

**FACTORES GEOTÉCNICOS, CONSTRUCTIVOS Y DE DISEÑO QUE PUEDEN  
CAUSAR LA DEFORMACIÓN EN EL TRAMO K85+616 AL K86+964 DEL  
TÚNEL DEL SUMAPAZ (GUILLERMO LEÓN VALENCIA)**

**MANUEL FERNANDO OLIVARES DIAZ**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ  
2015**

**FACTORES GEOTÉCNICOS, CONSTRUCTIVOS Y DE DISEÑO QUE PUEDEN  
CAUSAR LA DEFORMACIÓN EN EL TRAMO K85+616 AL K86+964 DEL  
TÚNEL DEL SUMAPAZ (GUILLERMO LEÓN VALENCIA)**

**MANUEL FERNANDO OLIVARES DIAZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de  
Ingeniero Civil**

**Asesor Disciplinar: Ing. Edison Garzón Montaña**

**Asesor Metodológico: Lic. Laura Milena Cala Cristancho**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ  
2015**

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	16
3. OBJETIVOS.....	18
a. OBJETIVO GENERAL.....	18
b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
4. ANTECEDENTES.....	19
4.1. TOMOS DE PREDISEÑO DE LA INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES) .....	22
5. MARCO REFERENCIAL .....	26
5.1. MARCO CONCEPTUAL .....	26
5.2. PARTES DE UN TÚNEL Y SU FUNCIÓN .....	27
5.3. GENERALIDADES GEOLÓGICAS DEL MACIZO ROCOSO DE LAS ABCISAS K89+502 A K85+616 .....	29
5.4. METODOLOGIA DE CARACTERIZACIÓN .....	32
5.5. MARCO GEOGRÁFICO.....	34
5.6. MARCO LEGAL .....	35
6. DISEÑO METODOLÓGICO .....	37
6.1. FASES DE INVESTIGACIÓN .....	37
6.2. INSTRUMENTOS.....	38
6.3. Esquema resumen de los posibles factores que afectan a favor de la deformación .....	39
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	40
7.1. RECOPIACIÓN DE LOS DATOS DE PREDISEÑO Y GEOTÉCNICO ..	40
7.1.1. ¿Por qué se escogió la opción de la construcción de un único túnel unidireccional? .....	48
7.1.2. Consecuencias de la segunda opción de diseño.....	51
7.1.3. Método de construcción.....	56
7.2. POSIBLES HIPÓTESIS SOBRE LA DEFORMACIÓN EN EL TÚNEL .	59

1. Omisión en la construcción de la solera curva del túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia).....	59
2. Deformación por materiales expansivos en la rasante del túnel.....	59
3. Lavado de los materiales de la rasante .....	60
7.3. Recopilación del esquema resumen de los factores a favor de la deformación y la guía a seguir para las hipótesis.....	62
8. CONCLUSIONES .....	66
9. RECOMENDACIONES.....	68
10. BIBLIOGRAFIA.....	72

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Localización del túnel de Sumapaz .....	13
Figura 2. Túnel del Sumapaz. ....	14
Figura 3. Modelo conceptual de los hinchamientos en las arcillitas del túnel de Lilla. ....	25
Figura 4. Plano de la sección transversal del túnel para suelos tipo IV.....	28
Figura 5. Ubicación y delimitación de la longitud del túnel del Sumapaz Guillermo León Valencia.....	34
Figura 6. Esquema resumen .....	39
Figura 7. Vista en perfil de la localización de los sondeos. ....	41
Figura 8. Vista en planta de la localización de los sondeos. ....	41
Figura 9. Zoom a la zona de la problemática. ....	44
Figura 10. Perfil estratigráfico de la rasante del túnel. ....	47
Figura 11. Plano 1 de planos constructivos de Sumapaz pico de flauta y diseño geométrico.....	50
Figura 12. Modelación en DIPS, planos de falla de las discontinuidades. ....	53
Figura 13. Modelación en DIPS, polos para la caracterización de familias de discontinuidades.....	54
Figura 14. Modelación en DIPS, polos para la caracterización de familias de discontinuidades.....	54
Figura 15. Pautas de excavación del método belga.....	57
Figura 16. Formaleta de la sección del túnel Guillermo León Valencia.....	58
Figura 17. Modelación del programa Pase 2, (deformación total sin soporte - rocas arcillosas - cobertura = 390m).....	59
Figura 18. Flujo de esfuerzos.....	60
Figura 19. Flujo de agua. ....	61
Figura 20. Esquema general de las hipótesis propuestas.....	63
Figura 21. esquema ilustrativo de la 1ª hipótesis. ....	64
Figura 22. esquema ilustrativo de la 2ª hipótesis. ....	64
Figura 23. esquema ilustrativo de la 3ª hipótesis. ....	65
Figura 24. propuesta de nueva cimentación por medio de micro pilotes (perfil)...	69
Figura 25. Propuesta de nueva cimentación por medio de micro pilotes (planta).	69
Figura 26. Propuesta de nueva cimentación por medio de anclajes (perfil). ....	70
Figura 27. Propuesta de nueva cimentación por medio de anclajes (planta). ....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sectorización geotécnica, composición y localización de unidades geológicas (Tabla 6.1).....	30
Tabla 2. Abscisa de contacto con cada formación. ....	31
Tabla 3. Resumen propiedades geomecánicas de la roca intacta. ....	33
Tabla 4. Resumen parámetros de resistencia de macizo rocoso. ....	34
Tabla 5. Parámetros para el cálculo de RMR para cada tipo de material. ....	43
Tabla 6. Descripción del área de afectación.....	44
Tabla 7. Permeabilidad según el tipo de material.....	46
Tabla 8. Tabla resumen, descripción general de los materiales y fallas estructurales.....	47
Tabla 9. Abscisa y descripción del tipo de formaciones presentes en el túnel. ....	49
Tabla 10. Tramo y avisado de los túneles. ....	51
Tabla 11. Parámetros de diseño del túnel. ....	52
Tabla 12. Resumen de propiedades geomecánicas de la roca intacta. ....	55
Tabla 13. Tipos de formaciones de la formación de Gualanday.....	55

## INTRODUCCIÓN

Desde hace mucho tiempo se ha estado evolucionando en el tema de vías y transporte, hasta tal punto de llegar a la rehabilitación y mantenimiento de la infraestructura vial la cual está construida en accidentes geográficos como montañas y laderas, las cuales hacen que el desplazamiento de los ciudadanos sea muy difícil, por tal motivo se hace necesario la implementación de estructuras subterráneas para la nueva adecuación de las infraestructura vial del país.

Los túneles son uno de los elementos estructurales subterráneos más importantes que tiene la ingeniería civil para el desarrollo de varias infraestructuras que permitan avanzar en cualquier tema de la humanidad, tales como represas, galerías, túneles carreteros o ferroviarios, exploraciones, entre otros. Uno de ello es el túnel Guillermo León Valencia, uno de los principales túneles carreteros de Colombia debido a la importancia económica y recreativa que este representa para la movilidad del país entero, ya que por medio de este túnel se conecta la parte sur y oeste del país sin omitir que también es una de las entradas principales a la capital.

Hace algún tiempo el túnel ha venido presentando una serie de deformaciones que afecta su operación y servicialidad.

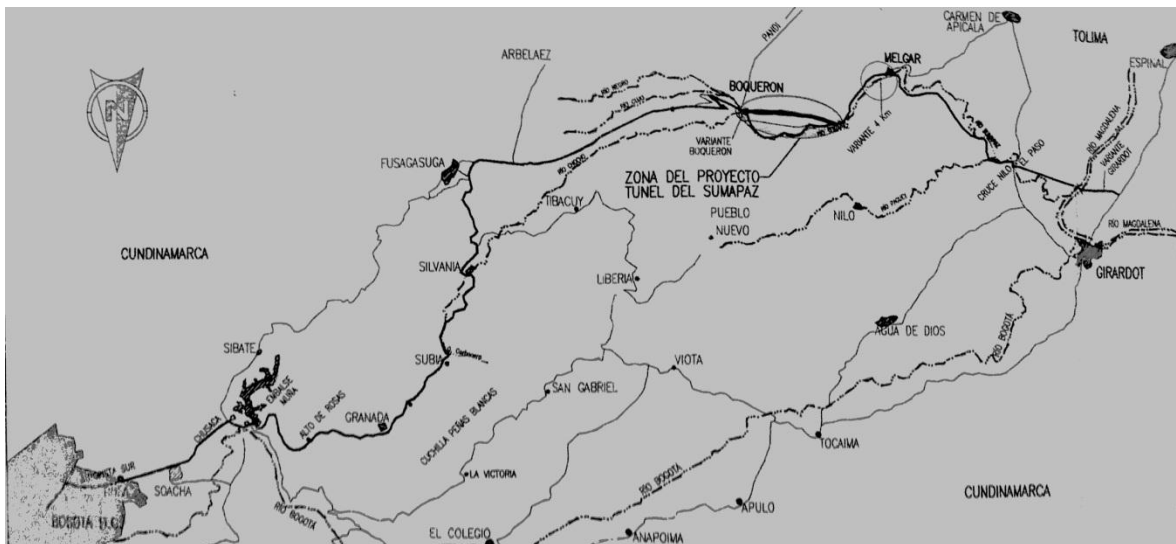
Este documento busca caracterizar todo el entorno que rodea el túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia), revisando los siguientes aspectos: constructivo, geotécnico y geológico y así plantear de manera conceptual diversas hipótesis que sirvan de guía para posteriores análisis y discusiones detalladas.

# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad Colombia ha venido cambiando su infraestructura para poder estar en competencia de crecimiento económico y social debido a la globalización. Es por ello que se hace importante el control de calidad de las estructuras para que ayuden con este propósito y también para la seguridad de los que la utilizan.

El 28 de marzo de 2010 se hizo entrega del túnel vehicular Guillermo León Valencia, que hace parte de la doble calzada Bogotá-Girardot (figura 1). Con una longitud de 4.173 km, dos carriles vehiculares unidireccionales y un alto flujo vehicular el cual puede llegar a un promedio de 25000 vehículos por día<sup>1</sup>, que lo convierte en un elemento imprescindible para la economía y la prestación de servicios de movilidad a la población del Tolima y Cundinamarca, ya que se ha disminuido el recorrido desde Girardot a la capital en 20 minutos. Sin embargo, en la actualidad el túnel ha venido presentado una serie de deformaciones que son visibles en los niveles del pavimento con 230 losas afectadas dentro de él, grietas y deformaciones en las tapas de inspección, generando así una alerta sobre la viabilidad del servicio del mismo; por lo anterior, se ha venido haciendo un monitoreo constante de las deformaciones en la ventana de servicio del túnel y la zona de parqueaderos. Existen posibles variables a nivel geotécnico, constructivo y de diseño que pueden estar causando tal deformación.

Figura 1. Localización del túnel de Sumapaz



Fuente. Informe de avance junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones)

<sup>1</sup> REDACCION NEGOCIOS. Economía: Cerrarían el túnel Guillermo León Valencia. En: EL ESPECTADOR. Bogotá D.C., 8 de octubre de 2014

En la parte geotécnica se pueden encontrar las propiedades índices del macizo (tipo de materiales que lo componen, alteración física y química y el flujo natural del agua dentro del macizo) en el que está construido el túnel, las cuales pueden ser una de las variables que puedan estar causando la deformación por eventos sísmicos o por condiciones que no se tuvieron en cuenta a la luz del estudio de diseño.

En la parte constructiva se han omitido estructuras que hacen parte del buen funcionamiento del túnel y en la parte de los diseños se tenían previstos dos trazados alternativos para la adecuación y construcción del túnel y/o carretera, pero debido a que la ampliación de la vía original ya estaba en proceso, la opción de un único túnel fue la más viable (figura 2) y por lo tanto se descartó la otra opción.

*Figura 2. Túnel del Sumapaz.*



FUENTE: propia.

Con base en lo anteriormente mencionado, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son los factores geotécnicos, constructivos y de diseño que pueden causar las deformaciones en el tramo K85+616 al k86+964 del túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia)?

## 2. JUSTIFICACIÓN

Es necesario tener en cuenta que el túnel Guillermo León Valencia es un elemento estructural y geotécnico que es muy importante para la conducción y el alivio de la carga vehicular que tiene un corredor vial como lo es Bogotá - Girardot. Este es un túnel que maneja un volumen vehicular muy grande debido a la zona turística y económica en donde este se ubica. Por otra parte, Melgar y Girardot son municipios de muy alta densidad turística, además el departamento de Tolima es uno de los mayores exportadores de arroz, frutas y verduras, las cuales llegan directamente a la capital a través de vehículos de carga pesada que utilizan dicho túnel.

Según un artículo del periódico el Espectador, el túnel recibe una carga vehicular en promedio de 25000 vehículos por día; no solo eso, según el manifestó Jairo Herrera Murillo, presidente de la Asociación Nacional de Empresas Transportadoras de Carga por Carretera (Asecarga) indica que el principal corredor logístico que tiene Colombia se llama Bogotá – Buenaventura, por dicho corredor circulan el 50 % de la carga de importación y exportación del país, con un cálculo de 5000 tractomulas que transitan por aquí y de las 410 millones de toneladas de mercancía que se mueven por Colombia, 100 se movilizan por este corredor<sup>2</sup>.

Es por ello, que se hace muy importante determinar las condiciones físicas de los materiales, que junto con las condiciones constructivas y de diseño, posiblemente generan las deformaciones actuales del túnel, problemática que será analizada a lo largo de este trabajo.

A sus 5 años de operación el túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia), aunque no ha tenido problemas en cuanto a su operación, lamentablemente no es posible definir el avance de las deformaciones dentro del mismo, pero si es posible decir, que es imprescindible la revisión de esta problemática para garantizar a futuro la seguridad y el bienestar de los usuarios, y por lo tanto, complementar los errores u omisiones posibles en la construcción del túnel, para darle importancia a esto como antecedentes para futuras construcciones de similar o igual importancia.

Es por ello que se busca con esta investigación identificar las posibles causas que provocan las deformaciones actuales presentadas en el túnel, debido a que estas pueden ocasionar el deterioro progresivo del mismo; y por lo tanto, ocasionar un problema mucho mayor que en el futuro implicaría afectar la operación del túnel e

---

<sup>2</sup> REDACCION NEGOCIOS. Economía: Cerrarían el túnel Guillermo León Valencia. En: EL ESPECTADOR. Bogotá D.C., 8 de octubre de 2014

incluso su cierre como medida preventiva o correctiva frente a un colapso de la estructura del túnel. Se hace necesario determinar elementos conceptuales que permitan en próximas investigaciones, evaluar cuantitativamente la problemática existente y así buscar una solución efectiva, lo que permitirá implementar estrategias de corrección según sea el caso y el control sobre el avance de dichas deformaciones.

### **3. OBJETIVOS**

#### **a. OBJETIVO GENERAL**

- ❖ Analizar los factores geotécnicos, constructivos y de diseño que pueden causar las deformaciones actuales presentadas en el tramo el tramo K85+616 al k86+964 del túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia).

#### **b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ❖ Identificar los aspectos geomecánicos de los macizos rocosos del Sumapaz y las características constructivas y de diseño del túnel Guillermo León Valencia, con base en estudios técnicos previos.
- ❖ Formular las posibles hipótesis que puedan dar un marco conceptual general sobre el problema de la deformación del túnel.

## 4. ANTECEDENTES

Los inicios de la ingeniería civil geotécnica están considerados desde los años 1700, la cual se basa en métodos empíricos de ensayo y error documentados, los cuales son la base actual de la mecánica de rocas.<sup>3</sup>

La variación de características de las rocas hacen muy difícil la semejanza de los posibles materiales de los macizos rocoso, esto se debe a que cada uno es único en su formación y propiedades contenidas a lo largo de miles de años de formación del mismo.

En el siglo XIII, Charles A. de Coulomb<sup>4</sup> publicó su trabajo sobre las presiones laterales que ejercen el suelo a estructuras de contención. Aplicó a los suelos los principios y las bases de la mecánica, basándose en los parámetros de cohesión y fricción. Christian Otto Mohr<sup>5</sup> (1882) elaboró un círculo de esfuerzos, que forma parte de su teoría de la resistencia de los materiales, estas dos teorías conjuntas da origen a la teoría utilizada en la mecánica de suelos de Mohr-Coulomb que se utiliza para construir el modelo de resistencia en suelos y rocas.

Con la ayuda de la clasificación del macizo rocoso es posible tener una idea de las propiedades y comportamientos del mismo, esto se hace con la recopilación de información de ensayos y datos tomados *in situ* o en laboratorio bajo los mismos criterios de análisis. Esto permite tener un idea general de la condición del macizo y también dar un guía a proceder para cualquier adecuación de este ya sea una vía, estructura subterránea, estabilización, entre otros.

Entre los sistemas de clasificaciones propuestos, más utilizados están:

### **SISTEMA DE TERZAGUI<sup>6</sup>**

Sistema por el cual se clasifica el macizo rocoso cualitativamente en 10 categorías a partir del criterio de formación de la zona de roca destruida por la clave de la

---

<sup>3</sup> Anónimo. Historia de la geotecnia. [Diapositivas]. 37 diapositivas. Sitio web: [http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado\\_tecic/211/algloki/pdfs/Resumen%20Suelos.PDF](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_tecic/211/algloki/pdfs/Resumen%20Suelos.PDF)

<sup>4</sup> ANONIMO. Cátedra geotécnica I: macizos rocosos. (1:1, marzo, 2010, Córdoba – Argentina. Cátedra geotécnica. Universidad Nacional de Córdoba – Argentina. 2013. P. 3 - 11

<sup>5</sup> Ibid., p. 2

<sup>6</sup> TERZAGHI, K. Rock defects and loads on tunneling supports. En: Rock tunneling with steel supportsk. 2 ed, Mexico DC: El ateneo, 2014. p. 15 - 99

excavación, “atendiendo esencialmente a las condiciones de fracturación en las rocas y a la cohesión o expansividad en los suelos”<sup>7</sup>.

Uno de los comentarios según el análisis de González de Vallejo<sup>8</sup>, dice que el problema que radica en Terzagui es que evalúa el macizo rocoso como un todo y no toma en cuenta las propiedades del macizo rocoso pudiendo presentar zonas diferenciadas y no permite una valoración subjetiva.

### **SISTEMA DE LAUFFER<sup>9</sup>**

Propone una clasificación de la masa rocosa de carácter cualitativa, la cual obedece a los siguientes parámetros:

- Longitud libre: que es la menor de las dos dimensiones, diámetro o altura de la excavación abierta sin revestimiento.
- Tiempo de estabilidad: es el tiempo que permanece sin desmoronarse la longitud libre anteriormente definida.

La falencia en este método es el impedimento en el cálculo de los dos parámetros que evalúa, si las excavaciones en la obra (de diferente longitud libre) no están despejadas, el lapso de tiempo que las rocas son estables en el contorno de la excavación.

### **SISTEMA DE PROTODYAKONOV<sup>10</sup>**

Propuso una clasificación de macizo cualitativa con el parámetro “f”, que se denomina coeficiente de fortaleza, este depende de la resistencia a la comprensión simple de la roca y corresponde a una décima parte de la comprensión, pero no involucra los parámetros de las discontinuidades ni la presencia de agua dentro del macizo y su afectación.

---

<sup>7</sup>CARTAYA, M. Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental de país. Tesis para postulación de doctorado. Cuba. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2001. Num 3 Vol. 22

<sup>8</sup> GONZALEA DE VALLEJO, L. *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. 2da. Edición. Madrid, J. Instituto Geológico y Minero de España, 2007. Vol. 1, p. 134.

<sup>9</sup>LAUFFER, H. Gebirgsklassifizierung für den stollenbau. Geologie und Bauwesen. Bauwesen. Miller 1958. Vol. 24 No 1, pp. 46-51.

<sup>10</sup>GUAMAN, Vladimir Ernesto y MEDIETA, Francisco Antonio. Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción “las victorias”. Título de ingeniería civil. Ecuador. Universidad de Cuenca. 2013. P. 31

## **SISTEMA DE DEERE<sup>11</sup>**

Propuso el índice de la calidad de las rocas RQD (Rock Quality Designation), el cual se basa en la recuperación de testigos y da a entender que tan alterado está un macizo en el carácter de fracturamiento, pero no nos indican las familias de discontinuidades ni la presencia de agua en el macizo.

## **SISTEMA DE BOLUCHOF<sup>12</sup>**

En la década de los 80 elaboró un sistema de clasificación de macizo rocoso determinado por el parámetro S, el cual depende del coeficiente de fortaleza "f" y de los coeficientes Km, Kt y Ka, que a su vez definen la fracturación del macizo y la resistencia al cortante de las discontinuidades, este método solo se desarrolló para proyectos subterráneos.

## **SISTEMA DE WICKHAM, TIEDEMANN Y SKINNER<sup>13</sup>**

Propusieron el método de clasificación RSR (Rock Structure Rating), este método es cuantitativo y se basa en la suma de parámetros dependientes de la geología, fracturamiento, dirección de avance, condición de agua y de las juntas.

## **SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO BARTON<sup>14</sup>**

El sistema de clasificación de macizo rocoso Q el cual se basa en la ecuación de parámetros de macizo como RQD, número de familias de juntas, rugosidad de las juntas, meteorización de las juntas, presencia de agua y SRF (Stress Reduction Factor), este es un sistema de clasificación cualitativo y depende en gran medida de la persona que realice la clasificación.

---

<sup>11</sup>DEERE, D. Geological considerations. Rock mechanics in engineering practice. 4 ed. Philadelphia, Louis Kirkaldie, 1988. 1.

<sup>12</sup>Anonimo, catedra de geotecnia. Op. Cit., p. 9

<sup>13</sup>Ibid., P. 10

<sup>14</sup>BARTON, N., LIEN, R. y LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock mechanics. 2 ed. New York, M. Bergan, 1980. 2 p. 553-561.

## **SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO BIENIAWSKI<sup>15</sup>**

Planteó el sistema de clasificación RMR (Rock Mass Rating), este se obtiene por medio de cinco parámetros del macizo, resistencia a compresión simple, RQD, estado de las juntas, frecuencia de las juntas y presencia de agua, es un sistema empírico y de carácter cualitativo, lo cual como el Q de Barton depende de la persona que lo realice.

## **CRITERIO DE FALLA DE HOEK Y BROWN<sup>16</sup>**

Mediante ensayos realizados a la matriz rocosa y correcciones y correlaciones que se derivan del RMR obtienen el criterio de falla para rocas, además en (1994 y 1997) se propone el parámetro GSI (Geological Strength Index), el cual incluyó parámetros como la foliación, rellenos, forma de los bloques y el contenido de finos.

El túnel Guillermo León Valencia, fue uno de los proyectos más grandes que se han hecho a nivel de Colombia, no solo por ser un túnel de 4,2 Km, sino también por la complejidad de su construcción y la importancia que este tiene para la movilidad del país. Este es uno de los túneles más cercanos a la capital del país que se tiene, convirtiéndolo en un elemento imprescindible para el sustento y el desarrollo económico de la misma; esto se justifica en el informe de vista técnica de la Concesión Autopista Bogotá - Girardot<sup>17</sup>.

### **4.1. TOMOS DE PREDISEÑO DE LA INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES)**

En el volumen II del informe geotécnico que fue realizado por el INCO (Instituto Nacional de Concesiones)<sup>18</sup> con la ayuda de la concesión Autopista Bogotá – Girardot se puede encontrar en una primera parte se realizaron los sondeos correspondientes para la caracterización del macizo rocoso en el que está construido. Se realizaron en total 8 sondeos a lo largo del perfil del túnel, en ellos

---

<sup>15</sup>BIENIAWSKI, Z.Engineering rock mass classifications. Advances in rock mechanics. 3 ed. Washintong, Balkeman, 1989. Vol 2., part A. p. 27 – 32.

<sup>16</sup>PROCEEDINGS OF THE 5TH NORTH AMERICAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM AND 17TH TUNNELLING ASSOCIATION OF CANADA CONFERENCE NARMS-TAC 2002. (3: 7, julio, 2010, Toronto, Canada). Hoek & Brown failure criterion. Toronto: Universidad de Toronto. 2010.

<sup>17</sup> CAMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. Informe visita técnica concesión autopista Bogotá – Girardot. Bogotá DC., concesión autopista Bogotá – Girardot, 2011. Vol1. 1086

<sup>18</sup> INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Túnel del Sumpaz longitud 3886 informe geotécnico de obras subterráneas. Bogotá, Ponce de León, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T02 – R0.

se obtuvo toda la caracterización de los estratos por los cuales este tendría que pasar y los promedios de avance que se debían realizar en el diseño previo a la construcción del mismo. También se especificó el método constructivo y el soporte, por el cual el túnel se mantendrá firme frente a los empujes propios del macizo rocoso dentro del cual se ubica la obra, estos eran estudios previos a la construcción del túnel.

Cabe resaltar que el RMR (Rock Mass Rating), que es la caracterización del macizo rocoso por medio de variables que surgen, a través de evaluar parámetros tales como el RQD (Índice de Calidad de la Roca), la resistencia uniaxial de la matriz rocosa, el espaciado, orientación y condiciones de las discontinuidades del macizo y por último las condiciones hidrogeológicas del macizo, clasifica el macizo rocoso dentro del intervalo de 0 a 100, según el INCO (Instituto Nacional de Concesiones)<sup>19</sup> este valor se mantuvo en los rangos de 45 a 50.

Lo anterior da a entender que el macizo no presenta un ambiente física y mecánicamente favorable para la construcción del túnel y por ello se vienen presentando problemas como el cerramiento de la cara del túnel por la acción de rocas blandas, y de las altas presiones que este presentaba conforme a la profundidad en la que fue realizado; también se presentaron procesos de remoción en masa debido a la alta alteración de la parte superficial del yacimiento. Es por ello que el túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia) fue uno de los túneles más complejos para su realización y su posterior puesta en funcionamiento.

Dentro del escenario de diseño y posterior construcción, se tienen varias investigaciones sobre túneles en el mundo; existen varios métodos de construcción y diseño de los túneles.

El túnel del Sumapaz fue construido por el método austriaco<sup>20</sup>, método por el cual se generan perfiles de excavación para la colocación del sostenimiento; sin embargo, existe gran variedad de sistemas o metodologías para la construcción del túnel los cuales podrían ayudar a contextualizar aún más el método anterior como lo es el método Belga<sup>21</sup>, el cual consiste en que la bóveda de segunda etapa se construye antes que los hastiales; el método Alemán<sup>22</sup> consiste en la construcción de los hastiales definitivos con hormigón moldeado de una longitud

---

<sup>19</sup> INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Túnel del Sumapaz informe de avance periodo junio de 2005. Ponce de León, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T01 – R0.

<sup>20</sup> INCO. OP. CIT, P. 18

<sup>21</sup> UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. Construcción de túneles en suelo. [diapositivas]. Cataluña. Escuela técnica de ingeniería de Caminos. 2015. 65 diapositivas.

<sup>22</sup> Ibid., p. 15

de 20m a 40m, es por ello que lo hace muy costoso debido a la cantidad de material a utilizar y la cantidad exagerada de la mano de obra, el método de frente completo es el más eficiente. Se construye la bóveda y hastiales primarios con hormigón proyectado y avances de uno a dos metros; se construye la solera con hormigón moldeado y longitud de cinco a ocho metros. Se construye la bóveda y hastiales secundarios con hormigón moldeado y longitud de cuatro a seis metros. Sin embargo, requiere una gran cantidad de hormigón moldeado colocado en una única etapa, entre otros.

Es importante resaltar que todo diseño de un túnel debe tener las respectivas modelaciones de la concentración y disipación de esfuerzos en toda el área de contacto del túnel, esto se hace para ver los comportamientos de esfuerzos a medida que se coloca el sostenimiento y la capa de cobertura. Esta modelación fue hecha para el túnel del Sumapaz en rock support y en PHASE2<sup>23</sup>, programas que ayudan a la comprensión de los esfuerzos actuantes del macizo hacia el túnel, esta modelación se hace necesaria como en el ejemplo de los túneles FFCC para el metro de Madrid, en los cuales se detalla mucho la concentración de esfuerzos en la clave y batea de los túneles.<sup>24</sup>

En segundo lugar como se mencionó anteriormente, el túnel ha venido presentando deformaciones a nivel del pavimento y las tapas de inspección. Este es el problema más importante que da lugar a la investigación de los procesos constructivos, geotécnicos y de diseño que posiblemente condicionaron el comportamiento mencionado.

Uno de los exponentes de esta problemática también es el túnel de Lilla, túnel ferroviario de Madrid a Barcelona el cual presentó deformaciones a nivel de la solera curva de 50 cm, según la tesis de Alexandre Plaza Castel<sup>25</sup>, el túnel de Lilla atraviesa una zona de materiales que son el reflejo sedimentaria de llanuras lutíticas con ambientes saturado. En su trabajo analiza y conceptualiza el modo de expandirse los materiales como lo muestra la figura 3, además de los exhaustivos exámenes por software de elementos finitos para constatar que modelo de solera era el adecuado para contrarrestar este movimiento.

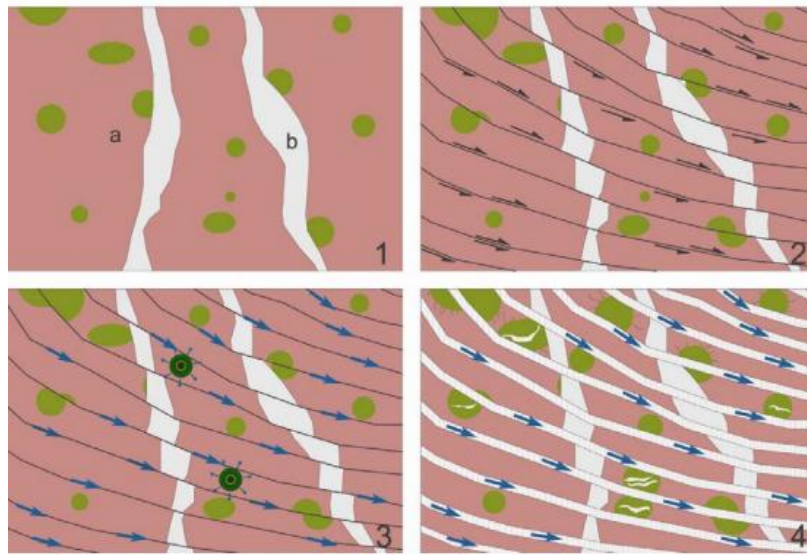
---

<sup>23</sup> INCO. OP. CIT, P. 54

<sup>24</sup> MAYNAR, Manuel, Construcción de los túneles del ffcc del metro de Madrid en suelos blandos. Madrid, E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1995. Vol. 1. 15192 La Coruña.

<sup>25</sup> PLAZA, Alexander. Análisis del comportamiento de un túnel excavado en rocas altamente expansivas. Doctorado. Barcelona. Universidad politécnica de Cataluña. 2008. P. 160

Figura 3. Modelo conceptual de los hinchamientos en las arcillitas del túnel de Lilla.



FUENTE: tesis, análisis del comportamiento de un túnel excavado en rocas altamente expansivas.

No se puede determinar las causas precisas por las cuales se dan las deformaciones en el túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia), pero si podemos determinar las posibles hipótesis que describan y delimiten este problema, con lo cual planteamos un escenario de ingeniería conceptual que sirva de base para estudios posteriores.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1. MARCO CONCEPTUAL

Dentro de los conceptos que sustentan el problema de investigación en el túnel del Sumapaz Guillermo León Valencia, se tienen en cuenta variables que indican el estado de la deformación del túnel<sup>26</sup>, considerando al mismo como un paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una vía de comunicación a través de un monte, por debajo de un río u otro obstáculo, dicha deformación se presenta como un cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo. En cuanto a los parámetros del túnel nos regimos por el método del RMR(Rock Mass Rating)<sup>27</sup>, que es la caracterización del macizo rocoso por medio de variables que surgen, a través de evaluar parámetros tales como el RQD (índice de calidad de la roca)<sup>28</sup>, la resistencia uniáxica de la matriz rocosa, el espaciado, orientación y condiciones de las discontinuidades del macizo y por último las condiciones hidrogeológicas del macizo, clasifica el macizo rocoso, este problema puede ser causa del diseño y trazado del túnel los cuales son los procesos, esquemas y/o bosquejos de los principios y las posibles posiciones en el terreno que pueda ocupar el túnel en sus inicios, durante y finalización de su construcción.

Dentro del marco geotécnico es bien sabido que la geotecnia es una de las ramas más importantes dentro de la ingeniería civil, dado a que la geotecnia<sup>29</sup> es la aplicación de la mecánica de suelos y rocas tanto a las obras de ingeniería civil (diseño y construcción) como a la conservación del medio ambiente. Dicho lo anterior también podemos describir el método constructivo el cual se basó en el método austriaco<sup>30</sup>, este método consiste en una serie de pasos de excavación controladas básicamente por el rango o nivel de avance de la excavación, por medio de este se puede garantizar el sostenimiento del túnel un promedio máximo de avance en la excavación de 15m/día, claro que este depende de los estudios del material, la composición mineralógica del mismo y los promedios de avance estipulados por la obra.

También hay una pequeña variable a la cual no se le puede atribuir la deformación del túnel debido a su poca influencia en el medio, pero si su importancia por la

---

<sup>26</sup> HOYOS, Fabián. Geotecnia. Diccionario básico. 3 ed. Medellín, Universidad nacional de Colombia, 2001. Vol.1.

<sup>27</sup> BIENASKI. Op. cit., p. 23

<sup>28</sup> DEERE. Op. cit., p. 12

<sup>29</sup> HOYOS. Op. Cit., p. 16

<sup>30</sup> GUAMAN. Op. Cit., p. 21.

cual este debe estar en óptimas condiciones, esta variable son los vehículos, como es bien sabido los vehículos considerados como artefactos montados sobre ruedas que sirve para transportar personas, animales o cosas, estos son todavía la base de la economía del país debido a que ellos tienen el 75% del mercado de transporte de todo bien material o vivo del país para su transporte y/o comercialización.<sup>31</sup>

Por último, está la estructura del propio túnel (entiéndase de estructura como conjunto de relaciones que mantienen entre sí las partes de un todo), en los planos originales se tuvo prevista la realización de la solera curva o contra bóveda, la cual es una estructura en forma de media luna con un espesor importante en concreto reforzado la cual ayuda a la disipación de esfuerzos y no permite enormes deformaciones, con cierres de hastiales en unos casos y levantamientos del fondo en otros (expansión y descompresión en otros caso).

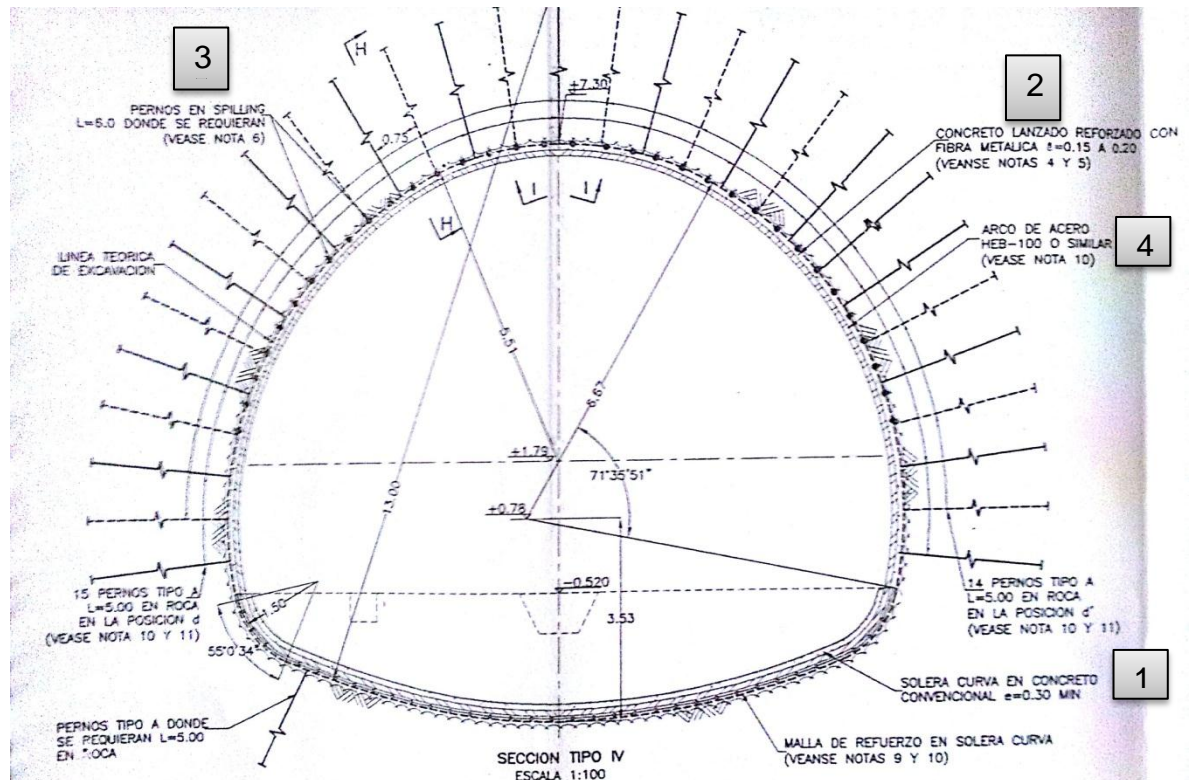
## **5.2. PARTES DE UN TÚNEL Y SU FUNCIÓN**

En esta sección se enfocarán los aspectos más importantes que debería tenerse en cuenta para controlar los esfuerzos de los terrenos con respecto a las estructuras correspondientes del túnel (figura 4) que estarían interactuando con el terreno.

---

<sup>31</sup> HOYOS Op. cit., p. 27

Figura 4. Plano de la sección transversal del túnel para suelos tipo IV.



Fuente. Informe de avance junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

1. **Solera curva o contra-bóveda:** la solera curva es uno de los elementos más importantes del túnel junto con la forma y el recubrimiento del mismo, esto es debido a que hace parte de la mitigación de esfuerzos que se generan de la interacción del material, el macizo y la estructura, por lo tanto la hacen indispensable para la integridad del túnel como una construcción monolítica y que funciona a tono con el macizo rocoso.
  
2. **Revestimiento y forma:** la forma del túnel no ha tenido muchos cambios a través del tiempo, siempre se ha buscado la forma circular o de arco para ellos, debido a que es el modelo más práctico para la disipación o conducción de las fuerzas a las que la estructura este sometida y así trabajar conjuntamente con los esfuerzos naturales en el medio en el que esté construido. Estos también son los responsables del revestimiento de los túneles, ya que a mayor profundidad se encuentre esta estructura mayor será su revestimiento y su manejo de aguas, ya que este revestimiento

también debe ser impermeabilizado para que el agua no ayude a que la estructura sea vulnerable ante los esfuerzos que soporta.

3. **Bulones o pernos:** los bulones son una parte primordial en la construcción del túnel, debido a que estos trabajan como una aguja cosiendo las cuñas producidas naturalmente por las fuerzas del propio macizo, estos se hacen imprescindibles a la hora de tener un avance en la excavación ya que ayuda a la estabilidad de la forma del túnel como también mitigando la posible falla de las cuñas o diaclasas que se forman por las discontinuidades dando así seguridad para colocar el refuerzo del túnel y seguir su construcción.
4. **Hastiales o arcos de acero:** los arcos de acero se han venido trabajando para el sostenimiento de los túneles durante mucho tiempo, ya que estos permiten estabilizar la excavación mientras se realizan tareas como la extracción de material, revestimiento del túnel y proseguir con el avance de la excavación para el siguiente segmento. En años anteriores se buscaba que los hastiales fueran lo más rígidos posibles provocando que la estructura fuera igualmente rígida para el soporte y su utilización dentro de una condición de esfuerzos masivos como la que se encuentra en un macizo rocoso, sin embargo, hoy en día las investigaciones de los métodos de excavación dependiendo del terreno en el que se construyan las obras subterráneas permite hastiales más débiles ya que se busca una condición de equilibrio con el material y la estructura.

### **5.3. GENERALIDADES GEOLÓGICAS DEL MACIZO ROCOSO DE LAS ABCISAS K89+502 A K85+616**

En este apartado se describe la geología del túnel del Sumapaz, incluyendo la estratigrafía, la geología estructural y las condiciones hidrogeológicas. El área donde se encuentra el túnel corresponde al sector comprendido entre la localidad del Boquerón y el hotel Malachi; estos dos puntos están localizados sobre el flanco izquierdo (sur) del cañón del río Sumapaz. En esta área se encuentran afloramientos del cretáceo, compuestos principalmente por arenisca con intercalaciones de limolita, lidita, lutita y arcillolita y rocas del terciario como areniscas conglomeráticas y conglomerados, cubiertas en algunos sectores por

coluviones compuestos por grandes bloques de arenisca en una matriz arenociliosa.<sup>32</sup>

En el sector donde fue excavado el túnel del Sumapaz, se presentan estructuras muy apretadas originando anticlinales y sinclinales invertidos y dislocados por dos fallas denominadas la falla de Quinini y la falla de Melgar, la primera divide prácticamente el área en dos grandes bloques: el bloque oriental, conformado por arenisca del grupo Guadalupe que buza hacia el occidente con ángulos promedio de 35 a 45 grados; en el contacto con la falla se presentan buzamientos suaves en rocas del grupo Villeta.<sup>33</sup>

El bloque occidental está compuesto por rocas del grupo Guadalupe con depósitos discordantes de rocas terciarias de la formación Gualanday localizada sobre los sinclinales presentes en el área. Al final del cañón del río Sumapaz se encuentran depósitos de terraza aluvial ubicados muy cerca de la falla de Melgar, la cual delimita el bloque occidental con rocas del terciario y depósitos de terraza aluvial, los cuales no fueron encontrados a nivel del túnel.<sup>34</sup>

En la parte central del área se presenta un coluvión que cubre las rocas separadas por la falla inversa denominada falla de Quinini, que divide los bloques estructurales antes mencionados. A continuación se muestra la sectorización geotécnica esperada en la tabla 1.

Tabla 1. Sectorización geotécnica, composición y localización de unidades geológicas (Tabla 6.1)

TUNEL DEL SUMAPAZ																	
INFORME GEOTECNICO DE OBRAS SUBTERRANEAS																	
TABLA No. 6.1 SECTORIZACION GEOTECNICA - TUNEL 3886 m <span style="float: right;">3906.00</span>																	
TUNEL LARGO																	
Abscisas	Longitud	Formacion	Tipo de Terreno														
			I		II - A		II - B		III		IV		V		VI		
			Long	%	Long	%	Long	%	Long	%	Long	%	Long	%	Long	%	
K89+502	K89+225	277	Tg - Formacion Gualanday	0	0%	28	10%	97	35%	125	45%	14	5%	0	0%	14	5%
K89+225	K89+207	18	Kgl - Arenisca de Labor	0	0%	3	15%	9	50%	5	25%	2	10%	0	0%	0	0%
K89+207	K89+178	29	Kgt - Arenisca Tierna	0	0%	0	0%	4	15%	16	55%	4	15%	4	15%	0	0%
K89+178	K89+109	69	Tg - Formacion Gualanday	0	0%	10	15%	24	35%	31	45%	3	5%	0	0%	0	0%
K89+109	K89+074	35	Kgt - Arenisca Tierna	0	0%	4	10%	14	40%	15	42%	3	8%	0	0%	0	0%
K89+074	K89+007	67	Kgl - Arenisca de Labor	0	0%	3	5%	23	35%	30	45%	10	15%	0	0%	0	0%
K89+007	K88+601	406	Kgp - Arenisca de Plaeners	0	0%	41	10%	183	45%	142	35%	41	10%	0	0%	0	0%
K88+601	K88+107	494	Kgl - Arenisca de Labor	0	0%	74	15%	272	55%	114	23%	35	7%	0	0%	0	0%
K88+107	K87+762	345	Kgp - Arenisca de Plaeners	0	0%	17	5%	35	10%	299	75%	35	10%	0	0%	0	0%
K87+762	K86+964	798	Kgd - Arenisca Dura	79,8	10%	72	9%	399	50%	120	15%	80	10%	48	6%	0	0%
K86+964	K86+914	50	Zona de falla Quinini	0	0%	0	0%	0	0%	3	5%	10	20%	38	75%	0	0%
K86+914	K86+412	502	Kv - Villeta (lutitas)	0	0%	0	0%	25	5%	251	50%	100	20%	126	25%	0	0%
K86+412	K85+955	457	Kgd - Arenisca Dura	54,84	12%	91	20%	274	60%	23	5%	14	3%	0	0%	0	0%
K85+955	K85+780	175	Kgp - Arenisca de Plaeners	0	0%	26	15%	88	50%	47	27%	14	8%	0	0%	0	0%
K85+780	K85+626	154	Kgl - Arenisca de Labor	0	0%	15	10%	85	55%	39	25%	15	10%	0	0%	0	0%
K85+626	K85+616	10	Kgt - Arenisca Tierna	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0,0%	0	0,0%	10	100,0%
Totales			3886	134,8	3%	384,4	10%	1531,3	39%	1217,3	31%	379,3	10%	215,2	8%	23,9	0,6%

<sup>32</sup> INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Túnel del Sumpaz longitud 3886 informe geotécnico de obras subterráneas. Bogotá, Ponce de León, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T02 – R0.

<sup>33</sup> INCO. OP. CIT, P. 54

<sup>34</sup> INCO. Op. Cit., p 18

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

- **Estratigrafía**

A continuación en la tabla 2 se describe la composición y localización de cada una de las unidades geológicas que fueron excavadas para el túnel del Sumapaz.

*Tabla 2. Abscisa de contacto con cada formación.*

ABSCISA	DESCRIPCION
K85+955	Contacto Formaciones Plaeners – Arenisca Dura
K86+412	Contacto Formaciones Arenisca Dura - Villeta
K86+964 – K86+914	Falla de Quinini
K88+107	Contacto Formaciones Plaeners – Arenisca de Labor
K88+601 – K88+107	Formación Arenisca de Labor
K89+007	Contacto Formaciones Plaeners – Arenisca de Labor
K89+109	Contacto Formaciones Arenisca Tierna - Gualanday
K89+178	Contacto Formaciones Gualanday – Arenisca Tierna

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

- **PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS**

Para evaluar analíticamente el comportamiento del túnel de Sumapaz, incluyendo el estimativo de presiones a que se podrían ver sometidos los diferentes elementos de soporte, el revestimiento y la magnitud de las deformaciones que se pueden esperar, es necesario conocer las propiedades geomecánicas y físico químicas de los materiales a excavar y estimar las del macizo rocoso donde se realizó la construcción del túnel. Entre estas se destacan la resistencia de la masa de roca, la cohesión, el ángulo de fricción, el módulo de deformación y el potencial de expansión.

El procedimiento para evaluar los parámetros de diseño aplicables a la masa rocosa se basa en las propiedades de la roca intacta. A partir de estos valores, empleando correlación entre las propiedades de la roca intacta y las condiciones del macizo rocoso, particularmente el grado de fracturamiento y el estado de las discontinuidades, se establecen las propiedades de diseño para la masa rocosa. A

continuación se presenta los análisis desarrollados para determinar los parámetros aplicables a cada tipo de roca en cada formación geológica, esto con ayuda del programa de análisis de estados de esfuerzos (ROCLAB) en que utilizo la INCO en función de sistemas de clasificación de macizo rocoso GSI.

#### **5.4. METODOLOGIA DE CARACTERIZACIÓN**

A continuación se presentara los parámetros necesarios para la realización de la caracterización de un macizo rocoso, este método se realizó para caracterizar el macizo del Sumapaz para posteriormente realizar la realización del túnel.

- **Resistencia y módulo de deformación de la macizo rocoso**

La frecuencia y la naturaleza de las discontinuidades dentro del macizo rocoso son factores importantes que determinan la resistencia y la deformabilidad de los distintos tipos de masa rocosa que lo componen. Esta calidad del macizo rocoso se relaciona directamente con el RQD. La resistencia de la masa de la roca está determinada entonces por la resistencia de la roca intacta y la alteración de las discontinuidades.

El módulo de elasticidad de los núcleos han proporcionado el límite superior del módulo del macizo, en caso de que las diaclasas estén muy separadas y muy cerradas. Al aumentar el grado de fracturamiento de la roca, el módulo de deformación del macizo se reduce a una pequeña fracción del módulo de elasticidad, determinado a partir de muestras de laboratorio y ensayos, como lo fueron los ensayos de compresión simple, corte directo en discontinuidades, los cuales en este caso fueron determinados de proyectos excavados en formación geológicas similares y comportamientos geomecánicos equivalentes y algunos ensayos realizados a muestras extraídas en la exploración de campo para este proyecto específico con ensayos de permeabilidad de Lefranc y de resistencia de paredes con martillo Schmidt.

- **Resistencia a la compresión y módulo de deformación de la roca intacta**

Se consideraron los ensayos de compresión inconfiada realizados sobre núcleos de roca extraídos durante la excavación de túnel en formaciones geológicas similares, aquellos reportados en los estudios a la fase II de este proyecto y los realizados a los núcleos extraídos durante la exploración de campo de este

estudio.<sup>35</sup> En las tablas se presenta el análisis estadístico de los valores de pesos unitario, resistencia a la compresión inconfiada y módulos de elasticidad para cada tipo de roca en cada formación. En la tabla No. 3, se presenta el resumen de propiedades mecánicas con parámetros de corrección de Hooke and Brown expuesta posteriormente.<sup>36</sup>

- **Cohesión y ángulo de fricción**

Conjuntamente con las propiedades mencionadas anteriormente, la cohesión (c) y ángulo de fricción son parámetros geomecánicos importantes y característicos de la masa de roca, por lo tanto, deben ser determinados para diseñar el soporte del túnel. Para determinar estos parámetros en la masa de roca se utilizó el programa Rocklab que utiliza la metodología propuesta por E. Hoek,<sup>37</sup> cálculos que se realizaron en los informes de construcción y diseño del túnel del Sumapaz.

- **CLASIFICACIÓN GEOMECAÁNICA DEL MACIZO ROCOSO**

Para la clasificación geomecánica del macizo rocoso aplicaron la metodología del RMR propuesta por Bieniawski<sup>38</sup>, la cual tiene en cuenta los parámetros expuestos anteriormente en el numeral 4 y el sistema de clasificación de macizo GSI propuesto por Hoek<sup>39</sup>, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas mencionadas en las tablas 3 y 4.

*Tabla 3. Resumen propiedades geomecánicas de la roca intacta.*

TUNEL DEL SUMAPAZ INFORME GEOTÉCNICO TABLA No.4.7 RESUMEN PROPIEDADES GEOMECAANICAS DE LA ROCA INTACTA Rocas de las Formaciones del Grupo Guadalupe, Villeta y Gualanday												
Formación	Convención	Tipo de Roca	$\gamma$ (Ton/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)			$E_{T50\%}$ (10 <sup>3</sup> MPa)			Constantes*		
				Promedio	Rango		Promedio	Rango		Promedio	$m_i$	s
					Máx	Mín		Máx	Mín			
<b>Grupo Guadalupe</b>												
Tierna	Kgt	Arenisca	2,27	40	30	35	8,7	7,7	8,2	19	1,0	
Labor	Kgl	Arenisca	2,32	43	30	36	10,7	8,4	9,6	19	1,0	
		Lutita	2,32	16	14	15	4,3	4,1	4,2	4	1,0	
Plaeners	Kgp	Arenisca	2,36	38	26	32	5,7	5,3	5,5	19	1,0	
		Limolita	2,42	40	24	32	4,7	4,5	4,6	9	1,0	
Dura	Kgd	Arenisca	2,33	47	34	40	9,9	8,5	9,2	19	1,0	
		Lutita	2,36	15	13	14	3,1	3,0	3,1	4	1,0	
		Arcillolita	2,16	3	3	3	0,1	0,1	0,1	4	1,0	
		Limolita	2,16	6	5	6	1,2	1,2	1,2	9	1,0	
Villeta	Kv	Lutita	2,62	10	8	9	0,9	0,9	0,9	4	1,0	
		Arenisca	2,44	59	49	54	1,8	1,8	1,8	19	1,0	
Gualanday	Tg	Conglomerado	2,16	17	17	17	5,0	5,0	4,9	22	1,0	
		Arenisca	2,38	15	13	14	0,7	0,7	0,7	19	1,0	

<sup>35</sup> INCO. Op. Cit., p 18

<sup>36</sup> Ibid., p. 18.

<sup>37</sup> HOEK. Op. Cit., p. 13

<sup>38</sup> BIENASKI. Op. Cit., p. 13

<sup>39</sup> HOEK. Op. Cit., p. 13

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

Tabla 4. Resumen parámetros de resistencia de macizo rocoso.

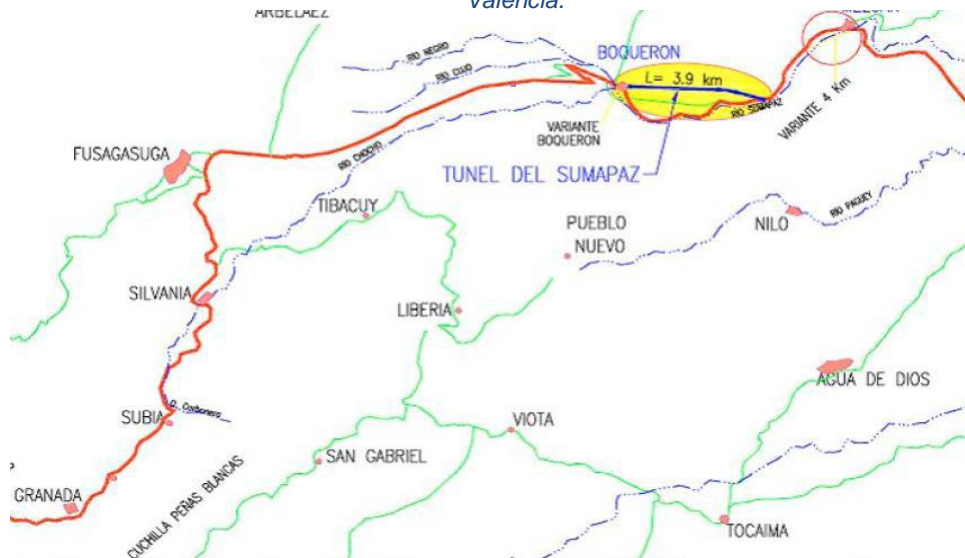
TUNEL DEL SUMAPAZ INFORME GEOTÉCNICO TABLA No. 4.8 RESUMEN PROPIEDADES GEOMECANICAS DEL MACIZO ROCOSO Rocas Arcillosas, Rocas Conglomeráticas y Rocas Areniscas																
Macizo Rocosos	$\sigma_{cm}$ (Mpa)				$\phi$				$c'$ (Mpa)				E (Mpa)			
	Especial	Máx.	Med.	Min.	Especial	Máx.	Med.	Min.	Especial	Máx.	Med.	Min.	Especial	Máx.	Med.	Min.
Cobertura	390 m	200 m	100 m	25 m	390 m	200 m	100 m	25 m	390 m	200 m	100 m	25 m	390 m	200 m	100 m	25 m
Rocas Arcillosas	1.07	1.07	1.03	0.60	21	21	21	24	0.37	0.37	0.36	0.20	2023	2023	1912	1793
Cobertura		100 m	50 m	25 m		100 m	50 m	25 m		100 m	50 m	25 m		100 m	50 m	25 m
Rocas Conglomeráticas		3.85	3.85	3.85		38	38	38		0.94	0.94	0.94		4123	4123	4123
Cobertura	300 m	200 m	100 m	25 m	300 m	200 m	100 m	25 m	300 m	200 m	100 m	25 m	300 m	200 m	100 m	25 m
Rocas Areniscas	12.92	12.92	11.00	9.00	41	41	41	41	2.93	2.93	2.52	2.10	15839	15839	14635	13322

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

## 5.5. MARCO GEOGRÁFICO

El túnel del Sumapaz Guillermo León Valencia está ubicado entre el centro poblado de Boquerón y la cabecera municipal de Melgar en el departamento del Tolima, tiene una longitud aproximada de 4.2 kilómetros y facilitará la movilidad a la altura de los sitios conocidos como “la nariz del diablo y el divino niño”<sup>40</sup> (ver figura 5). Las características principales del túnel son:

Figura 5. Ubicación y delimitación de la longitud del túnel del Sumapaz Guillermo León Valencia.



<sup>40</sup> INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Túnel del Sumapaz informe de avance periodo junio de 2005. Ponce de León, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T01 – RO.

Fuente: informe visita técnica concesión Bogotá – Girardot

- Ancho de carril = 3,65 m. c/u y franja de seguridad de 0,50 m. c/u.
- Velocidad de diseño: 60 Km/h.
- Centro de Control de Operaciones: Principal ubicado en ventana y auxiliar en Boquerón.
- Iluminación: Cuenta con más de 2.100 luminarias entre luminarias de Sodio, Fluorescentes y Tipo Led que garantizan la adecuada iluminación del Túnel.
- Ventilación: 20 ventiladores de 37 Kva. que mantienen al túnel con bajas concentraciones de gases producto de la combustión de los automóviles y camiones que transitan por éste.
- Circuito cerrado de televisión: Detecta automáticamente cualquier tipo de incidente, controla la velocidad de los vehículos e identifica las situaciones de riesgo. 47 cámaras en el interior del túnel y 3 cámaras en los Portales de Boquerón, Melgar y la Ventana.

Anteriormente se encontraba en proceso la remoción del derrumbe presentado en la Ventana de evacuación del Túnel el pasado mes de diciembre de 2010. La sobresaturación del suelo por efecto de la temporada invernal causó el colapso de los taludes laterales. Estas actividades fueron terminadas en noviembre de 2011, removiendo cerca de 40.000 m<sup>3</sup> de material.<sup>41</sup>

## **5.6. MARCO LEGAL**

Todos los trabajos relacionados a la construcción, operación y diseño de las obras subterráneas de carácter vial en el país se elaboran con lo establecido en estos documentos y las últimas publicaciones de las normas por las siguientes entidades y que sean aplicables a los parámetros mencionados anteriormente, las cuales deberán ser aplicadas en forma integral, es decir, sin mezclar especificaciones de otras instituciones:

- NTC 2050. Código Eléctrico Colombiano.
- NTC 1500 Código Colombiano de Fontanería.

---

<sup>41</sup> CAMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. OP. CIT., P 14

- CIE. Comité Internacional de Iluminación.
- Guide for Lighting of Road Tunnels and Underpasses (CIE 88-1990)
- RAS 2000

Las normas anteriormente mencionadas son establecidas para el desarrollo y operación del túnel. En cuanto a la normativa de la caracterización geotécnica y geológica del proyecto se encuentran:

- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1527
- NTC 1504: 1979, Suelos. Clasificación para propósitos de ingeniería.
- NTC 1522: 1979, Suelos. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado.
- NTC 1974: 1984, Ingeniería civil y arquitectura. Suelos. Determinación de la densidad relativa de los sólidos.
- NTC 2041: 1985, Ingeniería civil y arquitectura. Suelos cohesivos. Determinación de la resistencia. Método de compresión triaxial.
- NTC 2121: 1986, Ingeniería civil y arquitectura. Suelos. Obtención de muestras para probetas de ensayo. Método para tubos de pared delgada.
- NTC4630: 1999, Ingeniería civil y arquitectura. Suelos. Método de ensayo para la determinación del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos.
- ASTM D 653: Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids.
- ASTM D 2488: Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)
- ASTM D 4220: Practices for Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM D-3148 Compresión simple en roca.
- ASTM D-5731 Alistamiento de caras en núcleos (Corte de caras).
- ASTM D-2845 Velocidad de onda.
- ASTM D-5731 Carga Puntual.
- ASTM D-2937 Peso Unitario.
- ASTM D-3967 Tensión indirecta (método brasilero).
- ASTM D-3148 Compresión simple con medición de deformación axial.
- ASTM C-295 Petrografía (Incluye sección delgada y análisis).
- ASTM D-2664 Triaxial Estático en Roca.
- INV E – 101 – 13 investigación de suelo y roca para propósitos de ingeniería.
- INV E – 113 – 13 Conservación y transporte de núcleos en roca.

## **6. DISEÑO METODOLÓGICO**

El enfoque de la investigación es cualitativo debido a que este método de investigación permite descubrir y refinar preguntas de la misma; por otra parte, se debe resaltar que la investigación es de tipo descriptivo debido a que solo se pretende realizar la caracterización de un evento como el de la deformación del túnel del Sumapaz Guillermo León Valencia y por lo tanto se presenta solamente el estado del problema, como lo menciona.

### **6.1. FASES DE INVESTIGACIÓN**

#### **Fase I recopilación y revisión de la información:**

Identificar los aspectos geomecánicos del macizo rocoso del Sumapaz y las características constructivas y de diseño del túnel Guillermo León Valencia, con base en estudios técnicos previos se realizaron las siguientes actividades:

- Recopilación de la información constatada en los tomos de pre-diseño y geotécnico realizados por la INCO.
- Descripción de los aspectos geomecánicos del macizo rocoso para delimitar los posibles parámetros que no se tuvieron en cuenta para la construcción del túnel.
- Determinar si la opción de la construcción de un único túnel fue la más adecuada.
- Delimitar las posibles consecuencias, ya sean favorables o desfavorables, que hubiesen podido ocurrir si se tomara la otra posibilidad de diseño.
- Determinar si el método constructivo es el adecuado para la construcción del túnel dadas las características del macizo.

## **Fase II formulación de hipótesis:**

- Dependiendo de la fase anterior y de la revisión y posterior análisis de la información se formularon las posibles hipótesis sobre la deformación del túnel.
- Elaboración de diagramas y mapas conceptuales que permitan delimitar y demostrar el camino a la formulación de las hipótesis propuestas.

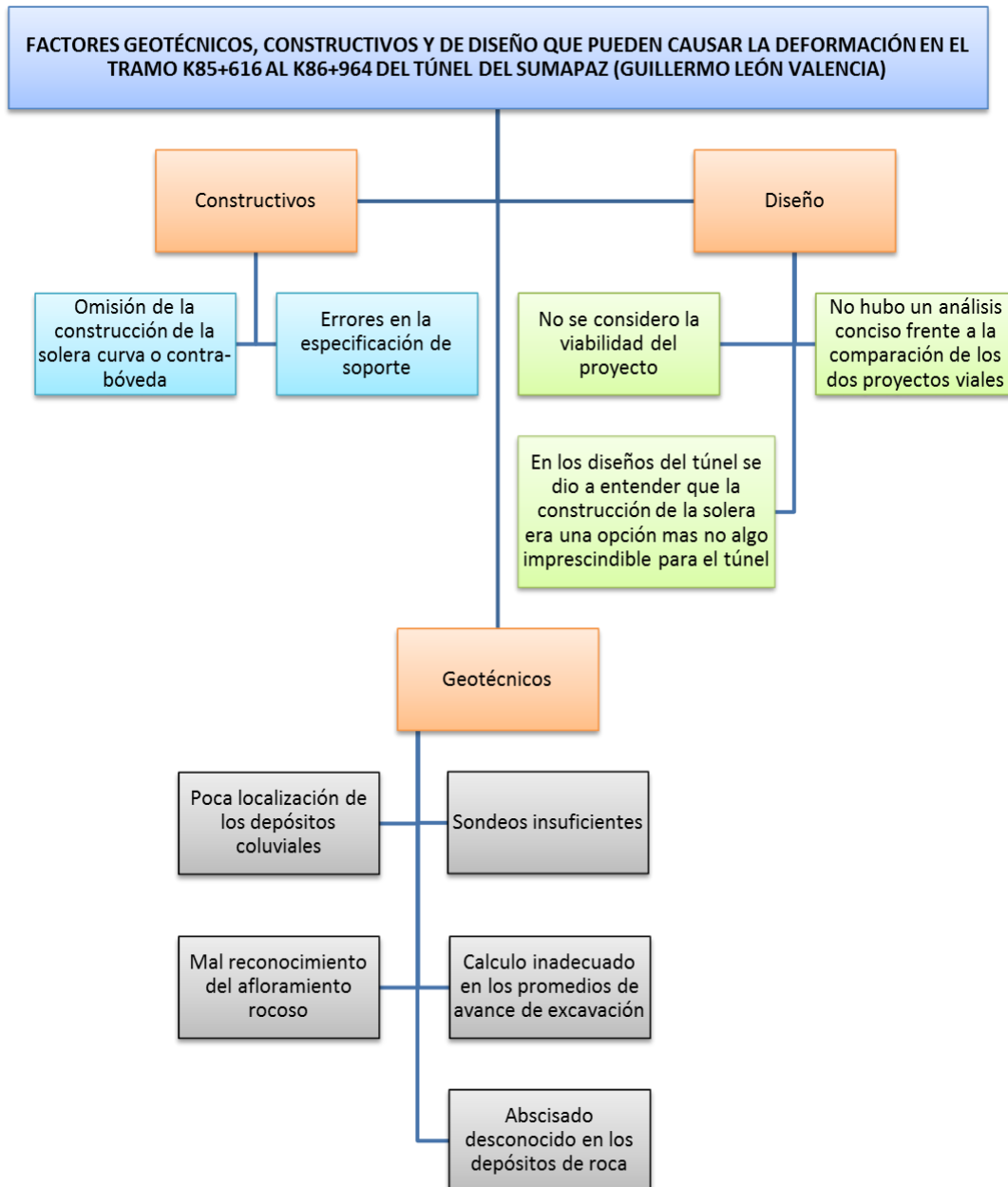
### **6.2. INSTRUMENTOS**

Dentro de los instrumentos que se deberán utilizar para la generación de las fases de investigación serán la información recolectada con el uso de software dentro de la misma, para la generación de las posibles causas que pueden estar generando la deformación en el túnel.

A continuación se presenta un diagrama conceptual de los diversos factores que puedan estar causando la deformación del túnel ya sean constructivos, geotécnicos o de diseño.

### 6.3. Esquema resumen de los posibles factores que afectan a favor de la deformación

Figura 6. Esquema resumen



## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. RECOPIACIÓN DE LOS DATOS DE PREDISEÑO Y GEOTÉCNICO

Los tomos del INCO (Instituto Nacional de Concesiones), determinan la posibilidad de la construcción, rehabilitación, operación y mantenimiento del proyecto vial Bosa – Granada – Girardot corredor vial Bogotá –Buenaventura, los cuales están enfocados en la zona del Boquerón, esta zona ya delimitada de manera espacial previamente, fue escogida para la realización del hoy en día *uno de los túneles carreteros más importantes del país*.

El informe se divide en dos tomos:<sup>42</sup> el primero sobre los aspectos geológicos y geotécnicos del macizo; y el segundo, sobre las dos etapas de diseño: la primera es el trazado de la rasante del túnel, o en otras palabras, la línea que debería seguir el túnel dentro del macizo rocoso de un único túnel unidireccional, y la segunda el trazado y posible construcción de tres túneles unidireccionales en la parte superior del yacimiento a una profundidad menor.

El segundo tomo de pre-diseño no enseña todo lo que se debe tomar a consideración en cuanto a cada opción de construcción, en ellos se puede encontrar el tipo de pre-sostenimiento, promedios de avance, tipos de excavación, tanto manual como por voladura y parámetros geométricos de cada alternativa.<sup>43</sup>

- **Sondeos**

En las fechas preliminares del 29 de junio al 29 de julio de 2005<sup>44</sup>, fechas las cuales se utilizaron para toda la preparación geotécnica y topográfica para el inicio de la elaboración del túnel, se controlaron 8 sondeos que se muestran en la figura 7 y 8, los cuales están especificados en el tomo de diseño (es importante decir que los 8 sondeos solo están especificados en el tomo de diseño por lo cual no se conoce ni se pudo obtener más información sobre sondeos y estudios anteriores a este tomo de avance). Cada sondeo está delimitado en el esquema de alternativa de la ventana de acceso con su respectiva abscisa y profundidad, los sondeos

---

<sup>42</sup> INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Contrato de concesión No. GG-040-2004 para el diseño, la construcción, rehabilitación, operación y mantenimiento del proyecto vial Bosa – Granada – Girardot corredor vial Bogotá - Buenaventura. Ponce de León, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T01 – R0, 197 – IN – T02 – R0

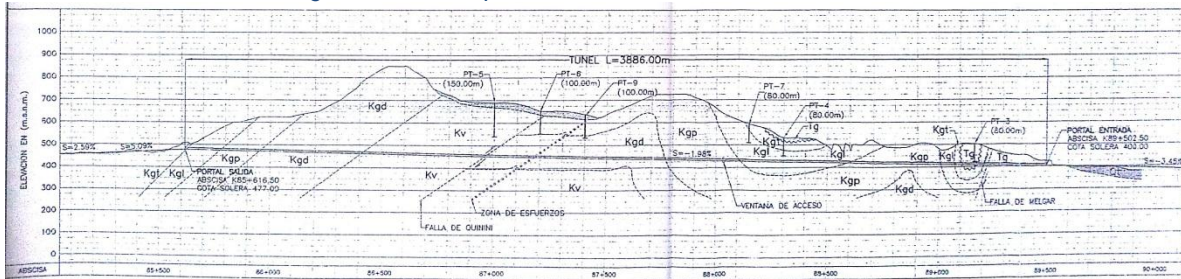
<sup>43</sup> INCO. Op. Cit., p 18

<sup>44</sup> INCO. Op. Cit., p. 17

están determinados a una profundidad de los 80 – 150 m, los cuales se concentran en el área de los portales y a lo largo del túnel.

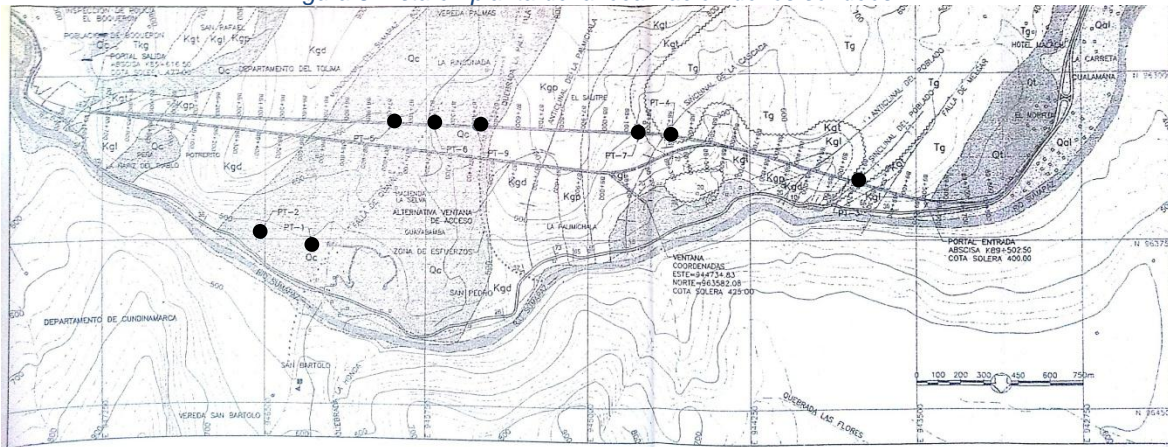
Con la ayuda de estos sondeos, la clasificación de macizo rocoso y estudios anteriores hechos por el IGAC<sup>45</sup> se hizo la caracterización de los distintos materiales que se tendría que escavar para la realización del túnel Guillermo León Valencia.

Figura 7. Vista en perfil de la localización de los sondeos.



Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

Figura 8. Vista en planta de la localización de los sondeos.



Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

- **Aspectos Geomecánicos**

Los aspectos geomecánicos del macizo rocoso deben verse solo en el tema de qué tan factible es la realización de una obra subterránea, dado que no es posible enfocarse en cuáles son las nuevas propiedades de este con el túnel construido,

<sup>45</sup> INCO. Op. Cit., p. 17

ya que se debe analizar el potencial del macizo rocoso para cualquier comportamiento.

Según el tomo geotécnico<sup>46</sup> se puede observar un macizo con características medias en sus propiedades mecánicas, se encuentra gran parte de material blando con intercalaciones de suelos medianamente duros, la zona que se debe tener en cuenta es a partir de 2,5 Km después de la entrada del túnel, es decir, entre las abscisas K86+964 y K85+616, debido a que allí se encuentra la falla de Quinini.

Esta falla es de tipo cubierta de cabalgamiento, por lo tanto, sirve como un condicional geológico dentro del macizo dividiendo las rocas blandas de las duras. Sin embargo, se puede observar que la presencia de agua en esta zona no es influyente debido a la baja permeabilidad del suelo, pero hay una condición especial en este caso, a partir de los 3,3Km a los 3,5Km se encuentra un estrato de material con características mecánicas pobres, muy permeable, el cual está siendo afectado por la fuerza de la falla de Quinini por medio de otro estrato de 300m de longitud aproximadamente, el cual es poco permeable y esto ayuda a que la presión del agua se condicione al suelo en estos 200m (estrato pobre de material que está contenido entre dos estratos de material bueno), además en la parte final se encuentra este mismo material el cual hace parte del portal de salida. Debido a la clasificación del RMR del macizo los cuales arrojan promedios de 42 – 58, lo que indica que es un macizo de propiedades media a bajas, el cual causa que las condiciones de soporte y pre-sostenimiento sean más altas que en un material con propiedades mecánicas mejores<sup>47</sup>. De esto se puede intuir que los promedios de avance no sean mayores a los 10m de distancia con intercalaciones de excavación manual y voladura con la dependiente del suelo. En la tabla número 5 se encuentra el análisis de RMR para cada estrato localizado.<sup>48</sup>

---

<sup>46</sup> INCO. Op. Cit., p 18

<sup>47</sup> BIENASKI. Op. Cit., p. 23

<sup>48</sup> INCO. Op. Cit., p. 17

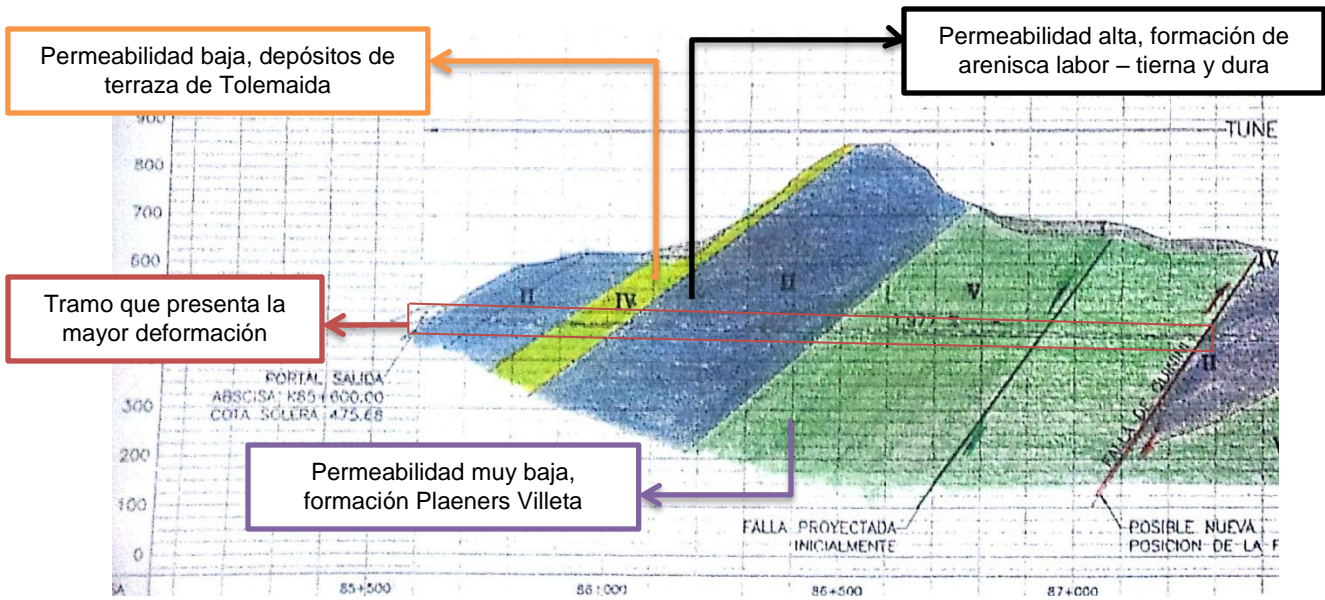
Tabla 5. Parámetros para el cálculo de RMR para cada tipo de material.

Parámetros	Formaciones Geológicas					
	Tg	Kgt	Kgl	Kgp	Kgd	Kv
	Puntos	Puntos	Puntos	Puntos	Puntos	Puntos
1. Resistencia a la Compresión Simple - kg/cm <sup>2</sup>	2 - 4	4	4	4	4	2
2. RQD %	13	13 - 17	13 - 17	8	13 - 17	8 - 13
3. Separación entre Discontinuidades	10	5 - 15	10 - 15	8 - 15	8 - 20	5
4. Condición de las Discontinuidades						
4.1 Rugosidad	5	3 - 5	1 - 5	3 - 5	3 - 5	1 - 5
4.2 Apertura	5	4 - 6	4 - 6	4	4 - 5	4 - 6
4.3 Continuidad	5	1 - 4	1 - 4	2 - 4	1 - 4	1 - 4
4.4 Alteración	6	5	3 - 5	3 - 5	3 - 5	3 - 5
5. Condición de Agua Subterránea	10 - 15	15	15	15	4 - 15	4 - 15
6. Ajuste por Orientación de Estratos	-5	-5	-5	-5	-5	-5
<b>RMR Estimado</b>	51 - 58	45 - 66	46 - 66	42 - 55	35 - 70	22 - 50
<b>Soporte a partir del RMR Modificado</b>	III - II	IV - II	III - II	IV - II	IV - II	V - III

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

La ondulación del terreno se puede apreciar después del k85+500 hasta el k87+00, según los planos de perfil del tomo de pre-diseño en los cuales se puede ver la condición de tapón hidráulico en los estratos pobres con una permeabilidad muy alta. También se debe resaltar que los estratos blandos se encuentran en mayor proporción en esta zona siendo así la parte más vulnerable en cuanto a condiciones y propiedades mecánicas y físicas de los materiales como se puede apreciar en la figura 9 y en la tabla 6.

Figura 9. Zoom a la zona de la problemática.



Fuente: Informe de avance junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones) editada por el autor.

Tabla 6. Descripción del área de afectación.

DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE SUELO DEL ÁREA DE AFECTACIÓN		TIPO DE SOPORTE
<b>TERRENO TIPO II</b>	Este tipo de terreno corresponde a areniscas moderadamente fracturadas a fracturadas con intercalaciones de limolitas, liditas, arcillolitas y ocasionalmente lutitas fracturadas y meteorizadas. Por el carácter no consolidado de estos terrenos y por su baja resistencia en su relación con los esfuerzos actuantes, se genera una zona de desconfinamiento alrededor de la excavación y se puede producir empujes moderados del terreno, la infiltración presenta un caudal moderado, aumentando la magnitud y la frecuencia de los desprendimientos, en caso de limolitas y lutitas se podría desencadenar presión de expansión.	hastiales deformables

<p><b>TERRENO TIPO IV</b></p>	<p>Este terreno corresponde a arenisca fracturadas a moderadamente fracturadas, con intercalaciones de limolitas, liditas, arcillolitas y lutitas meteorizada, por el carácter no consolidado de estos terrenos y su baja resistencia en relación a los esfuerzos actuantes se genera desconfinamiento en gran parte de la excavación y aunque su infiltración sea de baja magnitud puede llegar a tener efectos desfavorables pues intensifica la frecuencia y el volumen de los desprendimientos al promover arrastre de material en presencia de estratos friables.</p>	<p>soporte rígido e implementación de la solera curva</p>
<p><b>TERRENO TIPO V</b></p>	<p>Este terreno corresponde a una zona altamente sobre esforzada, asociada a lutitas o limolitas trituradas. Por el carácter no consolidado y su baja resistencia, genera desconfinamiento a lo ancho de la excavación con empujes importantes de terreno. Aunque su infiltración es baja esta puede detonar desprendimientos y promover arrastre del terreno.</p>	<p>soporte rígido e implementación de la solera curva</p>

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

- **Hidrogeología**

Su hidrología está dada por las características texturales como el tamaño del grano, selección, empaquetamiento contenido de matriz y cementación así como el fracturamiento y estructura geológica. Se realizó la siguiente clasificación de los suelos, contenido en el macizo (tabla 7) y además de ello se tiene un tabla de progreso en la cual se señala donde se pueden encontrar las mayores permeabilidades.

Tabla 7. Permeabilidad según el tipo de material.

CLASE	PERMEABILIDAD RELATIVA	FORMACIÓN GEOLÓGICA	LITOLOGÍA
I	Muy Alta	Depósitos aluviales	Bloques, cantos, gravas y arenas
II	Alta	Formación Arenisca Tierna Formación Arenisca Labor Formación Arenisca Dura	Arenisca con intercalaciones de arcillolita y lidita
III	Media	Formación Gualanday	Arenisca conglomerática, conglomerado y arcillolita.
IV	Baja	Depósitos coluviales	Bloques en matriz arcillosa y limoarenosa
		Depósitos de Terraza	Gravas finas a gruesas y cantos de arenisca soportados en matriz arenosa y limoarenosa.
V	Muy Baja	Formación Guaduas	Arcillolita con intercalaciones de arenisca
		Formación Plaeners	Arcillolita silicea y lidita
		Formación Villeta	Lutita con intercalaciones de lidita, limolita y arenisca

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

En cuanto al estimativo del cálculo de infiltración del túnel se hicieron los estudios correspondientes a partir de datos de túneles excavados en la cordillera oriental en la cuales se tuviera propiedades y aspectos físicos y mecánicos similares a las del túnel del Sumapaz, se logró estimar un promedio de tasa de infiltración de 0.014l/s/m un valor bajo con respecto a los valores adquiridos del túnel del Sumpaz.<sup>49</sup>

Para el túnel del Sumapaz, con una longitud de 4.2 Km, la infiltración calculada arrojó un valor de 55.5 l/s. Se asume un promedio de 50 a 70 l/s. No obstante esta sería la permeabilidad en la temporada seca de la zona en que está el macizo sin adjuntar los parámetros de precipitación ya que si se le suman dichos datos el caudal de infiltración llegaría a un máximo de 80.61 l/s. Esto se tendría en cuenta en la parte de estudio de la ondulación que se presenta al final del túnel de un aproximado de 1.5 Km, ya que en los primeros Kilómetros de túnel se encuentra el sinclinal de cascada, hecho por una formación de areniscas de labor de 435 m

<sup>49</sup> INCO. Op. Cit., p. 17



<b>FALLA DE MELGAR</b>	Esta falla de tipo inversa con su plano de falla buzando hacia el oriente, se encuentra en su mayoría cubierta por los depósitos Qc y Qt
<b>FALLA QUININI</b>	Esta falla es de tipo inverso y pone en contacto las formaciones plaeners y areniscas duras con la formación Villeta. Su bloque oriental sube con respecto al occidental. Su trazo se encuentra cubierto por un extenso depósito de coluvión y se estima que este localizada a 100 m de la quebrada del sector serranía del sumapaz

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

### **7.1.1. ¿Por qué se escogió la opción de la construcción de un único túnel unidireccional?**

En el informe de avance de junio de 2005 de la INCO (Instituto Nacional de Concesiones), se consideraron dos opciones de rehabilitación y mantenimiento de la vía Bogotá – Buenaventura en la zona del Boquerón para el valle del Sumapaz. Se escogió la de un único túnel unidireccional debido a la facilidad de rehabilitar la vía antigua<sup>51</sup>, una de las vías más peligrosas de Colombia por la topografía y la composición geométrica de la vía a la altura de la nariz del diablo<sup>52</sup>, esta se encuentra a 230 Km aproximadamente de Bogotá a un trayecto de 1,2 horas de la capital.

El túnel fue elegido ante las complicaciones y consecuencias que se tendrían para acondicionar una segunda calzada superficial, debido fundamentalmente a las limitaciones que imponía el río Sumapaz y las condiciones topográficas de los escarpes de roca que se encuentran en la zona. Ante esto se revisó el trazado propuesto para el túnel desde los puntos de vista geológico, geotécnico y de operación durante toda la vida útil del mismo. Los tipos de materiales que se encuentran en este túnel se puede observar en la tabla 7 resumen anteriormente mencionada.

Frente al trazado propuesto se destacaron dos alternativas, la primera fue la construcción de tramos subterráneos de 860 m, 1650 m y 890m de longitud con una intercalación sucesiva con tramos a cielo abierto y en sentido Girardot – Bogotá; la segunda opción y la escogida propuesta en 1998 por el Consorcio Ingetec S.A. – Bateman Ingeniería Ltda. – PIV Ingeniería Ltda.<sup>53</sup>, optimizaría el recorrido de la obra subterránea por las condiciones y formaciones del macizo rocoso menos competentes reduciendo los riesgos geológicos y geotécnicos presentes.

<sup>51</sup> INCO. Op. Cit., p. 17

<sup>52</sup> CAMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. OP. CIT., P 14

<sup>53</sup> INCO. Op. Cit., p. 22

El área donde se realizará el proyecto está determinada por una formación geológica sucesiva de rocas sedimentarias de edades terciarias y cretáceas pertenecientes a las siguientes formaciones (tabla 9):

*Tabla 9. Abscisa y descripción del tipo de formaciones presentes en el túnel.*

ABSCISA	DESCRIPCION
K85+955	contacto Formación Plaeners - Arenisca Dura
K86+412	contacto Formación Arenisca Dura - Villeta
K86+964 - K86+914	Falla de Quinini
K88+107	Contacto Formación Plaeners - Arenisca de Labor
K88+601 - K88+107	Formación Arenisca de Labor
K89+007	Contacto Formación Plaeners - Arenisca de Labor
K89+109	Contacto Formación Arenisca Tierna - Gualanday
K89+178	Contacto Formación Gualanday - Arenisca Tierna

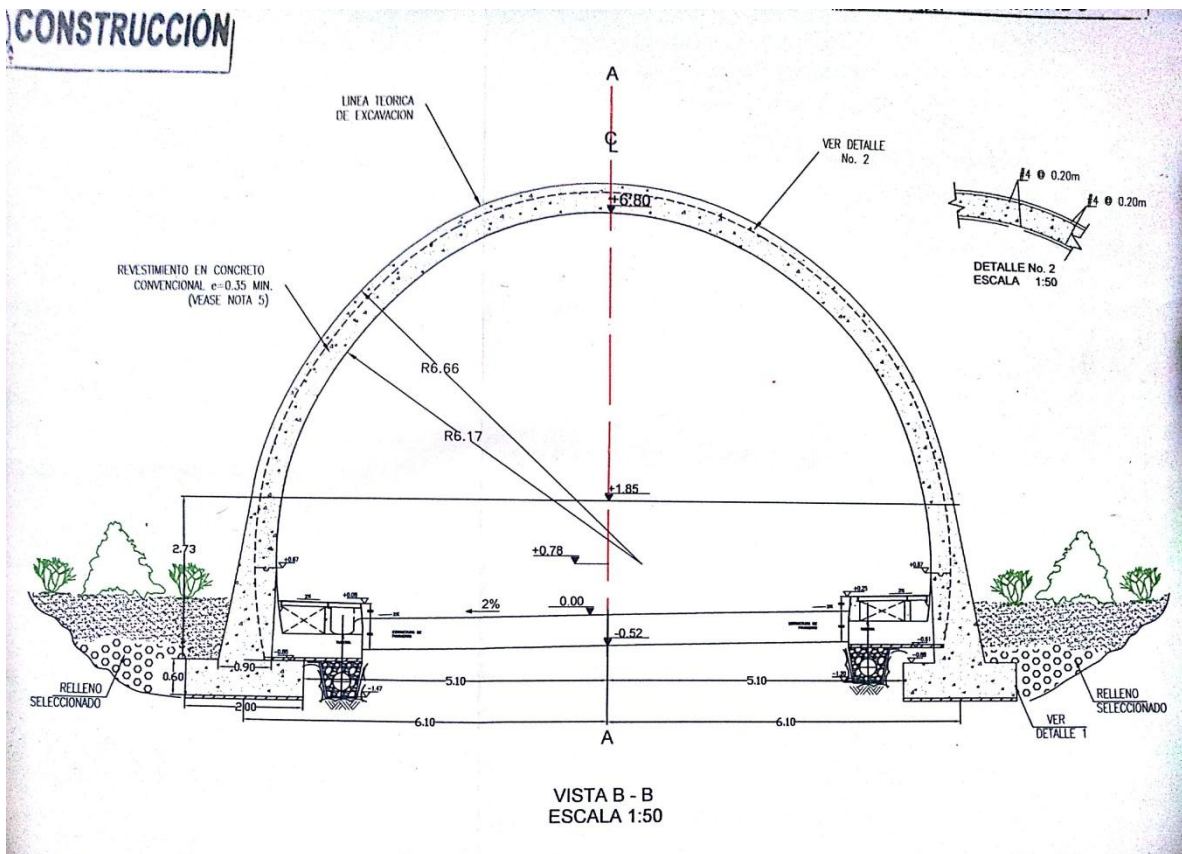
Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

En el diseño geométrico planteado se revisó la sección transversal del túnel entregada con los diseños preliminares de los tres túneles debido a lo manifestado por la INCO por parte de la interventoría dieron el comunicado GT- OF – IN – 151 – 05 de mayo 12 de 2005 en el que afirmaba que la sección transversal del túnel no cumplía con el apéndice No. 2 del contrato, por tal motivo se decide cambiar las dimensiones para cumplir con dicho apéndice y a los requerimientos del área libre del sistema de ventilación.

Por ende la sección se decide cambiarla a una geometría circular de tres segmentos de arco como se aprecia en la figura 11, aumentando el área de excavación de 75 m<sup>2</sup> a 82 m<sup>2</sup> con el propósito de aumentar las dimensiones de sardineles a 1,25 m de ancho, un ancho de carril de 3,9 m a 4,15 m y permitir un gálibo, el cual es el contorno de referencia con las alteraciones que corresponde considerar para determinadas circunstancias, al cual deben adecuarse las instalaciones fijas y el material rodante para posibilitar la circulación de los vehículos sin interferencia, mínimo de 4,60 m dejando un espacio de 2,2 m por encima del gálibo para el cumplimiento de las especificaciones de ventilación<sup>54</sup>.

<sup>54</sup> Ibid., p. 35

Figura 11. Plano 1 de planos constructivos de Sumapaz pico de flauta y diseño geométrico.



Fuente. Túneles de Colombia S.A. Nit. 900.035.380-1. Planos constructivos de Sumapaz pico de flauta y diseño geométrico.

De lo anterior se concluye que la opción de un único túnel unidireccional es la más viable en cuanto a las condiciones geológicas, geotécnicas, constructivas y de ventilación de la zona debido a la optimización del corredor y a los volúmenes de excavación<sup>55</sup>. Por lo tanto, lo hace menos vulnerable frente a estas condiciones y también es determinante el sentido del túnel de Girardot – Bogotá debido a que es una de las vías que comunica a la capital con todo el sustento alimentario y económico del país, además de que esta vía es una de las más utilizadas por los capitalinos para su opción vacacional de los municipios de Melgar y Girardot, el cual lo convierte en el túnel más transitado del país con un promedio de reducción en el viaje de 20 min.

<sup>55</sup> INCO. Op. Cit., p. 18

### 7.1.2. Consecuencias de la segunda opción de diseño

En 1998 se presentaron estudios por el consorcio Ingetec S.A. – Bateman Ingeniería Ltda. – PIV Ingeniería Ltda., para contemplar la construcción de dos variantes para la adecuación de la vía Bogotá – Girardot. Se vio la posibilidad de la construcción de un túnel doble y cuatro carriles, por la parte derecha del río Sumapaz o la construcción de un tramo de vía a cielo abierto por los predios a cargo de la fuerza área colombiana (FAC), a la parte izquierda del río.

En esencia se contemplaron dos túneles de 600 y 800 m aproximadamente, esto correspondía al paso de piedra del lancero comprendido entre las abscisas K89+800 y K100+000 con las abscisas que se muestran en la tabla 10.<sup>56</sup>

Tabla 10. Tramo y avisado de los túneles.

TRAMO	TIPO	ABSCISADO
Inicio Variante	Vía Superficial	K97+706 – K98+800
Túnel Izquierdo	Subterráneo	K99+109 – K99+712
Túnel Derecho	Subterráneo	K99+033 – K99+843
Semi - viaducto	Vía Superficial	K98+800 – K101+500
Final Variante	Vía Superficial	K101+500 – K102+100

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

En cuanto a la sección transversal de los túneles fueron proyectados para la variante de Melgar y se llegó a un acuerdo con la Concesión de la vía superficial Autopista Bogotá – Girardot y siguiendo las normas del Instituto Nacional de Concesiones (INCO), se presentaron las siguientes características del área circular:

- Dos carriles de 3.65 m de ancho por cada uno de ellos.
- Sobre ancho de calzada de 0.5 m a cada lado.
- Andenes de 1.25 m a lo largo de cada carril.
- Gálibo mínimo de 4.60 m.

Esta sección transversal se adoptó para un tipo de excavación en herradura de 3 segmentos de arco circular, esto con el fin de adecuar la distribución de los esfuerzos alrededor de la cavidad para minimizar su concentración y generar

<sup>56</sup> INCO. Op. Cit., p. 22

esfuerzos tensionales para su estabilidad. Los alineamientos de los túneles se tomaron siguiendo una serie de parámetros tanto para su orientación como su posición en el eje z:

- Una alineación estrictamente recta entre las zonas pre definidas para los portales.
- Pilar de roca de 40 m mínimo.
- La alineación del túnel no deberá afectar físicamente la integridad de la piedra de lanceros puesto según el Ministerio de Defensa se deberá hacer la inmediata restitución de la misma por tratarse de una zona de instrucción militar.
- Alteración mínima a todos los ejercicios de las instalaciones militares por las que atraviesa el trazado.
- En el trazado preestablecido se deberán ubicar los portales en las zonas que presenten una condición geológica estable partiendo de una exploración geológica preliminar.

Para los criterios de diseño se tomaron algunos parámetros del manual de diseño geométrico del Instituto Nacional de Vías el cual contempla solo algunos de ellos, por lo tanto también se basó en diseño en otras literaturas como “Tunnel Engineering Handbook”, “Manuel de diseño de túneles carreteros – Geoconsult de España” y la AASHTO como se ve en la tabla 11. Los criterios mínimos corresponden a los que se toman para el diseño de cielo abierto conjuntamente con los parámetros de la construcción de túneles.

*Tabla 11. Parámetros de diseño del túnel.*

PARAMETROS DE DISEÑO	
PARAMETROS	INDICADORES
Velocidad de diseño	60 km/h.
Radio mínimo	200 m
Distancia de parada	75 m
Distancia de visibilidad frente al portal	95 m
Pendiente longitudinal máxima en túnel	2.5 %
Pendiente longitudinal mínima	0.3 %
Peralte máximo en túnel	6.0 %
Peralte máximo en vía superficial	9.0%

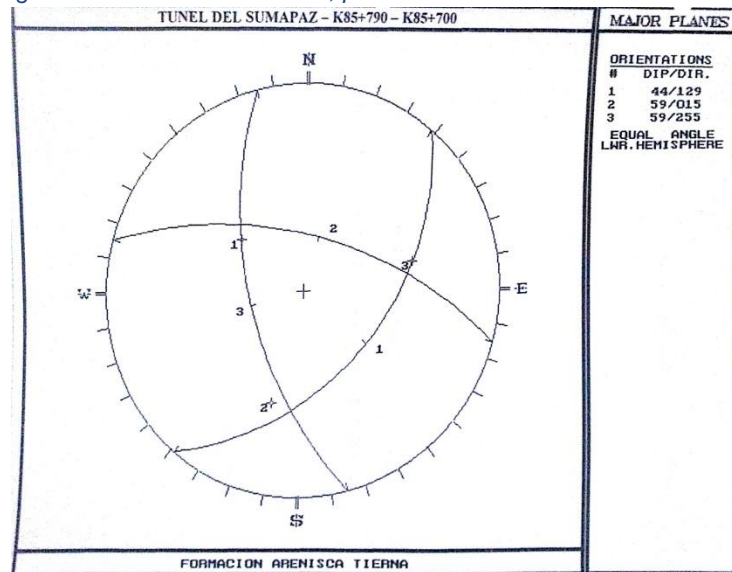
Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

Manteniendo así la sección transversal con cada bombeo de 2.0%, con radios de curvatura de ( $R > 130$  m) que no requieren sobre ancho y permitiendo que haya una transición del peralte ajusta al nivel de servicio del proyecto.

Con respecto a la parte geotécnica del proyecto, está situada en un área de materiales de edades cuaternarias como lo son depósitos coluviales y aluviales, terraza de Tolemaida y rocas de la formación Gualanday que son de edades terciarias. Los depósitos aluviales corresponden a los terrenos aledaños compuestos por sedimentos trasportados por el río Sumapaz y se localizan dentro de la llanura de inundación del mismo; los depósitos coluviales se encuentran al pie de los escarpes de rocas de la formación Gualanday y la terraza de Tolemaida está constituida por bloques y cantos rodados dentro de una matriz areno arcillosa que se encuentra dentro de la base de la Fuerza Aérea.

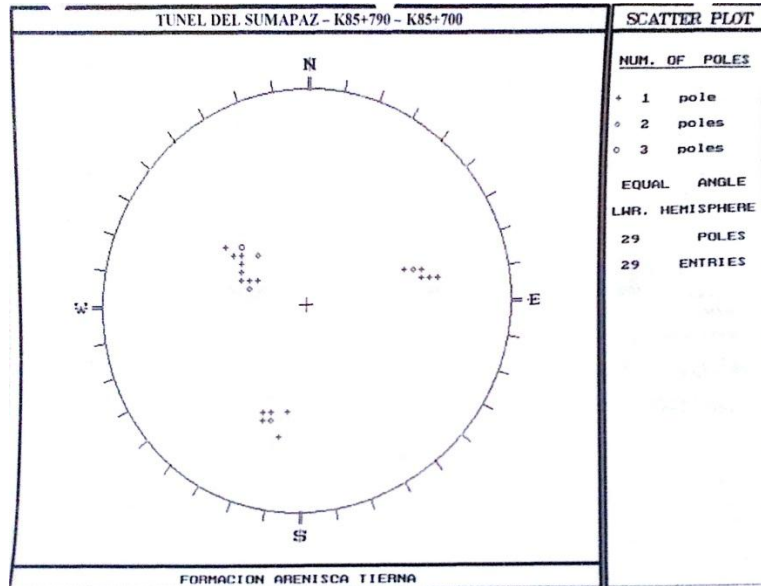
La formación Gualanday está constituida por capas medias a gruesas de conglomerados con intercalación de areniscas, conglomeráticas de grano grueso con intercalaciones de arenisca arcillosa y con presencia de láminas delgadas de arcillolitas. El área está afectada por tres familias de diaclasas bien marcadas dentro del macizo con la modelación en el programa DIPS (figuras 12, 13 y 14).

Figura 12. Modelación en DIPS, planos de falla de las discontinuidades.



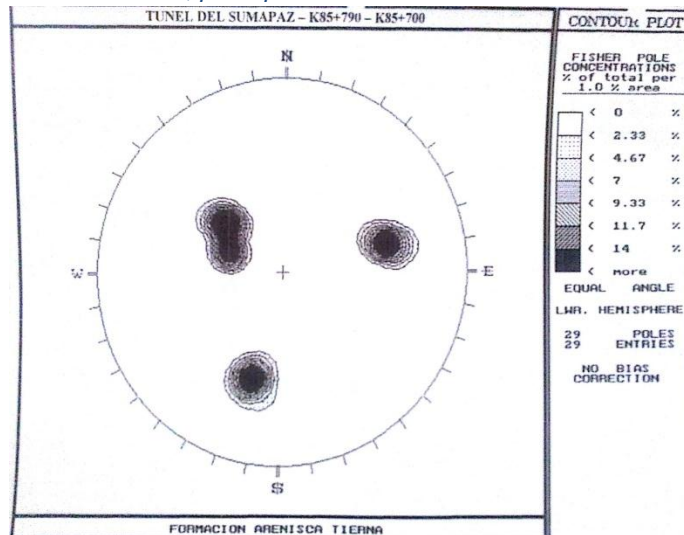
Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

Figura 13. Modelación en DIPS, polos para la caracterización de familias de discontinuidades.



Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

Figura 14. Modelación en DIPS, polos para la caracterización de familias de discontinuidades.



Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

Estas familias de diaclasas dan ocurrencia a caídas de cuñas, las cuales se sectorizan en la intersección de las tres familias, con planos de falla ocasionales y planos de inclinación demarcados por en la zona de excavación.<sup>57</sup>

<sup>57</sup> INCO. Op. Cit., p. 18

Geomorfológicamente la terraza de Tolemaida ocupa las partes altas del terreno con una morfología plana; la formación Gualanday infrayace o se encuentra cubierta por la terraza de Tolemaida formando escarpes muy pronunciados con pendientes muy altas y finalmente, los depósitos aluviales se congregan a las partes planas y bajas del terreno, a lo largo del cauce de río Sumapaz, el resumen de esta formación se aprecia en la tabla 12. El método de excavación que se contempló fue una combinación entre el uso de voladura controlada utilizadas en rocas de baja – media alteración y mientras que en los suelos y rocas alteradas y blandas se logran mejores resultados empleando métodos mecánico – manuales con coberturas apreciadas en la tabla 13.

Tabla 12. Resumen de propiedades geomecánicas de la roca intacta.

TABLA No.4.1 RESUMEN PROPIEDADES GEOMECAICAS DE LA ROCA INTACTA											
Rocas de la Formación Gualanday											
Formación	Convención	$\gamma$ (Ton/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)			$E_{T50\%}$ (10 <sup>3</sup> MPa)			Constantes*		
			Promedio	Rango		Promedio	Rango		Promedio	$m_i$	
		Máx		Min	Máx		Min	Máx		Min	
Gualanday	Tg	2.16	25	9	17	5	5	5	22	20	1.0

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

La clasificación del macizo rocoso en donde estarían situados los túneles arrojó un RMR de 35 y 70 con valores promedios de 50, de lo anterior, se anticipa que los túneles sean excavados en un 25% en terreno tipo IIB, 50% en terreno tipo III y el restante 25% en terreno de tipo IV.<sup>58</sup>

Tabla 13. Tipos de formaciones de la formación de Gualanday.

TABLA No.4.2 RESUMEN PROPIEDADES GEOMECAICAS DEL MACIZO ROCOSO								
Formaciones de la Formación Gualanday								
Formación								
Cobertura (m)	Máx	Min.	Máx	Min.	Máx	Min.	Máx	Min.
Gualanday ( Tg )	65	25	65	25	65	25	65	25
	4.50	1.50	42	38	1.00	0.30	6200	4500

Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

<sup>58</sup> INCO. Op. Cit., p. 22

De lo anterior se concluye que la alternativa de los túneles carreteros era una opción óptima para la adecuación de la vía Bogotá – Girardot, esto se debe a que la construcción de estos era mucho más fácil en cuanto a los promedios de avance y la adecuación vial con la antigua vía. Sin embargo, el macizo rocoso en donde estarían construidos no es el mejor, con terrenos jóvenes de orígenes por remoción en masa y suelos transportados, lo hacen vulnerable en este sentido pero debido a que había una posibilidad de interferir con las actividades e instalaciones de las fuerzas aéreas no se tomó la opción.<sup>59</sup>

### **7.1.3. Método de construcción**

El método de construcción del túnel del Sumapaz Guillermo León Valencia se hizo mediante el nuevo método austriaco bajo las siglas N.A.T.M. (“New Austrian Tunneling Method”), unos de los métodos de diseño y ejecución más importantes y con mayor éxito en las construcciones subterráneas alrededor del mundo de la ingeniería civil<sup>60</sup>.

Este método se basa principalmente en dejar que el mismo material en el que esté construida la estructura sea el mismo soporte de la misma, es decir, que al momento de excavar se permita una deformación controlada que trabaje conjuntamente con sistemas de soporte de menor costo, permitiendo bajas considerables en el presupuesto de la obra y dando un método más práctico en el ámbito constructivo.

Además de acuerdo a las pautas de excavación da un alto margen en el avance de la obra ya que la excavación se hace en tres etapas (figura 15):

- Inicialmente se ejecuta el promedio de excavación en avance de la sección superior del túnel, conjuntamente haciendo el pre-sostenimiento de la misma con una capa de concreto lanzado, la colocación de hastiales, seguida de una segunda capa de concreto lanzado reforzado con fibras metálicas y la colocación de pernos que refuerzan el terreno circundante y sujetan los hastieles.
- La excavación del resto de sección del túnel llamada destroza se hace en dos fases. Primero se excava una bancada más ancha para que permita el ingreso de maquinaria pesada al frente, inmediatamente después se realiza

---

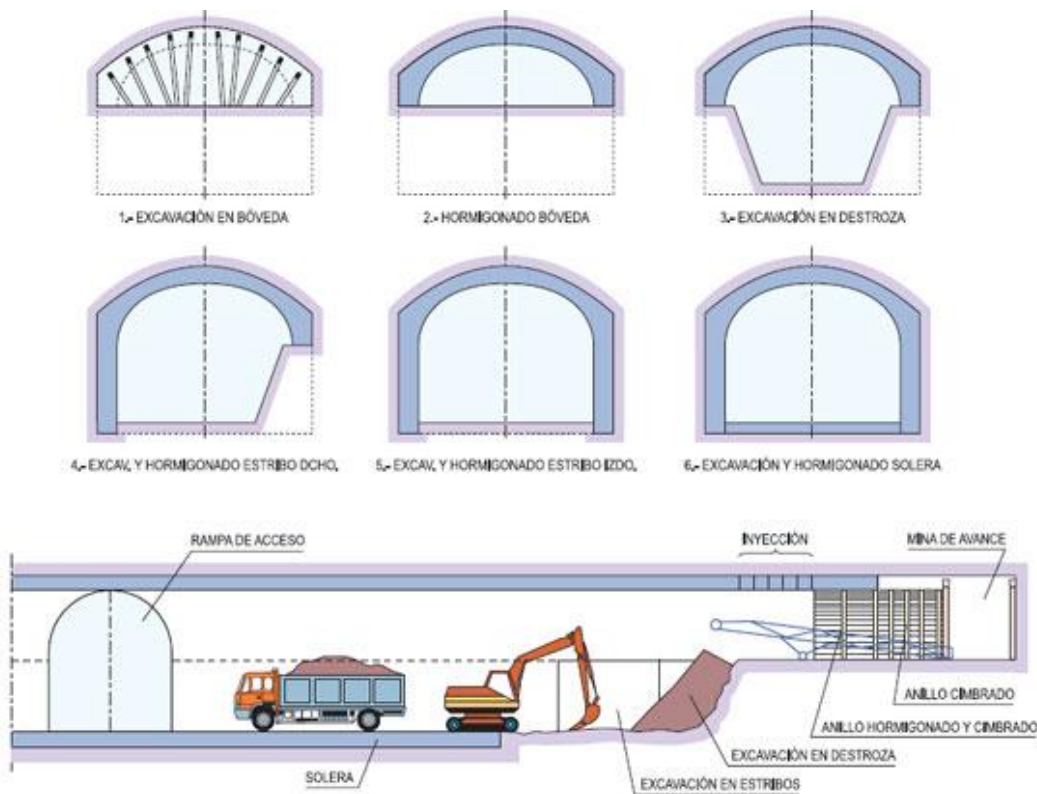
<sup>59</sup> INCO. Op. Cit., p. 18

<sup>60</sup> GUAMAN. Op. Cit., p. 21.

la prolongación del pre-sostenimiento ejecutado en avance traslapando los hastíeles con grapas y concreto lanzado, dejando un desfase mínimo de un pase de excavación para que por lo menos un hastial este apoyado y en la segunda se completa la excavación de avance con el sostenimiento correspondiente, siendo así toda la excavación del túnel.

- Finalmente se hace una banqueta de concreto para la excavación y armado de la contra-bóveda o solera.

Figura 15. Pautas de excavación del método belga.



Fuente. Universidad politécnica de valencia, método belga de construcción de túneles.

Después de ellos se dispone el sistema de drenaje del túnel, consistente en la colocación de arquetas cada 50m con su correspondiente tubo colector que se rellenan posteriormente de concreto. Seguido a ello se realiza la impermeabilización del túnel colocando una doble capa de geo-textil y PVC. Hecho este procedimiento se realiza el revestimiento que se basa en un carro de avance que desplaza por rieles dispuestos en la banqueta colocándose en

posición y ajustándose en la clave de la sección de túnel, luego se abre los faldones superiores e inferiores apoyándose en la banqueta para posteriormente empezar la fundida entre el encofrado y la impermeabilización, este proceso se hace conjuntamente en los lados del túnel para compensar las cargas que genera el concreto al carro de avance (figura 16).

*Figura 16. Formaleta de la sección del túnel Guillermo León Valencia.*



Fuente. Propia

Este método fue el más adecuado para la construcción del túnel Guillermo León Valencia, debido a que permite hacer un avance de excavación mayor, dejando que el mismo material se estabilice dando seguridad en el promedio de avance y hace fácilmente la disposición del pre-sostenimiento ganando así tiempo y minimizando costo en la construcción del túnel dado que el macizo en el que está construido contiene una propiedades mecánicas medias a bajas de las cuales hace riesgosa la excavación, pero el método se adecua perfectamente a las implicaciones del proyecto.<sup>61</sup>

---

<sup>61</sup> INCO. Op. Cit., p. 18

## 7.2. POSIBLES HIPÓTESIS SOBRE LA DEFORMACIÓN EN EL TÚNEL

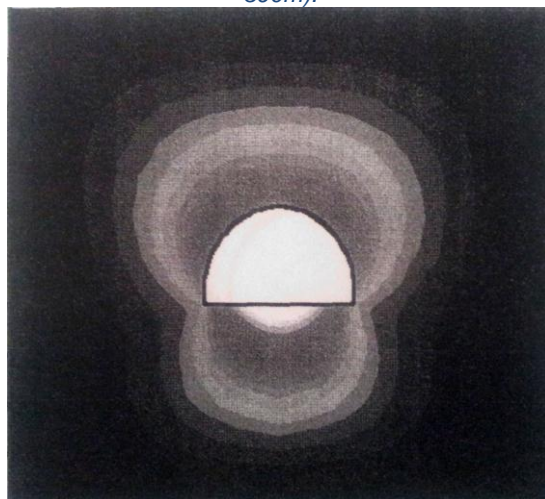
De lo anterior propuesto en la fase uno, se recopiló todo el análisis geotécnico, de diseño y constructivo de la información de los tomos de diseño y geotécnicos de la INCO (Instituto Nacional de Concesiones) y la problemática de la deformación del túnel Guillermo León Valencia se llegó a las siguientes hipótesis:

### 1. Omisión en la construcción de la solera curva del túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia)

Según la experiencia laboral del auxiliar de ingeniería Manuel Fernando Olivares Díaz dentro de la construcción del túnel en el periodo comprendido de enero de 2007 hasta julio de 2009, la construcción fue acelerada para la terminación del túnel a mediados del año 2010, esto fue provocado por consecuencias en el mal manejo de los tiempos de construcción.

Por tal motivo, se considera en los diseños del túnel que la solera curva que es uno de los elementos primordiales para la disipación de esfuerzos que le genera el macizo rocoso al túnel como se muestra en la figura 17 era opcional y se toma la decisión de no construirla a pesar de todo el análisis que se le hizo al caso por medio de los software Phase 2.0. Es por esto que la primera hipótesis de la deformación del túnel a tal punto de ser visibles en el asfalto es por la omisión de la construcción de la solera curva a lo largo del túnel del Sumapaz.

*Figura 17. Modelación del programa Phase 2, (deformación total sin soporte - rocas arcillosas - cobertura = 390m).*



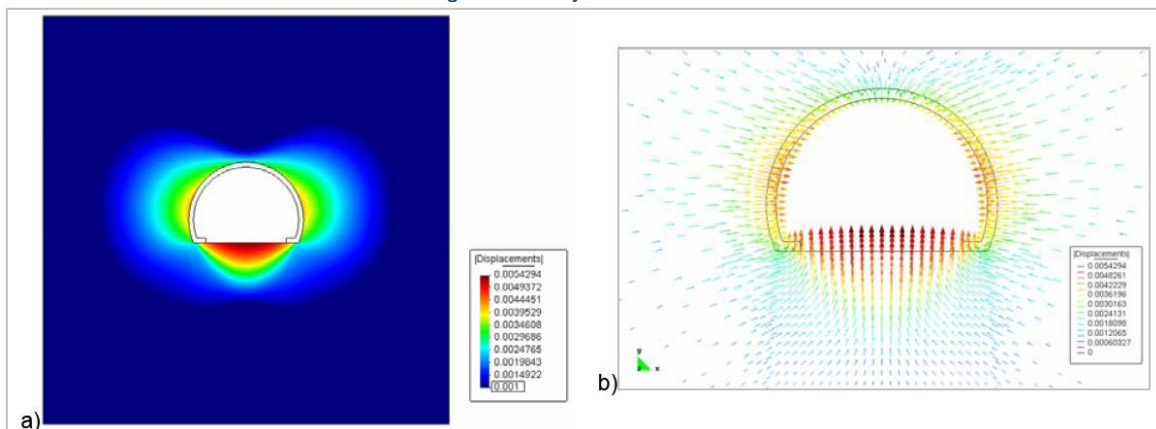
Fuente. Informe geotécnico de obras subterráneas junio 2005 túnel Sumapaz INCO (Instituto Nacional de Concesiones).

### 2. Deformación por materiales expansivos en la rasante del túnel

El abscisado del túnel Guillermo León Valencia pasa por formaciones de rocas lodosas y arcillosas como lo es la formación Villeta.

En dichas formaciones se puede encontrar rocas como limolita, lidita, lutita y arcillolita, debido a esto se puede esperar que este tipo de materiales tengan una tentativa de expansión por su composición mineralógica, a sus comportamientos mecánicos y al flujo de esfuerzos como lo muestra en la figura 18, esto debe ser uno de los principales problemas en el túnel. Sin embargo, debido a que no se han podido obtener estudios ni monitoreos en estos materiales solo se puede deducirla como una hipótesis dependiente del tipo del material contenido en la zona, aunque si es posible dar a entender el flujo de esfuerzos como lo muestra el caso del túnel de Lilla de España en la figura 20, el cual se asemeja mucho al patrón de deformaciones del análisis de Phase 2.0 que hace los tomos de la INCO.

Figura 18. Flujo de esfuerzos.



FUENTE: tesis, análisis del comportamiento de un túnel excavado en rocas altamente expansivas.

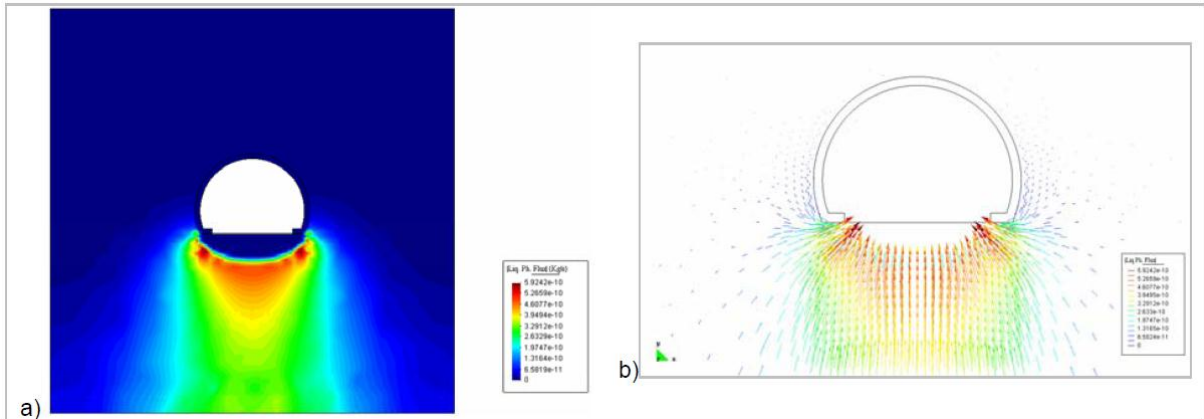
### 3. Lavado de los materiales de la rasante

Como se ha mencionado anteriormente el túnel Guillermo León Valencia no tiene solera curva o contra bóveda, por lo cual está cimentado en la roca de la zona. Debido a que el túnel presenta caudales de 50 a 70 l/s en temporada seca, surge la última hipótesis la cual consiste en la interacción del agua con la cimentación del túnel como se muestra en el ejemplo del túnel de Lilla en España en la figura 19. Esta puede estar provocando un lavado de los materiales, bajando sus propiedades mecánicas, causando así el abatimiento de la capacidad portante de los materiales comportamiento clásico de las rocas clásticas como lo son lutitas, limolitas y arcillolitas<sup>62</sup> las cuales son susceptibles a ser erosionadas por

<sup>62</sup> SEPÚLVEDA, Sergio. Mecani de rocas en obras de ingeniería. [diapositivas]. Bogotá D.C. Universidad Nacional. 2006. 110 diapositivas

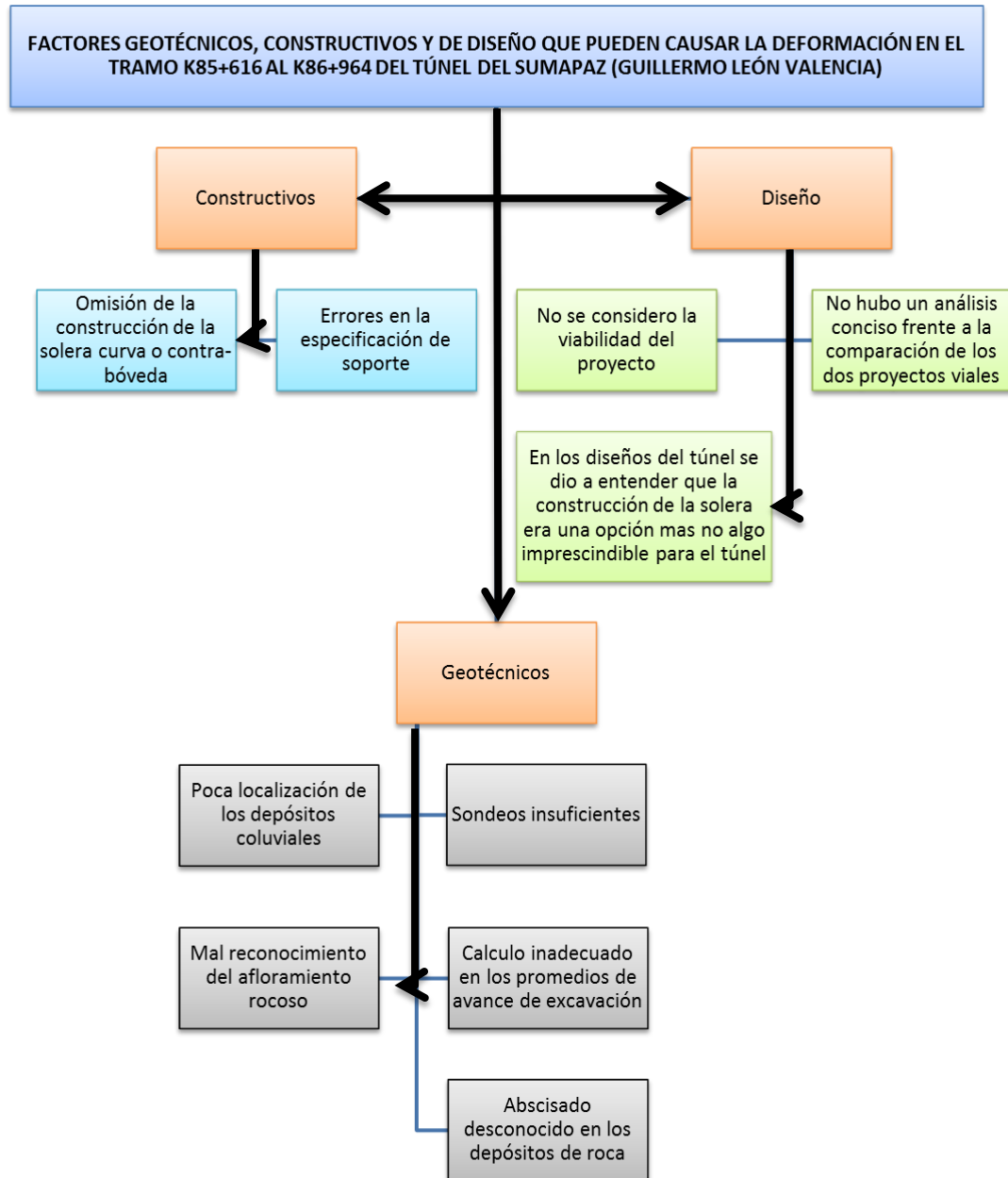
alteraciones químicas al contacto del agua, creando oquedades o vacíos de gran tamaño en la rasante del pavimento, esto quizás sea por fallas en los drenajes del túnel, y de esta manera se pueda causar la deformación del asfalto.

Figura 19. Flujo de agua.



FUENTE: Tesis, análisis del comportamiento de un túnel excavado en rocas altamente expansivas.

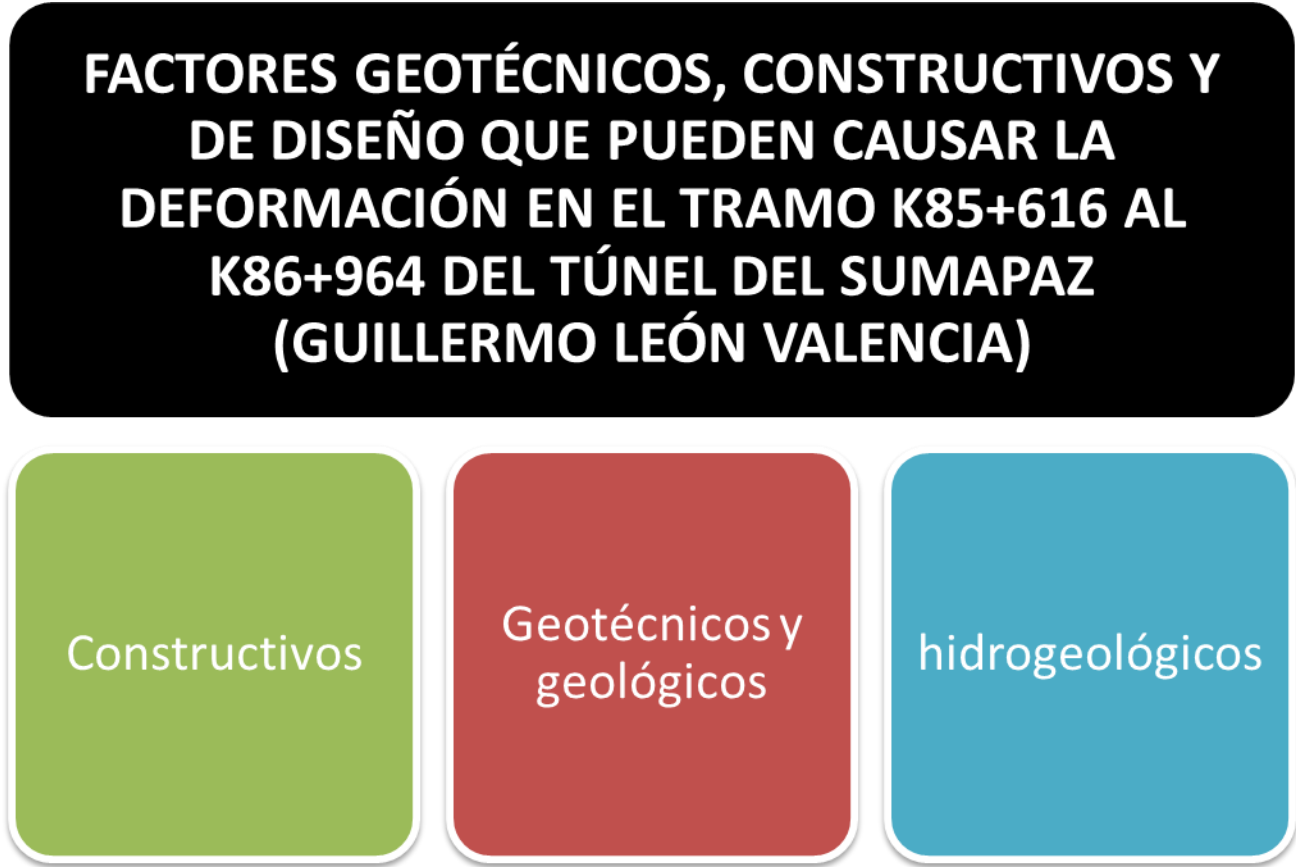
### 7.3. Recopilación del esquema resumen de los factores a favor de la deformación y la guía a seguir para las hipótesis



Fuente. Propia

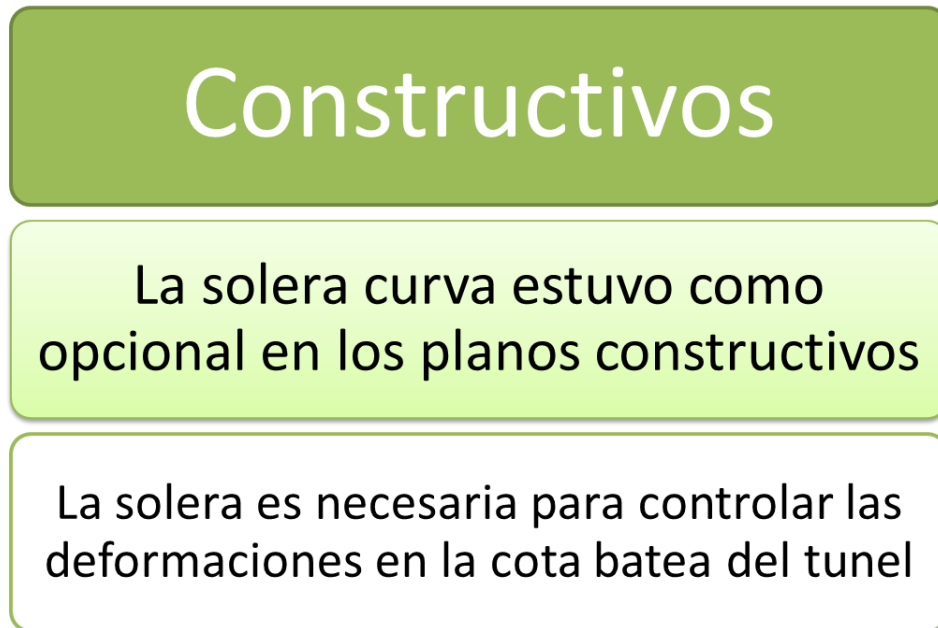
**Esquemas ilustrativos de las hipótesis propuestas:**

*Figura 20. Esquema general de las hipótesis propuestas.*



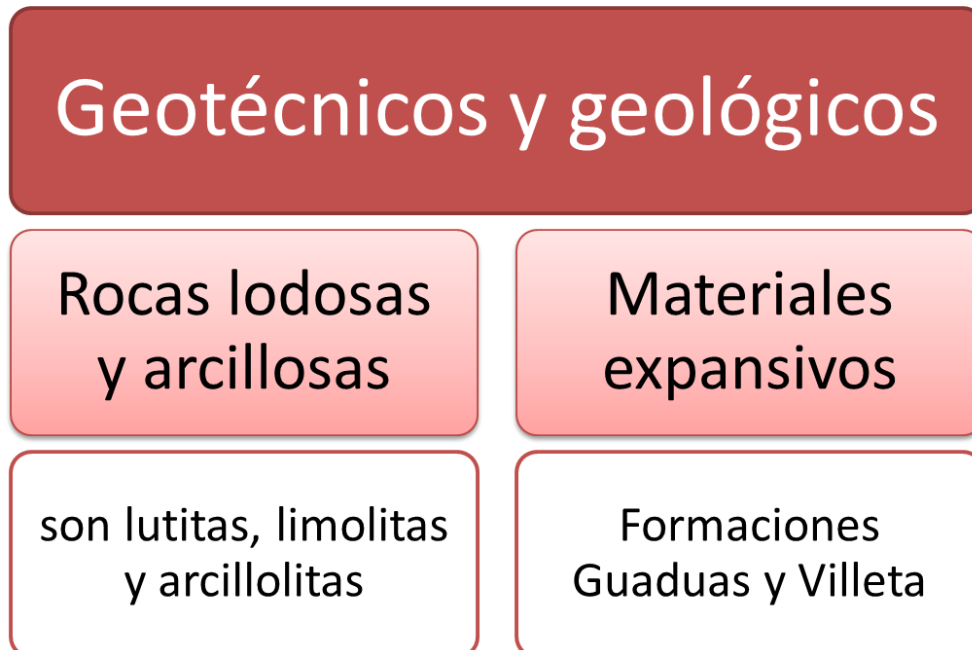
Fuente. Propia

Figura 21. esquema ilustrativo de la 1ª hipótesis.



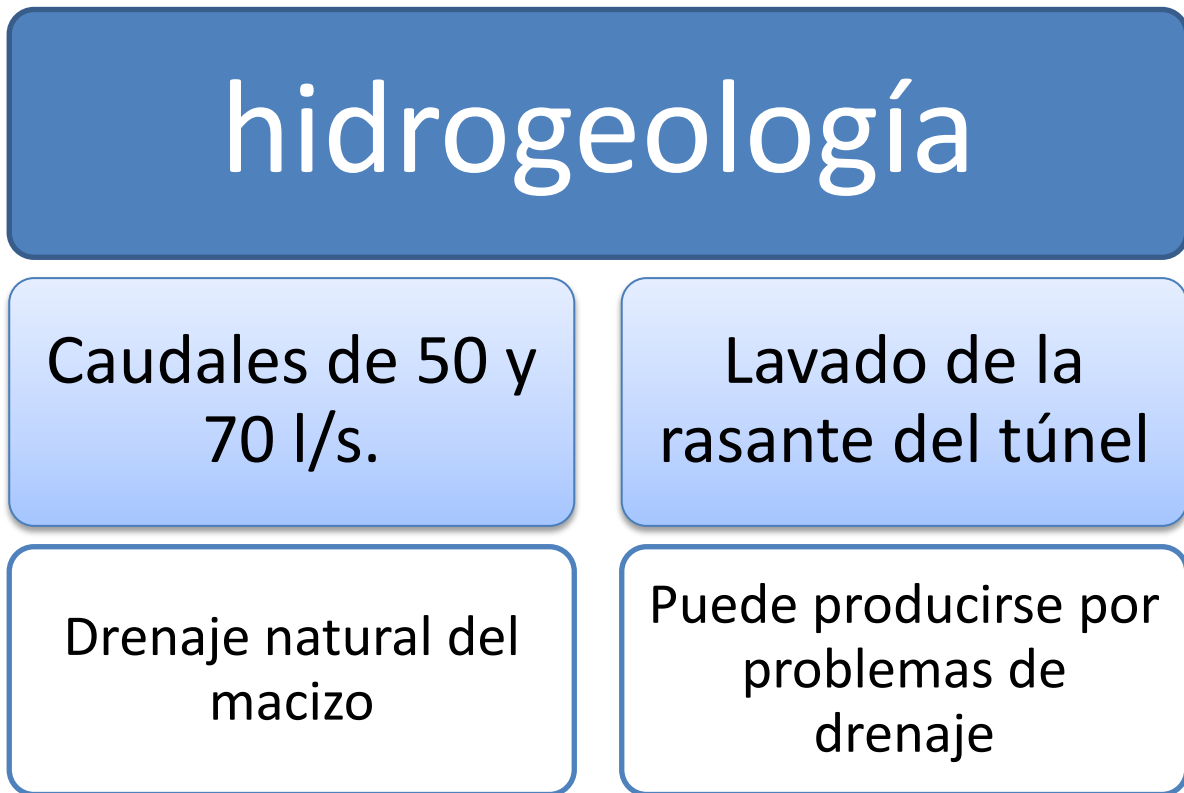
Fuente. Propia

Figura 22. esquema ilustrativo de la 2ª hipótesis.



Fuente. Propia

Figura 23. esquema ilustrativo de la 3ª hipótesis.



Fuente. Propia

## 8. CONCLUSIONES

Con respecto a toda la recopilación y análisis de los resultados de los informes geotécnicos, constructivos y de diseños de la INCO (Instituto Nacional de Concesiones) del túnel Guillermo León Valencia y de todo el camino recorrido para la realización de las obras subterráneas como lo son los túneles, se puede concluir que de las hipótesis propuestas anteriormente sobre la omisión de la solera curva es la que tiene más peso en la realización de este documento, esto se debe a que esta parte de la estructura es muy importante para la disipación de los esfuerzos en la estructura inferior del túnel y permite que este se comporte de una manera monolítica al compás de las fuerzas existentes del macizo rocoso.

Sin embargo, si la deformación del túnel pueda llegar a ser debido a la ausencia de esta estructura, no se puede omitir las demás hipótesis, ya que el material de cimentación del túnel posee unas propiedades mecánicas bajas, con gran cantidad de finos y por la presencia de rocas potencialmente expansivas como lo son las formaciones Villeta y Guaduas, las cuales son rocas sedimentarias marinas del cretáceo vulnerables a este comportamiento<sup>63</sup> y también la infiltración que puede sufrir el material, el cual causa un desmejoramiento de la base de cimentación del pavimento causando la afectación del mismo.

Si bien se conoce que el macizo rocoso es de propiedades medias a bajas, se puede concluir que no se tuvo en cuenta el potencial expansivo de los materiales y la implicación de deformación de las rocas arcillosas que contiene el macizo, a parte del nivel de fracturamiento del mismo ya que en el tomo geotécnico se especifica que el material está alterado físicamente y es no consolidado dando lugar a el desplazamiento grandes masas de terreno.

En la construcción de un único túnel se puede concluir que no era la mejor opción dado que las implicaciones de control, sostenimiento y estructura que requerían las deformaciones de los materiales contenidos en el macizo eran mucho mayores a comparación de la otra opción de trazado, pero aunque no fueron imposibles, hubiese sido más fácil llegar a la construcción de los tres túneles más superficiales ya que los materiales que atravesarían estos son de similares propiedades pero sin el incremento de esfuerzos que general la profundidad del túnel, además que en algunos tramos de los mismo serian en túnel falso y superficiales, no obstante esta opción no se pudo tomar por la implicaciones y consecuencias que traerían el uso de los suelos pertenecientes a las Fuerzas Áreas de Colombia (FAC).

---

<sup>63</sup> PAYMACOTAS, ingeniería de túneles. Túneles en terrenos salinos y expansivos. EN: JORNADA TÉCNICA Barcelona (6:21-01). Barcelona. 2001. P. 129

El método austriaco fue el mejor para la construcción del túnel del Sumapaz, esto se debe a que la forma de excavación y el sistema de la formaleta que permite el avance en el frente de excavación de la obra sea seguro en los materiales en los que fue excavado, además de que el método permite una pre-deformación del material y control de la misma con el fin de bajar el valor en los presupuestos de sostenimiento ya que un sistema de sostenimiento rígido sería muy caro. No obstante, también los sistemas de pre-sostenimiento como el sistema de paraguas y las recomendaciones de sostenimiento del RMR modificado según el tipo de material fueron una ayuda para la realización de este proyecto.

Según la clasificación del RMR de Bieniawski<sup>64</sup> el macizo rocoso en el que está construido el túnel es en general de propiedades medias, esto se debe a su valoración de 48 a 52 punto en la evaluación del método; hay que aclarar que este método de clasificación es un método empírico y depende mucho de la objetividad y experiencia de la persona que lo realice, además de ello existen varias correlaciones que permiten determinar si el número de valorización del método es coherente con otro tipo de clasificación.

Debido a las implicaciones del tema, a la complicación y ausencia de información técnica, material e informativa que en estos momentos presenta el túnel no es posible determinar claramente que estas sean las verdaderas implicaciones que causen la deformación del túnel, pero si se pueden validar o no en posteriores investigaciones tomando como guía las hipótesis propuestas en este documento.

---

<sup>64</sup> BIENASKI. Op. Cit., p. 23

## 9. RECOMENDACIONES

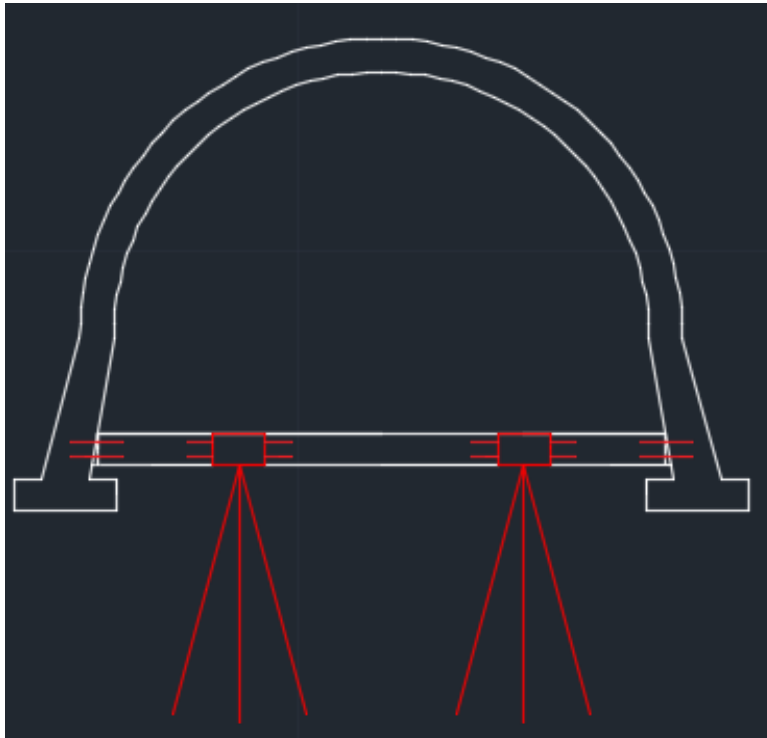
Una de las recomendaciones debería ser la readecuación de la solera curva en el túnel, pero este procedimiento tardaría mucho tiempo, sin mencionar las implicaciones estructurales que pudieran surgir y el cierre total del túnel de Sumapaz, una pieza indispensable en la movilidad y transporte de vía Bogotá – Buenaventura, sin embargo, como recomendaciones para los posteriores análisis y desarrollos en este tema se tendría que realizar un estudio detallado de diagnóstico geotécnico – estructural y monitoreo topográficos constantes para la determinación de la deformación, con ello se podría determinar si es un problema de disipación de esfuerzos, un problema de drenaje, consecuencias del comportamiento natural del agua dentro del macizo o un problema de mejoramiento de la rasante de la vía para la protección del pavimento rígido del túnel del Sumapaz.

En caso que la ausencia de la solera curva sea el factor determinante de la deformación del túnel del Sumapaz (Guillermo León Valencia) y debido a que la adecuación de la misma significaría el cierre total del túnel por un tiempo indefinido, a continuación se presentan esquemas ingenieriles de posibles soluciones para el control de la deformación

Solución propuesta 1 (figura 24 y 25):

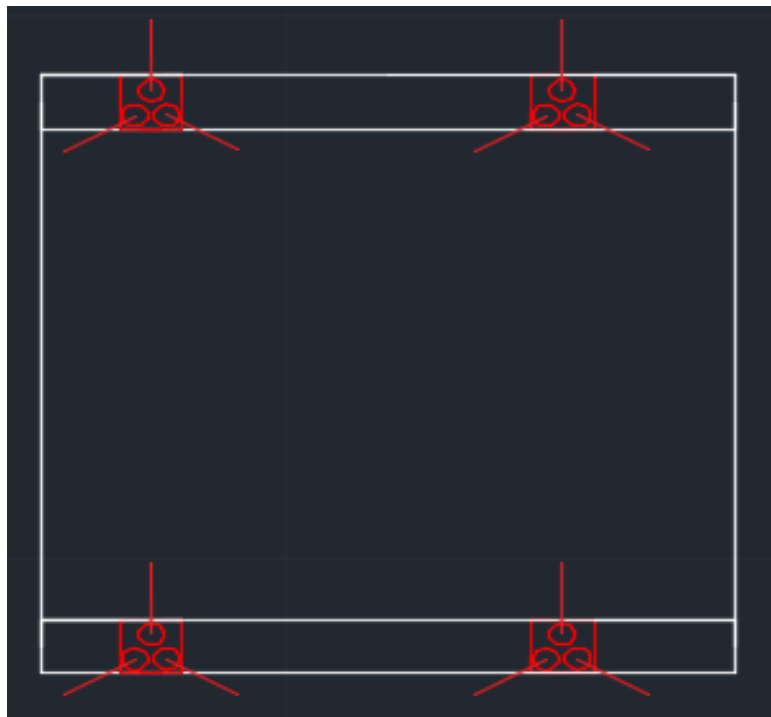
La primera propuesta trata de buscar controlar las deformaciones del pavimento por medio de vigas cimentadas en dos lados que tendrían tres micro-pilotes amarrados en ellos, de esta forma se podría hacer en dos fases, cada fase para cada carril y así o tener que cerrar todo el túnel para hacer esta adecuación, sin embargo se debe tener en cuenta que esta propuesta solo es de tipo conceptual ya que no está en los alcances de este documento y se busca que sea guía para posteriores investigaciones en el mismo tema o el principio de estudios para esta solución.

Figuran 24.propuesta de nueva cimentación por medio de micro pilotes (perfil).



Fuente; propia

Figura 25. Propuesta de nueva cimentación por medio de micro pilotes (planta).

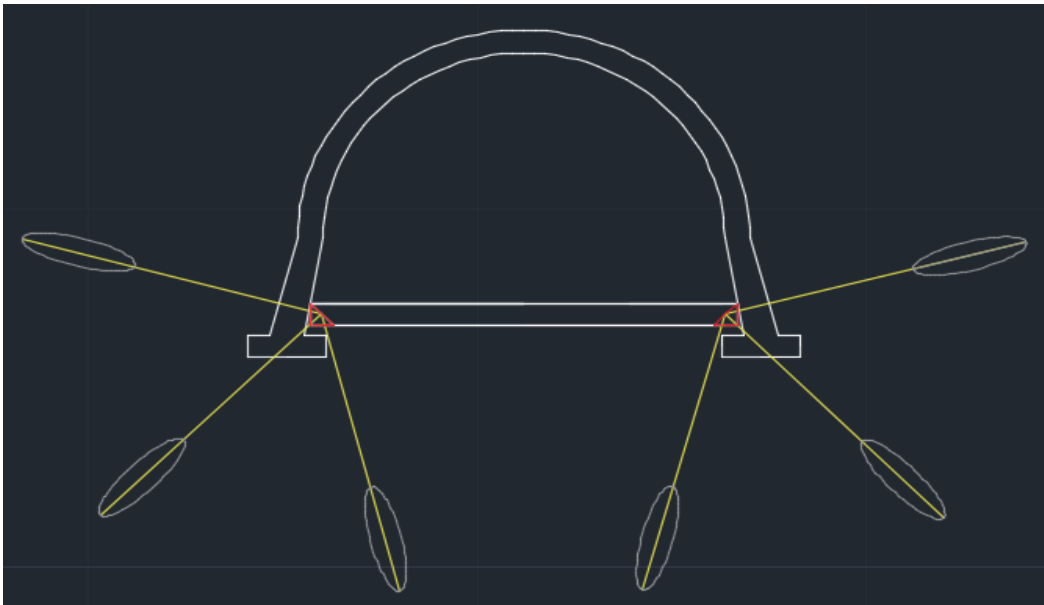


Fuente; propia

Solución propuesta 2 figura 26 y 27:

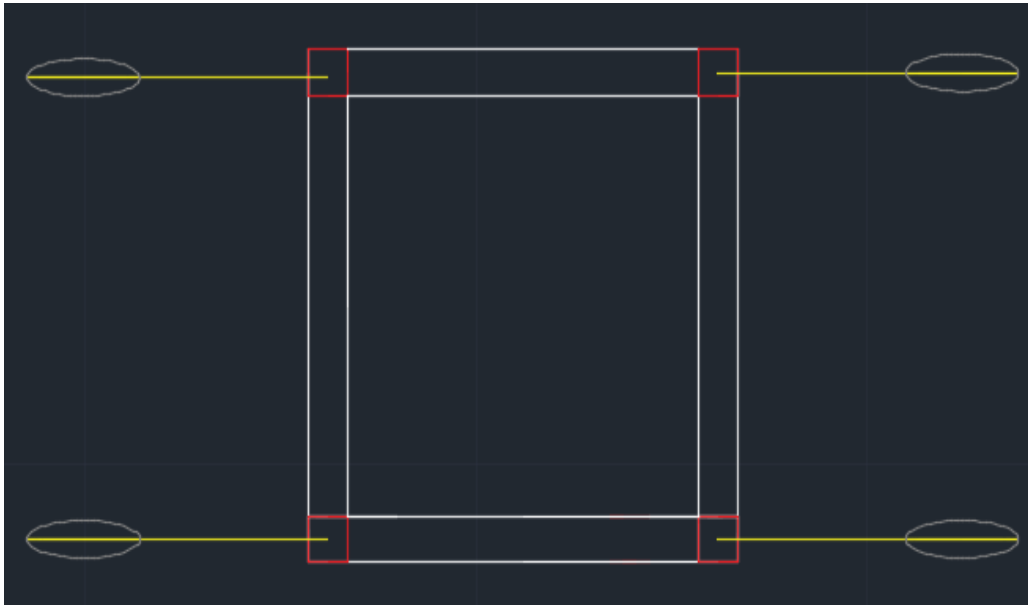
La propuesta dos se basa en anclar un viga por medio de tres bulones en cada extremo, buscando que se pueda controlar la deformación y que se pueda hacer este procedimiento de forma rápida y ágil. Sin embargo se debe tener en cuenta que los bulones deben sobrepasar la zona plástica que se forma alrededor de la sección del túnel y además se debe tener un estudio geotécnico preciso para determinar la longitud libre y de anclaje del bulón para garantizar su funcionamiento; se aclara que esta propuesta como la anterior es de tipo conceptual, ya que no tenemos datos fiables para la realización de la misma y no se encuentra en los alcances de este documento, se busca que esta propuesta se la guía para posteriores investigaciones en el mismo tema o el principio de estudios para esta solución.

*Figura 26. Propuesta de nueva cimentación por medio de anclajes (perfil).*



Fuente; propia

Figura 27. Propuesta de nueva cimentación por medio de anclajes (planta).



Fuente; propia

Se debe realizar ensayos para determinar el potencial de expansión de los materiales arcillosos y de esta manera cuantificar su influencia en la problemática existente.

Se debe instrumentar y monitorear las deformaciones, con los siguientes instrumentos: inclinómetros, extensómetros, medidores de esfuerzos, distancia metros de precisión (laser) que monitoreen acortamientos o alargamientos en los ejes principales del túnel y que permitan evaluar convergencias.

Con los datos suministrados con los anteriores elementos, se debe realizar un análisis retrospectivo de las presiones de tierra y las deformaciones en un programa aplicativo de elementos finitos. Lo anterior permitirá explicar los mecanismos de deformación que se diagnosticaron.

No obstante, este procedimiento sigue siendo igual de importante como la adecuación de la solera en el túnel, quizás sea diferente en cuanto a tiempos y a métodos de construcción; sin embargo la inhabilitación del túnel en un lapso de tiempo considerable, tampoco sería una solución viable debido al flujo de autos que tiene el túnel, por tal motivo se genera un problema por dependencia que por solución a una causa que a lo largo del tiempo será muy importante como para cerrar u inhabilitar el transporte por medio del túnel.

## 10. BIBLIOGRAFIA

1. ANONIMO. Cátedra geotécnica I: macizos rocosos. (1:1, marzo, 2010, Córdoba – Argentina. Cátedra geotécnica. Universidad Nacional de Córdoba – Argentina. 2013. P. 3 – 11
2. Anónimo. Historia de la geotecnia. [Diapositivas].37 diapositivas. Sitio web: [http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado\\_tecic/211/algloki/pdfs/Resumen%20Suelos.PDF](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_tecic/211/algloki/pdfs/Resumen%20Suelos.PDF)
3. BARTON, N., LIEN, R. y LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock mechanics. 2 ed. New York, M. Bergan, 1980. 2 p. 553-561.
4. BIENIAWSKI, Z. Engineering rock mass classifications. Advances in rock mechanics. 3 ed. Washintong, Balkeman, 1989. Vol 2., part A. p. 27 – 32.
5. CAMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. Informe visita técnica concesión autopista Bogotá – Girardot. Bogotá DC., concesión autopista Bogotá – Girardot, 2011. Vol1. 1086
6. CARTAYA, M. Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental de país. Tesis para postulación de doctorado. Cuba. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2001. Num 3 Vol. 22
7. DEERE, D. Geological considerations. Rock mechanics in engineering practice. 4 ed. Philadelphia, Louis Kirkaldie, 1988. 1.
8. GONZALEA DE VALLEJO, L. *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. 2da. Edición. Madrid. Instituto Geológico y Minero de España, 2007. Vol. 1, p. 134.

9. GUAMAN, Vladimir Ernesto y MEDIETA, Francisco Antonio. Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción “las victorias”. Título de ingeniería civil. Ecuador. Universidad de Cuenca. 2013. P. 31
  
10. HOYOS, Fabián. Geotecnia. Diccionario básico. 3 ed. Medellín, Universidad nacional de Colombia, 2001. Vol.1.
  
11. INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Contrato de concesión No. GG-040-2004 para el diseño, la construcción, rehabilitación, operación y mantenimiento del proyecto vial Bosa – Granada – Girardot corredor vial Bogotá - Buenaventura. Ponce de León, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T01 – R0, 197 – IN – T02 – R0
  
12. INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Túnel del Sumapaz informe de avance periodo junio de 2005. Ponce de león, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T01 – R0.
  
13. INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Túnel del Sumapaz informe de avance periodo junio de 2005. Ponce de león, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T01 – R0.
  
14. INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Túnel del Sumpaz longitud 3886 informe geotécnico de obras subterráneas. Bogotá, Ponce de león, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T02 – R0.
  
15. INCO (INSTITUTO NACIONAL DE CONCESIONES). Túnel del Sumpaz longitud 3886 informe geotécnico de obras subterráneas. Bogotá, Ponce de león, 2005. Vol. 2. 197 – IN – T02 – R0.
  
16. LAUFFER, H. Gebirgsklassifizierung für den stollenbau. Geologie und Bauwesen. Bauwesen. Miller 1958. Vol. 24 No 1, pp. 46-51.

17. MAYNAR, Manuel, Construcción de los túneles del ffcc del metro de Madrid en suelos blandos. Madrid, E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1995. Vol. 1. 15192 La Coruña.
18. PAYMACOTAS, ingeniería de túneles. Túneles en terrenos salinos y expansivos. EN: JORNADA TÉCNICA Barcelona (6:21-01). Barcelona. 2001. P. 129
19. PLAZA, Alexander. Análisis del comportamiento de un túnel excavado en rocas altamente expansivas. Doctorado. Barcelona. Universidad politécnica de Cataluña. 2008. P. 160
20. PROCEEDINGS OF THE 5TH NORTH AMERICAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM AND 17TH TUNNELLING ASSOCIATION OF CANADA CONFERENCE NARMS-TAC 2002. (3: 7, julio, 2010, Toronto, Canadá). Hoek & Brown failure criterion. Toronto: Universidad de Toronto. 2010.
21. REDACCION NEGOCIOS. Economía: Cerrarían el túnel Guillermo León Valencia. En: EL ESPECTADOR. Bogotá D.C., 8 de octubre de 2014
22. SEPÚLVEDA, Sergio. Mecánica de rocas en obras de ingeniería. [diapositivas]. Bogotá D.C. universidad nacional. 2006. 110 diapositivas
23. TERZAGHI, K. Rock defects and loads on tunneling supports. En: Rock tunneling with steel supportsk. 2 ed, Mexico DC: El ateneo, 2014. p. 15 – 99
24. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. Construcción de tuéneles en suelo. [diapositivas]. Cataluña. Escuela técnica de ingeniería de Caminos. 2015. 65 diapositivas.