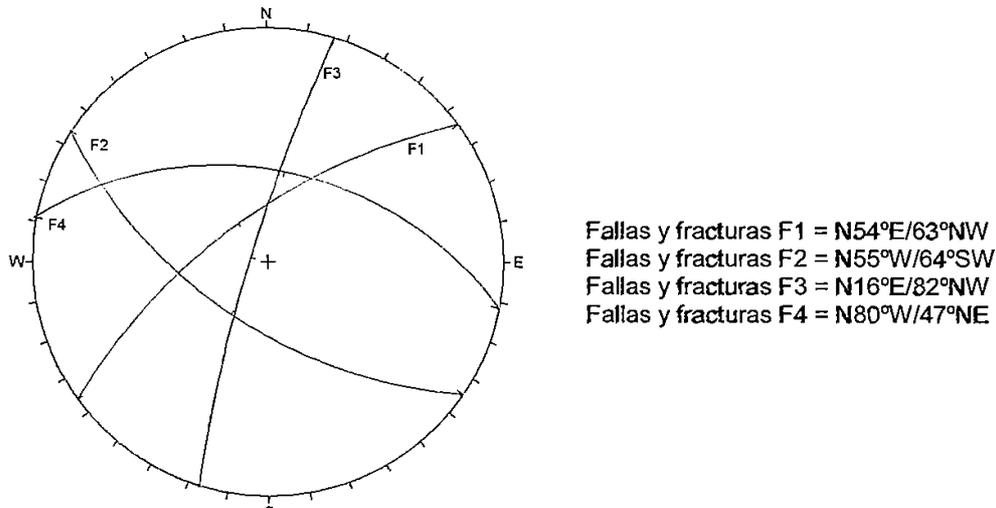


Figura 2.5. Principales sistemas estructurales de la zona embalse.

El sistema estructural que se presenta con mayor persistencia tiene una actitud preferencial N54°E/63°NW y al igual que el sistema N55°W/64°SW, se caracteriza por fallas geológicas con zonas de brecha de hasta 15,00 m de espesor, destacando que el relleno de falta está acompañado de arcilla.

Otro sistema tiene una actitud general $N16^{\circ}E/82^{\circ}NW$ y al igual que los anteriores se observa con brechas ligeramente cementadas con arcilla, definiendo zonas de falla con espesores de 5,00 a 10,00 m.

Por último, se tiene el sistema E-W con una actitud $N80^{\circ}W/47^{\circ}NE$, asociado a bloques deslizados a través de fallas lístricas en la zona de la boquilla, este sistema se caracteriza por presentar zonas de intenso fracturamiento con fracturas parcialmente abiertas, rellenas de arcilla y roca fragmentada pobremente cementada.

Estabilidad de laderas

De acuerdo con las condiciones geológicas-estructurales y la morfología del terreno, se establece que las laderas en el embalse y las zonas de fallas gravitacionales, asociadas con estructuras mayores paralelas al cauce del río Santiago, presentan mínimas condiciones de inestabilidad, ya que estas llegaron a su posición de reposo, máxima erosión y deslizamiento.

Las laderas en estado seco se consideran estables, sin embargo, la saturación de los materiales por influencia del cuerpo de agua de la presa a su máximo nivel, puede generar inestabilidad y deslizamiento de masas o bloques, ya que se tiene evidencia de caídos, principalmente en el arroyo Las Juntas, donde los bloques alcanzan hasta los 30,00 m de diámetro sin embargo, las dimensiones de estos bloques y la lejanía de su ubicación con respecto a la cortina no provocarán riesgo para las obras civiles.

Estanqueidad del vaso

Con base en los reconocimientos geológico-estructurales realizados hasta el momento en la zona de influencia del embalse, a partir de la boquilla y hacia aguas arriba, queda definido que los lineamientos regionales detectados en el embalse, no representan riesgo alguno, para la estanqueidad del vaso; sin embargo, mediante la interpretación de fotografías aéreas y la imagen de satélite, en la margen izquierda, se observó un curvilineamiento hacia el este de la zona de la boquilla, que tiene continuidad desde el vaso hasta aguas debajo de la zona de obras, denominado "Jagüey-Manguito", el cual corresponde a un falla normal orientada $N78^{\circ}E/77^{\circ}NW$; así mismo en la margen derecha se observan estructuras paralelas orientadas $N30^{\circ}E/70-45^{\circ}SE$, que podrían servir como conductos de agua en el subsuelo de adentro hacia afuera del vaso durante el llenado.

2.6. GEOLOGÍA GENERAL DE LA BOQUILLA

Considerando diversos esquemas de obras, la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos solicitó exploración geológica, geotécnica y geofísica del sitio de la boquilla para obtener información de los macizos rocosos en el P.H La Yesca; por tal motivo, se propuso y acordó continuar con el proceso de definición del modelo geológico e interpretación de la geología estructural del sitio en el que estarán alojadas las obras civiles de este importante proyecto hidroeléctrico.

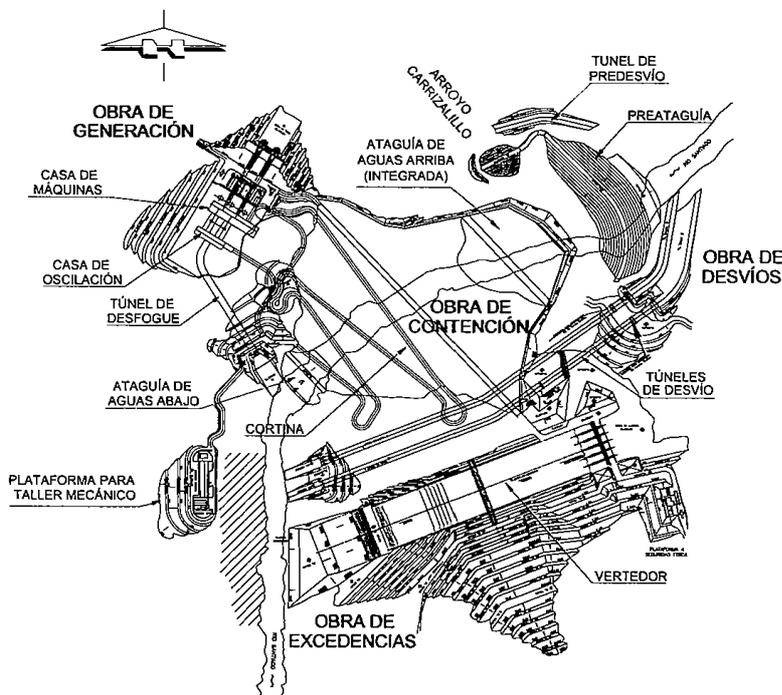
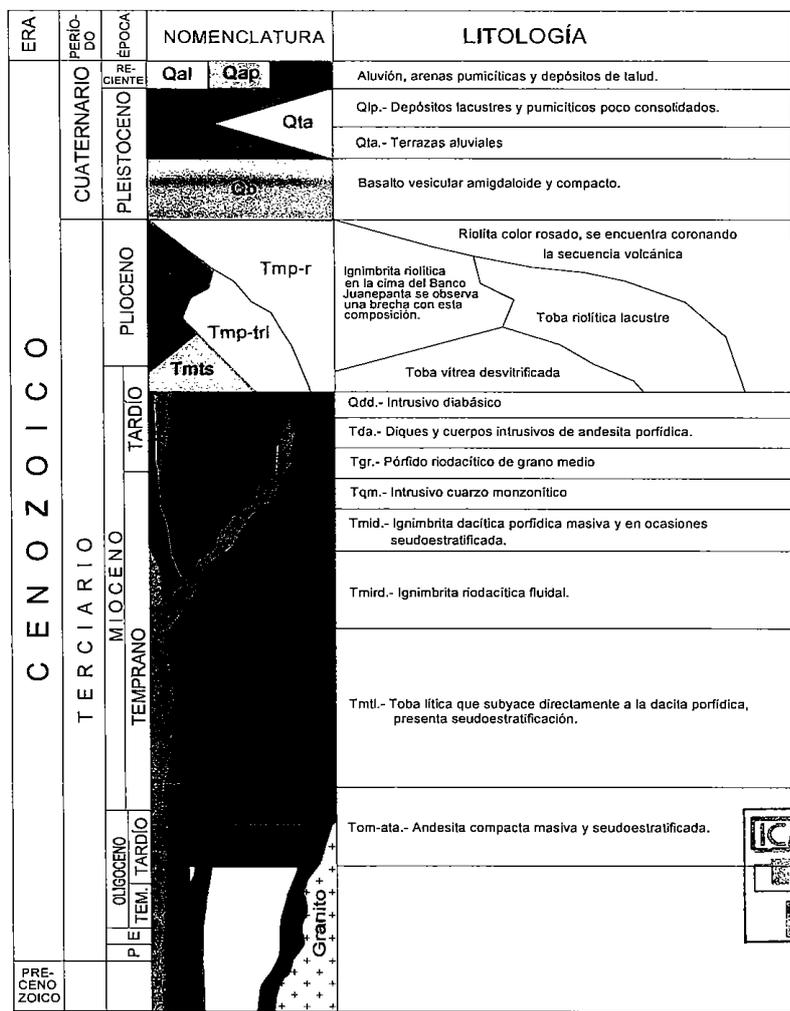


Figura 9. Esquema de obras del P.H La Yesca, que estarán alojadas en la zona de la boquilla.

ESTRATIGRAFÍA

En el sitio en el que se alojarán las obras civiles del P.H La Yesca, está conformado por un grupo de rocas volcánicas del Cenozoico (figura 10), que incluye andesitas (Tomata) 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).

Figura 10. COLUMNA GEOLÓGICA DE LA ZONA DE LA BOQUILLA P.H LA YESCA



Rocas ígneas extrusivas

Andesita (Tomata)

Esta unidad se halla representada por una roca de composición intermedia, de color verde oscuro a negro, textura afánítica y estructura masiva, que presenta una fuerte alteración hidrotermal evidenciada por abundante clorita y epidota y numerosas vetillas de calcita, se observa afectada por el fuerte fracturamiento y es fácilmente disgregable al golpe del martillo. Es la base de la secuencia litológica en el sitio y se haya expuesta como pequeños y esporádicos afloramiento a 400,00 m aguas arriba de la confluencia del arroyo El Carrizalillo con el Río Santiago, en la margen izquierda del arroyo El Carrizalillo, donde se presenta como un bloque flotado de poco tamaño, afectado por un pequeño cuerpo intrusivo pórfido andesítico de forma irregular que produce brechamiento y silificación en la andesita.

Toba lítica (Tmtl)

Es una roca de origen volcánico, de color gris claro a verde claro, piroclástica seudoestratificada, 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 afánítica muy salificada.

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

En la margen izquierda, presenta una mejor explosión a nivel cauce del río, cerca del trazo de la geometría del plinto y aflora de forma continua hacia aguas arriba hasta la zona de los portales de entrada de los túneles de desvío, donde está cubierta por depósitos de talud y aluviones en tanto que hacia aguas debajo de la traza del plinto, entre esta y el eje de la cortina, se observa el contacto entre la toba lítica y la ignimbrita riodacítica fluidal.

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.

Esta unidad litológica se considera en el sitio del proyecto como el basamento de la secuencia, no se le ha definido su espesor, porque no está expuesta su parte basal y se encuentra estratigráficamente por debajo de la ignimbrita riodacítica fluida; por otra parte, se puede observar que se halla intrusionada por cuerpos pórfido andesíticos, apófisis, cuarzomonzoníticos y diques diabásicos, emplazados en los principales sistemas de fracturamiento.

Cabe destacar que en esta unidad, los mecanismos de fricción de falla y las alteraciones hidrotermales incluidas en la roca huésped por efecto de los cuerpos

cuarzomonzoníticos producen materiales arenoso, que también se asocian a la presencia de las intrusiones pórfido andesíticas.

Ignimbrita riodacítica fluidal (Tmird)

Se le identifica como “dacita fluidal” y se trata de una roca piroclástica de color gris claro que varía a pardo u ocre y al intemperizar adquiere tonalidades amarillentas, ocres o grises muy oscuros, exhibe textura fluidal que va desde afanítica hasta porfídica, con pseudoestratos que tienen espesores variables de 0,20 a 1,50 m de espesor y es de composición riodacítica.

El macizo rocoso se presenta fuertemente silificado debido a alteración hidrotermal que ha sellado gran parte de las discontinuidades presentes, lo que ha producido una roca muy dura y cohesiva; sin embargo, aunque es de alta dureza exhibe un denso fracturamiento.

El contacto con la toba lítica subyacente (Tmtl) es concordante y transicional, con una actitud N25°W/34°SW, siendo característicos varios planos paralelos a la pseudoestratificación que se encuentran abiertos y sin material de relleno, en la parte basal, esta unidad se caracteriza por una pseudoestratificación delgada, con pseudoestratos de 0,05 a 0,15 m.

En algunos sitios, las líneas de flujo tienen una actitud coincidente con la orientación de la pseudoestratificación, mientras que en otros casos estas líneas presentan ondulaciones con trazos plegados, características de flujos altamente viscosos que incluso llegan a adoptar una posición casi vertical.

Por correlación estratigráfica se le asigna una edad miocénica, ya que se encuentra cubriendo a la toba lítica (Tmtl) debajo de una ignimbrita dacítica porfídica (Tmld), conformando un espesor de aproximadamente 140,00 m con un marcado basculamiento de 40 a 55° hacia el SW.

La cima de la unidad se caracteriza por la presencia de un paquete de entre 12,00 y 20,00 m de potencia de tobas líticas fuertemente silificadas, con pseudoestratos que van de 0,15 a 0,40 m y en ocasiones hasta mayores a 1.00 m de roca con matriz afanítica muy silificada que envuelve a una gran cantidad de líticos principalmente andesíticos, cuyos tamaños varían de 0.01 a 0.20 m de diámetro y son angulosos a subangulosos, dándole una apariencia brechoide a la masa rocosa pseudoestratificada.

Esta unidad presenta hacia su cima una variación textural gradual, desde fluidal hasta manifestarse como un paquete de tobas líticas extremadamente silificadas, lo que les confiere una fuerte compacidad y una alta competencia geomecánica. En la margen izquierda este paquete presenta su mejor exposición a nivel del cauce del río, en el pedraplén de pruebas El Guamúchil, mientras que en la margen derecha aflora de forma continua desde la zona de socavación 04 M.D hasta el estrechamiento Juanepanta.

El contacto con la dacita porfídica suprayacente es roca a roca, con una actitud general N15°W/44°SW, siendo característicos en este contacto varios planos estriados paralelos a la pseudoestratificación, que se encuentran abiertos y sin material

de relleno. La ocurrencia y distribución del paquete de tobas líticas de la cima de las ignimbritas riodacíticas fluidales es irregular y tiende a presentar acuñamientos frecuentes, no obstante, su presencia fue detectada por algunos barrenos exploratorios desarrollados en la margen izquierda, por debajo de las dacitas porfídicas.

Esta unidad es la segunda en distribución en el sitio, aflorando en la margen derecha desde la porción media de la ladera, aproximadamente desde la cota 552.0m hasta el nivel del río, entre la traza del plinto y la zona de los portales de salida de los desvíos, mientras que en la margen derecha se tiene expuesta desde aguas arriba del Eje La Yesca en la desembocadura del arroyo El Carrizalillo hasta el Socavón 2 de alternativa Juanepanta, por otra parte, el barreno BYSKD-04 perforado para explorar una primera alternativa de casa de máquinas permitió definir el contacto entre la ignimbrita dacítica porfídica y esta unidad a una elevación de 430.00 msnm.

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 silificada, mostrando en algunos sitios sulfuros diseminados; hacia la porción basal, cerca del contacto con la unidad riolítica infrayacente, en algunos sitios son apenas identificables líneas de fluidez y flares.

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 la ignimbrita riolítica fluidal (Tmird), en ocasiones se encuentra cubriendo en discordia a la toba lítica (Tmtl), está intrusada 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 pumiciticos (Qlp).

La masa de roca exhibe estructura masiva y en ocasiones se muestra seudoestratificada, es dura y compacta, sin embargo típicamente se encuentra afectada por un fuerte fracturamiento, algunos planos de fracturas se presentan con arcilla y carbonatos, mientras que otros muestran una pátina de oxidación; además, es característico que los procesos de alteración hidrotermal afectan fuertemente a un que de manera parcial a esta ignimbrita con manifestaciones importantes de silificación, produciendo un cambio textural casi total, conservándose únicamente relictos de plagioclasas.

En margen izquierda, la ignimbrita dacítica porfídica ocupa la porción media y media alta de las laderas, conformando la mayor parte del macizo rocoso en el que se excavarán las obras de excedencias, sin embargo, también se presentan grandes bloques de dacita a nivel de río, principalmente en la zona de los portales de salida de los túneles de desvío, que se interpretan como masas de roca deslizadas desde las partes topográficamente más altas.

En la margen derecha de esta unidad se encuentra ampliamente distribuida, ya que se tiene expuesta desde el eje Juanepanta, donde está suprayaciendo el paquete de tobas líticas de la cima de la ignimbrita riodacítica fluidal, así mismo, 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 pretende 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 riódacíticos, andesíticos y diabásicos que intrusionan a estas ignimbritas.

Toba vítrea desvitrificada (Tmts)

Es una roca de color claro, de textura piroclástica brechoide a eutaxítica, constituida por fragmentos muy alterados de líticos subangulosos a subredondeados de hasta 1.50 cm y fragmentos de vidrio y pómez, contenidos en una matriz tobácea de grano medio a fino fuertemente propilitizada, deleznable al contacto con el agua, contiene también amígdalas rellenas de calcedonia y escasos cristales de plagioclasas, muestra una estructura pseudoestratificada, con estratos de 0.30 a 0.50 m de espesor.

Se encuentra en afloramientos muy reducidos, únicamente en la margen izquierda, ocupando las partes altas, principalmente en la zona de cortes máximos de canal vertedor, donde se observa infrayaciendo a brecha volcánica riolítica (Tmbr), en contacto estructural con la ignimbrita dacítica porfídica (Tmld) y parcialmente cubierta por depósitos lacustres pumiciticos (Qlp) y por depósitos de talud (Qdt).

Brecha volcánica riolítica (Tmbr)

Es una roca de color rojizo que por alteración adquiere tonalidades pardas, posee textura piroclástica que varía de brechoide palillítica a tobácea y aún eutaxítica de tipo ignimbrítico, su estructura es masiva a pseudoestratificada y sus características geomecánicas son una alta dureza y cohesividad, producto de una fuerte derivada de alteración hidrotermal.

Esta unidad se encuentra expuesta de manera local en la zona de estudio y su mejor afloramiento se localiza en la zona de cortes máximos, en la parte más alta de los taludes izquierdos del canal de vertedor y en la zona del canal de llamada de la obra de excedencias, sobre el arroyo socavones, donde se tiene un bloque deslizado acompañado por material pumicitico.

Rocas ígneas intrusivas

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

El grado de alteración que presentan estos intrusivos en superficie se debe a su composición, ya que los tipo diabásico se muestran fuertemente alterados y se rompen fácilmente a golpe de martillo, mientras que los de tipo ácido por lo regular son duros, debido a la silicificación.

Los diques son cuerpos de forma tubular y dimensiones variadas que se encuentran emplazados en fallas y en los principales sistemas de fracturamiento; la orientación de estas estructuras coincide con los sistemas N78°W/60-86°NE, N30°E/88°NW, N25°E/65-75°, NO8°E/75-88°NW y N35°W/8 7°SW.

El espesor de estas estructuras es variable, pero se tiene un rango aproximado de entre 0.50 m y 5.00 m, su continuidad longitudinal es considerable, alcanzando desde 10.00m hasta más de 50.00 m, en tanto que algunos depósitos de talud enmascaran su presencia, permitiendo su afloramiento solo por tramos, no obstante, los rasgos topográficos y la red del drenaje local contribuyen a inferirlos. A continuación se hace una breve descripción de las características de estos intrusivos:

Pórfidos andesíticos (Tda)

Se trata de cuerpos intrusivos irregulares a nivel de afloramiento, sin embargo en lo general adoptan formas tabulares, superficialmente muestran espesores que varían entre 0.50 y 3.50 m; se caracterizan por una gran cantidad de cristales tabulares bien desarrollados de plagioclasas de color blanco de hasta 0.75 por 2.20 cm, contenidos en una matriz de color gris oscuro con tonalidades rojizas a verde o negro, de textura afanítica o microporfídica.

En margen izquierda se tiene un afloramiento de este tipo en el canal de llamada de la obra de excedencias, intrusionando a ignimbritas dacíticas porfídicas muy silicificadas, mientras que en la margen derecha se muestran sobre el arroyo El Carrizalillo, afectando a las andesitas y en la zona del cauce, sobre la traza del plinto, intrusionan a tobas líticas.

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.

Diques diabásicos (Qdd)

Presentan una coloración verde olivo a verde oscuro, tiene textura afanítica, contienen vetillas de calcita, muestran espesores desde 0.20 hasta 5.0 m, en superficie de estos intrusivos tienen continuidad de hasta 500.0 m, parcialmente cubiertos por materiales no consolidados.

Se comportan como cuerpos tabulares que intrusionan toda la secuencia, son compactos, de alta dureza y sus contactos con la litología encajonante es roca a roca y parcialmente con la arcilla en los respaldos, siguiendo los principales sistemas de fracturamiento, emplazados a través de zonas de debilidad siguiendo de preferencia los sistemas de falla.

Pórfidos cuarzomonzónicos (Tqm)

Son cuerpos intrusivos irregulares a nivel de afloramiento, sin embargo en lo general adoptan formas tubulares, sus manifestaciones superficiales más importantes se localizan a la margen derecha, aguas arriba de la preataguía, 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 por 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 invariable vinculados con la diseminación y emplazamiento de sulfuros en esta zona.

Depósitos no consolidados

Terrazas aluviales (Qta)

Están conformadas por materiales conglomerados que incluyen grandes bloques y clastos bien redondeados y mal clasificados de 0.25 a 1.50 m de diámetro, derivados principalmente de ignimbritas y tobas riolíticas, riódacíticas y dacíticas, fragmentos de granodioritas y de pórfido andesítico, contenidos en una matriz de gravas, arenas y limos, con moderado grado de consolidación, dispuestos en capas subhorizontales o de forma lenticular, acusando espesores que varían de 2.00 a 25.00 m.

Este material aluvial se encuentra ocupando terrazas aluviales cuyo desarrollo es paralelo al cauce actual del río Santiago y se identifica en ambas márgenes entre las cotas 412.00 y 580.00 m, expuesto de manera discontinua y erráticamente distribuido, sin embargo, en margen izquierda se hallan expuestos con dimensiones reducidas en la zona de estructura de control y en le canal de llamada de la obra de excedencias, así como aguas debajo de la intersección del plinto con el eje de la cortina, mientras que en la margen derecha se manifiestan en ambas márgenes del arroyo El Carrizalillo.

Constituyen la cima del sistema Terciario dentro del área mapeada, cubren en discordancia erosional y angular a las ignimbritas riódacíticas (Tmird) y dacíticas (Tmid), así como al pórfido andesítico (Tda) y se encuentra por debajo de los depósitos laustres y pumicíticos (Qlp) y depósitos de talud (Qdt).

Tobas pumicíticas y depósitos pumicíticos lacustres (Qlp)

Esta litología aflora en el sector oriental del área de estudio, en la parte alta de macizo rocoso y está conformada por material pumicítico contenido en una matriz tobácea de grano fino que constituye islotes irregulares rodeados y cubiertos por una mezcla heterogénea de abundantes fragmentos líticos y de pómez, subangulosos a redondeados, contenidos en una matriz arcillosa arenosa.

Constituyen materiales compactados pero no cementados y su espesor varia de 2.00 a 40.00 m, cubren en forma discordante a ignimbritas dacíticas porfídicas muy silicificadas (Tmid), ignimbritas riolíticas brechoides (Tmbr) y a tobas vítreas desvitrificadas (Tmts), mientras que a su vez se hallan parcialmente cubiertas por depósitos de talud (Qdt). Por correlación se le asigna una edad Holocénica, contemporánea de los basaltos recientes.

Arenas pumicíticas (Qap)

Este material se presenta suelto o ligeramente compactado pero no cementado pos lo general muy deleznable, se encuentra distribuido en ambas márgenes, de forma indistinta sobre paleodepósitos de talud, terrazas aluviales o ignimbritas dacíticas porfídicas descomprimidas, es de origen piroclástico de caída libre, de color gris muy claro y está constituido por cenizas y arenas bien clasificadas de granulometría gruesa a media, conformando espesores que varían de 0.50 a 3.00 m.

La edad de su formación se ha asignado al Holoceno, ya que se encuentra sobreyaciendo a la ignimbrita dacítica porfídica en discordancia angular, o bien interdigitada con terrazas aluviales y depósitos de talud. La mayor exposición de estos materiales se encuentra en la margen derecha, particularmente en la parte central de lo que se ha denominado “Circo de Erosión” y al poniente de la toma de la obra de generación.

Depósitos de Talud (Qdt)

Se encuentran ampliamente distribuidos en la zona de la boquilla y se identifican en ambas márgenes, ocupando principalmente los sitios de cambios bruscos de pendiente, están conformados por materiales de tamaño y forma heterogéneos que van desde pequeños fragmentos de 0.05 m hasta grandes bloques de más de 5.00 m de diámetro, aglutinados entre materiales limo arenosos. La gran mayoría de los fragmentos o bloques se han desprendido de las partes más elevadas del área, caídos por gravedad o formados por la desintegración provocada por el intemperismo, originando así grandes bloques, arenas y suelos. Estos depósitos de talud son de reciente formación y cubren y enmascaran los afloramientos, siendo destacable que en algunos sitios alcanzan hasta 20.00 m de espesor.

Aluviones (Qal)

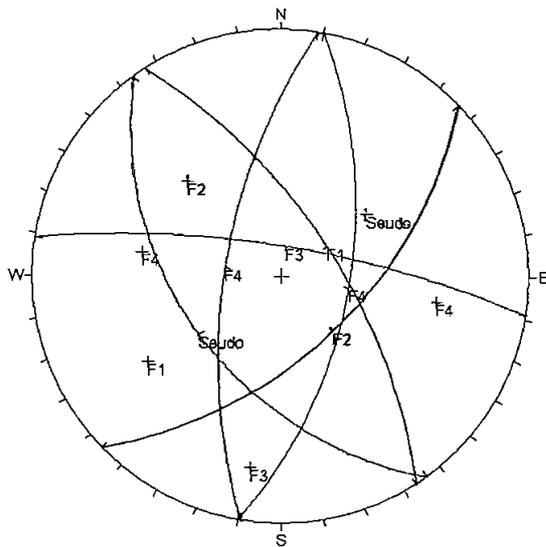
Los depósitos aluviales están compuestos por fragmentos de roca y bloques bien redondeados y mal clasificados en una matriz de gravas, arenas y limos, son de composición heterogénea y tamaños variados, estos materiales se encuentran a lo largo de los cauces del río Santiago y del arroyo El Carrizalillo, con espesores que fluctúan entre 3.00 y 15.00 m.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE LA BOQUILLA.

Margen izquierda

Esta margen presenta una topografía menos accidentada que la margen derecha, con pendientes topográficas que fluctúan entre 30-35°, sin embargo sobresalen en la parte más alta de las obras dos grandes estructuras geológicas que producen líneas de escarpes muy evidentes con paredes casi verticales, que corresponden a la respuesta geomórfica de las fallas Vertedor 1 y El Mirador.

Mediante el análisis estadístico de 1,334 datos, se determinaron los principales sistemas estructurales que afectan el macizo rocoso en la margen izquierda, destacando de acuerdo a su densidad fallas y fracturas seguidos de la seudoestratificación, cabe mencionar que las fallas Olga y El Mogote, son representativas del sistema Ff3, mientras que las fallas Vertedor 1, Vertedor 2, Socavón, Lavadero y Mirador son típicas del sistema Ff4, como se representa en el estereograma siguiente (figura 11).



Fracturas f1= N34°W166°NE
Fracturas f2= N45°E157°SE
Fallas y fracturas Ff3= N82°W176°NE
Fallas y fracturas Ff4= N10°E159°SE-50°NW
Seudoestratificación= N36°W146°SW
(F=fracturas f=fallas)

Figura 11. Principales sistemas estructurales de margen izquierda en el P.H La Yesca

Cabe mencionar que en el sistema N82°W176°NE se encuentran emplazados la mayor parte de los diques diabásicos encontrados en esta margen, aunque también se debe mencionar que se tienen cuerpos intrusivos de esta naturaleza con echados hacia el SW, como los que se encuentran en la zona de los portales de entrada de los desvíos y en el cauce, aguas debajo de la traza del plinto.

Para una mejor comprensión, en la tabla se describen las principales características de los sistemas de fracturas que prevalecen en esta margen, mientras que en la tabla siguiente se hace lo propio con las fallas geológicas más importantes.



| Sistema | Continuidad (m) | Frecuencia (fracturas por metro lineal) | Ru = Rugosidad Ab = Abertura (cm) | Observaciones |
|------------------------|-----------------------|---|---|---|
| (seudo) N36°W/46°SW | 60,00 m o más. | 1 a 5, 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). |
| f1 N34°W/66°NE | 0,60 a 10,00 m o más. | 1 a 5 | Ru = Planas-rug. y escalonadas-rug. Ab = Cda. a 0,01 | Algunos planos con óxidos de hierro y relleno de arcilla. |
| f2 N45°E/57°SE | 0,30 a 7,00 m. | 1 a 3, en ocasiones hasta 7 | Ru = Ond.-lisos. Ab = Cda. a 0,03. | En algunos casos, el relleno es de arcilla y suelo orgánico, impregnaciones de óxidos de hierro |
| f3 N82°E/56°NW | 0,02 a 8,00 m | 1 a 3, en ocasiones hasta 10 | Ond.-lisas, plana-rug. Ab = Cda. a 0,07 | El material de relleno es en algunos casos, impregnaciones de arcilla, óxidos de hierro y suelo orgánico. |
| f4 N02°E/ 54°SE | 0,10 a 12,00 m | 1 a 4 | Ru = Ond.-lisa, plana-rug. Ab = 0,005 a 0,05 | La superficie de contacto de algunas fracturas presenta impregnaciones de óxidos de hierro. |

Tabla 4.2.1. Características de seudoestratificación y fracturamiento de la margen izquierda.

Tabla 7. Características de seudoestratificación y fracturamiento de la margen izquierda.

| Falla | Actitud | Espesor (m) | Continuidad (m) | Relleno | observaciones |
|------------|----------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------------|---|
| MIRADOR | N15°E185°NW | 10,0 a 15,0 | 700 | Brecha, arcilla y óxidos | Planos de falla paralelos, afecta a taludes izquierdos del vertedor |
| VERTEDOR 1 | N20°E160°SE | 5,0 a 30,0 | 700 | brecha, roca triturada y arcilla | Espacios vacíos, contacto dacítica porfídica-riodacita fluidal, afecta a la estructura de control y taludes izquierdos del vertedor |
| VERTEDOR 2 | N20°E160°SE | 5,0 a 15,0 | 400 | brecha, roca triturada y arcilla | Espacios vacíos, contacto dacítica porfídica-riodacita fluidal, afecta taludes izquierdos del vertedor en zona de descarga. |
| COLAPSO | N85°E175 46°NE N85°E175 46°NW | 2,5 a 5,0 | 700 | brecha y arcilla | Asociada con zona de cizallamiento de hasta 30,0 m, afecta muro izquierdo de estructura de control de vertedor. |
| COLAPSO 1 | N85°E155-80°NW N76° W150-72°NE | 1,6 a 3,0 | 600 | brecha y arcilla | Asociada con zona de cizallamiento de hasta 10,0 m, afecta portales de entrada de desvíos y plinto. |
| COLAPSO 2 | N70°E/55-80°NW N80°W/55-75°NE | 0,3-0,6 | 300 | brecha y arcilla | Asociada con zona de cizallamiento de hasta 5,0 m, afecta zona del plinto. |

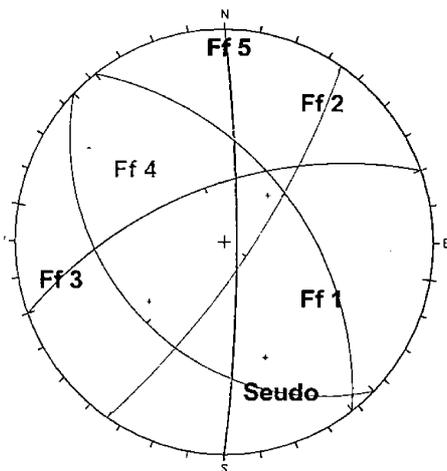
| | | | | | |
|----------|-------------|------------|-----|-------------------------------|---|
| OLGA | N75°W/65°NE | 0.5 a 15.0 | 350 | brecha cementada y arcilla | En algunos sitios la brecha está bien cementada por sílica, afectara taludes derechos del canal vertedor. |
| MOGOTE | E-W/80°N | 3.0 a 5.0 | 200 | brecha cementada silicificada | Afecta principalmente a muro derecho del vertedor y estructura de control. |
| LAVADERO | N-S/53°W | 0.6 a 0.3 | 200 | brecha y roca fracturada | grandes bloques (15 x 5 x 5 m), con salida hacia el cauce del río |

Tabla 8. Características de las fallas principales de la margen izquierda. 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 400.0 x 250.0 m, evidenciada por una traza semicircular 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 silificación sobresalen topográficamente debido a la erosión diferencial.

Las principales discontinuidades geológicas identificadas en esta zona son fallas, fracturas pseudoestratificación; por lo general las fallas son de tipo normal, con relleno de material al cataclástico que varía de compacto a deleznable, acompañado de cantidades diversas de relleno y en algunos casos presenta 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 12:



Fallas y fracturas Ff9= N38°W149°NE
Fallas y fracturas Ff2= N30°-34°E176°SE-58°NW
Fallas y fracturas Ff3= N70°E160°NW
Fallas y fracturas Ff4= N80°W60°NW
Fallas y fracturas Ff5= N-S183°-55°E
Seudoestratificación= N46°

Figura 12. Principales sistemas estructurales de la margen derecha en el P. H. La Yesca.

Cabe mencionar que las fallas Carrizalillo y Rodaderos pertenecen al sistema Ff1, cuyas discontinuidades, llegan a presentar orientaciones de hasta N60°W135°NE.

Las fallas Crucero Pitayo y La Sabanilla ejemplifican el sistema Ff2 y se caracterizan por tratarse de fallas de tipo listrico 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 sistemas Ff3, que también se caracteriza por estructuras lítricas de bajo ángulo.

Las estructuras correspondientes s 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 representantes del sistema Ff5 y la seudoestratificación exhibe una actitud general N46°W134°SW, mostrando un claro basculamiento de la secuencia hacia el SW.

Destaca en el límite norte del circo de erosión, la zona de nominada Colapso sur, como reflejo geomórfico orientado N45°W165° 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 siguiente tabla, mientras que las fallas más importantes se resumen en la tabla siguiente:

| Sistema | Continuidad (m) | Frecuencia (fracturas por metro lineal) | Ru= Rugosidad Ab= Abertura (CM) | Observaciones |
|-------------------------|---|---|---|--|
| seudo N46°W134°SW | >60.0 m | 1 a 5 y en ocasiones hasta 7 | Ru=Planas-ond. Y planas-rug Ab=Cada. A 0.05 | Presentes en las unidades Toba litica (Tmtl), riocácitica fluidal (Tmird) y dacítica porfídica (Tmid). |
| Ff1 N38°W149°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°N E | 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 0.01. | Fracturamiento parcialmente abierto, pero en general predomina el relleno arcilloso acompañado de una considerable cantidad de material arenoso. |

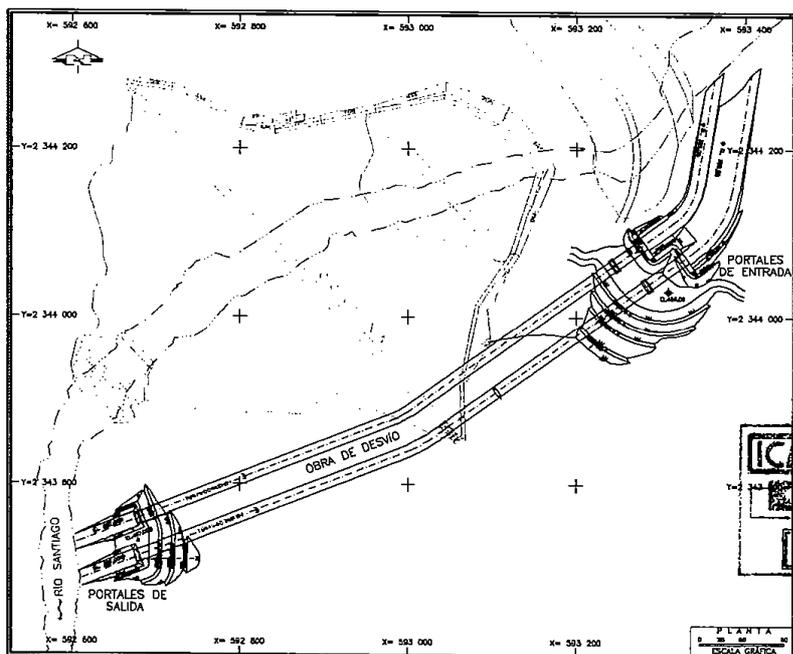
Tabla 9. Características de seudoestratificación de la margen derecha.

2.7. GEOLOGIA DE LA ZONA DE OBRAS

OBRAS DE DESVIÓ

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La zona de desvío del P.H La Yesca comprenden la ataguía de las aguas arriba, integrada al cuerpo de la cortina, además de una preataguía, una ataguía aguas abajo y dos túneles excavados en la margen izquierda; la ataguía de aguas arriba tiene una longitud de corona de 229.4 m, a la elevación 439.0 msnm, mientras que la cota 409.0 m la longitud de la corona de la ataguía de aguas abajo es del orden de 107.717 m; la preataguía tiene una longitud de túneles de 14.0 x 14.0 m de sección portal, con una distancia entre sus ejes de 42.0 m; la longitud del túnel de desvío 1 será de 693.3 m y la del túnel 2 de 750.576; estos túneles están diseñados para un gasto máximo de 8653 m³/s, para una avenida máxima anual con un tiempo de retorno (Tr) de 200 años, se tienen previstas excavaciones a cielo abierto, hasta la cota de desplante, para el emportalamiento de los túneles en la entrada y salida; el canal de llamada, por la entrada, tiene 60.0 m de ancho y una longitud de 222.7 m hasta el portal del túnel 1 y de 239.8 m al portal del túnel 2. Las aguas se integrarán nuevamente al río Santiago por medio de 2 canales de 18.0 m de ancho, uno por cada túnel.



| Túnel | Longitud de los túneles (m) | Elevación del piso en portales de entrada | Elevación del piso en portales de salida |
|-------|-----------------------------|---|--|
| 1 | 693.348 | 392.0 msnm | 387.0 msnm |
| 2 | 750.576 | 395.5 msnm | 387.0 msnm |

Figura 13. Características generales de los túneles de los túneles de desvío

Condiciones Geológicas de los túneles de desvío

Las condiciones geológicas de la zona de obras para los túneles de desvío se establecieron a partir de la cartografía superficial de detalle, con apoyo de la aplicación de métodos indirectos, como Tendidos de Refracción Sísmica Eléctricos Verticales (SEV). Con el método sísmico se obtuvieron los espesores de roca intemperizada y alterada, así como los espesores de materiales no consolidados (suelo, talud y aluvión) que cubren los afloramientos de roca, además de estimar, de manera cualitativa, la resistencia geomecánica de los materiales (calidad de roca); con el método eléctrico se estableció la estratigrafía aproximada del subsuelo y se identificaron las principales estructuras geológicas (fallas) y zonas anómalas. Dicha información se comprobó con la perforación de cuatro barrenos (diámetro NQ), distribuidos a lo largo de la traza de los túneles. En los párrafos siguientes se resumen los resultados obtenidos con la exploración.

Desde el punto de vista litológico, las obras de desvío quedarán alojadas principalmente en riodacita (Tmird) y tobas líticas (Tmtl), en la zona de los canales y portales de entrada, así como en dacitas porfídicas (Tmid), expuestas en los portales y canales de salida. A lo largo de las excavaciones se encontrarán diversos cuerpos intrusivos, tales como diques pórfido andesíticos (Tda), diabásicos (Qdd) y granitos (Tgr), los dos primeros susceptibles de alteración mientras que los graníticos son componentes y de buena calidad. En la zona del canal de llamada, en la parte superior de la traza de los túneles y en el canal de salida del túnel de desvío 2 existen depósitos de talud (Qdt), mientras que las acumulaciones aluviales (Qal) se presentan en los canales de entrada y salida.

Canal de llamada

El piso del canal de llamada en el túnel de desvío 1 estará ubicado a la elevación 392.0 msnm; durante las excavaciones se ejecutarán cortes máximos en el talud izquierdo de 33.0 m; casi a la entrada del túnel, mientras que para el desvío 2 el piso del canal se ubicará a la cota 395.50 m, para su desarrollo las excavaciones a cielo abierto alcanzarán cortes máximos de 64.0m en el talud frontal.

En el túnel de desvío 1, el piso del canal de llamada será excavado en tobas líticas (Tmtl), en superficie los materiales removibles no consolidados (Qal y Qdt) se presentarán desde el cauce del río hasta la zona del emportamiento del túnel (cad. 0+000), su espesor varía de 5.0 a 12.0 m, en el material aluvial se profundiza por debajo de la línea de excavación de proyecto entre los cadenamientos de 0-222.35 a 0-165.0 m con espesores de 2.0 a 8.0 m; estos materiales presentan velocidades de 0.35 a 1.3 km/s (aluvión seco y saturado) y resistividades de 151 a 1314 Ω -m.

Por debajo de los depósitos no consolidados, se encuentran tobas líticas que consisten en una roca dura fracturada de regular a mala calidad (Tmtl), con velocidades que oscilan de 1.3 a 2.0 km/s y su resistividad varía de 24 a 278 Ω -m, dicho material se excavará entre 0-130.0 y 0-072.0. A partir del cadenamiento 0-72.0 y hasta el portal del túnel 1 (0+000), el canal de llamada se excavará en tobas líticas de buena calidad (Tmtl), que comprende una roca muy dura y poco fracturada, con velocidades de 3.0 a 3.2 km/s y valores resistivos de 108 a 113 Ω -m; a profundidad se detectaron resistividades que varían de 209 a 422 Ω -m, dicha diferenciación resistiva

se puede deber a la intensidad del fracturamiento, arena en las discontinuidades o a la presencia de un cuerpo intrusivo. En la tabla 10 se muestran los aspectos geológicos y su correlación geofísica en el área del canal de llamada.

| Túnel | Cadenamiento | Litología | Velocidad (km/s) | Resistividad Ω -m | Observaciones |
|-------|------------------|-----------|------------------|--------------------------|---|
| 1 | 0-222.35-0-090.0 | Qal | 0.35-1.3 | 151-322 | Aluvión seco y saturado |
| | 0-090.0-0+000.0 | Qdt | 0.35-0.58 | 492-1314 | Material no consolidado |
| | 0-168.0-0.130.0 | Tmtl | 1.3 | 134-136 | Roca descomprimida, de muy mala calidad |
| | 0-130.0-0-072.0 | Tmtl | 1.9-2.0 | 24-278 | Roca fracturada de regular calidad |
| | 0-072.0-0+000.0 | Tmtl | 3.0-3.2 | 108-113 | Roca poco fracturada, de buena calidad |

Tabla 10. Condiciones geológicas en el canal de llamada túnel 1

Por otro lado, sobre la traza del eje del túnel 2, el canal de llamada será excavado en un potente paquete de aluvión (Qal), depósitos de talud (Qdt) y tobas líticas (Tmtl)

En la trayectoria del eje del canal de llamada, entre los cadenamientos 0-281.92 y 0-110.0 m, se tiene un depósito de aluvión (Qal), con espesor máximo de 21.0 m, con velocidades de 0.45 a 1.3 km/s (aluviones secos y saturados) y resistividades de 85 a 141 Ω -m.

A partir del cadenamiento 0-110 m, la excavación a nivel del piso del canal de llamada ocurrirá en roca dura muy fracturada de mala calidad representada por las tobas líticas (Tmtl), cuya respuesta sísmica varía de 1.4 a 1.6 km/s, con resistividades de 152 a 233 Ω -m y un espesor de 12 a 25 m, este último valor determinado en la zona del portal de entrada. Entre 0-019.0 y el portal entrada se excavará un tramo de roca de buena calidad, que sobresale 7 m por arriba de la elevación del piso del canal de llamada, se trata de tobas líticas (Tmtl) con velocidad de onda compresional de 2.7 a 3.2 km/s y resistividades de 84 a 448 Ω -m. superficialmente se tiene depósitos de talud (Qdt) de 12m de espesor, que presentan velocidades entre 0.35 y 0.80 km/s y resistividades de 94 y 878 Ω -m. en la tabla 11 se resumen las condiciones geológicas en el portal de entrada del túnel 2 y su correlación con los parámetros geofísicos.

La falla Carrizalillo y otras de menor importancia afectan la zona del canal de llamada entre los cadenamientos 0-150.0 y 0-060.0, es probable que se encuentren fallas correspondientes al sistema pilares y pequeñas replicas de colapso.



| Túnel | Cadenamiento | Litología | Velocidad (km/s) | Resistividad Ω -m | Observaciones |
|--|------------------|-----------|------------------|--------------------------|--|
| 2 | 0-281.92-0-110.0 | Qal | 0.45-1.3 | 85-1141 | Aluvión seco y saturado |
| | 0-110-0+000.0 | Qdt | 0.35-0.80 | 94-878 | Material no consolidado |
| | | Tmtl | 1.4-1.6 | 152-233 | Roca descomprimida, de muy mala calidad en el piso de canal |
| | 0-130.0-0-072.0 | Tmtl | 2.7-3.2 | 84-448 | Roca poco fracturada, de buena calidad, en media sección inferior del portal del túnel |
| Tabla 11. Condiciones geológicas en el canal de llamada túnel 2 | | | | | |

Portales de entrada

En la entrada de los túneles de desvío se tiene proyectada una excavación a cielo abierto, desde el piso de los túneles, elevación 395.50 msnm para el túnel 2 y 392.0 msnm para el túnel 1, con taludes frontales con pendiente de 0.24 a la elevación 435 msnm, a partir de esta elevación se tiene proyectado un talud de 0.5:1 hasta la cota de 456.0 m, donde se ubica la plataforma para las lumbreras de obturadores de cierre provisional, arriba de la plataforma el proyecto considera bermas a cada 20m con taludes de 0.5:1 y 1:1 hasta la elevación 560.0 msnm.

Dichos taludes se excavarán en roca fracturada de mala calidad de la riocacita fluidal (Tmird), intrusivo granítico (Tgr) y hacia las cotas inferiores de tobas líticas (Tmtl), con valores de velocidad que varían de 0.7 a 1.5 km/s y resistividades de 213 a 1067 Ω -m.

En el túnel de desvío 1, el emportalamiento se llevará a cabo en tobas líticas, de buena calidad, donde se obtuvieron velocidades de 3.2 km/s y resistividades de 110 Ω -m. Para conformar los taludes será necesario remover el depósito de talud de 11 m de espesor que se presenta hasta la cota 450 m. Por encima de la bóveda del túnel, los taludes proyectados hasta la cota 560, se excavarán en las unidades litológicas de la riocacita fluidal (Tmird) y la toba lítica (Tmtl), ambas con características de roca descomprimida con velocidades de 0.7 a 1.1 km/s y resistividades de 336 a 833 Ω -m, el contacto entre estas unidades se encontrará cercano a las cotas 430.0 a 445.0 m, con buzamiento hacia el macizo rocoso.

Con respecto al túnel de desvío 2, los depósitos de materiales no consolidados que será necesario remover se acuñan en la cota 439.0 m, presentando un espesor máximo de 11.0 m. En el portal del túnel 2 la parte media inferior se excavará en la toba lítica (Tmtl) sana, identificada por su velocidad de 3.2 km/s y sus resistividades que varían de 448 a 492 Ω -m, a partir de cota 402 a los taludes se desarrollarán en los siguientes tipos de roca: toba lítica, riocacita fluidal (Tmird) y diques intrusivos de composición granítica (Tgr) y andesítica (Tda), todas con características de roca

descomprimida, por sus velocidades de 1.0 a 1.5 km/s y resistividades de 152 a 681 Ω -m.

Como un dato adicional, es importante mencionar que las condiciones morfológicas del terreno en la zona de la traza del talud frontal permiten inferir en la superficie una zona anómala que pudiera asociarse con fallas antiguas de colapso, pero que no presenten riesgo para la conformación de los taludes.

En la tabla 12 se resumen las condiciones geológicas de los portales de entrada de los taludes de desvío.

| Elevación | Litología | Velocidad km/s | Resistividad | Observaciones | Elevación |
|--------------|---|----------------|--------------|--|--------------|
| 447.0-412.0 | Deposito de talud (Qdt) | 0.35-0.58 | 492-1314 | Espesor máximo de 11 m en zona de taludes. | 447.0-412.0 |
| 488.0-425.0 | Toba lítica (Tmtl) y riocacita fluidal (Tmird) | 0.7-1.1 | 336-833 | Roca de mala calidad, zona de contacto entre las unidades Tmtl y Tmird en zona de portal. Espesor máximo de 42 m de material de mala calidad en zona de taludes. | 488.0-425.0 |
| 425.0-407.0 | Toba lítica (Tmtl) | 1.9 | 228 | En la clave del túnel se presenta roca de regular calidad con un espesor de 16m. | 425.0-407.0 |
| 407.0-392.0 | Toba lítica (Tmtl) | 3.2 | 110 | Roca silificada, de buena calidad. | 407.0-392.0 |
| 438 | Deposito de talud (Qdt) | 0.35-0.8 | 94-878 | Límite superior del depósito, de poco espesor. | 438 |
| 550.0-402.0 | Riocacita fluidal (Tmird), intrusivo granítico (Tgr) y toba lítica (Tmtl) | 0.8-1.5 | 213-1067 | Roca descomprimida en zona de taludes y portal de entrada | 550.0-402.0 |
| 402.0-395.50 | Toba lítica (Tmtl) | 3.2 | 492 | Roca de buena calidad | 402.0-395.50 |

Tabla 12. Condiciones geológicas previstas en la excavación de los portales de entrada de los túneles de desvío.

Desde el punto de vista geológico-estructural, los portales de entrada de los túneles de desvío están ubicados en un bloque deslizado, limitado por las fallas Colapso 1 y Colapso 2, el cual se observa afectado por estructuras asociadas al sistema de fallas vertedor. El rasgo estructural más relevante en la zona del portal del túnel 1 es la presencia de una falla del sistema referido, orientada al N 08° E/ 65° SE, la cual se proyecta desde la superficie hacia el talud frontal y el portal de entrada del túnel, cortando la clave y parte de la tabla izquierda el portal del túnel 2 estará afectado por la falla Colapso 1, de rumbo N76° W/ 50-72° NE, que se proyecta hacia el muro izquierdo. En la tabla se resumen las características de las fallas que inciden en la zona de los portales de entrada de los túneles de desvío.

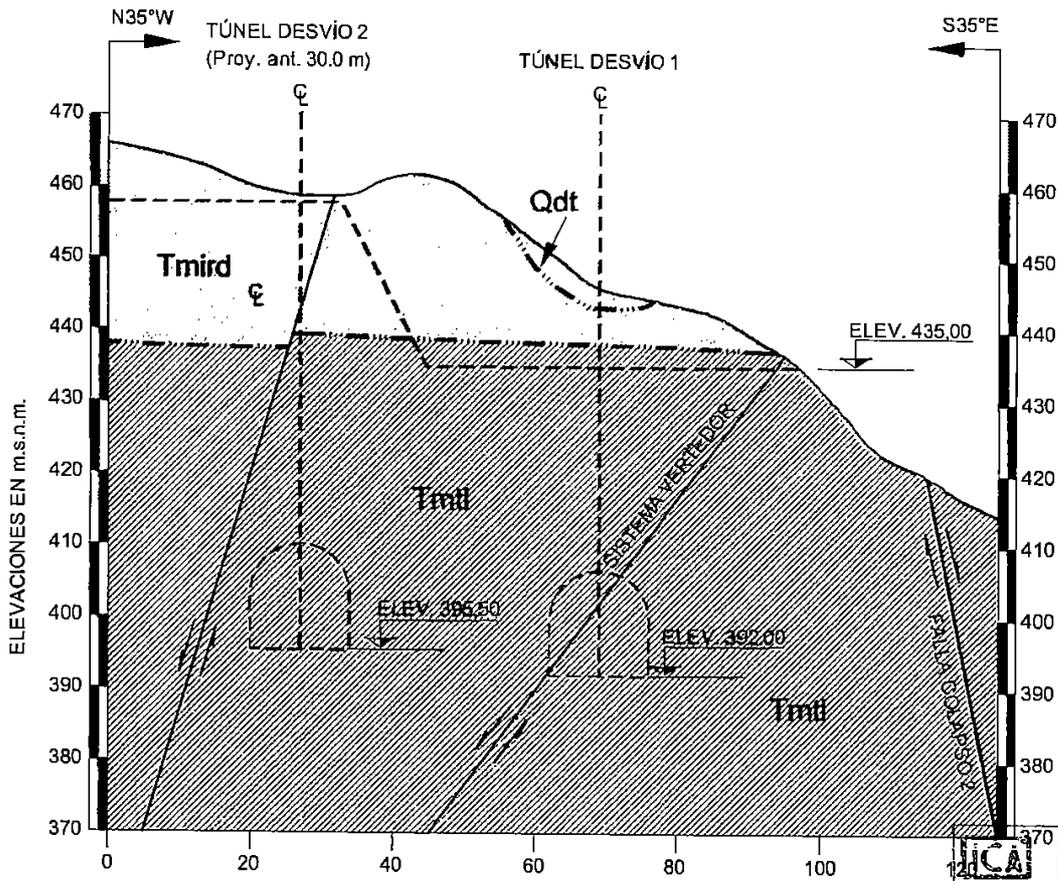


Figura 14. Sección esquemática del portal del túnel de desvío 1.

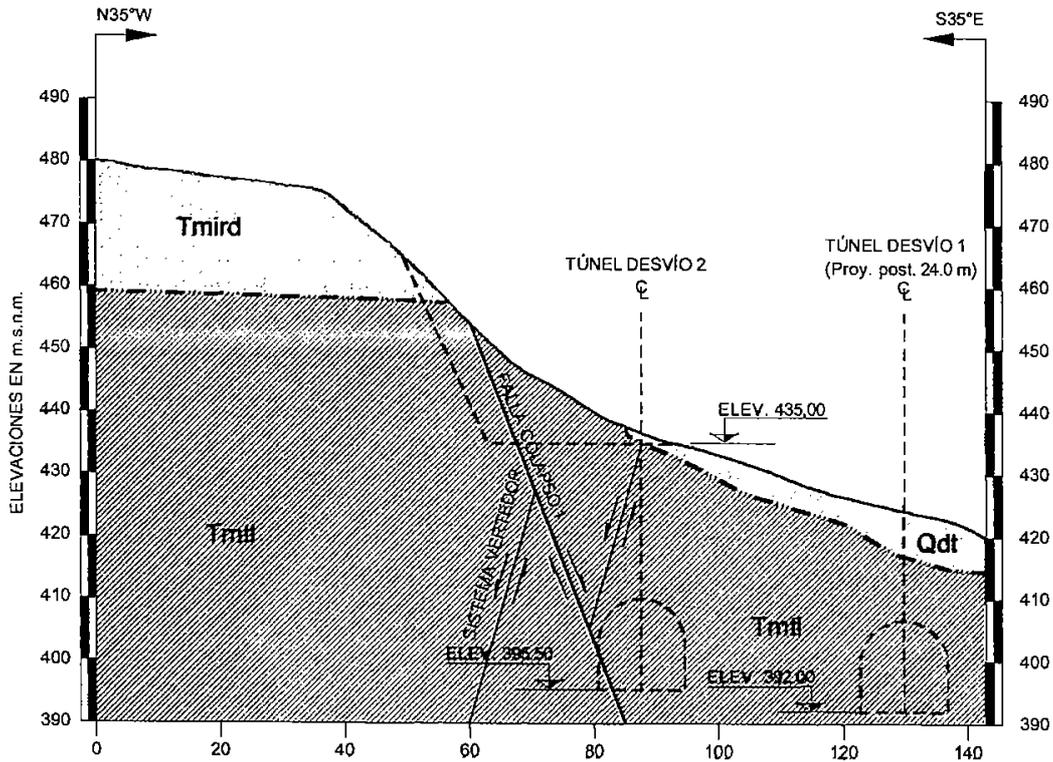


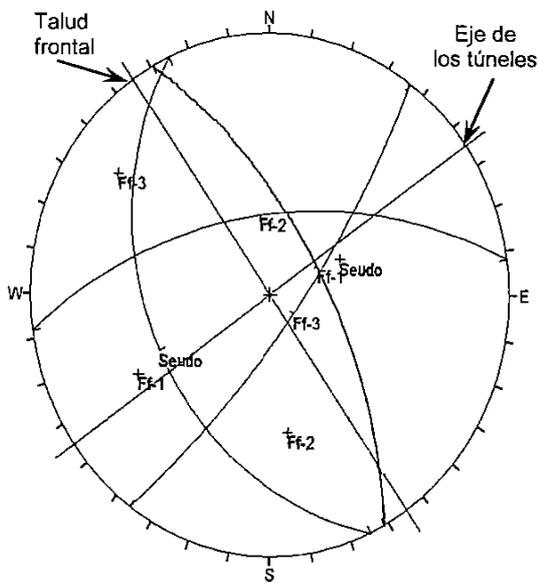
Figura 15. Sección esquemática del portal de entrada del túnel de desvío 2.

| Estructura | Rumbo y echado | Longitud (m) | Espesor (m) | Observaciones |
|------------------|---------------------|--------------|-------------|--|
| Falla Colapso 1 | N 76°W/ 50-72°NE | 600 | --- | Expresión morfológica representada por una traza semicircular con fuerte fracturamiento. |
| Falla Colapso 2 | N 70°E/ 55-75°NE | 300 | 0.30-0.60 | Expresión morfológica representada por una traza semicircular con fuerte fracturamiento. |
| Sistema vertedor | N 07-30°W/ 40-65°SE | 180 | 0.20-0.50 | Presenta relleno de roca fracturada y molida con presencia de arcilla. |

Principales fallas en los portales de entrada de los túneles de desvío.

Para establecer la relación entre los sistemas de fallas y fracturas con las excavaciones proyectadas para los portales de entrada de los túneles de desvío, se efectuó un análisis estereográfico a partir de los datos estructurales recolectados en el área de influencia, los resultados se presentan en los párrafos siguientes:

El estereograma de la figura muestra los patrones estructurales que predominan en la zona de los portales de entrada de los túneles de desvíos, mientras que en la tabla anterior se describen las características de las discontinuidades más importantes.



Fallas y fracturas Ff9= N38°W149°NE
Fallas y fracturas Ff2= N30°-34°E176°SE-58°NW
Fallas y fracturas Ff3= N70°E160°NW
Fallas y fracturas Ff4= N80°W60°NW
Fallas y fracturas Ff5= N-S183°-55°E
Seudoestratificación= N46°

Figura 16. Discontinuidades en la zona de los portales de entrada de los túneles de desvío.

Con base en la figura anterior se observa la formación de culas principalmente inestables que se forman por la intersección de los planos de los sistemas Ff2 que corresponden con la falla Colapso 1, y Ff3 representada al sistema de fallas vertedor. Por lo que debe haber un permanente mapeo geológico durante el avance de las excavaciones con objeto de actuar en consecuencia.

En los portales de entrada no se prevén problemas de inestabilidad por el efecto de la falla Colapso 1, ni por las fallas del sistema vertedor, ya que están dispuestas de manera perpendicular a la orientación de la excavación del talud frontal. (Tabla 13).

| Sistema | Continuidad | Frecuencia por metro lineal | Rugosidad de los planos y Abertura en cm | Observaciones |
|----------------------|-------------|-----------------------------|--|--|
| (Ff1) N29°W/64° | 0.50 a 10.0 | 1 a 5 fracturas | Planas-rugosas y escalonadas rugosas, Ab= cerrada a 0.01 | La mayoría se encuentra cerrada. |
| (Ff2) N82°E/58° | 0.60 a 25.0 | 1 a 10 fracturas | Onduladas-lisas y Planas rugosas Ab= Cerradas hasta 0.07 | Solo algunas de las fracturas abiertas no presentan arcilla. |
| (Ff3) N36°E/76°SE | 0.30 a 7.00 | 1 a 7 fracturas | Onduladas-lisas Ab= abiertas 0.01 y cerradas | El mayor porcentaje de este sistema de fracturas se encuentra cerrado. |
| Seudo N25°W/36°SW | 1.00 a 25.0 | 1 a 7 fracturas | Planas-Onduladas y Planas Rugosas Ab= cerradas hasta abiertas 0.03 | |

Tabla 13. Características geológicas de las discontinuidades encontradas en la zona de los canales y portales de entrada de los túneles de desvío.

Túneles de desvío

Los túneles de desvío tienen una cobertura de roca de espesor variable, en los portales de 50.0 a 60.0 m y en la parte central de 135.0 a 150.0 m; por lo general, estas estructuras se excavarán en rocas de mala a regular calidad, con algunas zonas de buena calidad, hacia los portales y tramos intermedios. La excavación de los túneles se realizará en las unidades de toba lítica (Tmtl), riocacita fluidal (Tmird) y dacita porfídica, las cuales están afectadas por diques de composición pórfido andesítica (Tda) y diabásica (Qdd), así como por fallas importantes, que en conjunto disminuyen la calidad de la masa de roca; por su continuidad y expresión destacan las fallas Colapso 1, Colapso, Olga y Lavadero, entre otras; sin embargo, el riesgo estructural más sobresaliente es la presencia de un cuerpo pórfido andesítico emplazado aparentemente en estructuras del sistema de fallas vertedor.

En la tabla 14 se sintetizan las características de las principales fallas que afectan la traza de los túneles de desvío, mientras que en la tabla 15 se muestra con detalle el pronóstico de la condición geológica, por tramo característico para cada uno de los túneles.



| Falla | Cadenamiento | | Rumbo y echado | Observaciones |
|-----------------------------------|----------------------------|-------------|--------------------------------|---|
| | Túnel 1 | Túnel 2 | | |
| Colapso | 0+340-0+360 | 0+310-0+330 | N70°-80°W/55-75°NE | En superficie se identifica por un rasgo morfológico de forma semicircular, su zona de influencia se encuentra afectada por roca muy fracturada y cizallada, cubierta en gran parte por depósitos de talud. |
| Colapso 1 | 0+155-0+170 | 0+075-0+095 | N70°-80°W/55-75°NE | Presenta roca muy fracturada con horizontales de arenas y arcilla entre planos de fracturas, tal y como se observó en el barrenado BYSKI-45. |
| Sistema Vertedor | 0+155-0+010 | 0+060-0+080 | N07°-30°E/45-65°SE | Sistema de estructuras asociadas a las fallas Vertedor 1 y 2, identificadas por espesores variables de relleno de roca brechada y arcilla. |
| Olga | 0+515-0+530 | 0+475-0+495 | N75°-85°W/55-75°NE | Falla con espesor de 0.40 a 1.30 m de relleno con roca brechada y arcilla, se observa silificación en la zona de falla. |
| Lavadero | ---- | 0+700-0+720 | N-S/45°-65°W | Falla con espesor de 0.20 a 0.30 m de relleno de arcilla y arenas; se presenta en los portales de salida. |
| Diques pórfido andesíticos | 0+120-0+220 | 0+210-0+320 | N27°-45°E/37°-56°E | Roca alterada y muy fracturada con presencia de arcilla, oxidación y calcita entre planos de fractura; los respaldos con la roca encajonante contienen material fácilmente disgregable. |
| Dique Diabásicos | 0+358-0+370 0+468-0+482 | 0+495-0+522 | N60°-75°W/45°-65°SW y 60°NE | Se encuentran muy fracturados, alterados con presencia de arcilla en el contacto con la roca encajonante y calcita entre planos de fractura. |
| Dique granítico | 0+022-0+064 | 0+023-0+055 | ---- | Se encuentra en la zona de los portales de entrada y lumbreras para obturadores, donde se observa una fuerte silificación de la roca, mejorando su calidad. |

Tabla 14. Principales Fallas en los Túneles de desvío.

| Túnel | Cadenamiento (m) | Litología/estructura | Observaciones |
|---|--------------------------------|---|---|
| 1 | Zona 1 0+000-0+128 | Tobas líticas (Tmtl) e intrusivo granítico (Tgr). | Tobas líticas silicificadas, fuertemente fracturadas con relleno arcilloso y Dique granítico de buena calidad entre 0+027 y 0+059 m. |
| | Zona 2 0+128-0+205 | Zona de dique pórfido andesítico afectado por fallamiento con intercalación de bloques de tobas líticas (Tmtl) y riocácica fluidal (Tmird) | En esta zona se estima una disminución de la calidad de la roca y condiciones de inestabilidad en la bóveda y paredes. |
| | Zona 3 0+205-693.348 | Tobas líticas (Tmtl), Riocacita fluidal (Tmird) afectadas por diques diabásicos (Qdd) y fallas. | Zona de Roca regular a buena calidad, con intervalos de muy mala a mala calidad en zonas de diques y fallas. Roca fracturada a muy fracturada con arcilla como material de relleno. |
| 2 | Zona 1 0+000-0+128 | Tobas líticas (Tmtl), intrusivo granítico (Tgr) y riocacita fluidal (Tmird). Tramo afectado por la falla Colapso 1 y presencia de fallas del sistema Vertedor. | Zona de rocas silicificadas muy abrasivas de mala a regular calidad, en el tramo de 0+028 a 0+049 m, dique granítico de buena calidad. |
| | Zona 2 0+128-0+205 | Zona de dique pórfido andesítico afectado por fallamiento con intercalación de bloques de tobas líticas (Tmtl) y riocácica fluidal (Tmird) | Zona de diques pórfido andesíticos alterados con puentes de roca, con problemas de inestabilidad en bóveda y paredes. |
| | Zona 3 0+205-693.348 | Tramo excavado principalmente en riocacita fluidal (Tmird) y en menor proporción en Toba lítica (Tmtl) y dacita porfídica (Tmid). Rocas afectadas por la falla Colapso y la falla Olga, así como diques diabásicos. | Zona de buena a regular calidad de roca, excepto en zonas de falla y diques geológicos. Roca dura, fracturada, de regular a buena calidad, con RQD de 53 a 77% (Tmird; barreno BYSKI-05). |
| Tabla 15. Zonificación geológica de los túneles de desvío. | | | |

Con los datos estructurales de las principales discontinuidades obtenidos sobre la traza de los túneles de desvío se determinaron los sistemas de fallas y fracturas y se llevó a cabo el análisis estereográfico para evaluar las condiciones preliminares de estabilidad de las excavaciones, y se determinaron los sistemas de fallas y fracturas que aparecen en la figura; sus características más importantes se sintetizaron en la tabla 16.

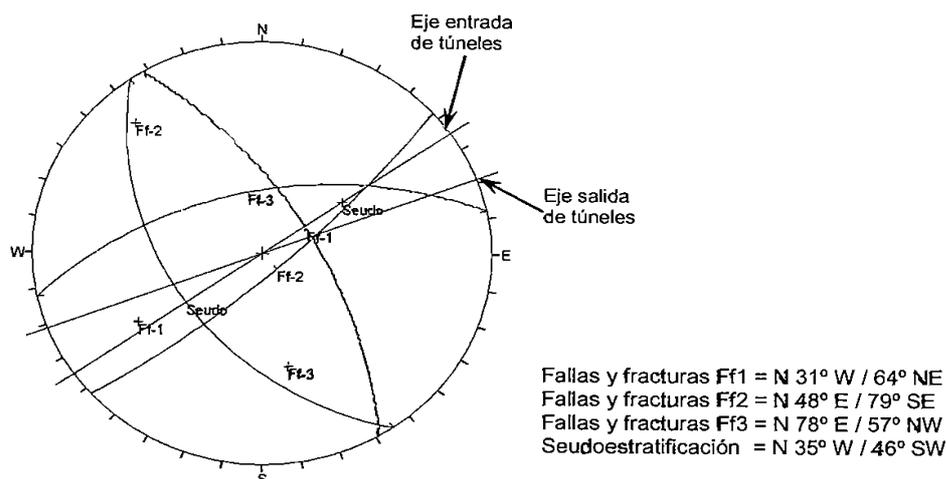


Figura 17. Representación estereográfica de los sistemas estructurales, determinados sobre la traza de los túneles de desvío.

Se interpreta que a lo largo de los túneles de desvío se puede presentar la formación de cuñas potencialmente inestables en la bóveda, por medio de la intersección entre los planos de la pseudoestratificación y los tres sistemas de fracturamiento.

| Sistema | Continuidad de la traza (m) | Frecuencia por metro lineal | Rugosidad en cm (AB) de los planos | Observaciones |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|---|
| (F11) N31W/64NE | 1.40 a 20 | 1 a 3 fracturas | Rugosas-onduladas Ab= 2.00 | La mayoría se encuentran cerradas. |
| (F12) N48E/79NW | 1.00 a 8.00 | 2 a 5 fracturas | Rugosas-onduladas Ab= 0.5 a 1.00 | Algunas de las fracturas presentan arcilla. |
| (F13) N78E/57NW | 0.50 a 7.00 | 2 a 4 fracturas | Rugosas-onduladas Ab=0.5 a 2.00 | Algunas de las fracturas presentan arcilla. |
| Seudo N35W/46SW | 25 | 2 a 4 fracturas | Rugosas-onduladas Ab=abiertas 0.5 a 1.00 | Se cierran a profundidad |

Tabla 16. Características geológicas de las discontinuidades en la zona de la traza de los túneles de desvío.

Lumbreras para obturadores de cierre provisional.

Estas lumbreras se excavarán a partir de una plataforma construida a la elevación 456.0 msnm, que quedará alojada en rocas de mala calidad, igual que los taludes proyectados para conformar dicha plataforma, los cuales tienen una relación de 0,5:1 y 1:1 hacia la parte más elevada.

En el túnel 1, el eje de la lumbrera se localiza en el cadenamiento 0+044.216, mientras que en el túnel 2, estará en el 0+056,500.

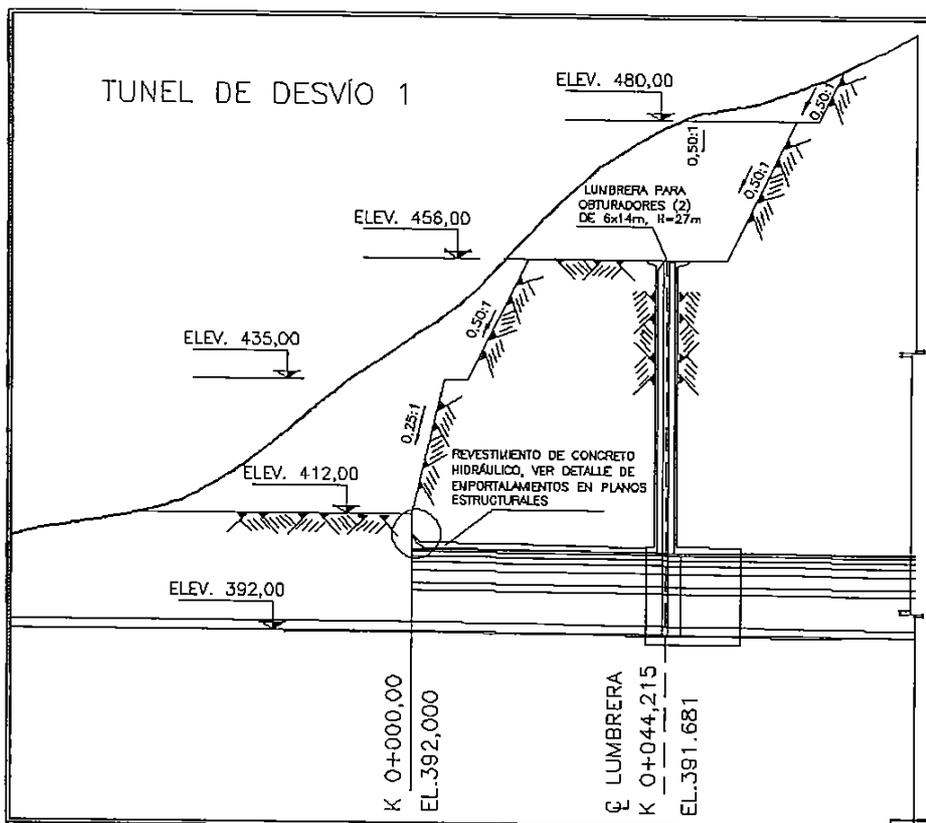


Figura 18. Geometría de los taludes y plataforma para la lumbrera para obturadores del túnel 1.

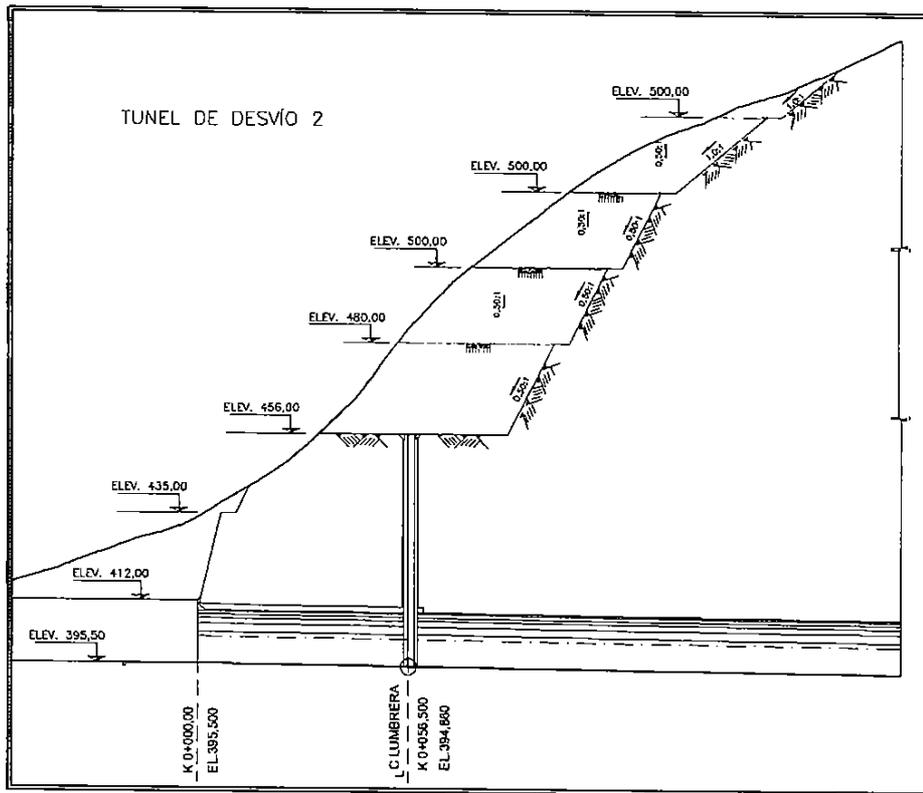


Figura 19. Geometría de los taludes y plataforma para la lumbrera para obturadores del túnel 2.

La excavación de la plataforma y las lumbreras de cierre ocurrirá en rocas fracturadas de las unidades ignimbrita riódacítica fluidal (Tmird), un dique granítico (Tgr) muy competente y la toba lítica (Tmtl). Los primeros 30 metros de excavación se prevén en condiciones de roca muy fracturada con presencia de arcilla entre los planos; a profundidad no se identificaron fallas importantes que corten la zona de las lumbreras; sin embargo, se debe tomar en cuenta que estas estructuras están ubicadas en el bloque del alto de la falla Colapso 1, por lo que se pueden encontrar replicas de esta estructura conforme se avance en la excavación.

En la tabla 17 se dan a conocer los aspectos geológico-geofísicos relacionados con la excavación de las lumbreras para obturadores de cierre provisional.

| Estructura | Obturador | Elevación msnm | Litología | Velocidad km/s | Resistividad Ω -m | Observaciones |
|--------------------------|---------------------|----------------|--|----------------|--------------------------|---|
| Taludes y plataforma 456 | Túnel 1/ Túnel 2 | 550-456 | Riodacita fluidal (Tmird) y dique granítico (Tgr) | 0.7-1.1 | 336-1067 | Roca descomprimida, de mala a regular calidad. RQD de 10 a 60% (barreno BYSKI-43) |
| Lumbrera | Túnel 1 | 456-429 | Riodacita fluidal (Tmird), tobs líticas (Tmtl) y dique granítico (Tgr) | 1.1 | 336-549 | Roca de mala calidad |
| | | 429-406 | Tobas líticas (Tmtl) y dique granítico (Tgr) | 3.2 | 115-261 | Roca de buena calidad |
| Lumbrera | Túnel 2 | 456-441 | Dique granítico (Tgr) | 1.1 | 671 | Roca de regular a mala calidad |
| | | 441-409.5 | Dique granítico (Tgr), Riodacita fluidal (Tmird) | 3.0-3.1 | 132 | Roca de buena calidad |

Tabla 17. Condiciones geofísicas en las lumbreras de cierre provisional.

Lumbrera de cierre final

Previo a la excavación de la lumbrera de cierre final se construirá una plataforma a la elevación 550 msnm, mediante una excavación a cielo abierto con taludes de 0.5:1 y 1.4:1; para tal efecto se removerá materiales no consolidados de talud (Qdt) y rocas de la unidad dacítica (Tmid) de mala a regular calidad, predominando estas últimas hasta la elevación 544 msnm, en promedio.

La lumbrera se excavará desde la plataforma de la elevación 550 msnm hasta la bóveda del túnel de desvío 2 (cota 406.0 m), tiene 7 m de ancho, 14 m de largo y 156 m de altura, cortará dacitas porfídicas (Tmid), riodacita fluidal (Tmird) y tobas líticas (Tmtl), de regular a buena calidad, el contacto con las mejores condiciones de roca se encuentra a partir de la cota 533 m al entrar en la dacita fluidal hasta la elevación 460.0 msnm en donde se encontraran los diques de composición pórfido andesítica con condiciones de roca de mala calidad, hasta la conexión con el túnel de desvío.

El detalle de las condiciones geológico-geofísicas esperadas en la excavación de la lumbrera de cierre final se describe en la tabla 18:

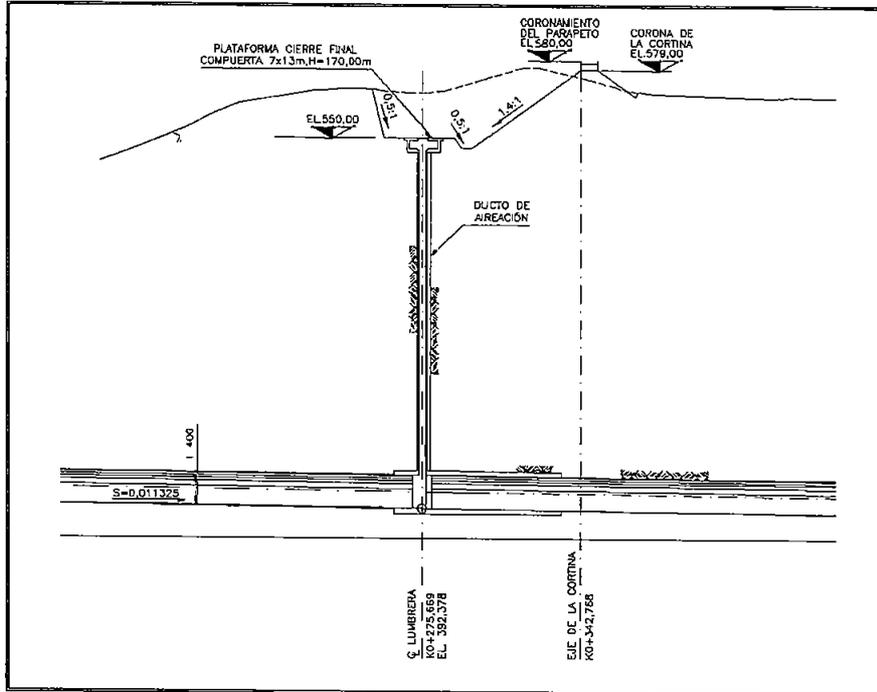


Figura 20. Geometría de la plataforma y lumbrera de cierre final.

| Estructura | Obturador | Elevación msnm | Litología | Velocidad km/s | Resistividad Ω -m | Observaciones |
|--------------------------|-----------|----------------|--|----------------|--------------------------|---|
| Taludes y plataforma 550 | Túnel 2 | 570-550 | Deposito de talud (Qdt) y dacita porfídica (Tmid) | 0.63 a 1.7 | 435-498 | Depósitos de talud y roca descomprimida de mala calidad. |
| Lumbrera | Túnel 2 | 558-533 | Dacita porfídica (Tmid) y riodacita fluidal (Tmird) | 1.7 | 59-611 | Roca de regular calidad |
| | | 533-406 | Riodacita fluidal (Tmird), tobas liticas (Tmtl) y diques pórfido andesíticos (Tda) | 3.1 | 180-197 | Roca de buena calidad con presencia de fallas de los sistemas Colapso y Vertedor. Diques pórfido andesíticos alterados a partir de la cota 460 m. |

Tabla 18. Condiciones geológico-geofísicas en la lumbrera de cierre final.

Zona del tapón del túnel de desvío 1

El tapón que se construirá en el túnel de desvío 1, entre los cadenamientos 0+228.33 y 0+256.33 m (figura), está ubicado en el bloque del bajo de la falla Colapso 1, muy cerca de la zona de diques pórfido andesíticos afectados por fallamiento, por lo que se estima quedará alojado en la toba lítica fracturada (Tmtl) de mala a regular calidad, en este sitio se perforó el barreno BYSKI-45, donde a nivel del túnel se determinó un RQD de 52%, confirmando las rocas fracturadas de la zona.

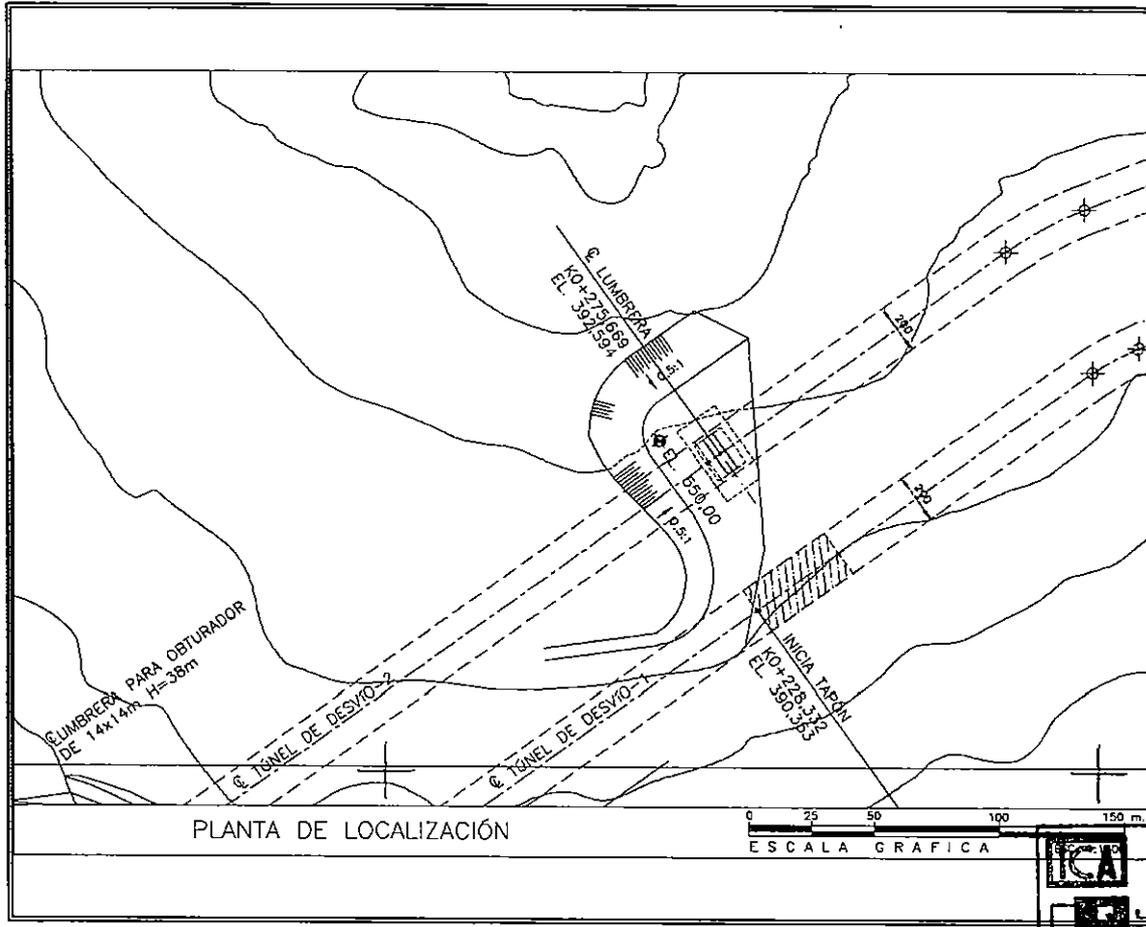


Figura 21. Localización del tapón del túnel de desvío 1.

Portales de Salida

Para construir la salida de los túneles de desvío a la elevación 387 msnm se realizará una excavación a cielo abierto con bermas y taludes con pendiente 0.5:1 hasta la cota 480 m; en el área está expuesta la roca fracturada de la dacita porfídica (Tmid), por lo que en la excavación se removerá la capa de material descomprimido y roca de regular calidad de dicha unidad, con velocidades de 0.45 a 1.8 a 2.3 km/s, respectivamente. El espesor máximo de material descomprimido varía de 6 a 10 m, en tanto que la roca de regular calidad puede alcanzar hasta 30 m en la zona de los portales. La condición estructural más desfavorable se refiere a la presencia de la falla Lavadero o fracturas paralelas a la misma, la cual tiene un echado promedio de 45° en dirección a la excavación, lo que puede generar problemas de inestabilidad en los taludes frontales de la excavación.

El portal de salida del túnel de desvío 1, ubicado en el cadenamiento 0+693.34, será excavado en rocas de buena calidad de la unidad riódacítica fluidal (Tmird) y se espera tener el contacto con la dacita porfídica (Tmid) muy cerca de la clave del túnel, mientras que el portal del túnel 2 (cadenamiento 0+750.57) quedará alojado en rocas de buena calidad de la dacita porfídica, en ambos portales la roca presenta velocidades mayores de 3.0 km/s. los taludes del portal del túnel 1 serán excavados en roca de regular calidad que presenta velocidades de 2.2 a 2.3 km/s, con resistividades de 42 a 183 Ω -m, en tanto que para el túnel 2 la roca presenta mayor fracturamiento de acuerdo con las velocidades de 1.8 km/s y resistividades de 82 a 940 Ω -m. En la siguiente tabla se resumen las condiciones identificadas en la zona de los portales de salida. (Tabla 19).

| Túnel | Elevación | Litología | Velocidad km/s | Resistividad Ω -m | Observaciones |
|-------|-------------|---------------------------|----------------|--------------------------|---|
| 1 | 448.0-407.0 | Dacita porfídica (Tmid) | 0.45-1.4 | 184-516 | Roca descomprimida en zona de taludes; espesor máximo 10m. |
| | 437.0-400.0 | Dacita porfídica (Tmid) | 2.2-2.3 | 82-183 | Roca muy fracturada de regular calidad en zona del portal y taludes. |
| | 400.0-387 | Riódacita fluidal (Tmird) | >3.0 | 183-282 | |
| 2 | 480.0-407.0 | Dacita porfídica (Tmid) | 0.45 | 45-940 | Roca descomprimida en zona de taludes; espesor máximo 6m. |
| | 460.0-403.0 | Dacita porfídica (Tmid) | 1.8-2.2 | 82-94 | Roca muy fracturada de regular calidad en la zona de taludes; espesor máximo de 30 m. |
| | 403.0-387.0 | Dacita porfídica (Tmid) | 3.1 | 61-370 | Roca de buena calidad en zona del portal. |

Tabla 19. Condiciones geológicas en los portales de salida de los túneles de desvío.

Con base en el análisis estereográfico (Figura 22) de las principales discontinuidades ubicadas en la zona de los portales de salida de los túneles de desvío, se determina que las estructuras geológicas que hay que vigilar al inicio de las excavaciones de los portales son: 1) la falla Lavadero (N-S/45-65°W), representada por la familia Ff2, y 2) la seudoestratificación que formarán cuñas o bloques que fallarían a través de estos planos.

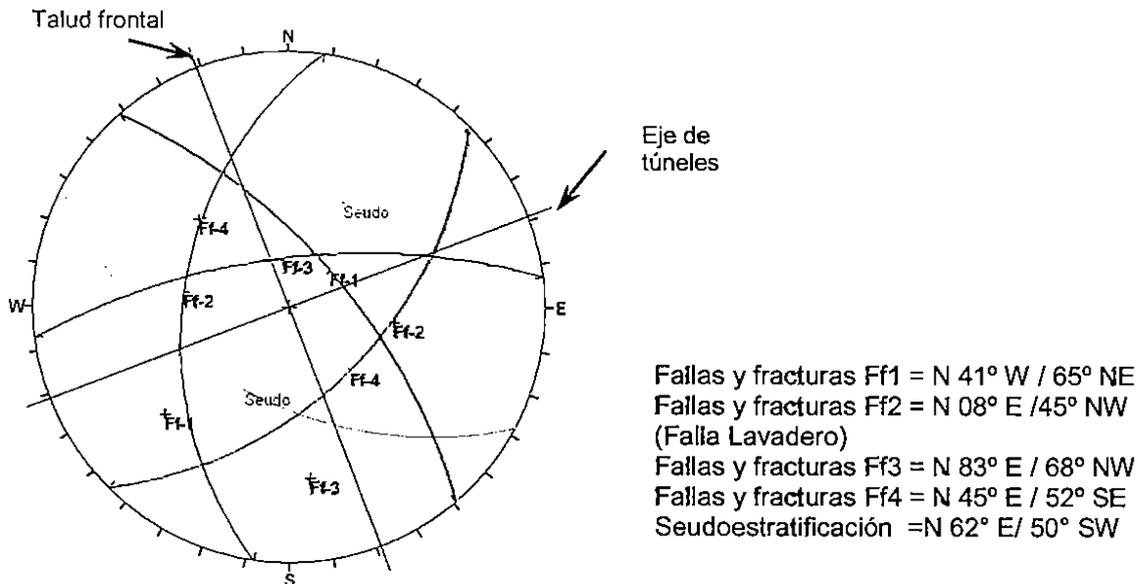


Figura 22. Representación estereográfica de los sistemas estructurales, determinados en la zona de los portales de salida.

En la tabla siguiente (20) se dan a conocer las características de las principales discontinuidades en la zona de influencia de la salida de los túneles de desvío.

| Sistema | Continuidad de la traza (m) | Frecuencia por metro lineal | Rugosidad y abertura (Ab) en cm de los planos | Observaciones |
|--|-----------------------------|-----------------------------|---|---|
| (Ff1) N41°W/65°NE | 1.00 a 20.0 | 1 a 5 fracturas | Rugosas-Onduladas y rugosas-planas. Ab= 1.00 a 2.00 | La mayoría se encuentran cerradas. |
| (Ff2) N08°E/45°NEW | 1.00 a 10.00 | 1 a 3 fracturas | Rugosas-Onduladas Ab=2.00 a 4.00 | Algunas de las fracturas presentan arcilla. |
| (Ff3) N83°E/68°NW | 0.50 a 4.00 | 2 a 7 fracturas | Rugosos-ondulados Ab= 2.00 a 3.00 | Algunas de las fracturas presentan arcilla. |
| (Ff4) N45°E/52°SE | 4.00 a 8.0 | 1 a 3 fracturas | Rugosos-ondulados Ab= 3.00 | Son frecuentes |
| Sis=NE-SW (Ff3) Seudo or=N62°E/50°SW | 5.00 a 20.00 | 1 a 3 fracturas | Rugosos-ondulados Ab= 2.00 a 3.00 | Se cierran a profundidad |

Tabla 20. Características geológicas de las discontinuidades determinadas en la zona de los portales de salida de los túneles de desvío

Canales de salida

Los canales de salida de los túneles de desvío 1 y 2 tendrán longitudes de 76.0 y 67.0 m, respectivamente, ambos se desplantarán a la cota 387.0 m, y tendrán un ancho de 18.0 m cada uno. Durante las excavaciones se ejecutarán cortes máximos de 28.0 en el talud derecho de canal del túnel 1, mientras que en el talud izquierdo del canal del túnel 2 serán del orden de 43.0 m. El canal de salida del túnel de desvío 1 será excavado en rocas de regular calidad, con las características descritas para el portal de salida de ese túnel (Tmid, de regular calidad); hacia el final del canal se removerán depósitos no consolidados de aluvión (Qal) y talud (Qdt) de poco espesor (5m). De la misma manera, en el canal de salida del túnel 2 se espera excavar en dacitas porfídicas (Tmid), de regular a buena calidad, como las identificadas en el portal de salida, aunque en superficie afloran depósitos poco significativos de talud (Qdt) y aluvión (Qal).

Como una nota adicional, es importante mencionar que durante la operación de los túneles la turbulencia generada por el agua al integrarse el caudal al cauce del río, puede remover y erosionar el pie del depósito de talud del circo de erosión de la margen derecha, provocando con ello azolves en el cauce e incluso inestabilidad de la ladera.

Ataguías

El proyecto de las obras de desvío se complementa con la construcción de cinco estructuras principales, que son: preataguía, ataguía sobre el arroyo El carrizalillo, ataguía integrada a la cortina de aguas abajo y el canal de descarga del arroyo Carrizalillo (figura) que servirán para contener y encauzar las aguas del río Santiago y e escurrimiento del arroyo El Carrizalillo hacia los túneles de desvío durante la construcción de la cortina del P.H La Yesca.

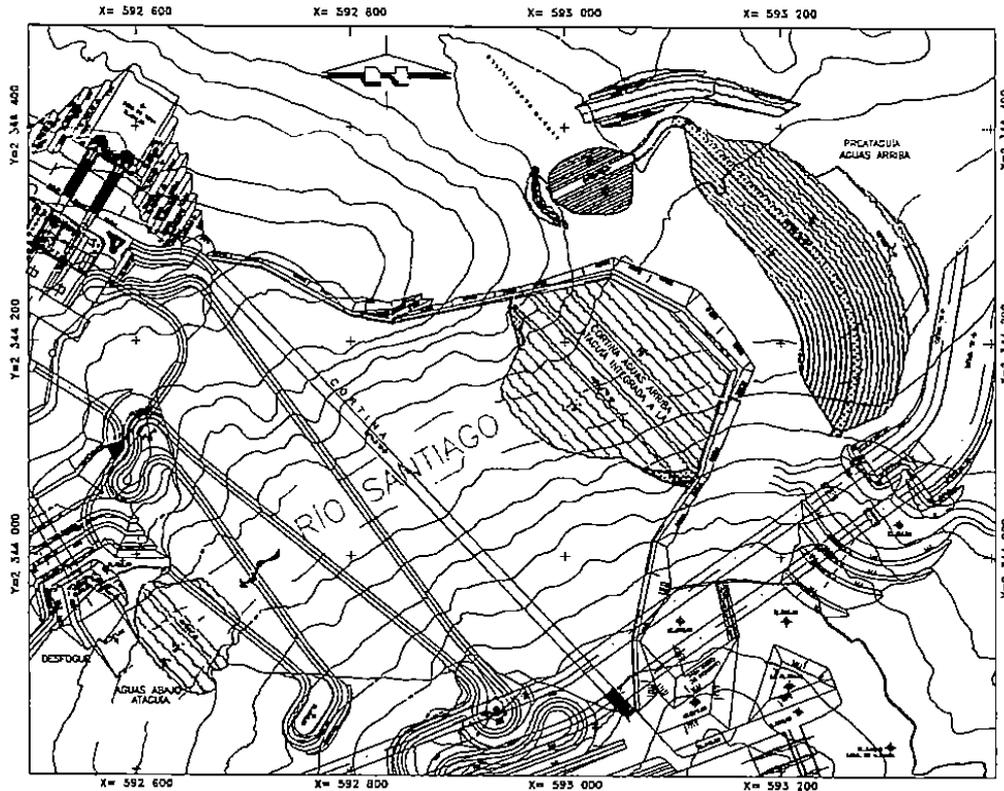


Figura 23. Localización de la preataguía y ataguías que complementan la obra de desvío.

Preatagüía

La preatagüía será construida de materiales granulados, contará de una pantalla plástica impermeable desplantada en la elevación 373.50 msnm, finalizando en la cota 395.0 m. Esta obra tiene la función de contener y encauzar el agua del río Santiago hacia los túneles de desvío, mientras que se construye la atagüía de aguas arriba. La corona de la preatagüía estará a la elevación 425 msnm y su longitud será de 346.20 m; el paramento de aguas arriba tendrá una pendiente de 1.8:1 y el de aguas debajo de 1.5:1.

Condiciones geológicas en la zona de la preatagüía.

Las características de la zona de la preatagüía se establecieron a partir de los trabajos geología de detalle, con la exploración de tres líneas de geofísica, una de ellas de apoyo también al estudio de la atagüía del arroyo El Carrizalillo, además de varios barrenos con recuperación de núcleo. Los resultados obtenidos se presentan a continuación;

Sección geológico-geofísica de la preatagüía

Para la margen izquierda, la información proporcionada por geofísica reporta un espesor de 5 a 11 m de depósitos de talud (Qdt), condición que se comprobó con la perforación del barreno BYSKI-41, donde se cortaron 10 m de ese tipo de material, representado por velocidades de 1.1 km/s, el cual cubre una capa de 6 a 14 m de espesor de roca descomprimida que se atribuye al intenso fracturamiento y alteración de las tobas líticas (Tmtl) presentes en la zona, caracterizadas por su velocidad de 1.3 km/s y su resistividad variable de 257 a 633 Ω -m; a profundidad mejora la calidad de la masa de roca, pues se detectaron velocidades del orden de 3.2 km/s, para la toba lítica compacta u poco fracturada, que la clasifica como de buena calidad.

Para la zona del cauce se efectuaron tendidos sísmicos de refracción en ambas orillas del río, determinando un espesor de 13m de depósitos aluviales (Qal), con una velocidad de onda compresional de hasta 1.6 km/s, en la zona saturada; por debajo del aluvión se detectaron rocas de mala a regular calidad con un espesor de máximo de 15 a 30 m, pertenecientes a un dique pórfido andesítico (Tda) y tobas líticas (Tmtl), representadas por velocidades de 1.6 a 1.9 km/s y resistividades de 78 a 220 Ω -m. Los materiales antes descritos cubren a la roca de buena calidad (Tmtl), representada por velocidades de 3.2 km/s.

La margen derecha está conformada por un extenso playón, expuesto a nivel del cauce, seguido por una ladera que tiende subir con una pendiente de 15°, en promedio, hasta la cota 440 m. En la zona del playón se perforaron dos barrenos, el BYSKD-26 y el BYSKD-28, con los cuales se identificó un espesor de aluvión de 14 y 10 m, respectivamente, con tendencia a acularse hacia la cota 400; debajo del aluvión del barreno 26 cortó un dique pórfido andesítico (Tda) fuertemente propilitizado y densamente fracturado, la alteración de este cuerpo ha provocado la degradación del mismo a un material arenoso de color verde, debido a que las soluciones hidrotermales afectaron la zona del contacto dique-roca, así como parte del propio cuerpo del dique.

Además, a distintos niveles del barreno se cortaron varias zonas de falla que presentan una alteración similar, es decir el material de relleno de la falla se alteró a cuerpos arenosos poco consistentes, que localmente disminuyen la calidad del macizo rocoso. Se interpreta que esas fallas están asociadas al sistema de la falla Pilares, pues también presenta materiales arenosos entre los planos de falla. Se estima que estos cuerpos tienen mucha continuidad en el sentido vertical ni hacia la zona de aguas abajo; atravesando el dique pórfido andesítico se recuperaron tobas líticas cristalinas de mala calidad, muy fracturadas.

Por otro lado, después de haber cortado el aluvión el barreno 26 entró directamente en tobas líticas de mala calidad, lo cual se relaciona con el paso de la falla Carrizalillo; sin embargo, geofísica reporta roca de buena calidad con velocidades de 3.2 a 3.3 km/s.

| Barreno | Espesor de aluvión (m) | Litología | REC% | RQD% | U.L | Comentarios |
|--|------------------------|--|---|--|---|--|
| BYSKD-26 Preatagüa margen derecha Vertical 50.30 m | 14,0 | Dique pórfido andesítico y toba lítica cristalina. El pórfido se localiza de 14,00 a 28,50 m de profundidad; tramos arenosos de 18,00 a 20,50 m; 22,00 a 23,00 m; de 27,00 a 31,35 m; de 31,65 a 36,10 m. La toba lítica se localiza de 28,50 a 50,30 m de profundidad; tramos arenosos de 36,40 a 37,40 m; 37,75 a 38,45 m; de 38,70 a 50,00 m. | 75 en promedio para el cuerpo intrusivo y de 80 a 85 para la toba lítica. | De 0 a 5 para el pórfido y menor al 25 para la toba | de 15 a 25 para la toba | Se presenta alteración arenosa en la base del dique y en la toba lítica |
| BYSKD-28 Preatagüa margen derecha Vertical 50.15 m | 10,0 | Toba lítica cristalina. Zona de fallas de 23,65 a 25,40 m y de 28,40 a 37,60 m con alteración arenosa. | 40 hasta 38,00 m de profundidad y 100 hasta el fondo del barreno. | De 0,0 a 45,0 | De 3,0 a 15,0 | Excepto las zonas de falla, la roca se encuentra fracturada aunque se puede considerar de buena calidad. |
| BYSKI-41 Preatagüa margen izquierda 70°al S35°W 140,25 m | 10,70 | Toba lítica y pórfido andesítico. Pórfido andesítico de 55,60 a 77,00, tramos de arena de 36,65 a 37,20 y de 129,85 a 131,75, zonas de falla de 52,80 a 55,60 de 91,35 a 93,20 de 103,95 a 106,60 de 124,25 a 127,00. | 50 a 60 para la toba lítica, 70 para el pórfido andesítico | De 0 a 5 para la toba lítica, 5 para el pórfido andesítico | De 1,16 a 8,68 (20-55m), 17,40 (55-60m), 4,52 a 7,76 (60-75m), 14,32 (75-80m), 1,12 a 4,52 (80-95m), 3,60 (98-103m) | |

Tabla 21. Resultados de la perforación en la zona de la preatagüa

Finalmente, en la ladera derecha se tiene un depósito de talud (Qdt) de 4 a 7m de espesor, con velocidades de 0,5 km/s y resistividades de 226 Ω -m, que cubre una capa de tobas líticas (Tmtl) fracturadas de mala a regular calidad, identificadas por sus velocidades de onda compresional de 1.3 a 2,3 km/s, cuyo espesor varía de 3 a 11 m; por debajo de esta capa existe roca de buena calidad, ya que se detectó una velocidad de 3,4 km/s.

En la zona de aguas abajo se perforaron los barrenos BYSKD-8^a y BYSKD-8, determinando 14,20 y 9,95 m de aluvión, respectivamente, posteriormente, ambos barrenos cortaron un dique pórfido andesítico propilitizado y muy alterado (Tda), de mala calidad, tal como lo indica su velocidad de 1,7km/s, posterior al dique se cortaron principalmente tobas líticas (Tmtl) de mala calidad, con algunos intervalos de roca de regular a buena calidad; en el barreno 8 se cortó un dique diabásico de 10 m de espesor aproximado, ubicado entre las elevaciones 320 y 340 msnm, lo que es indicativo de que se trata de una zona muy afectada por estructuras geológicas.

Con el barreno BYSKD-38, el cual atravesó 10,39 m de depósitos aluviales (Qal), se comprobó la continuidad del dique pórfido andesítico (Tda), identificado en los barrenos 8 y 8A, el cual por las relaciones de campo se interpreta con buzamiento hacia aguas arriba, ya que se infiere que su emplazamiento está asociado con el sistema de fallas Carrizalillo. Este dique tiene un espesor del orden de 30 m y se caracteriza por sus bajas resistividades (117 Ω -m), debidas a su alto grado de alteración. Los primeros 12,0 m del barreno 36 corresponden con material aluvial, mientras que de 12,0 a 32,85 m de profundidad las muestras de núcleo pertenecen a tobas líticas (Tmtl) de muy mala a mala calidad, por su bajo índice de RQD (0 a 8%); en el resto del barreno se recuperaron muestras de un dique pórfido andesítico alterado, de muy mala calidad.

Cabe mencionar que en el barreno 38 también se cortaron las zonas de falla alteradas a cuerpos arenosos, identificadas en el barreno BYSKD-26 y que se estima están alojados en estructuras del sistema de la falla Pilares, por lo que localmente resulta un macizo rocoso de mala calidad, aunque desde el punto de vista geofísico se trata de roca compactada con velocidades de 3, km/s y resistividades de 231 Ω -m.

En la intersección con el eje de la preatagüa se ubica el barreno 26, el cual reportó un depósito aluvial de 14m de espesor, bajo esta capa, se tiene el dique pórfido andesítico (Tda) muy alterado y tobas líticas (Tmtl) de mala calidad.

Sección geológico-geofísica por el eje de la ataguía del arroyo El Carrizalillo

Esta ataguía será construida de materiales graduados y tendrá una longitud de 86,47 m; la elevación de la corona está proyectada a la cota 425 m, los taludes de la estructura en ambos paramentos están diseñados con una pendiente 1,8:1.

El terreno en la zona del emportamiento de la margen derecha está constituido por una toba lítica (Tmtl) moderadamente fracturada, con un espesor de roca descomprimida de 8m, caracterizada por su velocidad de onda compresional de 1,4 km/s y resistividad de 110 a 150 Ω -m; a profundidad la roca mejora notablemente hasta alcanzar los 3,4 km/s, por lo que se considera un macizo rocoso de buena calidad.

En la zona del cauce del arroyo Carrizalillo se efectuaron tendidos sísmicos de refracción y sondeos eléctricos verticales, determinando una profundidad de acarreo (Qal) de 5m, con una velocidad de onda compresional $V_p=0,8$ km/s y resistividades de 625 Ω -m. Para la margen izquierda, el apoyo de la estructura será desplantado en el dique pórfido andesítico (Tda), el cual con los datos de geofísica presenta una zona de descompresión de 3 a 14 m, este último valor detectado en la parte alta de la ladera, donde se determinaron velocidades del orden de 1,4 km/s; hacia la zona del canal se tiene material de mala calidad, correlacionable con depósitos de talud (Qdt) y tobas líticas muy fracturadas y alteradas (Tmtl), que en conjunto forman una capa de 6 a 10 m de espesor, caracterizada por sus velocidades de 0,35 a 1,3 km/s y por sus resistividades de 226 a 603 Ω -m. Después de la capa de descompresión se presenta un horizonte de roca de regular calidad, integrado por tobas líticas (Tml) y parte del dique pórfido andesítico (Tad), su espesor varía de 5 a 14 m y presenta velocidades de 2,0 a 2,3 km/s; tanto las tobas líticas como el dique pórfido andesítico mejoran su calidad de roca a profundidad, como lo demuestran las velocidades de 3,2 a 3,5 km/s.

| Unidad | | Velocidad (km/s) | Resistividad (Ω -m) | Espesor máximo (m) | Correlación geológica | Calidad estimada |
|--------|-----|------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| U1 | U1A | 0.8 | 625 | 5.5 | Qal | Mala |
| | U1B | 0.35-0.5 | 226-853 | 4 | Qat | Mala |
| | U1D | 1.3-1.4 | 110-603 | 15 | Tda, Tmtl | Mala |
| U2 | U2B | 2.0-2.3 | 435 | 10 | Tda | Regular |
| | U2E | 2.2 | 142-276 | 9 | Tmtl | Regular |
| U3 | U3B | 3.5 | 84 | 28 | Tda | Buena |
| | U3E | 3.2-3.4 | 60-118 | indefinido | Tmtl | Buena |
| | | | 194-272 | indefinido | | Buena |

Tabla 22. Unidades geofísicas en la zona de la ataguía del arroyo El Carrizalillo.

Sección geológico-geofísica de la ataguía integrada al cuerpo de la cortina

Esta estructura será construida de aluvi6n (material 3B9, ya que formar6 parte del cuerpo de la cortina, tendr6 una altura de 49m con una longitud de 200,06 m; de proyecto se considera que la corona estar6 a la elevaci6n 439,0 msnm, con el paramento de aguas arriba con una pendiente de 1,4:1.

Superficialmente en la margen izquierda se tiene un dep6sito de talud (Qdt) con espesor estimado de 1 a 2 m, con una velocidad de onda compresional de 1,2 km/s, debajo de esta capa se tiene la toba l6tica de regular a buena calidad, con velocidades de 2,2 a 3,3 km/s, misma que est6 intruscionada por un dique p6rfido andes6tico con caracter6sticas geof6sicas similares (1,9 a 3,3 km/s), localizado entre las elevaciones 415 y 435 msnm, con un espesor estimado de 26 m inclinado hacia el macizo rocoso.

La zona del cauce est6 afectada por el sistema de fallas Pilares, las cuales forman una peque1a fosa rellena de material aluvial, con 15 m de espesor, que presenta una velocidad s6smica de 1,5 a 1,9 km/s en si zona saturada; debajo del aluvi6n existe roca de buena calidad (Tmtl), identificada por su velocidad de 3,2 km/s.

El apoyo en la margen derecha ser6 principalmente en la toba l6tica compactada, poco fracturada de buena calidad, con velocidades de onda compresional de 2,2 a 3,3 km/s.

| Unidad geof6sica | Velocidad (km/s) | Resistividad (Ω -m) | Espesor m6ximo (m) | Correlaci6n geol6gica | Calidad estimada | |
|------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|---------|
| U1 | U1A | 0.4-1.9 | 110-650 | 15 | Qal | Mala |
| | U1D | 1.2-1.4 | 1490 | 3 | Tda, Tmird, Tmtl | Mala |
| U2 | U2B | 1.9 | | 10.5 | Tda | Regular |
| | U2D | 2.5 | | 8 | Tmird | Regular |
| | U2E | 2.2-2.5 | 238 | 15 | Tmtl | Regular |
| U3 | U3B | 3.3 | | indefinido | Tda | Buena |
| | U3E | 3.2-3.6 | 618-795 | indefinido | Tmtl | Buena |

Tabla 23. Unidades geof6sicas en la zona de la atagu6a aguas arriba.

Ataguía de aguas abajo

La ataguía de aguas abajo será construida de materiales graduados con núcleo impermeable, en el eje de la estructura será construida una pantalla plástica entre las elevaciones 327 a 392 msnm y su función principal es evitar que el agua desfogada por los túneles de desvío retome al recinto de río, donde se construirá el cuerpo principal de la cortina. La longitud de la ataguía será de 106.56 m y la elevación de la corona a la 409.0, msnm.



Fotografía Vista de la zona donde quedará la ataguía de aguas abajo.

El apoyo de la margen izquierda será desplantado en riodacita fluidal, con una capa de roca descomprimida de 8 m de espesor, por debajo de esta capa mejora la calidad de la roca, alcanzando una velocidad de onda compresional de 3.1 km/s, aunque con e barreno BYSKI-49 se determinó que existen tramos variables de mala a buena calidad de roca, entre 20 y 80% de RQD.



| Barreno | Litología | REC% | RQD% | U.L | Comentarios |
|--|-----------------------------|------|---------|--|---|
| BYSKD-49 Ataguía de aguas abajo 60° al N 60°W 100,00 m | Riodacita fluidal 0.0-100 m | 95 | 20 a 80 | Impermeable: De 0,00-672 l/min/m (20-40,60-65.95-100 m) Permeable: De 10,4-23,7 l/min/m (40-55,65-95 m) | El dique se localiza de 11,50 m a 33,20 m de profundidad con alteración arenosa de 32,20 a 33,20 m. Zonas de falla de 25,50 a 33,20 m y de 91,00 a 93,00 m. El dique diabásico se localiza de 110,50 a 132,50 m de profundidad. |
| Tabla 24. Resultados de la perforación en la zona de la ataguía de aguas abajo. | | | | | |

Con la información del barreno BYR-38 se determinó un espesor de 14 m de aluvión en la zona del cauce; bajo este depósito la riodacita fluidal es de regular calidad, ya que así indica el RQD del barreno y la velocidad de onda sísmica de 2,5 km/s.

En la margen derecha está expuesta la dacita porfídica descomprimida, con espesor máximo de 9 m y velocidades de 1.1 km/s, incluye una pequeña zona con material de rezaga (Rz), mismo que deberá ser removido durante los trabajos de construcción; por debajo de la capa descomprimida continua la dacita porfídica, pero de regular calidad, con un espesor de 11 m y una velocidad de onda compresional de 1.8 km/s; a profundidad la calidad de la roca mejora notablemente, pues se detecta velocidades de 3.0 a 3.1 km/s.

| Unidad geofísica | Velocidad (km/s) | Resistividad (Ω -m) | Espesor máximo (m) | Correlación geológica | Calidad estimada |
|--|------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| U1 | U1A | 1.6 | 15 | Qal | Mala |
| | U1B | | 860 | Rz | Mala |
| | U1D | 1.1 | 520 | Tmird | Mala |
| U2 | U2B | 1.9 | 7 | Tgr | Regular |
| | U2C | 1.8 | 145 | Tmid | Regular |
| | U2D | 1.9 | 285-1090 | Tmird | Regular |
| U3 | U3B | 3.1 | Indefinido | Tgr | Buena |
| | U3C | 3.1 | 237 | Tmid | Buena |
| | U3D | 2.5-3.1 | 70-3000 | Tmird | Regular a Buena |
| Tabla 25. Unidades geofísicas en la ataguía de aguas abajo. | | | | | |



CAPÍTULO III.

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

3.1. TRATAMIENTOS DE LA ROCA.

Algunos incidentes con severas consecuencias han ocurrido en años recientes en diversas presas del mundo, los cuales han originado la falla de algunas de ellas. Ante esta situación, se ha despertado una preocupación plenamente justificada, ya que la súbita liberación de miles de toneladas de agua sobre asentamientos humanos importantes puede causar enormes pérdidas humanas y materiales, así como de graves daños al medio ambiente, concluyéndose en forma generalizada que las presas no deben fallar.

Muchas presas y centrales hidroeléctricas en nuestro país están cerca de terminar su vida útil; por otra parte, muchas de ellas se diseñaron, construyeron y montaron con normas o estándares que no necesariamente cumplen con las actualmente existentes.

Recientemente se ha presentado en el mundo un gran interés en cuanto a seguridad de presas, muestra de ello, es que existen numerosos artículos escritos en diferentes congresos y sesiones técnicas, además de varios trabajos de investigación al respecto y varias agencias y propietarios de presas y centrales hidroeléctricas en todo el mundo, han creado grupos específicos para estudiar y definir las acciones a seguir en este tipo de problemas.

El interés por incrementar la seguridad de presas, no debe plantearse sólo como un beneficio a la sociedad, sino que indudablemente debe verse como un mejoramiento a la capacidad de regulación de las presas y por tanto de la generación de energía, además de la regulación de avenidas.

Se puede señalar por ejemplo, que muchas de las presas existentes no necesariamente son capaces de pasar las avenidas que hoy en día se juzgarían como de diseño y tampoco de resistir sismos como los que se han presentado recientemente en nuestro país.

ANTECEDENTES DE FALLAS EN PRESAS A NIVEL MUNDIAL

Las presas proporcionan grandes beneficios al ser humano, pero también resultan potencialmente peligrosas, ya que ocurren fallas por la enorme magnitud de los volúmenes de agua que se llegan a almacenar, este fenómeno provoca grandes pérdidas humanas y materiales, aunado a los grandes daños realizados al medio ambiente.

De hecho, puede decirse que pocas actividades humanas poseen tal potencial de daño y destrucción como la falla de una presa, aunque son pocas las que experimentan durante su vida útil los eventos extremos para los cuales fueron diseñadas.

El desmedido crecimiento humano en los últimos años ha llevado a los ingenieros a la construcción de presas cada vez más grandes que permitan irrigar tierras, tomar agua para consumo humano, municipal e industrial, así como la generación de energía eléctrica principalmente, tan vital hoy en día, además de ser de gran utilidad para el control de avenidas. Estas razones hacen que las presas en altura, número, tamaño y costo hayan crecido exponencialmente en las últimas décadas.

El objetivo al revisar las principales causas de falla en presas es conocer los factores más importantes que deben tomarse en cuenta al hacer un análisis de riesgo de falla. Los trabajos en cuanto a estadística de fallas en presas más recientes son el de Lebreton de 1985, referente a fallas y accidentes graves en presas; el de Laginha Serafim y Coutinho-

Rodriguez de 1989, y el de Silveira acerca de la durabilidad de presas de 1990. Sin embargo, existen numerosos antecedentes entre los que se pueden mencionar los presentados por Baecher (1980) y Marengo (1994), quienes resumen las causas de falla en presas, de acuerdo a la siguiente tabla 26.

| CAUSAS | MIDDLEBROOKS (1953) | GRUNER (1963) | TAKASE (1967) | BABB Y MERMEL | USCOLD (1975) | SILVEIRA (1990) |
|------------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Desbordamiento | 30 | 23 | 28 | 36 | 38 | 57 |
| Tubificación o Filtración | 38 | 40 | 44 | 30 | 44 | 24 |
| Desplazamientos | 15 | 2 | 10 | 15 | 9 | 8 |

Tabla 26. Causas de falla de grandes presas en porcentaje.

Los factores relacionados con las causas de falla en presas pueden agruparse como sigue:

- **Factores hidrológicos.** Incluyen frecuencia de avenidas, volumen pico y distribución en el tiempo de las avenidas, nivel inicial del embalse antes de recibir la avenida, sedimentos en el embalse, escombros alrededor de la presa y oleaje por viento.
- **Factores hidráulicos.** Comprenden la capacidad del vertedor, obras de toma, compuertas, erosión y falla de tuberías y válvulas.
- **Factores geotécnicos.** Abarcan condiciones desfavorables del suelo, tales como capas débiles, material fisurado, juntas adversamente orientadas, filtración, tubificación, excesiva presión de poro, asentamientos, inestabilidad de taludes durante vaciados rápidos en el embalse y deslizamiento de taludes en alguna zona de la presa.
- **Factores sísmicos.** Se refieren a condiciones de estabilidad sísmica de la presa, licuación, grietas inducidas por sismos, oleaje por sismo y presión hidrodinámica.
- **Factores estructurales y de construcción.** Reúnen diseño estructural inadecuado, malos materiales, errores de construcción y pobre control de calidad.
- **Factores operacionales.** Integran mantenimiento inapropiado, procedimientos incorrectos de operación, errores humanos y negligencia.
- **Otros factores.** Implican actos de guerra, sabotaje e impactos accidentales en estructuras (como vehículos, embarcaciones etc.).
- Estos factores están sujetos a la incertidumbre, pueden ser diferentes en cada caso y variar en el tiempo y el espacio.

INCIDENTES Y FALLAS DE PRESAS EN MÉXICO.

En el diseño, construcción y operación de presas se han registrado avances significativos a nivel mundial. En los últimos 20 años se ha prestado una gran importancia a las consideraciones de durabilidad y falla de las mismas y se puede decir que se ha establecido la base técnica y científica para definir la seguridad que deben tener las presas y las obras temporales como las de desvío, sin embargo esto no se ha implantado en forma decidida en nuestro país.

Se puede considerar que se han planteado las bases para entender los aspectos geológicos, hidrológicos y la naturaleza y comportamiento de los materiales así como las cargas y ciclos a los que las presas están sujetas. El desarrollo de métodos numéricos y técnicas computacionales permiten tener un mejor panorama en estos aspectos y se puede decir que se están haciendo serios esfuerzos para instrumentar y definir de una mejor manera el comportamiento estructural de las presas.

La seguridad por si misma, debe ser una consideración de gran importancia para el ingeniero, ya que deben tomarse en cuenta todos los factores que razonablemente pueden ser identificados, de hecho la seguridad de presas depende de tres factores predominantes; diseño, calidad de construcción, mantenimiento y operación.

Es importante mencionar que en la etapa de diseño como sucede en otros países, debe implantarse un panel que revise el diseño del consultor o grupo que lo efectúa y que además lo haga oportunamente para que las medidas que se consideren necesarias, se puedan llevar a cabo.

La construcción es probablemente el aspecto más difícil de todos, ya que en la gran mayoría de estas obras existen compromisos políticos y sociales que obligan a cumplir un programa en tiempo y costo que en muchas de las ocasiones no son compatibles con la calidad requerida en las bases de diseño y la realidad de la obra. Además la mayoría de las veces el grado de supervisión varía enormemente de un país a otro y aún presenta diferencias dentro de una misma institución; por ejemplo, muchos clientes piensan que pagar una supervisión adecuada es superfluo, lo cual puede acarrear graves consecuencias. Respecto al mantenimiento y operación, el grupo de diseño o consultor, así como el supervisor debe formar parte del comité de inspección de la presa que está revisando y operando, ya que conocen y están íntimamente ligados con el proyecto en sí y los detalles que lo componen; de esta manera el monitoreo y verificación del comportamiento de la estructura pueden ser verdaderamente efectivos.

Lamentablemente estos aspectos no se consideran a la fecha y se toman en cuenta solo cuando aparecen las crisis.

3.2. GENERALIDADES

En este capítulo se describen las especificaciones relativas que debe ejecutar el contratista para el tratamiento de la roca en los sitios donde se construyan las diversas obras superficiales y subterráneas del proyecto.

Las actividades que debe realizar el Contratista, de manera enunciativa, son las que enseguida se describen: trabajos previos de limpieza y amacice superficial del terreno; ejecución de tratamientos de estabilización y soporte (barrenación, anclajes, concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada o con fibras metálicas, marcos metálicos, drenaje); y la ejecución de tratamientos de consolidación e impermeabilización por medio de inyecciones (relleno de oquedades, de contacto concreto-roca y concreto-placa, construcción de pantallas impermeables en ataguías y cortina, drenajes, pruebas de permeabilidad para verificar la eficacia de las inyecciones). Adicionalmente, durante los procesos de excavación, debe preverse la instalación de instrumentación geotécnica.

El tratamiento de la roca tiene la finalidad de garantizar la estabilidad del macizo rocoso y de las obras que ahí se construyan, por lo cual el Contratista tiene la responsabilidad de conocer la naturaleza geológica de la zona de las obras, a partir de la información que se presenta en estas especificaciones, con la que obtenga como resultado de su visita a la obra, con la información previa del concurso y con la que obtenga por otros medios.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha realizado estudios geológicos y geotécnicos para el desarrollo del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, Jal-Nay., tanto en su etapa de estudios de prefactibilidad como en su etapa de preconstrucción. El primer estudio geológico data del año 1984, y posteriormente se hace otro en junio de 1985 por el Contratista como información de referencia, con la advertencia de que las conclusiones que de él obtenga será de su exclusiva responsabilidad. La Comisión no asume compromiso alguno de las consecuencias y tiene la obligación de verificar la información que se le entrega y de realizar los estudios geológicos complementarios, si así lo considera necesario, para garantizar la estabilidad de las excavaciones en roca con los tratamientos de la roca que así se requieran, por lo cual debe considerar en su oferta los costos que implican estos trabajos.

El Contratista tiene la responsabilidad de tomar en cuenta y evaluar las anomalías geológicas que registra el subsuelo a través de los estudios que se le entregan, y de prever las dificultades de construcción que tiene que enfrentar, así como los trabajos, procedimientos y estrategias de construcción que adoptara para cumplir con el diseño y con el programa ejecutivo global del proyecto.

La Comisión proporciona toda la información referente a los diseños de tratamientos de la roca para las diversas obras del proyecto, así como las cantidades incluidas en el catálogo de conceptos a precios unitarios, y que el Contratista debe cotizar por unidad de medida. En el probable caso de incrementos de las cantidades, por orden de la comisión, el Contratista tendrá la obligación de ejecutar estos trabajos.

El contratista debe suministrar oportunamente el personal, materiales, equipos y maquinaria idóneos para ejecutar los tratamientos de la roca, dando estricto cumplimiento con las fechas establecidas en el programa general de construcción del proyecto.

El personal, el equipo y la maquinaria para construcción deben ser revisados y aceptados por la CFE antes de su uso en la obra y deben ser mantenidos por el Contratista en condiciones óptimas de la operación en todo momento durante la construcción.

El Contratista debe instalar los laboratorios de inyecciones y de mecánica de rocas en el sitio de construcción del proyecto, para realizar todos los muestreos, pruebas o ensayos de los materiales que se emplearan en los tratamientos, para verificar el control de calidad de estos y garantizar e aseguramiento de calidad de las estructuras, de acuerdo con las normas aplicables, de las presentes especificaciones y de acuerdo con las instrucciones de trabajo de supervisión que la CFE aplique a través de sus representantes en el sitio de construcción del proyecto.

Durante la ejecución de los trabajos, se debe establecer una estrecha vigilancia de los procesos de producción y/o construcción, verificando entre otros aspectos lo siguiente:

- En la colocación de los sistemas de estabilización y soporte se deben verificar los diámetros y características del acero de esfuerzo; el calibre y espesor de la sección de los marcos de acero de acuerdo a la geometría del proyecto; en los sistemas de anclajes, la compatibilidad entre los diámetros del barreno y ancla, la dosificación de los materiales para la fabricación de las lechadas y morteros, la limpieza previa de los barrenos, los volúmenes de mezclas inyección en barrenos comparados con los teóricos, la colocación de las placas metálicas de asiento, la orientación y longitud conforme a lo indicado en los planos de proyecto y las pruebas de extracción; los espesores de recubrimiento de concreto lanzado con el uso de escantillones y su resistencia; y la integración de conjunto de los distintos sistemas de soporte (marcos metálicos, anclaje en sus distintas opciones integrado el concreto lanzado con y sin refuerzo de acero, etc.)
- En la ejecución de los tratamientos de impermeabilización y consolidación se debe verificar; la calidad y dosificación de los cementantes, agregados y aditivos durante la preparación de las mezclas de inyección, monitoreo de las propiedades reológicas de las mezclas mediante pruebas, cumplimiento de criterio de inyección para los distintos fines, validación de las pruebas de verificación de las inyecciones, etc.

3.3. INYECCIÓN DE SUELOS EN ROCA

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

El producto inyectado reducirá la permeabilidad del medio (impermeabilización) y en algunos casos incrementará su resistencia y módulo de deformabilidad (consolidación) la inyección de un terreno implica la introducción en el mismo, de una mezcla fluida que posteriormente fragua y endurece.

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

Aquí se contemplan los siguientes tipos de inyección:

Impregnación: Sustitución del agua y/o gas intersticial en un medio poroso, por una lechada inyectada a una presión suficientemente baja, que asegure que no se producen desplazamientos significativos de terreno.

Relleno de fisuras: Inyección de lechada en las fisuras, diaclasas, fracturas o discontinuidades, en general, en formaciones rocosas.

Relleno de huecos: Consiste en la colocación de una lechada, con un alto contenido de partículas, para el relleno de grandes huecos.

Inyección por compactación: Consiste en un método de inyección con desplazamiento del terreno, en el cual se introduce un mortero de alta fricción interna en una masa de suelo.

Fracturación hidráulica: Consiste en la inyección del terreno mediante su fracturación por lechada, con una presión por encima de su resistencia a tracción y de su presión de confinamiento. También se denomina hidro-fracturación, hidrofisuración, hidro-jacking o claquage.

El proceso por el cual se le da tratamiento a suelos y rocas se le conoce como inyección, es un procedimiento de gran importancia al cual se le ha puesto muy poca atención ya que se considera de mayor importancia a las obras de contención (cortina y ataguías) así como las obras de generación (casa de máquinas), en dicho proceso realmente no nos es difícil conocer las condiciones reales del terreno a grandes profundidades puesto que los estudios geofísicos y geológicos nos dan una percepción aproximada y un tanto vaga del terreno mismo; ya que son muy pocas personas se sensibilizan con esta labor y llegan a entender de principio a fin este proceso. En los últimos años se le ha dado la importancia que se requiere para este proceso.

Como procesos de inyección se contemplan los siguientes:

Inyección desde la boca de la perforación: Consiste en introducir la lechada desde la boca del sondeo, obturando en la parte superior.

Inyecciones por fases descendentes: consiste en un proceso en el cual se perfora e inyecta un tramo de terreno, reperforando e inyectando a continuación el tramo inmediato inferior.

También se puede aplicar este método con la colocación de obturadores, iniciándose el proceso de inyección progresivamente hacia el fondo de sondeo.

Inyecciones por fases ascendentes: se trata de un proceso de inyección por tramos sucesivos, comenzando desde la parte inferior de la zona a inyectar hasta la zona superior.

Inyección por fases repetitivas mediante tubos manguito: se trata de un procedimiento que permite tratar repetidamente, en distintas fases, un mismo punto, sin reperfusión, para lo cual se perfora un taladro colocando en su interior un tubo, denominado "tubo manguito", que tiene una serie de agujeros periféricos, obturados exteriormente por manguitos de goma, que sirven de válvulas antirretorno, por los que sale la lechada. El espacio anular entre el tubo y el terreno se rellena, constituyendo lo que se denomina "gaine", con el objetivo de conseguir una obturación longitudinal continua.

Tratamiento superficial del terreno

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

Las actividades que comprende el tratamiento superficial de la roca son:

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

Pantalla flexible en ataguías

Consiste en un muro plástico de concreto o mortero, ubicado bajo los materiales de las ataguías como una prolongación de los núcleos impermeables, atravesando todo el espesor de los aluviones hasta hacer contacto con la roca de cimentación.

Inyecciones

Este tratamiento consiste en introducir dentro del macizo rocoso, de manera controlada, tanto en presión como en volumen, mezclas fabricadas con cemento, agua y aditivos, con la finalidad de reducir la permeabilidad del terreno o mejorar sus propiedades mecánicas. En algunos casos, a la mezcla se le adiciona un agregado fino (arena) para formar morteros de cemento, aplicable para el terreno de quedades.

Inyecciones de contacto

Tienen como finalidad rellenar y empaquetar los espacios entre la roca y los colados de los concretos, y/o entre estos y las placas de las estructuras metálicas, asegurando el contacto entre ambos por medio de inyección de lechadas o morteros para evitar concentraciones de flujo y garantizar la correcta interacción roca-revestimiento.

Inyecciones de consolidación

Tiene como propósito mejorar el módulo de deformabilidad de la roca de cimentación, mediante la inyección de mezclas de presión a través de barrenos perforados previamente en un arreglo geométrico definido. Con la inyección se trata de sellar las fisuras o grietas existentes en la masa de roca. Este tratamiento generalmente se aplica en el terreno de cimentación de la cortina y en la roca circundante a las tuberías a presión.

Inyecciones de impermeabilización bajo la pantalla flexible

Inyección del contacto entre la roca in situ y el límite inferior de la pantalla o muro plástico de las ataguías, para lograr la continuidad de la pantalla flexible y garantizar la estanqueidad del terreno.

Pantalla de impermeabilización profunda

Consiste en la impermeabilización de la roca mediante inyecciones a través de perforaciones profundas, sellando fracturas o discontinuidades geológicas (fallas, diques, etc.) existentes, con el propósito de reducir la permeabilidad del terreno al formar una barrera lo suficientemente profunda para garantizar la estanqueidad de la obra.

Anclajes de fricción

El anclaje es el soporte que debe aplicarse en forma sistemática y/o selectiva en el terreno, según se indique en los planos de proyecto, para estabilizar las excavaciones subterráneas y los taludes en las excavaciones exteriores. Para que cumpla este propósito, la actividad del anclaje debe quedar integrada a cada ciclo de trabajo de las excavaciones. En el proyecto se han considerado dos tipos de anclaje:

- Anclaje con resina de fraguado rápido, de uso muy restringido en el proyecto, aplicable solo donde se requiera que el soporte actúe de forma expedita. Podría ser el caso de las bóvedas de las grandes excavaciones subterráneas o zonas de roca de muy mala calidad.
- Anclaje con mortero de cemento, para uso en general, tanto en las obras a cielo abierto como en las subterráneas.

Todo el anclaje está diseñado como un soporte definitivo para que trabaje a fricción de acuerdo a su diseño. Las anclas consisten en pernos de varilla de acero corrugado de $f_y = 411,9 \text{ MPa}$ (4200 kg/cm^2), instalados e inyectados en toda su longitud dentro del barreno con mortero de cemento o con resina epóxica. La longitud es variable y se fija para cada caso particular de acuerdo al diseño y planos para construcción. En el extremo libre del ancla se debe colocar una placa de acero, de dimensiones preestablecidas, la cual se fija contra el terreno con una tuerca apretada con el torque especificado.

Marcos de acero

Los marcos de acero son elementos estructurales formados por vigas acero tipo 1, que sirven para el soporte de la roca en los portales y en algunas zonas en el interior de las excavaciones que presenten condiciones de riesgo por falla de roca o por condiciones de deformaciones excesivas. Es necesario que la instalación de marcos quede integrada al ciclo de excavación de portales y túneles. Para la colocación de los mismos, se debe considerar que sus dimensiones dejen libre el área hidráulica del proyecto.

Revestimientos y protección con concreto lanzado

Con el fin de evitar la erosión, la intemperización de la roca y problemas de inestabilidad en zonas de alto fracturamiento, se debe aplicar, según se indique en los planos del proyecto, un tratamiento sistemático y/o selectivo de concreto lanzado solo por vía húmeda, con tamaño máximo de agregado de 19,0 mm, reforzado con una o dos capas de malla de alambre electrosoldada con sus diferentes calibres, para aplicarse en las obras subterráneas y superficiales, o reforzado con fibras metálicas, según se indique en el proyecto.

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

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

Por cada 250 m² de aplicación de concreto lanzado se deben obtener artesas con muestras de concreto representativas del sitio, determinando las propiedades físicas y de resistencia mecánica a los 7; 14 y 28 días de edad (3 núcleos por edad); los resultados deben cumplir con los requerimientos del proyecto.

En el capítulo de estas especificaciones se detallan las características que deben cumplir el concreto lanzado y el procedimiento de aplicación.

Drenajes

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

Todos los drenajes largos serán de 7,62cm (3") de diámetro, en la longitud indicada en los planos de proyecto, y en el caso de los drenajes cortos, el diámetro es de 3,81 cm (1 1/2") y de longitud variable

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

En barrenos de drenaje que crucen zonas de fallas importantes con presencia de material fino o arcilloso susceptible a ser erosionado, se debe realizar una protección con tubos de PVC ranurado, recubierto con dos capas de geotextil, como mínimo en los primeros 6 m próximos al brocal, para garantizar la retención del material fino.

Tratamiento dental

Es el tratamiento para una zona de cimentación, que debe efectuarse en aquellos terrenos muy fracturados o fallados y en rocas intrusivas parcial o totalmente alteradas, rellenas con material triturado o arcilloso. Consiste en retirar el material alterado usando herramientas manuales y/o mecánicas apropiadas, incluso explosivos en caso necesario, hasta encontrar la roca sana o hasta una profundidad específica relacionada con el ancho de la falla (siempre que el espesor de la zona a tratar sea menor de 2 m, se podrá considerar una profundidad de tratamiento menor de 2,5 veces este espesor), la cual se dictamina dependiendo de cada tipo de falla. Después de la limpieza enérgica, se debe vaciar o colar concreto hidráulico y/o concreto lanzado, instalando previamente boquillas dirigidas hasta el contacto y/o dirección de las discontinuidades de la roca. Finalmente, a través de estas boquillas de PVC, se deben efectuar inyecciones de contacto concreto-roca y de consolidación.

En zonas de fallas importantes que crucen cualquier cimentación de una estructura, este tratamiento se debe realizar en una longitud que se define en función del tipo y uso de la cimentación.

En algunos casos, este tratamiento se combinará con un tratamiento de impermeabilización a través de una pantalla de inyecciones, complementada con anclas de fricción, para garantizar la estabilidad del tratamiento.

Protección en superficie de taludes con muro alcancía

Para la protección de taludes en materiales blandos, como suelo, roca alterada, y materiales granulares (depósitos de talud, paleocauces) y rocas blandas (brechas, tobas, vulcanosedimentarias), se colocarán muros alcancía en la superficie de la berma, aproximadamente entre 1 y 2 m de separación a partir del pie del talud. Éstos muros serán construidos con malla triple torsión de acero galvanizado, rellena de material rocoso con tamaños máximos de 30 cm, las dimensiones deberán adecuarse a las características del talud a proteger y será responsabilidad del contratista garantizar la estabilidad del muro.

Protección en superficie de taludes con malla triple torsión

Para los materiales poco consolidados, materiales tobáceos, depósitos vulcanosedimentarios, se colocarán protecciones a base de malla triple torsión, fijada en la corona de los taludes por proteger, y sujeta a la superficie del talud a través de anclas cortas de longitud adecuada.

Protección en superficie de taludes con zampeado

En zonas susceptibles de ser erosionadas con facilidad, se colocaran muros mampostería de piedra juntada con mortero de $f^c=17,6$ MPa (180 kg/cm²) Las dimensiones de las zonas por proteger, se definirán en el sitio.

Este tratamiento debe ser completado con la colocación de sistemas de drenaje, que garanticen el alivio de presiones de agua en el interior de la masa.

3.4. EQUIPO

Generalidades

El equipo que se utilice para realizar las actividades del tratamiento de la roca debe estar en excelentes condiciones mecánicas, ser del tipo y capacidad adecuados para asegurar la óptima ejecución del concepto de trabajo y llevar a cabo un mantenimiento sistemático para conservarlo en estas condiciones durante su utilización en la obra. El Contratista debe demostrar a la Comisión que está cumpliendo en todo momento este requisito mediante la aplicación de un sistema de aseguramiento de calidad (Ver capítulo 14 de estas especificaciones).

El Contratista es responsable de la elección del equipo de construcción; sin embargo, la Comisión especifica que el equipo debe cumplir con las características generales que se indican en la presente sección de las especificaciones de construcción, sin que esto exima la responsabilidad del Contratista de la elección adecuada del equipo de construcción.

Perforadoras

Deben utilizarse perforadoras de accionamiento neumático o hidráulico de percusión-rotación o rotatorias para barrenos de 41; 51,8; 57,2; y 76,2 mm de diámetro, con capacidad suficiente para barrenar a profundidades hasta de 80 m. Debe preverse que tengan incluido un dispositivo para poder inyectar agua en forma continua durante la perforación, requisito indispensable para eliminar la contaminación producida por el polvo de la barrenación.

Se recomienda la utilización de perforadoras neumáticas con martillo de fondo para profundidades superiores a los 30 m, con el fin de garantizar la correcta dirección del barreno, según se especifique en los planos de proyecto.

Para barrenos cortos como los utilizados para anclas cortas, drenes para concreto lanzado o para el contacto concreto-roca, se recomienda el uso de perforadoras ligeras equipadas con acero de barrenación integral.

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

Para garantizar la correcta ejecución de un barreno, el Contratista debe tomar en cuenta lo siguiente:

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

- Estabilidad de las paredes del barreno. Es fundamental que el barreno permanezca limpio durante el proceso de perforación para optimizar el avance; sin embargo, se pueden presentar zonas donde el terreno esté muy fracturado y sea necesario ademar las paredes del mismo a medida que se realiza la perforación hasta llegar a la profundidad de diseño, por lo cual el contratista debe considerar la utilización de ademes metálicos para estos casos.

Canastillas o plataformas de trabajo

Las canastillas o plataformas para el personal con elevador de acción telescópica deben ser del tipo autopropulsable, mediante orugas o llantas neumáticas, de tal forma que permitan un rápido posicionamiento y un ágil desplazamiento a cualquier zona durante el desarrollo de los trabajos, evitando interferencias con las actividades comunes del ciclo de excavación.

Equipo mezclador

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

- Turbomezclador de las altas revoluciones (1250 rpm) del tipo de bomba centrífuga, para la fabricación de lechadas. Debe contar con un tanque de almacenamiento con capacidad mínima de 150 litros, con una malla para retención de los grumos, papeles e impurezas que pueda contener el cemento o agua y tener integrado un medidor y dosificador para agua.
- Agitador o mezclador de bajas revoluciones (60 rpm). Se utiliza para fabricar morteros o para depositar la mezcla previamente preparada en el turbomezclador, manteniendo en suspensión las partículas sólidas y eliminando las burbujas de aire de la mezcla, de tal manera que la operación de inyectado sea continua. Se recomienda que la capacidad mínima de estos agitadores sea de 200 litros.

Bombas para inyecciones de morteros o mezclas pesadas

Para la inyección y bombeo de morteros y mezclas pesadas, se requiere la utilización de los siguientes equipos:

- a) Bombas de desplazamiento positivo del tipo pistón de doble efecto, adaptadas con válvula de control en el sistema hidráulico. Deben seleccionarse bombas cuya capacidad de inyección sea variable de 0 a 100 litros por minuto y presión ajustable de 0 a 5 MPa. El equipo de bombeo deberá estar conectado preferentemente a un sistema computarizado de control de inyección; éste tendrá adicionalmente el software que permita introducir los parámetros requeridos para cada inyección, aportando los reportes del comportamiento de la misma de manera gráfica y numérica en tiempo real.
- b) Bombas de desplazamiento positivo del tipo rotatorias o tornillo de Arquímedes, para inyección de mezclas pesadas y morteros que tengan una capacidad de bombeo de hasta 100 litros por minuto y 2 MPa de presión.

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

Bombas manuales para inyecciones

Para la inyección de mezclas para anclaje y para contactos concreto-blindaje se requiere la utilización de los siguientes equipos:

- a) Bombas hidroneumáticas: Estas bombas son recipientes presurizados que trabajan a una presión de 0,6 MPa. Tienen una eficiencia adecuada cuando la relación diámetro/longitud es de 1/5. Se utilizan para la inyección de morteros para anclas.
- b) Bombas de émbolo: Constan de un recipiente circular con un eje manivela con aspas para que al accionarse mantengan en suspensión la mezcla, la salida está diseñada para que la mezcla pase por una bomba de esferas y un manómetro para medir la presión de trabajo. Se utilizan para la inyección de contactos concreto-blindaje.

Medidores de gasto

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

Manómetros

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

Obturadores

Dispositivo que se coloca dentro del barreno al final de la tubería de inyección, cuya finalidad es la de aislar el tramo que se vaya a inyectar. Pueden ser neumáticos, mecánicos o de copas de cuero, dependiendo de las condiciones del sitio de inyección y de la presión de trabajo; el Contratista es responsable de su elección, y de cualquier cambio que se haga.

Sonda eléctrica

Se utiliza para medir o detectar el nivel de agua en el subsuelo. La medición debe realizarse antes de haberse efectuado la saturación o inyección del terreno en un sitio específico.

Plantas para la preparación de mezclas de inyección y estaciones de inyección

Las plantas para la preparación de mezclas de inyección consisten en las instalaciones apropiadas con los equipos e instrumentos necesarios y suficientes para la dosificación automatizada o manual, fabricación, almacenamiento y envío de las mezclas ya preparadas a través de las conducciones hasta las plantas de inyección y/o la boca del barreno de inyección. Deben estar ubicadas en sitios accesibles para el fácil aprovisionamiento de materiales, estar techadas, contar con espacio suficiente para alojar una cabina de control, equipo de laboratorio de campo, silos y tanques de agua provistos preferentemente de sistemas automatizados de dosificación. En caso de optarse por estos sistemas automatizados, deberán ser calibrados y certificados de acuerdo a la periodicidad prevista en la norma. Dado el caso, debe contar con tarimas de madera o metálicas sobre elevadas de 0,3 a 0,5 m del piso, así como en condiciones ambientales adecuadas para almacenar y conservar en buen estado los materiales que se utilicen para la fabricación de mezclas. Las plantas se deben localizar en sitios estratégicos que permitan surtir a las estaciones de inyección con el menor recorrido posible de las mezclas (menos de 70 m).

Es conveniente que desde estas plantas se puedan enviar las mezclas por gravedad o por bombeo hacia las estaciones de inyección, las cuales se instalan cerca del barreno, de tal manera que la circulación de las mezclas a través del sistema de inyección sea continua y permita un contra sensible de las presiones mediante una válvula de alivio colocada cerca del barreno. En algunos casos, juicio de la Comisión, en longitudes cortas (menos de 15 m) puede eliminarse la tubería de retorno con la condición de que se tenga una inyección continua en los barrenos. Las mezclas pueden prepararse en las estaciones de inyección, si éstas reúnen las características y condiciones mencionadas para las plantas.

Estaciones de aire comprimido

Debe preverse como condición obligada para las obras de generación subterráneas, la instalación de una estación para aire comprimido, en la cual se instale una batería de compresores en zonas a cielo abierto debido a que no se permiten compresores de combustión interna en sitios subterráneos, ubicados de acuerdo con la planeación del frente de trabajo sin que cause interferencias con otras actividades que se ejecuten en paralelo. La capacidad debe ser tal que cubra las demandas de los conceptos de trabajo que se ejecuten. Estas instalaciones deben incluir todas las tuberías, conducciones, conexiones, válvulas, recipientes para el almacenamiento del aire comprimido; a la salida de este último, se debe instalar un separador de agua para eliminar el agua de condensación para que el aire llegue seco a las máquinas.

Lanzadora de concreto

El contratista debe seleccionar el equipo adecuado para efectuar la aplicación de concreto lanzado solo por vía húmeda. El equipo de lanzado seleccionado debe cumplir con las características siguientes: contar con bombas de desplazamiento positivo o peristálticas que permita transportar la mezcla a distancias horizontales del orden de 300 m. y verticales de 100 m. y que tenga una producción efectiva mínima de 3 m³ / h; debe contemplarse dentro de este equipo que las boquillas para la integración del agua a la mezcla y la dosificación sean las que especifica el fabricante; para el mezclado pueden usarse camiones premezcladores o mezcladores portátiles; debe contar también con los dosificadores aditivos adecuados para medir correctamente la cantidad de acelerante que deba agregarse a la mezcla; el compresor de aire debe tener la capacidad de mantener un flujo de aire continuo, libre de aceite y agua para proporcionar una velocidad suficiente del concreto en la boquilla.

Taladro Electromagnético

Este equipo consiste en una perforadora de rotación de accionamiento eléctrico, montada sobre una base de accionamiento electromagnético que al posicionarse en un objeto metálico (en este caso la placa metálica de la estructura) queda sujeta magnéticamente, permitiendo en cualquier posición ejecutar perforaciones y transmitir el empuje necesario para barrenar eficientemente en cualquier diámetro.

Equipo para la instalación de anclas con resinas

Este equipo se requiere para la instalación de anclas con resina. Debe ser de accionamiento neumático y estar adaptado al equipo de barrenación.

Equipo para la excavación de aluvión para alojar la pantalla flexible

La excavación de la zanja para la construcción de la pantalla flexible debe hacerse con un equipo que cuente con un barretón telescópico tipo KELLY, equipado con un cucharón de almejas de 800 mm de ancho por 2500 mm de largo, de accionamiento hidráulico a través de una central montada sobre un grúa tipo Link Belt LS-118 o equivalente y adaptada a su sistema de fuerza. Este equipo debe garantizar la continuidad y la verticalidad del muro pantalla.

Para perfilar y empotrar la pantalla en la roca basal, así como para demoler bloques y boleos que no puedan extraerse con el equipo de almeja, es necesario contar con un equipo de cincel-trépano de 7 toneladas de peso mínimo, montado en una segunda pala.

Equipos para la preparación de las mezclas autofraguantes

La planta para la preparación de mezclas autofraguantes debe tener dimensiones apropiadas y suficientes para la instalación de los equipos, para almacenar cemento, bentonita y aditivos y para la instalación de los equipos del laboratorio de campo. Esta planta debe contar con silos para el almacenamiento de cemento; transportadores de gusano para alimentar cemento en forma automática a los agitadores durante la preparación de la mezcla; bombas sumergibles y todos los equipos complementarios necesarios para la fabricación de las mezclas del muro de pantalla.

3.5. MATERIALES

Los materiales que utilice el contratista en la ejecución de los conceptos de trabajo propios del tratamiento del a roca, deben ser de las características especificadas y cumplir con las normas que se indican en esta especificación. Todos los materiales deben ser suministrados por el contratista, incluyendo el transporte, traspaleos o acarreos internos, almacenamiento y todo lo necesario para disponerlos en el sitio.

Es responsabilidad del contratista disponer en cada frente de trabajo de una bodega para almacenar y conservar los materiales con las características de calidad especificadas hasta su utilización final.

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

Agua

El agua que se utilice para la fabricación de las mezclas de lechada y mortero de cemento debe ser limpia, con bajo contenido de sales, libre de sólidos disueltos, libre de materia orgánica, aceite y grasas, debe ser suministrada por el contratista, y puede ser obtenida del río Santiago y/o Bolaños.

Cemento

El cemento que se utilice para todos los tratamientos de la roca, en términos generales, debe cumplir con todas las especificaciones, para el caso de las inyecciones se debe cumplir con las siguientes características:

- Cemento puzolánico elaborado con puzolana de buena calidad (actividad puzolánico con cal mayor a $55 \text{ kg} / \text{cm}^2$) y que en porcentaje sea del 15 a 40 % (cemento tipo CPP 30 RS / BRA)
- Debe inhibir la reactividad álcali-sílice y ser resistente al ataque de los sulfatos
- Tiempo de fraguado 6.0 h, máximo (final)
- Superficie específica Blaine $4500 \text{ cm}^2 / \text{g}$. mínimo
- Densidad $2.86 \text{ g} / \text{cm}^3$

No se permite la utilización de cemento húmedo o con grumos. El cemento debe estar protegido contra los agentes atmosféricos para evitar su fraguado prematuro.

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

Arena

La arena que se utilice puede ser natural, triturada o una combinación de ambas. La obtención debe cumplir y estar bien graduada de fina a media con los siguientes requisitos de granulometría:

| Malla Berau Estándar | U.S Of. | Porcentaje acumulado | |
|----------------------------|------------|----------------------|----------|
| | | que pasa | retenido |
| No.8 | | 100-100 | 0-0 |
| No.16 | | 95-100 | 5-0 |
| No.30 | | 60-95 | 40-5 |
| No.50 | | 20-50 | 80-50 |
| No.100 | | 10-30 | 90-70 |

Aditivos

Los aditivos que se utilicen para los conceptos de trabajo del tratamiento de roca, deben cumplir con lo especificado.

- a) Para la mezcla única de inyección debe utilizarse un aditivo superfluidizante reductor de agua y, en caso de requerirse, un acelerante de resistencia y estabilizadores especiales, que al agregarse a concreto fresco imparten una consistencia superfluida y de alta trabajabilidad. No debe contener cloruros; no ser cáustico, tóxico ni inflamable; que tenga alto poder dispersante; con una densidad de 1.12 kg / L y un ph de 7.
- b) Para el mortero utilizado en la inyección de anclas se debe utilizar un aditivo de fraguado rápido.
- c) El silicato de sodio es para acelerar el fraguado de las mezclas de inyección, el grado de concentración requerido es de 40 grados Baumé.

Bentonita

La bentonita que se especifica es para utilizarse en forma de lodo como estabilizador y/o como componente de la mezcla autofraguante en las excavaciones para las pantalla de muros plásticos. La bentonita debe garantizar la uniformidad de consistencia para evitar ajustes innecesarios de la mezcla; debe tener además las siguientes características:

| | | |
|--|----|-----------|
| Viscosidad plástica en viscosímetro Fann a 600 r.p.m | 30 | cp mínimo |
| punto de fluencia, lb/100 ft ² | 3 | vp máximo |
| Filtrado a 0.7 Mpa | 15 | ml máximo |
| Humedad (a la salida de la fabrica) | 10 | % máximo |
| Residuo vía húmeda en malla No. 200 | 4 | % máximo |
| PH | 10 | |
| En donde: cp centipoise vp viscosidad plástica | | |

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

Resina epóxica

La resina epóxica es un material fabricado para que al mezclar sus componentes reaccionen químicamente produciendo un fraguado rápido en unos cuantos minutos.

La presentación comercial de la resina epóxica que se especifica para el anclaje, debe ser suministrada en cartuchos con envoltura de nylon que permita protegerla de la humedad y que con cierta facilidad se destruya dentro del barreno al ser desgarrada por el perno del anclaje. El diámetro dentro de los cartuchos está directamente relacionado con el perno de anclaje y el barreno; debe elegirse con base a lo especificado por el fabricante.

Este material debe almacenarse cuidadosamente, protegerse de los rayos directos del sol, de los cambios de temperatura, de la humedad y del maltrato por su delicado empaque. Debe vigilarse con especial cuidado su caducidad y llevar una rotación adecuada para el uso de este producto.

Malla de refuerzo

La malla de refuerzo o malla de alambre electrosoldada es una red metálica formada por una trama cuadrada de alambres soldados en si intersección, que se utiliza para el refuerzo del concreto lanzado. Debe cumplir con las normas DGN B-252 y ATSM A-185 y tener una resistencia a la tensión (a la fluencia) de 514.90 MPa (5 250 kg / cm²). Las mallas electrosoldadas comerciales que se pueden utilizar tienen las siguientes características: 10 x 10 x 0.343 cm. (44-1010), 15 x15 x 0.572 cm. (66-44) y 15 x 15 x 0.619 cm. (66-33), donde los dos primeros números indican la abertura de la trama y el siguiente el calibre de los alambres. Para la utilización como refuerzo del concreto lanzado debe, además, estar libre de óxido, no tener adherido material de rebote del mismo concreto lanzado ni otra sustancia que disminuya la adherencia.

Fibras Metálicas

Son elementos metálicos fabricados a partir de alambre cortado en frío, lamina cortada, o de extractos de una masa fundida, que cumplan con ATSM A-820, la longitud de la fibra metálica que se seleccione debe estar comprendida entre 25 y 50 mm de longitud y su sección trasversal con diámetros entre 0.7 y 1.2 mm (circular con extremos aplanados). El proporcionamiento de fibra que debe adicionarse al concreto lanzado estará comprendido entre 30 y 50 kg / m³, sin embargo, la dosificación optima debe referirse con base e pruebas que el Contratista realice en el sitio, siempre que cumpla con las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a la flexión, tenacidad).

Acero de barrenación

Es la sarta compuesta por: el zanco, los coples, las barras de extensión, adaptadores y la broca, la cual debe tener la longitud de diámetros necesarios para cumplir con las dimensiones del barreno especificado y además las características apropiadas con relación al espacio del frente de trabajo donde se utilice, montada en el equipo de perforación.

Tuberías

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

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

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

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

Mangueras

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

Anclas (pernos de anclaje)

El perno de anclaje consiste en una varilla de acero de $f_y=411.9$ MPa (4200 kg / cm^2), el cual lleva soldados 3 centradores de alambres de 6 mm de diámetro a cada 2 m. En un extremo del perno se le fabrica 20 cm de cuerda estándar y en el otro extremo un bisel de 5 cm para los pernos que se utilicen con resina. El perno completo incluye una placa de acero de 20 por 20 cm de lado y de 13 mm ($1/2''$) de espesor (o de la dimensión que indique el proyecto), la cual puede o no tener soldados 4 alambres de 6 mm de diámetro y de 50 cm de longitud cada uno, con el fin de integrarse a la malla electrosoldada (placa o alambres) y una tuerca de acero con cuerda estándar de igual diámetro del perno.

En el caso de pernos de anclaje que se instalen en forma ascendente, además de los indicado en el párrafo anterior, se debe instalar dentro del barreno y adosadas al perno de anclaje un par de mangueras para asegurar la inyección completa de todo el carril. Es recomendable que estas mangueras sean de plástico flexible.

La manguera que servirá para la inyección del mortero deberá tener un diámetro de 16 mm y una longitud de 80 cm, como mínimo, mientras que la manguera testigo o de regreso del mortero, será de 8 mm y de 50 cm de longitud mayor a la del perno de anclaje, esta última deberá estar sujeta con cinta adhesiva a lo largo del perno.

Boquillas

Son tubos de fierro o PVC, de diámetros que oscilan entre 12.7 y 76.2 mm y de longitudes variables, que se utilizan para captar agua o para la inyección de mezclas. Para el caso de las boquillas de inyección, en el extremo libre donde se instalan las válvulas de paso.

Brocas y machuelos de metal

Las brocas para la perforación de placas de acero y los machuelos que se utilicen para la fabricación de cuerdas deben seleccionarse con base en las características del acero que se emplee en la camisa de las tuberías a presión. El diámetro de los barrenos debe ser el especificado para la colocación de las boquillas que se utilizan para efectuar inyección de contacto concreto-blindaje.

Malla de torsión malla galvanizada triple torsión, escuadrilla de 8 x 10 cm de abertura, calibre 12.5 y 10 en las aristas y malla hexagonal de 25.0 mm calibre 20 galvanizada, fijada en la parte superior y la superficie del talud por medio de anclas cortas de 0.80 m de longitud.

Malla triple torsión

Malla galvanizada triple torsión, escuadrilla de 8 x 10 cm de abertura, calibre de 12.5 y 10 en las aristas y malla hexagonal de 25.0 mm calibre 20 galvanizada, fijada en la parte superior y la superficie del talud por medio de anclas cortas de 0.80 m de longitud.

3.6. ACTIVIDADES DE EJECUCIÓN

En esta sección se describen las principales actividades que debe ejecutar el Contratista, y se proporcionan los lineamientos mínimos que debe cumplir para que se ejecuten de manera integral los tratamientos de la roca en las diversas obras del proyecto.

Localización y trazo de barrenos

Son las actividades necesarias para ubicar y posicionar físicamente en el terreno los barrenos para anclaje, inyección, drenaje, etc., que debe ejecutar el Contratista, apegado a los datos indicados en los planos de proyecto. Para esto se requiere del apoyo de trazos auxiliares de topografía.

Mapeo

Las áreas de cimentación en roca, deben ser mapeadas geológicamente, con el objeto de definir las características de la inyección, como son intensidad, dirección y profundidad de barrenos, etc.

El mapeo para la inyección del contacto lámina-concreto en las tuberías a presión, consiste en determinar las áreas desde donde se distribuyen los barrenos para inyectar la mezcla y rellenar las oquedades existentes entre la placa de acero y el concreto.

Las áreas se determinan al golpear la placa metálica suavemente con un martillo de bola con un peso de un kilogramo y por el sonido (no compacto) producido por ese golpeo.

Conforme se van detectando las áreas que requieren tratarse con inyecciones de contacto, deben identificarse mediante marcas hechas con pintura, la cual debe ser visible y resistente al agua.

Instalación de tubos guía

Para iniciar la perforación de un barreno desde la profundidad requerida y ejecutar un tratamiento de inyección o de drenaje específico sin problemas de obstrucción, es necesario dejar instalados tubos guía previamente a la colocación del concreto lanzado, al colado del concreto hidráulico, a los colados de concreto plástico y/o al fraguado de la lechada autofraguante de los muros pantalla. La instalación de estos tubos guía debe garantizar que la perforación del barreno cumpla con los datos de proyecto, para tal efecto, es indispensable fijarlos firmemente y vigilar que durante las actividades de los revestimientos y los colados no sufran movimientos indeseables. Deben estar protegidos por ambos extremos del tubo para conservar todo el carril vacío, evitando obstrucciones internas. La longitud de los tubos es la

que permite llegar desde la superficie hasta la profundidad donde se debe iniciar el tratamiento o hasta pasar los armados de acero de refuerzo o hasta el contacto con la roca.

Se debe tener especial cuidado en la instalación de los tubos guías en el muro de la pantalla plástica, con la separación y profundidad adecuada, colocando tapones en ambos extremos y llenándolos de agua para que no floten. Es responsabilidad total del Contratista la elección del diámetro y material de los tubos guía; debe considerarse que el diámetro de los tubos guía es el que permita, en cada caso específico, un eficiente proceso de inyección.

Instalación de boquillas

Se refiere a las actividades que deben realizarse para instalar un tubo en una grieta o boca de un barreno. El tubo o boquilla debe quedar sujeto firmemente mediante taquetes de madera y sellado con papel y mortero de yeso-cemento, con la finalidad de que no se mueva durante el lanzamiento del concreto o colocación del concreto hidráulico. Las características de la boquilla son: tubo de hierro de diámetros que varían de 19,1 a 76,2 mm, con el extremo libre roscado para colocar una válvula esférica o de bola. La boquilla así instalada permitirá la captación de agua y/o la inyección de mezclas. Para drenajes cortos, pueden utilizarse tubos de PVC.

Perforaciones en roca

Todas las perforaciones deben realizarse con los equipos descritos en los incisos 6.2.2 y 6.3.10, de esta especificación, y deben ejecutarse sin interrupción en toda su longitud, incluyendo la reperfusión del tramo empleado en los casos en que previamente se hubiera inyectado el contacto concreto-roca, o detectado alguna falla de importancia y que se haya tenido que inyectar.

Si durante el proceso de perforación se presentan pérdidas de agua o se detecta alguna fractura o falla de importancia, se debe suspender temporalmente la perforación para proceder a sellar el barreno; éste se debe inyectar con el obturador colocado a 1 m por arriba del punto donde se presente la fuga de agua, hasta alcanzar la presión máxima especificada. Terminada la inyección, se debe remover el obturador y lavar todo el barreno de acuerdo a lo especificado en el inciso 6.4.8, o reperfusión el tramo para continuar la perforación del barreno hasta su profundidad total de proyecto.

Se requieren perforaciones para el anclaje y para las inyecciones de consolidación e impermeabilización como se describe enseguida:

Perforaciones para el anclaje

El diámetro de los barrenos debe estar en función del diámetro del perno de anclaje y del cementante que se utilice para rellenar el espacio entre el perno de anclaje y el barreno. De manera ilustrativa y como ejemplo, a continuación se muestran las combinaciones de diámetros que pueden tenerse para pernos de 25,4 (1") y 38,1 (1½") mm de diámetro:

Perno de 25,4 mm - cartucho de resina de 34,9 mm (1318") - barreno de 41,3 mm

Perno de 38,1 mm - cartucho de resina de 38,1 mm (1W) - barreno de 50,8 mm

Perno de 25,4 mm - Con mortero de cemento fabricado en sitio - barreno de 57,2 mm
Perno de 38,1 mm - Con mortero de cemento fabricado en sitio -- barreno de 76,2 mm

En el caso de los cartuchos de resina, la combinación de diámetros está definida en las especificaciones del fabricante del producto, que se tendrán que consultar para su aplicación. Lo anterior se define para cada caso en los planos de proyecto, así como también, la longitud de los barrenos para la colocación del anclaje.

Perforaciones para los tratamientos de consolidación e Impermeabilización

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

Los barrenos se deben perforar con el equipo indicado en los incisos 6.2.2 y 6.3.10, hasta su longitud de proyecto, respetando el proceso de perforación que se ejecutará por etapas y fases, según como se indica en el proyecto.

Las longitudes de cada barreno se indican en el proyecto, dichas longitudes pueden variar; para el caso de la pantalla profunda son de hasta 50 m de profundidad, sin embargo, pueden ser de 80 m en aquellas zonas donde la exploración profunda lo indique o para tratar alguna zona en particular de falla; para el caso de las inyecciones de consolidación la longitud puede ser del orden de 20 m.

Perforaciones en concreto

En el caso de perforar en concreto hidráulico endurecido o en concreto plástico, para ejecutar barrenos adicionales de drenaje o de contacto, se debe proceder conforme a lo siguiente:

Perforaciones en concreto hidráulico endurecido

Los barrenos se deben perforar con el equipo y la herramienta, hasta su longitud de diseño en una sola operación; es decir, en forma continua. Debe tenerse presente que eventualmente los barrenos intersectan acero de refuerzo, estructuras metálicas que sirvieron de apoyo a las cimbras, guías para la inyección de los contactos y la consolidación; en tales casos debe cambiarse de posición el barreno respetando los otros dos datos para el trazo del barreno (ángulo vertical y dirección) quedando ubicado dentro de un radio no mayor a 50 cm, o continuar con el mismo barreno adecuando la broca para demoler el

obstáculo de acero; esto último es a elección del Contratista y debe considerarlo en sus procedimientos constructivos para efecto de integrarlos en su oferta.

Perforaciones en concreto plástico o autofraguante

Esta perforación es específica para reforzar con inyección secciones detectadas con alta permeabilidad en los contactos del muro de pantalla con la roca basal. Los barrenos se deben perforar con el equipo indicado en los incisos 6.2.2 y 6.3.10, en forma continua hasta su longitud de diseño, respetando las etapas y ases que se indican en el proyecto. Debe tenerse presente la resistencia a la compresión simple del concreto y el espesor del muro para la elección y el manejo del equipo de perforación, y así garantizar la verticalidad del barreno para que no se desvíen demasiado y quede fuera del muro plástico.

Para las inyecciones en el muro pantalla, en el caso de no tener tubos guía la perforación debe ser considerada hasta llegar a la roca basal en donde se inicia con la perforación en roca; cuando se tengan tubos guías, lo anterior no se requiere.

Como el volumen de perforación en este tipo de concretos generalmente es mínimo, el Contratista, con base en su experiencia, debe estimar la cantidad de este tipo de perforación y en consecuencia incluirlos en el concepto de trabajo donde se aplique esta actividad.

Perforaciones en placas de acero

Con la finalidad de rellenar las oquedades dejadas entre la placa de acero de las estructuras y el concreto hidráulico, es necesario perforar la placa de acero con barrenos de diámetro pequeño e inyectar mezclas diseñadas exprofeso.

Las perforaciones se, deben realizar con taladros electromagnéticos, hasta pasar al espesor de la placa y profundizar la broca por lo menos 3 cm. Lo anterior es con el objeto de que se fabrique adecuadamente la cuerda en la perforación y se puedan colocar las boquillas.

La ubicación de los barrenos debe estar en las zonas que no fueron rellenadas totalmente, las cuales se localizan mediante el mapeo (detección con martillo).

Lavado del barreno

Esta actividad se debe realizar previa al equipamiento del barreno, para la inyección de la mezcla, o para la instalación de pernos de anclaje o cuando se requiera la reinyección de un tramo por alto consumo de mezcla. Consiste en la limpieza del barreno utilizando agua y aire a presión mediante la introducción de un chiflón o tubo cuyas boquillas o perforaciones estén orientadas en dirección perpendicular al eje del barreno; para el caso de lavado de barrenos que deberán ser reinyectados, la dirección del chiflón o tubo de agua se aplicará paralela al eje del barreno. La presión que se aplique debe ser tal que permita la salida del material producto de la perforación, de la inyección, de caldos de roca y de cualquier material que se encuentre rellenando las grietas hasta que el agua retorne limpia a la superficie y el barreno esté libre de obstrucciones en toda su longitud. Esta actividad es independiente del sopleteo o lavado que se haga durante el proceso de barrenación.

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

Colocación de los cartuchos de resina epóxica

El procedimiento de la colocación de los cartuchos de resina epóxica está relacionado a los diámetros del barreno, del perno de anclaje y del cartucho de resina (indicado en las especificaciones del fabricante del producto); por lo general, se deben introducir en juegos de 2 a 3 cartuchos intercalados con soportes de plástico para evitar que se salgan del barreno en perforaciones ascendentes. Es preferible utilizar un dispositivo neumático para lanzar los cartuchos al interior del barreno y evitar el uso de faeneros que puedan desgarrarlos.

En cada barreno se deben colocar dos tipos de resina:

- Resina 1. Fraguado rápido de 1 a 2 minutos
- Resina 2: Fraguado normal de 15 a 20 minutos

La resina de fraguado rápido se debe utilizar para cementar los primeros 100 cm del fondo del ancla, mientras que en el resto debe utilizarse la resina de fraguado normal.

INSTALACIÓN DE BARRAS DE ACERO DE ANCLAJE

Instalación de barras de acero con cartuchos de resina

Previo a la instalación del perno se deben colocar los cartuchos de resina. La barra de acero se debe introducir por el extremo biselado como punta para romper los cartuchos de resina; por el otro extremo, mediante un conector a la rosca se debe girar el perno durante 20 segundos en caso de usar máquina rotatoria ó de 40 a 60 revoluciones si se utiliza equipo de rotopercusión. Finalmente, debe instalarse la placa metálica, la cual se apoya contra la roca mediante la tuerca en el extremo libre a la que se debe aplicar un torque que transmita al perno una tensión del 30% de la capacidad nominal del perno. Debe tenerse cuidado de que los alambrones soldados a la placa no se dañen, debido a que están diseñados para ligar el anclaje con la malla de refuerzo y formar en conjunto con el concreto lanzado el soporte definitivo.

Instalación de barras de acero con mortero inyectado a presión

La barra de acero se debe introducir equipada con dos mangueras, la de inyección y la de testigo. En la boca del barreno se detiene el perno con una cuña de madera y se calafatea con papel y mortero seco con yeso, cuidando de no dañar las mangueras ni la rosca. Después de la inyección y transcurridas 72 horas, se debe instalar la placa metálica, la cual se apoya contra la roca mediante la tuerca en el extremo libre. Debe tenerse cuidado que los alambrones soldados a la placa no se dañen ya que están diseñados para ligar el anclaje con la malla de refuerzo y formar en conjunto con el concreto lanzado el soporte definitivo,

El volumen inyectado en un ancla, debe ser por lo menos igual al volumen teórico (diferencia entre el volumen del barreno y el volumen de la barra de acero) para una longitud y diámetro de barreno. Debe suspenderse la inyección, cuando para la presión de inyección especificada el volumen de mortero de inyección sea nulo.

Pruebas previas de instalación y control de calidad del anclaje

a) Pruebas previas de campo

El Contratista debe elegir, previa aprobación de la Comisión, un sitio cercano a las zonas de instalación de anclaje, que sea representativa del terreno, para realizar una serie de pruebas que permitan verificar la eficiencia de los distintos tipos de anclaje indicados en el proyecto. Estas pruebas deben ejecutarse con base en lo estipulado en la norma ASTM D4435. Lo anterior, tiene el propósito de asegurar que el comportamiento del anclaje cumpla con lo indicado en su diseño.

b) Pruebas sistemáticas de campo ó de control de calidad

El Contratista debe realizar un muestreo aleatorio y selectivo de los componentes empleados en los procesos de producción y/o construcción con pruebas de laboratorio, bajo los siguientes lineamientos:

- Obtener muestras del mortero o de resinas epóxicas por cada 15 anclas colocadas e inyectadas, a las cuales se les deberá determinar las propiedades físicas y verificar que cumplan con lo señalado en el inciso 6.4.14.2 y de resistencia mecánica; los resultados deben cumplir con los requerimientos del proyecto.
- + Por cada 70 anclas colocadas, se debe realizar una prueba de extracción, según la norma ASTM D4435, seleccionándose éstas de manera aleatoria o en sitios donde se tengan dudas sobre el procedimiento aplicado para su instalación. El Contratista debe disponer del equipo necesario y adecuado para realizar estas pruebas.

Pruebas de agua a presión

Se debe realizar en los sitios seleccionados por la Comisión, ya sea para conocer la permeabilidad inicial de la masa de roca o bien para verificar la eficacia del tratamiento en la misma. Las presiones efectivas que deberán aplicarse para cada tramo de prueba son:

MPa Ascendentes: 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 y
1,0
MPa Descendentes: 0,9 - 0,7 - 0,5 y 0,3

Saturación previa del terreno

La saturación del terreno se debe realizar a través del barreno por inyectar en tramos de 20 m, inyectando agua a una presión de 1,0 MPa (10 kg/cm²) durante 30 minutos, o un volumen máximo de 200 litros por metro de barreno. La saturación se iniciará por el tramo más profundo en forma ascendente a partir del nivel de aguas freáticas (NAF). La longitud de los tramos está definida según sean barrenos para inyección de pantalla profunda o para consolidación.

Para aquellos tramos que alcanzan la presión de 1 MPa (10 kg/cm²), se debe seguir un criterio basado en el de gasto constante, que consiste en aplicar la presión de 10 kg/cm², medir el gasto cada 3 minutos; cuando el gasto se estabilice, se continuará la inyección de agua por espacio de otros 5 minutos más, hasta llegar a los 30 minutos. En este punto se da por saturado el tramo.

La inyección de agua debe hacerse con el obturador puesto como límite superior de cada tramo por saturar.

El agua empleada para la saturación del terreno debe ser limpia, la saturación debe realizarse previamente al proceso de inyección para el tratamiento de discontinuidades geológicas, para la construcción de pantallas o para la construcción del tapete de impermeabilización. Inmediatamente después de saturado un tramo de un barreno debe procederse a inyectarlo con mezcla, de acuerdo con lo indicado, teniendo un tiempo máximo para realizar esta operación de 24 horas. De no cumplirse esta condición, será necesario saturar nuevamente el terreno.

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

Preparación de la Mezcla de inyección

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

La fabricación de la mezcla debe efectuarse con turbomezcladores de altas revoluciones (mayores a 1250 rpm) colocando los materiales componentes, con base en la dosificación de proyecto, en el orden siguiente: agua, aditivo estabilizador de volumen, cemento, arena (en el caso del mortero) y por último el aditivo fluidizante. Una vez que haya

sido adicionado el último componente de la mezcla, ésta debe mantenerse en agitación dentro del turbomezclador de 1 a 3 minutos, dependiendo de los resultados de pruebas preliminares; después de esto, se envía a los agitadores de bajas revoluciones (60 rpm, como mínimo) de las estaciones de inyección, en las cuales debe mantenerse en agitación mientras dure el proceso de inyectado o durante la vida útil de la mezcla.

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

La lechada para inyección es una mezcla única para todas las actividades de impermeabilización y consolidación de la roca y debe cumplir con las siguientes especificaciones de proporcionamiento o dosificación:

La relación agua/cemento (A/C) con relación al peso del cemento será variable de (0,8 a 1,0)11, dependiendo de los ensayos de laboratorio, adicionando el porcentaje de aditivo superfluidizante y estabilizador de volumen con relación al peso del cemento, necesarios para que la mezcla cumpla con las siguientes propiedades especificadas.

Características de las mezclas de Inyección

Mezclas para las inyecciones de consolidación y de impermeabilización

- Viscosidad al cono Marsh entre 29 y 33 segundos, constante durante una hora.
- Densidad o peso volumétrico mayor o igual a **1,55** glcm³
- Decantación (sedimentación) menor o igual a 3% en dos horas.
- Cohesión (con placa) menor o igual a 0,03 glcm².
- Coeficiente de filtrado menor o igual a 0,6.
- Cake obtenido de la prueba de filtrado menor o igual a 15 mm.
- Resistencia a la compresión simple a la edad de 28 días mayor o igual a 10 MPa.

Se debe adicionar a la mezcla un acelerante de fraguado (silicato de sodio a 40° Be) cuando así se requiera. Cada una de las propiedades físicas especificadas deberá verificarse bajo los siguientes métodos de ensaye:

- Viscosidad Marsh. Se define como el tiempo en segundos que tarda en escurrir un litro o 946 ml de mezcla, de un embudo de dimensiones estándar (denominado como Marsh), de un total de 1.5 litros de mezcla.
- Densidad o peso volumétrico. Se obtiene mediante la balanza de lodos y consiste en llenar con mezcla la copa de la balanza, golpeándola ligeramente para eliminar burbujas de aire, se tapa dándole un ligero movimiento de rotación. Se coloca la balanza sobre su base y se equilibra, obteniéndose directamente el valor en la escala correspondiente.
- Decantación o sedimentación. Consiste en vaciar 200 ml de mezcla en una probeta de vidrio de 250 ml, colocándola en una superficie lisa y nivelada, anotando las lecturas del nivel de sólidos a cada 15 minutos durante la primera hora y media, y después a cada 30 minutos, hasta obtener por lo menos dos lecturas iguales.
- Cohesión. Se obtiene por medio de una placa de acero inoxidable de 100 x 100 mm y un espesor del alrededor de 1,5 mm, debe ser lo suficientemente rugosa, por lo cual se deberá rayar en ambas caras. El ensaye consiste en pesar la placa en una balanza de precisión, sumergir la placa en la mezcla dejándola escurrir libremente y pesar nuevamente, la diferencia obtenida se divide entre el área de ambas caras de la placa, y se obtiene la cohesión en glcm^2
- Coeficiente de filtrado. Se obtiene mediante el aparato denominado filtro-prensa y consiste en determinar la cantidad de líquido que se extrae de un volumen determinado de mezcla a presiones de 0 ; 0,4 y 0,7 MPa, durante 30 minutos o en el momento que empieza a salir aire exclusivamente, obteniéndose el volumen de agua filtrada, espesor del "cake" (sólidos retenidos), así como dureza, textura, flexibilidad etc.
- Resistencia a la compresión simple. Es el esfuerzo máximo que se aplica a una muestra cilíndrica con relación de esbeltez (HID) de 2,5 a 3,0 ó cúbica, aplicando una carga de 200 kg/min, hasta llegar a la falla. Las probetas deben ensayarse a 7; 14 y 28 días. Previo al ensaye se debe verificar que las caras estén completamente paralelas, en caso de existir alguna desviación pulir las superficies en un vidrio, utilizando polvos abrasivos.

Mezclas para la inyección de anclas

Cemento: El cemento a utilizar debe ser del tipo CPC30R (Cemento Pórtland Compuesto clase resistente 30R), el cual deberá cumplir con la Norma NMX-C-414.

Agua: Podrá emplearse agua del río Santiago, siempre que cumpla con los requisitos de calidad establecidos para la fabricación del mortero.

Arena: La arena debe tener un módulo de finura de $2,8\% \pm 0,5$, debe pasar la malla No. 16 (1,19 mm); la pérdida por lavado determinada según ASTM C 117 no debe exceder del 5% y debe apegarse a las especificaciones señaladas en dosificación para concreto y tener una humedad comprendida entre el 4 y el 8%.

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

Los valores de los parámetros físicos que deberán ser observados en campo, son los siguientes:

Fluidez cono Prapack 7-8 segundos
Densidad 1.86 a 1.88 g/cm²
Decantación 0.5%
Resistencia a la compresión simple ≥ 18 MPa (a los 28 días de edad)

Para efecto de medir los parámetros físicos de las mezclas se requiere contar con la balanza de lodos y él como prepack, además de otros utensilios auxiliares.

El método de ensaye para la densidad, decantación y resistencia a la compresión simple es similar a lo descrito anteriormente en este mismo inciso, para la fluidez se describe a continuación:

Fluidez en cono prepack se define como el tiempo en segundos que tarda en escurrir un litro de mezcla, de un total de 1.725 litros, en un embudo de dimensiones estándar.

La resistencia del mortero o resina debe ser de $f_c \geq 19.6$ MPa (como mínimo) a los 28 días de edad, que cumpla con lo que se especifica en los dos incisos siguientes.

Mezclas de inyección para rellenos en contacto concreto-roca y concreto-placa

Para efectos de inyecciones de relleno de contactos concreto-roca y concreto-placa se debe utilizar, además de la lechada única, el mortero de cemento especificado.

Mezcla para inyecciones en el muro pantalla

La mezcla de inyección es única a base de agua-cemento-aditivo superfluidizante y estabilizador de volumen, la cual debe tener una resistencia a la compresión simple, a la edad de 28 días, de $f_c \geq 10$ MPa. Tentativamente se propone la siguiente dosificación:

Relación agua/cemento de 0.8 a 1.0
Aditivo estabilizador de volumen de 1% a 3% (opcional)
Aditivo superfluidizante de 0.5 a 1%

El aditivo estabilizador de volumen (bentonita) puede ser eliminado con los resultados de las mezclas en el sitio, empleando el cemento tipo CPP-IP.

La dosificación definitiva de las mezclas a debe determinar el Contratista después de realizar los ensayos a los materiales del lugar, cumpliendo con las especificaciones de proyecto.

Puede ser necesario el uso de mezclas de fraguado rápido por lo que la utilización de silicato de sodio se hace necesaria. El Contratista bajo su responsabilidad, debe contemplar dicha eventualidad y tener en existencia en su almacén de obra un volumen de 1000 litros de este producto, cuya densidad debe ser de 40° Baumé. Debe considerarse que la dosificación de las mezclas puede cambiar para cementos de diferentes marcas.

| Material | Proporción en peso |
|----------------|--------------------|
| Arena fina | 26 kg |
| Agua | 27 L |
| Cemento normal | 50 kg |

En cualquier caso, estos proporcionamientos deben ser ajustados en la obra por el laboratorio de mezclas del Contratista, con el propósito de que se mantengan las propiedades de fluidez, estabilidad, densidad aparente y resistencia de las mezclas.

Inyecciones para el anclaje

Para la inyección de las anclas se recomienda utilizar una bomba manual hidroneumática como se especifica en el inciso 6.2.6, especial para la inyección de morteros en barrenos para anclaje, ya que permiten tener un control adecuado de la presión y el gasto durante la inyección.

La inyección debe ejecutarse en una sola progresión y en forma continua desde el inicio hasta el llenado total del barreno, utilizando para tal efecto la manguera corta de inyección. La inyección de un barreno se da por terminada cuando se observe la salida del mortero por la manguera testigo (en ese momento en que ésta debe sellarse), y cuando la inyección del mortero alcance una presión de 0,5 kg/cm² y el gasto de la mezcla registrado sea nulo.

Esta actividad incluye los materiales para el mortero de inyección y los desperdicios que el Contratista, con base en su experiencia, considere necesarios para su total ejecución.

Inyecciones en roca

El análisis y evaluación de la exploración geotécnica realizada por la Comisión ce anos al eje del plinto y zona de ataguías indican la presencia de sistemas de fracturamiento, fallas, dique y contactos geológicos en la masa de roca.

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

Los barrenos de exploración y de investigación, se deben realizar para la parte inferior a media a cada 24 m de separación horizontal entre barreno y barreno y hasta una profundidad de 70 m, para la parte media a superior se realizarán a cada 36 m de separación horizontal y hasta una profundidad de 60 m, a partir de la rasante y siguiendo el desarrollo del plinto de la cortina. Los barrenos de exploración hacia el interior de las laderas, se deben ejecutar desde la superficie y desde las galerías de inyección y drenaje.

El tratamiento de la roca se realizará mediante la inyección del barreno en tramos de 5 m en progresión ascendente, empleando el método GIN (Grouting Intensity Number) que consiste introducir la mezcla dentro del barreno con presiones ascendentes, p. e. en incrementos de 0,5 MPa, solo limitado por la capacidad de la fabricación de las mezclas o del mismo equipo. En todo momento se debe graficar la evolución de la presión (MPa) y el volumen de mezcla por metro (l/m) hasta interceptar la curva o trayectoria GIN, y decrecer la presión de la aplicación de la mezcla hasta que el gasto sea menor de 5 l/min/tramo inyectado, es decir 1 l/min/m, para tramos de 5 m de longitud.

El tiempo entre lecturas podrá reducirse de 5 minutos a 2 minutos cuando el gasto sea menor de 5 l/min/tramo inyectado (1 l/min/m).

Lo anterior aplica para el tratamiento de discontinuidades geológicas, pantalla impermeable y tapete de impermeabilización, con una intensidad de inyección moderada y presiones máximas que se muestran en la tabla 6.1.

Zonas y presiones de Inyección aplicables para la pantalla y tapete de consolidación.

| Zona | Localización con Relación a las elevaciones del terreno en el eje del plinto | GIN Mpa. L/m | Presión Máx. Mpa | Volumen Máximo de Mezcla L/m |
|-------|--|--------------|------------------|------------------------------|
| Alta | Elevación 580 a 495 | 200 | 1.5 | 200 |
| Media | Elevación 495 a 410 | 200 | 2.5 | 200 |
| Baja | Cauce Elevación 410 a 325 | 200 | 4 | 200 |

La constante que determina la curva o trayectoria de la envolvente GIN mencionada en la tabla anterior (valor asignado de acuerdo a las características geológicas generales), podrá modificarse según los resultados que se obtengan de pruebas de inyectabilidad en los primeros barrenos de exploración que ejecute el Contratista en cada galería o sitio que por sus condiciones geológicas así lo ameriten. Los resultados de estas pruebas deberán someterse a la aceptación del personal de supervisión de CFE. Para casos particulares de zonas de fallas importantes con presencia de materiales arcillosos, se propone emplear un valor de la constante GIN entre 80 y 120 Mpa –L/m, sin embargo estos valores deberán definirse finalmente con pruebas.

El plano de estanqueidad en el plinto se debe prolongar si el resultado de los consumo de la mezcla de cemento que se registren en cada tramo probado e inyectado son mayores o iguales a los indicados en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Valores de consumos de mezcla de cemento que requerirán prolongar tratamiento o definir barrenos de etapas adicionales Nota: Solo se realizarán barrenos adicionales cuando la separación entre barrenos de etapas anteriores sea mayor a 3 m de longitud.

| Elevación | | Consumo de mezcla kg/m | metros por probar e inyectar | Toma de decisión |
|-----------|-----|------------------------|------------------------------|---|
| De | A | | | |
| 580 | 495 | ≥ 50 | 260 | Se debe prolongar la pantalla hasta 5 m por debajo del tramo que tuvo el consumo mayor a los límites establecidos, pero solo hasta el límite de pantalla de proyecto. Bajo ninguna condición deberá de profundizarse por debajo de este límite. |
| 495 | 410 | ≥ 40 | 280 | |
| 410 | 325 | ≥ 30 | 320 | |

Inyecciones en la roca para consolidación y/o Impermeabilización

En general, las inyecciones deben ejecutarse por progresiones ascendentes en sub-tramos cuya longitud se indica en el proyecto, nunca mayores de 5 m, salvo en los casos en que las condiciones de la roca obliguen a ejecutarlas en otra forma, tal es el caso de presencia de fallas o fracturas francamente abiertas; en esta situación, se debe realizar el tratamiento como se especifica en el inciso 6.4.5. Una vez iniciada la inyección no debe detenerse por ninguna causa, siendo un proceso continuo de principio a fin; pero si esto llega a ocurrir, se debe proceder de la manera siguiente: limpiar con agua a presión utilizando el procedimiento de lavado del barreno como se especifica en el inciso 6.4.8 y reiniciar la inyección de tramo.

La mezcla que se debe utilizar es la que se especifica, y la secuencia de ejecución por etapas y fases como se indica en el proyecto.

Con el fin de obtener un mayor confinamiento durante el proceso de inyección, el orden de ejecución de la inyección debe ser:

1. Línea o líneas de tapete de impermeabilización y/o consolidación localizada aguas abajo del plinto
2. Línea o líneas de tapete de impermeabilización y/o consolidación localizada aguas arriba del plinto
3. Línea central de pantalla de impermeabilización

Inyecciones en la roca para pantallas de impermeabilización

Las inyecciones deben ejecutarse por progresiones ascendentes, iniciando a partir del tramo más profundo y continuar ascendiendo en sub-tramos cuya longitud se indica en el proyecto, nunca mayores de 5 m, salvo en los casos en que las condiciones de la roca obliguen a ejecutarlas de otra forma, tal es el caso de presencia de fallas o fracturas francamente abiertas; en este caso, se debe tratar como. Una vez iniciada la inyección no debe detenerse por ninguna causa, siendo un proceso continuo de principio a fin; sin

embargo, si esto llega a ocurrir, se debe bombear 200 litros de agua para limpiar el carril, utilizando el procedimiento de lavado del barreno, y reiniciar la inyección del tramo.

Reinyección de barrenos por alto consumo (volumen máximo)

En casos de alto consumo durante la inyección de un barreno y sin tener evidencia de hidrofracturamiento o destaponamiento del terreno, se aplicará un volumen de 1 m³ de mezcla suspenderá la inyección por un lapso de 6 horas para lavar el tramo inyectado y carril del barreno; después del tiempo señalado, volver a inyectarlo como un nuevo tramo o progresión. De ocurrir lo mismo en la 2a reinyección del tramo, se reanuda la inyección bajo el mismo criterio, solo permitiéndose una última 3ra reinyección; en esta última es indispensable la adición de acelerantes para el fraguado de la mezcla con silicato de sodio cuya densidad debe ser de 40° Baumé o morteros con resistencia a la compresión simple compatible con la mezcla, es decir, solo se aplicará hasta 3 m³ de mezcla en total.

La dosificación definitiva de las mezclas o morteros la debe determinar el Contratista después de realizar los ensayos a los materiales del lugar, cumpliendo con las especificaciones de proyecto.

La inyección se reanuda en el siguiente tramo superior, con la posibilidad de continuar con alto consumo; en este caso, se iniciará la 2a reinyección con la aplicación de mezclas con acelerantes o morteros.

Solo en el caso específico que ocurra hidrofracturamiento o destaponamiento sistemático del terreno en tres ocasiones en un barreno con separación de 3,0 m, será necesario realizar dos barrenos adicionales, uno a cada lado del barreno anterior, quedando los barrenos a 1,50 m.

Para evaluar el comportamiento del terreno, desde el inicio hasta el final de cada una de las progresiones o tramos de inyectado de cada barreno, se debe llevar un registro continuo de la evolución utilizando los siguientes parámetros: presión de inyección medida en el brocal del barreno en MPa, volumen total inyectado de lechada (consumo) en litros y el tiempo en minutos. Con estos parámetros deben elaborarse las siguientes 3 gráficas de control de inyección:

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

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

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

La gráfica para el control de la inyección debe contener la curva PRESION x VOLUMEN = CONSTANTE, cuyo valor debe estar definido por el proyectista.

La presión de inyección medida en el brocal del barreno debe aplicarse en incrementos de 0,5 MPa, cada 3 a 5 minutos hasta alcanzar la presión máxima. Si durante estos incrementos se presenta un aumento notable en el consumo de mezcla, que indique el

hidrofracturamiento de la roca, se debe disminuir gradualmente la presión hasta sellar el tramo, lo cual ocurre cuando el gasto de mezcla sea prácticamente nulo.

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

El comportamiento de la inyección debe seguirse a través de la gráfica $PV = \text{Constante}$, medido en $\text{MPa} \cdot \text{L/m}$, de acuerdo con el método de inyección GIN, utilizando un equipo automático de registro de presión y gasto, y de preferencia elaborar las gráficas mediante equipo de cómputo.

La inyección de cada progresión se dará por concluida cuando se alcance cualquiera de las tres condiciones mencionadas a continuación y que a su vez se ejecuten las actividades que se indican enseguida:

- Volumen máximo
- Presión máxima.
- Intersección con la curva $P \times V$

Volumen máximo:

- a) Al llegar al volumen máximo se suspende la inyección y se bombean 200 litros de agua para lavar el carril.
- b) Pasadas seis horas de haberse suspendido la inyección se reinicia como un tramo nuevo.
- c) Las operaciones de los puntos a y b deben repetirse dos veces como máximo.
- d) Si después de lo anterior continúa el alto consumo sin levantar presión, se ejecutarán barrenos adicionales.

Presión máxima:

- a) Cuando se llega a la presión máxima, ésta se debe mantener constante durante cinco minutos y se mide el gasto.
- b) Si el gasto medido es menor a 5 litros/min/tramo, la inyección se da por concluida.
- c) Si el gasto medido es mayor a 5 litros/min/tramo, bajar la presión 0,5 MPa, mantenerla durante 5 minutos y medir el gasto.
- d) Si el gasto medido es menor a 5 litros/min/tramo, la inyección se da por terminada.
- e) Si el gasto medido es mayor a 5 litros/min/tramo, subir la presión 0,5 MPa, mantenerla durante cinco minutos y se mide el gasto.
- f) Si el gasto medido es menor a 5 litros/min/tramo, la inyección se da por terminada.
- g) Si el gasto medido es mayor a 5 litros/min/tramo, se repiten los pasos c, d, e y f, dos veces como máximo.

Intersección con la curva $P \times V$:

- a) Cuando la inyección levanta presión y en su trayectoria interseca la curva $P \times V$, se continuará la inyección durante cinco minutos a la presión de intersección y se medirá el gasto.

-
-
- b) Si el gasto medido es mayor a 5 litros/min/tramo, se disminuirá la presión hasta intersectar la curva, manteniéndola durante cinco minutos y se medirá el gasto.
- c) Si el gasto es mayor a 5 litros/min/tramo, se disminuye la presión hasta intersectar nuevamente la curva, y así sucesivamente hasta cumplir con el gasto menor a 5 litros/min/tramo, o hasta al consumo máximo.

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

El Contratista está obligado a tener actualizados los planos de avance y de consumo de mezcla durante todo el proceso de inyección.

Actividades de control durante los tratamientos de inyección (procesos de producción)

Se debe mantener una estrecha vigilancia de los procesos de producción y/o construcción establecidos por el diseño, verificando la orientación e inclinación de los barrenos tal como lo indique el proyecto y supervisando los consumos, gastos, presión, tiempo de aplicación de las mezclas que toma el terreno, y el apego al método GIN; asegurando un adecuado retaque final de barrenos. Se debe establecer un muestreo aleatorio y selectivo de los componentes empleados en los procesos de producción y/o construcción con pruebas de laboratorio, bajo el siguiente esquema:

- Obtener muestras de lechada por cada 5 barrenos inyectados. Estas muestras preferentemente en la válvula de purga ubicada en el brocal del barreno, y se les debe índice y de resistencia mecánica bajo el método indicado, cuyos resultados los requerimientos del proyecto.

Verificación después de terminar los tratamientos de inyección

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

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

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

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

Los barrenos de exploración para verificar el tratamiento de la roca se realizarán después de concluidas las operaciones de inyectado, y tendrán un espaciamiento no mayor a 48 m en longitud horizontal. Con los resultados que se obtengan, se evaluará y asegurará el tratamiento de la roca verificando la efectividad del plano de estanqueidad. Los valores permisibles para aceptar un tramo sellado se indican en la tabla 6.3.

| Elevación | Consumo de mezcla kg/m |
|-----------|------------------------|
| 580 a 495 | ≥ 50 |
| 495 a 410 | ≥ 40 |
| 41 a 325 | ≥ 30 |

Consumo máximo de mezcla para aceptación de tramos tratados.

Inyecciones de contacto

Inyecciones de contacto entre la pantalla flexible o muro pantalla y el terreno

Para garantizar el correcto contacto entre el muro pantalla y la roca basal, por lo menos 50 cm, la inyección de contacto muro pantalla-roca basal se debe realizar colocando el obturador en el tubo guía 20 cm por arriba del contacto e inyectar un volumen máximo o el volumen que se alcance a inyectar a una presión efectiva máxima establecida de la mezcla especificada.

Inyecciones de contacto concreto-roca

Estas inyecciones se deben ejecutar para asegurar el contacto del concreto a la roca y con ello garantizar un apoyo uniforme y/o rellenar vías permeables. Estas inyecciones se realizan equipando los tubos guía, dejados previamente a los colados como se especifica en el inciso 6.4.3, e introducir el volumen necesario de lechadas y de morteros hasta lograr el llenado completo de la oquedad, vigilando que la presión máxima de inyección no sobrepase la presión que se especifica para cada caso, según el proyecto. Tanto para este caso como para los muros pantalla con mezcla autofraguante, esta actividad debe realizarse en forma sistemática

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

- La inyección de contacto concreto-roca debe ejecutarse posterior a la consolidación
- Los barrenos serán de 2 Y4", penetrando 0,20 m después del contacto concreto-roca.
- El contacto concreto-roca se inyectará en una sola progresión, obturando 0,20 m antes del contacto concreto-roca.
- El avance de la inyección será de los barrenos inferiores a los superiores, manteniendo

abiertos los barrenos y emboquillados con válvula o manguera flexible, los de la sección y secciones anterior y posterior.

- El tratamiento de contacto concreto-roca se debe ejecutar en todo el desarrollo blindado de las tuberías a presión.
- Con respecto a las tuberías a presión, la presión de inyección de la mezcla debe ser de 0,3 MPa (3,0 Kglcm²)
- Con respecto a las tuberías a presión, después de realizar la inyección de contacto concreto-roca, se debe retacar con mortero seco la longitud del barreno, dejando espacio para colocar y soldar el tapón metálico.

Inyecciones de contacto concreto-roca en la losa del plinto

El procedimiento que debe seguirse para ejecutar esta actividad es el siguiente:

- El contacto concreto-roca se ejecutara a través de los mismos barrenos de tapete y pantalla de impermeabilización y otros que deberán perforarse en la línea central, de tal manera que la separación final entre barrenos sea de 3 m.
- Los barrenos serán de 2"W, penetrando 0,20 m después del contacto concreto-roca.
- Se inyectará en una sola progresión, obturando 0,20 m antes del contacto concreto-roca
- El avance de la inyección será línea aguas abajo, línea aguas arriba y finalmente la línea central.
- La presión de inyección debe ser de 0,2 MPa durante cinco minutos y1o un volumen máximo de 0,2 m' de mezcla.

Inyecciones de contacto concreto-placa

El proceso de inyección consiste en el equipamiento de la zona a rellenar, instalando boquillas en todos los barrenos cuya longitud se debe seleccionar dependiendo de la ubicación de la zona a tratar. Es requisito indispensable que todos los barrenos estén emboquillados antes de iniciar la inyección y que todas las boquillas tengan instaladas sus válvulas de esfera o bola. La inyección de la mezcla debe realizarse utilizando bombas manuales de émbolo corno se especifica en el inciso 6.2.6, ya que permiten controlar muy eficazmente todo el volumen inyectado así como la presión de inyección, ambos relativamente pequeños. La inyección se da por terminada cuando se hayan inyectado todos los barrenos. Para evitar que la lechada inyectada presión de proyecto se pierda al llenar la oquedad, las válvulas de las boquillas deben permanecer cerradas hasta que la mezcla haya fraguado.

El procedimiento para este tipo de inyección es el siguiente:

- Después de colocar los taponeros metálicos en la tubería a presión, se procederá a detectar las oquedades entre el concreto y el blindaje, apoyándose de un martillo metálico.
- Una vez marcadas estas zonas, se efectuarán de 2 a 5 perforaciones de $\frac{1}{8}$ " a $\frac{1}{4}$ " de diámetro hasta el contacto con el concreto y dependerá del sitio (piso, paredes y bóveda). Las perforaciones en el blindaje, deben ser machueladas para adaptar el dispositivo de inyección.
- El avance de la inyección será de los barrenos inferiores a los superiores.
- Para inyectar un barreno, deben estar perforados por lo menos 4 contiguos, para área de influencia mayor o igual a $2\ 500\text{ cm}^2$.
- La obturación de los barrenos se hará con taponeros de acero, quedando remetido el tapón 118" de la cara exterior del blindaje, para recibir posteriormente soldadura de 118" de espesor.
- Después de 72 horas de efectuada la inyección, se procederá a revisar nuevamente las posibles oquedades y en su caso programar una reinyección, utilizando mezclas más fluidas o resinas de dos componentes cuya fluidez sea muy similar a la del agua.
- La presión de inyección de la mezcla será de 0,05 MPa ($0,5\text{ kg/cm}^2$).

Inyección de barrenos comunicados

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

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

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

Calafateo de grietas

El calafateo es un taponamiento superficial y provisional que consiste en la limpieza de la grieta con herramientas manuales y/o mecánicas, en retirar todo el material suelto con agua y aire a presión y taponar con cuñas de madera y con morteros de yeso y de cemento toda la grieta hasta una profundidad depende del tipo de la grieta, del tipo de terreno y de la presión a que estará sujeto dicho tapón.

Lavado de mezclas en el barreno

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

Consiste en la limpieza del barreno en un tramo que previamente fue inyectado. La limpieza se debe ejecutar previamente al fraguado de la mezcla de cemento, utilizando un chiflón que lance agua a una presión suficiente para disolver la mezcla y extraer la mezcla disuelta a la superficie.

Retaque final de barrenos

Después de 24 horas de haberse terminado la inyección de un barreno, se debe proceder a sopletear el tramo con aire a presión; posteriormente, se debe rellenar con mortero de cemento como el especificado en el inciso 6.4.14.2; finalmente, lo que llegara a decantarse en barrenos hacia abajo o los barrenos hacia arriba en donde es difícil el retaque, se debe rellenar con un mortero de cemento seco, utilizando la misma relación cemento/arena pero agregando el agua hasta hacerlo trabajable de manera que pueda introducirse con un faenero sin que llegue a escurrirse.

Suministro de mezclas de inyección

El suministro de mezclas de inyección consiste en la adquisición, transporte, montaje y puesta en servicio de todo el equipo para instalar las plantas de preparación y de inyección, así como de su completa operación para cumplir con los requisitos especificados en los incisos 6.2.11 y en 6.3.11 referente a las conducciones desde las plantas hasta la boca del barreno, incluyendo las instalaciones auxiliares como tanques de almacenamiento, cárcamos para lodos, bombeo y conducciones internas que el Contratista, con base a su experiencia, considere necesarios para cubrir la demanda de las mezclas y cumplir con el programa de construcción establecido.

La localización de las plantas de preparación con respecto a las estaciones de inyección ubicadas en los frentes de trabajo merece una atención especial en estos trabajos, debido a que de esto depende el volumen de desperdicio de la mezcla utilizada para llenar las conducciones, volumen que debe considerar el Contratista al integrar el costo de su oferta.

La calidad de la mezcla debe ser uniforme y conservarse durante todo el proceso, desde la planta de preparación, pasando por las conducciones, hasta su inyección en el barreno; consecuentemente, las conducciones a través de las cuales se envía la mezcla al sitio deben protegerse y tener un desarrollo óptimo tanto de longitud como de cambios de dirección, cumpliendo con lo especificado el Contratista debe verificar durante la fabricación y el transporte hasta su inyección en el barreno, el comportamiento de la mezcla, certificando que la dosificación, la viscosidad, la sedimentación, el tiempo de fraguado, la fluidez, la densidad y la rigidez cumplen con la calidad especificada. Debe incluir el muestreo y sus ensayos mediante pruebas de laboratorio como parte del aseguramiento de la calidad de la mezcla.

Equipamientos de barrenos de drenaje

El equipamiento de los barrenos de drenaje consiste en instalar sifones en el brocal del barreno, con la finalidad de protegerlo contra el arrastre de finos y la carbonatación, en donde aplique este concepto.

Equipamiento contra el arrastre de finos

La protección contra el arrastre de finos consiste en instalar un tramo de tubo de PVC ranurado y recubierto con dos capas de geotextil, cuya longitud y diámetro se indica en el proyecto, debiendo prever una conexión para que en su caso, también en este barreno se instale la protección contra la carbonatación.

Equipamiento contra la carbonatación

La protección contra la carbonatación consiste en instalar un sifón a 180° grados, conectado al extremo del tubo de PVC.

Amacice y limpieza de superficies para revestimientos

Son las actividades preparatorias que se deben efectuar a todas las superficies que vayan a revestirse con concreto lanzado. Consiste en eliminar la roca floja o suelta y concreto mal adherido, utilizando barretas; y efectuar una limpieza enérgica, por medio de chiflones de agua y aire a presión para eliminar el polvo, el aceite, la vegetación y los restos de material de rebote, para dejar la superficie preparada y asegurar una óptima adherencia.

Habilitado de la malla de refuerzo

El habilitado de la malla de refuerzo consiste en preparar los lienzos o tramos de malla, cortándolos con las dimensiones adecuadas al sitio donde se van a colocar y limpiándolos previo a su utilización para que estén libres de óxido, de aceite y de otras sustancias que disminuyan su adherencia al concreto lanzado. En esta actividad se debe incluir el transporte y el almacenamiento en el sitio de colocación.

Colocación de la malla

La malla de refuerzo se debe colocar pegada al terreno y siguiendo sus irregularidades, sujetándola con anclas cortas de 0,60 a 1,20 m de longitud y/o clavos de impacto. Cada unión de lienzos de malla se debe traslapar por lo menos con una retícula y deben amarrarse con alambre recocido de la misma forma que se sujeta la malla al clavo y/o ancla; es necesario que para instalar la malla sobre superficies rocosas, primeramente sea colocada una capa de concreto lanzado con un espesor de 3 cm o lo que indiquen los planos de proyecto. En esta actividad se incluyen los traslapes, descalibre de la malla, las anclas cortas, los clavos y todos los desperdicios que el Contratista, con base en su experiencia, considere necesarios para la ejecución de la actividad. Una vez colocada la malla, se continúa colocando el concreto lanzado hasta completar el espesor indicado en el diseño, quedando completamente cubierta la malla.

En los casos en los que el sistema de soporte trabaje en conjunto con anclas de fricción, la placa de fijación de las anclas cuenta con una alambres adosados, que deben ser fijados a la malla electrosoldada, de manera que trabajen en conjunto.

Telecomunicaciones en los frentes de trabajo

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

Limpieza en el sitio de trabajo

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

Es responsabilidad del Contratista mantener en todo momento el frente de trabajo libre de desechos también, que todo desperdicio sea cargado, transportado y depositado en los bancos de almacenamiento determinados o aceptados por la Comisión. Después de la determinación de todos los trabajos, debe efectuarse una limpieza general de los desperdicios de materiales y de las mezclas fraguadas.

Documentación del trabajo

Antes de iniciar un trabajo, el Contratista debe entregar a Comisión toda la documentación requerida para ese concepto. La Comisión se reserva el derecho de modificar o de aumentar en cualquier momento el tipo de información, sin que esto deba ser motivo para reclamaciones.

El Contratista está obligado a tener al día la documentación y planos de todos los trabajos ejecutados y en vía de ejecución. Al término de los trabajos de cada día, de ser requeridos, el Contratista debe entregar a la Comisión los reportes correspondientes a las diferentes operaciones realizadas y las observaciones particulares que para cada caso se requieran.

3.7. CONSTRUCCION DE PANTALLA FLEXIBLE EN ATAGUÍAS

El Contratista debe someter los puntos siguientes para la aprobación de la Comisión antes de comenzar el trabajo:

1. Certificación de la bentonita.
2. Muestras de bentonita.
3. Identificación, composición y calidad de la fuente de agua.
4. Plan de trabajo detallado. Incluirá por lo menos lo siguiente:
 - Lista del equipo.
 - Características y propiedades índices de los materiales a usar en los rellenos.
 - Especificaciones de la planta de lodos.
 - Especificaciones de la planta de concretos.
 - Métodos de almacenaje del material y del equipo.
 - Procedimientos para la mezcla de agua-bentonita, su transporte y la recirculación.
 - Procedimientos para la excavación de la zanja, colocación del lodo, mezclado del relleno y colocación del relleno.
 - Procedimientos para la disposición de los excesos de lodos.
5. Programa de control de calidad, incluyendo funciones y responsabilidades del personal, organización, plan de inspección y prueba incluyendo tipos y frecuencia de ensaye, normas aplicables y procedimiento del producto no-conforme.

A continuación se dan las especificaciones de carácter general que debe considerar el contratista.

Construcción de las plataformas de trabajo

Deben construirse dos plataformas de trabajo, a partir de una elevación de seguridad que se indica en el proyecto para cada ataguía, dichas plataformas deben estar perfectamente niveladas y compactadas sobre las cuales se alojarán cada uno de los brocales que servirán de guía para la construcción de los muros pantalla. Los materiales que constituyan dichas plataformas, cuando menos en el área que aloje el brocal guía, deben ser aluviales con tamaños menores de 76,2 mm para dar facilidad a las excavaciones y que, a la vez, eviten grandes pérdidas de lodo bentonítico por infiltración al terreno durante la construcción, además formar un núcleo de arcilla de 3 x 2 m (ancho x profundidad) a lo largo del eje del muro pantalla, el cual permite lograr una conexión adecuada al núcleo de la ataguía. Es obligatorio que las plataformas se mantengan niveladas para evitar que, por irregularidades del terreno, el equipo de excavación adopte posiciones que pudieran ser desfavorables a la verticalidad y/o continuidad del muro pantalla. El área de esta plataforma debe contar con espacio suficiente para recibir en ella simultáneamente los equipos de excavación y las plantas de preparación de lodos y mezclas, así como la vialidad de los camiones para acarrear el producto de las excavaciones.

Construcción de los brocales guía

Deben construirse brocales de concreto armado colocados en ambos lados • - la zanja, formados por "muretes" cuya sección sea una "L" invertida, separados lo mínimo necesario para introducir el equipo de excavación. La función principal de este brocal guía, como su nombre lo indica, es para guiar el equipo de excavación y para estabilizar la parte superior de la zanja contra empujes relativamente importantes, inducidos por el tránsito del equipo pesado, y evitar erosiones severas ante la variación del nivel del lodo estabilizador durante la excavación. Sobre las banquetas de estos muros se deben fijar, mediante marcas adecuadas, referencias para la posición de los paneles del muro pantalla y los barrenos para las inyecciones. Después de descimbrar los brocales, deben colocarse puntales para evitar colapsos, así como compuertas separadoras para aislar tramos del brocal guía correspondiente a la longitud del tablero por excavar; cada tramo aislado por las compuertas debe mantenerse lleno con lodo estabilizador, hasta su nivel superior.

Suministro de la mezcla autofraguante

El suministro de la mezcla autofraguante consiste en la adquisición, transporte, distribución, almacenamiento y manejo de todos los materiales hasta el sitio de la planta de preparación; así como la preparación o fabricación de la mezcla en la planta e instalaciones auxiliares destinadas para tal fin y en la conducción desde esta planta de preparación hasta el tablero del muro pantalla.

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

El Contratista debe verificar durante la fabricación y el transporte, hasta su colocación en los tableros del muro pantalla, el comportamiento de la mezcla, certificando que la dosificación, la viscosidad, y la rigidez cumplen con la calidad especificada. Debe incluir el muestreo y sus ensayos mediante pruebas de laboratorio como parte de la certificación de la calidad de la mezcla.

Características de la mezcla autofraguante a

La mezcla autofraguante que se utilice en la construcción del muro pantalla flexo-impermeable debe tener las siguientes características:

Resistencia a la compresión simple $f_c \geq 0,98$ MPa (10 kg/cm^2), a la edad de 28 días, con un modulo de deformabilidad de $500 \text{ MP} \pm 10\%$.

No erosionabilidad garantizada por lo menos a seis años (verificada mediante los muestreos, y con pruebas en laboratorio de resistencia a la compresión simple).

Permeabilidad (k) menor a 1×10^{-8} cm/s (se debe verificar que la mezcla bentonita/cemento, tenga la permeabilidad 10 veces menor, en el laboratorio, para tener en cuenta incidencias durante la ejecución de la obra, puede emplearse la Norma Técnica de la Sociedad Suiza de Ingenieros y arquitectos, SIA-162).

El contratista debe diseñar la dosificación final de acuerdo con los materiales del sitio, para cumplir con las propiedades especificadas de la mezcla autofraguante a utilizar.

Se propone tentativamente el siguiente proporcionamiento:

Cemento 200kg
Agua 504 L
Lodo bentonítico 296 L
Lignosulfito 2 kg (retardante opcional)

Mezcla desplazante (concreto plástico)

Si el proyecto indica que los muros pantalla deben tener una vida útil similar al de la obra entonces debe utilizarse concreto plástico para la construcción de dichos muros, con las características siguientes:

- Resistencia a la compresión simple $f'c \geq 0.98$ MPa (10 kg/cm^2), a los 28 días de edad.
- Modulo de deformabilidad de 5000 MPa
- Permeabilidad (k) menor a 1×10^{-6} cm/s

El contratista debe diseñar la dosificación final de acuerdo con los materiales del sitio, para cumplir con las propiedades específicas del concreto plástico a utilizar.

De forma tentativa se propone la siguiente dosificación:

Agua 85 L
Cemento 140 kg
Arena 975 kg
Grava 375kg
Lodo bentonítico rel. 12:1 de 300 a 400 L
Aditivo retardante opcional 0.65 kg (lignosulfito)

Excavación de la zanja para la pantalla flexible

La excavación se debe ejecutar por tableros primarios y secundarios en forma alternada; es decir, primero se excava el panel uno y luego se pasa al panel tres; una vez terminados éstos, se regresa al panel dos, continuando con el panel cinco y regresando al panel cuatro y así sucesivamente. Simultáneamente a la excavación de la zanja se debe efectuar el relleno con una lechada elaborada con cemento-bentonita-aditivos, para formar lo que se denomina mezcla autofraguante, cuya característica de acción doble está diseñada para estabilizar la zanja durante la excavación y al fraguar como elemento final del muro de pantalla. Se debe tener presente el uso de aditivos floculantes y/o retardantes en función del comportamiento de la mezcla en obra, por lo que se hace necesario que el Contratista lleve un estricto control en el manejo de la mezcla, implementándose un

laboratorio de campo equipado por lo menos con: conos Marsh, elutriómetros, balanzas para lodos, balanzas de precisión, termómetros, muestreadores y moldes para lechada.

Cuando en el proceso de excavación se presenten bloques o zonas con material de dureza excesiva o boleos, cuya resistencia y/o dimensiones sean mayores a la capacidad de corte del equipo de excavación, es necesario romper el terreno o boleos mediante el uso de cinceles o trépanos. Cuando no sea posible extraer o demoler los bloques o boleos, será necesario inyectar estas zonas empleando el método de inyección de manguitos.

Al término de la excavación de un tablero, debe verificarse mediante el tránsito de la herramienta de excavación por el fondo de la misma, que no exista material sin excavar.

Se debe verificar la verticalidad y la continuidad de los tableros; la verticalidad mediante una plomada colocada en el centro longitudinal del tablero, no aceptándose desplomes mayores a una vez el espesor del muro; la continuidad de los tableros, también debe verificarse con una plomada, aceptándose como traslape mínimo el equivalente a la mitad del espesor del muro.

En cualquier caso, los planos de corte de un tablero primario ya colocado, y que será el traslape con el tablero secundario, no debe ser menor que el traslape mínimo ya señalado. En el caso de que existan desviaciones, se debe acondicionar la herramienta para rebajar las paredes o extremos del tablero, de tal forma que se tenga la seguridad de no dejar huecos o zonas permeables en el muro pantalla. En casos extremos de desviación donde se tenga duda de la continuidad, se debe colar un panel o tablero adicional adyacente aguas arriba para cerrar el hueco y cumplir con los traslapes mínimos.

Se debe asegurar al término de las excavaciones y antes del colado de contar con la siguiente información:

- Coordinadas de control de los tableros y/o paneles.
- Profundidad final de cada excavación.
- Descripción de los materiales extraídos
- Eventos ocurridos durante la excavación (uso del trépano, caídos, etc.)
- Verificación de los traslapes transversales y longitudinales.

Empotramiento de la pantalla flexible en la roca basal

El Contratista está obligado a verificar que se ha llegado a la roca basal, para lo cual, durante el proceso de excavación debe obtener muestras de roca a esa profundidad, como evidencia. Una vez definida la profundidad del contacto de la roca basal, debe profundizarse la excavación unos 50 cm dentro de esta roca. Para cumplir con esta excavación puede ser necesario el uso del trépano, el cual debe tener el peso, dimensiones y el perfil de ataque adecuados para tal fin. La excavación se dará por concluida cuando se haya verificado y se obtenga la evidencia de que se ha llegado al nivel de empotrado deseado en toda la longitud del tablero.

Retiro de los brocales guía

Como última actividad correspondiente al muro pantalla, se debe retirar el brocal guía de la ataguía de aguas arriba sin dañar el muro pantalla. Se debe restituir la arcilla del núcleo, colocándola de acuerdo a las especificaciones y compactándola con un rodillo ligero hasta 2 m arriba de la corona del muro pantalla para no dañarlo.

Colocación de marcos de acero

De acuerdo con los planos de proyecto, en algunas zonas de las excavaciones subterráneas se requerirá como soporte marcos metálicos con las siguientes características

Marcos de acero constituidos tentativamente por un perfil tipo IR de 12 o 18" x 336, cuyas dimensiones serán definidas en función de la sección de excavación donde sean requeridos.

La separación entre marcos se definirá en función de la calidad de la roca en el sitio, pero se estima que esta sea de entre 1 y 2 m de separación.

La colocación de los marcos de acero consiste en el suministro de los propios marcos y/o materiales en su caso, para la fabricación en la obra, incluyendo transporte, almacenamiento y los movimientos internos hasta el sitio de su colocación; montaje y su fijación al terreno.

La colocación de los marcos de acero debe estar integrada al ciclo de excavación, consecuentemente debe programarse con la lógica adecuada para evitar interferencias con las otras actividades como son: una capa de concreto lanzado que debe aplicarse previamente; el anclaje sistemático y la sujeción de [os marcos al terreno por medio de anclas cortas y entre ellos, por medio de atiesadores metálicos y separadores de madera que posteriormente se retiran. En caso de excavación en etapas a media sección, se deberá considerar el suministro y colocación de rastras metálicas.

Por problemas geológicos la excavación puede quedar fuera de la línea de proyecto y la capa de concreto lanzado no ser suficiente para proporcionar un apoyo uniforme de los marcos al terreno, por lo cual, el Contratista debe prever el suministro y colocación de puntales metálicos o de madera en la cantidad necesaria y suficiente para garantizar que las cargas se transmitan al marco en forma uniformemente repartida.

Verificación del comportamiento del terreno y de las estructuras durante la construcción

Para el monitoreo continuo del comportamiento del terreno durante los procesos de excavación y de las estructuras, el Contratista debe contar con dispositivos para la medición de desplazamientos del terreno (extensómetros de barra, referencias topográficas superficiales, bases de centraje forzoso, inclinómetros, etc.), medidores de convergencia con cinta invar, medidores de vibraciones, celdas de presión, medidores de presión, gasto y temperatura, y los que sean necesarios para asegurar la correcta ejecución de los trabajos.

También es indispensable que instale un laboratorio de mecánica de rocas, que cuente con los equipos mínimos indispensables para la ejecución de pruebas, para establecer controles de aseguramiento de calidad de los trabajos que involucren los diversos tratamientos de la roca.

Para detectar la influencia de las fuerzas explosivas que se presenten cuando se realicen las excavaciones en roca con el uso de explosivos, se deben instalar medidores de vibraciones, con los cuales se debe establecer un seguimiento estricto y sistemático de mediciones, en primer lugar para verificar los parámetros de la roca y en segundo, si es necesario ajustar las cargas de explosivos detonadas en un solo tiempo para distintas condiciones de las excavaciones, y evitar dañar a la masa de roca remanente (fracturamiento inducido) y zonas donde se realicen trabajos de estabilización o inyecciones cercanas.

En zonas del plinto y en otras zonas que se detecten como susceptibles de moverse o de alto riesgo de inestabilidad, se deben instalar sistemas de medición de desplazamiento temporal. En el capítulo referente al sistema de auscultación de las diversas obras se detallan las características y cantidades de estos instrumentos.

Instrumentación geotécnica durante los procesos de excavación

En las excavaciones subterráneas y a cielo abierto, sobre todo en [os sitios asociados a estructuras geológicas plenamente identificadas, que además se considere pongan en riesgo la seguridad del personal y equipo, se debe prever la instalación de sistemas de medición y monitoreo (temporal y definitivo) mediante medidores de desplazamiento como son los extensómetros de barra múltiple y los inclinómetros.

Adicionalmente debe contemplar la instalación de piezómetros abiertos tipo Casagrande en las laderas y galerías, y de celdas de presión tipo gato plano en el interior de las excavaciones subterráneas de la obra de generación.

La instrumentación geotécnica durante las etapas de excavación debe enfocarse principalmente a: las bóvedas y las paredes aguas arriba y aguas bajo, de la casa de maquinas y de la galería de oscilación; e n los taludes laterales y frontales de la obra de toma; en los taludes de la subestación; y en los laterales, del canal de llamada, de la zona de estructuras y del canal de descarga, de la obra de excedencias.

En el cuadro siguiente se presenta, de manera enunciativa y no limitativa, la instrumentación geotécnica mínima requerida que debe considerar el contratista en su oferta, la cual está sujeta a modificaciones de acuerdo a las condiciones reales que se presenten durante las excavaciones y que deben ser aprobadas por la supervisión de CFE (Comisión Federal de Electricidad).

Los extensómetros serán del tipo de barras múltiples con cabezal mecánico para medición manual. Para fines de oferta deben considerarse 50 extensómetros de 40 m de longitud constituidos por 4 barras de 10, 20, 30 y 40 m; y 60 piezómetros de 30 m de longitud, constituidos por 4 barras de 9, 18, 24 y 30 m. Las especificaciones de detalle están incluidas en el apartado del Sistema de Auscultación.

Las características y especificaciones de los materiales y el procedimiento de instalación de los inclinómetros están indicados en el apartado del Sistema de Auscultación. Con relación a los piezómetros abiertos en las laderas y dentro de las galerías, su ubicación tentativa, la cantidad y profundidad están incluidas en el apartado del Sistema de Auscultación.

Las características y especificaciones de los materiales y el procedimiento de instalación de los inclinómetros están indicados en el apartado del sistema de Auscultación. Con relación a los piezómetros abiertos en las laderas y dentro de las galerías, su ubicación tentativa, la cantidad y profundidad están incluidas en el apartado de sistema de Auscultación.

Con el propósito de conocer los esfuerzos y deformaciones que se generan en los puntos especificaciones de las obras de generación por las excavaciones en roca, se instalarán seis sitios de ensaye con celdas de gato plano; tres en casa de maquinas (en el pilar de roca entre casa de maquinas y galería de oscilación, del lado de GO (Galería de Oscilación, durante construcción).

Las celdas planas se instalarán en ranuras practicadas en la roca mediante barrenos cortos y empacadas con un grout diseñado ex profeso para tal fin, de acuerdo a la norma ATSM D4729-87 y la ubicación definitiva que establezca personal de CFE.

Las especificaciones de la celda y los instrumentos de medición para la prueba de gato plano son las siguientes:

| Especificaciones de la Celda para Prueba de Gato Plano | |
|--|---|
| Tipo: | Diseño CFE de lámina de acero Cold Rollad calibre 14 (2.11 mm) de espesor, troquelada, con un refuerzo tubular perimetral, soldada en proceso TIG con electrodos de Tungsteno protegido con gas inerte (Argón) y dos tubos laterales equipados con conectores niples roscados machos NPT de 1/4" (6.35) de diámetro, de acero inoxidable. |
| Dimensiones: | Cuadradas de 405 x 405 mm, con bordos redondeados. |
| Accesorios: | Se equiparan con un conjunto de los conectores rápidos y dos válvulas compactas de paso de operación rápida (1/4 de vuelta para abrir o cerrar) y sello positivo para todo el intervalo de presión (35 Mpa). |
| Accesorios: | |
| Bomba Hidráulica: | Manual de palanca, de doble acción con capacidad de 700 kg/cm ² (69 Mpa) Tipo Enerpac P-84, incluye mangueras, conectores y caja de transporte. |

CAPÍTULO IV.

CASO DE ESTUDIO:

**“PANTALLA PLÁSTICA DE LAS ATAGUÍAS EN LA
PRESA LA YESCA”.**

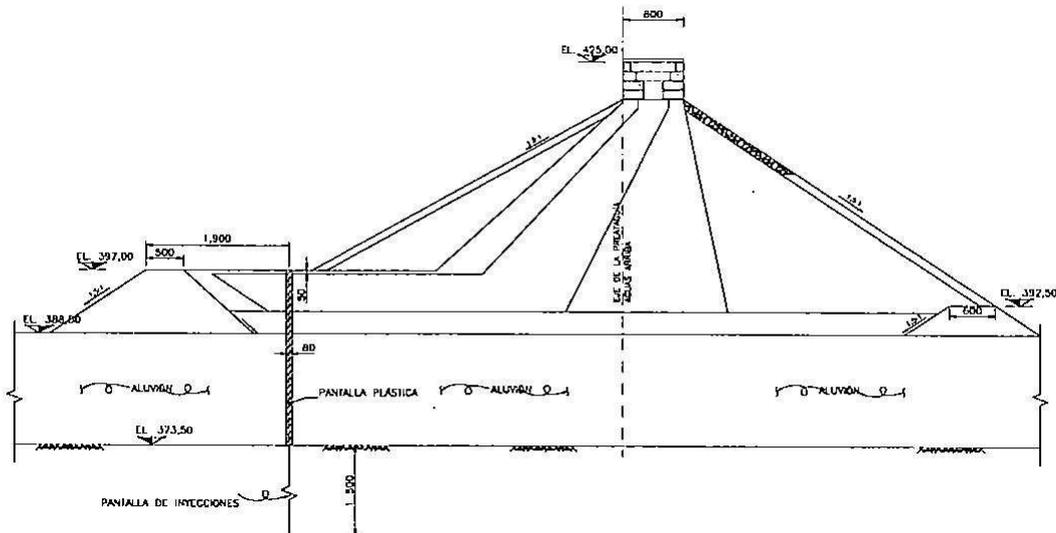
4.1 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PANTALLA FLEXOIMPERMEABLE

4.2. OBJETIVO

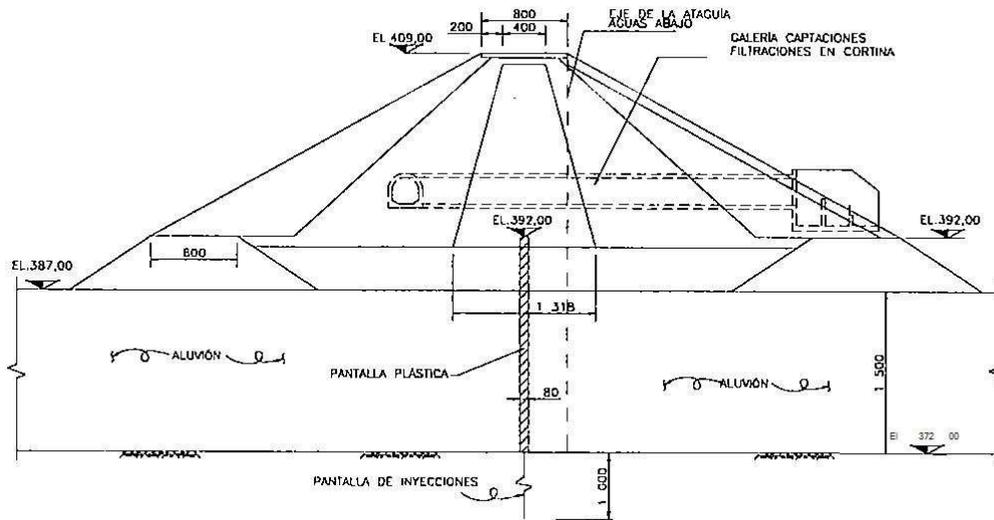
Establecer el procedimiento para realizar los trabajos de construcción de las pantallas flexibles para la preatagüa de aguas arriba y la atagüa de aguas debajo de la Obra de Desvío.

Alcance

Este procedimiento aplica para la construcción de las pantallas flexibles, para la preatagüa de aguas arriba y la atagüa de aguas debajo de la cortina para el Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, excavadas en material aluvial y empotradas en la roca, contempla las actividades de excavación, colocación del concreto plástico y la perforación e inyección de la pantalla de impermeabilización en roca.



PREATAGÜÍA AGUAS ARRIBA.



PREATAGUÍA AGUAS ARRIBA.

DEFINICIONES

Pantalla flexible. Muro embebido en el terreno aluvial, formada de una mezcla determinada de bentonita y cemento y/o concreto plástico que impide las filtraciones hacia el recinto de la cimentación de la presa, a través del material aluvial que conforma el lecho del río.

Brocal. Guía de concreto armado construido por dos "L" invertidas para guiar la herramienta de excavación de la pantalla y protección del espesor de suelo superficial en el sitio.

Lodo Fraguante. Mezcla de bentonita, cemento y agua, de consistencia similar a la de un lodo y con propiedades de alta impermeabilidad y endurecimiento lento.

Tablero. Unidad estructural que conforma a la pantalla, con una sección modulada en función de las dimensiones de la almeja de excavación, y con la profundidad necesaria del barretón telescópico para alcanzar la formación de roca y lograr el empotramiento de diseño.

RESPONSABILIDADES

El gerente de tratamientos y el superintendente de tratamientos, son los responsables de la correcta implantación y cumplimiento de este procedimiento, vigilando que el personal a su cargo realice las actividades consideradas y planeadas para conseguir la calidad establecida.

El jefe de obra de ataguías, es responsable de verificar que se lleve a cabo lo indicado en este procedimiento y registrar las inspecciones realizadas en los formatos particulares de cada actividad, también es responsable de conciliar con la supervisión los trabajos ejecutados, y entregar los soportes de generadores para la elaboración de la estimación; además es responsable del retiro de los desechos sólidos que se generen durante los trabajos, llevándolos a los lugares autorizados.

El jefe de topografía es el responsable de la realización del trazo definitivo para la ubicación de cada tablero, y el monitoreo continuo para asegurar la posición y verticalidad del mismo.

El responsable de maquinaria es el encargado del mantenimiento, reparación y manejo (recolección, transporte, almacenamiento y disposición final) de los residuos peligrosos generados por las actividades del mantenimiento preventivo, correctivo y de trabajo de la maquinaria y equipo.

ANTECEDENTES

Se elabora un plan de inspecciones para la verificación de las actividades, de tal manera que se programe, concilie y autoricen cada una de las etapas de construcción.

La construcción de la pantalla flexible en la preataguía aguas arriba, se realizará desde la elevación 397 y desde la cota 392 en la ataguía aguas abajo.

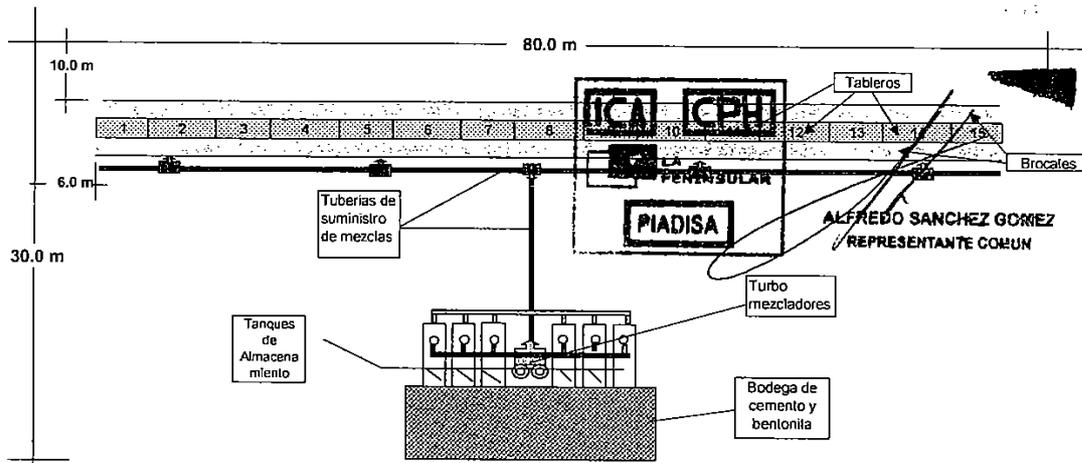
Para tener una guía en la excavación de los tableos, es necesaria la construcción de brocales de concreto armado.

Es importante que al inicio de los trabajos se capacite al personal con relación al contenido de este documento, conforme al procedimiento general de capacitación.

Antes de iniciar los trabajos, se debe tener autorizado para construcción el proyecto definitivo de la construcción de la pantalla flexible.

Todo el personal que participe en los trabajos, debe contar con el siguiente equipo de seguridad como mínimo: casco de protección, zapatos o botas de trabajo y guates de carnaza.

Estar debidamente construida y probada la planta de elaboración de lodos.



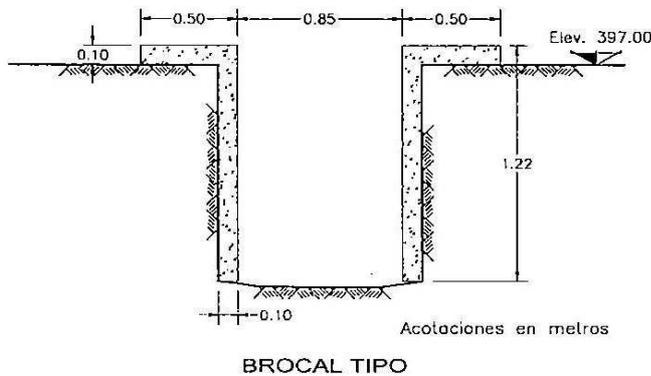
Vista esquemática en la planta de la pantalla plástica y de la planta de lodos.

4.3. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

EXCAVACIÓN Y COLADO DE BROCALES

Concluida la construcción de las plataformas tanto en las elevaciones 397 como en la 392, el personal de topografía de la obra, localiza y traza los ejes de las pantallas plásticas.

Se realiza la excavación del brocal con una retro excavadora Caterpillar 338 o similar con un bote de 1.0 metro de ancho y una profundidad de 1.25 m aproximadamente. Se coloca el acero de refuerzo para temperatura dispuesto a cada 30 cm en ambos sentidos, o malla electrosoldada 66-1010, finalmente, se realiza el cimbrado y colado del brocal. Una vez que se ha descimbrado, es necesario troquelarlo para evitar el movimiento del mismo. Sobre el alerón del brocal, topografía ubica los números y centros de cada tablero y antes de iniciar la excavación, se ubican marcas en los brocales con el fin de tener siempre referencias físicas del tablero que se trabaja.



EXCAVACION DE LA ZANJA

Al planear la excavación de los taleros, se considera que estos deben excavar de manera alterada, ya que nunca se debe excavar un talero contiguo a otro que tenga menos de 24 horas de colado, realizando además un traslape mínimo de 40 cm entre tableros.

Para realizar la excavación se utiliza una almeja guiada del tipo Casagrande KRC2/28 o similar, montada sobre una grúa Link-Belt modelo LS-118 o similar y se procede a la excavación; en función al comportamiento de la excavación, se definirá la longitud de cada tablero, determinándose en cuantas posiciones en la almeja guiada se realiza la excavación, en cada una de las posiciones, se debe llegar a la profundidad de proyecto hasta completar cada tablero o panel.



Fotografía 1. Excavación de zanja.

La profundidad de la excavación se va verificando por medio de una sonda que tiene calibrado su cable a cada metro para conocer su profundidad del tablero

La profundidad para la excavación y para la fabricación del concreto plástico, será elaborado con una relación en peso de agua-bentonita de 12:1.

El lodo bentonítico será elaborado mediante un turbomezclador, de altas revoluciones, y almacenado por un periodo mínimo de 12 horas para su hidratación. Una vez terminada la excavación, se verificará la verticalidad y continuidad de los tableros.

Una vez preparado el lodo se almacenara en tanques por lo menos tres con una capacidad mayor o igual a 20000 litros cada uno, dispuestos de la siguiente manera:

- Uno que contendrá el lodo el cual ya cumplió con su hidratación, en un tiempo mínimo de 12 horas.
- Otro que contendrá el lodo que estará en reposo, y que estará en proceso de preparación.

- Otro que contendrá el lodo que se usara para la fabricación de la mezcla autofraguante para la formación del muro pantalla, que deberá cumplir con los requisitos solicitados.

Estos tanques se irán alternando para su disposición de acuerdo a la producción del lodo Bentonítico.

Antes de darle uso al lodo Bentonítico, que ya haya cumplido con su tiempo de hidratación de 12 hrs., se procederá a llevar a cabo una recirculación o reactivación del contenido del tanque a utilizar para obtener una mezcla homogénea del mismo, este se lleva a cabo con la ayuda de un compresor, el cual mediante una manguera conectada abajo del tanque se le introduce aire a presión para circular el lodo Bentonítico dentro del tanque. Es te proceso se lleva a cabo por lo menos 30 minutos antes de utilizarlo.

La mezcla autofraguante que se utiliza es de:

| | |
|----------------------------------|----------------------------|
| Cemento | 402kg |
| Agua | 535.6 lts |
| Lodo Bentonitico (rel. A/B=12:1) | 344.8 kg |
| Lignosulfito | 2 kg (retardante opcional) |

La elaboración de la mezcla se realiza de la siguiente manera:

Se coloca 535.6lit de agua en el turbo mezclador, se le agrega el lodo Bentonítico hidratado se le da 1 minuto de mezclado, se le agrega el cemento CPP 30 RS y por último se le agrega el aditivo fluidificante (lignosulfito). Una vez mezclado se vacía a una tolva para después mandarla al panel respectivo mediante una bomba.

Para perfilar y empotrar en toda su longitud la pantalla en la roca, así como para demoler los bloques y boleos que no puedan extraerse con la almeja, se utiliza un trepano de 7 ton de peso mínimo, montado en una segunda grúa Link Belt LS 108 o similar.

Para garantizar la estabilidad de las paredes de la excavación, durante el proceso de excavación y simultáneamente con esta, el material extraído por la almeja es sustituido por la mezcla autofraguante, manteniendo el nivel a 50cm por debajo del nivel de la plataforma de trabajo, evitando que se escurra sobre la superficie.

La verticalidad del equipo de excavación, se controlara continuamente utilizando dos plomadas de hilo situadas perpendicularmente a 90° de la posición del eje de excavación y apoyadas en dos bases de varilla, distanciadas adecuadamente de la maquina. Durante el proceso de excavación, el material extraído es retirado del sitio de trabajo, llevándolo al tiro autorizado.

PREPARACIÓN Y MEZCLADO DEL LODO BENTONITICO

- Se verifica que el equipo mezclador este limpio
- Se preparan los materiales de acuerdo a la mezcla de diseño
- Se vierte el agua y la bentonita en el de la mezcladora en una relación Agua/Bentonita (A/B) 12:1.
- Se dan 3 a 5 min. De mezclado para dar consistencia uniforme al lodo obtenido.
- Se hace pasar el lodo por una malla para eliminar los grumos que pudieran existir.
- Se deja en estado de reposo de 12 a 16 horas para garantizar su hidratación.

Lodo bentonítico

El lodo bentonítico es una mezcla de bentonita con agua.

La bentonita es un tipo de arcilla montmorillonítica de muy alto límite líquido. Esto implica que a pesar de que se le añada mucha agua, la mezcla no pierde estabilidad o consistencia. Los lodos bentoníticos tienen una propiedad muy importante, que los hacen muy útiles en construcción. Cuando un lodo bentonítico es amasado sin que se produzca variación de agua, pierde resistencia, comportándose como un fluido. Sin embargo, vuelve a adquirir esta resistencia una vez que entra en reposo.

CONTROL DE CAMPO DEL LODO BENTONITICO

Se verifica la existencia suficiente de materiales en el sitio para la preparación de la mezcla autofraguante; se tomara una muestra de bentonita de cada lote para realizar pruebas de límites de plasticidad.

Se da seguimiento a la preparación del lodo Bentonítico, conforme al procedimiento de construcción.

Una vez terminado el periodo de reposo del lodo previamente preparado se da seguimiento a la producción del lodo autofraguante. Realizando las pruebas que se describen a continuación.

PRUEBAS AL LODO BENTONITICO Y A LA MEZCLA AUTOFRAGUANTE

A) VISCOSIDAD MARSH

Previa limpieza se humedece el cono y el vaso, se cubre con un dedo el orificio del mismo. Pasando la mezcla a través de la malla del cono Marsh, se llena hasta el nivel de la parte inferior de la malla. Al mismo tiempo se retira el dedo y se acciona el cronometro, midiendo el tiempo necesario para que la mezcla proveniente del cono llene 946 cm³ del recipiente graduado al que se vacia.

El tiempo en segundos medido será el valor de la viscosidad Marsh para esa mezcla.

Este valor se registra en el Formato correspondiente.

Se mide la temperatura de la mezcla, se registra en el Formato correspondiente.

B) DENSIDAD DE LA MEZCLA

Previamente se coloca la balanza en un lugar estático y nivelado

Se llena con la mezcla la copo de la balanza hasta su borde, se le coloca la tapa y se deja salir y se limpia el excedente.

Se coloca la balanza en su base, se equilibra y se toma la lectura en g/cm^3 , el valor leído se registra en el Formato correspondiente. Anexo D

C) RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Una vez elaborada la mezcla se toma una porción suficiente para elaborar ocho cilindros.

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

Se podrán emplear moldes de 5 cm de diámetro y 15 cm de altura.

Que esta mezcla se toma del panel ya terminado, mediante un buzo, que atraviesa toda la mezcla en el panel hasta llegar al fondo del panel para extraer la mezcla y colocarla en los cilindros para su ensaye.

Ensayos. Al cumplir con la edad de pruebas los especímenes se ensayan dentro de las fechas siguientes: a 7 días; a 14 días; a 28 días, pruebas de compresión son en pares para tomar un promedio de cada par, pero como son 8 cilindros los realizados en campo, dos cilindros de esos 8 quedan hasta los 28 días para hacer pruebas de deformabilidad. Sacados los especímenes del curado en todo momento deben cubrirse con un paño húmedo. El curado del espécimen es guardado en una bolsa y cerrarlos herméticamente, cubriéndolos con un paño húmedo hasta llegar a su edad de ensaye, el paño se humedece diariamente.

Verificar la planicidad y ensayándolos por las caras planas de los especímenes

Colocar el espécimen en la máquina de prueba centrándolo entre las placas de ensaye y aplicar la carga uniforme y en un tiempo no menor de 20 y no mayor a 80 segundos.

Registrar la carga máxima y calcular el área de contacto del espécimen. Obtener la resistencia dividiendo la carga entre el área.

RECURSOS

A) EQUIPO PARA LA ELABORACIÓN DE LA MEZCLA AUTOFRAGUANTE Y EL LODO BENTONITICO.

- Turbo mezclador, aforado de acuerdo a la cantidad de material a usar.
- Bascula
- Tolva de almacenamiento
- Bomba (moyno) para la mezcla autofraguante
- Bomba para el agua

B) EQUIPO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS ÍNDICES EN CAMPO

- Cono y vaso
- Balanza baroid
- Termómetro
- Cronometro
- Cilindros de 5cm x 15cm
- Un buzo
- Equipo en laboratorio para realizar las pruebas
- Prensa

C) MATERIALES

- Cemento CPP 30RS
- Bentonita
- Lignosulfito (aditivo retardante, opcional)
- Agua

D) MANO DE OBRA

- Laboratorista
- Supervisor y/o jefe de laboratorio
- Formato que corresponde para registrar la viscosidad, temperatura y densidad de la mezcla.

PERFORACIONES EN ROCA

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

Si durante el proceso de perforación se presentan pérdidas de agua o se detecta alguna fractura o falla de importancia que dificulte la continuidad de la perforación, se debe suspender temporalmente la perforación para proceder a sellar el tramo del barreno; éste se debe inyectar con el obturador colocado a 1 m por arriba del punto donde se presente la fuga de agua, hasta alcanzar la presión máxima especificada. Terminada la inyección, se debe remover el obturador y lavar todo el barreno, o reperfusión el tramo para continuar la perforación del barreno hasta su profundidad total de proyecto.

PERFORACIONES EN CONCRETO PLÁSTICO O AUTOFRAGUANTE

Esta perforación es específica para reforzar con inyección algunas secciones detectadas con alta permeabilidad en los contactos del muro de pantalla con la roca basal. Los barrenos se deben perforar con el equipo indicado. En forma continúa hasta su longitud de diseño, respetando las etapas y las fases que se indican en el proyecto. Debe tenerse presente la resistencia a la compresión simple del concreto y el espesor del muro para la elección y el manejo del equipo de perforación, y así garantizar la verticalidad del barreno para que no se desvíen demasiado y quede fuera del muro plástico.

Para las inyecciones en el muro pantalla, en caso de no tener tubos guía, la perforación debe ser considerada desde la superficie hasta llegar a la roca basal, en donde se inicia con la perforación en roca; cuando se tengan tubos guía, lo anterior no se requiere.

Como el volumen de perforación en este tipo de concretos generalmente es mínimo, el Contratista, con base en su experiencia debe estimar la cantidad de este tipo de

perforación, y en consecuencia incluirlos en el concepto de trabajo donde se aplique esta actividad.

PERFORADORAS

Deben utilizarse perforadoras de accionamiento neumático o hidráulico de percusión-rotación o rotatorias para barrenos de 41,3; 50,8; 57,2; y 76,2 mm de diámetro (15/8", 2", 21/4" y 3" respectivamente), con capacidad suficiente para barrenar a profundidades hasta de 80 m. Debe preverse que tengan incluido un dispositivo para poder inyectar agua en forma continua durante la perforación, requisito indispensable para eliminar la contaminación producida por el polvo de la barrenación.

Se recomienda la utilización de perforadoras neumáticas con martillo de fondo para profundidades superiores a los 30 m, con el fin de garantizar la correcta dirección del barreno, según se especifique en los planos de proyecto.

Para barrenos cortos como los utilizados para anclas cortas, drenes para concreto lanzado o para el contacto concreto-roca, se recomienda el uso de perforadoras ligeras equipadas con acero de barrenación integral.

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

Para garantizar la correcta ejecución de un barreno, el Contratista debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Longitud. Las perforaciones se deben ejecutar tanto a cielo abierto como desde galerías, por lo cual, el tamaño del equipo y del acero de barrenación debe ser el adecuado a los espacios disponibles (generalmente reducidos dentro de las galerías).
- Alineación. Debe conservarse la dirección de la perforación en toda la longitud del barreno, por lo que se debe considerar el peso del varillaje o acero de barrenación que seleccione; sobre todo en barrenos inclinados.
- Estabilidad de las paredes del barreno. Es fundamental que el barreno permanezca limpio durante el proceso de perforación para optimizar el avance; sin embargo, se pueden presentar zonas donde el terreno esté muy fracturado y sea necesario ademar las paredes del mismo a medida que se realiza la perforación hasta llegar a la profundidad de diseño, por lo cual el Contratista debe considerar la utilización de ademes metálicos para estos casos.

Adicionalmente, deben considerarse las perforadoras indicadas:

Perforación a mano: Para la perforación a mano se utilizan barras de acero fundido o de hierro con la punta de acero, su sección es generalmente, octogonal, de punta afilada con diferentes formas, según la naturaleza de la roca; el ángulo varía de 60° a 90°; el rendimiento óptimo para cada clase de roca, se obtiene con un ángulo determinado, que es conveniente fijar experimentalmente antes de empezar los trabajos.

Para ejecutar el agujero de un barreno, se empieza por preparar en la roca una superficie plana, normal a la dirección en que se ha de practicar; el agujero se inicia con

golpes de barra, teniendo cuidado de hacer girar esta a cada golpe; cuanto más pequeño sea el ángulo que se haga girar la barra, más perfecto será el agujero practicado. Cuando la roca en la cual se ejecuta el barrenado está seca, la operación se ayuda echando agua en el agujero, con lo cual se hace más fácil la maniobra y se evita el excesivo calentamiento de la barra. Es muy importante que el agujero sea circular, bien derecho, el acero de las barrenas debe ser duro y presentar una gran resistencia al choque; se emplean para las puntas de las barras aceros especiales al cromo, manganeso o wolfram.

Perforación o barrenado: Existen diferentes equipos y accesorios para realizar un barrenado o perforación en roca, las que de acuerdo con la forma en que se desarrollan su trabajo, se dividen en máquinas rotativas y de percusión.

Máquinas Rotativas: Realizan la perforación por medio de una herramienta cortante giratoria en forma de corona, que puede estar revestida de materiales en movimiento granallas. El efecto cortante es determinado por la velocidad de rotación, el poder abrasivo de la corona, la presión ejercida por el mecanismo de avance y el peso de varillaje y de herramientas. La naturaleza de la roca, además de los factores señalados determina la velocidad de avance.

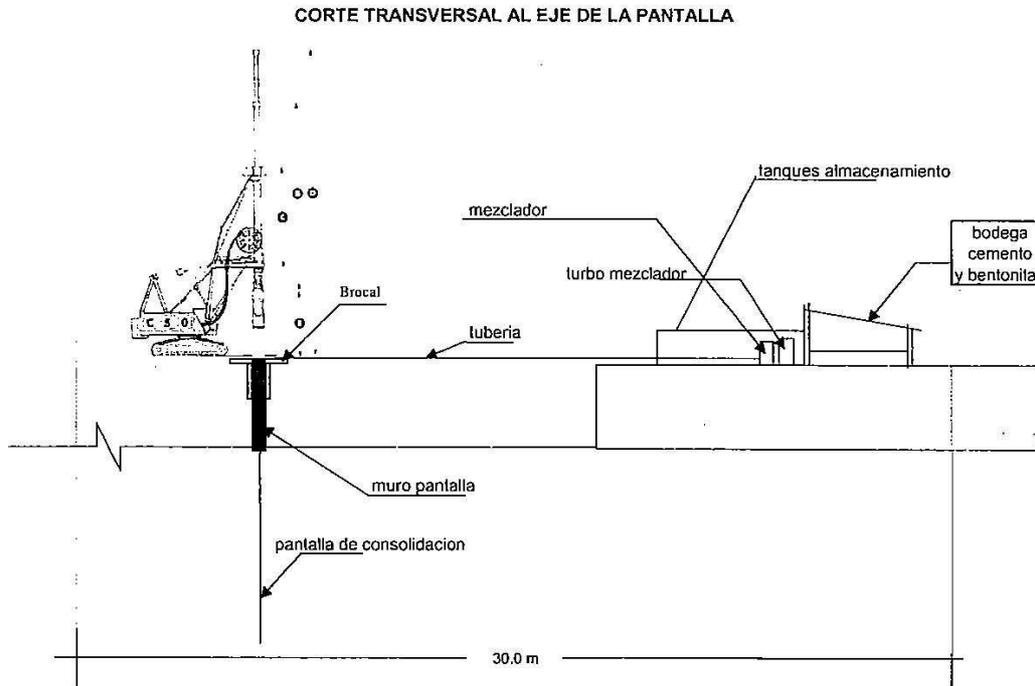
Máquinas de Percusión: Las máquinas de percusión realizan su trabajo por medio de una herramienta cortante o trepano que golpea sobre el fondo de la perforación; los bordes agudos de la herramienta cortan la roca y el mecanismo de rotación de la máquina hace girar la broca a una nueva posición por cada golpe. Los factores que fundamentalmente determinan la velocidad de avance son: el número de golpes por minuto y la naturaleza de la roca.

Perforadoras de Percusión:

- **“Jacklegs”:** Debido a su facilidad para barrenar en cualquier posición, esta máquina fue la más utilizada en las galerías de Ralco y Pangue. Además es liviana, fácil de manejar y basta con un solo operario para realizar barrenado.
- **“Guagua”:** Es una máquina liviana equipada con mangos, para trabajar con ella a pulso. Debido a su poco peso y pequeño tamaño, es muy apropiada para barrenar en lugares estrechos. Este tipo de perforadora es de uso general en trabajos de superficie y en el interior de túneles.

La terminación de la excavación de un tablero, se revisa por medio del tránsito de la herramienta de excavación por el fondo de la misma.

Al concluir la excavación, y previo al colado, se revisan las propiedades índice del lodo de la excavación, si este cumple, se está en condiciones para colar el tablero y/o realizar la sustitución por concreto plástico.



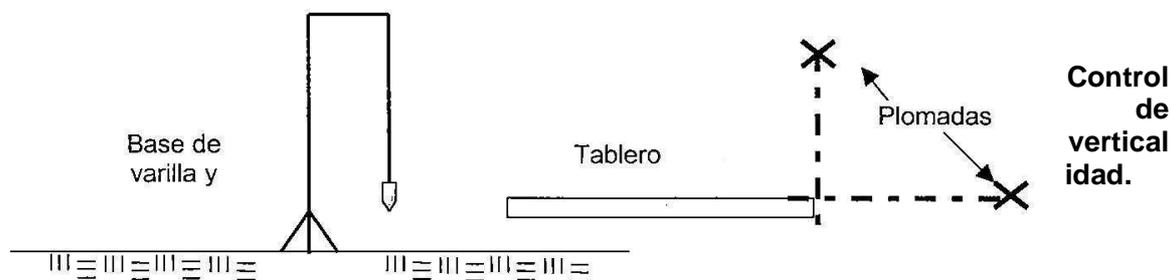
Corte trasversal al eje de la pantalla

Para perfilar y empotrar en toda su longitud los 50 cm de la pantalla en la roca, así como para demoler los bloques y boleos que no puedan extraerse con la almeja, se utiliza un trepano de 7 toneladas de peso mínimo, montado en una segunda grúa Link Belt LS 108 o similar.

Para garantizar la estabilidad de las paredes de la excavación durante el proceso de excavación y simultáneamente con esta, el material extraído por la almeja es sustituido por lodo bentonítico, manteniendo el nivel del lodo a 50 cm por debajo del nivel de la plataforma de trabajo, evitando que se escurra sobre la superficie.

Una vez concluida la excavación de cada tablero, se verifica que el fondo esté libre de azolve, limpiando el fondo con la almeja y revisándolo con una sonda la profundidad total, de excavación.

La verticalidad del equipo de excavación se controlara continuamente utilizando dos plomadas de hilo situadas perpendicularmente a 90° de la posición del eje de excavación y apoyadas en dos bases de varilla, distanciadas adecuadamente de la máquina.



Durante el proceso de excavación, el material extraído es retirado del sitio de trabajo, llevándolo al tiro autorizado.

En caso de que el lodo de excavación no cumpla con la especificación, se cambiara por un lodo que si cumpla con las propiedades índice.

MEZCLA DESPLAZANTE (CONCRETO PLÁSTICO)

- El concreto plástico, será elaborado en sitio, y debe de cumplir las siguientes características:
- Resistencia a la compresión simple $f'c \geq 0.98 \text{ MPa}$ (10.0 kg/cm^2) a 28 días de edad.
- Modulo de deformabilidad de 5000 MPa
- Permeabilidad (k) menor a $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$

De manera tentativa se presenta la dosificación a utilizar para el muro de concreto plástico, la cual, posterior a elaborar pruebas con los materiales del sitio, se definirá la dosificación definitiva.

| | | |
|-----------------------------|--------------|-------------------|
| Agua | 85 | litros |
| Cemento | 140 | Kg |
| Arena | 975 | Kg |
| Grava | 375 | Kg |
| Lodo Bentonítico | De 300 a 400 | litros |
| Aditivo retardante opcional | 0.65 | Kg (lignosulfito) |

Dosificación requerida para el muro de concreto plástico

Cuando el lodo bentonítico de un tablero excavado cumple con las especificaciones de construcción, se procede a colocar la tolva y la tubería Tremie de 8 a 10 pulgadas de diámetro la cual debe quedar perfectamente hermética y colocarse a no más de 50 cm del fondo de la excavación.

El concreto plástico se prepara dosificando el lodo bentonítico y el agua en la planta de lodos descargando directamente en las ollas revolventoras, las cuales, se desplazarán a la planta de concreto donde se les dosificara el cemento y los agregados.

Antes de vaciar el concreto plástico en la tubería tremie, se coloca una cámara de balón o una bola de papel para que sirva de tapón deslizante para limpiar la tubería del lodo bentonítico y al mismo tiempo sirva de contenedor para que se llene a tubería con concreto evitando su segregación y contaminación, y de esta manera, al llegar el tapón a la boca de la tubería, el peso de la carga de concreto en la tubería, desplazara al lodo bentonítico del fondo de la excavación creando un cono de concreto que alcanza a cubrir la boca de la tubería y de esta manera, se evita la contaminación del concreto plástico. El control del colado de los muros, se realiza mediante un registro en el cual se anota el volumen de concreto vaciado y la altura que va alcanzando el nivel de concreto en el tablero y esto se compara con la información teórica del llenado del tablero, esta misma información, nos permite decidir el momento oportuno para disminuir a longitud de la tubería tremie. La terminación del colado se da cuando en la superficie de todo el tablero aflora todo el concreto contaminado. Finalmente, ya retirada la tubería de colado, se instalan los tubos de guía de PVC de 6" \varnothing sobre el eje de la pantalla con una separación de --- metros.

PERFORACIÓN PARA INYECCIÓN

Se realizará la perforación para la inyección de la pantalla de impermeabilización a través de las boquillas de 6" \varnothing con un equipo perforador sobre orugas del tipo ECM 350 o similar dotado de perforadora top hammer o con unidad de rotación para martillo de fondo, la mancuerna se completa con un compresor portátil y/o estacionario de mínimo 600 PCM, la perforación, se realizara en un diámetro mínimo de 2 1/4" y a profundidades de 15 y 10 metros en la pantalla de aguas arriba y de 10 metros en la pantalla aguas abajo.



Fotografía 2. Perforación para la inyección.

LAVADO DEL BARRENO

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

Consiste en la limpieza del barreno utilizando agua y aire a presión mediante la introducción de un chiflón o tubo provisto en la punta de perforaciones que estén orientadas en dirección perpendicular al eje del barreno; para el caso de lavado de barrenos que deberán ser reinyectados, la dirección del chiflón o tubo de agua se aplicará de preferencia paralela al eje del barreno. La presión que se aplique debe ser tal que permita la salida del material producto de la perforación, de la inyección, de caídos de roca y de cualquier material que se encuentre rellenando las grietas hasta que el agua retorne limpia a la superficie y el barreno esté libre de obstrucciones en toda su longitud. Esta actividad es independiente del sopleteado o lavado que se haga durante el proceso de barrenación.

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

SATURACIÓN

Con la utilización de una sonda eléctrica, se determina el nivel de aguas freáticas (NAF), en función de los datos que nos arroje la sonda eléctrica, procederemos de la siguiente manera; si el nivel de aguas freáticas se encuentra en el contacto de la pantalla con la roca basal, no será necesario realizar la saturación, en cambio si alguna progresión se encuentren por arriba del NAF, se satura con el siguiente procedimiento: se coloca el obturador en la parte superior de la progresión que estos casos es el inicio de la perforación en roca.

Se inyecta agua una presión de 0.98 MPa (10 kg/cm²) durante 30 minutos, o un volumen máximo de 200 litros por metro de barreno. Si al saturar se alcanza la presión de 0.98 MPa se sigue e criterio de gasto constante, que consiste en aplicar la presión de 0.98 MPa (10 kg/cm²), medir el gasto cada 3 minutos; cuando se estabilice el gasto, se continua inyectando agua por espacio de otros 5 minutos más, hasta llegar a 30 minutos momento en el cual, se da por terminación la saturación.

PREPARACIÓN DE LA MEZCLA

La mezcla de inyección se prepara en un turbo mezclador de altas revoluciones (1250 rpm) posteriormente, se pasa a un agitador de bajas revoluciones y finalmente la bomba de inyección la inyecta.

La mezcla a utilizar, será la que se determine con las pruebas que se realizaran en campo con los materiales del lugar y que cumpla las especificaciones de construcción de la obra civil. La relación agua/cemento (A/C) con relación al peso del cemento será variable de A/C de 0.8/1 a 1.0/1 en peso del cemento adicionando el aditivo superfluidizante y estabilizador de volumen con relación al peso del cemento.

Con estas dosificaciones se deben cumplir las propiedades siguientes:

- Viscosidad al cono Marsh entre 29 y 33 segundos, constante durante una hora.
- Densidad o peso volumétrico entre 1,47 a 1,55 g/cm³
- Decantación (sedimentación) menor o igual a 4 % en dos horas.
- Cohesión (con placa) menor o igual a 0,03 g/cm² ó 0,2 mm
- Coeficiente de filtrado menor o igual a 0,6.
- Cake obtenido de la prueba de filtrado menor o igual a 15 mm.
- Resistencia a la compresión simple a la edad de 28 días mayor o igual a 9,8 MPa (100 kg/cm²).

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

Viscosidad Marsh

Previa limpieza se humedece el cono y el vaso, se cubre con un dedo el orificio del mismo. Pasando la mezcla a través de la malla del cono Marsh, se llena hasta el nivel de la parte inferior de la malla que son 1500 ml. Al mismo tiempo se retira el dedo y se acciona el cronometro, midiendo el tiempo necesario para que la mezcla proveniente del cono llene 946 cm³ del recipiente graduado al que se vacía.

El tiempo en segundos medido será el valor de la viscosidad Marsh para esa mezcla

Este valor se registra en el anexo del formato correspondiente.

Se mide la temperatura de la mezcla

Densidad aparente

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

Decantación o sedimentación

Se agita en el recipiente de la mezcla obtenida y se vacía la muestra de mezcla en una probeta graduada de 250 mililitros, hasta el límite de la probeta y se anota el tiempo. Al cabo de 120 minutos se registra la sedimentación y se calcula lo siguiente fórmula

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

En donde

D= decantación o sedimentación. %

A= asentamiento, ml

V_o= volumen original, ml

Cohesión con placa

Con una placa acero inoxidable de superficies ásperas y de dimensiones aproximadas con 100mm x 100mm y espesor de 1.5 mm.

La placa preparada limpia y seca, se determina su masa "M1" y el área "As" que estará en contacto con la mezcla

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

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

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

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

En donde:

CP=cohesión con placa, el valor obtenido estará dado en g/cm²

M2= volumen final de filtrado

M2= masa de la placa con el sujetador cubierta con mezcla

As= área de la placa en cm²

Coefficiente de filtrado y espesor de costra CAKE

- El equipo deberá estar limpio
- De la muestra obtenida de la lechada, se procede a vaciar 200ml en la celda de filtrado baroid, previamente preparada para con el papel filtro.
- Se colocara en la armadura y se conecta al sistema de presión de 100 lb/pulg² (7kg/cm²).
- Se aplica la presión y paralelamente se acciona el cronometro.
- Se para el cronometro cuando deja de filtrarse el agua y empieza a salir aire. Se mide el valor del agua filtradas en mililitros en una probeta graduada. Se quita la presión,

se abre la válvula de alivio y se cerciorará que la presión este descargada. Se calcula el coeficiente de filtrado como sigue:

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

En donde:

CF: coeficiente de filtrado

VF: volumen filtrado

VT: volumen total

T: tiempo

Para determinar el espesor de COSTRA CAKE, se procederá a vaciar el material de la celda del filtrado y se desarma con cuidado. Una vez hecho esto se retira la malla con el papel filtro y se mide el espesor de la Costra Cake en mm.

Resistencia a la compresión simple.

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

Eventualmente puede ser necesario adicionar a la mezcla un acelerante de fraguado (silicato de sodio con una concentración o densidad de 40° Baumé u otro similar) cuando así se requiera.

Actividades de control durante los tratamientos de inyección (procesos de producción)

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

El muestreo es aleatorio y selectivo de los componentes empleados en los procesos de producción y/o construcción con pruebas de laboratorio, bajo el siguiente esquema:

Obtener muestras de lechada por cada 5 barrenos inyectados. Estas muestras deben tomarse preferentemente en la válvula de purga ubicada en el brocal del barreno, y se les debe practicar pruebas índice y de resistencia mecánica, para verificar el cumplimiento de los requisitos especificados. Comisión se reserva el derecho de efectuar verificaciones intermedias de estas propiedades, y en caso de existir diferencias importantes o incumplimiento de los requisitos, podrá rechazar las mezclas durante el proceso de inyectado y exigir su corrección y/o ajuste.

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

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

CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS DE INYECCIÓN

INYECCIONES EN ROCA

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

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

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

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

El diseño geométrico preliminar del plano de estanqueidad, desde el plinto y galerías (4 por margen), así como los tratamientos antes mencionados, están indicados de forma esquemática en los planos de proyecto que proporciona Comisión a los licitantes, para efectos de evaluación y cuantificación de volúmenes que debe considerar en su oferta. El desarrollo de la ingeniería de detalle, bajo los lineamientos establecidos en el proyecto, será responsabilidad del Contratista, pero que deberá someter a la revisión y aceptación de la Comisión.

El diseño de estos tratamientos, contempla en forma general la ejecución de tres etapas de inyección, iniciando por la Etapa I con separación de barrenos @ 12 m, la Etapa II @ 6 m y la Etapa III @ 3 m. La profundidad de la pantalla de inyecciones se indica en los planos de proyecto.

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

A) MEZCLAS PARA LA INYECCIÓN DE ANCLAS

El cemento a utilizar en la fabricación de los morteros para los anclajes debe ser del tipo CPC-30R (Cemento Portland Compuesto clase resistente 30R), el cual deberá cumplir con la Norma NMX-C-414. El agua debe obtenerse del río Santiago o el Río Bolaños.

El agua para la elaboración y curado del concreto debe ser captada, extraída, procesada, conducida y en general suministrada y analizada por el Contratista a su cargo. El agua debe estar libre de aceites, álcalis, sales, materia orgánica, grasas o impurezas que puedan afectar el fraguado del concreto y reducir la resistencia o la durabilidad del mismo, o la del refuerzo.

El agua que se utilice debe ser ensayada de acuerdo a los métodos establecidos por las normas ASTM que a continuación se indican y a los requerimientos establecidos por Comisión para cada ensaye:

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

En caso de que el agua no cumpla con las especificaciones anteriormente mencionadas, el Contratista no podrá utilizarla para la fabricación o curado del concreto y debe buscar fuentes alternas o realizar los tratamientos necesarios para cumplir con la calidad de la misma, a su cargo.

La arena a emplear debe tener un módulo de finura de $2,8\% \pm 0,5$, debe pasar la malla No. 16 (1,19 mm); la pérdida por lavado determinada según ASTM C 117 no debe exceder del 5% y debe apegarse a las especificaciones señaladas en dosificación para concreto y tener una humedad comprendida entre el 4 y el 8%.

El proporcionamiento tentativo, de acuerdo con los materiales de la región, es el siguiente:

| Material | Proporción en peso |
|-----------------------------|--------------------|
| Arena fina (malla # 8 a 16) | 26 kg |
| Agua | 27 litros |
| Cemento CPC-30R | 50 kg |

El Contratista debe realizar pruebas para definir el proporcionamiento final, el cual someterá a la consideración de Comisión. Los parámetros que debe cumplir son los siguientes:

| | |
|------------------------------------|--|
| Fluidez en cono Prepakt | 7 - 8 segundos |
| Densidad | 1,86 a 1,88 g/cm ³ |
| Decantación | < 0,5% (en 60 minutos). |
| Resistencia a la compresión simple | ≥19,6 MPa (200 kg/cm ²), a los 28 días de edad |

Para efecto de medir los parámetros físicos de las mezclas se requiere contar con la balanza de lodos y el cono Prepakt, además de otros utensilios auxiliares.

El método de ensaye para la densidad, decantación y resistencia a la compresión simple es similar a lo descrito anteriormente en este mismo inciso, para la fluidez se describe a continuación:

Fluidez en cono Prepakt. Se define como el tiempo en segundos que tarda en escurrir un litro de mezcla, de un total de 1,725 litros, depositados en un embudo de dimensiones estándar denominado Cono Prepakt.

La resistencia del mortero o resina debe ser de $f'c \geq 19,6$ MPa (200 kg/cm²), como mínimo a los 28 días de edad, que cumpla con las especificaciones de diseño para este proyecto.

B) MEZCLAS DE INYECCIÓN PARA RELLENOS DE CONTACTO (CONCRETO-PLACA METÁLICA Y CONCRETO-ROCA)

El tratamiento concreto-placa metálica es aplicable principalmente en las tuberías a presión. Las inyecciones sirven para rellenar el espacio que queda entre el concreto y la placa metálica de las tuberías. Los materiales a utilizar en este tratamiento son la lechada de cemento especificada y el mortero de cemento especificado (Mortero para anclaje).

Para otros casos, como lo es el relleno de cavidades u oquedades que queda entre los concretos y la roca, se debe emplear tanto la lechada especificada como un mortero de

cemento de alta densidad, que tenga una relación agua/cemento/Arena (A/C/Ar = 1,0:1,0:1,0).

La dosificación tentativa para este mortero es la siguiente:

| Material | Proporción en peso |
|-----------------------------|--------------------|
| Arena fina (malla # 8 a 16) | 50 kg |
| Agua | 50 litros |
| Cemento CPC-30R ó CPP-30R | 50 kg |

El empleo de una u otra mezcla estará en función del tamaño de la oquedad y/o del propósito buscado según el tratamiento de contacto de que se trate. Los cambios deberán ser notificados previamente al supervisor de Comisión, para someterlos a su aprobación.

C) MEZCLA PARA LAS INYECCIONES EN ROCA MICROFISURADA O CON PRESENCIA DE MATERIAL ARENOSO

La mezcla que a continuación se especifica, es aplicable para el tratamiento del macizo rocoso microfisurado o con presencia de material arenoso, como es el caso de la zona del cauce, donde se requiera realizar inyecciones de impermeabilización y/o de consolidación.

Para estos casos, se propone emplear una mezcla a base de agua-cemento-aditivo superfluidizante, adelgazante y estabilizador de volumen, la cual debe tener una resistencia a la compresión simple, a la edad de 28 días $\geq 7,8$ MPa (80 kg/cm²).

Tentativamente se propone la siguiente dosificación:

| | |
|----------------------------------|--|
| Relación agua/cemento | de 0,8/1 a 1,2/1 |
| Aditivo estabilizador de volumen | de 1% a 3 % (opcional - bentonita) |
| Aditivo superfluidificante | de 0,5 a 1,5 % |
| Aditivo adelgazante | de 3 a 5 % (opcional – humo de sílice) |

El aditivo estabilizador de volumen (bentonita) puede ser eliminado de acuerdo con los resultados de los ensayos de las mezclas que se realicen el sitio, empleando el cemento tipo CPP-30R.

La dosificación definitiva de la mezcla debe ser determinada por el Contratista después de realizar los ensayos a los materiales del lugar, debiendo cumplir con los parámetros indicados en estas especificaciones.

CONTROL NUMÉRICO DEL PROCESO DE INYECCIONES

El sistema de control numérico de inyecciones consiste en una serie de componentes o sistemas, los cuales deben ser capaces de poder diseñar el proyecto de inyecciones, controlar el procedimiento en campo de las inyecciones, representar gráficamente y analizar la información de las inyecciones terminadas.

Los sistemas deben ser compatibles entre si para que el diseño, ejecución y análisis se haga de forma rápida y exacta.

• Sistema de diseño

Este sistema debe ser capaz de poder representar en forma gráfica las perforaciones que serán parte del proyecto de inyección. Debe poder identificar los posibles obstáculos que se pudieran encontrar (servicios, túneles, etc.).

De igual forma debe representar en tres dimensiones la distribución de las perforaciones verticales, horizontales o inclinadas con toda la información relacionada con las cotas y profundidades, tener la capacidad de diseñar y representar todas las líneas de inyección necesarias para la ejecución de los trabajos y la capacidad de implementar la nomenclatura optada para las perforaciones y hacer la diferencia entre tipos de perforación y de tratamiento de inyección.

El sistema debe calcular los volúmenes de inyección teóricos, presiones mínimas y máximas de inyección y caudales de inyección previstos por cada tipo de terreno y para cada tramo individual de inyección.

Todo el sistema debe ser computarizado y automático para poder generar reportes de forma rápida y exacta.

• Sistema de control de inyecciones

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

- Controlar automáticamente el arranque y paro de la bomba al cumplir con los criterios de inyección del proyecto, indicándole al operador de forma instantánea que el tramo inyectado ha sido terminado.

- Las bombas de inyección deben estar equipadas con sensores de presión, caudal electrónicos que envíen la información de forma instantánea a la computadora de control de inyecciones.

- Mostrar gráficamente y de forma instantánea los parámetros de diseño (del sistema de diseño) y previamente programados como: presión, caudal y volumen teóricos.

- Mostrar gráficamente y de forma instantánea los parámetros reales de ejecución como son: presión, caudal y volumen real inyectado.

- Tener un sistema automático de almacenamiento de la información de las inyecciones realizadas y por realizar.

- Reportar de forma instantánea los posibles problemas que se generen durante un proceso de inyección (comunicación con otra perforación, resurgencias, problemas con la bomba de inyección, taponamientos, etc.) indicándolo en el reporte que debe ser generado de forma automática.

- Generar reportes impresos, con toda la información de las inyecciones terminadas y en curso, en cualquier momento que sea solicitado y de forma instantánea desde el sitio de obra.

- Controlar de 2 a 12 bombas de inyección desde un solo punto de trabajo.

- Transferir la información de forma diaria de los trabajos terminados a una memoria para utilizar dicha información y realizar los análisis requeridos.

• **Sistema de representación gráfica de inyecciones**

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

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

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

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

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

Este sistema debe tener la capacidad de generar reportes con toda la información relacionada con la inyección de forma gráfica y cuadros con los valores de los parámetros de inyección teóricos y reales y debe ser compatible con los sistemas de diseño y control.

INYECCION DE LA MEZCLA

La inyección se realizara siguiendo la metodología de inyección de Presión y Volumen constante denominado GIN (por sus siglas en inglés Grouting Intensity Number).

El equipo a utilizar, será una planta de inyección del tipo Hany 650/725 o similar.

La inyección se ejecutara, en progresiones ascendentes de 5.0 metros desde la más profunda hasta la superficie. Se aplicara incrementos de presión de 0.49 MPa (5 kg/cm²) y el volumen de mezcla por metro (l/m) hasta interceptar la curva GIN de 137.3 MPa*l/m (1400 kg/cm² l/m) presión máxima de 3.43 MPa (35 kg/cm²) y un volumen máximo de mezcla de 140 l/m. la intersección de la curva PV, puede darse de tres maneras; por la presión máxima especificada, por intersección de la propia curva GIN o por llegar al volumen máximo por metro establecido.



Fotografía 3. Ejemplo de inyección de mezcla.

Para evaluar el comportamiento del terreno, desde el inicio y hasta el final de cada una de las progresiones o tramos inyectados de cada barreno, el Contratista debe llevar un registro continuo de la evolución de la inyección, utilizando los siguientes parámetros: Presión de inyección medida en el brocal del barreno en MPa; volumen total inyectado de lechada (consumo) en litros y el tiempo en minutos. Con estos parámetros deben elaborarse las gráficas de control de inyección siguientes:

- | | | |
|------------------------------|-----|--|
| a) Presión efectiva (MPa) | vs. | Volumen acumulado (l/m) |
| b) Presión efectiva (MPa) | vs. | Tiempo (min) |
| c) Gasto (l/min) | vs. | Tiempo (min) |
| d) Volumen acumulado (l/m) | vs. | Tiempo (min) |
| e) Gasto/Presión (l/m / MPa) | vs. | Tiempo (min) (Penetrabilidad) |
| f) Gasto/Presión (l/m / MPa) | vs. | Volumen acumulado (l/m) (Penetrabilidad) |

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

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

Durante todo el proceso de inyección, esta se realizara en apego al procedimiento establecido, procedimiento de ejecución, de las especificaciones de construcción de obra civil.

PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN

- La inyección debe hacerse en tramos de 5 m y en progresiones ascendentes, iniciando a partir del tramo más profundo del barreno, por tanto, el barreno deberá perforarse hasta su profundidad de proyecto, y posteriormente inyectarse. En casos donde se crucen zonas de fallas o de cuerpos intrusivos (rocas de mala calidad) que induzcan inestabilidad en el barreno y que impidan el avance de la perforación, podrá optarse por la inyección anticipada del tramo anómalo (de acuerdo con la metodología establecida) y posteriormente reperforarse para continuar con la perforación del barreno hasta la profundidad especificada. Es importante mencionar que los tramos inyectados anticipadamente, no deberán inyectarse de nuevo cuando se realice la inyección del barreno en tramos ascendentes. De tenerse problemas de obturación, por condiciones de la roca, se puede optar por inyectar tramos menores a 5 m, o un poco mayores (hasta de 7 m); esto será aceptable, siempre que esté debidamente justificado por el Contratista y avalado por la Comisión.
- Una vez iniciada la inyección, no debe detenerse por ninguna causa, siendo un proceso continuo de principio a fin; sin embargo, si esto llega a ocurrir, se debe lavar el carril del barreno empleando un volumen del orden de 200 litros de agua, utilizando el procedimiento indicado el inciso 6.4.8. Posterior a esto, se deberá iniciar nuevamente la inyección del tramo.
- Durante el proceso se debe monitorear la evolución de la presión registrada en el manómetro instalado en el brocal del barreno, dando incrementos de 0,49 MPa (5 kg/cm²), así como registrar el volumen de mezcla acumulado que ha consumido el tramo del barreno en litros por metro (l/m), hasta interceptar la curva o trayectoria GIN seleccionada.
- El gasto mínimo para considerarse sellado un tramo debe ser menor de 5 litros/minuto/tramo, es decir, 1litro /minuto/metro, para tramos de 5 metros de longitud.
- El tiempo entre lecturas podrá ser de 3 a 5 minutos de acuerdo al comportamiento de la inyección; pero podrá reducirse a 2 minutos cuando el gasto ya sea cercano a 5 litros/minuto/tramo inyectado (1litro/minuto/metro).
- El criterio de reducir el tiempo de inyección cuando se esté llegando al gasto mínimo con una presión alta, es con la finalidad de evitar el exprimido prematuro de la mezcla, lo cual provoca taponamientos en la tubería de inyección, principalmente en el extremo inferior del obturador.
- Para evitar estos taponamientos durante el proceso de inyección de un tramo, los incrementos de presión se deben aplicar en forma lenta y no bruscamente, para evitar el exprimido de la mezcla, y en consecuencia generar un falso sellado del tramo.

Para dar por sellada una progresión, se aplicara el criterio indicado. Comportamiento de las inyecciones, de las especificaciones de construcción de obra civil.

COMPORTAMIENTO DE LAS INYECCIONES

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

• Al alcanzar la Presión máxima:

- a) Cuando se llegue a la presión máxima especificada, ésta se deberá mantener constante durante 3 a 5 minutos y se deberá medir el gasto.
- b) Si este gasto es menor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), la inyección se da por concluida y el tramo se considera sellado.
- c) Pero, si dicho gasto es mayor a 5 litros /minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), se debe realizar un decremento de la presión de 0,49 MPa (5,0 Kg/cm²) y mantenerse durante 3 a 5 minutos, para medir nuevamente el gasto.
- d) Si este nuevo gasto resulta menor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), la inyección se da por terminada y el tramo por sellado.
- e) Pero, si el nuevo gasto sigue siendo mayor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), se debe aplicar ahora un incremento de la presión de 0,49 MPa (5,0 Kg/cm²) y mantenerla durante 3 a 5 minutos, y medir el gasto nuevamente.
- f) Si ahora el gasto medido es menor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), la inyección se da por terminada y el tramo por sellado.
- g) Pero si este último gasto continúa siendo mayor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), se repiten los pasos c, d, e y f, hasta dos veces como máximo para dar por terminada la inyección del tramo.

• Intersección con la curva P x V:

- a) Cuando el proceso de inyección registre un incremento rápido de la presión (múltiplo de 0,49 MPa ó 5,0kg/cm²) y en su trayectoria intersecta la curva PV, se continuará la inyección durante 3 a 5 minutos a la presión a la que llegó después de haber intersectado dicha curva y se medirá el gasto.

-
-
- b) Si el gasto medido es mayor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), se disminuirá la presión hasta intersectar la curva, manteniéndola durante 3 a 5 minutos y se medirá el gasto.
 - c) Si el gasto resulta todavía mayor a 5 litros/minuto/tramo, se disminuye la presión hasta intersectar nuevamente la curva, y así sucesivamente hasta cumplir con el gasto menor a 5 litros/minuto/tramo (1 litro/minuto/metro), o hasta llegar al gasto mínimo requerido para darlo por sellado o hasta llegar al volumen máximo acumulado especificado, en litros/metro.
 - d) Al llegar al volumen máximo acumulado se deberá suspender la inyección, se aplicarán los 200 litros de agua para lavar el tramo y el carril del barreno, y se dejará en reposo durante seis horas, para que después de este lapso se prosiga con la inyección como un tramo nuevo. Se deberán considerar solo 3 inyecciones por tramo como máximo.

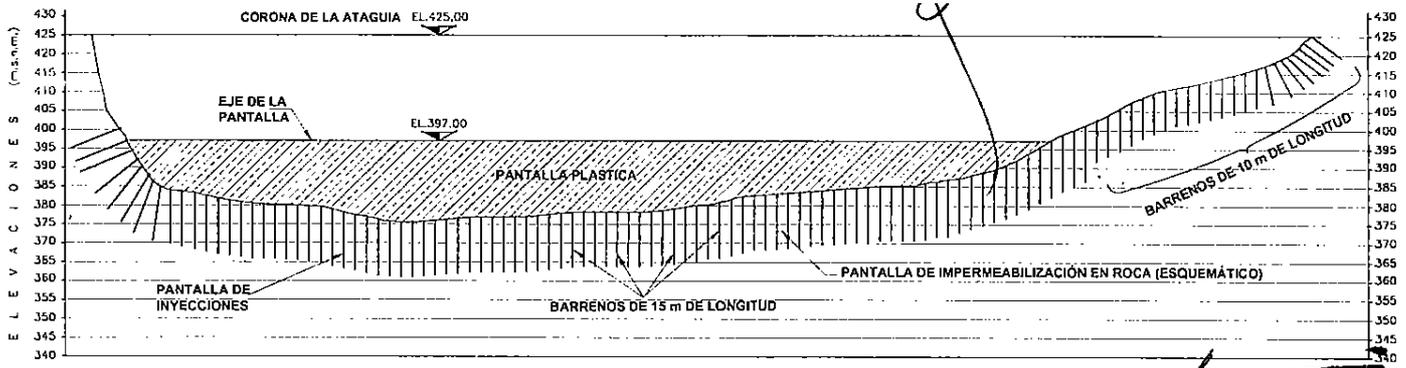
• **Al llegar al Volumen máximo:**

- a) Al llegar al volumen máximo en una primera inyección, sin haberse alcanzado la presión máxima especificada, se suspende la inyección y se bombean 200 litros de agua para lavar el tramo y el carril del barreno y dejarlo en reposo durante 6 horas.
- b) Pasadas las seis horas de haberse suspendido la inyección, se reinicia como un tramo nuevo.
- c) Si con las dos inyecciones anteriores no se logra el sellado del tramo se debe aplicar una tercera inyección, siguiendo las operaciones indicadas en los puntos a) y b).
- d) Si después de la tercera inyección continúa el alto consumo sin llegar a la presión máxima especificada, se ejecutarán barrenos adicionales, como se describe más adelante.

En cualquiera de las tres condiciones anteriores, a juicio de Comisión, si el gasto es cercano al mínimo indicado para dar por sellado un tramo (5 litros/minuto/tramo), se podrá continuar la inyección manteniendo la presión que se esté aplicando por un lapso de 6 a 10 minutos, con el propósito de comprobar si el tramo está a punto de alcanzar el sellado.

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

Pantalla de inyección preatagüa aguas arriba



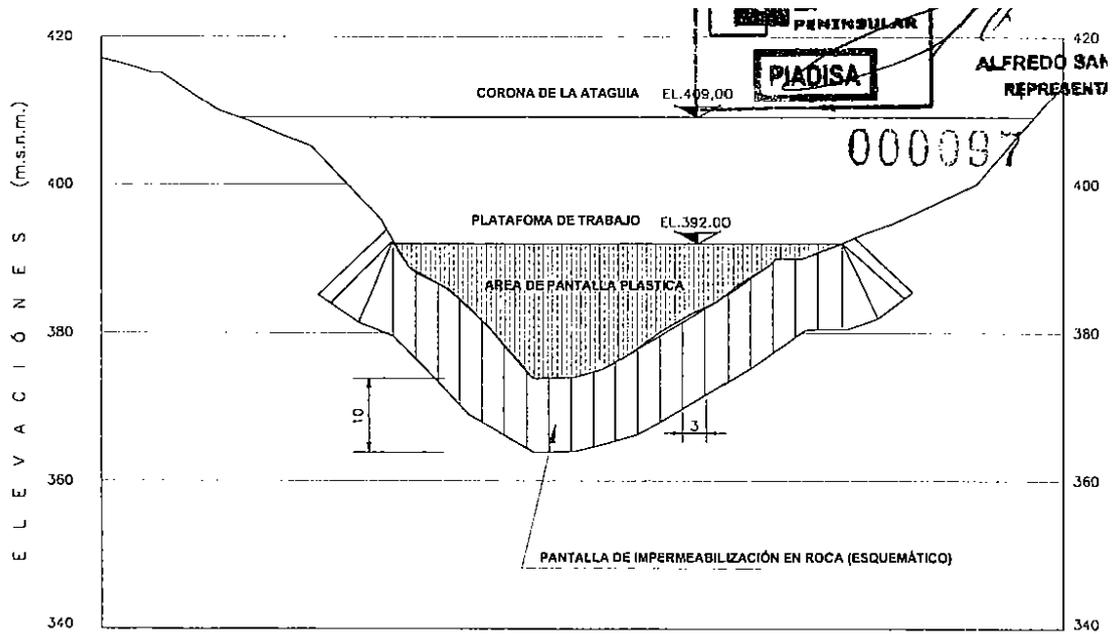
Pantalla de inyección preatagüa aguas arriba

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

- Como se mencionó en los casos donde se alcanza el volumen máximo acumulado en una primera inyección de un barreno, sin tener evidencia de hidrofracturamiento o destaponamiento del terreno, se aplicará un volumen máximo de mezcla de 700, 625 o 500 litros, según la curva GIN que se esté utilizando, y se suspenderá la inyección por un lapso de 6 horas, lavando el tramo inyectado y el carril del barreno al suspender la inyección; y después del tiempo señalado, se debe volver a inyectar como un nuevo tramo o progresión. De ocurrir lo mismo en la 2ª reinyección del tramo, se reanuda la inyección bajo el mismo criterio; solo permitiéndose una última 3ª reinyección; en esta última es indispensable la adición de acelerantes para el fraguado de la mezcla, pudiendo ser silicato de sodio cuya densidad debe ser de 40º Baumé descrito en el inciso 6.4.14.4 ó aplicar morteros con resistencia a la compresión simple compatible con la mezcla; es decir, solo se aplicará un volumen máximo por tramo o progresión de 2100, 1875 o 1500 litros, según la curva GIN utilizada.
- En la inyección del tramo inmediato superior, al descrito en el párrafo anterior, si se tiene un comportamiento similar (con altos consumos), se podrá iniciar la 2ª reinyección con la aplicación de mezclas con acelerante de fraguado o con morteros.
- En barrenos de tercera etapa (con espaciamiento @ 3 m), en el caso específico de que ocurra hidrofracturamiento o destaponamiento sistemático del terreno en tres inyecciones sucesivas de uno o varios tramos será necesario ejecutar dos barrenos adicionales de cierre, uno a cada lado del barreno en cuestión, quedando éstos a 1,50 m de separación (barrenos de 4ª etapa). La profundidad de los barrenos adicionales será 5 m mayor respecto al tramo más profundo donde se haya registrado el alto consumo.



Fotografía 4. Ataguía aguas arriba



Pantalla de inyección ataguía aguas abajo

Vista esquemática de las pantallas de inyección de la preataguía aguas arriba y ataguía.

Concluida la inyección de consolidación, procederemos a realizar la inyección de contacto colocando el obturador 20 cm arriba del contacto pantalla roca a una presión de 0.29 MPa (3.0 kg/cm²).

4.4. RECURSOS

MAQUINARIA Y EQUIPO

Excavadoras sobre orugas Link-Belt LS 118
Excavadoras s/orugas Link Belt LS 108 o similar
Equipo guiado con almeja
Trepano de 10 toneladas
Planta de lodos
Bomba para lodos
Camiones de volteo
Camión pipa
Planta de inyección Häny 650/725 o similar
Compresor portátil 600 PCM

MANO DE OBRA

Se utilizara una cuadrilla por cada pantalla
Una brigada de excavación está constituida por:
Dos operadores especializados de grúa
Dos maniobristas
Ayudantes
Chofer camión volteo
Se utilizara una brigada para la preatagüa aguas arriba y otra para la atagüa aguas abajo.

Una brigada para la fabricación y manejo del lodo está constituido por:

Cabo de oficios
Operador de bomba
Ayudantes generales
Chofer camión pipa

Para los servicios generales:

Mecánico
Soldador
Chofer

MATERIALES

Cemento
Bentonita
Agua
Tanques de almacenamiento
Conexiones y mangueras

4.5. SEGURIDAD

Todas las cargas de izaje con grúa, deben realizarse con operadores y maniobristas calificados, utilizando las herramientas y accesorios adecuados, ser guiadas por cuerdas de polipropileno (viento) de longitudes necesarias según la maniobra. El jefe de obra debe realizar periódicamente una inspección visual de los accesorios de izaje, tales como; eslingas, poleas y sus pernos, estrobos, grilletes y cables de acero del tipo adecuado. El personal debe usar equipo de protección (casco de polipropileno, guantes, goles, botas de hule, etc.), de acuerdo con sus actividades y riesgos identificados.

4.6. MEDIO AMBIENTE

Para el abastecimiento de combustible a la maquinaria y equipo, se debe prever medios de transporte determinados para esta actividad. En los trabajos de reparación y mantenimiento de la maquinaria, el encargado de maquinaria es responsable del transporte de los materiales peligrosos (grasas, aceites, combustibles), realizar de manera responsable las reparaciones y el mantenimiento correspondiente, evitando derrames por mal manejo de las sustancias, así como el retiro de residuos peligrosos para su almacenamiento respectivo en el almacén provisto para el proyecto. El responsable del frente debe asegurarse del aprovisionamiento y retiro periódico de contenedores para la recolección de la basura que se genere por las personas que participan en los trabajos. Para los trabajos de soldadura, los sobrantes de soldadura (colillas) deben ser depositados en recipientes exclusivos para ese fin de semana. El responsable del frente se asegura de proveer letrinas móviles ubicadas en lugares estratégicos y accesibles para su mantenimiento.



CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES.

1. El trabajo en equipo es de vital importancia ya que todos en conjunto le íbamos dando forma a todo el proyecto. Al estar presente en la realización de este enorme proyecto, no tenía una visión muy clara de la importancia que tiene cada uno de los diferentes frentes de trabajo y que fue con el esfuerzo diario en que se ve uno involucrado, en la gran responsabilidad y la confianza de tener cada uno de nosotros como ingenieros asignado a un frente de trabajo y que llegue a comprender la importancia que esto como trabajador implica.
2. Se comprueba que el tratamiento de la roca es un método efectivo y necesario para garantizar la estabilidad del macizo rocoso y las obras que se construyen en el, es fácil de aplicar siempre y cuando se tengan estudios previos de la zona a construir.
3. El proceso constructivo de la pantalla impermeable es un procedimiento preciso que garantiza la estanqueidad de la cimentación de las ataguías siempre que se realice paso por paso sin dejar la calidad del concreto ya que durante su proceso en La Presa La Yesca se presentaron diversos problemas en las inyecciones.
4. En gran medida el colaborar en la construcción de este proyecto y ser partícipe de las diversas problemáticas surgidas en el tiempo en que estuve presente, me fueron dando un sin número de ideas, conocimientos y la formación de un criterio mucho más amplio para la toma de decisiones con respecto al forjado en las aulas de la universidad; de igual forma me dejó una gran experiencia ya que son muy pocos ingenieros los que tienen la oportunidad de trabajar en este tipo de proyectos

BIBLIOGRAFÍA.

Especificaciones de Construcción de Obra Civil del P.H. La Yesca, Jal. Nayarit.

Informe Geológico Final de la Etapa de Preconstrucción del P.H. La Yesca, Jalisco – Nayarit.

Procedimiento de los acarreo y colocación de los materiales en las ataguías.

Construcción de la preataguía aguas arriba y de la ataguía aguas abajo.

Bombeo en el lecho del río y la construcción de la ataguía integrada a la cortina

Procedimiento Detallado de Construcción de las Obras de Desvío. Proyecto Hidroeléctrico 146 CH "La Yesca".