



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
COHORTE II

TEMA:

**“ANÁLISIS EMPÍRICO DE LA PERMEABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO:
APLICACIÓN EN UN TÚNEL”**

AUTORES:

Ing. Cantos Salazar, Mario David
Ing. Pinargote Mendiburo, Karol Andrea

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE:**

MAGÍSTER EN GEOTECNIA

TUTOR:

Ph.D. Ing. Luis Jorda Bordehore

CO-TUTOR:

Ph.D. Ing. Samantha Jiménez Oyola

Guayaquil, Ecuador

30 de julio del 2021

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, en primer lugar, pues su voluntad es la que hace posible todo.

A las personas que me motivaron a inscribirme en este programa de estudios de posgrados y que creyeron en mi desde el principio: al Ing. Javier Guambo López, mi compadre; a la Ph.D. Samantha Jimenez O., mi mejor amiga; y, a la Ab. Yomayra Espinel Alvarado, por su incondicional y siempre oportuno respaldo.

Agradezco a los funcionarios del M. I. Municipio de Guayaquil que nos dieron todas las facilidades para desarrollar este trabajo de tesis: a la M.Sc. Ingrid Orta Zambrano, Directora de la Unidad de Proyectos con Financiamiento Externo; al Ing. Alberto Gavilanez, Subdirector de Obras Eléctricas; y, a los colaboradores de la Jefatura de Túneles, quienes nos acompañaron en todas las tareas de campo que se realizaron para la elaboración de esta memoria.

A nuestros tutores, por su apoyo permanente, motivación y guía; y también por sus llamados de atención y regaños, que fueron la chispa que encendía la llama que alumbraba el camino en los días de poca luz.

A mi compañera Karol Pinargote M., por invitarme a formar parte de este reto y por su disciplina, dedicación, talento y energía. En ella se reflejan los más altos valores que debe tener un profesional.

Mario David Cantos Salazar

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Jehová porque sin Él nada de esto hubiera sido posible, por ser mi fuente de fuerza, amor y dedicación. Por estar presente siempre en mis oraciones y guiándome en cada paso de mi vida.

A mi por todo el sacrificio y esfuerzo realizado para poder realizar esta maestría y trabajo de titulación.

A mi familia, por ser un ejemplo de superación y motivación para alcanzar grandes sueños, a mi padre Borys, mi mamá Maritza, y mi ñaña Karen, que me han guiado a lo largo de toda mi carrera profesional.

Para mi esposo, Danny, por su amor, apoyo y ayuda en todo momento.

A mi compañero Mario por su actitud positiva y el trabajo en equipo.

Al PhD. Ing. Luis Jordá y a la PhD. Ing. Samantha Jiménez, por ser una guía incondicional, especialmente por la oportunidad y confianza para realizar este trabajo. Además, a la Muy Ilustre Municipalidad de Guayaquil y la directora de la CAF por habernos ayudado con la información del estudio para la elaboración de esta investigación.

Karol Andrea Pinargote Mendiburo

DEDICATORIA

A mis tres familias: la que está cerca mío, la que extraño a la distancia y la que algún día tendré.

A ellos, este es el título que les ofrecí.

Mario David Cantos Salazar

DEDICATORIA

Le dedico este logro a Dios, a mis padres, a mis abuelitos y a mi amado esposo.

Karol Andrea Pinargote Mendiburo

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 1.1. Antecedentes | 2 |
| 1.2. Justificación del problema..... | 3 |
| 1.3. Preguntas de la Investigación..... | 4 |
| 1.4. Objetivo General | 5 |
| 1.5. Objetivos Específicos..... | 5 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1. Permeabilidad..... | 6 |
| 2.1.1. Permeabilidad primaria y secundaria..... | 6 |
| 2.2. Métodos para determinar la permeabilidad..... | 12 |
| 2.2.1. Ensayo Lugeon..... | 13 |
| 2.2.2. Relación entre la permeabilidad y los índices del macizo rocoso. | 14 |
| 2.2.3. Relación entre la permeabilidad y la profundidad. | 17 |
| 2.3. Características geomecánicas que se correlacionan con la permeabilidad. | 21 |
| 2.3.1. Rock Quality Designation, RQD | 21 |
| 2.3.2. Presencia de agua..... | 23 |
| 2.5. Determinación empírica de caudales infiltrados en un túnel | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 3. METODOLOGÍA..... | 28 |
| 3.1. Recopilación de información y análisis de datos | 28 |
| 3.1.1. Descripción del área de estudio | 29 |
| 3.1.2. Información disponible | 41 |
| 3.2. Cálculo de permeabilidad a partir de ecuaciones empíricas | 41 |
| 3.3. Cálculo de caudales infiltrados a partir de ecuaciones empíricas | 43 |
| 3.4. Trabajos de campo (Aforos <i>in situ</i>)..... | 44 |
| 3.5. Validación de los resultados..... | 46 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 48 |
| 4.1. Determinación empírica de la permeabilidad del macizo rocoso. | 48 |
| 4.1.1. Permeabilidad como función de los índices RMR y RQD. | 48 |
| 4.1.1. Permeabilidad como función de la profundidad. | 53 |
| 4.2. Estimación de los caudales infiltrados | 56 |
| 4.3. Determinación <i>in situ</i> el caudal de infiltración del túnel | 59 |
| 4.4. Comparación de los valores de permeabilidad obtenidos | 61 |
| 4.6. Comparación de los valores de caudales obtenidos | 65 |
| CONCLUSIONES..... | 69 |
| RECOMENDACIONES | 70 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 71 |
| ANEXOS..... | 75 |

| | |
|---------------|----|
| Anexo 1 | 75 |
| Anexo 2 | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.- Valores de permeabilidad primaria y secundaria para rocas y macizos rocosos (González de Vallejo et al., 2002). | 8 |
| Figura 2.- Permeabilidad equivalente considerando la ley de Darcy para el flujo viajando de manera paralela y perpendicular, respectivamente (Sánchez San Román, 1856) | 11 |
| Figura 3.- Estimación de RQD a partir de testigos de sondeo (Ramírez & Alejano, 2004). | 22 |
| Figura 4.- Red de flujo en sección generada en el entorno de un túnel (Escalante, 1992)..... | 24 |
| Figura 5.- Modelo utilizado para las fórmulas de obtención de caudal en un túnel mediante la permeabilidad (El Tani, 1999)..... | 25 |
| Figura 6.- Fotografías del ingreso y salida del Túnel No. 1 Cerro Del Carmen y Túnel No. 2 Cerro Santa Ana. Obtenidas de Google Maps..... | 29 |
| Figura 7.- Perfil geológico del macizo rocoso y distribución de sección tipo en túnel Cerro Del Carmen (GADM Guayaquil, 1998)..... | 34 |
| Figura 8.- Perfil geológico del macizo rocoso y distribución de sección tipo en túnel Cerro Santa Ana (GADM Guayaquil, 1998). | 36 |
| Figura 9.- Inspección <i>in situ</i> . Túnel Cerro El Carmen y Santa Ana..... | 45 |
| Figura 10.- Captación in situ del caudal obtenido en semana de no lluvia. túnel Cerro El Carmen y Santa Ana. | 46 |
| Figura 11.- Cuadro comparativo de los resultados obtenidos mediante el estudio (GADM Guayaquil, 1998) y los métodos empíricos del cerro El Carmen. | 52 |
| Figura 12.- Cuadro comparativo de los resultados obtenidos mediante el estudio (GADM Guayaquil, 1998) y los métodos empíricos del cerro Santa Ana. | 53 |
| Figura 13.- Permeabilidad (m/s) obtenida en función de la profundidad..... | 54 |
| Figura 14.- Permeabilidad (m/s) obtenida en función de la profundidad..... | 56 |
| Figura 15.- Gráfico de profundidad de la permeabilidad contra el RQD (Qureshi et al. 2014)..... | 64 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.- Clasificación de los valores de Lugeon asociado con la conductividad hidráulica de las discontinuidades en el macizo rocoso (Öge, 2017)..... | 14 |
| Tabla 2.- Clasificación de presencia de agua en macizo rocoso según Bieniawski (1979). | 23 |
| Tabla 3.- Clasificación de meteorización (ISRM) (GADM Guayaquil, 1998)..... | 32 |
| Tabla 4.- Clasificación del RMR según las clases del tipo de macizo rocoso de los Túneles Cerro El Carmen y Santa Ana (GADM Guayaquil, 1998)..... | 37 |
| Tabla 5.- Longitud de los tramos artificiales y naturales del Túnel 1 y 2 (GADM Guayaquil, 1998)..... | 38 |
| Tabla 6.- Longitud de aplicación de las secciones tipo en cada túnel (GADM Guayaquil, 1998). | 39 |
| Tabla 7.- Permeabilidad obtenida del estudio del Túnel 1 ubicado en el Cerro Del Carmen (GADM Guayaquil, 1998)..... | 40 |
| Tabla 8.- Permeabilidad obtenida del estudio del Túnel 2 ubicado en el Cerro Santa Ana (GADM Guayaquil, 1998)..... | 40 |
| Tabla 9.- Ecuaciones que relacionan la permeabilidad con los Índices de la roca..... | 41 |
| Tabla 10.- Ecuaciones que relacionan la permeabilidad con la profundidad..... | 42 |
| Tabla 11.- Ecuaciones analíticas para el cálculo del caudal infiltrado en el túnel. | 43 |
| Tabla 12.- Permeabilidad (m/s) en el cerro El Carmen, según Qureshi et al. (2014). | 48 |
| Tabla 13.- Permeabilidad (m/s) en el cerro Santa Ana, según Qureshi et al. (2014). | 49 |
| Tabla 14.- Permeabilidad (m/s) en el cerro El Carmen, según El-Naqa (2001)..... | 49 |
| Tabla 15.- Permeabilidad (m/s) en el cerro Santa Ana, según El-Naqa (2001). | 50 |
| Tabla 16.- Permeabilidad (m/s) en el cerro El Carmen, según Jiang et al. (2009a, 2009b). | 51 |
| Tabla 17.- Permeabilidad (m/s) en el cerro El Carmen, según Jiang et al.(2009a, 2009b). | 51 |
| Tabla 18.- Permeabilidad (m/s) como función de la profundidad Túnel Cerro El Carmen. | 54 |
| Tabla 19.- Permeabilidad (m/s) como función de la profundidad Túnel Cerro Santa Ana..... | 55 |
| Tabla 20.- Resultados de caudales (l/s) utilizando diferentes métodos Túnel El Carmen. | 57 |
| Tabla 21.- Resultados de caudales (l/s) utilizando diferentes métodos Túnel Santa Ana..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Tabla 22.- Valores de caudal (l/s) obtenidos de inspección <i>in situ</i> Túnel El Carmen y Santa Ana. | 59 |
| Tabla 23.- Análisis inverso para determinación de las permeabilidad (m/s) en diferentes métodos Túnel El Carmen..... | 60 |
| Tabla 24.- Análisis inverso para determinación de las permeabilidad (m/s) en diferentes métodos Túnel Santa Ana..... | 61 |
| Tabla 25.- Comparación de las permeabilidades (m/s) obtenidas Túnel El Carmen. | 61 |
| Tabla 26.- Comparación de las permeabilidades (m/s) obtenidas Túnel Santa Ana. | 62 |
| Tabla 27.- Comparación de los caudales (l/s) obtenidos en el túnel del Carmen..... | 66 |
| Tabla 28.- Comparación de los caudales (l/s) obtenidos en el túnel Santa Ana..... | 67 |

ÍNDICE DE ANEXO

| | |
|---|----|
| Anexo 1.- Secciones tipo en el túnel natural. (GADM Guayaquil, 1998). | 76 |
| Anexo 2.- Localización de muestra tomada en Túnel Cerro Del Carmen. | 77 |
| Anexo 3.- Localización de muestra tomada en Túnel Cerro Santa Ana. | 77 |

RESUMEN

Conocer la influencia del agua subterránea en los macizos rocosos en donde se pretende construir túneles es de fundamental importancia, ya que un inadecuado análisis puede provocar infiltraciones que comprometan la estabilidad del mismo y la seguridad de las personas que participan en el proceso constructivo, así como puede reducir la vida útil de la infraestructura y afectar a los usuarios de la misma. El presente trabajo analizó la relación entre la permeabilidad, las características geomecánicas del macizo rocoso y la profundidad del túnel, lo que permitió la estimación del caudal infiltrado en los túneles de hormigón proyectado de los Cerros El Carmen y Santa Ana, a través de métodos empíricos y analíticos. Como resultado se obtuvo que a partir de los valores de permeabilidad encontrados y utilizando las ecuaciones empíricas propuestas por varios autores, fue posible estimar valores de caudales infiltrados en los túneles. A pesar de la incertidumbre de los resultados obtenidos en los valores de permeabilidad, se considera que estos están dentro de los rangos de dispersión de resultados que se observan en los diferentes estudios de permeabilidad que fueron analizados para la elaboración de este trabajo. Es importante destacar que el propósito de este trabajo no es solo estimar los caudales y la permeabilidad del túnel objeto de estudio, sino más bien, utilizarlo como un sitio de pruebas para validar y analizar diferentes metodologías y formulaciones empíricas. La información obtenida en este estudio debe ser el primer paso para futuras investigaciones que deriven en formulaciones empíricas de permeabilidad para los macizos rocosos de la localidad.

PALABRAS CLAVES: Permeabilidad, caudal, conductividad hidráulica aparente, túneles, infiltración.

ABSTRACT

Knowing the influence of groundwater in the rocky massifs where tunnels are to be built is of fundamental importance, since an inadequate analysis can cause infiltrations that compromise the stability of the structure and safety of the person who participate in the construction process, as well as it can reduce the useful life of the infrastructure and affect its users. This study analyzed the relationship between permeability, the geomechanical characteristics of the rocky massif and the depth of the tunnel, which allowed the estimation of the infiltrated flow in the shotcrete tunnels of Cerro El Carmen and Santa Ana, through empirical and analytics methods. As a result, from the calculated permeability values and the empirical equations proposed by various authors, it was possible to estimate values of infiltrated flows in the tunnels. Despite the uncertainty of the results in the permeability values, it is considered that these are within the ranges of dispersion reported by other authors that were used for the preparation of this study. It is important to note that the purpose of this work is not only to estimate the flow rates and permeability of the tunnel under study, but rather to use it as a test site to validate and analyze different empirical methodologies and formulations. The information obtained in this study should be the first step for future research that will lead to empirical permeability formulations for the local rock massifs.

KEY WORD: Permeability, flow, apparent hydraulic conductivity, tunnels, infiltration.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La naturaleza, y en particular los macizos rocosos, tiende a ser heterogénea y anisótropa. Por ello, se debe prestar mayor atención a las zonas débiles del macizo rocoso (juntas, discontinuidades, zonas de cizallamiento, zonas de fallas, etc.) que pueden causar fallas de diferentes maneras (R.K. & Bhawani, 2011). Bieniawski (1979) y Barton et al. (1974), propusieron sistemas de clasificación de los macizos rocosos que consideran la resistencia de la roca, la presencia de discontinuidades y el estado de las mismas, la presencia de agua, entre otros.

Un tema en particular es la incidencia del agua en la estabilidad de los macizos rocosos, que a lo largo del tiempo ha significado un limitante para atravesar montañas con cargas hidráulicas altas o para cruzar afluentes de agua en zonas urbanas. La fuerza que ejerce el agua es tal que puede generar inestabilidad en el macizo (Oteo Mazo, 2016).

Un ejemplo claro de la influencia que puede tener el agua en los macizos rocosos y en los túneles lo encontramos en la construcción del cruce de los túneles ferroviarios de Guadamarra. Los trabajos de construcción de estos túneles de 27 km de longitud cada uno, bajo el arroyo Valparíaso (Segovia), provocaron una socavación de 5 m de profundidad y 10 m de ancho, debido a que la tuneladora interceptó una falla por la que filtraba agua proveniente de un río cercano (Oteo Mazo, 2016), creando no solo daños en los alrededores sino también cambiando el trazado del túnel que se pensaba realizar.

En la práctica actual de la ingeniería, la estimación de la entrada de agua subterránea en un túnel con discontinuidades en su macizo rocoso es calculada mediante la utilización de la

conductividad hidráulica equivalente o también llamada permeabilidad. En un macizo rocoso con discontinuidades, el caudal es controlado principalmente por la permeabilidad de las juntas que se interceptan en una muestra, que a su vez depende de las características geomecánicas y el esfuerzo efectivo normal de las juntas (Öge, 2017). Sin embargo, si las intercepciones de las juntas que se encuentran en la muestra son significativamente diferentes a las que cruzan el túnel, la conductividad hidráulica equivalente puede no ser representativa para estimar la tasa de entrada del agua subterránea.

Diversos estudios han propuesto ecuaciones que correlacionan los índices geológicos de los macizos rocosos con valores de conductividad hidráulica o permeabilidad, tales como: Öge (2017), Qureshi et al. (2014), El-Naqa (2001), entre otros.

El 28 de febrero de 1995, la M. I. Municipalidad de Guayaquil y la Compañía STIPE S.p.A. celebraron el contrato de consultoría N° PDM 95-07 para la elaboración de los “Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos del Proyecto Vial de los Túneles de los Cerros El Carmen y Santa Ana de la Ciudad de Guayaquil”, cuyos resultados finales fueron entregados a la ciudad en el mes de mayo de 1999. Estos estudios técnicos, aportan una valiosa cantidad de datos que permiten aplicar las ecuaciones de correlación citadas en el párrafo anterior y analizar, de manera empírica, la permeabilidad de un macizo rocoso atravesado por un túnel.

1.2. Justificación del problema

Las obras de ingeniería modifican el estado tensional al que están sometidos los macizos rocosos en un tiempo muy corto en comparación con los procesos geológicos, y pueden tener lugar interacciones mutuas entre la liberación o redistribución de los esfuerzos naturales y las estructuras. Por su parte, el agua presente en los macizos rocosos reduce su resistencia, genera

presiones en el interior de los mismos y altera sus propiedades, dificultando las excavaciones superficiales y subterráneas (González de Vallejo et al., 2002).

Considérese la aplicabilidad de conocer esta incidencia en un túnel. Un inadecuado análisis de la influencia del agua subterránea sobre el macizo rocoso puede provocar que no se tomen en cuenta altas infiltraciones que comprometan la estabilidad del mismo y la seguridad de las personas que participan en el proceso constructivo.

Para evaluar la influencia del agua deben estudiarse las características de la permeabilidad y el flujo en los macizos rocosos. Las propiedades del medio rocoso deben evaluarse teniendo en cuenta las condiciones del agua subterránea (González de Vallejo et al., 2002). Por ello, la medición en campo y el cálculo empírico de la permeabilidad del macizo rocoso permitirán conocer el comportamiento del agua con la estructura que se encuentre en la roca.

1.3.Preguntas de la Investigación

Ante la problemática identificada en la zona de estudio nos planteamos las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el método empírico que mejor representa el comportamiento de la permeabilidad del macizo rocoso en los Cerros El Carmen y Santa Ana?
- ¿Cuál es la diferencia entre los valores de permeabilidad obtenidos a partir de datos *in situ* y los calculados mediante los métodos empíricos, en los Túneles Cerro El Carmen y Santa Ana?

1.4.Objetivo General

Analizar la relación entre la permeabilidad, las características geomecánicas de un macizo rocoso y la estimación del caudal filtrante en los Túneles El Carmen y Santa Ana a través de métodos empíricos.

1.5.Objetivos Específicos

- Determinar de manera empírica la permeabilidad de los macizos rocosos de los Cerros El Carmen y Santa Ana, a través de correlaciones litológicas y calidad de la roca.
- Estimar los caudales infiltrados a partir de los resultados empíricos de permeabilidad en los Túneles El Carmen y Santa Ana.
- Validar los resultados de permeabilidad y caudal obtenidos de manera empírica comparándolos con los valores encontrados a partir de muestreos *in situ*.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Permeabilidad

Existen diversos problemas geotécnicos que afectan la estabilidad del macizo rocoso en un túnel. Sin embargo, uno de los más importantes es la presencia de agua subterránea. Es ampliamente conocido que el ingreso de agua en macizos fracturados suele generar situaciones desfavorables ya que reduce la calidad de la roca. Por esto, se debe planificar la construcción de un túnel poniendo especial atención a la identificación y naturaleza de las condiciones hidrogeológicas del área de influencia del proyecto constructivo (Maristany Eduardo, 1999).

Para poder estimar la presencia de agua subterránea es necesario determinar elementos importantes como: el nivel freático, la dirección y trayectoria que sigue el flujo subterráneo, la identificación y localización de las zonas de recarga y descarga, la variación de los caudales con respecto al tiempo, la permeabilidad del medio, entre otros. Estos factores permitirán conocer la cantidad de agua que ingresa al túnel, variación en el tiempo, y la presión hidráulica que puede desestabilizar el túnel, por ello será necesario medir periódicamente los niveles de agua en pozos (Escalante, 1992).

Según Angelone et al. (2006), para poder estimar la cantidad de agua que ingresa de un acuífero a un túnel, se puede realizar un análisis cuantitativo de la red de flujo si la permeabilidad del medio es conocida.

2.1.1. Permeabilidad primaria y secundaria

Según González de Vallejo et al. (2002) la permeabilidad es definida como la capacidad del medio rocoso para que el agua fluya a través de sus vacíos interconectados y se representa por

el coeficiente de permeabilidad, que se expresa como una velocidad. Los valores normales para las rocas varían de 1 m/día a 1 m/año.

La permeabilidad de la matriz rocosa es intergranular, y el agua se transmite a través de los poros y microfisuras interconectados de la roca, recibiendo el nombre de permeabilidad primaria. En los macizos rocosos el agua fluye a favor de las superficies de discontinuidad, y se define como permeabilidad secundaria. Por lo general, la permeabilidad de la matriz rocosa es despreciable con respecto a la del macizo rocoso fracturado. Una excepción son las areniscas y otras rocas porosas (ver Figura 1), donde sí es posible el flujo de agua a través de la matriz (González de Vallejo et al., 2002).

El flujo del agua en un macizo rocoso fracturado depende de la abertura de las discontinuidades, que a su vez depende del esfuerzo normal ejercido sobre ellas, y de su interconexión. Este esfuerzo aumenta con la profundidad, y a partir de un determinado nivel las discontinuidades aparecen cerradas, siendo la permeabilidad del macizo la de la matriz rocosa, o permeabilidad primaria (González de Vallejo et al., 2002).

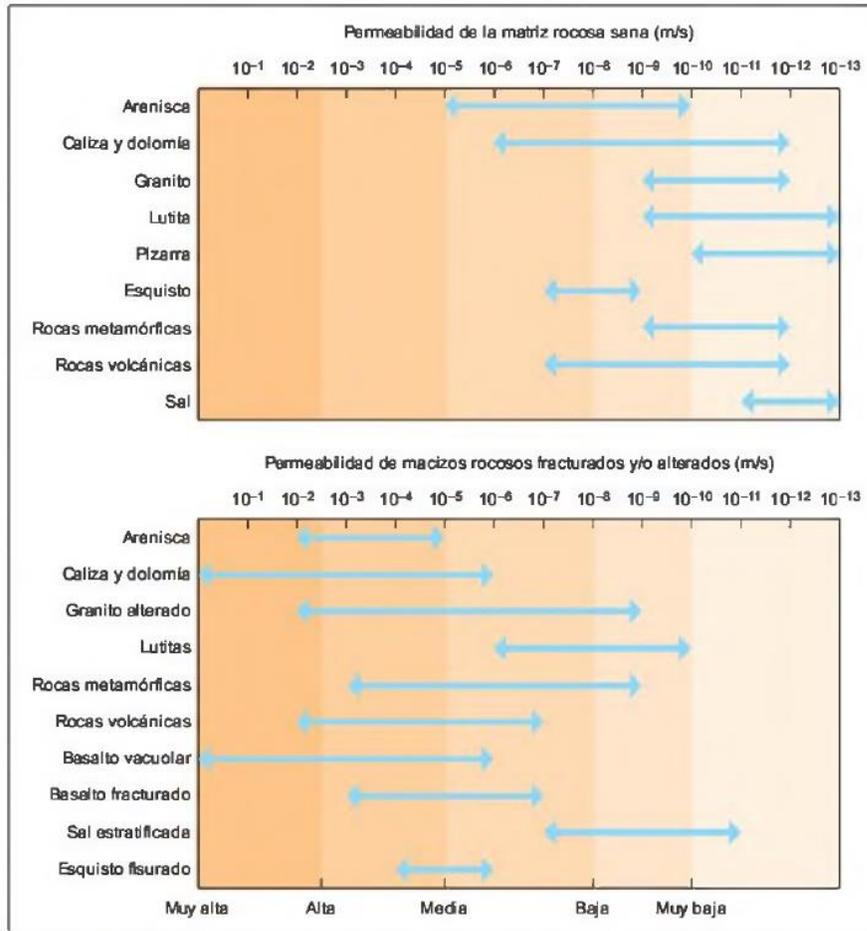


FIGURA 1.- VALORES DE PERMEABILIDAD PRIMARIA Y SECUNDARIA PARA ROCAS Y MACIZOS ROCOSOS (GONZÁLEZ DE VALLEJO ET AL., 2002).

La permeabilidad de la matriz rocosa se mide en ensayos de laboratorio, y la del macizo rocoso mediante la realización de ensayos *in situ* en sondeos.

Ley de Darcy (1856)

Según Sánchez San Román (1856), en su investigación acerca de la ley de Darcy indica algunos parámetros a seguir dependiendo de la dirección del flujo y estado del material. Para el flujo de agua a través de un material granular saturado, la ley de Darcy (Darcy, 1856) es ampliamente aceptada:

$$Q = K \times A \times i$$

En donde el caudal total (Q en m^3/s) es directamente proporcional al área de flujo de la sección transversal (A en m^2), conductividad hidráulica (o llamado como coeficiente de permeabilidad K en m/s) y gradiente hidráulico i . i es una relación de diferencia de presión (Δh) a lo largo de la longitud de flujo (l en m) se puede representar como:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

La conductividad hidráulica K , además de la intrínseca permeabilidad del material geológico representada por k_i , depende de las propiedades del fluido, que son el peso unitario y la viscosidad:

$$K = k_i \times (\gamma/\mu)$$

La conductividad hidráulica (coeficiente de permeabilidad) puede ser medido en escala de laboratorio y de campo, luego se puede utilizar para calcular el flujo total de agua subterránea en un área particular. Para el material del suelo, se acepta que todos los poros o vacíos están interconectados y, en general, la gradación, densidad, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación, y la estratificación influye en la permeabilidad.

Se debe tomar en consideración si la relación entre el caudal y el gradiente hidráulico no es lineal, como suele ocurrir en algunos escenarios, cuando el valor de la conductividad hidráulica K es muy baja o cuando el flujo presenta velocidades muy altas. Para el último caso, el caudal es directamente proporcional, la función no sería linealmente proporcional sino potencial donde n tiene que ser distinto a 1, a la sección y al gradiente:

$$q = -K \left(\frac{\Delta h}{\Delta l} \right)^n$$

Para este caso, se aplica el número de Reynolds para ambientes porosos, utilizando la fórmula para canales o tubos, reemplazando el diámetro de conducción por el diámetro medio de los granos (d en m), empleando la densidad del fluido (ρ en kg/m^3), la velocidad de Darcy (v en m/s) y la viscosidad dinámica (μ en $\frac{kg}{m^2s}$), teniendo en cuenta que μ/ρ es igual a la viscosidad cinemática (ν en m^2/s).

$$R = \frac{\rho \times v \times d}{\mu} = \frac{vd}{\nu}$$

Si los valores obtenidos son altos indican un régimen turbulento (caudal no es linealmente proporcional al gradiente hidráulico) y si son bajos se trata de un régimen laminar. De manera experimental se ha determinado que si (Sánchez San Román, 1856):

- $R < 1$ ∴ cumple con la ley de Darcy
- $R > 10$ ∴ no cumple con la ley de Darcy
- R entre 1 y 10 puede cumplir como no, dependiendo de otros factores a parte del diámetro del grano como la heterometría, forma, entre otros.

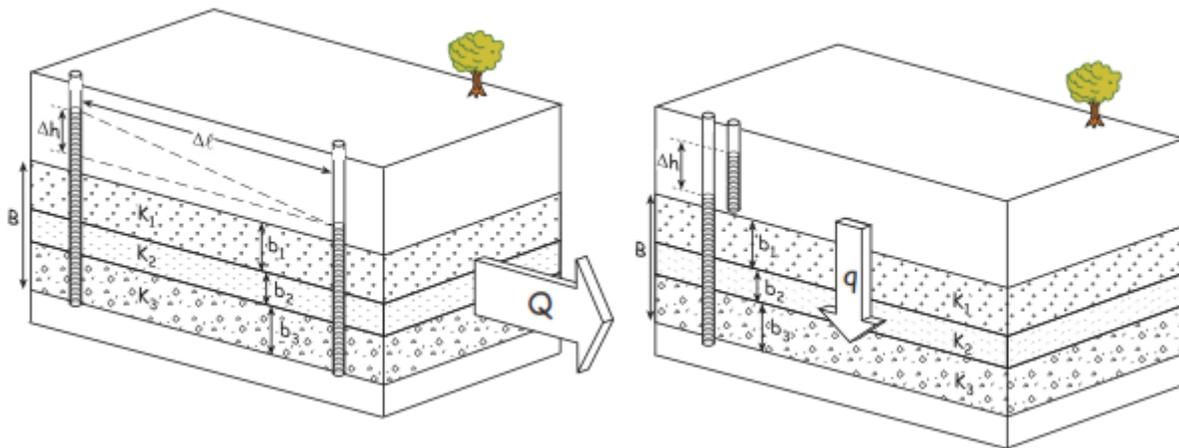
En general para agua subterránea las velocidades son lentas a excepción de los ambientes kársticos y algunos volcánicos (basaltos), por lo que los valores de R son bajos cumpliendo con la relación lineal entre el caudal y el gradiente.

Hay formaciones rocosas que pueden figurar el comportamiento permeable del suelo con los vacíos interconectados representando una alta porosidad. La roca intacta generalmente está muy bien cementada con granos minerales que contienen poros diminutos. Sin embargo, los poros

o vacíos no están interconectados lo cual representa una permeabilidad muy baja, si es que la roca no está fracturada (Sánchez San Román, 1856).

La permeabilidad de la roca intacta y el macizo rocoso se altera debido a la presencia y frecuencia de discontinuidades. Según Bieniawski Z.T.(1989) las condiciones de las discontinuidades consisten en: persistencia, apertura, rugosidad, tipo de relleno, el espesor de relleno de las discontinuidades también gobierna el caudal de agua a través de un macizo rocoso, además de afectar la resistencia de este. La estimación y medición en campo de la permeabilidad se vuelve más importante cuando el interés del estudio es una masa rocosa.

Ahora bien, según Sánchez San Román (1856), cuando el flujo atraviesa varias capas de suelo se puede presentar en dos situaciones. Cuando el flujo va en dirección paralela a las capas o cuando el flujo va de manera perpendicular, así como se ve en la Figura 2. Para esto se estima que las capas de suelo son homogéneas e isotrópicas.



a) Flujo paralela a los estratos

b) Flujo perpendicular a los estratos

FIGURA 2.- PERMEABILIDAD EQUIVALENTE CONSIDERANDO LA LEY DE DARCY PARA EL FLUJO VIAJANDO DE MANERA PARALELA Y PERPENDICULAR, RESPECTIVAMENTE (SÁNCHEZ SAN ROMÁN, 1856)

Cuando el flujo va en dirección paralela a las capas, la permeabilidad es igual a:

$$K_h = \frac{(\sum K_i \times b_i)}{B}$$

Donde, K_h es la conductividad hidráulica horizontal equivalente, que depende de la sumatoria de la conductividad hidráulica (K_i) y espesores (b_i) de cada capa, y el total de todos los espesores (B).

Si el flujo va de manera perpendicular, la permeabilidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$K_v = \frac{B}{\sum \frac{b_i}{K_i}}$$

Donde la conductividad hidráulica vertical equivalente (K_v) es igual al espesor total de las capas (B) para la sumatoria del espesor (b_i) y conductividad hidráulica de cada capa (K_i).

La ley de Darcy (Darcy, 1856) es uno de los componentes fundamentales del método analítico, del cual se basa este trabajo de investigación.

2.2. Métodos para determinar la permeabilidad

Los métodos para la determinación de la conductividad hidráulica van desde ensayos *in situ* hasta determinaciones mediante correlaciones entre la profundidad o las características geológicas del macizo rocoso, como se verán a continuación:

2.2.1. Ensayo Lugeon

El ensayo Lugeon, según Öge (2017), es una prueba *in situ* comúnmente empleada para medir la permeabilidad del macizo rocoso. La prueba recibió el nombre por el geólogo suizo Maurice Lugeon en 1933.

Este ensayo se realiza en el interior de sondeos y permite calcular semi-cuantitativamente la permeabilidad de los macizos rocosos, en cualquier tipo de litología y estado de fracturación. El ensayo consiste en introducir agua a presión constante (10 kp/cm^2) en el sondeo, midiendo las admisiones durante un período de 10 minutos. Normalmente, se ensayan tramos de 5 m. de sondeo, aislando el tramo de ensayo del resto del sondeo mediante dos obturadores; en este caso el ensayo se conoce también como *packer test*. Si el ensayo se realiza en el fondo del sondeo (5 m finales) sólo es necesario el empleo de un obturador, correspondiendo en este caso al ensayo tal y como lo definió M. Lugeon en 1933 (Öge, 2017).

La presión se aplica en escalones sucesivos de carga y descarga de 0, 1, 2, 5 y 10 kp/cm^2 respectivamente, manteniendo la presión en cada escalón durante 10 minutos. Siempre deben alcanzarse los 10 kp/cm^2 , excepto en rocas blandas en las que se puede producir fracturación hidráulica antes de llegar a dicha presión. Los valores de permeabilidad obtenidos a 5 y 10 kp/cm^2 no pueden extrapolarse linealmente para presiones mayores (Öge, 2017).

La unidad de medida del ensayo es el Lugeon que corresponde a una absorción de agua de 1 litro por metro de sondeo y por minuto, realizando el ensayo a 10 atmósferas de presión durante 10 minutos. Una unidad Lugeon equivale a un coeficiente de permeabilidad de 10^{-5} cm/s (U.L. = $1 \text{ l/m} \times \text{min} = 10^{-5} \text{ cm/s}$) (Öge, 2017).

Los resultados de esta prueba se presentan en función de la profundidad, en unidades Lugeon o admisión en l/m x min en función de la presión ensayada.

A continuación, la Tabla 1 muestra valores de Lugeon asociados a condiciones de las discontinuidades del macizo rocoso:

TABLA 1.- CLASIFICACIÓN DE LOS VALORES DE LUGEON ASOCIADO CON LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LAS DISCONTINUIDADES EN EL MACIZO ROCOSO (ÖGE, 2017).

| Rango Lugeon | Clasificación | Rango de Conductividad Hidráulica | Condición de las discontinuidades del macizo rocoso | Rango de precisión (Lugeons) |
|---------------------|----------------------|--|--|-------------------------------------|
| < 1 | Muy bajo | $< 1 \times 10^{-5}$ | Muy estrecho | < 1 |
| 1-5 | Bajo | $1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$ | Estrecho | ± 0 |
| 5-15 | Moderado | $6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$ | Pocas abiertas | ± 1 |
| 15-50 | Medio | $2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$ | Algunas abiertas | ± 5 |
| 50-100 | Alto | $6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$ | Muchas abiertas | ± 10 |
| > 100 | Muy Alto | $> 1 \times 10^{-3}$ | Vacíos | > 100 |

2.2.2. Relación entre la permeabilidad y los índices del macizo rocoso.

En los estudios de macizos rocosos se evalúa la calidad y estabilidad de los mismos conforme a índices tales como: *rock mass rating* (RMR), *geological strength index* (GSI), y *rock quality designation* (RQD). Algunos autores han intentado establecer una relación empírica entre dichos índices y la permeabilidad o conductividad hidráulica (Shahbazi et al., 2020). A continuación, se presenta un resumen de las ecuaciones desarrolladas por diversos autores:

Qureshi et al. (2014)

Según Qureshi et al. (2014), los registros de pozos obtenidos de las investigaciones del sitio realizadas durante la construcción de estructuras hidráulicas en Omán incluían los resultados de las pruebas de presión del agua de Lugeon y los valores de RQD para las secciones respectivas de

los pozos perforados en formaciones rocosas sedimentarias. En total, se revisaron 367 pruebas de presión de agua de Lugeon realizadas en 33 pozos con una profundidad máxima de 120 m, en las formaciones sedimentarias discontinuas.

Según los datos *in situ* de permeabilidad, las rocas sedimentarias discontinuas poco profundas son más conductoras en comparación con la permeabilidad baja o insignificante en extensiones más profundas. Estos resultados confirman los efectos de las condiciones de estrés sobre la permeabilidad de rocas discontinuas.

Se deriva una relación de logaritmo natural decreciente entre la permeabilidad *in situ* delineada por las pruebas de Lugeon y la RQD en rocas sedimentarias discontinuas por análisis de regresión.

Esta relación estadísticamente significativa se propone para estimar la permeabilidad *in situ* aparente del RQD de roca sedimentaria discontinua obtenida durante la perforación del pozo, lo que hace posible planificar las investigaciones de campo detalladas durante el diseño y construcción de estructuras hidráulicas. Este enfoque mejora el alcance general de los problemas relacionados con el ahorro de tiempo y la rentabilidad en las investigaciones detalladas del sitio para un lugar específico. Los valores de permeabilidad aparente obtenidos mediante el uso de esta metodología pueden considerarse válidos para el área que tiene características geoestructurales similares, es decir, rocas sedimentarias principalmente areniscas y limolitas.

La ecuación planteada por Qureshi et al. (2014), es la siguiente:

$$K_a = 0,01382 - 0,003 \ln RQD$$

donde

K_a : permeabilidad aparente [cm/s]

RQD : *Rock Quality Designation* [%]

La permeabilidad del macizo rocoso con matriz rocosa de baja permeabilidad está controlada por la intensidad de fracturación, la interconexión de las discontinuidades y la permeabilidad de las mismas. Su determinación es compleja por la gran variabilidad que presenta, incluso en zonas próximas dentro del mismo macizo rocoso. La presencia de varias familias de juntas, de discontinuidades singulares como las fallas, las zonas meteorizadas, alteradas, tectonizadas, etc., suponen zonas de anisotropía en la permeabilidad del macizo.

El-Naqa (2001)

En la investigación realizada por El-Naqa (2001) se correlacionó la conductividad hidráulica con algunos de los índices geotécnicos como RQD y RMR, porque la derivación de estos índices depende principalmente en las características relevantes de la fractura. Además, estos parámetros son fáciles de obtener de perforaciones o del mapeo de familias de fracturas en los afloramientos. Por tanto, mediante un análisis de regresión, se ha determinado una relación entre la conductividad hidráulica y el RQD y RMR.

Para el presente trabajo de tesis, se usó la ecuación obtenida mediante la regresión de datos obtenidos en perforaciones y utilizando como variable el valor de RMR de la roca. Esta ecuación es la siguiente:

$$K = 5 \times 10^6 e^{-0,1923 \times RMR}$$

donde

RMR : *Rock Mass Rating*

Jiang et al. (2009a,2009b)

$$K = 0,4892e^{-(0,0543 \times RQD)}$$

donde

RQD : *Rock Quality Designation* [%]

2.2.3. Relación entre la permeabilidad y la profundidad.

Según Shahbazi et al. (2020), en investigaciones empíricas, el estado tensional es el parámetro que más afecta la permeabilidad en sitios profundos del macizo rocoso. Los esfuerzos inciden directamente en la apertura de las discontinuidades, que es por donde circula el agua dentro de un macizo, y por consiguiente, afecta la permeabilidad de la formación rocosa. La apertura de las discontinuidades disminuye con la profundidad debido a la tensión que ejercen las fuerzas gravitatorias y los espaciamientos entre fracturas aumentan. La variación de la permeabilidad, según la profundidad, está gobernada por la apertura más que por los espaciamientos.

A continuación, se presentan algunas ecuaciones que muestran la correlación existente entre valores de permeabilidad y la profundidad.

Snow (1970)

Según Snow (1970), los datos de las pruebas de presión se han utilizado para estimar el espaciamiento promedio y la apertura promedio de las fracturas conductoras de agua en macizos rocosos no perturbados. Las descargas de las pruebas de inyección del empacador muestran distribuciones sesgadas cuando se ajustan a condiciones de prueba uniformes. Cada distribución es un compuesto de (i), la distribución del número de fracturas intersectadas por perforaciones en los intervalos entre empacadores, y (ii) la distribución de las aberturas de las fracturas.

Los números están distribuidos aproximadamente por Poisson en una roca estructuralmente uniforme, por lo que el número de discontinuidades por unidad de longitud (λ), la media y la varianza de la frecuencia de fractura, se puede estimar a partir de la frecuencia de intersección de fracturas sin conducción de agua, que es la frecuencia observada de cero descargas.

Una vez que se conoce λ , la apertura media y la desviación estándar de las aberturas de placas paralelas equivalentes se pueden calcular a partir de los parámetros de la distribución de descarga.

Las aberturas, medidas en afloramientos mediante la fotografía de fracturas tratadas con un penetrante de tinte fluorescente, se distribuyen de forma logarítmica normal. Si la forma logarítmica normal también prevalece en rocas no perturbadas, entonces la desviación media y estándar calculada a partir de pruebas de agua también puede revelar tamaños de fractura a cualquier profundidad especificada en un cuerpo de roca.

En su análisis, Snow (1970) propone una ecuación que relaciona valores de permeabilidad como una función de la profundidad:

$$\log k = -8,9 - 1,671 \log z$$

A continuación, se presentan otras ecuaciones que permiten correlacionar la profundidad con la conductividad hidráulica.

Louis (1974)

La ecuación planteada es la siguiente (Louis, 1974):

$$K = K_0 \exp(-ad)$$

donde:

K : Conductividad hidráulica [m/s]

K_0 : Conductividad hidráulica del terreno [m/s]

d : Profundidad [m]

a : Coeficiente empírico

Para ser usada en rocas ígneas y metamórficas.

Carlsson y Olson (1977)

La ecuación planteada es la siguiente (Carlsson & Olsson, 1977):

$$K = 10^{-(1,6Logz+4)}$$

donde:

K : Conductividad hidráulica [m/s]

z : Profundidad [m]

Burgress (1977)

La ecuación propuesta es la siguiente (Burgress, 1977):

$$\log K = -5,57 + 0,352 \log z - 0,978(\log z)^2 + 0,167(\log z)^3$$

donde:

K : Conductividad hidráulica [m/s]

z : Profundidad [m]

Piscopo et al. (2018)

Investigaciones más recientes, proponen que la ecuación que relaciona la profundidad con la permeabilidad es la siguiente (Piscopo et al., 2018):

$$K = K_0 \exp(-\beta d)$$

donde:

K : Conductividad hidráulica [m/s]

K_0 : Conductividad hidráulica cerca de la superficie del terreno [m/s]

d : Profundidad [m]

β : Coeficiente empírico

Chen et al. (2018)

Otro reciente estudio, ha determinado que la relación entre la profundidad y la permeabilidad de un macizo rocoso es la siguiente (Chen et al., 2018):

$$K = 2 \times 10^{-6} d^{-0,48}$$

donde:

K : Conductividad hidráulica [m/s]

d : Profundidad [m]

2.3. Características geomecánicas que se correlacionan con la permeabilidad.

2.3.1. Rock Quality Designation, RQD

En la actualidad, las dos clasificaciones geomecánicas más utilizadas son: la Clasificación Geomecánica o RMR de Bieniawski (1979), y el sistema Q de Barton, Lien y Lunde (Barton et al., 1974). Estas clasificaciones fueron creadas originalmente para excavaciones subterráneas, particularmente túneles, aunque el RMR se ha extendido después a otras aplicaciones, como minería subterránea metálica y de carbón (Laubscher, 1977 y 1984; Cummings et al. 1982; Kendorski et al. 1983, Unal 1983 y 1986), estabilidad de taludes (Romana, 1985) y arranque de rocas (Weaver 1975, Smith 1987 y Singh et al. 1986).

El parámetro RQD, planteado por Deere et al. (1967), se obtiene a partir del porcentaje de fragmentos de testigo mayores que 10 cm recuperados en un sondeo, tal y como se muestra en la Figura 3 y permite estimar el grado de fracturación del macizo rocoso.

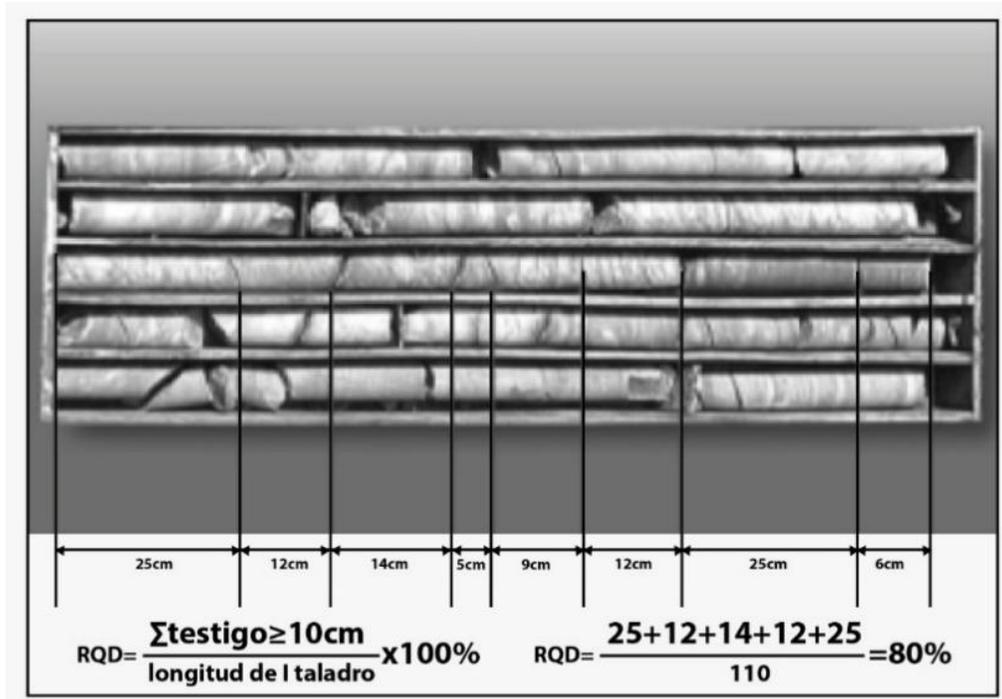


FIGURA 3.- ESTIMACIÓN DE RQD A PARTIR DE TESTIGOS DE SONDEO (RAMÍREZ & ALEJANO, 2004).

La incertidumbre del valor de RQD no solo depende de la fracturación del macizo rocoso sino también de otros factores, como la técnica del sondeo, dirección, diámetro, etc. En casos de no disponer de sondeos, el valor de RQD se estima a partir de datos tomados en afloramientos con base en la relación de Palmstrom & Broch (2006), aunque su precisión no es superior a la que puede proporcionar una mera estimación visual (Bieniawski, 1979). Esta relación es la siguiente:

$$RQD = 110 - 2,5J_v$$

Donde J_v es el índice volumétrico de juntas o número de juntas por metro cúbico.

Los valores de RQD determinados para el área de estudio, serán utilizados en el siguiente apartado para calcular valores estimados de permeabilidad, según los métodos empíricos descritos en párrafos anteriores.

2.3.2. Presencia de agua

En un macizo rocoso diaclasado, el agua tiene mucha influencia en su comportamiento, debiendo estimarse el flujo de agua en litros/min cada 10 m de túnel.

La descripción utilizada en la clasificación *Rock Mass Rating* RMR desarrollada por Bieniawski (1979) es la siguiente: seco, ligeramente húmedo, húmedo, goteando, fluyendo.

A continuación, en la Tabla 2 se muestran los valores de caudal que se usan para determinar el estado de presencia de agua, según el caso:

TABLA 2.- CLASIFICACIÓN DE PRESENCIA DE AGUA EN MACIZO ROCOSO SEGÚN BIENIAWSKI (1979).

| Caudal en 10 m de túnel | Estado |
|--------------------------------|--------------------|
| Nulo | Seco |
| < 10 [l/min] | Ligeramente húmedo |
| 10 – 25 [l/min] | Húmedo |
| 25 – 125 [l/min] | Goteando |
| > 125 [l/min] | Fluyendo |

2.5. Determinación empírica de caudales infiltrados en un túnel

La evaluación adecuada de la filtración de agua en los túneles excavados debajo del nivel freático dentro de un macizo rocoso es esencial para diseñar túneles, sistemas de drenaje y reducción del riesgo de rotura de rocas en dichos túneles. La filtración disminuye la estabilidad de un macizo rocoso alrededor de un túnel, lo que agrega presión sobre los sistemas de apoyo permanente y disminución de la tasa de excavación.

La importancia de las filtraciones en excavaciones subterráneas ha propiciado múltiples estudios analíticos enfocados en predecir las tasas de flujo hacia estos espacios subterráneos; sin embargo, comparando los diversos estudios es difícil ya que cada uno se basa en notaciones

diferentes, condiciones de contorno, niveles de perturbación del suelo alrededor de los sitios de excavación y posibles soluciones. No obstante, todas estas formulaciones analíticas se basan en la ecuación de Laplace, según El Tani (1999), bajo una condición de estado estacionario 2D asumiendo diferentes condiciones de contorno para la superficie del terreno y la circunferencia del túnel (Figura 4).

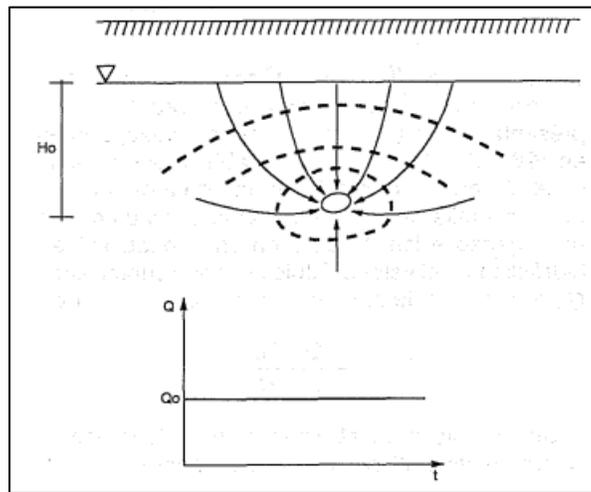


FIGURA 4.- RED DE FLUJO EN SECCIÓN GENERADA EN EL ENTORNO DE UN TÚNEL (ESCALANTE, 1992).

Las ecuaciones empíricas para la estimación del caudal de infiltración en túneles son llamados métodos analíticos, según Farhadian & Katibeh (2015), a partir de parámetros como la permeabilidad del macizo rocoso, nivel freático, radio del túnel, etc. En estas ecuaciones H , representa la distancia entre el centro del túnel y nivel freático, R , el radio del túnel, k , el coeficiente de permeabilidad del medio rocoso, Q , caudal de infiltración (Figura 5).

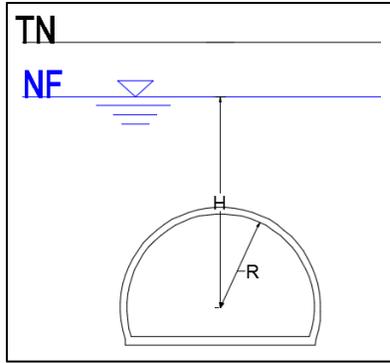


FIGURA 5.- MODELO UTILIZADO PARA LAS FÓRMULAS DE OBTENCIÓN DE CAUDAL EN UN TÚNEL MEDIANTE LA PERMEABILIDAD (EL TANI, 1999).

A continuación, se muestran las ecuaciones basadas en el método analítico:

El Tani (1999)

$$Q = 2\pi kH \frac{1 - 3\left(\frac{R}{2H}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{R}{2H}\right)^2\right] \ln \frac{2H}{R} - \left(\frac{R}{2H}\right)^2}$$

Para el análisis, la permeabilidad se calculó de acuerdo con una aproximada y útil expresión propuesta por Celestino (2005), ampliando para túneles revestidos, una solución anterior presentada por El Tani (1999) para túneles sin revestimiento (Figura 5).

Las variables de la fórmula anterior son:

- k : Conductividad de un macizo rocoso homogéneo e isotrópico (m/s).
- H : Altura del nivel freático sobre el eje (m).
- R : Radio del túnel (m).

Goodman et al. (1965)

$$Q = 2\pi k \frac{H}{\ln\left(\frac{2H}{R}\right)}$$

Otro método de análisis teórico es el presentado por Goodman y otros investigadores, fue planteada en 1965 (Su et al., 2017), donde se establece que para un túnel de radio R , el cual actúa como un dren de red de flujo similar al de la figura 5, se asume que es un medio homogéneo e isotrópico, que la superficie piezométrica tiene forma parabólica y que el flujo es horizontal, siendo (Richard E. Goodman et al., 1965):

donde

k : Conductividad de un macizo rocoso homogéneo e isotrópico (m/s).

H : Altura del nivel freático sobre el eje (m).

R : Radio del túnel (m).

Para el uso de esta ecuación, se asume un flujo en estado estacionario a lo largo de la longitud del túnel en formaciones saturadas, homogéneas e isotrópicas. Aplicable a túneles profundos donde la longitud del túnel es similar a su diámetro.

Karlsruud (2001)

Se asume un medio homogéneo con permeabilidad constante en todas las direcciones (Karlsruud, 2001).

$$Q = 2\pi k \frac{H}{\ln\left(\frac{2H}{R} - 1\right)}$$

donde

k : Conductividad de un macizo rocoso homogéneo e isotrópico (m/s).

H : Altura del nivel freático sobre el eje (m).

R : Radio del túnel (m).

Lombardi (2002)

En la ecuación de Lombardi (2002) se presenta la corrección de la fórmula presentada por Karsrud (2001). El cual indica que, según observaciones en campo, se editó las fórmulas de Goodman et al. (1965) y Heuer (1995) con respecto a la reducción del error en profundidad y en túneles poco profundos.

$$Q = 2\pi kH \frac{1}{\left[1 + 0,4 \left(\frac{R}{H}\right)^2\right] \ln\left(\frac{2H}{R}\right)}$$

donde

k : Coeficiente de permeabilidad (m/s).

H : Altura del nivel freático sobre el eje (m).

R : Radio del túnel (m).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos, se utilizó una metodología sistemática basada en las siguientes fases:

- Recopilación de información y análisis de datos
- Cálculo de permeabilidad a partir de ecuaciones empíricas
- Cálculo de caudales infiltrados a partir de ecuaciones empíricas
- Trabajos de campo
- Validación de resultados

3.1. Recopilación de información y análisis de datos

Se solicitó al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guayaquil, la autorización para acceder a los resultados de los “Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos del Proyecto Vial Túneles de los Cerros “El Carmen” y “Santa Ana” de la ciudad de Guayaquil” del año 1998 (GADM Guayaquil, 1998), lo cual sirvió como fuente de consulta de información relevante para el presente trabajo.

La información encontrada en los estudios previamente citados incluyó: perfiles geológicos de cada uno de los cerros, clasificación geomecánica del macizo rocoso, sección transversal y longitudinal de los túneles, método de construcción, especificaciones técnicas, entre otros datos de interés.

Además, se realizó una investigación bibliográfica relacionada con ecuaciones empíricas para el cálculo de permeabilidad (Burgress, 1977; Carlsson & Olsson, 1977; El-Naqa, 2001; X.-W. Jiang et al., 2009; X. W. Jiang et al., 2009; Louis, 1974; Piscopo et al., 2018; Qureshi et al.,

2014; Snow, 1970) y de caudales infiltrados (El Tani, 1999; R. E. Goodman et al., 1965; Karlsrud, 2001; Lombardi, 2002).

3.1.1. Descripción del área de estudio

Los túneles objeto de este estudio se encuentran localizados en la ciudad de Guayaquil, situada a 4 m sobre el nivel del mar. La ciudad tiene una topografía plana con pendientes que varían entre 1 y 2 por ciento. Está bordeada por zonas altas y laderas con pendientes moderadas e incluso fuertes, pero de poca altura. El área física del proyecto está delimitada hacia el Norte unos 400 m arriba de la intersección entre la Avenida Menéndez Gilbert y la Avenida Carlos Plaza Dañín, hacia el Sur por el trazado de la Calle Juan Montalvo, al Oeste por la cima del Cerro del Carmen y al Este por el Río Guayas (Figura 6) (GADM Guayaquil, 1998).



a) Salida del Túnel Santa Ana.



b) Ingreso del Túnel El Carmen.

FIGURA 6.- FOTOGRAFÍAS DEL INGRESO Y SALIDA DEL TÚNEL NO. 1 CERRO DEL CARMEN Y TÚNEL NO. 2 CERRO SANTA ANA. OBTENIDAS DE GOOGLE MAPS.

De los “Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos del Proyecto Vial Túneles de los Cerros “El Carmen” y “Santa Ana” de la ciudad de Guayaquil” (GADM Guayaquil, 1998) se obtuvo toda la información detallada en este apartado. Es importante recalcar que el objetivo del

trabajo de titulación es de utilizar los Túneles El Carmen y Santa Ana como sitio test para validar y analizar diferentes metodologías y formulaciones empíricas y analíticas.

El Túnel 1 se encuentra localizado en el Cerro del Carmen, el eje principal es de Norte-Sur del proyecto, el cual permite el ingreso de la Calle Boyacá y de esa manera al centro de la ciudad de Guayaquil.

El Túnel 2 está localizado en el Cerro Santa Ana, el eje principal es de Sur-Norte del proyecto, el cual tiene su origen en la Calle Malecón Simón Bolívar, al pie del Cerro Santa Ana y del río Guayas, llegando a la Urbanización Puerto Santa Ana, un complejo inmobiliario y turístico de Guayaquil.

Las cimas de los Cerros alcanzan las cotas de 101,50 m.s.n.m y de 86,65 m.s.n.m para el Cerro del Carmen al oeste y el Cerro Santa Ana al este, respectivamente. El paso comprendido entre las dos cimas tiene una cota de 41,60 m.s.n.m.

El esquema geotécnico del subsuelo de los Cerros se representó por un núcleo, conformado por la formación Cayo (miembro Guayaquil) más o menos integral, cubierto por suelos coluviales y porciones de la misma formación Cayo que a su vez se encuentran degradadas por meteorización, es decir materiales con características pobres y hasta muy pobres.

La formación Guayaquil se la consideró como un complejo único, constituido por lutitas y areniscas asociadas en diferente proporción, en el que las distinciones de interés geotécnico están principalmente correlacionadas con el grado de alteración meteórica de los componentes primarios y con el grado de subdivisión por discontinuidades de origen tectónico o estratigráfico. A partir de estas consideraciones, se establecieron 4 tipos de calidad de los macizos rocosos, cuyas características se sintetizan a continuación (GADM Guayaquil, 1998):

- **Clase 1-2**

Constituida por areniscas calcáreas, con granulometría de media a fina, y lutitas calcáreas y/o silíceas, con grado de meteorización ausente o ligero (M1 - M2), con separación de las juntas amplia o muy amplia.

- **Clase 3**

Constituida por lutitas calcáreas y/o silíceas y areniscas calcáreas, con grado de meteorización de ligero a medio (M2-M3), con separación de las juntas de estrecha a muy estrecha. La porción de roca comprendida entre las juntas puede ser en parte degradada.

- **Clase 4**

Constituida por lutitas y areniscas con grado de meteorización de medio a alto (M3-M4), con separación de las juntas de muy estrecha a estrecha. La porción rocosa comprendida entre las juntas puede ser en parte degradada.

- **Clase 5**

Lutitas y areniscas en parte descompuestas, con grado de alteración de completo a alto (M4-M5), con separación de las juntas muy estrecha; comportamiento de roca suave a suelo débilmente cohesivo.

La meteorización del macizo rocoso se estimó mediante la clasificación ISRM, la cual se basa en la decoloración de la roca y su descomposición. Se utilizó la siguiente tabla simplificada (GADM Guayaquil, 1998):

TABLA 3.- CLASIFICACIÓN DE METEORIZACIÓN (ISRM) (GADM GUAYAQUIL, 1998).

| No. | Grado | Nomenclatura | Descripción |
|-----|----------|--------------|---|
| M1 | Ausente | F | No visible signo de descomposición o descoloración. Anillos bajo el impacto del martillo. Roca sana. |
| M2 | Ligera | WS | Presenta ligera descoloración de manera interna en las fracturas abiertas, y otras partes se encuentra como el grado (F). |
| M3 | Mediana | WM | Descoloración a lo largo de los minerales descompuestos más frágiles. Resistencia un poco menor de la roca fresca. Textura intacta. |
| M4 | Alta | WH | La mayoría de los minerales se encuentran un poco descompuestos. Las muestras pueden romperse a mano con esfuerzo. |
| M5 | Completa | WC | Los minerales son descompuestos hasta llegar a ser tierra suelta. Las muestras fácilmente se desintegran y pueden ser penetradas. |

El núcleo del Cerro del Carmen esta mayormente constituido del material clase 1-2 siendo una arenisca de color gris verdoso en la superficie, café grisáceo o amarillento (alteradas) de grano fino a grueso, calcárea, parcialmente brechosa con tamaños de granos de hasta 2 cm, en capas decimétricas a métricas masivas. La arenisca se encuentra intercalada con lutita silicificada de color gris, calcárea, finamente estratificada. De ahí, en sus costados (izquierdo y derecho, yendo de adentro hacia afuera del núcleo del túnel) se encuentra formado por material de clase 3 que es una lutita, de color gris a gris verdoso (fresca), blanco amarillento o rojizo (alterada), calcáreas, silicificadas, finamente estratificadas, con lentes y niveles (que se encuentra esporádicamente) de chert; con arenisca, de color gris verdoso (frescas) café grisáceo o amarillento (alteradas), de grano fino a grueso, calcárea, parcialmente brechosa con tamaños de granos hasta 2 cm. Hasta el exterior del túnel (del lado izquierdo y derecho, en los extremos del túnel) se encuentra material de clase 4 compuesto de lutita, como el antes descrito, con intercalaciones de arenisca de color gris o gris verdoso (frescas), café grisáceo o amarillento (alteradas), calcáreas, de grano fino a medio, en capas desde centimétricas hasta métricas. Con una superficie formada por material clase 5, se

encuentra primero un depósito coluvial integrado por arcilla arenosa con pocas gravas con lutita silicificada, alterados, con tamaños de 0,5 a 6 cm. Segundo, un relleno compuesto por grava con fragmentos de chert, lutita silícea y arenisca con pocos finos de arena arcillosa (Figura 7).

NOTAS

- CLASIFICACION CONVENCIONAL DEL MACIZO ROCOSO (Bieniowski,1989)

| CLASE | RMR BASICO | RMR (TUNEL) | |
|-------|---------------------|-------------|----|
| | | N | S |
| 1 | 2 | 79 | 82 |
| 2 | 79 | 82 | 66 |
| 3 | 46 | 63 | 33 |
| 4 | 31 | 18 | 10 |
| 5 | (asimilado a suelo) | | |

Limite de la clase convencional de la roca
 Elevacion maxima y minima medida del nivel del agua

LITOLOGIA

- DEPOSITOS DE COBERTURA
 Deposito coluvial (col); constituido por arcilla arenosa con pocas gravas. La fraccion gruesa, esta representada por fragmentos pegados de lutita silicificada, alterados, con tamaños de 10" a 1 m.

Bellano (rel); constituido por grava, representada por fragmentos angulosos de chert, lutita silicea y arenisca, con pocos finos de arena arcillosa.

- FORMACION CAJO (MEMBRO GUAYAQUIL)
 Secuencia alterante de lutitas y areniscas; en la cual se han delimitado tres unidades litológicas.

Lutita con intercalaciones de arenisca (lut. + ar); constituida de lutitas de color gris a gris verduoso (fresca), blanco amarillento o rojo (alterada), calcareas, silicificadas, finamente estratificadas o laminadas; mas o menos esporadicamente se encuentran arenas y niveles de chert.
 Las intercalaciones de arenisca sin de color gris o gris verduoso (frescas), cafe grisaceo o amarillento (alteradas) calcareas de grado fino a medio, en capas decimetricas hasta metricas.

Lutita y arenisca (lut. y ar); Lutitas, como para la unidad precedente (lut. + ar) y areniscas, como para la unidad siguiente (ar. + lut.), alteradas en proporcion comparable.

Arenisca con intercalaciones de lutita (ar. + lut.); Areniscas de color gris verduoso (frescas) cafe grisaceo o amarillento (alteradas), de grado fino a grueso, calcareas, parcialmente pegadas con tabanos de granulos de hasta 2 cm, en capas decimetricas a metricas masivas. La lutita silicificada es de color gris, calcarea, finamente estratificada.

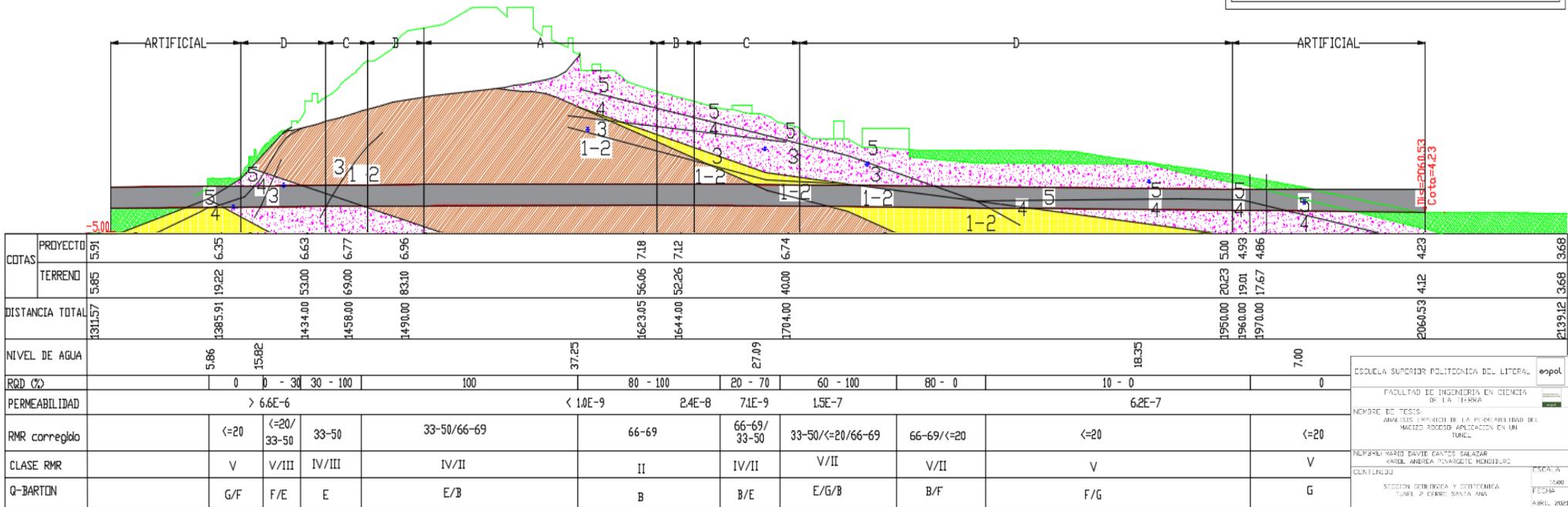


FIGURA 7.- PERFIL GEOLÓGICO DEL MACIZO ROCOSO Y DISTRIBUCIÓN DE SECCIÓN TIPO EN TÚNEL CERRO DEL CARMEN (GADM GUAYAQUIL, 1998).

ESUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIA DE LA TIERRA

MEMBRE DE TESIS: ANALISIS EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO: APLICACION EN UN TUNEL

MEMBRE MAESTRO DAVIE GAYOS SALAZAR
 KAROL AMERICA TORRIGATE MENDOZA

CONTENIDO: SECCION GEOLÓGICA Y DISTRIBUCION DE SECCION TIPO EN TUNEL CERRO DEL CARMEN

ESCALA: 1:500
 FECHA: ABRIL 2009

El Cerro Santa Ana está constituido principalmente de material clase 3 de lutita, de color gris a gris verdoso (fresca), blanco amarillento o rojizo (alterada), calcáreas, silicificadas, finamente estratificadas, con lentes y niveles (que se encuentra esporádicamente) de chert; con arenisca, de color gris verdoso (frescas) café grisáceo o amarillento (alteradas), de grano fino a grueso, calcárea, parcialmente brechosa con tamaños de granos hasta 2 cm. De ahí, continuando de la parte interna a la externa del macizo, se encuentra el material de clase 4 compuesto de lutita, como el ante descrito, con intercalaciones de arenisca de color gris o gris verdoso (frescas), café grisáceo o amarillento (alteradas), calcáreas, de grano fino a medio, en capas desde centimétricas hasta métricas. Con una superficie formada por material clase 5, se encuentra primero un depósito coluvial integrado por arcilla arenosa con pocas gravas con lutita silicificada, alterados, con tamaños de 0,5 a 6 cm. Segundo, un relleno compuesto por grava con fragmentos de chert, lutita silícea y arenisca con pocos finos de arena arcillosa, así como se muestra en la Figura 8.

NOTAS

- CLASIFICACION CONVENCIONAL DEL MACIZO ROCOSO (Bierniowski,1989)

| CLASE | RMR BASICO | | RMR (TUNEL) | |
|-------|------------|----|-------------|----|
| | N | S | N | S |
| 1 | 2 | 79 | 82 | 68 |
| 2 | 3 | 46 | 63 | 33 |
| 3 | 4 | 31 | 18 | 25 |
| 4 | 5 | | | 10 |

4/3 Limite de la clase convencional de la roca

Elevacion maxima y minima medida del nivel del agua

LITOLOGIA

- DEPOSITOS DE COBERTURA

Deposito coluvial (cd); constituido por arena arenosa con pocos gravas. La fraccion gruesa esta representada por fragmentos angulosos de lutita silicificada, alternados, con tendos de 0.5 a 6 cm.

Belleno (rel); constituido por grava representada por fragmentos angulosos de tierra, lutita silicificada y arenisca, con pocos finos de arena arcillosa.

- FORMACION CAYO (MEMBRO GUAYAQUIL)

Secuencia alternante de lutitas y areniscas; en la cual se han delimitado tres unidades litologicas.

Lutita con intercalaciones de arenisca (lut. + ar.); constituida de lutitas de color gris a gris verdoso (fresca), blanco amarillento o fujizo (alterada), calcareas silicificadas, finemente estratificadas o laminares; raras o raras, esporadicamente se encuentran lentas y niveles de chert.

Lutitas con intercalaciones de arenisca sin de color gris o gris verdoso (frescas), caren o grisáceo o amarillento (alteradas); calcareas de grano fino a medio, en capas centimetricas hasta metricas.

Lutita y arenisca (lut. y ar.); Lutitas como para la unidad precedente (lut. + ar.) y areniscas como para la unidad siguiente (ar. + lut.), alternadas en proporcion comparada.

Arenisca con intercalaciones de lutita (ar. + lut.); Areniscas de color gris verdoso (frescas) caren o amarillento (alteradas) de grano fino a grueso; calcareas, parcialmente precipitadas con tabanos de arenas de hasta 2 cm, en capas decimetricas a metricas masivas. La lutita silicificada es de color gris, calcarea, finemente estratificada.

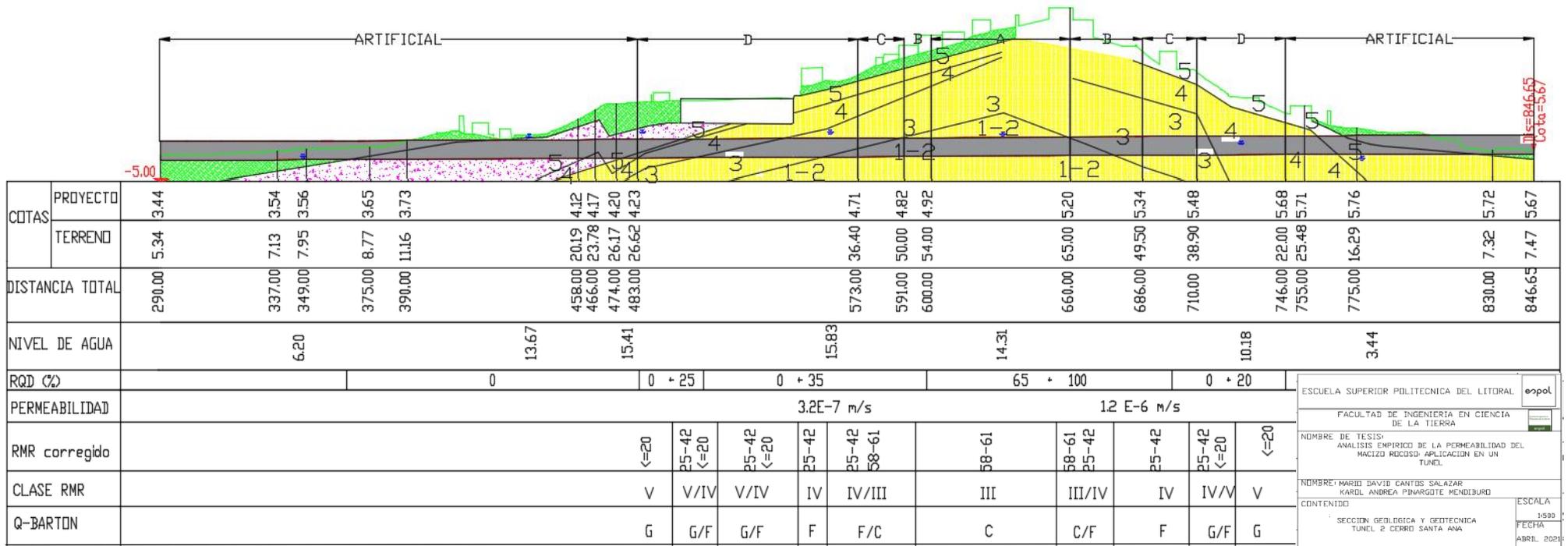


FIGURA 8.- PERFIL GEOLÓGICO DEL MACIZO ROCOSO Y DISTRIBUCIÓN DE SECCIÓN TIPO EN TÚNEL CERRO SANTA ANA (GADM GUAYAQUIL, 1998).

Las características físico - mecánicas, a nivel del macizo rocoso, están determinadas por las características de los materiales rocosos intactos, por la geometría y por las características de las discontinuidades y de las superficies de mínima resistencia que interceptan la masa rocosa.

Para las características de los macizos rocosos (clases 1-2, 3 y 4) en sus aspectos de interés técnico se tomó como referencia la clasificación RMR (Bieniawski, 1989). En la Tabla 4 se encuentra el resumen de los datos por cada clase (GADM Guayaquil, 1998):

TABLA 4.- CLASIFICACIÓN DEL RMR SEGÚN LAS CLASES DEL TIPO DE MACIZO ROCOSO DE LOS TÚNELES CERRO EL CARMEN Y SANTA ANA (GADM GUAYAQUIL, 1998).

| Clase | RQD | RMR |
|--------------|------------|------------|
| 1-2 | 100 | 82 |
| | 76 | 79 |
| 3 | 75 | 63 |
| | 26 | 46 |
| 4 | 25 | 31 |
| | 1 | 31 |
| 5 | | |

La construcción de los túneles en los Cerros se constituyó en dos modalidades: natural y artificial (Tabla 5). Por los problemas técnicos que se presentaron para los tramos centrales, que afectó al núcleo profundo de los Cerros, son los que normalmente se presentan para túneles de gran sección en roca, debajo de coberturas modestas, los cuales fueron realizados con las secciones de túneles naturales.

La construcción de los tramos iniciales y finales se ven afectados principalmente por terrenos de cobertura pequeñas con características pobres y donde se manifiestan fuertemente los

acondicionamientos creados por la nueva estructura vial en el tejido urbano existente, presenta problemas complejos y muy diferentes, que obligaron a desarrollar secciones de túneles artificiales únicas para cada tramo.

TABLA 5.- LONGITUD DE LOS TRAMOS ARTIFICIALES Y NATURALES DEL TÚNEL 1 Y 2 (GADM GUAYAQUIL, 1998).

| Túnel | Tunel No. 1 | | Tunel No. 2 | |
|--------------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| | Longitud | % | Longitud | % |
| Natural | 564 | 78% | 263,3 | 49% |
| Artificial | 159 | 22% | 277,7 | 51% |
| Total | 723 | 100% | 541 | 100% |

En el Túnel No. 1, ubicado en el Cerro Del Carmen, se encuentra compuesto de secciones tipo de túnel natural en un 78% del tramo de la longitud total, casi dos tercios las partes de la formación Cayo. Y 22% de túnel artificial.

La mayor longitud de los tramos en artificial recae en la ladera sur de los Cerros, caracterizada por una pendiente más suave. El tramo más largo (278 m aproximadamente) es la de la embocadura sur del Túnel No. 2.

Se determinó que el macizo rocoso del área de estudio está conformado principalmente por lutitas y areniscas. Además, con ello, se escogieron las ecuaciones que permitieron obtener valores de permeabilidad a partir de los datos empíricos calculados anteriormente.

Las secciones tipo del túnel natural se dividen en las siguientes 4 clases, en el Anexo 1 se adjuntó el esquema del diseño de las secciones tipos, a continuación se detalla (GADM Guayaquil, 1998):

- a) “Tipo A” y “Tipo B” utilizados en los tramos donde la cobertera es mayor y contemporáneamente formada por terrenos con discretas o buenas características (clase 1-2).
- b) “Tipo D” empleado en los tramos donde la cobertera del túnel es escasa (menor de 1-2 diámetros, en la mayoría de los tramos se sugirió el uso de inyecciones de llenado y de contacto desde el interior del túnel y en la superficie del terreno), conjuntamente, formada por terrenos con deficientes características, en los que, en la vertical de la excavación, o muy próximo en la superficie, están presentes construcciones.
- c) “Tipo C” en los tramos de transición entre las situaciones de los dos casos precedentes.

Las distribuciones de las secciones en los túneles por el que está compuesto cada sección se presentan en las Tablas 6 (GADM Guayaquil, 1998).

TABLA 6.- LONGITUD DE APLICACIÓN DE LAS SECCIONES TIPO EN CADA TÚNEL (GADM GUAYAQUIL, 1998).

| Sección Tipo | Túnel No. 1 | | Túnel No. 2 | |
|---------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| | Longitud | % | Longitud | % |
| A | 133 | 24% | 60 | 23% |
| B | 53 | 9% | 38,3 | 14% |
| C | 114 | 20% | 39 | 15% |
| D | 264 | 47% | 126 | 48% |
| Total | 564 | 100% | 263,3 | 100% |

La permeabilidad (m/s) estimada por la clase del material fueron la siguiente (GADM Guayaquil, 1998):

Para el túnel 1 que se encuentra en el Cerro Del Carmen, desde el norte al sur (entrada a la salida del túnel) se presenta la Tabla 7:

TABLA 7.- PERMEABILIDAD OBTENIDA DEL ESTUDIO DEL TÚNEL 1 UBICADO EN EL CERRO DEL CARMEN (GADM GUAYAQUIL, 1998).

| Tramo | | | Litología | Permeabilidad (m/s) | Longitud tramo (m) |
|----------------------------|-----------|----------|----------------|---------------------|--------------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 1 | 1+386 | 1+434 | Sección Tipo D | 6,60E-06 | 48 |
| 2 | 1+434 | 1+458 | Sección Tipo C | 6,60E-06 | 24 |
| 3 | 1+458 | 1+490 | Sección Tipo B | 6,60E-06 | 32 |
| 4 | 1+490 | 1+620 | Sección Tipo A | 1,00E-09 | 130 |
| 5 | 1+620 | 1+644 | Sección Tipo B | 2,40E-08 | 24 |
| 6 | 1+644 | 1+704 | Sección Tipo C | 7,10E-09 | 60 |
| 7 | 1+704 | 1+950 | Sección Tipo D | 1,50E-07 | 246 |
| Longitud total (m): | | | | | 564 |

Para el túnel 2 localizado en el Cerro Santa Ana, desde el sur al norte (entrada a la salida del túnel) se presenta en la Tabla 8:

TABLA 8.- PERMEABILIDAD OBTENIDA DEL ESTUDIO DEL TÚNEL 2 UBICADO EN EL CERRO SANTA ANA (GADM GUAYAQUIL, 1998).

| Tramo | | | Litología | Permeabilidad (m/s) | Longitud tramo (m) |
|----------------------------|-----------|----------|----------------|---------------------|--------------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 1 | 0+483 | 0+573 | Sección Tipo D | 3,20E-07 | 90 |
| 2 | 0+573 | 0+591 | Sección Tipo C | 3,20E-07 | 18 |
| 3 | 0+591 | 0+600 | Sección Tipo B | 3,20E-07 | 9 |
| 4 | 0+600 | 0+660 | Sección Tipo A | 1,20E-06 | 60 |
| 5 | 0+660 | 0+686 | Sección Tipo B | 1,20E-06 | 26 |
| 6 | 0+686 | 0+710 | Sección Tipo C | 1,20E-06 | 24 |
| 7 | 0+710 | 0+746 | Sección Tipo D | 1,20E-06 | 36 |
| Longitud total (m): | | | | | 263 |

3.1.2. Información disponible

De la investigación bibliográfica realizada, se obtuvo la siguiente información:

- Perfil geológico del cerro El Carmen.
- Perfil geológico del cerro Santa Ana.
- Valores de permeabilidad obtenidos mediante trabajos de campo (perforaciones).
- Caracterización de los macizos rocosos según el criterio de *rock mass rating*.
- Ecuaciones empíricas de permeabilidad como función de los índices de roca.
- Ecuaciones empíricas de permeabilidad como función de la profundidad.
- Ecuaciones analíticas para estimación de caudales.

3.2. Cálculo de permeabilidad a partir de ecuaciones empíricas

Para el cálculo de permeabilidad a partir de ecuaciones empíricas, se utilizó las que se detallan a continuación en la Tabla 9:

TABLA 9.- ECUACIONES QUE RELACIONAN LA PERMEABILIDAD CON LOS ÍNDICES DE LA ROCA.

| Ecuación | Referencia | Parámetros | Descripción |
|--|----------------|---|---------------------|
| $K_a = 0,01382 - 0,003 \ln RQD$ | Qureshi (2014) | Ka, conductividad hidráulica aparente (cm/s) RQD, rock quality designation (%) | Rocas sedimentarias |
| $K = 5 \times 10^6 e^{-0,1923 \times RMR}$ | El-Naqa (2001) | K, conductividad hidráulica en Lugeon (uL) RMR, rock mass rating | Areniscas |

| Ecuación | Referencia | Parámetros | Descripción |
|--------------------------------------|-----------------------------|--|----------------------|
| $K = 0,4892e^{-(0,0543 \times RQD)}$ | Jiang et al. (2009a, 2009b) | K, conductividad hidráulica (m/s) RQD, rock quality designation (%) | Granitos y cuarcitas |

En el apartado 2.2.2. Relación entre la permeabilidad y los índices del macizo rocoso, se describe con más detalle al respecto.

Es importante señalar que, para propósitos del presente trabajo, no se limitó el uso de las ecuaciones según el tipo de roca para las que fueron desarrolladas, sino que se hizo ejercicios de prueba y error buscando la ecuación que mejor represente el comportamiento de la permeabilidad en la roca de nuestra tesis. Para ello, se correlacionó los resultados obtenidos con estas ecuaciones, la información de permeabilidad que consta en los estudios previamente citados (GADM Guayaquil, 1998) y el cálculo de valores de permeabilidad obtenido mediante un análisis inverso a partir de datos de caudal registrados *in situ*, lo cual se describirá más adelante.

En la Tabla 10 se presentan las ecuaciones que relacionan la permeabilidad con la profundidad del túnel de manera empírica.

TABLA 10.- ECUACIONES QUE RELACIONAN LA PERMEABILIDAD CON LA PROFUNDIDAD.

| Ecuación | Referencia | Parámetros | Descripción |
|------------------------------------|--------------------------|---|-----------------------------|
| $K = K_0 \exp(-ad)$ | Louis (1974) | K, conductividad hidráulica (m/s) K ₀ , conductividad hidráulica del terreno (m/s) d, profundidad (m) a, coeficiente empírico | Rocas ígneas y metamórficas |
| $K = 10^{-(1,6 \text{Log} z + 4)}$ | Carlsson & Olsson (1977) | K, conductividad hidráulica (m/s) z, profundidad (m) | Gneis |

| Ecuación | Referencia | Parámetros | Descripción |
|---|-----------------------|--|--|
| $\log K = -5,57 + 0,352 \log z$ $- 0,978(\log z)^2$ $+ 0,167(\log z)^3$ | Burgess (1977) | K, conductividad hidráulica (m/s) z, profundidad (m) | Rocas metamórficas |
| $K = K_0 \exp(-\beta d)$ | Piscopo et al. (2018) | K, conductividad hidráulica (m/s) K ₀ , conductividad hidráulica cerca de la superficie del terreno (m/s) D, profundidad (m) B, coeficiente empírico | Principalmente para la andesita, segundo para las rocas metamórficas |
| $K = 2 \times 10^{-6} d^{-0,48}$ | Chen et al. (2018) | K, conductividad hidráulica (m/s) d, profundidad (m) | Rocas ígneas y metamórficas |

3.3. Cálculo de caudales infiltrados a partir de ecuaciones empíricas

Para el cálculo de los caudales infiltrados en los túneles Cerro El Carmen y Santa Ana se utilizó la Tabla 11 en el cual se realiza un resumen de las ecuaciones del método analítico. Para más información remitirse al apartado 2.5. Determinación empírica de caudales infiltrados en un túnel.

TABLA 11.- ECUACIONES ANALÍTICAS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL INFILTRADO EN EL TÚNEL.

| Ecuación | Referencia | Parámetros | Descripción |
|--|-------------------|---|---|
| $Q = 2\pi kH \frac{1 - 3\left(\frac{R}{2H}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{R}{2H}\right)^2\right] \ln \frac{2H}{R} - \left(\frac{R}{2H}\right)^2}$ | El Tani (1999) | k, conductividad hidráulica del macizo rocoso homogéneo e isotrópico H, altura del centro del túnel y nivel freático R, radio del túnel | La elevación del nivel del agua es utilizada como <i>datum</i> ; Para acuíferos semi-infinitos isotrópicos y homogéneos drenados por un túnel circular. |

| Ecuación | Referencia | Parámetros | Descripción |
|--|-----------------------|---|--|
| $Q = 2\pi k \frac{H}{\ln\left(\frac{2H}{R}\right)}$ | Goodman et al. (1965) | k, conductividad hidráulica del macizo rocoso homogéneo e isotrópico H, altura del centro del túnel y nivel freático R, radio del túnel | El flujo de entrada se encuentra en estado estacionario a lo largo del túnel; Para formaciones saturadas, homogéneas e isotrópicas; Aplicable a túneles profundos (L ≈ D). |
| $Q = 2\pi k \frac{H}{\ln\left(\frac{2H}{R} - 1\right)}$ | Karlsruud (2001) | k, conductividad hidráulica del macizo rocoso homogéneo e isotrópico H, altura del centro del túnel y nivel freático R, radio del túnel | Para medios homogéneos que tienen una permeabilidad constante en todas las direcciones; El túnel está profundamente incrustado (H/R ≥ 3-4) |
| $Q = 2\pi k H \frac{1}{\left[1 + 0,4\left(\frac{R}{H}\right)^2\right] \ln\left(\frac{2H}{R}\right)}$ | Lombardi (2002) | k, conductividad hidráulica del macizo rocoso homogéneo e isotrópico H, altura del centro del túnel y nivel freático R, radio del túnel | En esta ecuación, el método de Karlsruud ha sido corregido. Para reducir el error en la profundidad y túneles poco profundos (bajo el nivel freático). |

3.4. Trabajos de campo (*Aforos in situ*)

Como parte del proceso de verificación de resultados empíricos, se procedió a coordinar trabajos de campo con el fin de obtener valores de caudales de infiltración *in situ* (Figura 9).



FIGURA 9.- INSPECCIÓN *IN SITU*. TÚNEL CERRO EL CARMEN Y SANTA ANA.

Previamente a los trabajos de campo, se investigó acerca del sistema de drenaje que funciona en ambos túneles y se determinó que dicho sistema funciona de la siguiente manera:

Se han previsto sistemas externos o internos de drenaje. Los primeros para captar y conducir los flujos, de cualquier origen, que escurren por el terreno y evitar el desarrollo de presiones hidrostáticas en el exterior del revestimiento, y los sistemas internos para la captación y desalajo de los drenajes externos y de los escurrimientos que se generen internamente en las calzadas de los túneles, hasta su descarga en los sistemas de alcantarillado pluvial de la ciudad.

De acuerdo a los planos, el revestimiento de los túneles se encuentra externamente protegido de filtraciones por una geo membrana sobre la cual se ubica un manto geotextil cuya función es de captar y conducir las filtraciones hasta un tubo micro fisurado localizado en su parte inferior que va descargando a lo largo de los túneles en colectores ubicados en las aceras que se conectan con los sistemas de alcantarillado pluvial de la ciudad (Figura 10).

Para la captación de los flujos generados en las calzadas, en los bordillos de las aceras se proyectaron sumideros tipo buzón que descargan en los mismos colectores del drenaje externo.

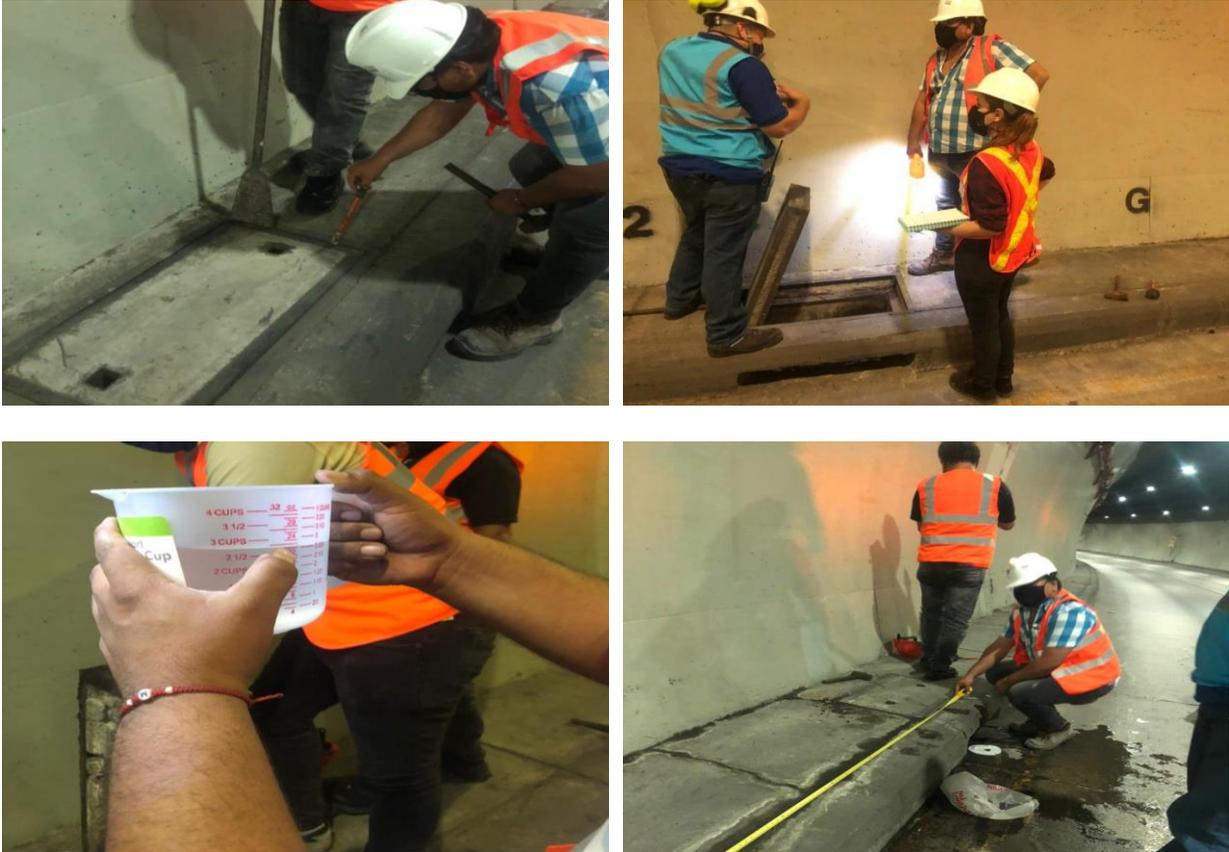


FIGURA 10.- CAPTACIÓN IN SITU DEL CAUDAL OBTENIDO EN SEMANA DE NO LLUVIA. TÚNEL CERRO EL CARMEN Y SANTA ANA.

3.5. Validación de los resultados

Como se mencionó en el apartado 3.2, se realizó un proceso de validación de los resultados de permeabilidad obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas señaladas anteriormente, comparando dichos resultados con los datos de permeabilidad que constan en los resultados del estudio citado previamente (GADM Guayaquil, 1998) y con los valores de permeabilidad teóricos que se pudieron calcular mediante un análisis inverso a partir de valores de caudal que fueron determinados mediante un aforo.

Este análisis inverso consistió en tomar datos de caudales infiltrados en los túneles de los cerros El Carmen y Santa Ana e insertarlos en las ecuaciones de caudal detalladas en el apartado

3.3, dejando como incógnita el valor de la permeabilidad. De este modo, se obtuvo valores de permeabilidad a partir de datos de caudales conocidos. Del mismo modo, se realizó la estimación de los caudales mediante el método analítico (ecuaciones empíricas) y se realizó una comparación con los caudales obtenidos *in situ*.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación empírica de la permeabilidad del macizo rocoso.

4.1.1. Permeabilidad como función de los índices RMR y RQD.

Se realizó un análisis del perfil geológico de los cerros El Carmen y Santa Ana y se determinó los tipos de roca encontrados. Con los rangos de los valores RQD y RMR definidos en la caracterización geológica del área de estudio se aplicaron las ecuaciones empíricas descritas en el literal 2.2.2 de este trabajo, y se obtuvo los resultados presentados a continuación:

Según la metodología Qureshi et al. (2014), los valores de permeabilidad (m/s) en el Túnel El Carmen se presentan en la Tabla 12 y el Túnel Santa Ana en la Tabla 13:

TABLA 12.- PERMEABILIDAD (M/S) EN EL CERRO EL CARMEN, SEGÚN QURESHI ET AL. (2014).

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) (m/s) | METODO EMPIRICO (Qureshi, 2014) (m/s) |
|-------|--------------|----------|----------------|--|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 1 | 1+386 | 1+434 | Sección Tipo D | 6,60E-06 | 8,68E-06 |
| 2 | 1+434 | 1+458 | Sección Tipo C | 6,60E-06 | 4,49E-08 |
| 3 | 1+458 | 1+490 | Sección Tipo B | 6,60E-06 | 4,49E-08 |
| 4 | 1+490 | 1+620 | Sección Tipo A | 1,00E-09 | 4,49E-08 |
| 5 | 1+620 | 1+644 | Sección Tipo B | 2,40E-08 | 4,49E-08 |
| 6 | 1+644 | 1+704 | Sección Tipo C | 7,10E-09 | 4,49E-08 |
| 7 | 1+704 | 1+950 | Sección Tipo D | 1,50E-07 | 4,16E-05 |

TABLA 13.- PERMEABILIDAD (M/S) EN EL CERRO SANTA ANA, SEGÚN QURESHI ET AL. (2014).

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) (m/s) | METODO EMPIRICO (Qureshi, 2014) (m/s) |
|-------|--------------|----------|----------------|--|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 1 | 0+483 | 0+573 | Sección Tipo D | 3,20E-07 | 8,68E-06 |
| 2 | 0+573 | 0+591 | Sección Tipo C | 3,20E-07 | 4,49E-08 |
| 3 | 0+591 | 0+600 | Sección Tipo B | 3,20E-07 | 8,68E-06 |
| 4 | 0+600 | 0+660 | Sección Tipo A | 1,20E-06 | 8,68E-06 |
| 5 | 0+660 | 0+686 | Sección Tipo B | 1,20E-06 | 4,49E-08 |
| 6 | 0+686 | 0+710 | Sección Tipo C | 1,20E-06 | 8,68E-06 |
| 7 | 0+710 | 0+746 | Sección Tipo D | 1,20E-06 | 8,68E-06 |

Se utilizó la ecuación propuesta por El-Naqa (2001), como una función del RMR, y se obtuvo los siguientes resultados del Túnel El Carmen en la Tabla 14 y del Túnel Santa en la Tabla 15:

TABLA 14.- PERMEABILIDAD (M/S) EN EL CERRO EL CARMEN, SEGÚN EL-NAQA (2001).

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) (m/s) | METODO EMPIRICO (El-Naqa, 2001) (m/s) |
|-------|--------------|----------|----------------|--|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 1 | 1+386 | 1+434 | Sección Tipo D | 6,60E-06 | 3,56E-06 |
| 2 | 1+434 | 1+458 | Sección Tipo C | 6,60E-06 | 9,22E-08 |
| 3 | 1+458 | 1+490 | Sección Tipo B | 6,60E-06 | 9,22E-08 |
| 4 | 1+490 | 1+620 | Sección Tipo A | 1,00E-09 | 9,22E-08 |
| 5 | 1+620 | 1+644 | Sección Tipo B | 2,40E-08 | 9,22E-08 |

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) (m/s) | METODO EMPIRICO (El-Naqa, 2001) (m/s) |
|-------|--------------|----------|----------------|--|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 6 | 1+644 | 1+704 | Sección Tipo C | 7,10E-09 | 9,22E-08 |
| 7 | 1+704 | 1+950 | Sección Tipo D | 1,50E-07 | 1,67E-03 |

TABLA 15.- PERMEABILIDAD (M/S) EN EL CERRO SANTA ANA, SEGÚN EL-NAQA (2001).

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) (m/s) | METODO EMPIRICO (El-Naqa, 2001) (m/s) |
|-------|--------------|----------|----------------|--|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 1 | 0+483 | 0+573 | Sección Tipo D | 3,20E-07 | 3,56E-06 |
| 2 | 0+573 | 0+591 | Sección Tipo C | 3,20E-07 | 9,22E-08 |
| 3 | 0+591 | 0+600 | Sección Tipo B | 3,20E-07 | 3,56E-06 |
| 4 | 0+600 | 0+660 | Sección Tipo A | 1,20E-06 | 3,56E-06 |
| 5 | 0+660 | 0+686 | Sección Tipo B | 1,20E-06 | 9,22E-08 |
| 6 | 0+686 | 0+710 | Sección Tipo C | 1,20E-06 | 3,56E-06 |
| 7 | 0+710 | 0+746 | Sección Tipo D | 1,20E-06 | 3,56E-06 |

Se utilizó la ecuación propuesta por Jiang et al. (2009a, 2009b) y se obtuvo los siguientes resultados para el Túnel El Carmen en la Tabla 16 y del Túnel Santa Ana en la Tabla 17:

TABLA 16.- PERMEABILIDAD (M/S) EN EL CERRO EL CARMEN, SEGÚN JIANG ET AL. (2009A, 2009B).

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) (m/s) | METODO EMPIRICO (Jiang et al, 2009) (m/s) |
|-------|--------------|----------|----------------|--|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 1 | 1+386 | 1+434 | Sección Tipo D | 6,60E-06 | 1,08E-09 |
| 2 | 1+434 | 1+458 | Sección Tipo C | 6,60E-06 | 2,79E-10 |
| 3 | 1+458 | 1+490 | Sección Tipo B | 6,60E-06 | 2,79E-10 |
| 4 | 1+490 | 1+620 | Sección Tipo A | 1,00E-09 | 2,79E-10 |
| 5 | 1+620 | 1+644 | Sección Tipo B | 2,40E-08 | 2,79E-10 |
| 6 | 1+644 | 1+704 | Sección Tipo C | 7,10E-09 | 2,79E-10 |
| 7 | 1+704 | 1+950 | Sección Tipo D | 1,50E-07 | 1,64E-08 |

TABLA 17.- PERMEABILIDAD (M/S) EN EL CERRO EL CARMEN, SEGÚN JIANG ET AL.(2009A, 2009B).

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) (m/s) | METODO EMPIRICO (Jiang et al, 2009) (m/s) |
|-------|--------------|----------|----------------|--|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | |
| 1 | 0+483 | 0+573 | Sección Tipo D | 3,20E-07 | 1,08E-09 |
| 2 | 0+573 | 0+591 | Sección Tipo C | 3,20E-07 | 2,79E-10 |
| 3 | 0+591 | 0+600 | Sección Tipo B | 3,20E-07 | 1,08E-09 |
| 4 | 0+600 | 0+660 | Sección Tipo A | 1,20E-06 | 1,08E-09 |
| 5 | 0+660 | 0+686 | Sección Tipo B | 1,20E-06 | 2,79E-10 |
| 6 | 0+686 | 0+710 | Sección Tipo C | 1,20E-06 | 1,08E-09 |
| 7 | 0+710 | 0+746 | Sección Tipo D | 1,20E-06 | 1,08E-09 |

En el trabajo denominado “Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos del Proyecto Vial Túneles de los Cerros “El Carmen” y “Santa Ana” de la ciudad de Guayaquil” (GADM Guayaquil, 1998), se obtuvieron valores de permeabilidad en los distintos tramos de los túneles los cuales han sido comparados con los valores obtenidos con el uso de las ecuaciones empíricas presentadas, observándose que los resultados dados por las ecuaciones de Qureshi et al. (2014) y El-Naqa (2001) son similares entre sí, tal como se muestra en las Figuras 11 y 12.

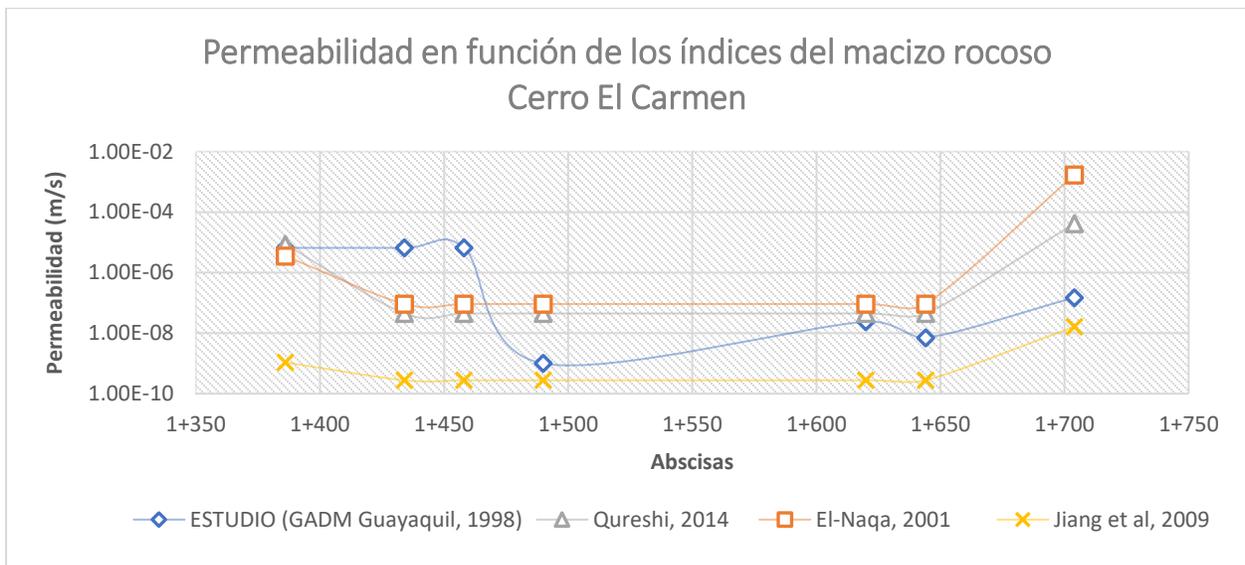


FIGURA 11.- CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ESTUDIO (GADM GUAYAQUIL, 1998) Y LOS MÉTODOS EMPÍRICOS DEL CERRO EL CARMEN.

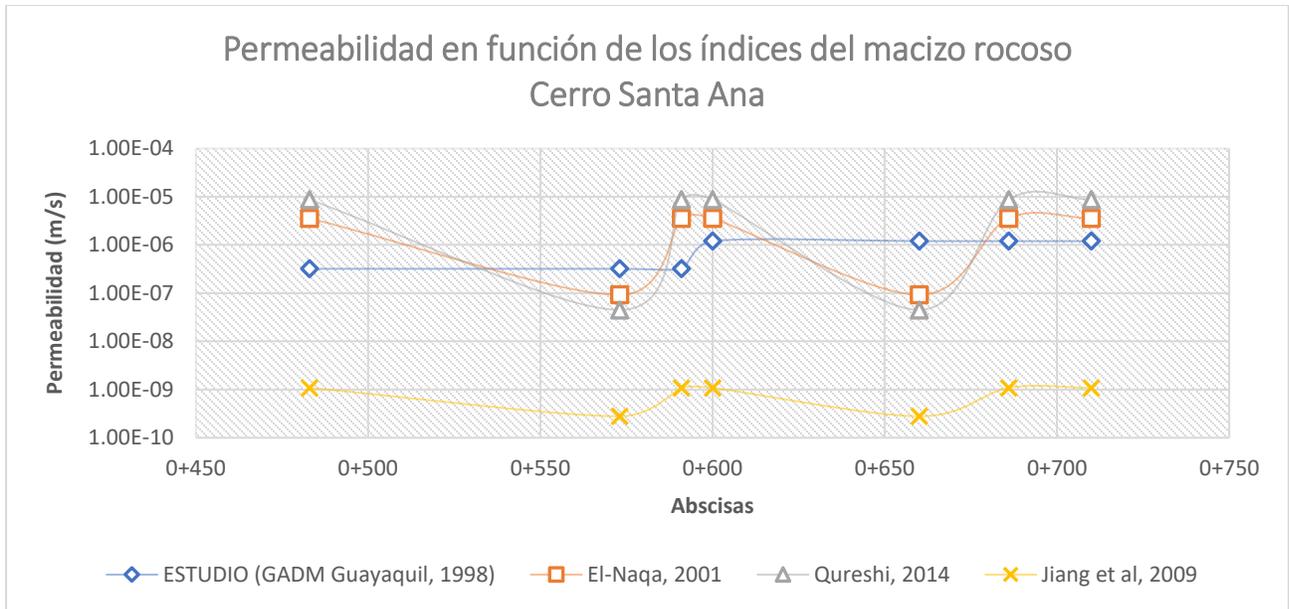


FIGURA 12.- CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ESTUDIO (GADM GUAYAQUIL, 1998) Y LOS MÉTODOS EMPÍRICOS DEL CERRO SANTA ANA.

No obstante, la ecuación de Qureshi et al. (2014) ha sido desarrollada para ser aplicada en rocas sedimentarias las cuales son las encontradas en el sitio de nuestro estudio. Por tanto, se escogieron los resultados de permeabilidad cálculos por el método empírico de Qureshi et al. (2014) para continuar con el cálculo de valores de caudal, en las siguientes etapas de este trabajo.

4.1.1. Permeabilidad como función de la profundidad.

Se determinó, a partir de la topografía que consta en el “Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos del Proyecto Vial Túneles de los Cerros “El Carmen” y “Santa Ana” de la ciudad de Guayaquil” (GADM Guayaquil, 1998), las profundidades según la abscisa del proyecto. Con esta información, se calculó los valores de permeabilidad utilizando las ecuaciones empíricas descritas en el apartado 2.2.3. Los resultados se muestran a continuación:

- Permeabilidad (m/s) en el cerro El Carmen usando ecuaciones que relacionan la profundidad (Tabla 18 y Figura 13).

TABLA 18.- PERMEABILIDAD (M/S) COMO FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD TÚNEL CERRO EL CARMEN.

| Nº | PK Inicio | Profundidad (m) | Permeabilidad (m/s) | | | | |
|----|-----------|-----------------|---------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| | | | Louis (1974) | Carlsson and Olsson (1977) | Burgress (1977) | Piscopo et al. (2018) | Chen et al. (2018) |
| 1 | 1+386 | 20,83 | 7,83E-08 | 7,76E-07 | 3,77E-07 | 6,92E-08 | 4,66E-07 |
| 2 | 1+434 | 34,04 | 7,48E-08 | 3,54E-07 | 1,88E-07 | 6,12E-08 | 3,68E-07 |
| 3 | 1+458 | 69,09 | 6,64E-08 | 1,14E-07 | 6,42E-08 | 4,42E-08 | 2,62E-07 |
| 4 | 1+490 | 83,1 | 6,33E-08 | 8,48E-08 | 4,82E-08 | 3,88E-08 | 2,40E-07 |
| 5 | 1+620 | 56,43 | 6,93E-08 | 1,58E-07 | 8,78E-08 | 4,97E-08 | 2,89E-07 |
| 6 | 1+644 | 51,68 | 7,05E-08 | 1,81E-07 | 1,00E-07 | 5,19E-08 | 3,01E-07 |
| 7 | 1+704 | 41 | 7,31E-08 | 2,63E-07 | 1,43E-07 | 5,74E-08 | 3,36E-07 |

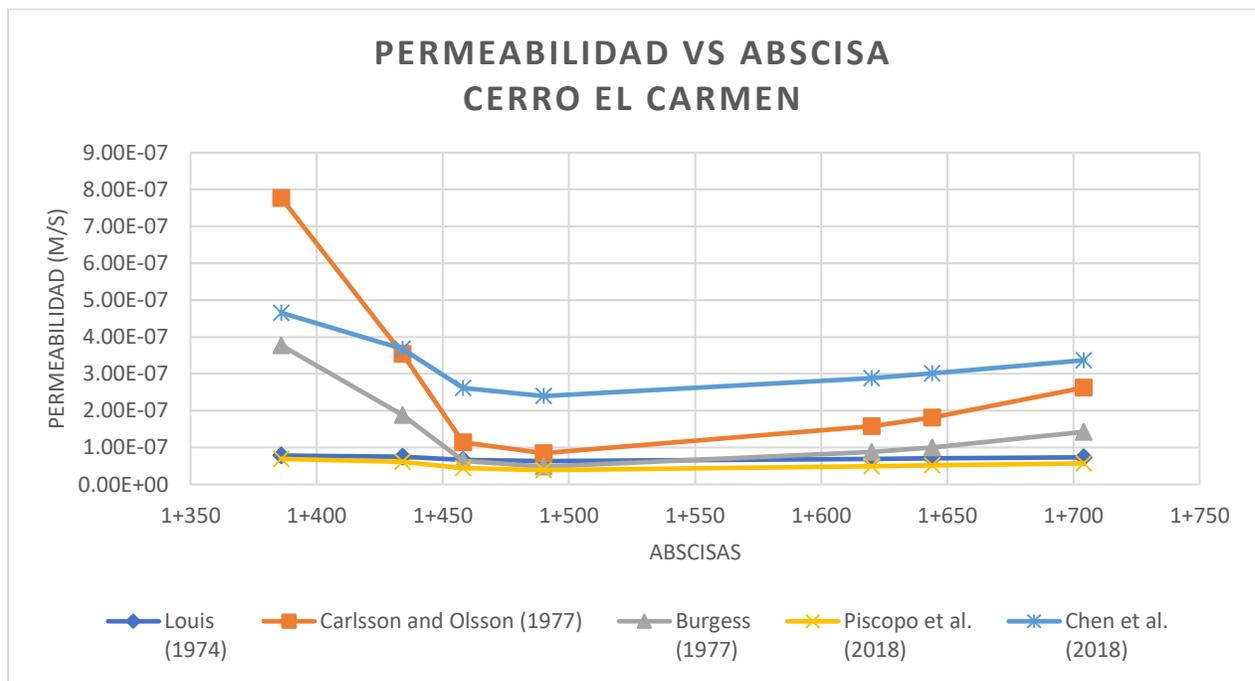


FIGURA 13.- PERMEABILIDAD (M/S) OBTENIDA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD.

Los valores de permeabilidad varían desde $3,88 \times 10^{-8}$ hasta $7,76 \times 10^{-7}$. Se cumple el criterio que la permeabilidad es inversamente proporcional a la profundidad. Los menores valores de permeabilidad se dan a la profundidad de 83,1 m, según todos los autores.

- Permeabilidad (m/s) en el cerro Santa Ana usando ecuaciones que relacionan la profundidad (Tabla 19 y Figura 14).

TABLA 19.- PERMEABILIDAD (M/S) COMO FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD TÚNEL CERRO SANTA ANA.

| Nº | PK Inicio | Profundidad (m) | Permeabilidad (m/s) | | | | |
|----|-----------|-----------------|---------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| | | | Louis (1974) | Carlsson and Olsson (1977) | Burgress (1977) | Piscopo et al. (2018) | Chen et al. (2018) |
| 1 | 0+483 | 26,7 | 7,67E-08 | 5,22E-07 | 2,67E-07 | 6,55E-08 | 4,13E-07 |
| 2 | 0+573 | 37,63 | 7,39E-08 | 3,01E-07 | 1,62E-07 | 5,92E-08 | 3,51E-07 |
| 3 | 0+591 | 44,76 | 7,21E-08 | 2,28E-07 | 1,25E-07 | 5,54E-08 | 3,23E-07 |
| 4 | 0+600 | 47,3 | 7,15E-08 | 2,09E-07 | 1,15E-07 | 5,41E-08 | 3,14E-07 |
| 5 | 0+660 | 48,38 | 7,13E-08 | 2,02E-07 | 1,11E-07 | 5,36E-08 | 3,11E-07 |
| 6 | 0+686 | 42,55 | 7,27E-08 | 2,48E-07 | 1,35E-07 | 5,65E-08 | 3,30E-07 |
| 7 | 0+710 | 39 | 7,36E-08 | 2,85E-07 | 1,54E-07 | 5,84E-08 | 3,45E-07 |

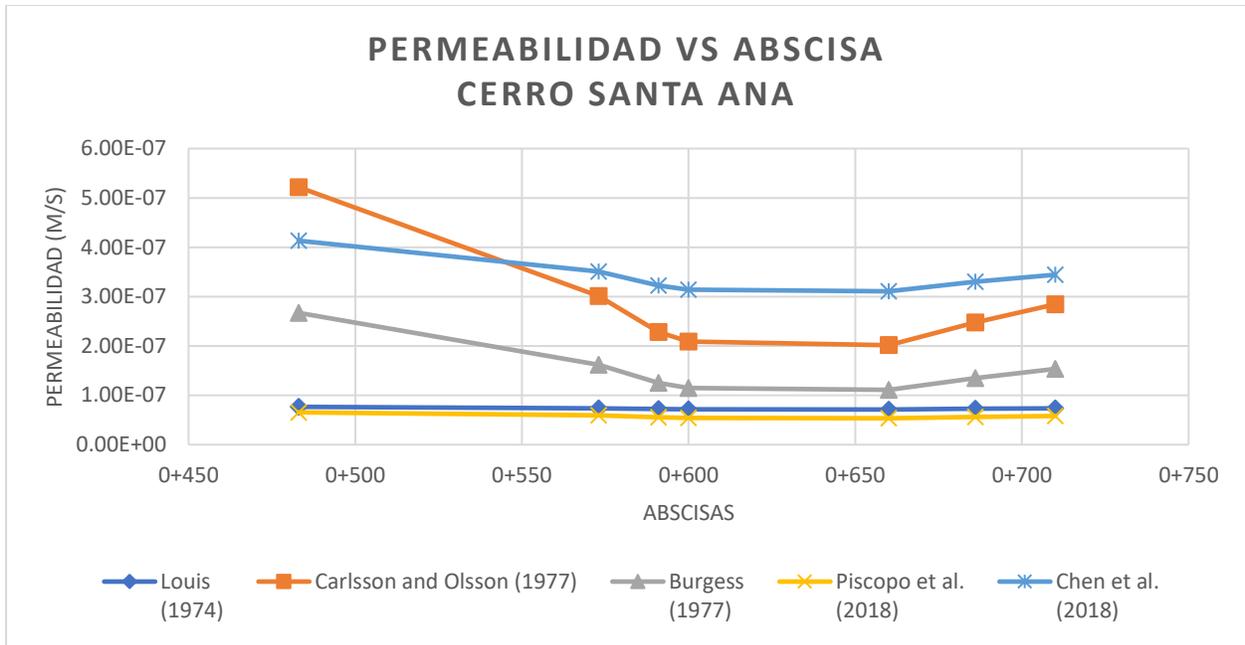


FIGURA 14.- PERMEABILIDAD (M/S) OBTENIDA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD.

4.2. Estimación de los caudales infiltrados

Considerando la alta sismicidad de la zona y las condiciones hidráulicas, todas las secciones tipo, hasta la A y la B que se las utiliza para las mejores condiciones de la roca, son cerradas, con contra bóveda a la base; en la sección tipo A, completamente en roca poco subdividida y fresca, la contra bóveda presenta una flecha muy modesta (GADM Guayaquil, 1998). Se observó que la sección tipo que se construyó en la mayor parte de las longitudes de los túneles naturales fue la D, además de ser la que se encontró con mayor reforzamiento en la parte estructural y en su impermeabilización, por ser utilizada en las zonas donde el macizo rocoso es categorizado en clase 3 y 4. Al calcular los caudales de cada uno de los túneles, se obtuvieron los resultados de la Tabla 20 para el Túnel El Carmen y Tabla 21 para el Túnel Santa Ana:

TABLA 20.- RESULTADOS DE CAUDALES (L/S) UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS TÚNEL EL CARMEN.

| Tramo | | | Litología | Longitud tramo (m) | Radio (m) | k (m/s) | H (m) | Caudales (l/s) | | | |
|----------------------------|-----------|----------|----------------|--------------------|-----------|----------|-------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | | | | Goodman | El Tani | Lombardi | Karlsurd |
| 1 | 1+386 | 1+434 | Sección Tipo D | 48 | 7.52 | 8.68E-06 | 9.34 | 26.87 | 20.93 | 21.34 | 61.94 |
| 2 | 1+434 | 1+458 | Sección Tipo C | 24 | 7.27 | 4.49E-08 | 15 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.09 |
| 3 | 1+458 | 1+490 | Sección Tipo B | 32 | 7 | 4.49E-08 | 20 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.12 |
| 4 | 1+490 | 1+620 | Sección Tipo A | 130 | 7 | 4.49E-08 | 30.01 | 0.51 | 0.50 | 0.50 | 0.54 |
| 5 | 1+620 | 1+644 | Sección Tipo B | 24 | 7 | 4.49E-08 | 25 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.09 |
| 6 | 1+644 | 1+704 | Sección Tipo C | 60 | 7.27 | 4.49E-08 | 20.19 | 0.20 | 0.19 | 0.19 | 0.23 |
| Longitud total (m): | | | | 564 | | | | 27,84 | 21,86 | 22,28 | 63,00 |

TABLA 21.- RESULTADOS DE CAUDALES (L/S) UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS TÚNEL SANTA ANA.

| Tramo | | | Litología | Longitud tramo (m) | Radio (m) | k (m/s) | H (m) | Caudales (l/s) | | | |
|----------------------------|-----------|----------|----------------|--------------------|-----------|----------|-------|----------------|--------------|---------------|--------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | | | | Goodman | El Tani | Lombardi | Karlsurd |
| 1 | 0+483 | 0+573 | Sección Tipo D | 90 | 7,52 | 8,68E-06 | 11,2 | 50,37 | 42,52 | 42,67 | 80,55 |
| 2 | 0+573 | 0+591 | Sección Tipo C | 18 | 7,27 | 4,49E-08 | 9,3 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,11 |
| 3 | 0+591 | 0+600 | Sección Tipo B | 9 | 7 | 8,68E-06 | 9,3 | 4,67 | 3,77 | 3,81 | 9,04 |
| 4 | 0+600 | 0+660 | Sección Tipo A | 60 | 7 | 8,68E-06 | 9,3 | 31,14 | 25,10 | 25,39 | 60,25 |
| 5 | 0+660 | 0+686 | Sección Tipo B | 26 | 7 | 4,49E-08 | 7 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,00 |
| 6 | 0+686 | 0+710 | Sección Tipo C | 24 | 7,27 | 8,68E-06 | 7 | 13,98 | 8,38 | 9,77 | -118,71 |
| 7 | 0+710 | 0+746 | Sección Tipo D | 36 | 7,52 | 8,68E-06 | 4,6 | 44,79 | 15,09 | 21,65 | -6,03 |
| Longitud total (m): | | | | 263 | | | | 145,07 | 94,94 | 103,38 | 25,21 |

4.3. Determinación *in situ* el caudal de infiltración del túnel

Mediante la inspección realizada *in situ* se obtuvieron los siguientes aforos de caudales (Tabla 22) en los sitios marcados adjunto en Anexo 2:

TABLA 22.- VALORES DE CAUDAL (L/S) OBTENIDOS DE INSPECCIÓN *IN SITU* TÚNEL EL CARMEN Y SANTA ANA.

CERRO DEL CARMEN

Lado izquierdo

| Nº | Abscisa túnel | Abscisa estudio | Muestras [ml/s] | | | | Caudal |
|----|---------------|-----------------|-----------------|-------|-------|----------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | Promedio | [l/s] |
| 1 | 0+388 | 1+700 | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 21,25 | 0,0213 |

CERRO SANTA ANA

Lado derecho

| Nº | Abscisa túnel | Abscisa estudio | Muestras [ml/s] | | | | Caudal |
|----|---------------|-----------------|-----------------|--------|--------|----------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | Promedio | [l/s] |
| 1 | 0+150 | 0+440 | 131,82 | 135,00 | 135,00 | 133,94 | 0,1339 |

| Nº | Abscisa túnel | Abscisa estudio | Muestras [ml/s] | | | | Caudal |
|----|---------------|-----------------|-----------------|--------|--------|----------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | Promedio | [l/s] |
| 2 | 0+162 | 0+452 | 110,00 | 115,00 | 115,00 | 113,33 | 0,1133 |

| Nº | Abscisa túnel | Abscisa estudio | Muestras [ml/s] | | | | Caudal |
|----|---------------|-----------------|-----------------|-------|-------|----------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | Promedio | [l/s] |
| 3 | 0+199 | 0+489 | 80,00 | 80,00 | 80,00 | 80,00 | 0,0800 |

| Nº | Abscisa túnel | Abscisa estudio | Muestras [ml/s] | | | | Caudal |
|----|---------------|-----------------|-----------------|-------|-------|----------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | Promedio | [l/s] |
| 5 | 0+303 | 0+593 | 65,00 | 65,00 | 65,00 | 65,00 | 0,0650 |

Lado izquierdo

| Nº | Abscisa túnel | Abscisa estudio | Muestras [ml/s] | | | | Caudal |
|----|---------------|-----------------|-----------------|------|------|----------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | Promedio | [l/s] |
| 4 | 0+191 | 0+481 | 3,33 | 3,33 | 3,33 | 3,33 | 0,0033 |

Con estos resultados, se utilizó las ecuaciones empíricas de caudales descritas en la sección 2.5 y se realizó un análisis inverso, es decir, se determinó permeabilidades a partir de datos de caudal obtenidos en sitio, los cuales se obtuvieron la Tabla 23 para el Túnel El Carmen y Tabla 24 para el Túnel Santa Ana:

TABLA 23.- ANÁLISIS INVERSO PARA DETERMINACIÓN DE LAS PERMEABILIDAD (M/S) EN DIFERENTES MÉTODOS TÚNEL EL CARMEN.

| Tramo | | | Litología | Longitud tramo (m) | Radio (m) | Caudales (l/s) | H (m) | k (m/s) | | | |
|-------|-----------|----------|----------------|--------------------|-----------|----------------|-------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | | | | Goodman (1965) | El Tani (1999) | Lombardi (2002) | Karlsurd (2001) |
| 7 | 1+704 | 1+950 | Sección Tipo D | 246 | 7,52 | 0,0213 | 13 | 1,32E-09 | 1,49E-09 | 1,49E-09 | 9,53E-10 |

Se observó (Tabla 23) que, con el método de El Tani, Lombardi y Goodman se obtenían valores aproximados entre ellos, por lo que se utilizó la ponderación de los tres, por lo que la permeabilidad obtenida en el túnel El Carmen en el tramo No. 7 es de $1,43E^{-09}$ m/s. Cabe indicar que el análisis solo pudo ser realizado en este tramo debido a que fue el único lugar donde se pudo medir el caudal infiltrado. En las inspecciones realizadas no se observaron otros sitios donde poder obtener valores de caudales.

TABLA 24.- ANÁLISIS INVERSO PARA DETERMINACIÓN DE LAS PERMEABILIDAD (M/S) EN DIFERENTES MÉTODOS TÚNEL SANTA ANA.

| Tramo | | | Litología | Longitud tramo (m) | Radio (m) | Caudales (l/s) | H (m) | k (m/s) | | | |
|-------|-----------|----------|----------------|--------------------|-----------|----------------|-------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | | | | Goodman (1965) | El Tani (1999) | Lombardi (2002) | Karlsurd (2001) |
| 1 | 0+483 | 0+573 | Sección Tipo D | 90 | 7,52 | 0,3306 | 11,2 | 5,70E-08 | 6,75E-08 | 6,72E-08 | 3,56E-08 |
| 2 | 0+573 | 0+591 | Sección Tipo C | 18 | 7,27 | 0,065 | 9,3 | 5,81E-08 | 7,34E-08 | 7,22E-08 | 2,74E-08 |

En la Tabla 24 se puede observar que, al igual que en los valores presentados en la tabla anterior, los métodos El Tani y Lombardi dan valores muy parecidos entre ellos. La permeabilidad obtenida, mediante ponderación entre los dos métodos, en el túnel Santa Ana en el tramo No. 1 es de $6,74E^{-08}$ m/s y en el tramo No. 2 es de $7,28E^{-08}$ m/s.

4.4. Comparación de los valores de permeabilidad obtenidos

Al realizar los cálculos, se obtuvieron los siguientes resultados de permeabilidad (m/s), en donde las primeras cantidades son las obtenidas del estudio de factibilidad de los túneles (GADM Guayaquil, 1998), las segundas son las cantidades que se obtuvieron in situ (2021) y las ultimas son las calculadas mediante el método empírico Qureshi (2014) (Tablas 25 y 26):

TABLA 25.- COMPARACIÓN DE LAS PERMEABILIDADES (M/S) OBTENIDAS TÚNEL EL CARMEN.

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) (m/s) | OBTENIDOS <i>IN SITU</i> (m/s) | METODO EMPIRICO (Qureshi, 2014) (m/s) |
|-------|-----------|----------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | | |
| 1 | 1+386 | 1+434 | Sección Tipo D | 6,60E-06 | - | 8,68E-06 |
| 2 | 1+434 | 1+458 | Sección Tipo C | 6,60E-06 | - | 4,49E-08 |
| 3 | 1+458 | 1+490 | Sección Tipo B | 6,60E-06 | - | 4,49E-08 |

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) | OBTENIDOS <i>IN SITU</i> | METODO EMPIRICO (Qureshi, 2014) |
|-------|--------------|----------|----------------|---|-----------------------------|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | (m/s) | (m/s) | (m/s) |
| 4 | 1+490 | 1+620 | Sección Tipo A | 1,00E-09 | - | 4,49E-08 |
| 5 | 1+620 | 1+644 | Sección Tipo B | 2,40E-08 | - | 4,49E-08 |
| 6 | 1+644 | 1+704 | Sección Tipo C | 7,10E-09 | - | 4,49E-08 |
| 7 | 1+704 | 1+950 | Sección Tipo D | 1,50E-07 | 1,49E-09 | 4,16E-05 |

TABLA 26.- COMPARACIÓN DE LAS PERMEABILIDADES (M/S) OBTENIDAS TÚNEL SANTA ANA.

| Tramo | | | Litología | ESTUDIO (GADM Guayaquil, 1998) | OBTENIDOS <i>IN SITU</i> | METODO EMPIRICO (Qureshi, 2014) |
|-------|--------------|-------------|----------------|---|-----------------------------|--|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | (m/s) | (m/s) | (m/s) |
| 1 | 0+483 | 0+573 | Sección Tipo D | 3,20E-07 | 6,74E-08 | 8,68E-06 |
| 2 | 0+573 | 0+591 | Sección Tipo C | 3,20E-07 | 7,28E-08 | 4,49E-08 |
| 3 | 0+591 | 0+600 | Sección Tipo B | 3,20E-07 | - | 8,68E-06 |
| 4 | 0+600 | 0+660 | Sección Tipo A | 1,20E-06 | - | 8,68E-06 |
| 5 | 0+660 | 0+686 | Sección Tipo B | 1,20E-06 | - | 4,49E-08 |
| 6 | 0+686 | 0+710 | Sección Tipo C | 1,20E-06 | - | 8,68E-06 |
| 7 | 0+710 | 0+746 | Sección Tipo D | 1,20E-06 | - | 8,68E-06 |

Los valores obtenidos en los cálculos desarrollados, utilizando las distintas ecuaciones señaladas en el desarrollo de este trabajo, son coherentes con los criterios generales con los que se plantean las diversas ecuaciones propuestas y ya mencionadas en líneas anteriores.

Se observa que, a mayores valores de los índices RMR o RQD menores son los valores de permeabilidad obtenidos en los cálculos, lo cual es un criterio en el que coinciden Qureshi et al. (2014), El-Naqa (2001) y Jiang et al. (2009a, 2009b).

De igual forma, se observa que la permeabilidad en un punto es inversamente proporcional a la profundidad a la que dicho punto se encuentra tomando como referencia las cotas de la superficie.

Los valores obtenidos de permeabilidad están supeditados a los valores de RQD, RMR o profundidad definidos para cada sección según el análisis empírico realizado. Ninguna de las ecuaciones consideradas para el presente trabajo, considera la variable de la precipitación como dato de entrada para el cálculo de los valores. No ha sido posible asociar la Ley de Darcy a las ecuaciones de permeabilidad por cuanto, todas las ecuaciones planteadas, parten de la hipótesis de que la permeabilidad está relacionada a la porosidad de la roca, el número de discontinuidades y la apertura de dichas discontinuidades. Por tanto, se entiende que la permeabilidad es un parámetro intrínseco del macizo rocoso según su condición de calidad o profundidad.

Los coeficientes presentados en las ecuaciones empíricas consideradas para el presente estudio fueron desarrollados como una función de la estadística de resultados de permeabilidad obtenidos a partir de métodos directos y de laboratorio.

Por citar un ejemplo, la ecuación planteada por Qureshi et al. (2014) es el resultado de una regresión de datos obtenidos en más de 350 perforaciones realizadas en Omán, considerando los valores obtenidos a través de las pruebas de presión de Lugeon y la determinación de valores de RQD en cada uno de los sitios estudiados para la elaboración de proyectos hidráulicos, en rocas sedimentarias fracturadas. Si se observa la Figura 15, se puede apreciar que la dispersión de

resultados que fueron considerados para el desarrollo de la ecuación de Qureshi et al. (2014) supera los rangos de 10^3 , esto es, que para un mismo valor de RQD se han determinado mediante la prueba de Lugeon valores de permeabilidad diferentes entre sí hasta en 1000 veces. Esto, revela el nivel de incertidumbre que debe ser considerado en el uso de estas ecuaciones para un análisis empírico de permeabilidad.

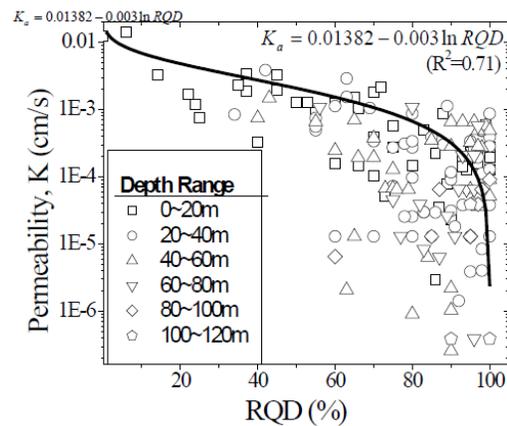


FIGURA 15.- GRÁFICO DE PROFUNDIDAD DE LA PERMEABILIDAD CONTRA EL RQD (QURESHI ET AL. 2014).

Luego de los cálculos realizados con todas las ecuaciones consideradas para el presente trabajo, se ha determinado que los valores de permeabilidad más cercanos a los establecidos en el “Estudio de Factibilidad y Diseños Definitivos del Proyecto Vial Túneles de los Cerros “El Carmen” y “Santa Ana” de la ciudad de Guayaquil” (GADM Guayaquil, 1998), son los obtenidos a partir de la ecuación Qureshi et al. (2014). Por ello, se ha considerado que, para el cálculo de los caudales, se ha de utilizar los valores de permeabilidad obtenidos usando dicha ecuación.

4.6. Comparación de los valores de caudales obtenidos

Se realizó la comparación de los valores de caudales (l/s) obtenidos en el aforo *in situ* y los calculados mediante las fórmulas presentadas en el apartado 3.3 (El Tani, 1999; R. E. Goodman et al., 1965; Karlsrud, 2001; Lombardi, 2002) utilizando la permeabilidad estimada de los métodos empíricos (Qureshi et al., 2014) (Tablas 27 y 28).

TABLA 27.- COMPARACIÓN DE LOS CAUDALES (L/S) OBTENIDOS EN EL TÚNEL DEL CARMEN.

| Tramo | | | Litología | OBTENIDOS IN SITU (GADM Guayaquil, 1998) (l/s) | METODOS EMPIRICOS (l/s) | | | |
|-------|--------------|----------|----------------|---|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | Goodman (1965) | El Tani (1999) | Lombardi (2002) | Karlsurd (2001) |
| 1 | 1+386 | 1+434 | Sección Tipo D | - | 26,87 | 20,93 | 21,34 | 61,94 |
| 2 | 1+434 | 1+458 | Sección Tipo C | - | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,09 |
| 3 | 1+458 | 1+490 | Sección Tipo B | - | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,12 |
| 4 | 1+490 | 1+620 | Sección Tipo A | - | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,54 |
| 5 | 1+620 | 1+644 | Sección Tipo B | - | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,09 |
| 6 | 1+644 | 1+704 | Sección Tipo C | 0,02 | 0,20 | 0,19 | 0,19 | 0,23 |

TABLA 28.- COMPARACIÓN DE LOS CAUDALES (L/S) OBTENIDOS EN EL TÚNEL SANTA ANA.

| Tramo | | | Litología | OBTENIDOS IN SITU (GADM Guayaquil, 1998) (l/s) | METODOS EMPIRICOS (l/s) | | | |
|-------|--------------|----------|----------------|---|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Nº | PK Inicio | PK Final | | | Goodman (1965) | El Tani (1999) | Lombardi (2002) | Karlsurd (2001) |
| 1 | 0+483 | 0+573 | Sección Tipo D | 0,33 | 50,37 | 42,52 | 42,67 | 80,55 |
| 2 | 0+573 | 0+591 | Sección Tipo C | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,11 |
| 3 | 0+591 | 0+600 | Sección Tipo B | - | 4,67 | 3,77 | 3,81 | 9,04 |
| 4 | 0+600 | 0+660 | Sección Tipo A | - | 31,14 | 25,10 | 25,39 | 60,25 |
| 5 | 0+660 | 0+686 | Sección Tipo B | - | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,00 |
| 6 | 0+686 | 0+710 | Sección Tipo C | - | 13,98 | 8,38 | 9,77 | -118,71 |
| 7 | 0+710 | 0+746 | Sección Tipo D | - | 44,79 | 15,09 | 21,65 | -6,03 |

Según los resultados obtenidos en las Tablas 27 y 28 se puede observar la diferencia que existe entre las cantidades de los caudales medidos en la inspección de los túneles encontrados el mes de mayo de 2021 y las cantidades calculadas con las ecuaciones utilizando la permeabilidad por métodos empíricos, siendo hasta 10^2 veces mayor, en el caso más crítico, que la encontrada *in situ*.

CONCLUSIONES

- En este estudio se ha obtenido, de forma empírica, valores de permeabilidad de los macizos rocosos de los cerros El Carmen y Santa Ana, a partir de ecuaciones que consideran como variables las características litológicas y de calidad, resumidas en los índices RMR y RQD.
- La ecuación que mejor representa el comportamiento de la permeabilidad de ambos macizos rocosos como una función de la calidad de la roca, es la desarrollada por Qureshi et al. (2014), obtenida a partir del análisis de resultados de perforaciones y utilizando como variable el índice RQD.
- A partir de los valores de permeabilidad encontrados y utilizando las ecuaciones empíricas propuestas por varios autores, ha sido posible estimar valores de caudales infiltrados en los túneles objeto de estudio. Los resultados obtenidos han sido comparados con los valores registrados en aforos realizados *in situ*, teniendo diferencias de hasta 10^2 (l/s).
- A pesar de estas diferencias, se considera que estas están dentro de los rangos de diferencias de datos que se observan en los estudios de permeabilidad que fueron analizados para la elaboración del presente trabajo. Si se observa la Figura 13, se puede apreciar que la diferencia de resultados que fueron considerados para el desarrollo de la ecuación de Qureshi et al. (2014) supera los rangos de 10^3 , esto es, que para un mismo valor de RQD se han determinado mediante la prueba de Lugeon valores de permeabilidad diferentes entre sí hasta en 1000 veces. Esto, revela el nivel de incertidumbre que debe ser considerado en el uso de estas ecuaciones para un análisis empírico de permeabilidad.

RECOMENDACIONES

- Para desarrollar una ecuación que represente mejor el comportamiento de la permeabilidad de los macizos rocosos que se encuentran en la localidad, se recomienda consolidar la información disponible de perforaciones realizadas y ampliar la cantidad de exploraciones de modo que se cuenten con datos que permitan correlacionar los resultados de permeabilidad a partir de pruebas de Lugeon y los respectivos valores de calidad de la roca, representados en los índices RMR o RQD, y mediante procesos estadísticos determinar la relación que existe entre variables.
- Para obtener una estimación más aproximada de los valores de caudal infiltrados en los macizos rocosos, se recomienda continuar los aforos de caudal, conocer las cotas de nivel freático en las distintas estaciones y la información de precipitaciones obtenidas a través de los pluviómetros instalados en la ciudad, de modo que se desarrolle un análisis estadístico que permita predecir los caudales como una función de los volúmenes de precipitación.

BIBLIOGRAFÍA

- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé C., M. (2006). Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos. In *Universidad Nacional de Rosario*.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geolog?a+y+Geotecnia#4>
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. In *Norg Geotek Inst, Publ* (Issue 106).
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)91319-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(75)91319-4)
- Bieniawski, Z. T. (1979). *The Geomechanics Classification In Rock Engineering Applications* .
- Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil and Petroleum Engineering* (I. John Wiley & Sons (ed.)). A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION.
<https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=pejDUvjwPdMC&oi=fnd&pg=PP13&dq=Bieniawski,+Z.+T.+1989:+Engineering+rock+mass+classifications:+a+complete+manual+for+engineers+and+geologists+in+mining,+civil,+and+petroleum+engineering.+John+Wiley+%26+Sons&ot>
- Burgess, A. (1977). *Groundwater movements around a repository - Regional groundwater analysis*.
- Carlsson, A., & Olsson, T. (1977). Hydraulic properties of Swedish crystalline rocks. Hydraulic conductivity and its relation to depth. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala*, 7, 71–84.
- Celestino, T. (2005). Shotcrete And Waterproofing For Operational Tunnels. *International Tunnelling Association Working Group on Shotcrete Use*.
- Chen, Y.-F., Ling, X.-M., Liu, M.-M., Hu, R., & Yang, Z. (2018). Statistical distribution of hydraulic conductivity of rocks in deep-incised valleys, Southwest China. *Journal of Hydrology*, 566, 216–226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.016>
- Cummings, R. A., Kendorski, F. S., & Bieniawski, Z. T. (1982). Caving Rock Mass Classification and Support Estimation. *U.S. Bureau of Mines Contract Report #J0100103. Engineers International. INC. Chicago*, 195.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application*. Victor Dalmont.
- Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., & Cording, E. J. (1967). *Design Of Surface And Near-Surface Construction In Rock*.
- El-Naqa, A. (2001). The hydraulic conductivity of the fractures intersecting Cambrian sandstone rock masses, central Jordan. *Environmental Geology*, 40(8), 973–982.
<https://doi.org/10.1007/s002540100266>

- El Tani, M. (1999). Water inflow into tunnels. *Challenges for the 21st Century. Proceedings of the World Tunnel Congress '99, Oslo, June 1999. (2 Vols).*, May 1999, 61–70.
- Escalante, R. M. (1992). Agua subterránea en túneles. *Agua Subterranea En Tuneles*, 116–120.
- Farhadian, H., & Katibeh, H. (2015). Groundwater seepage estimation into amirkabir tunnel using analytical methods and DEM and SGR method. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*, March.
- GADM Guayaquil. (1998). *Estudios de Factibilidad y Diseños Definitivos del Proyecto Vial Túneles de los Cerros “El Carmen” y “Santa Ana.”*
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. In *Editorial Pearson Education, Madrid*.
- Goodman, R. E., Moye, D. G., Van Schalkwyk, A., & Javandel, I. (1965). *Ground water inflows during tunnel driving*. Bulletin of the International Association of Engineering Geologists 2.
- Heuer, R. E. (1995). Estimating Rock Tunnel Water Inflow. *12th Rapid Excavation and Tunneling Conference, PROCEEDINGS OF THE RAPID EXCAVATION AND TUNNELING CONFERENCE, comp*, 41–60.
<https://www.tib.eu/de/suchen/id/BLCP%3ACN012010035>
- Jiang, X.-W., Wan, L., Wang, X.-S., Liang, S., & Hu, B. (2009). Estimation of fracture normal stiffness using a transmissivity-depth correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 51–58.
- Jiang, X. W., Wan, L., Wang, X. S., Wu, X., & Zhang, X. (2009). Estimation of rock mass deformation modulus using variations in transmissivity and RQD with depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8), 1370–1377.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.05.004>
- Karlsrud, K. (2001). Control of water leakage when tunnelling under urban areas in the oslo region. *Norwegian Tunnelling Society (NFF)*, 27–33.
- Karsrud, K. (2001). Water control when tunneling under urban areas in the Oslo region. *NFF Publication*, 12, 27–33.
- Kendorski, F. S., Cummings, R. A., Bieniawski, Z. T., & Skinner, E. H. (1983). *Rock Mass Classification For Block Caving Mine Drift Support* .
- Laubscher, D. H. (1977). *Geomechanics classification of jointed rock masses: mining applications*.
- Laubscher, D. H. (1984). *Design aspects and effectiveness of support systems in different mining conditions*.
- Lombardi, G. (2002). *Private Communication*.
- Louis, C. (1974). Introduction a l’hydraulique des roches. *Orleans, Bureau Recherches*

Geologique Miniers., 4, 7–127.

Maristany Eduardo. (1999). *Afluencia de aguas en los tuneles*. Revista de Obras Publicas.

Öge, I. F. (2017). Assessing Rock Mass Permeability Using Discontinuity Properties. *Procedia Engineering*, 191, 638–645. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.373>

Oteo Mazo, C. (2016). El agua y los túneles. *Revista de Obras Públicas: Organo Profesional de Los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, 3579, 6–16.

Palmstrom, A., & Broch, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.10.005>

Piscopo, V., Baiocchi, A., Lotti, F., Ayan, E., Biler, A., Ceyhan, A., Cuylan, M., Gear, E., Kahraman, S., & Taskin, M. (2018). Estimación de la permeabilidad del macizo rocoso mediante la variación de la conductividad hidráulica con la profundidad: experiencias en rocas duras del oeste de Turquía. *Boletín de Ingeniería, Geología y Medio Ambiente*, 77, 1663–1671. <https://doi.org/10.1007 / s10064-017-1058-8>

Qureshi, M. U., Khan, K. M., Bessaih, N., Al-Mawali, K., & Al-Sadrani, K. (2014). An empirical relationship between in-situ permeability and RQD of discontinuous sedimentary rocks. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19(R), 4781–4790.

R.K., G., & Bhawani, S. (2011). *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides* (Elsevier Inc. (ed.); 1st edition). Elsevier Inc. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=7TCQEQ1RXOAC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Engineering+Rock+Mass+Classification+1st+Edition&ots=0U0_zBTbZm&sig=7GCrFrKa_T0HdPN2hekITLzQt24&redir_esc=y#v=onepage&q=Engineering Rock Mass Classification 1st Edition&f=false

Ramírez, P., & Alejano, L. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 300. http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf

Romana, M. (1985). Nuevos factores de ajuste para la clasificación de Bieniawski a los taludes. *Ponencia En El 3er Coloquio Sobre Ingeniería Geológica*.

Sánchez San Román, F. J. (1856). Ley de Darcy. Conductividad hidráulica. In *Ley de Darcy. Conductividad hidráulica*. <http://hidrologia.usual.es>

Shahbazi, A., Saeidi, A., & Chesnaux, R. (2020). A review of existing methods used to evaluate the hydraulic conductivity of a fractured rock mass. *Engineering Geology*, 265(June 2019), 105438. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105438>

Singh, R. N., Demby, B., Egretli, I., & Pathon, A. G. (1986). Assessment of ground rippability in open cast miing operations. *Nottingham University. Mining Dept. Magazine*, 38, 21–34.

Smith, H. J. (1987). Estimating the mechanical dredgeability of rock. *28th. U.S. Symposium on Rock Mechanics.*, 935–943.

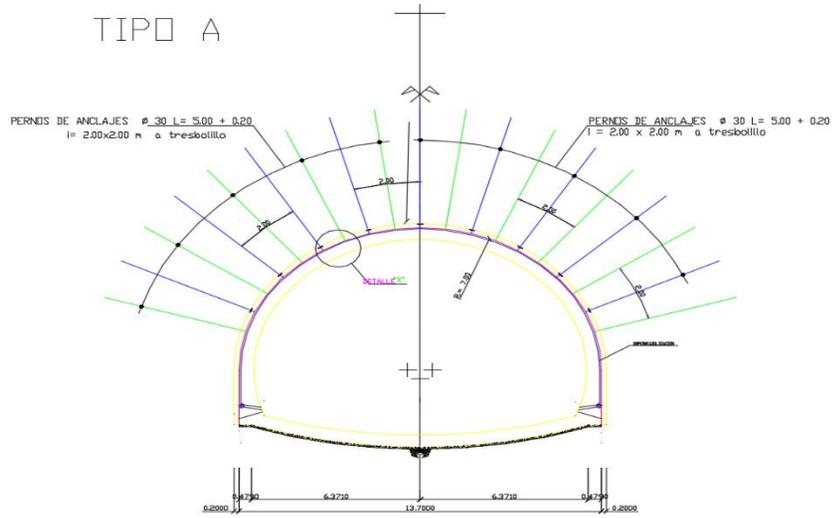
- Snow, D. T. (1970). The frequency and apertures of fractures in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 7(1), 23–40.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90025-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90025-2)
- Su, K., Zhou, Y., Wu, H., Shi, C., & Zhou, L. (2017). An Analytical Method for Groundwater Inflow into a Drained Circular Tunnel. *Groundwater*, 55(5), 712–721.
<https://doi.org/10.1111/gwat.12513>
- Unal, E. (1983). Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs. In *Pennsylvania State University*.
- Unal, E. (1986). Empirical approach to calculate rock loads in coal mine roadways. *Proc. 5th Conf. Ground Control Coal Mines.*, 234–241.
- Weaver, J. M. (1975). Geological factors significant in the assessment of rippability. *Civil Engineer in South Africa*, 17, 313–316.

ANEXOS

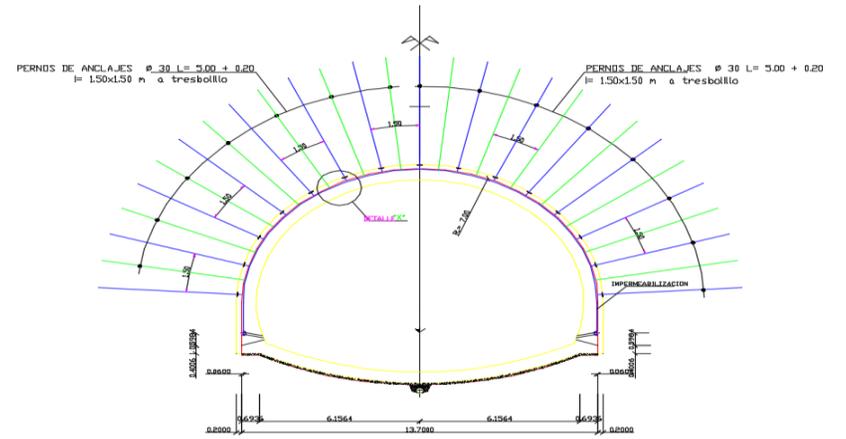
Anexo 1

En el Anexo 1 se encuentra lo relacionado al apartado 3.1.1 con respecto a las secciones tipo. Se dividen en las siguientes 4 clases que se detallan a continuación en los esquemas (GADM Guayaquil, 1998):

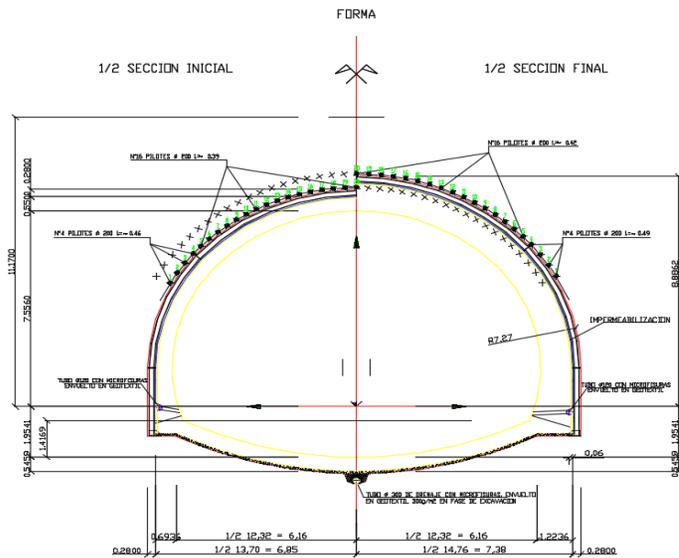
TIPO A



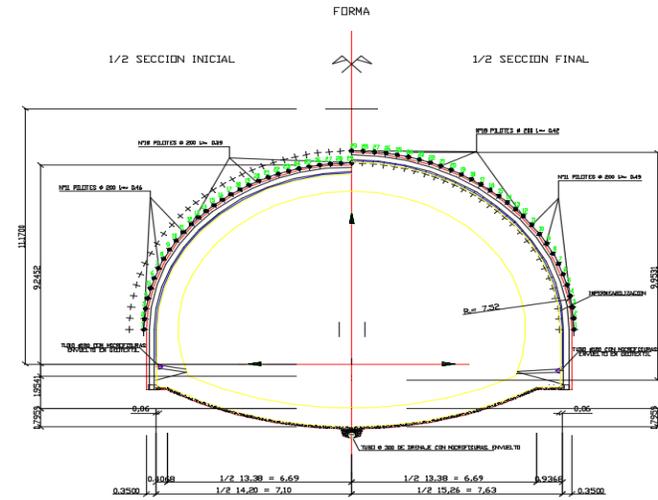
TIPO B



TIPO C

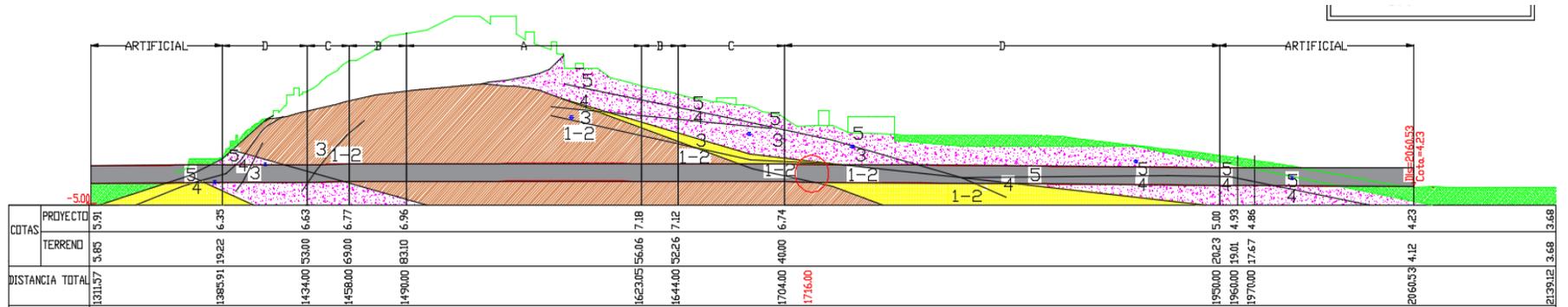


TIPO D

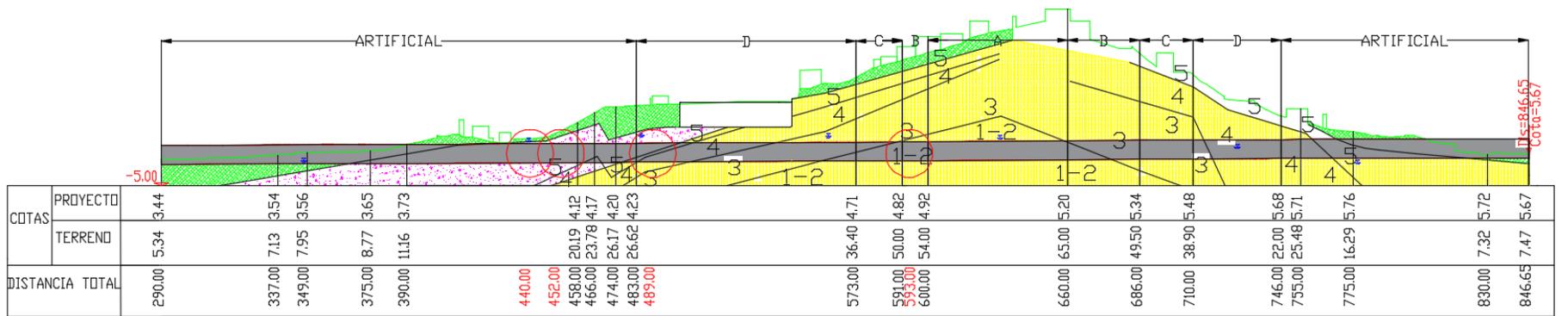


ANEXO 1.- SECCIONES TIPO EN EL TÚNEL NATURAL. (GADM GUAYAQUIL, 1998).

Anexo 2



ANEXO 2.- LOCALIZACIÓN DE MUESTRA TOMADA EN TÚNEL CERRO DEL CARMEN.



ANEXO 3.- LOCALIZACIÓN DE MUESTRA TOMADA EN TÚNEL CERRO SANTA ANA.