



**INFORME COMPLEMENTARIO DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ FÍSICA DE LA CONTINGENCIA
PRESENTADA EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO**

EVENTO ANALIZADO	TAPONAMIENTO GALERÍA AUXILIAR DE DESVIACIÓN		
LUGAR DEL EVENTO	PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO, ANTIOQUIA		
UNIDAD DE NEGOCIO		ESTUDIO	ANÁLISIS COMPLEMENTARIO DE CAUSA RAÍZ FÍSICA
No. INFORME	SKV373-003-001-INF-003-B	FECHA	28 - Febrero - 2019
METODOLOGIA UTILIZADA			
RESPONSABLE INVESTIGACIÓN	SKAVA CONSULTING S.A.		



TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	OBJETIVO Y ALCANCE	6
3.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO DE LA GAD	6
3.1.	Descripción general	6
3.2.	Formas y dimensiones de los túneles de desvío	8
3.3.	Geología general.....	9
3.4.	Aspectos hidráulicos	9
3.5.	Secuencia de excavación	10
3.6.	Soporte diseñado	11
3.7.	Cronología del desvío del río y taponamiento de la GAD.....	14
3.7.1.	Desvío inicial del río por túneles de desvío izquierdo y derecho.....	15
3.7.2.	Inicio de operación de la GAD	15
3.7.3.	Taponamiento de la GAD.....	15
4.	DESCRIPCIÓN ORGANIZACIONAL DEL PROYECTO	15
4.1.	Descripción organizacional del proyecto para las etapas de diseño y construcción	15
4.1.1.	Diseñador, Constructor e Interventoría	15
4.1.2.	Comités de Diseño y Obra	17
4.2.	Comunicaciones.....	18
5.	DISEÑO DE LA GAD	18
5.1.	Definiciones previas	18
5.2.	Diseño antes del inicio de la construcción	19
5.2.1.	Diseño geotécnico.....	19
5.2.2.	Diseño del revestimiento.....	20
5.3.	Observaciones al diseño antes del inicio de la construcción.....	24
5.3.1.	Observaciones del diseño geotécnico	24



**SKAVA CONSULTING -EMPRESAS PÚBLICAS DE
MEDELLÍN E.S.P.**



Informe Complementario del Análisis de
Causa Raíz

Versión 0

Página 3 de 40

5.3.2.	Observaciones al diseño del revestimiento	25
6.	CONSTRUCCIÓN DE LA GAD.....	31
6.1.	Calidad de la Construcción	31
6.2.	Plan de ejecución	34
6.3.	Ingeniería durante la construcción	35
7.	CONCLUSIONES	38
7.1.	Conclusiones de la construcción	38
7.2.	Conclusiones del diseño y asesoría	38
8.	REFERENCIAS.....	40

1. INTRODUCCIÓN

SKAVA Consulting, en adelante SKAVA, ha elaborado el Estudio de Causa Raíz Física del taponamiento de la Galería Auxiliar de Desviación (en adelante GAD), éste estudio tiene como resultado el “Informe de Estudio de Causa Raíz Física” [Ref. 1]. La conclusión del estudio es que la causa raíz física probable del taponamiento es la erosión progresiva del piso de la GAD, la cual habría ocurrido en zonas de debilidad de la roca (zonas de cizalla) provocada por efectos del flujo del agua.

CAUSA RAÍZ FÍSICA PROBABLE DEL TAPONAMIENTO DE LA GAD
--

Erosión progresiva del piso de la GAD en zonas de debilidad de la roca (zonas de cizalla y/o fallas), provocada por efectos del flujo del agua.
--

En la Figura 1 se muestra el árbol de hipótesis de fallas que se elaboró en el “Estudio de Causa Raíz Física” [Ref. 1]. En éste se observa que se identificaron y analizaron un total veintiocho (28) hipótesis de causa física. Se descartaron veinte (20) hipótesis, seis (6) hipótesis se consideran como probables factores contribuyentes y dos (2) de ellas combinadas son la causa raíz física probable.

Los seis (6) Factores Contribuyentes probables identificados son:

FACTORES CONTRIBUYENTES
1. Detección de singularidades geológicas
2. Elección del soporte del piso
3. Perfil irregular y perturbación por voladura
4. Flujo pulsante
5. Golpe de ariete
6. Oscilación de subpresiones al interior de la roca

Taponamiento en la Galea Auxiliar de Desviación
Capítulo 4.3

Bloqueo de la GAD
Capítulo 4.3

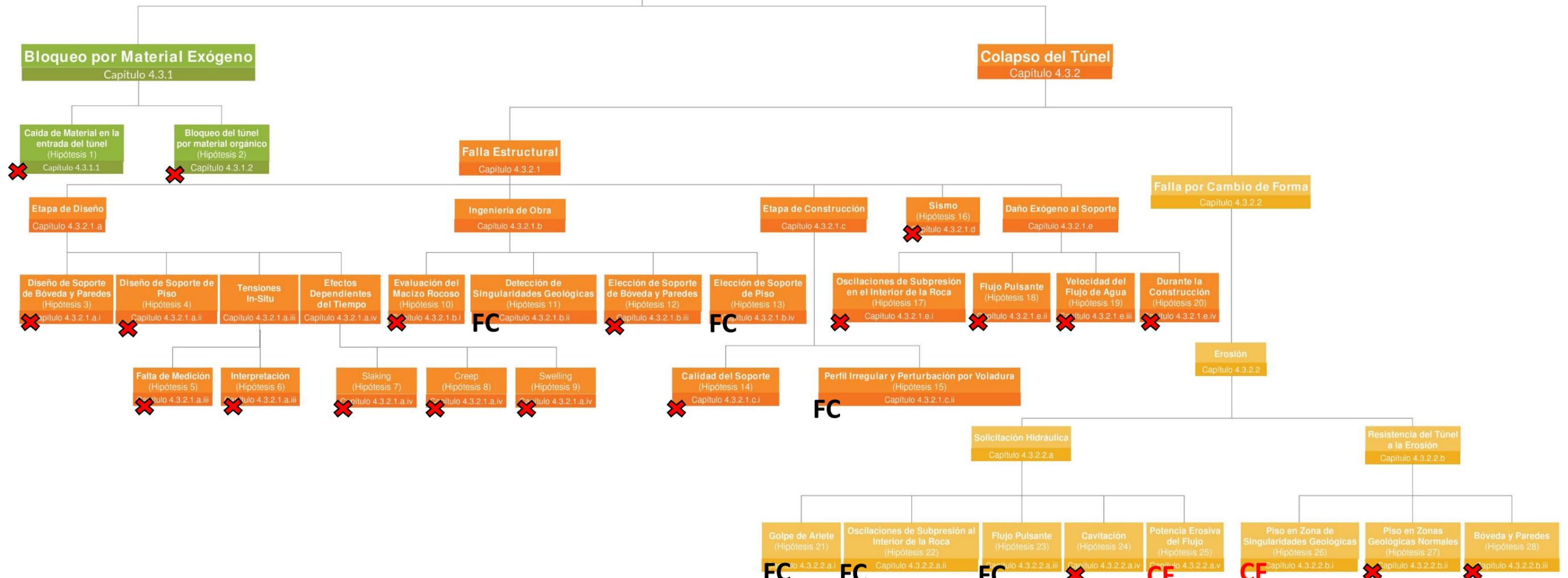


Figura 1. Árbol de Falla



2. OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo del presente informe es profundizar el análisis de la razón por la cual se pudo haber materializado la hipótesis, de la causa raíz física probable que provocó el taponamiento de la GAD. Y con esto, se determine si pudo haberse presentado alguna desviación en cuanto a la aplicación de normas, regulaciones o buenas prácticas de ingeniería.

El alcance del informe comprende sólo lo ocurrido en la GAD, desde la etapa de diseño y hasta el momento del taponamiento de ésta. No se analiza los eventos ocurridos posteriormente, es decir, después del 30 de abril de 2018. Tampoco se analiza el resto de las obras del proyecto.

Se analizan, las etapas de diseño, construcción y operación de la GAD; dando énfasis a los factores contribuyentes probables y a la causa raíz física probable, identificados en el “Informe de Estudio de Causa Raíz Física” [Ref. 1].

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO DE LA GAD

3.1. Descripción general

El Proyecto Hidroeléctrico Ituango se compone fundamentalmente de una presa de enrocado con núcleo impermeable. Esta se encuentra localizada inmediatamente aguas arriba de la desembocadura del río Ituango al río Cauca; adicionalmente cuenta con obras para descarga de fondo e intermedia y un vertedero en canal abierto para evacuación de crecientes, todas estas obras se ubican en la margen derecha del río Cauca. En esta misma margen se localizan las obras para generación que incluyen ocho captaciones sumergidas conectadas a las conducciones en presión que alimentan ocho grupos turbina – generador de eje vertical que se alojan en la caverna de máquinas y conectados por galerías de barras a ocho bancos de transformadores situados en la caverna de transformadores. El agua turbinada llega a dos cavernas independientes que actúan como almenaras de aguas abajo. De cada almenara se desprenden dos túneles de descarga que devuelven el caudal al río Cauca.

Para la construcción de estas obras se desarrolló un sistema de desvío temporal del río compuesto inicialmente por dos (2) túneles de desviación, llamados túnel izquierdo y túnel derecho; luego, por necesidades ajustes de diseño durante la construcción, y de cumplimiento de plazos surge el túnel llamado Galería Auxiliar de Desviación.

El fundamento de adicionar un nuevo túnel al sistema de desvío, de acuerdo con lo indicado por el diseñador, en el documento I-I-2194-034-R01 Rev.0 [Ref. 2] “ANÁLISIS DE REQUERIMIENTO DE REVESTIMIENTO”. Dicha explicación se presenta en el siguiente párrafo.

“El Sistema Auxiliar de Desviación (SAD) surge como una medida remedial o alterna, para evitar el retraso en la entrada en operación del proyecto, ante los problemas que impidieron la construcción oportuna de las estructuras de operación de las compuertas en la entrada de los Túneles de Desviación Izquierdo y Derecho. Por lo anterior, las compuertas originalmente previstas para dichos túneles se colocaron dentro del nuevo sistema de desviación, conjuntamente con las compuertas y equipos de la descarga de fondo, con el fin de permitir el inicio al llenado del embalse”

A continuación, en la Figura 2, se presenta el esquema de disposición general de las obras más importantes del proyecto.

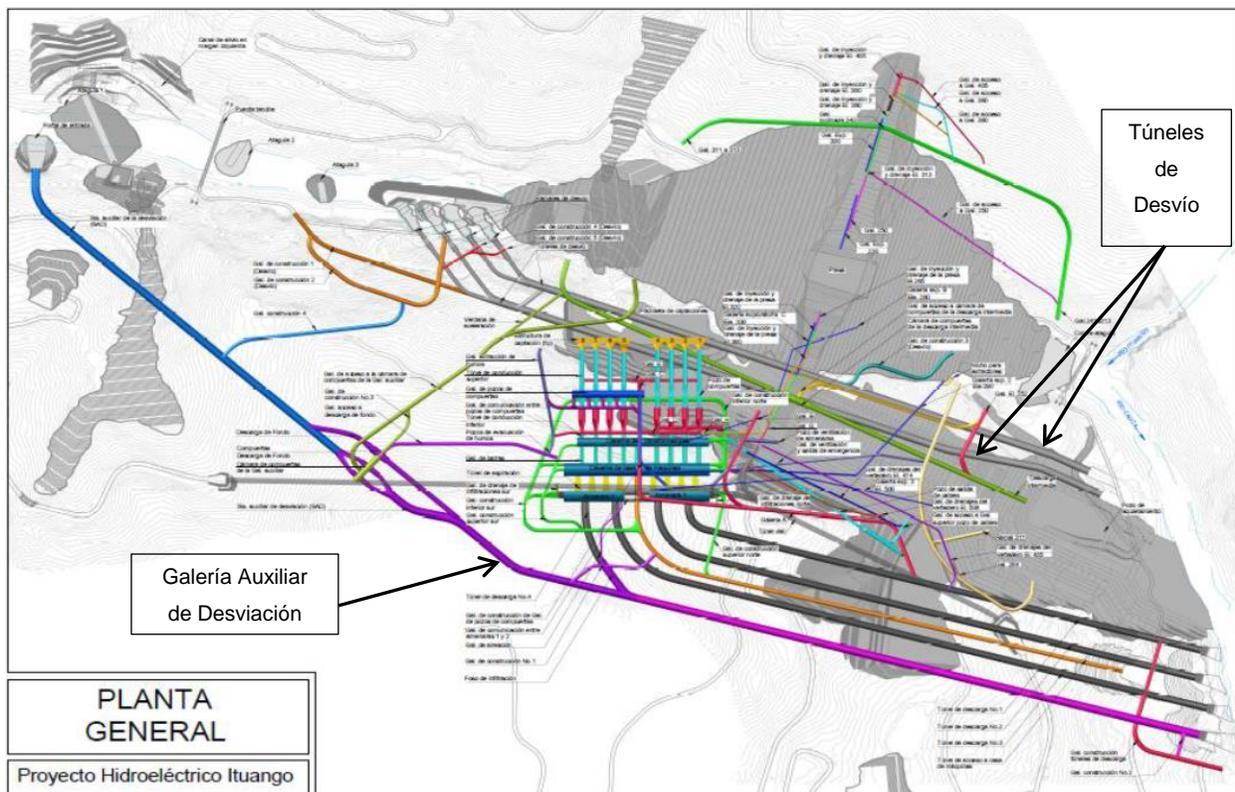


Figura 2. Disposición General de las Obras. Vista en planta.
(Adaptado de Ref. 3)

En la Figura 3 se muestra una vista isométrica de todas las obras subterráneas del proyecto. Además se indica en colores los distintos sectores que se definieron para la GAD. Los sectores definidos para la GAD son los siguientes:

- **Sector 1:** Ventana de aceleración, Galería de acceso a cámara de compuertas de la GAD, Galería de construcción No. 3, Cámara de operación de las compuertas de la GAD y pozos de las Compuertas deslizantes de la GAD.
- **Sector 2:** GAD túnel principal y galería de construcción N.3
- **Sector 3:** GAD túnel principal, Ramales izquierdo y derecho, Galería de construcción No.1, Galería de aireación, Galería de acceso a cámara de Compuertas de la descarga de fondo, Túnel de descarga de fondo y Cámara de compuertas de la descarga de fondo.
- **Sector 4:** GAD túnel principal (futuro túnel de descarga No.4) y galería de construcción No.2.

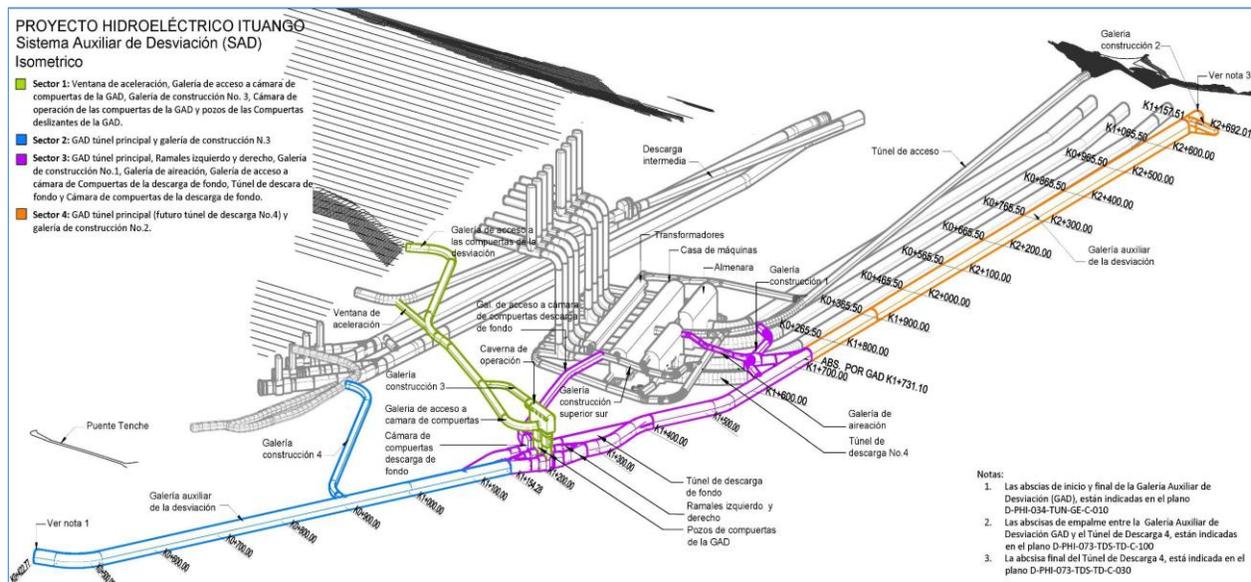
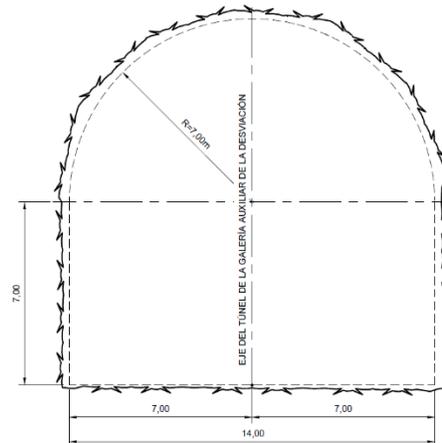


Figura 3. Sectorización empleada para la construcción de la GAD. Vista isométrica.
(Adaptado de Ref. 3)

3.2. Formas y dimensiones de los túneles de desvío

Los tres túneles de desvío, es decir, el izquierdo, derecho y la GAD, fueron diseñados cada uno de ellos con la misma forma y dimensiones. La forma es del tipo arco de medio punto, cuyas dimensiones son 14 m de ancho basal y 14 m de alto, tal como se presenta en la Figura 4.

**Figura 4.** Geometría de los túneles de desvío.

3.3. Geología general

Todas las obras subterráneas del proyecto, incluidas los túneles de desviación, se emplazan en la margen derecha del río Cauca. Esta, de acuerdo a lo expresado en el Informe de Caracterización Geológica Geotécnica del sitio [Ref. 4] corresponde a un macizo rocoso compuesto principalmente por rocas metamórficas de edad paleozoica y secuencias ofiolíticas con presencia de rocas ígneas y sedimentarias. Estructuralmente se puede decir que todo el sistema se encuentra dominado por el sistema de fallas Cauca-Romeral y algunos de sus sistemas asociados como las fallas “Mellizo” y “Tocayo”.

3.4. Aspectos hidráulicos

Desde el punto de vista hidráulico, el diseño del desvío se hizo de tal forma que cada uno de los tres túneles por sí sólo es capaz de desviar el caudal medio del río Cauca, funcionando hidráulicamente con escurrimiento libre. El caudal medio del río Cauca es de 1.000 m³/s.

De acuerdo a lo expresado por el Diseñador, “SAD-Presentacion-Skava-HidrologiaHidraulica” [Ref. 5], el diseño del Sistema Auxiliar de Desvío (en adelante SAD) contemplaba un nivel de seguridad hidrológico mínimo de 500 años de período de retorno. Una gráfica explicativa se presenta en la Figura 5.

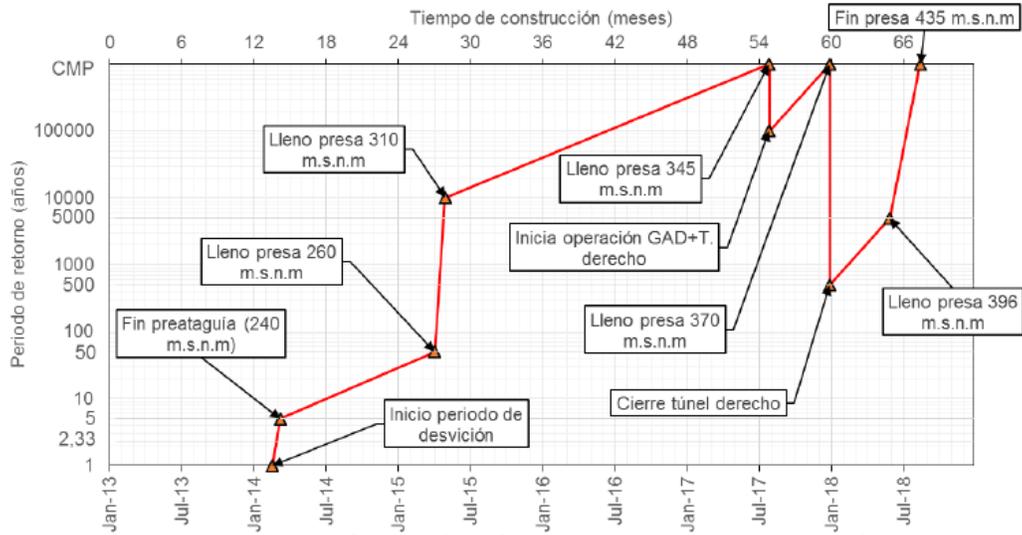
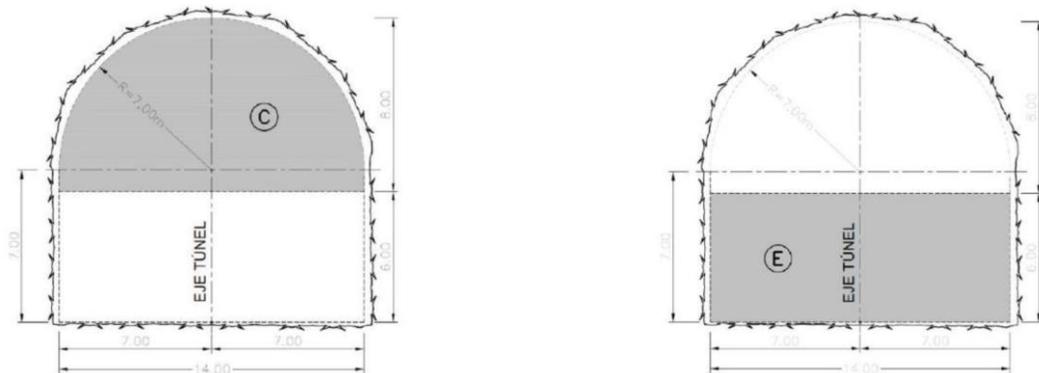


Figura 5. Diseño Operación y Seguridad sistema de desviación.

3.5. Secuencia de excavación

De acuerdo a lo expresado por la interventoría, en el documento PHI-IFF-LC1-011 Rev. 0 [Ref. 6], la metodología constructiva seleccionada para la GAD fue la de perforación y voladura, con la particularidad de que dadas las dimensiones de estos túneles se excavó en dos etapas. La primera correspondiente a la bóveda del túnel y la segunda correspondiente al banco del túnel. En las Figura 6 (a) y (b) se muestra un esquema explicativo.



(a) Bóveda, primera etapa de excavación.

(b) Banco, segunda etapa de excavación.

Figura 6. Esquema explicativo de metodología de excavación.

3.6. Soporte diseñado

La metodología utilizada para la definición, durante la construcción, el tipo de soporte a instalar consiste en lo siguiente. Cada cierta cantidad de pasos de avance de excavación, se hace una evaluación de la calidad geotécnica del macizo rocoso, para esta evaluación se emplea la clasificación geomecánica del índice Q de Barton (NGI, 2015) [Ref. 7]. Utilizando el parámetro Q se clasifica la roca como calidad I, II, III o IV. Luego, en los planos aprobados para construcción, para cada calidad de roca existe un soporte, estos son soportes tipo I, II, III y IV. La relación entre la calidad de roca y tipo de soporte es biunívoca.

En el plano de soporte D-PHI-C34-TUN-EXC-010 revisión 1 [Ref. 8], mostrado en la Figura 7 se muestra los soportes.

Los rangos de valores del índice Q para la clasificación geotécnica de la calidad de roca I, II, III y IV y los correspondientes soportes a instalar se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores Q para las rocas Tipo I, II, III y IV y los correspondientes soportes para la GAD en el sector 2.

Galería auxiliar de desviación Sector 2					
Sección:	Herradura con paredes rectas (14,0m x 14,0m)		Abscisa inicial	Abscisa final	Longitud
Área:	178,60 m ²		K0+465,50	K1+154,28	688,78 m
TIPO I			TIPO II		
Q	Bóveda	Hastial	Q	Bóveda	Hastial
>20	Pernos BRL 8 L=6m donde se requiera		3-20	Pernos BRL 8 L=6m espaciados cada 1,8m al tresbolillo	Pernos BRL 8 L=6m espaciados cada 2,5m al tresbolillo
	Concreto lanzado: Dos capas de 0,05m con fibra sintética donde se requiera			Concreto lanzado: Dos capas de 0,05m con fibra sintética	
TIPO III			TIPO IV		
Q	Bóveda	Hastial	Q	Bóveda	Hastial
0,3-3	Pernos BRL 8 L=6m espaciados cada 1,5m al tresbolillo	Pernos BRL 8 L=6m espaciados cada 2,0m al tresbolillo	<0,3	Perfil metálico HBE 160 con área de 54,3 m ² y momento de inercia de 2492 cm ⁴ , espaciado cada 1,0m entre ejes.	Concreto lanzado: Dos capas de 0,05m con fibra sintética en bóveda y hastiales y malla electrosoldada donde se requiera.
	Concreto lanzado: Dos capas de 0,05m con fibra sintética en bóveda y hastiales y malla electrosoldada donde se requiera.				
Observaciones: El concreto lanzado tiene una resistencia de 28 MPa a los 28 días. Perforaciones para drenaje 51mm y longitud mínima de 4m con tubo de salida donde se requiera.			Losa de piso concreto hidráulico de 35 MPa e=0,30 m con barras #5 a 0,25 en ambas direcciones (recubrimiento 0,08m) Pernos BAL 8 L=2 m al tresbolillo		

(*) En el sector 2 de la GAD, el diseño definió que la losa de piso sólo se instalaría en terreno tipo IV.

Hay que mencionar que la definición de los rangos de calidad de roca (roca tipo I, II, III y IV) y los correspondientes soportes fueron definidos por el diseñador en la etapa de ingeniería previa a la construcción. Por otra parte, durante la construcción, la evaluación del macizo rocoso, la clasificación del



tipo de terreno; la realizaron en conjunto la Asesoría y el Constructor. Para realizar la clasificación del macizo rocoso ambos utilizaron mapeos geológico-geotécnico del frente de excavación.

Es importante señalar, a modo de contexto, que las calidades de roca y tipos de soportes definidos por el Diseñador-Asesor para la GAD son similares a los definidos previamente para los túneles de desviación izquierdo y derecho. Con la diferencia en el diseño de la losa de piso. Durante la etapa de diseño, los túneles izquierdo y derecho contemplaban la losa de piso sistemática a todo lo largo de ellos. Mientras que el diseño de la GAD indica que la losa de piso se instalará sólo para la calidad de roca tipo IV.

Este cambio de criterio de diseño se debe a que, según lo evidenciado en la comunicación D-PHI-CCE-ADM-1-C4264 [Ref. 9], durante la construcción de los túneles de desviación izquierdo y derecho se realizó una evaluación de la condición de la roca, mediante esta evaluación se determinó que en aproximadamente un 25% de la longitud de estos no era necesaria la instalación de la losa de piso. Esta metodología traspasa parte del diseño de la etapa de ingeniería previa a la etapa de ingeniería durante la construcción. Esto es una práctica habitual en la construcción de túneles.

De acuerdo a los cálculos de evaluación de erosión realizados por SKAVA esta decisión es aceptable, siempre y cuando se realice correctamente una evaluación y diagnóstico del piso.

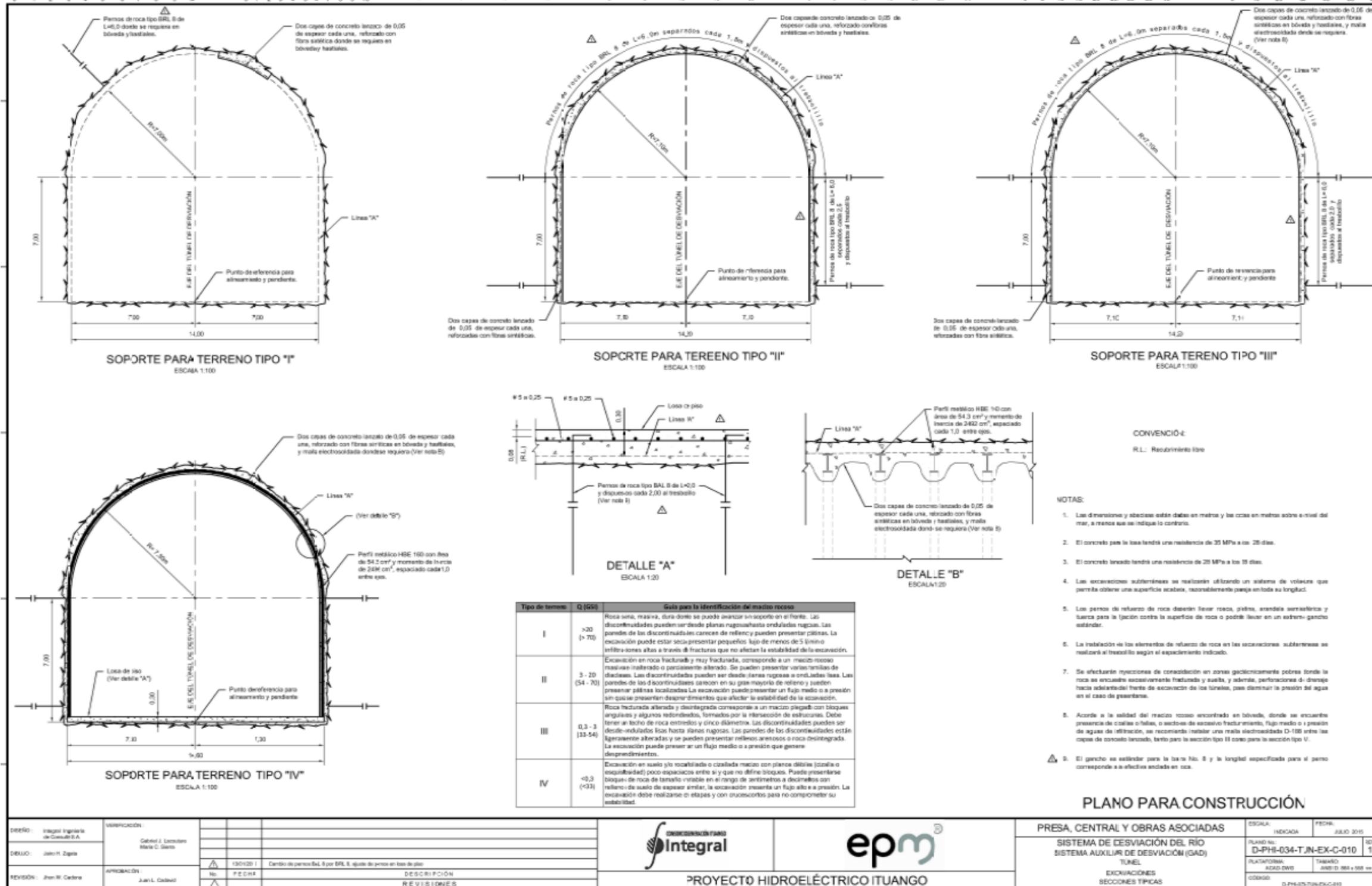


Figura 7. Plano de soporte y excavación de la GAD.

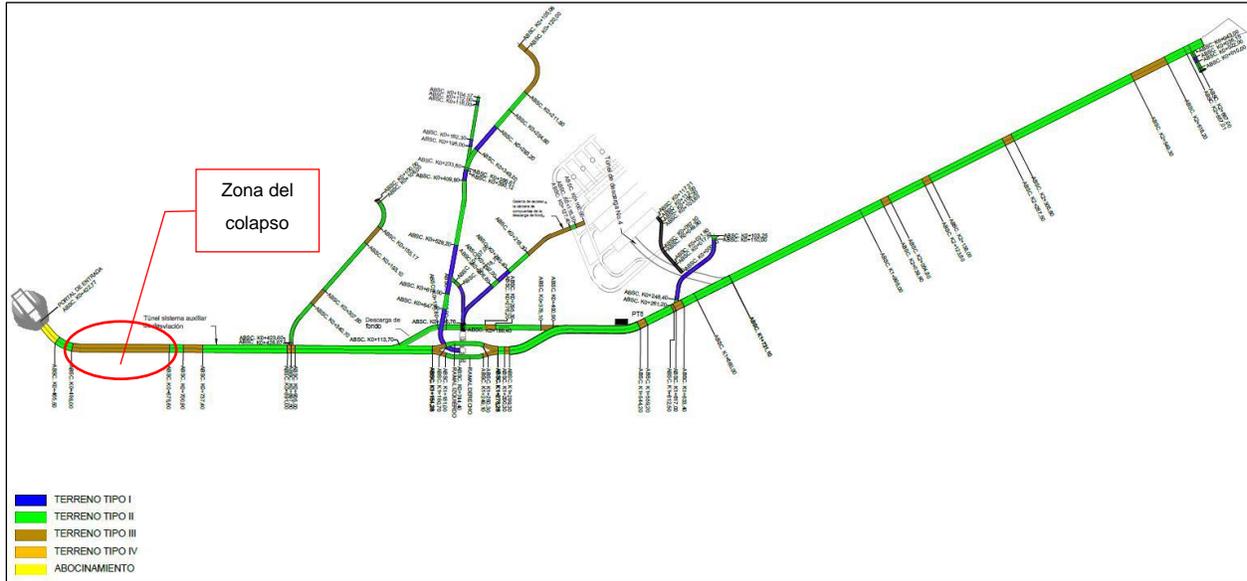


Figura 8. Soportes instalados en el SAD. Fuente: presentación hecha por la Interventoría Ago/2018.

3.7. Cronología del desvío del río y taponamiento de la GAD

Para el entendimiento de lo ocurrido en el colapso de la GAD es necesario conocer bien la cronología de los eventos sucedidos antes y durante el taponamiento. En la Figura 9 se muestran en una línea de tiempo los hitos importantes con sus correspondientes fechas y niveles del embalse.

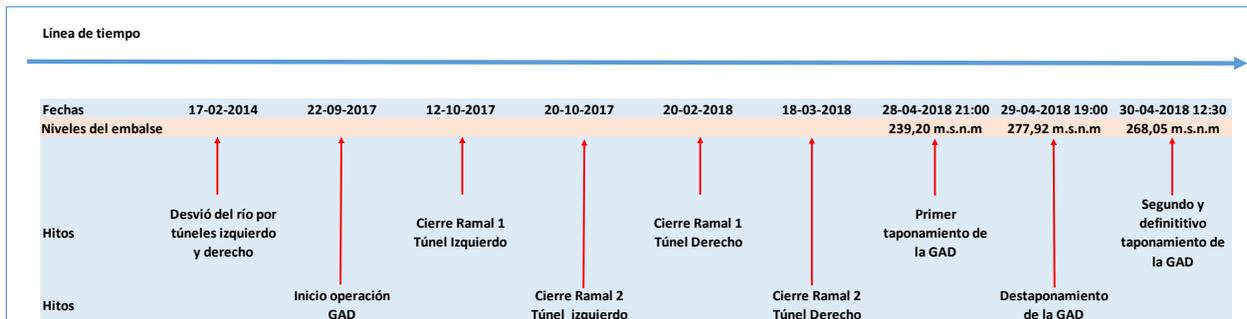


Figura 9. Línea de tiempo del desvío del río y taponamiento de la GAD.



3.7.1. Desvío inicial del río por túneles de desvío izquierdo y derecho

El desvío del río Cauca se produce el día 17 de febrero de 2014, fecha en la cual entran en operación los túneles de desvío izquierdo y derecho.

3.7.2. Inicio de operación de la GAD

El 22 de septiembre de 2017 comenzó a operar la GAD. Con esto se iniciaron los trabajos de cierre de los túneles izquierdo y derecho. Primero se cerró el Ramal 1 (Túnel Izquierdo), el 12 de octubre de 2017, luego el Ramal 2 (Túnel Izquierdo), el 20 de octubre de 2017. A continuación el 20 de febrero de 2018 y 18 de marzo de 2018 se cerraron los ramales del túnel derecho.

Se destaca que los túneles izquierdo y derecho operaron sin la GAD desde el 17 de febrero de 2014 hasta el 22 de septiembre de 2017, esto implica que operaron durante 3 años y 7 meses sin la GAD.

A partir del 18 de marzo de 2018 el sistema de desvío del río Cauca cuenta sólo con la GAD.

3.7.3. Taponamiento de la GAD

El primer taponamiento de la GAD se produce el 28 de abril de 2018, luego el día 29 de abril de 2018 se destaponó, finalmente se produjo un segundo y definitivo taponamiento el día 30 de abril de 2018.

4. DESCRIPCIÓN ORGANIZACIONAL DEL PROYECTO

Para efectos de entender todos los aspectos que podrían haber influido en el taponamiento de la GAD, es necesario tomar en consideración el contexto general del proyecto durante las etapas de diseño, construcción y operación de la GAD.

Se comenzará por describir el contexto organizacional y la asignación de roles de los principales actores que estuvieron involucrados en el proyecto de la GAD.

4.1. Descripción organizacional del proyecto para las etapas de diseño y construcción

4.1.1. Diseñador, Constructor e Interventoría



El diseño y construcción de la GAD se gesta una vez desviado el río por los túneles de desvío originales, es decir durante la construcción de las obras principales del proyecto. Por lo que se decide emplear a los mismos actores que se estaba empleando para el resto del proyecto.

Por lo anterior el diseño de la GAD fue ejecutado por la empresa de ingeniería Consorcio Generación Ituango. El alcance del diseño comprende el estudio hidrológico, estudio geológico-geotécnico, diseño hidráulico, diseño de las obras hidromecánicas (compuertas), diseño estructural de las obras civiles, y el diseño del soporte del túnel; es decir, fue el responsable de diseño multidisciplinario y total de la GAD.

Al Consorcio Generación Ituango, además de ejecutar el diseño de la GAD (previo a la etapa de construcción), se le encargó la Asesoría durante la construcción. El alcance de esta labor es hacer acompañamiento durante la construcción cumpliendo el rol, entre otros, de: mapeo geológico-geotécnico del frente de excavación, clasificar geotécnicamente el macizo rocoso, definir el tipo de soporte a instalar, ejecutar los planos de obra terminada del túnel y ajustar el diseño, en los casos en que las condiciones reales encontradas durante la construcción fueran distintas de las supuestas durante la etapa de estudios y diseño. En adelante, en este informe al Consorcio Generación Ituango, se le denominará como Diseñador-Asesor.

La construcción de la GAD se le encargó al Consorcio CCC Ituango, quien estaba a cargo de la construcción de las obras principales del proyecto. CCC Ituango tenía como alcance construir la GAD de acuerdo a lo señalado en los planos y especificaciones del proyecto. Las obras debían construirse con la calidad indicada en el diseño, de forma segura, cumpliendo los plazos y los costos del proyecto. En adelante, en este informe al Consorcio CCC Ituango se le denominará como Constructor.

Al consorcio Ingetec-Sedic dentro del marco de la Interventoría de las obras del proyecto se le encargó además la Interventoría de la construcción de la GAD. El alcance de la interventoría fue velar para que el Contratista de Construcción ejecutara las obras de la GAD de acuerdo al diseño, es decir, según se indica en los planos y especificaciones. También tenía la responsabilidad de hacer el Aseguramiento y Control de Calidad de la construcción. Además debía llevar el control de la programación y los costos del proyecto, velando por que se cumplieran los plazos, hitos y el presupuesto. Es la Interventoría quien debía detectar las no conformidades durante la Construcción y hacer que estas desviaciones fuesen corregidas. En adelante, en este informe al consorcio Ingetec-Sedic se le denominará como Interventoría.

4.1.2. Comités de Diseño y Obra

De acuerdo a lo informado por EPM a SKAVA, para efectos de organización, administración y comunicaciones durante la etapa de construcción se constituyeron dos comités, estos son el Comité de Diseño y el Comité de Obra. Se debe señalar que estos comités se constituyeron para ver todo el proyecto, es decir, la GAD es sólo una de la parte de las obras del proyecto que son atendidas en estos comités.

En el Comité de Diseño participan EPM, el Diseñador-Asesor y la Interventoría. Tiene por objetivo reunir a estos tres actores y “resolver inquietudes y dudas constructivas que se han generado en la obra y se plantean soluciones para el normal desarrollo de las obras” del proyecto.

En el Comité de Obra participan la Interventoría y los Contratistas de Construcción de obras, montaje, pruebas y puesta en operación del proyecto. Tiene por objetivo reunir a estos actores con el propósito de evaluar el estado del proyecto y avance de las diferentes actividades, discutir temas de trascendencia para el proyecto, solucionar inquietudes y dudas constructivas, elevar inquietudes de diseño y demás requerimientos que sean necesarios abordar para el normal desarrollo de las obras.

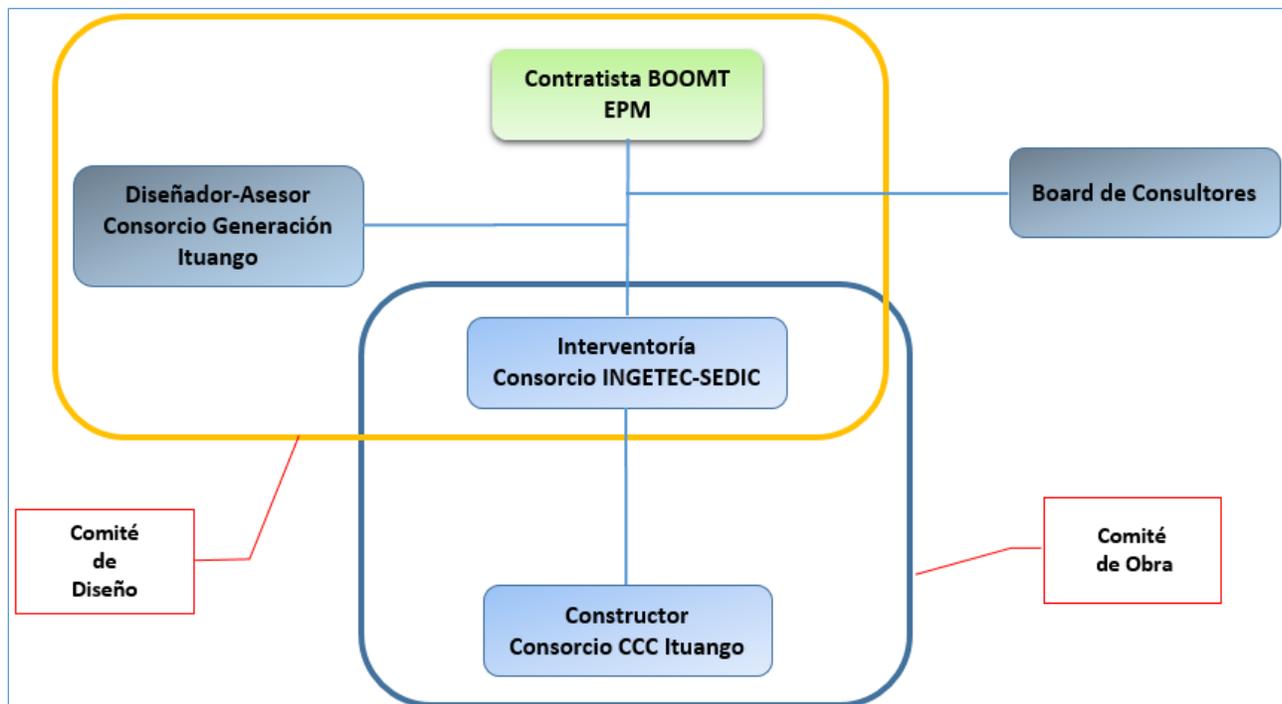


Figura 10. Organización proyecto Ituango en la etapa de construcción.

4.2. Comunicaciones

Durante la etapa de construcción EPM, el Diseñador-Asesor y la Interventoría compartían en terreno el mismo edificio de oficinas, en el mismo campamento. Esto a juicio de SKAVA, es una ventaja del proyecto, ya que acerca a los grupos de profesionales involucrados en el proyecto, permitiendo que las comunicaciones fluyan rápidamente.

Desde el punto de vista contractual las comunicaciones oficiales entre el Diseñador-Asesor y el Constructor eran a través de la Interventoría. De forma similar, las comunicaciones oficiales entre el Diseñador-Asesor e Interventoría eran a través de EPM.

5. DISEÑO DE LA GAD

5.1. Definiciones previas

El diseño y selección definitiva de los soportes se dividió en dos etapas. Estas son:

- Diseño antes del inicio de la construcción.
- Diseño durante la etapa de construcción.

Diseño antes del inicio de la construcción.

La primera actividad correspondió a las investigaciones geológicas geotécnicas, luego con esta información se hizo un modelo interpretativo de la condición geológica-geotécnica del terreno, finalmente se hizo el diseño de la GAD.

En el numeral 5.2 se resume lo hecho por el Diseñador-Asesor antes del inicio de la construcción. En el numeral 5.3 se presentan los comentarios de SKAVA respecto del diseño antes del inicio de la construcción.

Verificación y ajustes del Diseño durante la etapa de construcción

En esta etapa de construcción, el Diseñador-Asesor tuvo la responsabilidad de la evaluación de la calidad geotécnica de la roca y la definición del tipo de soporte a instalar.

Era labor del Diseñador-Asesor asegurar, con su definición de soporte durante la construcción, que el túnel sea estable para la etapa de construcción y operación. Teniendo presente las futuras condiciones de

operación que pudiesen significar solicitudes distintas y adicionales a las que ocurren durante la construcción, por ejemplo las solicitudes que produce el flujo de agua, con esto en mente, evaluar si el diseño hecho en gabinete en la etapa anterior era adecuado y suficiente para resistir todas las solicitudes y condiciones reales observadas en terreno.

5.2. Diseño antes del inicio de la construcción

Para efectos del objetivo planteado en este informe, se procederá a revisar el diseño de la GAD hecho por el Diseñador-Asesor, tomando en consideración el diseño geotécnico y el diseño del revestimiento. Esta revisión comprende sólo el sector 2 de la GAD, es decir, desde la progresiva K 0+422.77 hasta la progresiva K 1+154.28, ya que es la zona en la que se produjo el taponamiento. No se hará la revisión del diseño hidráulico, tampoco al diseño de las estructuras civiles como son las estructuras del portal de entrada y el sector de compuertas.

De acuerdo a los antecedentes que ha recibido SKAVA, el Diseñador-Asesor entregó como producto de su trabajo los siguientes documentos:

- ANEXO TÉCNICO – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN - CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA, CENTRAL Y OBRAS ASOCIADAS, de marzo 2012, [Ref. 10].
- Plano D-PHI-034-TUN-EX-C-010 rev.1 Excavaciones Secciones Típicas, [Ref. 8].
- “MEMORIA DE CALCULO GEOTÉCNICO”, código I-M-2194-034-GYG-01, [Ref. 11].
- “ANÁLISIS DE REQUERIMIENTO DE REVESTIMIENTO”, código I-I-2194-034-R01, [Ref. 2].

Es importante señalar que el plano D-PHI-034-TUN-EX-C-010 en su revisión 0, aprobado para construcción, fue recibido por el contratista mediante la carta INT-CC-CCCI-917/15 el día 10 de agosto de 2015. La construcción de las obras subterráneas de la GAD inició el 14 de octubre de 2015 [Ref. 3].

5.2.1. Diseño geotécnico

En el documento denominado “MEMORIA DE CALCULO GEOTÉCNICO” [Ref. 11] se presenta el diseño geotécnico de la GAD.

En la introducción del informe se describe el contenido de éste. En el párrafo siguiente se transcribe el contenido del informe.

“La primera parte de este informe contiene las generalidades del proyecto, donde se describe la configuración geométrica la GAD. Seguidamente, se describe la geología donde está ubicado la excavación. En este mismo apartado se presentan los levantamientos de campos realizados por Integral S.A, tanto a nivel superficial como a nivel subterráneo de las obras excavadas hasta la fecha. Luego se describe la metodología para el diseño de la excavación, subterránea y superficial. Definida la metodología y la caracterización geológica, se presenta la caracterización geotécnica para la roca intacta y para el macizo rocoso, así como sus discontinuidades. Finalmente se presenta el diseño del sostenimiento”.

5.2.2. Diseño del revestimiento

En el documento denominado “ANÁLISIS DE REQUERIMIENTO DE REVESTIMIENTO” [Ref. 2], de fecha 28 de agosto de 2018, se presenta el estudio que define el requerimiento o no de revestimiento de la GAD.

En la introducción del informe se describe el contenido de este. En el párrafo siguiente se transcribe el contenido del informe.

“En este documento se presentan los antecedentes, criterios de diseño y análisis principales realizados para la definición del tipo de revestimiento permanente requerido para la correcta operación de la Galería Auxiliar de Desviación-GAD), obra principal del Sistema Auxiliar de Desviación-SAD.”

En los numerales siguientes se procede a describir y analizar lo ejecutado por el diseñador en el documento “ANÁLISIS DE REQUERIMIENTO DE REVESTIMIENTO” [Ref. 2].

5.2.2.1. Condiciones hidráulicas de diseño

En el informe se describe en términos generales la operación hidráulica del túnel y las condiciones que controlan el diseño del revestimiento. A continuación se hace un resumen de los principales parámetros hidráulicos:

i. Velocidades de operación

Las velocidades consideradas en el diseño son las siguientes:

- Velocidad máxima de diseño= 17,2 m/s
- Velocidad mínima de diseño= 3,5 m/s
- Velocidad media de diseño= 5.1 m/s (50% de probabilidad de excedencia)

En la Figura 11, se observa que existe un 40% de probabilidad de excedencia para la velocidad de 6 m/s. También se observa que existe un 90% de probabilidad de excedencia para la velocidad por sobre 4 m/s, es decir, prácticamente todo el tiempo la GAD estará operando con velocidades altas (ver en Tabla 2 valores recomendados por distintos autores). Debido a esto, hay que prestar especial atención a los efectos que generan las velocidades altas en túneles hidráulicos, como por ejemplo: la erosión y cavitación.

Tabla 2. Velocidades de flujo recomendadas en túneles no revestidos.

Autor	Referencia	Velocidad recomendada
Brox [Ref. 13]	Practical Guide to Rock Tunneling	Menor a 3 m/s
Humphries [Ref. 14]	Design and Construction of Unlined Water Tunnels – an Update	Menor a 5 m/s
Benson [Ref. 15]	Design of Unlined and Lined Pressure Tunnels	Menor a 4 m/s Recomendado 2 - 3 m/s
U.S. Army corps of Engineers [Ref. 16]	Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rocks	Menor a 3 m/s para túneles sin revestimiento y menor a 6 m/s túneles revestidos en concreto

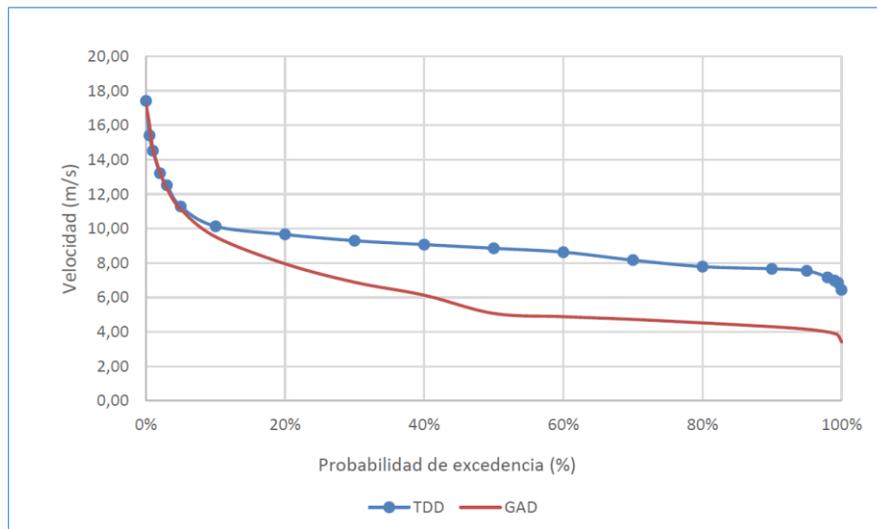


Figura 11. Comparación velocidades de diseño original (TDD) durante la construcción de la Descarga de fondo y GAD.
Tomada de Ref. 17.

ii. Flujo de transición

De acuerdo a lo señalado en la Memoria de Cálculo Hidráulico [Ref. 17], el 70% del tiempo la GAD operará a flujo libre, por lo tanto el 30% restante el flujo será en presión o en transición.

En la Figura 12 se presenta la curva de calibración teórica de la Galería Auxiliar de Desviación, en la cual se observa la variación del nivel del embalse con respecto al caudal conducido por el sistema de desviación.

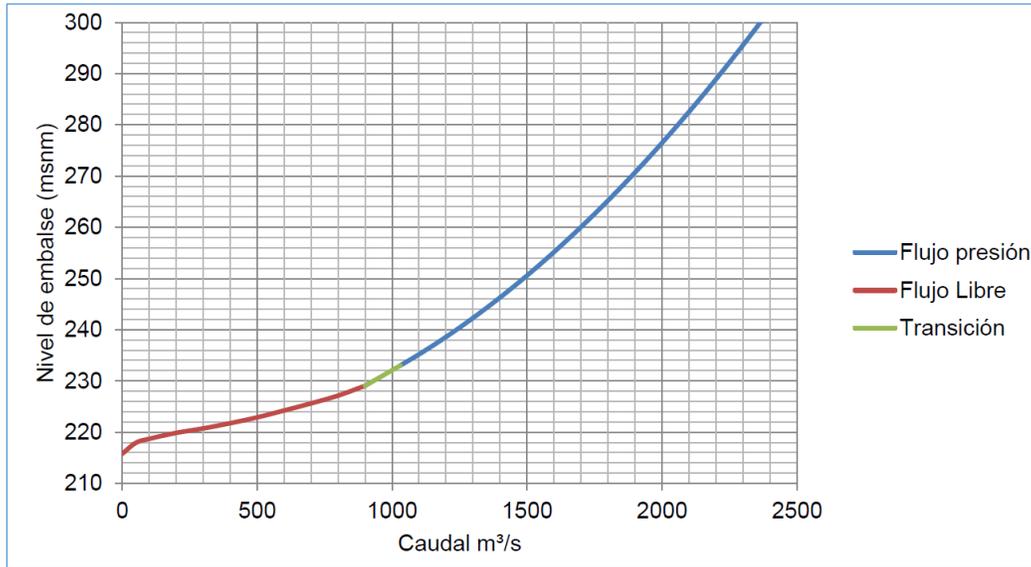


Figura 12. Curva de calibración teórica de la Galería Auxiliar de Desviación.
Tomada de Ref. 17.

Es importante observar en la Figura 12 que para los niveles del embalse comprendidos entre 228 msnm y 234 msnm (aproximadamente) el flujo es de transición (flujo pulsante). Durante las transiciones entre flujo libre y flujo en presión se producen en el túnel variaciones de presión no controladas sobre el perímetro de éste, similares a pulsaciones. Las pulsaciones de presión producen fuerzas de presión y succión sobre la roca. Si previamente se ha iniciado un proceso erosivo, las pulsaciones de presión son un Factor Contribuyente Probable adicional que aceleraría la erosión.

Durante los días previos al taponamiento inicial de la GAD (28 de abril), los niveles del embalse estuvieron alrededor a 234 msnm (ver Figura 13), es decir, muy cerca del límite superior de la zona de transición del flujo, por lo que probablemente se produjo un flujo pulsante, lo cual sería un factor contribuyente para la Causa Raíz Física Probable del colapso.

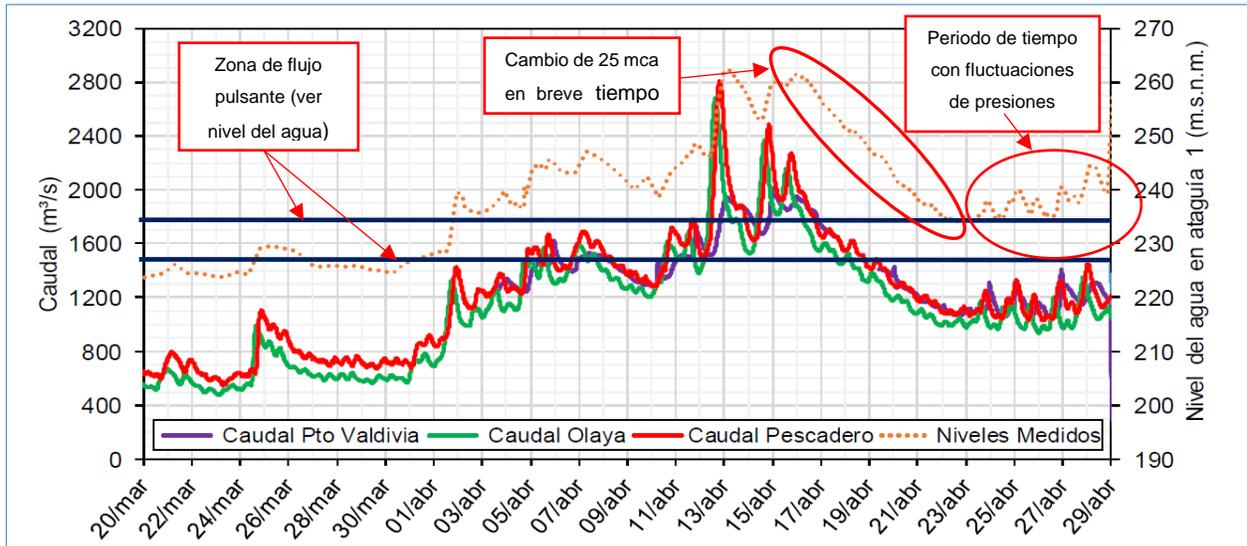


Figura 13. Caudales y niveles en el embalse días previos al taponamiento de la GAD.
Modificado de Presentación hecha Integral a SKAVA Ref. 5.

5.2.2.2. Estados de carga

En este informe se señala que se consideraron las condiciones hidráulicas de operación del túnel, es decir, se verificaron los siguientes “estados de carga”:

- Presión exterior.
- Presión interior.
- Velocidad del flujo de agua.

5.2.2.3. Verificaciones realizadas

5.2.2.3.1. Verificación para presión exterior

El Diseñador-Asesor verificó el caso en que la presión exterior supera a la interior, generando una subpresión que pudo haber generado inestabilidad en las cuñas de roca. A juicio de SKAVA esta metodología de verificación es adecuada y se ajusta a las buenas prácticas.

5.2.2.3.2. Verificación para presión interior

La metodología utilizada por el Diseñador-Asesor para la verificación de la condición en la que la presión interior supera a la exterior corresponde a la propuesta por Merrit (1999) [Ref. 18] en el documento “Merrit

A. Geologic and geotechnical considerations for pressure tunnel design. *ASCE Geotech.* 1999". La verificación consistió en comprobar que la presión interior del túnel no produce hidrogateo o hidrofracturamiento en la roca. Con esta metodología de análisis se determinan las zonas del túnel que requieren revestimiento o no y el tipo de revestimiento (blindaje de acero u hormigón convencional).

La metodología de verificación para la presión interior utilizada por el Diseñador-Asesor es, a juicio de SKAVA, adecuada y se ajusta a las buenas prácticas.

5.2.2.3.3. Condición de velocidad del flujo (desgaste por erosión)

El Diseñador-Asesor en el documento "Análisis de Requerimiento de Revestimiento", Ref. 2, para efectos de verificar la condición de la velocidad del flujo y que producto de esta situación no se genere erosión en el túnel, hizo un "estudio de casos" y luego lo comparó con las condiciones de operación y velocidades de la GAD, llegando a la conclusión que no se generaría erosión.

El estudio de casos consideró 5 ejemplos de proyectos en los cuales se construyeron túneles de desvíos que operaron con altas velocidades. En la descripción que hace el Diseñador de los casos, hay algunos túneles que tienen revestimiento y solera de concreto, en otros no se indica si tienen o no revestimiento y solera de concreto.

La conclusión del "estudio de casos" por el Diseñador-Asesor es la siguiente:

"Análogamente a lo definido para el diseño del revestimiento permanente de los túneles de desviación, teniendo en cuenta el comportamiento de los proyectos antes descritos frente a la velocidad del flujo, y las características de la roca del proyecto, se considera que para las velocidades medias y máximas previstas para los túneles de desviación del Proyecto Ituango no se requiere de revestimiento o tratamiento adicional al soporte de construcción por concepto de abrasión de la roca y concreto lanzado circundante."

5.3. Observaciones al diseño antes del inicio de la construcción

A continuación se entregan las observaciones y opiniones de SKAVA respecto al "diseño antes de la construcción".

5.3.1. Observaciones del diseño geotécnico



Al revisar el diseño geotécnico (Ref. 11) se observa que se contempló el soporte necesario para resistir las condiciones que impone el macizo rocoso, las cuales se producen durante la construcción y son de acción permanente.

A juicio de SKAVA, la metodología utilizada por el Diseñador-Asesor para definir el soporte geotécnico es adecuada y se ajusta a las buenas prácticas actuales del diseño de túneles. Además, SKAVA realizó cálculos independientes para verificar el diseño del soporte, concluyendo que el soporte diseñado es adecuado para resistir las solicitaciones del macizo rocoso.

De acuerdo a lo señalado por el Diseñador-Asesor, la verificación del túnel ante las solicitaciones hidráulicas que ocurrirían durante la operación está contenida en el informe “Análisis de Requerimiento de Revestimiento” (Ref. 2).

5.3.2. Observaciones al diseño del revestimiento

5.3.2.1. Observaciones al diseño estructural del revestimiento.

La metodología usada por el Diseñador-Asesor para el diseño del revestimiento consistió principalmente en la verificación estructural, tomando en consideración la acción de las presiones del agua interior y exterior. Evaluó primero la necesidad de instalación o no de revestimiento de modo de evitar el hidrogateo o hidrofracturamiento a través del método de Merrit. Llegó a la conclusión que no era necesario un revestimiento estructural.

SKAVA está de acuerdo con la metodología utilizada por el diseñador para la verificación de la necesidad o no de instalar un revestimiento por condiciones de las solicitaciones estructurales. Se observa por parte del diseñador un entendimiento del problema y se utilizaron las buenas prácticas de la ingeniería.

5.3.2.2. Observaciones al diseño hidráulico del revestimiento.

Como ya se mencionó en el numeral “5.1.2.3.3. *Condición de velocidad del flujo (desgaste por erosión)*”, para la verificación de la necesidad de revestir el túnel por efectos de las velocidades del flujo de agua, el Diseñador-Asesor utilizó la metodología de “estudio de casos” mostrando 5 proyectos con túneles hidráulicos con flujo a altas velocidades, además señaló que utilizó como referencia los túneles de desvío izquierdo y derecho, ya en operación en el proyecto.

De los 5 casos, al menos en dos de ellos son revestidos con concreto lanzado y con losa de concreto en el piso, es decir, estos casos no son equivalentes a la GAD, ya que ésta última no tiene losa de concreto en el piso y la roca está expuesta al flujo del agua.



En los casos de estudio no se indican las calidades de la roca o si para las zonas de roca débil o muy débil se hicieron o no algún tipo de tratamiento o revestimiento. Esto implica que los casos de estudio podrían no ser equivalentes a la GAD.

A juicio de SKAVA, en el “estudio de casos” hecho por el diseñador no se ha demostrado que estos casos son equivalentes a la GAD. Por lo tanto, los ejemplos podrían no ser válidos.

Como referencia a lo señalado en el párrafo anterior, la asociación internacional de tunelería (ITA) en el documento ITA Guidelines for the Design of Tunnels [Ref. 20], en el numeral 4.4. Empirical Approach, indica una serie de requerimientos que se debe cumplir entre proyectos para hacerlos asimilables. En el diseño de la GAD no se cuenta con evidencia de que estos parámetros de equivalencia se cumplan.

Además del “estudio de casos”, el Diseñador-Asesor utilizó la experiencia ganada en el túnel izquierdo y derecho del desvío original del proyecto, en los cuales el 26% de la longitud total de estos túneles no se instaló losa de piso (información obtenida de la Tabla 5, del anexo 3 de la Ref. 9) y operaron por más de 1 año antes del inicio del diseño de la GAD y 3 años en total en condiciones de flujo de agua similares a la que operaría la GAD. Debido a que estos túneles están en el mismo proyecto, en el mismo macizo rocoso y operaron en las mismas condiciones que operaría la GAD, es información valiosa. A juicio de SKAVA, la decisión del Diseñador-Asesor de usar la información de los túneles existentes es correcta e ineludible.

Hay que señalar que el utilizar la experiencia de los túneles izquierdo y derecho, cumple los requerimientos presentados por la ITA en el documento mencionado anteriormente.

A partir de la información disponible para SKAVA, el entendimiento de la historia de lo que se hizo con el revestimiento del piso de los túneles de desvío originales es la siguiente:

El diseño de los túneles de desvío originales (izquierdo y derecho) consideraba que el 100% del piso debía tener losa, pero de acuerdo a lo indicado por el Diseñador-Asesor, durante la construcción se evaluó no instalarlo en 100% (ver Ref. 9). Se hizo una priorización por parte del Diseñador-Asesor definiendo que en “zonas de roca tipo IV y donde se requiriera, de acuerdo con la inspección visual detallada que se fuera realizando durante los levantamientos de campo”. Finalmente se instaló losa de piso en el 74% del piso y no se instaló losa en el 26% restante.

A juicio de SKAVA, el ajuste del diseño durante la etapa de construcción es una práctica normal. Los ajustes se deben hacer de acuerdo a las condiciones reales observadas en terreno y después de una evaluación técnica del diseñador. Por lo tanto, SKAVA opina que el procedimiento descrito por el Diseñador-Asesor es adecuado.



Ahora, volviendo al Diseño de la GAD, como ya se señaló el diseñador indica en su comunicación Ref. 9 que utilizó la experiencia ganada en los túneles de desvío original para el diseño del revestimiento. De forma similar a lo hecho en los túneles de desvío originales (izquierdo y derecho), el Diseñador-Asesor tomó la decisión (antes del inicio de la construcción) que se instalaría losa de piso sólo en la roca tipo IV y *“donde se requiriera, de acuerdo con la inspección visual detallada que se fuera realizando durante los levantamientos de campo”*.

Se entiende que el procedimiento indicado en la Ref. 9 del Diseñador-Asesor, se refiere a la forma en que se define la instalación o no de losa de piso, no se ha pronunciado respecto a la aplicación del procedimiento de tratamiento de cizallas y debilidades geológicas indicado en la Especificación Técnica.

Revisando la información de los túneles izquierdo y derecho, SKAVA no ha encontrado evidencia que en el 26% sin losa de piso, se hayan detectado zonas de debilidad en la roca (grietas, zonas de cizalle o fallas geológicas). Es decir, es probable que las zonas sin losa de piso de estos túneles son las de roca de mejor calidad y sin cizallas. Por lo tanto, no sería correcto concluir que la GAD no tendría problemas de erosión, ya que en las zonas débiles continúa el riesgo de erosión.

Respecto al “estudio de caso” hecho por el Diseñador-Asesor, se puede demostrar que existe experiencia en el mundo de túneles hidráulicos que han sufrido colapso como producto de la erosión del agua en zonas de roca débil. A modo de ejemplo, en la referencia “Some tunnel failures and what they have taught” del libro Hazards in tunneling and on falsework (Institution of Civil Engineers. London 1975 del autor J. Donovan Jacobs) [Ref. 21] se presentan tres túneles de centrales hidroeléctricas que fallaron, uno en Canadá y dos en Australia. Esto demuestra que el método de “estudio de casos” hecho para la GAD como metodología de diseño es débil y podría llevar a un mal diagnóstico del fenómeno de erosión.

Otro ejemplo de un túnel colapsado por erosión es el túnel del proyecto Lower Vinstra II hydropower tunnel [Ref. 23]. En las Figuras 14 y 15, se muestra este caso.

Probable cause of the collapse

Observations in the headrace tunnel upstream of the collapse found that clay fillings in many faults/weakness zones had been washed or slid out sometimes to a depth of 2 - 3 m. Other location with similar conditions that had been supported by shotcrete showed no signs of cracking or damage. This indicates that the collapse had started in the unsealed parts of the zones of weak, clayey⁵ rock which had been left without any protective support. Softening of the clayish material and reduced friction properties after inundation were probably the main causes.

Due to the softening of the clayey material and erosion by the water flow, the size of the tunnel here was increased resulting in sliding and collapses until the debris filled most of the tunnel profile downstream of the collapse area and almost blocked the water flow. It was concluded that if the shotcrete had been installed in the whole wall and in the invert, sealing of the loose materials, the collapse could have been avoided.

Figure 6 shows a possible explanation for the development of the collapse.

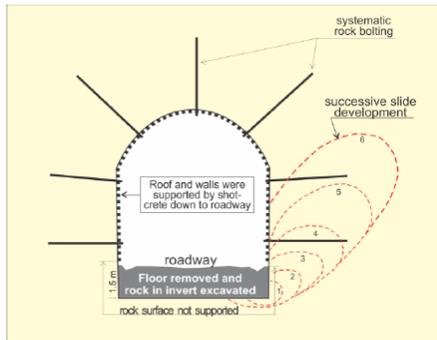


Figure 6: Possible development of the failure, mainly in the right side (looking downstream)

Probable causa del colapso

Al observar el túnel de aducción, aguas arriba del colapso se encuentra que los rellenos arcillosos en muchas fallas geológicas y zonas débiles de la roca han sido lavados o deslizados, hasta profundidades de 2 a 3 m. Otras zonas con similares condiciones que fueron soportadas con concreto lanzado no muestran signos de agrietamiento o daño. Esto indica que el colapso ha comenzado en las zonas débiles con rellenos arcillosos no selladas que fueron dejadas sin ningún tipo de soporte. El ablandamiento de los materiales arcillosos y la reducción de las propiedades resistentes después del llenado probablemente fue la principal causa.

Debido al ablandamiento del relleno de arcilla y la erosión producida por el flujo hidráulico, el tamaño del túnel se incrementó resultando en deslizamiento y colapsos hasta que el detrito llenó la mayor parte de la sección del túnel aguas abajo del área del colapso y además taponeo el flujo de agua. Se concluyó que si se hubiese instalado concreto lanzado en toda la pared y el piso, sellando para evitar la pérdida de materiales, el colapso podría haber sido evitado.

La figura muestra la posible explicación del desarrollo del colapso.

Figura 15. Posible causa del colapso del túnel del proyecto Lower Vinstra II hydropower.

Con los contraejemplos de casos mostrados por SKAVA, se demuestra que el Diseñador-Asesor, en la etapa de diseño previo a la construcción, al utilizar las consideraciones de “estudio de casos” podría haber hecho un mal diagnóstico de los efectos de la erosión en las zonas del túnel en la que la roca quedaría expuesta a la acción del flujo del agua. Adicionalmente no hay evidencia que el Diseñador-Asesor hizo algún cálculo de potencial erosivo específico para la GAD.

Con el fin de evaluar analíticamente la posibilidad de erosión en la GAD, SKAVA hizo cálculos independientes del potencial erosivo (ver Informe de Causa Raíz Física SKV373-003-001-INF-001), concluyendo que:

- Considerando los parámetros geotécnicos del macizo rocoso tipo III no se habría producido erosión en este tipo de roca.
- Sin embargo, en las zonas de debilidad, como una zona de cizalla, es probable que se produzca erosión.

Los resultados del análisis hecho por SKAVA se muestran en la Figura 16.

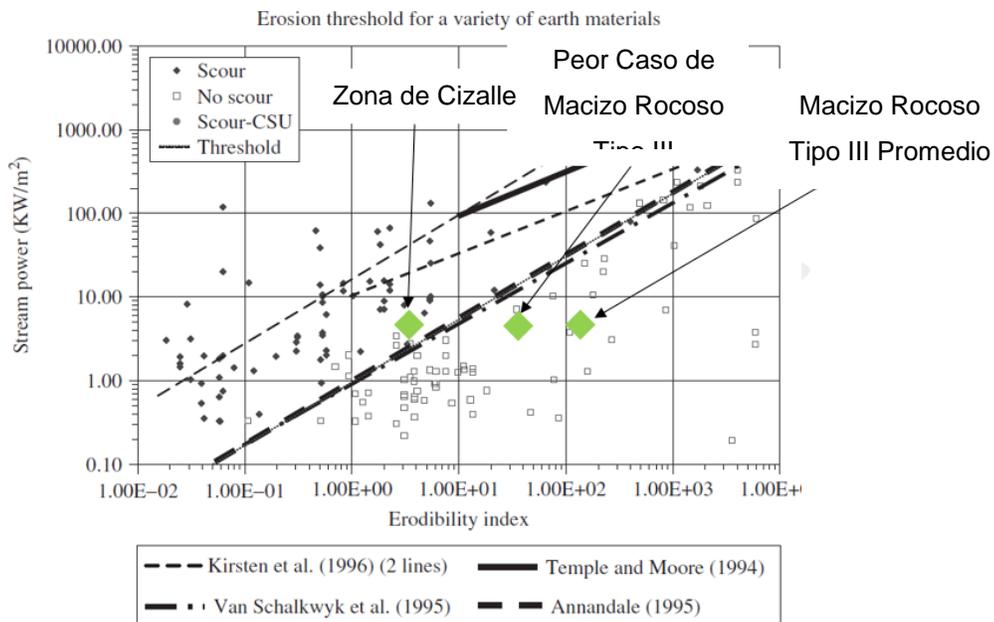


Figura 16. Resultado análisis de erosión.

De los análisis hechos por SKAVA se concluye que en las rocas tipo I, II y III la probabilidad de erosión por efectos del agua es baja y que la decisión del Diseñador-Asesor de no solicitar sistemáticamente losa de piso fue adecuada. Sin embargo, fruto de este análisis, se puede ver que las zonas de cizalla si son erosionables.

Por otra parte, en el ítem “3.2. Tratamiento de grietas, zonas de cizalladura y fallas menores” de la especificación técnica del proyecto se aborda e indica el tratamiento de las zonas de cizalla y debilidad, esto disminuiría el riesgo de erosión para las zonas débiles.

Es importante señalar que si bien el diseño (previo a la construcción) no es un Factor Contribuyente al fenómeno de erosión, el Diseñador-Asesor transfirió a la etapa de construcción la decisión final para la instalación de la losa en el piso y la decisión del tratamiento de zonas singulares, es decir, el riesgo de diseño se transfirió a la etapa de construcción.

6. CONSTRUCCIÓN DE LA GAD

Los actores que intervienen durante la construcción son EPM, el Diseñador-Asesor, el Constructor y el Interventor. Lo roles y responsabilidades de cada uno de esto están descritos en el ítem **4.1.1 Diseñador, Constructor e Interventoría**. La forma seleccionada para organizar el proyecto es una de las formas clásicas utilizadas a nivel mundial.

A continuación se abordan los aspectos de Calidad, Plan de Ejecución e Ingeniería de Diseño que pudieron contribuir al fenómeno de causa raíz física.

6.1. Calidad de la Construcción

La calidad de la construcción se chequeó durante el progreso de la excavación mediante los siguientes controles:

- Medición de resistencia concreto lanzado
- Medición de ductilidad concreto lanzado
- Medición de espesores concreto lanzado
- Pruebas de arrancamiento de pernos
- Mediciones de perfiles de excavación.

6.1.1. Calidad de los materiales del soporte

De acuerdo a las responsabilidades definidas en el proyecto las actividades de control de calidad fueron efectuadas por el Interventor, con el apoyo del Constructor donde se requiriera.

De acuerdo a los resultados presentados por el Interventor en el reporte PHI-IFF-LC1-011-R0, "Informe Final de Obras Principales Parte 3 – Sistema Auxiliar de Desviación" [Ref. 6] y en sus anexos, se observa que en la GAD se realizaron los ensayos especificados para verificar la calidad del soporte. Se aprecia que se cumplió con lo especificado para la calidad de concreto lanzado y de los pernos, es decir, se cumplió con: la resistencia, ductilidad y espesores, en el caso del concreto lanzado; con la resistencia en el caso



de los pernos. En aquellos casos en que inicialmente no se cumplió con lo especificado se tomaron las medidas de corrección indicadas en las especificaciones técnicas.

A juicio de SKAVA, los procedimientos utilizados para el control de la calidad de los materiales del soporte se ajustan a las buenas prácticas internacionales de este tipo de obras. Hay evidencia que se hicieron los controles de calidad de los materiales del soporte y no se observan problemas en estos que podrían haber contribuido a la Causa Raíz Física Probable.

6.1.2. Perfil de excavación

Además del control de calidad de los materiales, en un túnel hidráulico la calidad de la construcción también debe considerar el cumplimiento de la forma, dimensiones mínimas y la rugosidad del perfil de excavación.

La especificación en el ítem “3.1.1.3 Límites de excavación” establece los requerimientos de la calidad de la terminación de la excavación de todo el proyecto. La especificación indica que se debe cumplir como mínimo con el perfil teórico de excavación y que no se aceptan subexcavaciones. Respecto a la sobrexexcavaciones, las especificaciones no establecen un límite para estas, tampoco se indica en la especificación controles de rugosidad para los túneles hidráulicos.

Durante la construcción de la GAD el Interventor hizo controles de la forma y dimensiones del túnel a través de la obtención de perfiles transversales topográficos sistemáticos. Al analizar los perfiles se observa que no hay presencia de subexcavaciones, es decir, se cumplió con lo especificado en relación a la subexcavación.

En relación a las sobrexexcavaciones, y tal como se señaló en el Informe de Causa Raíz Física [Ref. 1] en el ítem “4.3.2.1.c.ii. Perfil Irregular y Perturbación por Voladura” “... en la GAD existen irregularidades en el perfil tanto en sentido radial como axial. Estas irregularidades pueden ser incluso de hasta más de 2 m, como es el caso en la abscisa 0+511. Se considera que las irregularidades pudieron haber sido ocasionadas por condiciones geológicas inherentes al macizo rocoso, metodología constructiva y “perturbación por voladura”. Todas éstas son propias del método constructivo de perforación y voladura, e incluso en el sector 2 de la GAD se tomaron medidas de pre soporte para evitarlas, como instalación de “spiling bars”.

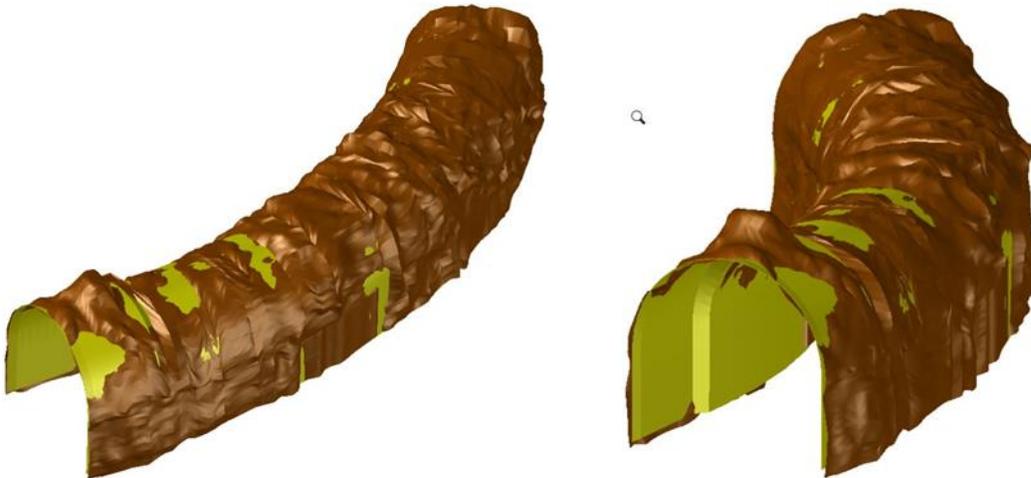


Figura 17. Visualización CAD del perfil final del túnel en la zona de la curva de la GAD.

El color marrón del Figura 17 representa las zonas con sobreexcavaciones.

Con el objeto de mostrar la irregularidad de la excavación en el piso y a modo de ejemplo se muestra en la Figura 18 fotos del piso del túnel de descarga 4 (este túnel forma parte de la GAD). Se aprecia que la irregularidad o rugosidad de la superficie de excavación es alta.



(a)



(b)

Figura 18 Terminación de la excavación del piso del túnel de descarga 4. Fotos obtenidas del informe I-2194-PHI-O34-184-GEO-TD4-01 REV.0 hecho por Diseñador-Asesor.

Tal como se señaló en Informe de Causa Raíz Física, la irregularidad del piso se considera como un Factor Contribuyente Probable.

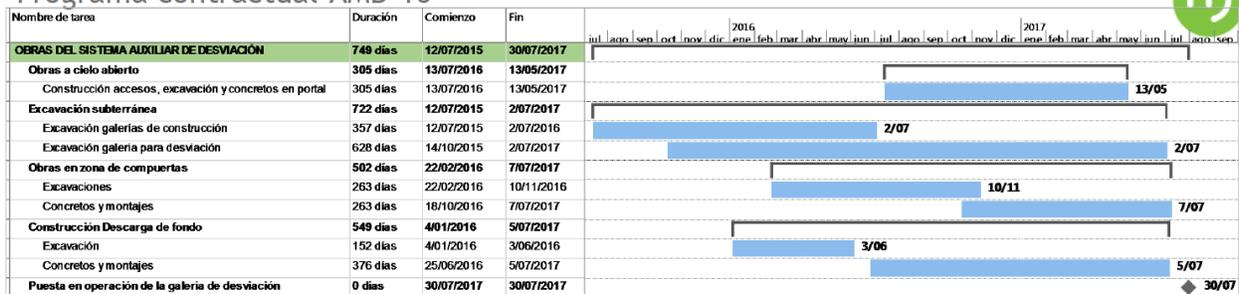
6.2. Plan de ejecución

La construcción de la GAD se inició el 12 de julio de 2015. Las excavaciones subterráneas de la GAD se iniciaron el 14 de octubre de 2015 y se terminaron el 20 de julio de 2017. Finalmente, la puesta en operación fue el 22 de septiembre de 2017.

En la Figura 20 y 19 se presentan: “Programa contractual-AMB-16, Programa ajustado (se modificó la fecha de inicio de las obras exteriores) y el Programa contractual vs ejecución real de las obras de la SAD” (Tomado de Ref. 3)

Se observa que el hito de inicio se cumplió, sin embargo la fecha programada para el desvío (30 de julio de 2017) no se cumplió, ya que la fecha del desvío fue el 22 de septiembre de 2017, es decir, hubo un desfase de 54 días respecto a lo programado.

Programa contractual-AMB-16



Programa ajustado (se modificó la fecha de inicio de las obras exteriores)

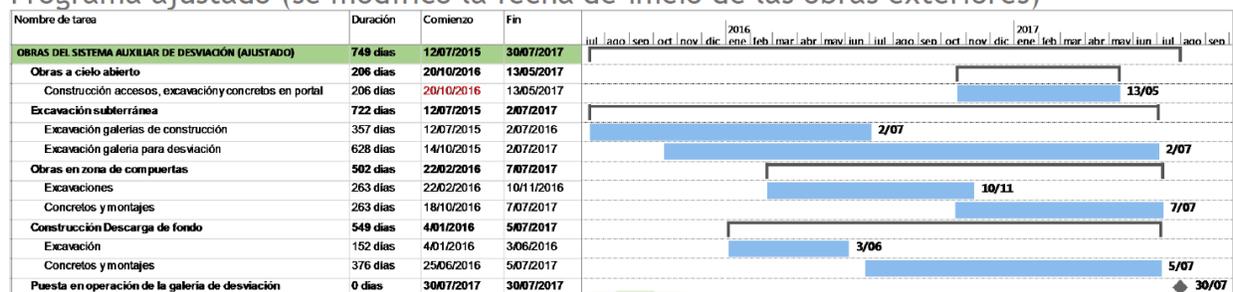


Figura 19. Fuente: presentación hecha por el a Interventor en Ago/2018.

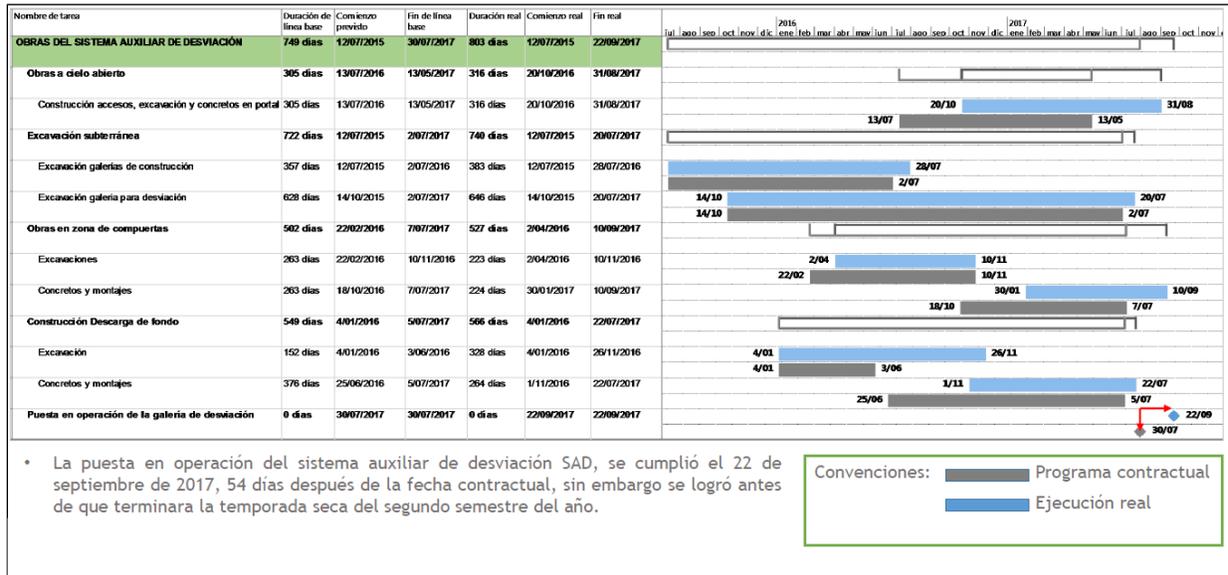


Figura 20 Programa contractual versus cronograma de ejecución del SAD.

Tomada de Ref. 3.

Al comparar los tres programas anteriores, se observa que la duración la construcción y las fechas de inicio y término programadas de las obras subterráneas, correspondientes a la GAD, fueron siempre las mismas. Esta demostraría que no hubo aceleración en programación de la construcción de la GAD.

6.3. Ingeniería durante la construcción

La práctica habitual en los proyectos de túneles es que el diseño y selección definitiva de los soportes continúa hasta el final de la etapa de construcción, ello debido a que es necesario ajustar los diseños ejecutados antes del inicio de la construcción a las condiciones reales encontradas en el sitio de excavación, las que pueden variar de las hipótesis o supuestos considerados en las etapas previas del diseño.

En el caso del proyecto Hidroituango y en particular en el proyecto de la GAD el Diseñador-Asesor continuó su participación durante la etapa de construcción cumpliendo la función de asesorar durante la construcción. Las principales responsabilidades de Diseñador-Asesor eran: hacer y validar los mapeos geológicos geotécnicos de la excavación, evaluar y definir la clasificación geotécnica del macizo rocoso, seleccionar el tipo de soporte a instalar (de acuerdo a las clasificaciones geotécnicas y tipo de soporte definidos previamente en la etapa de diseño), hacer los ajustes al proyecto que fuesen necesarios para



asegurar la estabilidad definitiva del túnel ante variaciones de las condiciones reales del terreno, registrar y ejecutar los planos “as-built” de la GAD.

Respecto a las tareas hechas por el Diseñador-Asesor durante la construcción se comenta que:

Los mapeos geológicos se desarrollaron empleando metodologías acorde al estado del arte. Los mapeos si bien no pueden ser evaluadas completamente, se realizaron de forma consistente. Además se considera que dada la gran cantidad de obras subterráneas existentes previamente en el proyecto existía experiencia acumulada suficiente entre los geólogos para desarrollar la tarea de forma correcta. Se debe señalar que de acuerdo a la información recibida por SKAVA, en la práctica el mapeo de la GAD fue desarrollado en forma independiente tanto por Diseñador-Asesor como por el Constructor. Cuando hubo discrepancias, siempre se optó por la clasificación más conservadora, es decir, la que implicaba mayor cantidad de soporte.

Los registros de los mapeos y de los soportes instalados se encuentran contenidos en los planos As-built del proyecto de la GAD, ejecutados por Diseñador-Asesor. Se observa que la cantidad de información contenida en estos es planos es importante y abundante (geología, tipo de terreno, descripción litológica, parámetros de las discontinuidades, descripción de las infiltraciones de agua, valores de RQD, valores de Q, resultados del monitoreo de convergencias, cantidad de soportes instalados).

El mapeo geológico de frente tiene como objetivo clasificar el macizo rocoso, sin embargo, también cumple la función de la detección de singularidades geológicas como zonas puntuales de debilidad o cambios abruptos de calidad del macizo rocoso. Respecto a la detección de singularidades geológicas, se señala que es inevitable la posibilidad que existan singularidades geológicas no detectadas en los tramos donde el mapeo no existe. Aun en macizos homogéneos como el macizo en que se encuentra emplazada la GAD. Tal como se señaló en el Informe de Estudio de Causa Raíz Física Probable, la probabilidad de no detección de singularidades geológicas es un factor contribuyente.

Debido a que la Causa Raíz Física Probable del colapso y posterior taponamiento de la GAD es la erosión producida en el piso, la elección de instalar losa de piso y/o de hacer el tratamiento de zonas de debilidad geológica en el piso en la roca expuesta al flujo de agua es un Factor Contribuyente muy importante. La elección de la protección del piso con losa y de las zonas en las cuales se debe hacer el tratamiento de fallas o cizalla se debía hacer durante la etapa de construcción y era el Diseñador-Asesor quien debía ejecutar esta labor.



En los planos aprobados para construcción de la GAD, sólo se indicaba losa de piso para las zonas donde el tipo de terreno se calificara como roca Tipo IV. Durante la excavación, en el sector 2 de la GAD no se encontró roca Tipo IV, por lo que no se instaló losa de piso. La decisión de no instalar losa de piso es consistente con lo señalado en la etapa de diseño, sin embargo, también se ha señalado por el Diseñador-Asesor que debía hacerse una evaluación al final de la construcción de las zonas sin losa de piso para determinar si algunos casos singulares requerían de todas formas losa. No se ha encontrado evidencia en los documentos revisados por SKAVA que esta revisión final se hizo.

Por otra parte, durante el mapeo geológico se identificaron estructuras débiles como zonas de cizalla de espesores de hasta algunos metros. Estas zonas de cizalla o debilidad geológica se pueden ver en los planos de obra terminada (o planos "As-Built"). También se observa en los planos As-Built que en las zonas de cizalla no se hizo un tratamiento especial. No se ha encontrado evidencia en los documentos revisados por SKAVA la razón por la cual no se habría hecho el tratamiento.

A juicio de SKAVA la combinación del potencial erosivo del agua (producto de la alta velocidad), con la presencia de un piso no revestido y zonas de roca singularmente débil (fallas y/o zonas de cizalla) son la Causa Raíz Física más probable del colapso y posterior taponamiento de la GAD. Las razones por las cuales se tomó la decisión de no revestir el piso y no hacer un tratamiento en las zonas de debilidad, se deben probablemente a un mal diagnóstico.

7. CONCLUSIONES

La causa raíz física probable fue la erosión progresiva de una zona de cizalle a nivel del piso de la GAD, causada por el flujo de agua en el túnel.

En este informe se ha buscado determinar si hubo desviaciones por parte del Diseñador-Asesor, el Contratista Constructor, o la Interventoría en cuanto a aplicación de normas, regulaciones o buenas prácticas de la ingeniería y construcción.

7.1. Conclusiones de la construcción

En lo relativo al sector 2 de la GAD, hemos observado que -en su gran mayoría- la labor del Constructor se ajusta a las exigencias del proyecto (planos y especificaciones). La excepción es la sobre excavación. Esta, en el sector del colapso, fue mayor que en otros sectores y es un factor contribuyente probable.

Por otra parte, la documentación analizada elaborada por el Interventor no evidencia desviaciones de las prácticas comunes de la industria y refleja un control adecuado de la calidad de la ejecución.

7.2. Conclusiones del diseño y asesoría

Como se ha dicho en el cuerpo del informe, el diseño de este tipo de obras es un proceso continuo que se inicia antes de la construcción. Luego, se ajusta o modifica por el Diseñador-Asesor durante esta para adecuarse a las condiciones efectivamente materializadas.

En esta línea podemos emitir las siguientes conclusiones:

- En el diseño geotécnico del túnel se siguieron las metodologías, las buenas prácticas y estado actual del arte. El diseño geotécnico se hizo considerando las solicitudes que impone el macizo rocoso y la construcción del túnel.
- Durante la etapa de diseño, previo a la construcción, el estudio de verificación de la necesidad de revestimiento para la GAD, considerando el efecto de las presiones del agua y su efecto estructural, el Diseñador-Asesor siguió las metodologías adecuadas, las buenas prácticas y estado del arte.
- El Diseñador-Asesor señaló en la comunicación D-PHI-CCE-ADM-1-C-4264 que el criterio definido en la etapa de diseño para la instalación del piso de concreto durante la construcción sería “...



según los resultados que arrojará la inspección que se realizará durante los levantamientos de campo”. El diagnóstico en obra es un procedimiento adecuado y común para la selección de la instalación del piso.

- En el ítem “3.2 Tratamiento de grietas, zonas de cizalladura y fallas menores” de la Especificación Técnica, que es un documento general para todo el proyecto, se indica un tratamiento de refuerzo de las zonas de grietas, cizalle y/o fallas geológicas, de modo de evitar el inicio del proceso de erosión. Por lo tanto, si bien el diseñador consideró que no había riesgo de erosión en el diseño de la GAD (ver documento I-I-2194-034-REV-01-R0), había un procedimiento para mitigar este riesgo.
- Durante la construcción, el Diseñador-Asesor diagnosticó las características geológicas del macizo rocoso y de las zonas débiles, de cizalla o fallas. También definió el requerimiento de soporte o tratamientos específicos. Por último, especificó la necesidad de revestimiento de piso u otros tratamientos para zonas débiles, de cizalla o fallas en este. Es en esta secuencia donde se evidencia una desviación respecto de los documentos de diseño mencionados en el punto anterior.
- En particular, en la zona del taponamiento, el plano de mapeo geológico y soportes de excavación denominado “D-PHI-034-TUN-MG-B-002 REV.1” evidencia una cizalla entre las progresivas 0+519 y 0+538. Por otra parte, los planos de obra terminada de excavaciones y secciones típicas D-PHI-034-TUN-EXC-010 y D-PHI-034-TUN-MG-002 no presentan ningún tipo de tratamiento a nivel de piso. Además, el Diseñador-Asesor, en su comunicación “D-PHI-CCE-ADM-1-C4264” pág. 37 indica que una vez terminada la excavación de la GAD se requirió limpieza de piso hasta roca sana, sin embargo no se evidencia ninguna instrucción que sea consistente con sus documentos de diseño mencionados anteriormente en cuanto al tratamiento de zonas de cizalla.

Los puntos anteriores explicarían la existencia de una zona de cizalla expuesta a la erosión donde el flujo del agua tenía su mayor potencial erosivo. Es en este punto donde probablemente se inicia el proceso de erosión y posterior taponamiento del túnel.



REFERENCIAS

- Ref. 1 SKAVA (2019). Informe de Causa Raíz Física Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Informe SKV373-003-001-INF-001.
- Ref. 2 INTEGRAL (2018). Análisis de requerimiento de revestimiento. Informe: I -I-2194-034-R01 de revisión 0.
- Ref. 3 INGETEC-SEDIC (2018). Presentación Construcción SAD.
- Ref. 4 INTEGRAL (2010). Caracterización Geológica y Geotécnica. Informe: D-PHI-CCE-ADM-C0082. Archivo: "D-PHI-CCE-ADM C0314 Info caract geolo".
- Ref. 5 INTEGRAL (2018). Presentación. Archivo: SAD -Presentacion-Skava-HidrologiaHidraulica.
- Ref. 6 INGETEC-SEDIC (2018). Informe Final de Obras Principales Parte 3 – Sistema Auxiliar de Desviación. Informe: PHI-IFF-LC1-011-R0. Archivo: PHI-IFF-LC1-011-R0.
- Ref. 7 NGI (2015). Using the Q-System – Rock Mass Classification and Support Design.- Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, 2015.
- Ref. 8 INTEGRAL (2015). Excavaciones - Secciones Típicas. Plano: D-PHI-034-TUN-EXC-010. Archivo: D-PHI-034-TUN-EX-C-010-R1.
- Ref. 9 INTEGRAL (2018). Comunicación D-PHI-CCE-ADM-1-C-4264.
- Ref. 10 INTEGRAL (2012). ANEXO TÉCNICO – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN - "Tomo 2 Anexo Técnico - ET-incluye adendas")
- Ref. 11 INTEGRAL (2018). "Memoria de Cálculo Geotécnico", código I-I-2194-05208-01-R0.
- Ref. 12 INTEGRAL (2015). Excavaciones - Secciones Típicas. Plano: D-PHI-034-TUN-EXC-010. Archivo: D-PHI-034-TUN-EX-C-010-R0.
- Ref. 13 Brox, D. (2017). Practical Guide to Rock Tunneling. CRC Press.
- Ref. 14 Humphries (2018). R. Design and Construction of Unlined Water Tunnels - an update.
- Ref. 15 Benson, R. P. (1989). Design of unlined and lined pressure tunnels.
- Ref. 16 Williams, O. (1997). Engineering and design-tunnels and shafts in rock. US Army Corps of Engineers, Washington, DC, 20314-1000.
- Ref. 17 INTEGRAL (2018). "Memoria de Cálculo Hidráulico". Informe: I-M-2194-034-HID-02.
- Ref. 18 Merritt, A. H. (1999). Geologic and geotechnical considerations for pressure tunnel design. In Geo-Engineering for Underground Facilities (pp. 66-81).
- Ref. 19 INTEGRAL (2018). Memoria de Cálculo Geotécnica. Informe: I-M-2194-034-GYG-01. Archivo: I-M-2194-034-GYG-01-R0.
- Ref. 20 ITA (1988). Feature Report: Guidelines for the Design of Tunnels. Tunnelling and Undergroud Space Technology, Vol. 3, Nr. 3, pp. 237 – 249.
- Ref. 21 Jacobs, D. (1975). 3 Some tunnel failures and what they have taught. In Hazards in tunnelling and on falsework: Proceedings of the Third International Safety Conference, held at The Institution of Civil Engineers, 19-20 March 1975 (pp. 37-46). Thomas Telford Publishing.
- Ref. 22 Palmström, A. & Broch, E. (2017). The design of unlined hydropower tunnels and shafts: 100 years of Norwegian experience. International Journal on Hydropower and Dams, 3, 1-9.
- Ref. 23 Palmström, A. (2013). The collapse in the New, Lower Vinstra II hydropower tunnel.
- Ref. 24 Diseñador-Asesor. I-2194-PHI-O34-184-GEO-TD4-01 REV.0
- Ref. 25 Interventor. Control de Avance Prog. Acelerado CCCI.
- Ref. 26 Diseñador-Asesor. I-I-2194-034-REV-01-R0.
- Ref. 27 INTEGRAL (2018). Plano de mapeo geológico y soportes de excavación denominado "D-PHI-034-TUN-MG-B-002 REV.1"