

**ESTUDIO DE CASO – RIESGO
GEOLOGICO. DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL
DE SUMAPAZ**

**CASE STUDY – GEOLOGIC
RISK. DESIGN AND
CONSTRUCTION OF THE
SUMAPAZ TUNNEL**

**ESTUDO DE CAS – RISCO
GEOLOGICO. CONCEPÇÃO
E CONSTRUÇÃO DO TÚNEL
DE SUMAPAZ**



Alfredo Camacho Salas^(a)

^(a) Facultad de Ingeniería,
Programa de Maestría en Infraestructura Vial,
Universidad Santo Tomás,
E- mail:

maestriainfraestructuravial@usantotomas.edu.co

Fecha de recepción: 21 de enero 2018
Fecha de aprobación: 30 de marzo 2018

Resumen

Entre los años 2006 a 2011, se realizó la construcción del túnel del Sumapaz, localizado en la vía que conduce de Bogotá a Girardot, obra singular del contrato de concesión de tercera generación GG-040-2004, celebrado entre el Instituto Nacional de Vías y la Sociedad Concesión Autopista Bogotá Girardot S.A. Los diseños para la estructuración del proyecto los realizó la firma INGETEC S.A. – BATEMAN INGENIERÍA LTDA. – PIV INGENIERÍA LTDA, estableciendo las cantidades de obra a ejecutar, a partir de las cuales se determinó como riesgo geológico a cargo del concesionario el 10% de las mayores cantidades ejecutadas y superado este tope el reconocimiento por sobrecostos por parte del Estado. El concesionario de acuerdo con la potestad contractual, contrató el diseño final del túnel con la firma PONCE DE LEÓN y ASOCIADOS S.A. INGENIEROS CONSULTORES – PL&A, con los que se ejecutó la obra. El Estado a través de la Agencia Nacional de Infraestructura, reconoció y pagó al concesionario la suma aproximada de cincuenta y cinco mil millones de pesos adicionales, no obstante haber contado con los diseños de INGETEC y un margen del diez por ciento (10%) en las cantidades de obra establecidas como riesgo geológico a cargo del concesionario.

Palabras clave: Concesión, Riesgo, Riesgo Geológico, Túnel

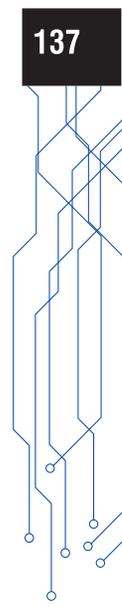
Abstract

Between years 2006 to 2011, was realized the construction of the tunnel of the Sumapaz, located in the route that leads from Bogota to Girardot, builds singular of the contract of concession of third generation GG-040-2004, celebrated between the National Institute of Routes and the Society Concession freeway Bogotá Girardot S.A. The designs for the structuring of the project the company INGETEC S.A. realized them – BATEMAN INGENIERÍA Ltda. – PIV INGENIERÍA Ltda., establishing the amounts of work to execute, from which 10% of the majors were determined like risk geologic in charge of the concessionaire executed amounts and surpassed this top the recognition by extra charges on the part of the State. The concessionaire in agreement with the contractual power, contracted the final design of the tunnel with the company PONCE DE LEÓN y CONSULTING ENGINEER ASOCIADOS S.A. – PL&A, with which the work was executed. The State through the National Infrastructure Agency, recognized and paid to the concessionaire the approximated sum of fifty-five billions of additional pesos, despite having counted with the designs of INGETEC and a margin of the ten percent (10%) in the established amounts of work like geologic risk in charge of the concessionaire.

Key words: Concession, Risk, Geologic Risk, Tunnel.

Resumo

Entre os anos 2006 à 2011, efetuou-se a construção do túnel do Sumapaz, situado na via que conduz de Bogotá Girardot, obra singular do contrato de concessão de terceira geração GG-040-2004, tida entre o Instituto Nacional Vias e da Sociedade Concessão Autoestrada Bogotá Girardot S.A. As concepções para a estruturação do projeto foi efetuadas pela assinatura INGETEC S.A – BATEMAN ENGENHARIA LTDA. – PIB ENGENHARIA LTDA, estabelecendo as quantidades de obra a executar, partir das quais determinou-se como risco geológico à carga do concessionário 10% mais das grandes quantidades



executadas e excedido este limite o reconhecimento por custos adicionais pelo Estado. O concessionário de acordo com o poder contratual, contratou a concepção final do túnel com a assinatura PEDRA-POMES LEON e de ASSOCIADOS S.Aos ENGENHEIROS CONSULTOR – PL&A, com os que foram executados a obra. O Estado por meio da Agência Nacional de Infraestrutura, reconheceu e pagou ao concessionário a soma aproximativa de cinquenta e cinco mil milhões de pesos adicionais, não obstante ter disposto com as concepções INGETEC e de uma margem de dez para - cem (10%) nas quantidades de obra estabelecidas como risco geológico à carga da concessão naire.

Palavras Concessão chave, Risco, Risco Geológico, Túnel

I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo titulado “RIESGO GEOLÓGICO – DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE SUMAPAZ”, presenta un análisis desde los puntos de vista técnico y contractual, de los diseños elaborados para la construcción del túnel de Sumapaz por la firma INGETEC S.A., los diseños de la firma PONCE DE LEÓN y el túnel construido.

Especial relevancia reviste la determinación de las modificaciones del proyecto sufridas a lo largo de las etapas de diseño y construcción, la identificación de las condiciones del macizo rocoso previstas en los diseños, contrastadas con las condiciones reales encontradas en el proceso constructivo, el análisis de la asignación del riesgo geológico, y la incidencia de los cambios efectuados al mismo en la valoración y reconocimiento por parte del Estado, de la contingencia por riesgo geológico.

Del análisis comparativo de los principales parámetros que incidieron en la activación del riesgo geológico, se puede concluir que la escasa campaña de exploración geotécnica previa fue la causa principal de las diferencias encontradas en el proceso constructivo, tal y como lo reportan los informes de interventoría de las firmas Consorcio EDL – DIS –IPC y ConCol B&C respectivamente, que en general se asociaron a menores calidades

del macizo rocoso, requiriendo por tanto mayores cantidades de obra a las estimadas en los ítems correspondientes al presoporte y soporte definitivo de la excavación, superando en todo caso las previsiones de la estructuración del proyecto.

Adicionalmente, el cambio de diseño del túnel efectuado por la firma concesionaria, introdujo modificaciones sustanciales con respecto al alineamiento inicial del túnel, que no obstante encontrarse enmarcado en el mismo sector geográfico, incidió de manera significativa en las condiciones del macizo geológico encontradas en el proceso constructivo.

La inobservancia por parte del constructor de las recomendaciones de diseño establecidas en las especificaciones técnicas para construcción, en lo referente a la construcción de solera curva en los tramos donde el terreno fuera clasificado como terreno tipo V, se refleja en las graves afectaciones que presenta la estructura del pavimento (ondulaciones, desniveles, grietas, fisuras, etc.), en la zona coincidente con la presencia de la falla de Quininí que amerita un adecuado y permanente monitoreo y estudio.

No menos significativas son las afectaciones del soporte del túnel ventana, que requiere la reconstrucción del falso túnel, el reforzamiento

del concreto lanzado, el tratamiento adecuado de aguas de infiltración y en general un adecuado mantenimiento que garantice su funcionalidad y operatividad permanente, dada la importancia que reviste como única vía de atención de emergencias y evacuación del túnel principal.

II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE SUMAPAZ

Por encargo del Instituto Nacional de Vías el Consorcio INGETEC S.A. – BATEMAN INGENIERÍA LTDA. – PIV INGENIERÍA LTDA, en el año 1998, realizó los estudios y diseños correspondientes a la segunda calzada Bogotá - Girardot, los cuales contemplaron como obra particular la construcción de un túnel de aproximadamente 4.1 Km de longitud en la zona de la Nariz del Diablo en sentido Girardot – Bogotá, con un túnel accesorio o ventana de 33m; cruzando los cerros San Bartolo y La Palmita, con una cobertura máxima de 300m y un trazado conformado por tres alineamientos rectos y dos curvas intermedias espiralizadas.

El alineamiento del túnel se localizó tal y como lo refieren los estudios para la concesión de la carretera Av. Boyacá-Bosa-Granada-Girardot, en la zona del piedemonte occidental de la cordillera oriental donde se presentan rocas cretáceas del Grupo Guadalupe y de la Formación Villeta, rocas cretáceo-terciarias de la Formación Guaduas y rocas terciarias de la Formación Gualanday; en la zona de los portales se encuentran depósitos cuaternarios de terraza, aluviales y coluviales.

Los análisis de campo realizados en el sector del túnel identificaron las fallas geológicas de Quininí y Melgar, las estructuras anticlinales La Palmita y La Cascada, los sinclinales de Icononzo y La Cascada, así como zonas de esfuerzos inferidas.

Con ocasión de la presencia de fuentes de agua superficial como la quebrada La Cascada, y la permeabilidad promedio de las formaciones geológicas identificadas y sus estructuras, se esperaba encontrar concentración de infiltraciones con caudales iniciales estimados entre 46 y 74 l/s.

Para determinar las propiedades geomecánicas de los materiales se realizaron siete sondeos eléctricos verticales, y toma de núcleos a lo largo del cañón del río Sumapaz; en las zonas de los portales se ejecutaron dos perforaciones en cada una de ellas con el fin de conocer el espesor del depósito coluvial y determinar el perfil longitudinal final del túnel; adicionalmente, a lo largo de los afloramientos y en las quebradas se obtuvieron núcleos de roca que fueron sometidos a ensayos de compresión inconfinaada instrumentada y triaxial.

Con base en los diseños, la sección transversal y el tipo de terreno esperado, el consultor estableció las cantidades de obra estimadas para la construcción del túnel de Sumapaz, a partir de las cuales se determinó el presupuesto, con un monto total aproximado de US \$49'037.126 de julio de 1998.

Las cantidades de obra referidas fueron incorporadas por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, en los estudios previos y en la estructuración del proyecto que dio origen a los pliegos de condiciones de la Licitación Pública No. 01 de 2003, abierta posteriormente por el Instituto Nacional de Concesiones – INCO.

Riesgo, Riesgo Geológico y su Asignación Contractual

El riesgo se define de manera general como el resultado de la probabilidad de que uno o varios acontecimientos sucedan multiplicados por sus posibles consecuencias:

$$Riesgo = \Sigma(\text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia})$$

Ecuación donde la probabilidad y la consecuencia están determinadas por la Incertidumbre, entendida como “la incapacidad para estimar o conocer de manera precisa las variables intervinientes”.

En términos generales se acepta la definición de riesgo geológico como “todo proceso que afecta el medio geológico, de origen natural (procesos internos) o inducido (intervención del hombre), que puede generar un daño económico o social para el hombre o los seres vivos”.

La construcción de túneles reviste serias incertidumbres en relación con las condiciones del macizo rocoso que se encuentren en el proceso constructivo, y con los supuestos adoptados en el proceso de diseño y estructuración del proyecto, razón por la cual en Colombia y con el fin de brindar garantías a los inversionistas privados, se incluye en los contratos de concesión de iniciativa pública el “Soporte Parcial por Riesgo Geológico”, que establece los mecanismos de reconocimiento de mayores cantidades y/o mayores valores por las actividades propias de su construcción.

Nótese en todo caso, que la definición ampliamente aceptada de riesgo geológico como el conjunto de amenazas o peligros derivados de procesos geológicos de origen interno, externo o de una combinación de ambos, migró en nuestro medio y desde el punto de vista contractual a las mayores cantidades de obra resultantes de un proceso constructivo.

Con relación a la asignación del riesgo geológico, la Cláusula 23 del Contrato de Concesión GG-040-2004, Soporte Parcial por Riesgo Geológico, estableció que el INCO reconocería al Concesionario las cantidades de obra que

debieran ejecutarse en exceso, entendiéndose que habrían cantidades de obra superiores cuando las cantidades de obra ejecutadas por el Concesionario fueran superiores en un diez por ciento (10%) a aquellas establecidas en la estructuración del proyecto con base en los diseños de INGETEC y las mismas se originaran en causas diferentes a errores de diseño o construcción atribuibles al Concesionario o a su culpa o su negligencia. Para calcular dichas cantidades por tipo de terreno se partió del índice RMR (Rock Mass Rating), de acuerdo con la Metodología Bieniawski-76.

Diseños del Consorcio Ingetec S.A. – Bateman Ingeniería Ltda.- PIV Ingeniería Ltda.

Por encargo del Instituto Nacional de Vías – INVIAS, el Consorcio INGETEC S.A. – BATEMAN INGENIERÍA LTDA. – PIV INGENIERÍA LTDA, en el año 1998, realizó los estudios y diseños correspondientes a la segunda calzada Bogotá - Girardot, los cuales contemplaron como obra particular la construcción de un túnel de aproximadamente 4.1 km de longitud en la zona de la Nariz del Diablo en sentido Girardot – Bogotá, con un túnel accesorio o ventana de 33 m; cruzando los cerros San Bartolo y La Palmita, con una cobertura máxima de 300 m y un trazado conformado por tres alineamientos rectos y dos curvas intermedias espiralizadas.

El alineamiento del túnel se localizó en la zona del piedemonte occidental de la cordillera oriental, donde se presentan rocas cretáceas del Grupo Guadalupe y de la Formación Villeta, rocas cretáceo-terciarias de la Formación Guaduas y rocas terciarias de la Formación Gualanday. En la zona de los portales se encuentran depósitos cuaternarios de terraza, aluviales y coluviales.

Los análisis de campo realizados en el sector del túnel identificaron las fallas geológicas de Quiniñí

y Melgar, las estructuras anticlinales La Palmita y La Cascada, los sinclinales de Icononzo y La Cascada, así como zonas de esfuerzos inferidas.

El túnel final se proyectó con una longitud de 4.105 m, con una sección de excavación de 12 m por 8 m y pendientes variables de 1.6%, 2.34% y 3.9%, localizando el portal Boquerón en la cota 464 msnm y el portal Melgar en la cota 381 msnm, previendo una ventana localizada a 900 m del portal Melgar con una longitud de 33 m.

Para determinar las propiedades geomecánicas de los materiales se realizaron sondeos mecánicos, sondeos eléctricos verticales – SEV, y toma de núcleos a lo largo del cañón del río Sumapaz; en las zonas de los portales se ejecutaron dos perforaciones en cada una de ellas con el fin de conocer el espesor del depósito coluvial y determinar el perfil longitudinal final del túnel.

Adicionalmente, a lo largo de los afloramientos y en las quebradas se obtuvieron núcleos de roca que fueron sometidos a ensayos de compresión confinada instrumentada y triaxial.

Diseños de la firma PONCE DE LEÓN y Asociados S.A. Ingenieros Consultores – PL&A.

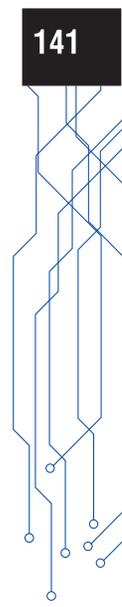
Iniciada la etapa de preconstrucción, la firma Concesión Autopista Bogotá Girardot S.A. haciendo uso de la potestad conferida en el contrato de concesión, contrató la revisión y elaboración de nuevos diseños de detalle del túnel con la firma PONCE DE LEÓN y Asociados, con los que finalmente se construyó el túnel.

Un primer diseño de 2.004, contempló la construcción de tres (3) túneles cortos de 900 m, 1740 m y 770 m de longitud respectivamente, y dos secciones intermedias con excavación a

cielo abierto de 400 m y 140 m, con la pretensión de minimizar los costos operacionales (el modelo financiero asociado al proyecto previó un plazo inicial de dieciséis años para alcanzar el ingreso esperado del Concesionario, tiempo durante el cual subsistía la obligación de operar y mantener la infraestructura construida), asociados principalmente al sistema de ventilación; adicionalmente con la posibilidad de contar con seis portales que optimizaría el proceso constructivo al disponer de igual número de frentes de obra acortando los tiempos de construcción.

Una segunda aproximación conocida en 2.005 estableció la misma configuración anterior con tres túneles cortos de 780 m, 1730 m y 860 m de longitud respectivamente, y dos secciones intermedias con excavación a cielo abierto de 1675 m y 600 m, con la pretensión de atravesar la zona de la Falla de Quinín a tajo abierto.

Serías dificultades en la localización planteada de los portales, referidos en la memoria técnica final presentada por el Concesionario, así como la controversia generada con la Entidad Concedente (Instituto Nacional de Concesiones – INCO) que consideró que el contrato estipulaba la construcción de un túnel de 4.180 m aproximadamente, con una ventana de 30 m según los diseños iniciales, obligaron al Consultor a reformular el proyecto, lo que finalmente dio lugar a la solución adoptada en 2.005 (Informe final de estudios y diseños para la construcción del túnel de enero de 2005), similar a la inicialmente planteada por INGETEC, consistente en un solo túnel principal con una longitud aproximada de 3.966 m y una ventana de 207 m de longitud, que corresponde a la obra finalmente ejecutada entre octubre de 2.006 y marzo de 2.010, por la firma colombo ecuatoriana SEMAICA DE COLOMBIA S.A., y al final de la



excavación por la firma colombiana TÚNELES DE COLOMBIA S.A.

Análisis comparativo de los diseños y el túnel construido.

Tal y como se planteó desde los estudios iniciales del túnel de Sumapaz, el alineamiento del túnel se ubicó en el piedemonte occidental de la cordillera oriental, en el sector de la Nariz del Diablo atravesando la serranía de Quininí, con una orientación aproximada Este–Oeste paralela al río Sumapaz y a la carretera existente.

Geocronológicamente, la formación de la cordillera oriental data de las eras Cenozoica y Mesozoica en una escala temporal que abarca los últimos 85 millones de años, estando el túnel ubicado en una zona tectónicamente complicada sometida a fuertes esfuerzos compresionales evidenciados en la presencia de sinclinales, anticlinales y fallas.

Coinciden los estudios realizados para diferentes proyectos que contemplan excavaciones subterráneas en la cordillera oriental (Proyectos Mesitas, Chingaza y Rosales de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá), en la descripción geológica general y en las características geotécnicas principales, estudios de referencia ampliamente empleados para el cotejo de parámetros de diseño y resultados de ensayos de laboratorio en proyectos similares.

En términos generales los estudios realizados tanto por INGETEC, como por PONCE DE LEÓN, coinciden en la identificación de las formaciones rocosas asociadas a los períodos geológicos, corroboradas en el proceso constructivo como se evidencia en la Tabla 1 Períodos geológicos y formaciones asociadas, a continuación.

Tabla1. Períodos geológicos y formaciones asociadas

INGETEC	PONCE DE LEÓN	PROYECTO CONSTRUIDO
PERIODO CUATERNARIO		
Depósitos aluviales	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales
Depósitos coluviales	Depósitos coluviales	Depósitos coluviales
	Depósitos de coluvión y terraza	Depósitos fluvio-glaciales
Depósitos de terraza	Depósitos de terraza	
PERIODO Terciario		
Formación Gualanday	Formación Gualanday	Formación Gualanday
-	-	Formación Guaduas
PERIODO CRETACEO – Terciario		
Formación Guaduas	Formación Guaduas	
PERIODO CRETACEO		
Grupo Guadalupe Arenisca tierna	Grupo Guadalupe Arenisca tierna	Grupo Guadalupe Arenisca tierna
Arenisca de labor Formación	Arenisca de labor Formación	Arenisca de labor Formación
Plaeners Arenisca dura	Plaeners Arenisca dura	Plaeners Arenisca dura
-	-	Chert
Formación Villeta	Formación Villeta	Formación Villeta

Fuente. Autor

De igual manera que el caso anterior, los estudios realizados coinciden entre sí y a su vez con lo encontrado en campo con relación a las estructuras formacionales, comparadas en la Tabla 2 Geología Estructura Pliegues, Tabla 3 Geología Estructural Fallas y Tabla 4 Geología Estructural Discordancias.

Tabla 2. Geología estructural. Pliegues

INGETEC	PONCE DE LEÓN	PROYECTO CONSTRUIDO
Sinclinal de Icononzo	Sinclinal El Poblado	Monoclinal oriental Anticlinal truncado central
Anticlinal de La Palmita Sinclinal de La Cascada	Anticlinal El Poblado Sinclinal de La Cascada	Sinclinal de La Cascada
Anticlinal de La Cascada	Anticlinal de La Palmita	Graben de La Cascada
Sinclinal de Malachí	Monoclinal del Sumapaz	Isoclinal de El Poblado

Fuente. Autor

Tabla 3. Fallas

INGETEC	PONCE DE LEÓN	PROYECTO CONSTRUIDO
Falla de Quininí	Falla de Quininí	Falla de Quininí
Falla de Melgar	Falla de Melgar	Falla de La Palmichala
-	-	Falla Inversa del K87+800
-	-	Falla Ventana
-	-	Falla de El Poblado
-	-	Falla de Malachí

Fuente. Autor

Es importante en todo caso observar cómo, el nivel de detalle de la geología estructural solo se alcanza en el proceso constructivo de la obra subterránea, lo que permitió identificar las zonas de fallamiento a lo largo del trazado del túnel y tal vez lo más relevante, la secuencia litológica reportada en la Tabla 50 Sectorización Litológica.

Tabla 4. Geología estructural. Discordancias

INGETEC	PONCE DE LEÓN	PROYECTO CONSTRUIDO
Discordancia Guadalupe - Gualanday	Discordancia Guadalupe - Gualanday	Discordancia Guadalupe - Gualanday

Fuente. Autor

De conformidad con la identificación de las formaciones rocosas, tanto los estudios como la construcción del túnel coincidieron en mayor o menor medida en las condiciones de permeabilidad, clasificadas como se relaciona en la Tabla 5 permeabilidad asociada a las formaciones rocosas.

Tabla 5. Permeabilidad asociada a las formaciones rocosas.

CLASIFICACIÓN	INGETEC	PONCE DE LEÓN	PROYECTO CONSTRUIDO
Muy alta	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales y coluviales
Alta	Areniscas	Areniscas Tierna, de Labor y Dura	Areniscas Tierna, de Labor y Dura
Media	Formación Gualanday	Formación Gualanday	Formación Gualanday
Baja	Depósitos coluviales y de terraza	Depósitos coluviales y de terraza	Depósitos de terraza
Muy baja	Formaciones Guaduas, Plaeners y Villeta	Formaciones Guaduas, Plaeners y Villeta	Formaciones Guaduas, Plaeners y Villeta
Impermeable	-	-	Formación Guaduas

Fuente. Adaptación propia

En la construcción se encontró que los sectores de mayor aporte al interior del túnel correspondieron a las zonas de acuíferos del Monoclinal Oriental y el Sinclinal de La Cascada y la zona de recarga constituida por la serranía de Quininí, el cerro Palmichala y las lomas de El Poblado.

Tal y como se previó inicialmente, la construcción del túnel generó serias afectaciones en las fuentes de agua superficial, al funcionar la excavación como un gran colector de aguas, lo que se refleja en el desecamiento de la quebrada “La Cascada”

y otros acuíferos menores que servían de abastecimiento a las comunidades asentadas en el lugar, situación que hizo necesario disponer del suministro de agua potable a través de carrotanques.

Coinciden los estudios y el procedimiento constructivo empleado, en la implementación del denominado Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles o NATM (Rabcewickz, Müller y Parcher. 1948 -1964), por sus siglas en inglés, entendido este como una filosofía en el actuar propio de una excavación subterránea, que compara las curvas características del terreno con los resultados de la instrumentación instalada, para determinar a priori cuál es el sostenimiento que mejor puede funcionar en un caso dado, teniendo presente sin embargo las recomendaciones de soporte y los criterios de sostenimiento de túneles basados en las clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso.

Especial importancia reviste la determinación efectuada en cada caso de los posibles mecanismos de falla, mediante la identificación de la combinación desfavorable de familias de discontinuidades (con el empleo de métodos analíticos y gráficos), y la redistribución de esfuerzos ocasionada por la excavación; análisis que buscaron establecer las presiones críticas de soporte que debieron ser resistidas para que no se produjera la falla ni se indujeran zonas plásticas muy amplias alrededor de la excavación.

De esta manera se estableció en todos los casos el empleo de concreto lanzado adicionado con fibras metálicas, la instalación de anillos sistemáticos de pernos anclados para generar un arco autosoportante y la colocación de arcos metálicos en zonas de bajo tiempo de autosoporte, acompañados de pernos en Spilling donde las condiciones del frente de avance lo requirieron.

Con respecto al empleo de concreto lanzado, estableció la tabla de cantidades tope a partir de las cuales se activó el soporte parcial por riesgo geológico, un volumen de 15.400 m³, que contrastado con el volumen empleado de 30.141 m³, representa un incremento del 196% en el estimado por diseño, tal y como se representa en la Figura 1 Comparativo concreto lanzado.

Con relación al empleo de arcos de sostenimiento, estableció el contrato que a partir de 1'974.540 Kg se activaría el riesgo geológico, encontrando que de acuerdo a los reportes se requirieron tan solo 1'798.900 Kg. Equivalente al 91% del estimado inicial, como se observa en la Figura 2 Comparativo arcos de sostenimiento.

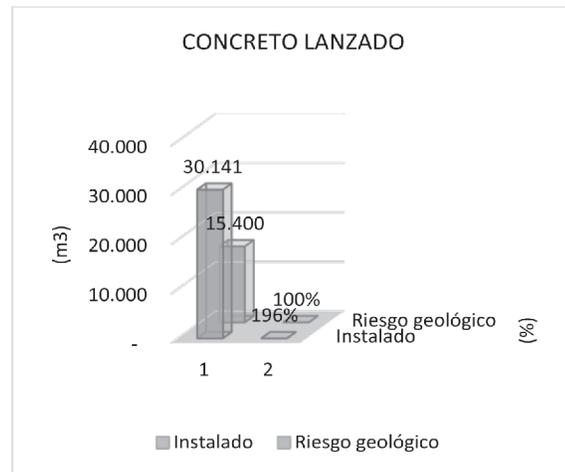


Figura 1. Comparativo concreto lanzado
Fuente. Autor

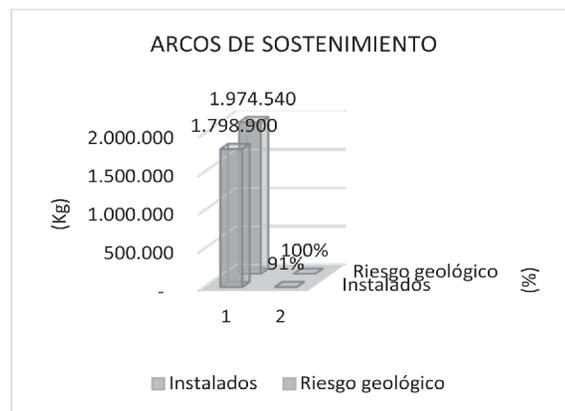


Figura 2. Comparativos arcos de sostenimiento
Fuente. Autor

En lo concerniente al empleo de pernos de anclaje para estabilizar la excavación, se previó contractualmente el empleo hasta de 261.583 m, a partir del cual se activaría el riesgo geológico, encontrando que se emplearon solamente 179.390 m, equivalente al 69% del tope estimado, como se refleja en la Figura 3 Comparativo pernos de anclaje.

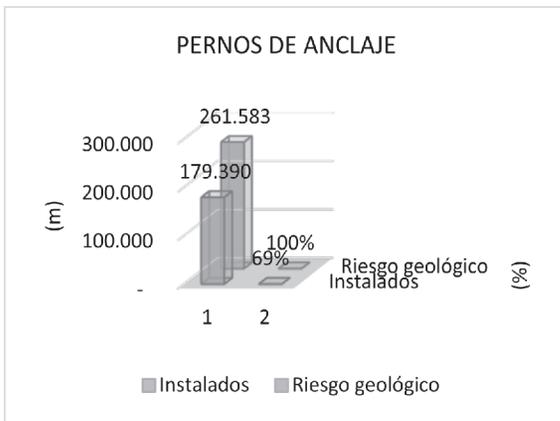


Figura 3. Comparativos pernos de anclaje
Fuente. Autor

La Figura 4 Comparativo malla electrosoldada sostenimiento, corresponde a la relación entre el estimado por riesgo geológico para el área de malla electrosoldada en cuantía de 6.400 m² y la realmente empleada como parte del sostenimiento correspondiente a 99.661 m², esto es un desfase que supera el 1.500%

Previo el contrato en lo concerniente a la longitud esperada de perforaciones para anclajes y drenes, que a partir de 3.938 m se activaría el riesgo, encontrando como se muestra en la Figura 5 Comparativo perforaciones para anclajes y drenes, la perforación de 4.880 m, equivalente al 124%.

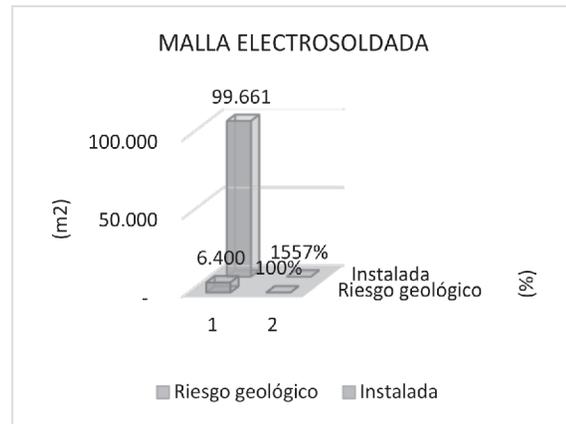


Figura 4. Comparativo malla electro soldada sostenimiento.
Fuente. Autor

Finalmente, en este comparativo de los elementos del sistema de sostenimiento con relación a las cantidades previstas para activar el riesgo geológico, la Figura 6 Comparativo aditivo acelerante para concreto reporta el empleo de 1'476.924 kilos de aditivo que representa el 1.136% del aditivo contemplado en diseños, correspondiente a 130.000 kilos.



Figura 5. Comparativo perforaciones para anclajes y drenes.
Fuente. Autor



Figura 6. Comparativo aditivo acelerante para concreto
Fuente. Autor

A manera de resumen, la Tabla 6 Comparativo elementos de sostenimiento, relaciona las cantidades correspondientes a los elementos empleados en el sostenimiento de la excavación, las cantidades contractuales y sus porcentajes equivalentes, representados esquemáticamente en la Figura 7 Comparativo elementos de sostenimiento.

Tabla 6. Comparativos elementos de sostenimiento

ELEMENTO	INSTALADO	RIESGO GEOLÓGICO	%
Arcos de sostenimiento instalados	1'798.900	1'974.540	91%
Concreto lanzado instalado	30.141	15.400	196%
Aditivo acelerante instalado	1'476.924	130.000	1.136%
Malla electro-soldada riesgo geológico	99.661	6.400	1.557%
Pernos de anclaje instalados	179.390	261.583	69%
Perforaciones realizadas	4.880	3.938	124%

Fuente. Autor

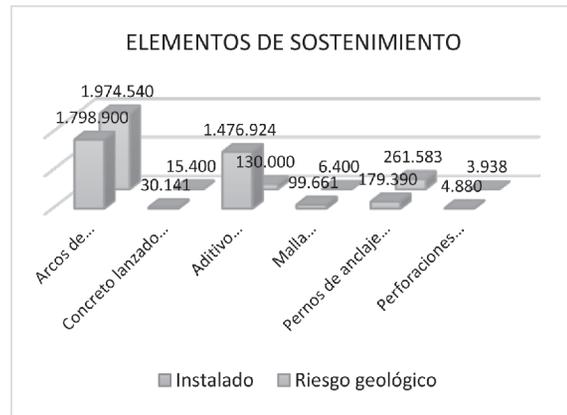


Figura 7. Comparativos elementos de sostenimiento
Fuente. Autor

Puede concluirse entonces, que los elementos del sistema de sostenimiento que superaron los topes establecidos contractualmente para activar el riesgo geológico corresponden al concreto lanzado, la malla electrosoldada y el aditivo acelerante para el concreto.

Bajo la premisa que el soporte diseñado es capaz de resistir la totalidad de las cargas impuestas por el macizo rocoso, se determinó en ambos estudios el diseño y construcción del revestimiento total del túnel por consideraciones de seguridad y funcionalidad, con base en la modelación geométrica de la sección, las propiedades del concreto y diferentes combinaciones de carga, con resultados que arrojaron espesores entre 35 cm y 40 cm.

La Figura 8 Comparativo concreto de revestimiento, representa comparativamente el volumen de concreto empleado en el revestimiento de la obra subterránea, que excedió en el 123% el volumen establecido contractualmente como tope para activación del riesgo geológico; tengamos en cuenta que el concesionario no revistió los nichos de parqueo ni la ventana que hubiera generado aún mayores cantidades de obra.

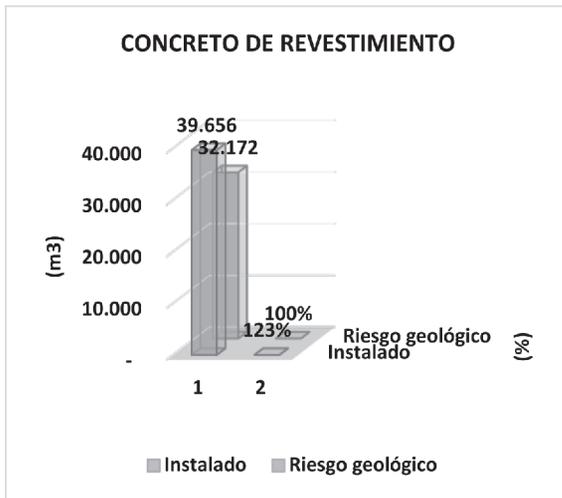


Figura 8. Comparativo concreto de revestimiento
Fuente. Autor

III. CONCLUSIONES

En la estructuración del proyecto que dio origen al contrato de concesión No. GG-040-2004, en especial en lo relacionado con la construcción del túnel de Sumapaz, se consideró que los diseños elaborados por el Consorcio INGETEC S.A. – BATEMAN INGENIERÍA LTDA. – PIV INGENIERÍA LTDA, en el año 1.998, tuvieron el alcance suficiente y necesario para determinar cantidades de obra razonablemente acordes con la obra a ejecutar, y que la provisión realizada como soporte parcial por riesgo geológico era garantía suficiente tanto para el contratista como para el Estado.

No obstante, no se tuvo en cuenta los efectos de la potestad concedida en el contrato al concesionario de realizar sus propios diseños de construcción, que ocasionó modificaciones al proyecto inicial que incidieron en la longitud final del túnel y en cambios sustanciales en las condiciones esperadas del macizo rocoso, situaciones que hicieron insuficiente la provisión del 10% de las mayores cantidades de obra a cargo del concesionario, ocasionando un sobre costo cercano a Cincuenta y Cinco Mil

Millones de Pesos (\$55.000.000.000), que corresponden aproximadamente al 30 % del costo estimado de construcción del túnel, tasado en Ciento Noventa Mil Millones de Pesos (\$ 190.000*000.000) del año 2002.

La asignación de riesgos del Contrato de Concesión No. GG-040-2004, no determinó los riesgos de diseño y construcción, que debieron ser asignados al concesionario y asociados a la potestad de modificar los diseños; en otras palabras, las consecuencias de la modificación del diseño del túnel de Sumapaz han debido ser asumidas por el concesionario con cargo al riesgo de diseño.

Desde el punto de vista contractual la definición ampliamente aceptada de riesgo geológico como “el conjunto de amenazas o peligros derivados de procesos geológicos de origen interno, externo o de una combinación de ambos”, migró a la asociación del riesgo geológico a “las mayores cantidades de obra” resultante de un proceso constructivo.

El análisis realizado permite concluir que si bien la modificación efectuada a los diseños iniciales con los que se estructuró el proyecto no se tradujo en mayores cambios de sección o longitud, si incidió significativamente en las condiciones del macizo rocoso variando sustancial y negativamente el tipo de terreno esperado, lo que a su vez significó mayores exigencias en los sistemas de presoporte y soporte definitivo y por consiguiente en mayores cantidades de las estimadas, superando el presupuesto estimado para la construcción al activarse la contingencia por riesgo geológico.

La campaña exploratoria realizada para el proyecto de construcción del túnel de Sumapaz resultó insuficiente para determinar con un grado de certeza razonable las condiciones esperadas del macizo rocoso a lo largo del alineamiento

propuesto, de cara a un proceso contractual donde el riesgo geológico asociado a mayores cantidades de obra se constituyó en un parámetro determinante en su costo final.

SOCIEDAD CONCESIÓN AUTOPISTA BOGOTÁ GIRARDOT S.A. 2013, *Memoria técnica final. Trayecto Túnel Sumapaz. Obras Civiles*

TÚNELES DE COLOMBIA S.A. 2009, *Informe final de geología y geotecnia*

WORLD ROAD ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE. *Manual de túneles de carretera.*

REFERENCIAS

ADEVIRE PATACA, OSVALDO, y Otros. 1997. *Manual de túneles y obras subterráneas. Segunda Edición.* Madrid mayo de 1997

Colombia, CONPES 376, 2013. *Proyectos viales bajo el esquema de Asociaciones Público Privadas: Cuarta Generación de Concesiones Viales.*

Colombia, Instituto Nacional de Vías – INVIAS 2015. *Manual para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carreteras.* Instituto Nacional de Vías – Primera Edición

Colombia, Instituto Nacional de Vías - INVIAS 2004. *Contrato de Concesión No. GG-040 de 1 de julio de 2004.*

Consortio ConCol B&C, 2012. *Informes mensuales de interventoría. 2009 a 2012.*

Consortio EDL LTDA – DIS LTDA – IPC LTD, 2009. *Informes mensuales de interventoría. 2006 a 2009.*

Consortio INGETEC S.A. – BATEMAN INGENIERÍA LTDA. – PIV INGENIERÍA, 1998. *Estudios para la concesión de la carretera Av. Boyacá-Bosa-Granada-Girardot..*

SOCIEDAD CONCESIÓN AUTOPISTA BOGOTÁ - GIRARDOT S.A. 2005, *Especificaciones, técnicas para construcción. Túnel del Sumapaz*