

- ❑ **Análisis de rendimientos para varios sistemas de excavación de túneles en roca.**
- ❑ **Dimensionamiento de piscinas de sedimentación en proyectos mineros a cielo abierto. Metodología**
- ❑ **Competencias ciudadanas y de liderazgo en IES de carácter científico-tecnológico: una aproximación conceptual.**
- ❑ **Aplicación de métodos de análisis en geotecnia no convencionales a empuje lateral de tierras, siguiendo procesos estocásticos de segundo orden en suelos cohesivos uniformes.**
- ❑ **Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos para obras geotécnicas.**
- ❑ **Estado del arte en la impermeabilización de túneles en roca. Casos, aplicaciones y recomendaciones.**
- ❑ **Herramienta computacional para el diseño de lagunas naturales de estabilización.**

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

VOCALES GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ
ÁLVARO ANTONIO GONZÁLEZ FLETCHER
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
RICARDO SALAZAR FERRO
HENRY MORENO MOSQUERA
(representante de los profesores)
EYDI MARYOLI RIVERA ACERO
(representante de los estudiantes)

RECTOR HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

SECRETARIO RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

COMITÉ EDITORIAL GERMÁN ACERO RIVEROS
CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES
PAULA XIMENA RÍOS REYES
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
EDUARDO SARMIENTO PALACIO

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

EDICIÓN **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA
CORRECCIÓN DE ESTILO
ELKIN RIVERA GÓMEZ
TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS
DAVID PEÑA CITA

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 N.º 205-59
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533
revista@escuelaing.edu.co
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

5 / EDITORIAL

Ricardo Rincón Hernández

7-19

Análisis de rendimientos para varios sistemas de excavación de túneles en roca

Diego Triana Cortés - Ramiro Gutiérrez Rodríguez

La experiencia ha demostrado que no se cumplen los rendimientos teóricos de excavación propuestos para proyectos en Colombia y que se debe ir improvisando a medida que avanza la obra, lo que da origen a la siguiente inquietud: ¿cómo calcular el rendimiento de excavación en roca para la construcción de túneles en Colombia?

21-28

Dimensionamiento de piscinas de sedimentación en proyectos mineros a cielo abierto.

Metodología

Alfonso Rodríguez Díaz - Andrés Humberto Otálora Carmona

En este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, cuyo objetivo es el dimensionamiento de piscinas de sedimentación del material transportado por la escorrentía proveniente de botaderos construidos como zonas de acopio de material residual, generado por actividades mineras a cielo abierto.

29-40

Competencias ciudadanas y de liderazgo en IES de carácter científico-tecnológico: una aproximación conceptual

Joseph Robert Voelkl Peñalosa - Juan Carlos Lopera Téllez

El presente artículo es el resultado de una investigación de programa, de carácter exploratorio, sobre competencias ciudadanas y de liderazgo, llevada a cabo en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Comienza con un acercamiento a la importancia del desarrollo de competencias personales (o blandas) en las instituciones de educación superior, haciendo hincapié en la necesidad de fortalecer aquellas relacionadas con el liderazgo y el ejercicio de la ciudadanía, especialmente en instituciones educativas de carácter científico-tecnológico.

41-44

Aplicación de métodos de análisis en geotecnia no convencionales a empuje lateral de tierras, siguiendo procesos estocásticos de segundo orden en suelos cohesivos uniformes

Fabián Andrés Avella Cubides - Ricardo Salazar Ferro

A partir de las teorías de probabilidad y empuje lateral de tierras, se ha logrado obtener un modelo de cálculo de probabilidades de falla alterno a las metodologías convencionales, que permite considerar la variación de las propiedades del suelo desde el planteamiento mismo del problema y no haciendo una aleatorización de una expresión determinística. El modelo se plantea asumiendo las propiedades de resistencia del suelo no como variables aleatorias, sino como campos aleatorias que siguen un proceso estocástico de segundo orden, teniendo en cuenta que en un depósito de suelo estas propiedades cambian punto a punto.

45-63

Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos para obras geotécnicas

Alfonso Rico - Ramiro Gutiérrez

En este artículo se habla sobre los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos, y además se puede encontrar la información necesaria, como guía básica, para diseñar, construir y supervisar este tipo de trabajos.

65-79

Estado del arte en la impermeabilización de túneles en roca. Casos, aplicaciones y recomendaciones

Luis Alejandro Ruiz Piragauta - Ramiro Gutiérrez Rodríguez

En el presente artículo se describen los conceptos generales de geología e hidráulica, así como las actividades de investigación y exploración del agua. Se habla del contexto histórico de los túneles y de las características constructivas, se exponen las directrices y pautas para el control y medición de las tasas de infiltración. Además, se exponen las técnicas para el control del agua subterránea, y se presentan los elementos instalados como parte de los revestimientos, materiales y equipos utilizados.

81-88

Herramienta computacional para el diseño de lagunas naturales de estabilización

Jorge Luis González Castro - Jairo Alberto Romero Rojas

En este artículo, se presenta el desarrollo de la herramienta computacional Dislag para el diseño de lagunas naturales de estabilización, teniendo como base el programa LAG desarrollado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en la década de los noventa, por el Ing. Ricardo López Cualla. El aplicativo Dislag consta de varios módulos que van guiando al usuario en el diseño del proceso de tratamiento de la laguna hasta culminar con su dimensionamiento geométrico y con la presentación de la totalidad de resultados de forma gráfica y numérica.

89 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

Cofundador de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
Presidente del Claustro y del Consejo Directivo.

ricardo.rincon@escuelaing.edu.co

Las marchas que se han venido presentando en muchas de las ciudades colombianas, desde mediados del año 2019, han complicado el discurrir normal de las actividades de la mayoría de los ciudadanos. Se han tenido que soportar por estos hechos varios inconvenientes, entre los que sobresalen los problemas de movilidad, en especial la reducción de los servicios de transporte público, por lo cual, los ciudadanos que disponen de un empleo han tenido que vivir con el temor de ser despedidos o de aceptar una disminución de sus ingresos, por no poder arribar a tiempo a su sitio de trabajo. Los estudiantes no han podido asistir en muchas ocasiones a sus clases en colegios o universidades y para el normal desarrollo de las actividades propias de las ciudades y pueblos colombianos, se han tenido que aceptar innumerables inconvenientes.

En general, estas jornadas de protesta han frenado la industria y el comercio; adicionalmente –y es lo más angustiante–, algunos vándalos han arremetido contra el transporte público, contra la estructura comercial, contra las instalaciones gubernamentales y particulares, contra la fuerza pública y contra la ciudadanía en general, que sin un apoyo no pueden impedir estos comportamientos. Lamentablemente, las autoridades se han visto en serios aprietos para judicializar a estos inadaptados.

Como consecuencia de este modo de actuar, se han producido enormes pérdidas económicas que afectan la vida de un pueblo, que se supone civilizado y que por

tales desmanes debe asumir, de manera generalizada, la reparación de los daños materiales. Esto deja en la mayoría de la población una sensación de impotencia, tristeza y frustración, por lo que es conveniente tratar de entender la razón de los paros y buscar cómo salir de esta encrucijada.

Es por lo menos irónico que una ciudadanía que espera que el gobierno de turno le resuelva todas sus inquietudes, que debería presentar de manera ordenada y precisa los aspectos que requieren estudio y como resultado de esto cambios fundamentados, que le den al menos la esperanza de poder lograr el bienestar de la sociedad en su conjunto, no tenga clara la razón fundamental para salir a protestar. Algunos creen que se trata de presionar para obtener beneficios inmediatos, como conseguir que no se presenten cambios en las normas establecidas para alcanzar una pensión; otros piensan que se requiere un mejoramiento sustantivo en la prestación de los servicios de salud o lograr la aprobación de unos salarios adecuados para que cualquier familia pueda al menos subsistir.

Todas estas razones, sin duda, pueden ser valederas. Sin embargo, también hay otros para los cuales ésta será la oportunidad política de conseguir que el gobierno admita la necesidad de que los integrantes de alguno de los grupos opositores formen parte de la burocracia en el gobierno central, así como en gobernaciones y municipios, otros más que sólo esperan el caos total, con la esperanza de un cambio radical que les permita

formar parte de un gobierno similar al que impera en otros países y gobernar con su influencia.

Curiosamente, en las marchas no se ha planteado la necesidad de unirnos para desterrar la corrupción ya generalizada y el narcotráfico asfixiante, aspectos que están incidiendo de manera frontal en el desarrollo del país y que, en vez de conseguir su extinción, cada día toman más fuerza, posiblemente porque existen grupos dominantes que al parecer están interesados no sólo en mantenerlos, sino en fortalecerlos.

Es evidente que cualquier país en vía de desarrollo requiere cambios en muchos aspectos, pero tales cambios deben corresponder a un plan de desarrollo perfectamente estructurado, para lograr un avance bien cimentado y no obedecer a la presión de un estallido del momento, que en tal caso es muy posible que resulten en un fracaso y, como consecuencia, en una frustración.

Se debe recordar que, como se ha demostrado en varias ocasiones en muchos lugares del mundo, la violencia con frecuencia lleva a cambios que implican soluciones apresuradas, las cuales sólo benefician a unos pocos y a menudo impiden el desarrollo sostenido y bien estructurado de los países en problemas, lo cual lleva a la pérdida de verdaderas oportunidades para mejorar.

Por otra parte, cuando hay razones bien cimentadas, porque se han discutido en forma adecuada, es lícita y hasta conveniente la protesta, pero se debe respetar el derecho de los ciudadanos a la movilidad y al trabajo; lo ideal es que se presente sin violencia ni destrucción y que de ninguna manera se tenga que lamentar la pérdida de vidas humanas.

Así las cosas, no se entiende que un grupo reducido, de poca representación, pretenda ser vocero de las necesidades de los colombianos, grupo en el cual algunos dicen representar a sindicatos. Como es bien sabido, varias de estas agremiaciones a menudo sólo buscan el bienestar de sus dirigentes, o en muchas ocasiones han presionado con peticiones exageradas, hasta obligar al cierre de empresas productivas.

Hay otros que creen ser representantes de asociaciones de profesores que se dicen educadores, pero que no quieren aceptar que se les hagan evaluaciones para saber a ciencia cierta la calidad de sus actuaciones como formadores de personas con principios definidos y que sean posteriormente ejemplos para todos. Deben

recordar que una de las misiones del educador verdadero es definir, mediante evaluaciones hechas a sus alumnos, las acciones más convenientes que les permitan colaborarles en una formación que busque fundamentalmente responsabilidad y compromiso. Por último, hay otros grupos, al parecer sin representación definida.

En todos los casos, el país necesita individuos que tengan la capacidad de analizar y con base en esto, plantear ordenadamente los aspectos y proyectos que se requieran para conseguir cambios que se enfoquen en un desarrollo ordenado y en el cual participen todos los ciudadanos. El país necesita con urgencia, para conseguir los cambios, que se disponga en todos los ámbitos, en los sindicatos, en las asociaciones de industriales, en las de los comerciantes, en los grupos de estudiantes, en los educadores, en los hombres del campo, en los miembros del Congreso, en dependencias oficiales y hasta en los grupos militares, de líderes bien intencionados.

La Escuela Colombiana de Ingeniería en particular, pero también la academia en general, debe preocuparse por continuar contribuyendo al fortalecimiento de líderes. En todos sus programas, siguiendo lo establecido en su Declaración de Principios, propenderá a que sus profesionales participen de manera clara en la búsqueda del bienestar de los conciudadanos, como líderes convencidos, ya que únicamente de este modo se podrán hacer planteamientos mediante discusiones bien intencionadas y adecuadamente planteadas. Es importante que siempre se tenga presente que sólo con inteligencia, con gran vocación y a veces con sacrificios personales, se puede contribuir a tener un país más próspero.

La sociedad, el Estado y los manifestantes pueden y deben actuar buscando el bien común y desterrando la violencia; está ampliamente demostrado en el mundo, y particularmente en Colombia, que ninguna reforma social o ningún progreso económico pueden perdurar si se utiliza como argumento básico la violencia.

La Escuela debe seguir siendo un laboratorio de ideas y conocimiento, donde además de ofrecer programas de gran calidad, se ayude a crear en el estudiante la necesidad de formarse como líder; esto le permitirá avanzar en sus aspiraciones empresariales, sociales y, si es del caso, también políticas.

Análisis de rendimientos para varios sistemas de excavación de túneles en roca

Performance analysis for several rock tunnel excavation systems

DIEGO TRIANA CORTÉS¹ - RAMIRO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ²

1. Ingeniero civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. magíster en Ingeniería de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil de la Universidad Javeriana. Consultor. Director del Departamento de Túneles en Ingetec S.A.

diego.triana-c@mail.escuelaing.edu.co - rgutier@ingetec.com.co

Recibido: 20/07/2019 Aceptado: 10/08/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Varias empresas se encuentran construyendo túneles a lo largo y ancho del país, con el fin de mejorar el desarrollo de la infraestructura nacional. Sin embargo, es común ver cómo se aumentan los tiempos de excavación y construcción en la ejecución de las obras porque el diseñador o constructor no tiene por lo general un método definido y completo para estimar el rendimiento del proceso constructivo, ya que los métodos disponibles en la actualidad sólo sirven para calcular parcialmente los rendimientos de algunas actividades.

La experiencia ha demostrado que no se cumplen los rendimientos teóricos de excavación propuestos para proyectos en Colombia y que se debe ir improvisando a medida que avanza la obra, lo que da origen a la siguiente inquietud: ¿cómo calcular el rendimiento de excavación en roca para la construcción de túneles en Colombia?

Para dar respuesta a esta pregunta se elaboró una guía que permite establecer los rendimientos de excavación para diferentes sistemas de excavación de túneles en roca, mediante las teorías de cálculo de rendimiento descritas en la bibliografía de métodos parcialmente desarrollados por autores europeos, complementándolos con experiencias de túneles construidos en el país.

Los resultados obtenidos se consideran buenos, teniendo en cuenta los datos medidos en campo de proyectos ejecutados en Colombia, ya que varían entre el 2 y 20 %, la mayoría de los resultados en el rango inferior, lo que ratifica el uso de la metodología.

Palabras claves: rendimiento, parámetros del macizo rocoso, geología estructural, métodos de excavación de túneles en roca, perforación en túneles.

Abstract

Several companies nationwide are currently building tunnels to improve the development of the country's infrastructure. It is common to see how excavation and construction times have increased in the execution of the works, since either the designer or the builder usually does not have a definite and complete method to estimate the performance of the construction process, as the current methods partially calculate the yields of some activities.

Experience has shown that the theoretical excavation yields proposed for projects in Colombia are not met and that improvisation occurs as the work progresses, giving rise to the following concern: How to calculate the performance of rock excavation for the construction of tunnels in Colombia?

To answer this question, a guide was developed to establish the excavation yields for different rock tunnel excavation systems, using the performance calculation theories described in the literature of methods partially developed by European authors, complementing them with experiences of tunnels built in the country.

The results showed positive results, considering the data measured in the field of projects executed in Colombia. The results vary between 2 and 20%, most of them are in the lower range, confirming the use of the methodology.

Keywords: performance, rock mass parameters, structural geology, rock tunnel excavation methods, tunnel perforation.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la inversión de infraestructura en el país ha aumentado, lo que permitirá que en los próximos proyectos viales e hidroeléctricos el número de túneles sea cada vez mayor (Clavijo, Vera & Vera, 2012). En el país se vienen desarrollando varias obras de infraestructura que acaparan la atención nacional, ya que cada día la innovación en la construcción de túneles es frecuente. Los túneles se vienen desarrollando en Colombia con base en los lineamientos establecidos por expertos, principalmente europeos, los cuales han documentado muy bien sus casos y tienen la posibilidad de retroalimentar sus métodos de excavación y construcción de túneles, hábito que poco se practica en Colombia.

Para desarrollar este tema se debe partir de que en el Viejo Continente se han elaborado trabajos que han tratado de estimar el rendimiento de las máquinas perforadoras de túneles (TBM), en función de parámetros empíricos establecidos por Bartono Bienawski u otros. Así mismo, hay estudios en los que se calculan el rendimiento de dichas máquinas, en función de los parámetros de roca fracturada (Nelson, Ingraffea & O'Rourke, 1985) y otros parámetros del macizo. Por otra parte, se han elaborado artículos que describen el rendimiento de las rozadoras, en función de parámetros de la roca intacta y del macizo (Abdolreza, & Siamak, 2013), y se han desarrollado investigaciones efectuadas por autores que presentan metodologías para el cálculo de rendimiento de excavación para túneles en roca, en función de parámetros empíricos establecidos por Barton (Khademi, Shahriar, Rezai & Rostami, 2010).

La investigación de este tema se enfoca en establecer cuál debería ser el proceso teórico-práctico para calcular los rendimientos de excavación para los diferentes sistemas de perforación. Por ejemplo, existen autores que determinan el rendimiento de excavación de las máquinas rozadoras mediante el índice de perforabilidad DRI, la potencia de la rozadora y el tipo de cabezal de corte (López, García & Torija, 2012). Además, para el sistema de perforación y voladura, previamente se debe elaborar el diseño del cuele, con el fin de determinar la cantidad de barrenos de expansión y la cantidad de explosivo necesario para destrozarse el túnel (López, Arnaiz, López & García, 2013). Así mismo, para las máquinas tuneladoras se calcula el rendimiento mediante el torque generado por la cabeza de corte y las revoluciones

por minuto que desarrolla el motor (Bruland, 2014) (Bruland, 2015).

Como complemento a cada uno de los procesos de perforación, se debe articular el sistema de retiro del material excavado, mediante la incorporación de volquetas, vagones, cintas de transporte, etc., que permitan un circuito de trabajo adecuado con la menor pérdida de tiempo posible (López, García, Diez & López, 2013). Ahora, cuando los parámetros del macizo rocoso no son los mejores, se deben ejecutar obras de soporte para garantizar la estabilidad del túnel y permitir el buen desarrollo de éste.

La guía desarrollada permite calcular los tiempos de ejecución de las actividades descritas anteriormente de manera racional y así estimar el tiempo de la excavación mediante un análisis teórico.

Por ejemplo, para el sistema de perforación y voladura, se debe tener en cuenta el tiempo empleado por la topografía, el diámetro del barreno de cargue y el barreno de explosión para estimar el tiempo de perforación con los jumbos, si el diseño contempla barrenos de precorte o corte, tiempo de cargue de explosivos, tiempo de ventilación, tiempo de desescombro, tiempo para la instalación de soporte, concreto lanzado, pernos, arcos metálicos (fijos o deformables), inyecciones de consolidación, solera curva y enfilajes.

De la misma manera, para la excavación con rozadoras y máquinas TBM se desarrolló un manual, en el que para cada actividad se calcula un tiempo.

Finalmente, cabe destacar que la fuente teórica principal para desarrollar la guía de cálculo es indicada por Carlos López Jimeno y otros, mediante publicaciones realizadas entre los años de 2010 y 2013, en las que se describe cómo estimar el rendimiento de varias actividades que deberán efectuarse durante el proceso de excavación de rozadoras y el sistema de perforación y voladura. Además, en Colombia se han usado varios procesos de excavación en túneles y a la fecha no se cuenta con un manual que estime el rendimiento de los procesos mencionados, con el propósito de retroalimentar futuros túneles para excavar.

GENERALIDADES

Actualmente, para la excavación de túneles se puede efectuar cuatro metodologías de excavación, tal como se ilustra a continuación:



Ilustración 1. Metodologías de excavación. Fuente: Auditoría del autor.

Sin embargo, la excavación mecánica o puntual no se tuvo en cuenta, dado que este proceso se utiliza para suelos o roca débil o meteorizada. Cada uno de los demás procesos se puede usar para excavación en roca y se ejecuta mediante un ciclo de trabajo.

Para la metodología de excavación mediante perforación y voladura, se ejecutan las siguientes actividades: a) Topografía; b) Perforación de barrenos; c) Cargue de explosivos; d) Explosión; e) Ventilación; f) Retiro de la rezaga; g) Desquinche; h) Soporte. Esto se ilustra a continuación:

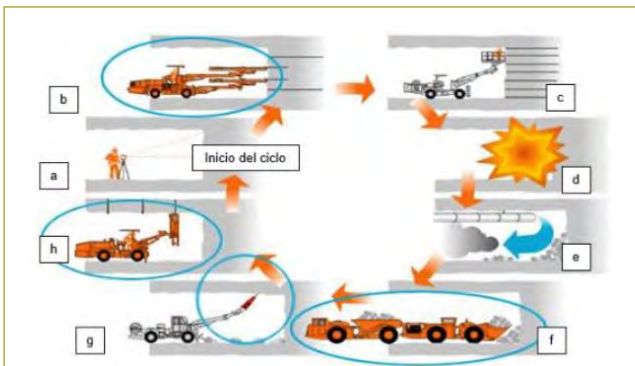


Ilustración 2. Sistema de perforación y voladura convencional. Fuente: www.structuralia.com.

El sistema de excavación mediante rozadora se ejecuta por medio de las siguientes actividades: a) Topografía; b) Rozado del frente; c) Ventilación; d) Retiro de la rezaga; e) Soporte. A renglón seguido se ilustra una fotografía de una máquina rozadora:



Ilustración 3. Sistema de perforación con rozadora. Fuente: www.structuralia.com.

Ahora, el sistema de excavación mediante máquina tuneladora TMB, contempla las siguientes actividades: a) Topografía; b) Corte del frente; c) Ventilación; d) Retiro de rezaga; e) Soporte. A continuación, se ilustra una fotografía de una máquina tuneladora:



Ilustración 4. Sistema de perforación con máquina tuneladora TMB. Fuente: www.ubicatv.com/ecuador.

METODOLOGÍA

Como primera medida, se consultó la información disponible en la bibliografía correspondiente al cálculo de rendimientos de excavación; principalmente, se contó con el apoyo de los manuales publicados por López Jimeno entre los años 1997 y 2013 para los sistemas de rozadoras y perforación y voladura (López, García & Torija, 2012), (López, Arnaiz, López & García, 2013), (López, García, Díez & López, 2013), (López, 1997). Para el sistema de excavación con máquina tuneladora, se usaron los artículos publicados por Bruland en la Universidad de Noruega (Bruland, 2014) (Bruland, 2015).

Posteriormente, se recopilaban los datos de algunos proyectos a los que se tuvo acceso, donde se conocieron la metodología de excavación, algunas características de los equipos usados, la geología, la clasificación del terreno, el sistema de soporte, y sobre todo se obtuvieron los rendimientos de excavación medidos en campo.

Luego se hizo un análisis de los datos medidos en campo, para finalmente comparar los cálculos obtenidos mediante la metodología propuesta. A continuación, una ilustración del plan de trabajo ejecutado:

RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Túnel Tunjita

La empresa Interconexión Eléctrica desarrolló el proyecto hidroeléctrico Chivor en 1976, construyendo una etapa inicial para la generación de 500.000 KWh.



Ilustración 5. Plan de trabajo. Fuente: Auditoría del autor.

Posteriormente, en 1982 se construyó la segunda etapa, con el fin de duplicar la generación de energía y proveer 1.000.000 KWh. Para aumentar la generación de energía, la empresa ISA realizó obras de desviación del río Tunjita, mediante un túnel de 13,8 km, con el propósito de captar 12 m³/s de agua.

La excavación de dicho túnel se efectuó por dos frentes. El portal de entrada se excavó mediante el sistema de perforación y voladura convencional, avanzando 6.688 km. Por el portal de salida, la excavación se inició con el sistema de perforación y voladura convencional, avanzando 603 m para establecer un avance seguro para la tuneladora. Después se continuó la excavación, en especial mediante una máquina tuneladora, la cual avanzó 7.172 km.

Finalizados los trabajos de excavación, el revestimiento consistió en la proyección de concreto lanzado con malla y con pernos en la solera. Para algunos tramos, se instalaron además arcos neticos TH-21, debido a la presencia de fallas geológicas y agrietamientos de la roca por efecto de las voladuras.

Resumen de condiciones geotécnicas

Los problemas de excavación y estabilidad cuando se perforaba mediante el sistema de perforación y voladura convencional en areniscas fueron pocos, comparados con las zonas donde se encontraban lutitas, que en algunos casos presentaron empujes; por eso hubo necesidad de implementar adicionalmente al concreto lanzado pernos y arcos metálicos.

Por otra parte, durante la excavación mediante tuneladora se presentaron problemas por la dureza de la

arenisca y por desprendimientos de la lutita debido a la condición laminada de los estratos. Esta última condición provocó, adicionalmente al concreto lanzado, la instalación de pernos y arcos y muchos sectores.

A renglón seguido se ilustra el perfil del macizo en función de la longitud del túnel:

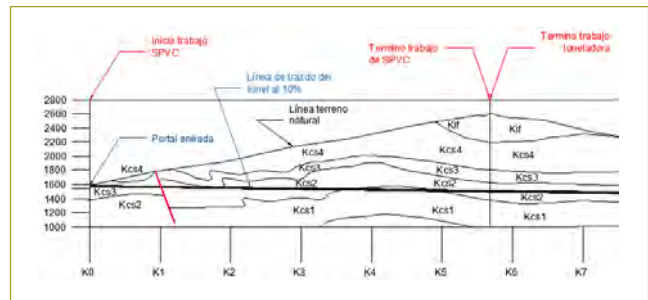


Ilustración 6. Perfil del macizo Portal de entrada. Fuente: Auditoría del autor.

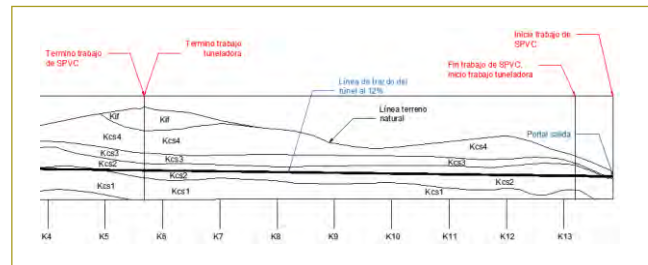


Ilustración 7. Perfil del macizo Portal de salida. Fuente: Auditoría del autor.

Propiedades físicas de la roca

Roca	Peso unitario (kg/cm ²)	Com. Inconf. (kg/cm ³)	Porosidad (%)	W (%)	Cant. cuarzo (%)	Factor abrasiv. (kg/cm)	Desgaste máquina de los ángeles (%)
Arenisca	2,40 a 2,70	570 a 2280	11 a 12	0,7	95 a 99	1,4 a 5,5	
Lutita	2,70	50 a 800					
Intercalaciones de areniscas y lutita		540 arenisca 220 lutita					28 a 38 % a 500 rev y 5 a 1 % a 100 rev

Ilustración 8. Propiedades físicas de la roca. Fuente: Autoría del autor.

Sistema de retiro de rezaga

De acuerdo con los datos registrados del proyecto, el retiro de la rezaga para ambos portales se efectuó mediante dos locomotoras, complementadas con diez vagones de 1.2 m³ de capacidad.

Sistema de ventilación

Se utilizó un sistema de purga de frente para buscar que la distancia de la fuente de ventilación con respecto al frente de excavación fuera aproximadamente de 25 m.

Clasificación de los tramos de excavación en función del sistema de soporte

Longitud del túnel 13860 m		
Sistema de perforación y voladura convencional 6688 m		
Tipo de terreno	Longitud tramo (m)	Tipo de soporte
I	6036	Concreto lanzado, solera o inyección de contacto
II	257	Concreto, inyecciones de consolidación
IIIa	395	Concreto lanzado, cerchas y pernos
Sistema de perforación con tuneladora 7172 m		
Tipo de terreno	Longitud tramo (m)	Tipo de soporte
I	5879	Concreto lanzado, con solera
II	1293	Concreto lanzado, cerchas y pernos

Ilustración 9. Clasificación de los tramos que hay que excavar mediante los dos sistemas expuestos.

Con base en los datos medidos, se elaboraron gráficas que describen el avance mensual de la excavación por el portal de entrada mediante el sistema de excavación y voladura:

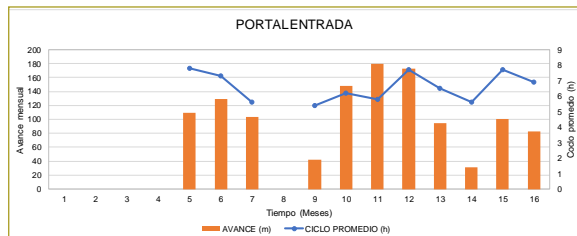


Ilustración 10. Avance de excavación entre los meses 1 y 16.

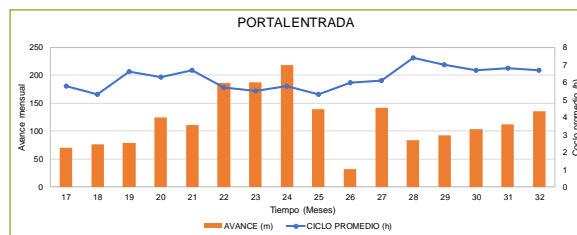


Ilustración 11. Avance de excavación entre los meses 17 y 32.

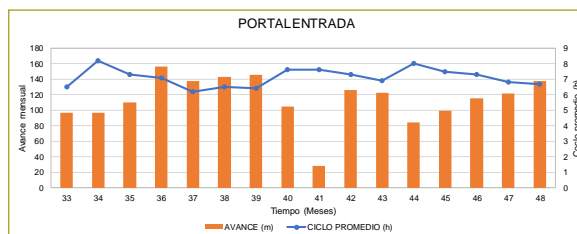


Ilustración 12. Avance de excavación entre los meses 33 y 48.

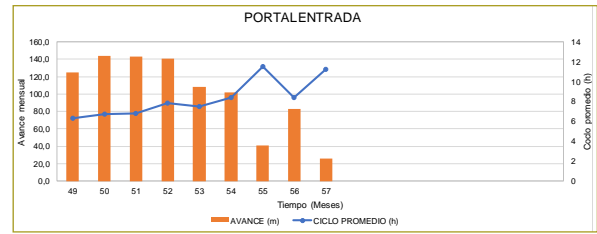


Ilustración 13. Avance de excavación entre los meses 49 y 57.

Tomando en cuenta los datos medidos durante el proyecto, se tienen los siguientes rendimientos por ciclo en el portal de entrada:

Actividad	Tiempo promedio de ciclo (h)
1. Topografía y barrenado	2,03
2. Cargue y ventilación	1,79
3. Retiro de rezaga	3,24
4. Soporte	4,24

Ilustración 14. Tiempo promedio por actividad por cada ciclo de trabajo.

Datos medidos

Con base en los datos medidos, se elaboraron gráficas que describen el avance mensual de la excavación por el portal de salida mediante el sistema de excavación con máquina tuneladora:

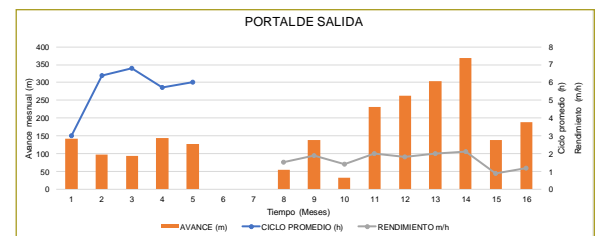


Ilustración 15. Avance de excavación entre los meses 1 y 16.

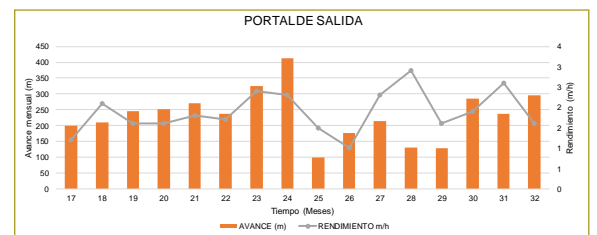


Ilustración 16. Avance de excavación entre los meses 17 y 32.

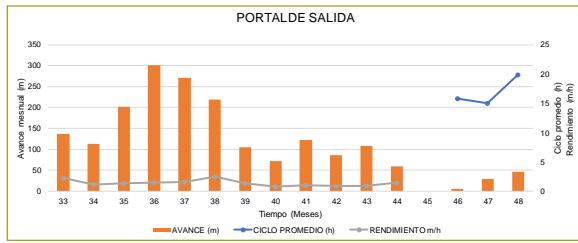


Ilustración 17. Avance de excavación entre los meses 33 y 48.

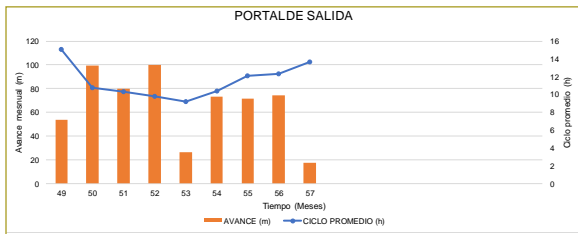


Ilustración 18. Avance de excavación entre los meses 49 y 57.

Para esta excavación se utilizó una tuneladora de 4,30 m de diámetro, con un cabezal de corte compuesto por 35 discos de corte de 14” de diámetro. La máquina TBM usaba 5 motores de 125 HP con una velocidad de rotación de 5.56 rpm.

Túnel Usaquén

Para el abastecimiento de agua de Bogotá, la ciudad cuenta con tres fuentes principales de agua (Sistema Chingaza, Tibitoc y La Regadera), las cuales realizan un almacenamiento en el embalse San Rafael y a la vez la conducen a la planta de tratamiento Wiesner. El agua tratada es conducida a través del túnel antiguo de Usaquén y Santa Bárbara.

De los análisis de vulnerabilidad con respecto a la red de distribución los túneles mencionados anteriormente son vulnerables a fallas; por lo tanto, se proyectó la construcción del túnel alterno de 2,5 km que mitigue dicha vulnerabilidad (túnel alterno de Usaquén).

Este túnel es paralelo al existente, está separado 300 m y tiene una pendiente de 0,96 %. Así mismo, se compone de una sección de 15,05 m² en forma de herradura, con un diámetro de 4,30 m, con paredes rectas de 1,95 m de alto y una solera recta de 3,36 m. El portal de entrada se ubica en el embalse San Rafael y el portal de salida conecta con el túnel existente Los Rosales.

Se inició la excavación del túnel por el portal de salida mediante el sistema de perforación y voladura, con martillos neumáticos e hidráulicos, efectuando el retiro de la rezaga con retroexcavadora y volquetas durante los primeros 40 m del túnel. Luego la excavación continuó con una rozadora Alpine ATM 75, compuesta por un cabezal de corte transversal, complementada con dos vagonetas de 15 m³ cada una, apoyadas en rieles para el retiro de la rezaga.

Dado que los rendimientos de excavación no eran los esperados, por el portal de entrada se inició la excavación mediante el sistema de perforación y voladura, complementado con retroexcavadoras y equipo de llantas para el retiro de la rezaga, avanzando 430 m. Al completar el avance por el portal de entrada, se mantuvieron los trabajos por el portal de salida, hasta que se logró el empalme de las excavaciones.

A continuación, se describen los parámetros y características básicas que se tuvieron en cuenta para el diseño del túnel:

Descripción	Cantidad
Longitud (m)	2.496
Área de excavación (m ²)	15,05
Pendiente longitudinal (%)	0,96
Altura hastiales (m)	1,95
Cabeza normal de operación (m)	31,1
Cota piso portal entrada (msnm)	2.813,70
Cota piso portal salida (msnm)	2.789,80
Volumen de excavación (m ³)	37.600
Longitud terreno tipo II (m)	1.497
Longitud terreno tipo III A (m)	799
Longitud terreno tipo III B (m)	200
Longitud de revestimiento en concreto convencional (m)	2.496
Volumen de concreto convencional (m ³)	9.115
Longitud de blindaje en acero portal entrada (m)	20
Longitud de blindaje en acero portal salida (m)	105
Espeso lámina blindaje (mm) ASTM A516-70	12,5

Ilustración 19. Características del túnel.

Así mismo, a renglón seguido se describen las dimensiones y características de la rozadora empleada.

Dimensiones	
Largo total	14 m
Ancho del escudo de cargue	2800 mm
Capacidades y velocidades	2600 mm
Capacidades instaladas del motor	
Total	342 kW
Motor de corte	200 kW
Motor hidráulico de desplazamiento	70 kW
Motores de carga y transporte	2 x 36 kW
Velocidades	
Velocidad de corte	3,5 m/s
Velocidad de desplazamiento	4,2 - 12,7 m/min
Sistema eléctrico	
Diseño no es a prueba de explosión	1000 V/60 Hz
Perfil de corte	
Altura	5180 mm
Ancho	7000 mm
Corte por debajo	150 mm

Ilustración 20. Características de la rozadora.

De acuerdo con la información disponible de este caso histórico, el túnel se clasificó en tres tipos de terreno, los cuales se resumen a continuación:

Terreno tipo II

Se compone de rocas de dureza media alta, de estratificación media, poco fracturadas a moderadamente fracturadas. Para este tipo de terreno el soporte deberá ser sistemático, con limitación de avance de 3 m por ciclo.

El soporte consistirá en la colocación de 5 cm de concreto en la sección superior, luego la instalación de 4 a 5 pernos radiales de 2,5 m de longitud, con separación de 1,5 m. Después se pondrán 5 cm de concreto en las paredes del túnel, para finalmente colocar 10 cm de concreto en toda el área perimetral del túnel.

Terreno tipos IIIA y IIIB

Se compone de roca de dureza media a baja, de estratificación delgada, fracturada a muy fracturada, donde los planos de discontinuidad pueden estar alterados.

El terreno IIIB corresponde a sectores del túnel compuestos por bolsas de arena, materiales friables o zonas de falla con material muy fracturado. Para este terreno se deben instalar pernos antes de cada avance,

con el fin de controlar las deformaciones del frente. El avance para este tipo de terreno no puede ser mayor de 3 m.

El sistema de soporte para el terreno IIIA se resume a continuación:

1. Instalación de pernos en la parte superior del túnel.
2. Una capa de concreto en la sección superior.
3. Colocación de arcos metálicos tipo TH-21, espaciados 1,5 m.
4. Instalación de 7 a 8 pernos radiales alternados de 2,50 m de longitud, espaciados cada 1,50 m.
5. Aplicación de 10 cm de concreto en la parte superior del túnel y paredes.

Para el terreno IIIB, el sistema de soporte es el siguiente:

1. Inyecciones de consolidación, separadas 1,50 m.
2. Instalación de pernos en la parte superior del túnel.
3. Una capa de concreto en la sección superior.
4. Colocación de arcos metálicos tipo TH-21, espaciados 1,5 m.
5. Instalación de 7 a 8 pernos radiales alternados, de 2,50 m de longitud, espaciados cada 1,50 m.
6. Aplicación de 10 cm de concreto en la parte superior del túnel y paredes.

Finalmente, para ambos tipos de terreno se consideró la posibilidad de empujes laterales; por esta razón, se deben instalar pernos radiales.

Resumen de condiciones geotécnicas

El macizo rocoso se clasificó teniendo en cuenta las siguientes premisas:

1. Descripción del terreno.
2. Descripción del comportamiento del terreno en las condiciones del sistema de excavación y soporte.
3. Influencia del agua de infiltración.
4. Descripción de la secuencia de excavación.

Con base en los diseños se hizo un estimativo de las longitudes de tipos de terreno previstos para el túnel, como se describe a continuación:

Tipo de terreno	Longitud prevista (m)	Longitud encontrada (m)
Tipo II	1.496,99	1.609,90
Tipo IIIA	799,1	677
Tipo IIIB	200	209,2

Ilustración 21. Longitudes de tipos de terreno.

Tipo de terreno	Diferencia excavada vs. previsto (m)	Diferencia excavada vs. previsto (%)
Tipo II	112,9	107,5
Tipo IIIA	-122,1	84,7
Tipo IIIB	9,2	104,6

Ilustración 22. Diferencia entre longitud que hay que excavar y longitud ejecutada.

Así mismo, se describen las condiciones geotécnicas presentadas en las formaciones litológicas:

FORMACIÓN	CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA	SOPORTE SISTEMÁTICO	DESPRENDIMIENTOS	INFILTRACIONES
Arenisca Tierra	Terreno Tipo II = 66 m	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor	5 desprendimientos con sobre excavaciones de 0.60 y 0.70 m, ocasionados por la arcillolita blanda o lutita diaclasada	Escasas
	Terreno Tipo IIIA = 224 m	Arcos metálicos $\overline{IH21}$, 6 a 7 pernos distribuidos cada 1.5 y 1.0 m, concreto neumático de 15 a 30 cm de espesor		
	Terreno Tipo IIIB = 22 m	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor		
Arenisca Labor	Terreno Tipo II = 11.5 m	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor	7 desprendimientos con sobre excavaciones de 0.40 a 0.50 m ocasionados por arcillolita y arenisca blanda. 3 desprendimientos causaron sobre excavaciones de 1 y 2 m.	Escasas
	Terreno Tipo IIIA = 78.9 m	Arcos metálicos $\overline{IH21}$, 6 a 7 pernos distribuidos cada 1.5 y 1.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor		
	Terreno Tipo IIIB = 24.6 m	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor		
Plañers. Primer sector	Terreno Tipo II = 170 m	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor	Sin desprendimientos	Goteos lentos y rápidos en sitios puntuales
	Terreno Tipo II = 59 m	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor		
Plañers. Segundo sector	Terreno Tipo IIIA = 40 m	Arcos metálicos $\overline{IH21}$, 6 a 7 pernos distribuidos cada 1.5 y 1.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor	1 desprendimiento que formo una caverna de 1.7 m, debido a la presencia de limolitas en estratos delgados	Escasas
	Terreno Tipo IIIB = 15 m	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor		

Ilustración 23. Condiciones geotécnicas en función de la litología.

Las rocas de la formación Arenisca Dura se excavaron con rozadora un 70 % y con sistema de perforación y volcadura un 30 %. En el portal de entrada se realizó el 18 % de esta excavación y en el portal de salida, un 82 %.

FORMACION	CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA	SOPORTE	DESPRENDIMIENTOS	INFILTRACIONES
Arenisca Dura	Terreno Tipo II = 73%	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor	Desprendimientos menores de 0.40 a 1.0 m, compuestos por estratos de arena y diaclasas blandas con rellenos de arcilla.	Diferentes caudales que variaron entre 0.5 a 3 l/s.
	Terreno Tipo IIIA = 19%	Arcos metálicos $\overline{IH21}$, 6 a 7 pernos distribuidos cada 1.5 y 1.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor	Algunos desprendimientos de gran magnitud con sobre excavaciones de 0.60 y 1.0 m por factores como techo plano, diaclasas con bloques en cuña, fracturamiento intenso.	
	Terreno Tipo IIIB = 8%	4 a 5 pernos cada 2.0 m, concreto neumático de 15 a 20 cm de espesor		

Ilustración 24. Continuación tabla 22. Condiciones geotécnicas en función de la litología.

Propiedades físicas de la roca

A continuación se describen algunas propiedades de la roca, organizadas por sectores en función de las abscisas del túnel:

FORMACIÓN	ABSCISA	COMPRESIÓN INCONFINADA (MPa)	MÓDULO DE YOUNG E (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON (μ)
Promedio Sector	$k2+351.80/349.20$	47,63	3644,17	0,6
Promedio Sector	$k2+339.40/337.40$	35,49	3021,75	0,24
Promedio Sector	$k2+249.40/247.60$	57,75	6720	0,35
Promedio Sector	$k2+205.00/201.50$	33,1	4742	0,59
Promedio Sector	$k2+185.80/183.20$	57,8	7270,5	0,66
Promedio Sector	$k1+910.00$	67,3	6752	0,295
Promedio Sector	$k0+950.0$	21,5	1593	0,355
Promedio Sector	$k0+885.3/k0+887.7$	38,5	4884,0	0,5
Promedio Sector	$k0+977/k0+980$	35,3	2798,5	0,3
Promedio Sector	$k1+418.00$	47,9	5178,5	0,3
Promedio Sector	$k0+320.0$	7,1	1656,5	0,54
Promedio Sector	$k1+225.9$	46,9	7064,0	0,10
Promedio Total		38,78	4183,9	0,4

Ilustración 25. Propiedades de la roca.

Sistema de ventilación

En el portal de entrada se instalaron dos ventiladores en serie: uno de 24” de 25 HP y otro de 36” de 30 HP de potencia. En el interior del túnel se operaron ventiladores dobles de 24” de 25 HP, para reimpulsión de aire.

Para el portal de salida se implementaron dos ventiladores en serie, cada uno de 60 HP y 27” de diámetro.

Datos medidos

Con base en los datos medidos, se elaboraron gráficas en las que se describe el avance mensual de la excavación mediante el sistema de excavación con máquina rozadora:

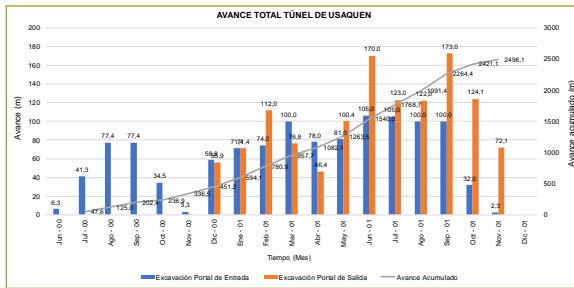


Ilustración 26. Avance de excavación mensual.

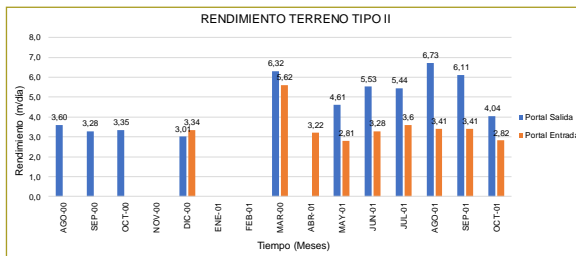


Ilustración 27. Avance de excavación mensual para tipo de terreno II.

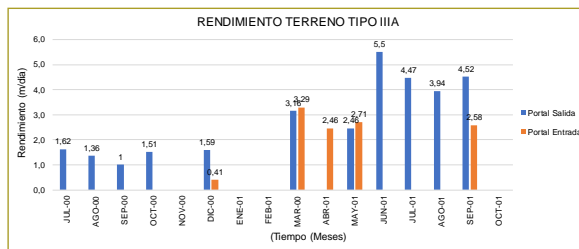


Ilustración 28. Avance de excavación mensual para tipo de terreno IIIA.

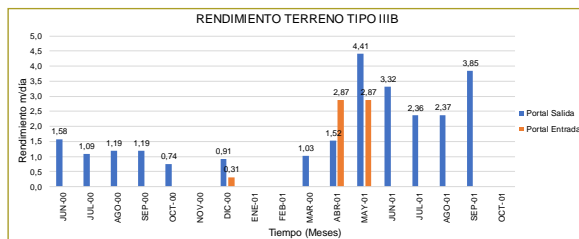


Ilustración 29. Avance de excavación mensual para tipo de terreno IIIB.

Tomando en cuenta los datos medidos durante el proyecto, se tienen los siguientes rendimientos:

Promedio portal entrada	Promedio portal salida
Terreno II = 3,50 m/día	Terreno II = 4,73 m/día
Terreno IIIA = 2,29 m/día	Terreno IIIA = 2,88 m/día
Terreno IIIB = 1,76 m/día	Terreno IIIB = 1,97 m/día

Ilustración 30. Rendimientos promedio medidos por cada portal del túnel.

RESULTADOS

Túnel Tunjita: Sistema de perforación y voladura

Con base en la teoría encontrada en la bibliografía y la experiencia obtenida en bastantes proyectos, se elaboraron hojas de cálculo en las que se anota la duración de las actividades previstas para el sistema de perforación y voladura.

Para calcular la duración en tiempo de la actividad topográfica, se estima un rendimiento de 1 min/m² con base en la sección del túnel.

La duración en tiempo de la actividad de barrenado se calculó con base en la velocidad de penetración de la roca, en función de la potencia del jumbo, la dureza de la roca, el diámetro de los barrenos, el espaciamiento de las discontinuidades y el índice de perforabilidad (López, Arnaiz, López & García, 2013) (López, 1997).

El tiempo de cargue de los barrenos con los explosivos se estimó con base en un rendimiento de 4 m/min, mientras que la ventilación se calculó con base en el caudal de salida de aire de los ventiladores, la distancia entre el frente de trabajo y la boca del ventilador, y el factor relacionado con la cantidad de CO₂ (López, 1997).

El tiempo empleado para el retiro de la rezaga se calculó con base en la sección del túnel, el peso específico del material, el factor de expansión, el tipo de equipo de transporte, el tipo de equipo de carga, los tiempos muertos, los tiempos de maniobra y las condiciones de operación (López, García, Díez & López, 2013).

Finalmente, el tiempo empleado para la instalación del soporte se halló teniendo en cuenta un rendimiento propuesto entre 2 y 6 m³/h para el concreto lanzado, un rendimiento de 3,50 kg/min para la instalación de arcos metálicos, y un rendimiento de 0,60 m/min para la instalación y fraguado de pernos e inyecciones de consolidación. A continuación se describe el resumen de los cálculos ejecutados:

Longitud del túnel		13860 m	
Sistema de perforación y voladura convencional		6688 m	
Tipo de terreno	Longitud tramo (m)	Tipo de soporte	
I	6036	Concreto lanzado, solera o inyección de contacto	
II	257	Concreto, inyecciones de consolidación	
IIIa	395	Concreto lanzado, cerchas y pernos	
ACTIVIDAD PARA TIPO DE TERRENO I		Duración (h)	
1. Topografía		0,39	
2. Barrenado		1,80	
3. Cargue y ventilación		1,78	
4. Retiro de rezaga		3,78	
5. Soporte		4,34	
	Tiempo por ciclo	12,08	
ACTIVIDAD PARA TIPO DE TERRENO II		Duración (h)	
1. Topografía		0,39	
2. Barrenado		1,30	
3. Cargue y ventilación		1,46	
4. Retiro de rezaga		1,98	
5. Soporte		3,53	
	Tiempo por ciclo	8,66	
ACTIVIDAD PARA TIPO DE TERRENO IIIa		Duración (h)	
1. Topografía		0,39	
2. Barrenado		1,10	
3. Cargue y ventilación		1,35	
4. Retiro de rezaga		1,48	
5. Soporte		4,26	
	Tiempo por ciclo	8,57	
ACTIVIDAD		Duración promedio por ciclo (h)	
	Chivor	Tesis	
1. Topografía y barrenado	2,03	2,12	
2. Cargue y ventilación	1,79	1,74	
3. Retiro de rezaga	3,24	3,58	
4. Soporte	4,24	4,30	
	11,30	11,74	
ACTIVIDAD		Rendimiento (m/día)	
	Chivor	Tesis	
	1,70	1,63	

Ilustración 31. Cálculos elaborados mediante la metodología propuesta para el sistema de perforación y voladura.

Cabe destacar que la duración del retiro de la rezaga es mayor con respecto al promedio medido, dado que durante los cálculos del número de vagones era suficiente para el ciclo de transporte tener ocho vagones; sin embargo, el proyecto disponía de diez. Con respecto a las demás actividades, se tienen resultados similares.

Túnel Tunjita: Sistema de perforación con máquina tuneladora

Como ya se mencionó, la duración de la topografía se estimó con base en un rendimiento de 1 min/m². El cálculo de la perforación se hizo teniendo en cuenta la metodología propuesta por Bruland, Universidad de Noruega (Bruland, 2014) (Bruland, 2015), cuyos parámetros de entrada son los siguientes: distancia entre plano de debilidad, diámetro del disco de corte, separación entre discos de corte, tipo de macizo rocoso,

diámetro de la TBM, porosidad de la roca y número de discontinuidades. Con dichos parámetros, se halla la penetración neta, el torque y la potencia necesarios para realizar el trabajo de perforación. A renglón seguido se describe el resumen de los cálculos ejecutados:

Longitud del túnel		13860 m	
Sistema de perforación con tuneladora		7172 m	
Tipo de terreno	Longitud tramo (m)	Tipo de soporte	
I	5879	Concreto lanzado, con solera	
II	1293	Concreto lanzado, cerchas y pernos	
PARAMETROS DE LA TUNELADORA			
1. N° discos		Proyecto	Tesis
2. Diametro discos de corte 14" (mm)		356	34
3. Potencia cabezal de corte 750 HP (KW)		559,3	585,4
4. RPM motor		5,56	7,17
ACTIVIDAD PARA TIPO DE TERRENO I		Rendimiento (m/h)	
1. Topografía		0,39	
2. Perforación		1,33	
		1,71	
ACTIVIDAD PARA TIPO DE TERRENO II		Rendimiento (m/h)	
1. Topografía		0,39	
2. Perforación		1,24	
		1,62	
ACTIVIDAD		Rendimiento (m/h)	
	Chivor	Tesis	
1. Topografía		1,63	
2. Perforación		1,70	
Rendimiento (m/día)			
	Chivor	Tesis	
	9,88	10,28	

Ilustración 32. Cálculos elaborados mediante la metodología propuesta para el sistema de perforación con máquina tuneladora.

Vale la pena señalar que el rendimiento estimado mediante la guía propuesta en la tesis es mayor con respecto a la medida, debido a que durante los cálculos del número de discos, la potencia del cabezal de corte y las revoluciones por minuto son mayores, por lo que desarrolla un mayor rendimiento.

Los rendimientos estimados para el sistema de perforación y voladura, y excavación con máquina tuneladora, tienen un margen de error del 4 y 2 %, respectivamente, valores considerados muy bajos.

Túnel de Usaquéen: Sistema de perforación con máquina rozadora

El cálculo del tiempo para las actividades de topografía, ventilación, retiro de rezaga y soporte se mencionaron

anteriormente; por lo tanto, el tiempo empleado para efectuar los trabajos de rozado se calculó teniendo en cuenta el peso específico de la roca, los valores de compresión axial y tensión de la roca, el tipo de cabezal de corte (transversal o axial), el valor de RQD, la potencia de la rozadora, el peso de la rozadora y el índice de corte o perforabilidad (López, García & Torija, 2012). A continuación, se describe el resumen de los cálculos ejecutados:

Longitud del túnel		m		
Sistema de perforación con rozadora		2495 m		
Tipo de terreno	Longitud tramo (m)	Tipo de soporte		
II	1609			
IIIA	677			
IIIB	209			
ACTIVIDAD PARA TIPO DE TERRENO II		Duración (h)		
1. Topografía		0,25		
2. Rozado		2,36		
3. Ventilación		0,88		
4. Retiro de rezaga		0,92		
5. Soporte		1,23		
	Tiempo por ciclo	5,64		
ACTIVIDAD PARA TIPO DE TERRENO IIIA		Duración (h)		
1. Topografía		0,25		
2. Rozado		1,77		
3. Ventilación		0,75		
4. Retiro de rezaga		0,69		
5. Soporte		4,92		
	Tiempo por ciclo	8,38		
ACTIVIDAD PARA TIPO DE TERRENO IIIB		Duración (h)		
1. Topografía		0,25		
2. Rozado		1,18		
3. Ventilación		0,62		
4. Retiro de rezaga		0,46		
5. Soporte		7,49		
	Tiempo por ciclo	9,99		
RENDIMIENTO (m/día)				
TERRENO	PORTAL ENTRADA	PORTAL SALIDA	PROMEDIO	TESIS
Tipo de terreno II	3,50	4,73	4,12	4,26
Tipo de terreno IIIA	2,29	2,88	2,59	2,87
Tipo de terreno IIIB	1,76	1,97	1,87	2,40

Ilustración 33. Cálculos elaborados mediante la metodología propuesta para el sistema de perforación con máquina rozadora.

Cabe señalar que el rendimiento estimado mediante la guía propuesta para el tipo de terreno IIIB es alto con respecto al promedio, debido a que en esos tramos de túnel se realizaron obras de consolidación del terreno, pero en la información suministrada no se tenían detalles de dicha actividad; por lo tanto, esto afecta el cálculo final del rendimiento.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una guía que permite calcular de manera racional el rendimiento de excavación de un túnel,

mediante diferentes sistemas de perforación a partir de metodologías encontradas en la bibliografía. La guía se comparó con datos medidos en campo para corroborar la validez de ésta, obteniendo buenos resultados.

Se evaluó el caso de un túnel excavado en el departamento de Boyacá (túnel de desvío río del Tunjita), donde cada portal del túnel se excavó por medio de un sistema de excavación independiente. Para el cálculo del rendimiento mediante la guía propuesta, se manejaron los mismos datos del índice de resistencia a la perforación (DRI, por su sigla en inglés), así como los valores de resistencia a la compresión de la roca; a su vez, los rendimientos estimados para el sistema de perforación y voladura y excavación con máquina tuneladora tienen un margen de error del 4 y 2 %, respectivamente, valores considerados muy bajos.

El sistema de perforación y voladura en el túnel del río Tunjita obtuvo un rendimiento medido en campo de 1,70 m/día, mientras que el valor estimado fue de 1,67 m/día. De lo anterior se puede concluir que la metodología propuesta es acertada, aun cuando presenta un margen de error mínimo. Así mismo, para el sistema de excavación con máquina tuneladora en el túnel de desvío del río Tunjita, se obtuvo un rendimiento medido de 9,88 m/día, mientras que el valor calculado arrojó un valor de 10,28 m/día, corroborando la validez de la guía. Es de anotar que, de acuerdo con la información suministrada, la temperatura ambiente fue muy alta y ocasionó disminución del rendimiento. Para efectos de esta tesis, lo anterior no se tuvo en cuenta debido a que es un parámetro difícil de establecer.

El retiro de la rezaga se realizó mediante dos locomotoras, complementada cada una con diez vagones de 1,2 m³ de capacidad. Durante los cálculos efectuados mediante la guía se notó que para cada ciclo de transporte eran suficientes ocho vagonetas de dicha capacidad. Esto ratifica la recomendación de uso de la guía de cálculo.

Con respecto al soporte del túnel, en su mayoría se implementó el empleo de concreto lanzado, ya que las propiedades del macizo rocoso en general eran buenas, con un predominio de areniscas duras a lo largo del perfil excavado. Sin embargo, el rendimiento en el lanzado del concreto no fue el mejor debido a que la voladura ocasionó expansiones hasta de 51 cm en varios tramos de la sección del túnel, generando retrasos por el tiempo de fraguado necesario para poder aplicar la otra capa de

concreto, con el fin de llegar al radio de excavación de diseño. Para este caso especial, por dicha condición, el rendimiento propuesto fue de 2,75 m³/h.

Para el caso del portal del túnel excavado con máquina tuneladora, se implementó la metodología de cálculo propuesta por Bruland (2015), desarrollada por la Norwegian University of Science and Technology (NTNU, por su sigla en noruego), la cual se adaptó muy bien a los datos registrados en campo. Lo anterior se justifica si se considera que la máquina tuneladora estaba compuesta por un cabezal de 35 discos de 14" de diámetro (256 mm), impulsada con 6 motores de 125 HP (559,3 kW), trabajando a 5,56 rpm, mientras que los cálculos efectuados demuestran que se necesitaban 34 discos de corte con diámetro de 256 mm, con motores que generaran 585,4 kW, trabajando a 4,49 rpm.

Al revisar el caso del túnel de Usaquén, excavado con máquina rozadora, en el que se contó con los datos de los rendimientos de cada tipo de terreno, se obtuvo que el rendimiento calculado con la guía propuesta tiene un margen de error del 3, 10 y 20 % para tipo de terreno II, IIIA y IIIB, respectivamente, considerando valores muy bajos para los dos primeros. Sin embargo, en el terreno IIIB se ejecutaron obras de consolidación del terreno, pero en la información suministrada no se tenían detalles de dicha actividad, por lo que esto afecta el cálculo final del rendimiento. Así mismo, se tuvieron problemas de visibilidad, ventilación por efecto del polvo, aspectos que son difíciles de evaluar.

El retiro de la rezaga se realizó mediante dos locomotoras, complementada cada una con dos vagones de 15 m³ de capacidad. Durante los cálculos efectuados mediante la guía se obtuvo que para cada ciclo de transporte estaba bien implementar dos vagonetas de dicha capacidad, ratificando que la guía de cálculo es acertada.

RECOMENDACIONES

Con respecto al sistema de perforación y voladura, es clave siempre desarrollar un diseño de voladuras de contorno en el perímetro del túnel para evitar sobreexcavaciones y, por ende, mayor disponibilidad de tiempo en la implementación de soportes.

Es importante evaluar, mediante ensayos de laboratorio, los parámetros S20 y SJ para calcular el índice de perforabilidad, ya que es uno de los factores principales

para estimar la velocidad de perforación. En la información obtenida de los túneles evaluados, los valores se consiguieron mediante correlaciones en función del valor de la compresión inconfínada de núcleos de roca.

Así mismo, resulta necesario tener ensayos de abrasividad, con el fin de estimar la vida útil de los accesorios de los equipos de perforación. No se deben considerar correlaciones en función de la compresión inconfínada de núcleos de roca.

Con respecto al sistema de excavación mediante máquina tuneladora, el muestreo de ensayos de permeabilidad y porosidad deben efectuar con mayor frecuencia, ya que, en los datos obtenidos del túnel en estudio, sólo se describían dos valores de porosidad. Lo anterior modifica significativamente el rendimiento de excavación.

Hay que tomar en cuenta factores de temperatura ambiente o parámetros de evaluación de *squeezing*, *swelling*, *rock burst*, etc., con el fin de afectar el rendimiento de excavación mediante cualquier metodología.

Finalmente, se hace un llamado a la cooperación entre empresas nacionales o extranjeras, que hayan efectuado el diseño y construcción de túneles en Colombia, con el fin de compartir los datos medidos en campo y las experiencias vividas durante la construcción, con el fin de retroalimentar las teorías de cálculo de rendimientos de excavación.

Agradecimientos

Esta tesis no se habría culminado con éxito sin el apoyo del ingeniero Ramiro Gutiérrez. Gracias por sus comentarios, ideas y observaciones dadas a lo largo del desarrollo de este artículo.

REFERENCIAS

- Abdolreza, Y.-C., & Siamak, H. Y. (2013). A new model to predict roadheader performance using rock mass properties. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 19(1), 51–56. <https://doi.org/10.1007/s12404-013-0109-4>.
- Bruland, A. (2014). Design and Construction. *Hard Rock Tunnel Boring*, 2 (November). <https://doi.org/10.13140/2.1.4074.8482>
- Bruland, A. (2015). Advance Rate and Cutter Wear. *Hard Rock Tunnel Boring*, 3(February). <https://doi.org/10.13140/2.1.3050.3204>.
- Clavijo, S., Vera, A., & Vera, N. (2012). *La inversión en infraestructura en Colombia, 2012-2020*.
- Khademi Hamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., & Rostami, J. (2010). Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system. *Tunnelling and Underground*

- Space Technology*, 25(4), 333–345. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.01.008>.
- López Jimeno, C. (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico.
- López Jimeno, C., Arnaiz de Guezala, R., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2013). *Manual de perforación de túneles*. <https://doi.org/10.1590/S1516-18462008000300012>.
- López Jimeno, C., García Bermúdez, P., & Torija Maillo, M. (2012). *Manual de excavación de túneles con rozadoras*. Madrid: Universidad de Madrid.
- López Jimeno, C., García Bermúdez, P., Díez López, J., & López Jimeno, E. (2013). *Manual de equipos de desescombro en túneles*.pdf.
- Nelson, P. P., Ingraffea, A. R., & O'Rourke, T. D. (1985). TBM performance prediction using rock fracture parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(3), 189–192. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93234-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)93234-6).

Dimensionamiento de piscinas de sedimentación en proyectos mineros a cielo abierto. Metodología

Sedimentation pools sizing in open pit mining projects. Methodology

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ - ANDRÉS HUMBERTO OTÁLORA CARMONA²

1. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - andres.otalora@escuelaing.edu.co

Recibido: 31/07/2019 Aceptado: 15/08/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la investigación realizada por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, cuyo objetivo es el dimensionamiento de piscinas de sedimentación del material transportado por la escorrentía proveniente de botaderos construidos como zonas de acopio de material residual, generado por actividades mineras a cielo abierto.

En la metodología propuesta se consideran la evaluación y la estimación de caudales medios, máximos y mínimos de escorrentía en un punto de entrega y en un punto de vertimiento, el dimensionamiento de la piscina de sedimentación y el diseño de la estructura de descarga hacia las corrientes receptoras.

Palabras claves: piscina de sedimentación, escombreras, minería a cielo abierto, manejo de escorrentía.

Abstract

This article presents the results of a research performed by the Center for Hydraulic Studies of Escuela Colombiana de Ingeniería, whose objective is sizing the sedimentation pools of the material transported by the runoff coming from dumps built as material stocks, generated by open pit mining activities. The proposed methodology considers the evaluation and modifications of the maximum and minimum flows at a delivery point, at a discharge point, the sedimentation pool sizing, and the design of the discharge structure towards the receiving currents.

Keywords: sedimentation pool, slag heaps, open pit mining, runoff management.

INTRODUCCIÓN

La escorrentía que se genera en las escombreras o botaderos ubicados en las zonas de explotación minera a cielo abierto se debe descargar previamente en una piscina de sedimentación, con el propósito de retener los sólidos transportados por la escorrentía proveniente de esas superficies. En razón de que la disposición final de esta escorrentía son cuerpos de agua o corrientes naturales, es necesario controlar la carga de sólidos que llegan al cauce. Una piscina de sedimentación debe asegurar que la escorrentía vertida cumple los requerimientos exigidos, relacionados con el volumen de sedimentos transportados.

La función primordial de las piscinas de sedimentación será retener las aguas por un periodo de tiempo suficientemente largo, que permita su clarificación. Esto se logra al decantar los sólidos que arrastran en suspensión y posibilitar el almacenamiento de esos materiales hasta que se realice la limpieza de dicha estructura. Una piscina de sedimentación es, básicamente, un depósito sencillo para embalsar agua, que posee poca profundidad (entre 1 y 4 m, por lo general), la cual se puede excavar en tierra o conformar con diques, buscando que su base y paredes estén hechas con materiales de baja permeabilidad.

Una de las variables que hay que considerar para el diseño de las piscinas es el volumen de agua, lo cual condiciona el tiempo de retención y el proceso de sedimentación. El volumen y, por tanto, las dimensiones de la piscina son función del volumen del caudal proveniente de los botaderos, la morfología y superficie de estos, la intensidad de la lluvia y el porcentaje de retención de los sólidos que se necesite.

Como punto de partida de este trabajo se han tomado como referencia las recomendaciones hechas por varios autores, quienes proponen que el volumen de la piscina debe permitir el almacenamiento del volumen de escorrentía generada por un evento de lluvia con una recurrencia de 10 años y con una duración de 24 horas.

De la misma manera, los puntos de vertimiento de las piscinas se deben definir con base en la localización de los botaderos, el manejo particular de la escorrentía y la ubicación de los cuerpos de agua más cercanos a donde se hará el vertimiento.

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para el dimensionamiento de las piscinas se deben analizar la hidrología de la zona donde se encuentra ubicada la escombrera y las características morfométricas e hidráulicas de la cuenca que conforma la escombrera, de modo que sea posible evaluar el comportamiento de la escorrentía y su tiempo de concentración.

Para el desarrollo de los estudios hidrológicos e hidráulicos se recopiló información de tipo espacial, proveniente de mapas disponibles en diversas fuentes, al igual que información de series de tiempo de datos pluviométricos, hidrométricos y climatológicos. Como paso previo a la adquisición de información se hizo un inventario de la información disponible, consultando las diferentes fuentes existentes, y se evaluaron las características de datos para establecer la necesidad o no de ésta.

METODOLOGÍA

El objetivo principal de este trabajo es recomendar una metodología para el dimensionamiento de piscinas de sedimentación utilizadas para almacenar temporalmente las aguas lluvias provenientes de botaderos o escombreras construidas como parte de las actividades de extracción minera a cielo abierto. En los siguientes apartados se presentan, de manera general, el procedimiento y las recomendaciones para el dimensionamiento de dichas piscinas.

Características morfológicas y geomorfológicas de la cuenca

La caracterización de la cuenca de drenaje definida por la escombrera y sus áreas aferentes es una actividad fundamental. La cuenca o las subcuencas deben trazarse de tal modo que sus áreas representen la superficie de la escombrera cuya escorrentía descargará en un punto de control, que corresponderá al punto de alimentación de la piscina de sedimentación. El número de cuencas o subcuencas definidas en cada escombrera dependerá de la complejidad, el tamaño, la distribución y las características particulares del drenaje en la escombrera. Se deben evaluar el límite de la cuenca, el área de drenaje, la pendiente de la cuenca, la longitud del drenaje, la diferencia de elevación, el tiempo de concentración, el

número de subcuencas y el número de curva (CN). Para la evaluación de dichos parámetros es necesario tener en cuenta las particularidades morfológicas de los botaderos, puesto que la disposición del material depende de la organización de los procesos de acopio del material.

Criterios de diseño

En estos criterios se han considerado diferentes metodologías, en las que se toman en cuenta la información disponible, el amortiguamiento de los caudales de entrada, las características de los sedimentos transportados y su sedimentación, el volumen de almacenamiento, el área disponible y las características de las estructuras de descarga. En el caso particular de la evaluación hidrológica para el dimensionamiento del volumen de las piscinas, se ha definido como lluvia de diseño una lluvia particular que considera el tiempo de retención en el almacenamiento. Las condiciones hidráulicas tienen en cuenta condiciones de flujo no permanente, con el propósito de evaluar el almacenamiento temporal y el amortiguamiento de los caudales con los cuales se diseñan las estructuras de descarga. Dadas las condiciones del vertimiento hacia cuerpos naturales, se debe definir una batería de alcantarillas que puede constar de una o más hileras de baterías.

Criterios hidrológicos para el dimensionamiento de la piscina

Los principales criterios de diseño para la evaluación hidrológica de las superficies de los botaderos toman en cuenta la frecuencia del evento de lluvia considerado y su duración.

En general, para este tipo de sistemas no existe un solo criterio que permita establecer un periodo de retorno. En la mayoría de los casos, el periodo de retorno está asociado con el tipo de estructura hidráulica y el riesgo asociado a ésta, y con los valores tomados de las experiencias. En el caso particular de las obras asociadas con un sistema de acopio de material, el tiempo de operación del botadero es un referente importante para la determinación del periodo de retorno. También resulta clave considerar, de acuerdo con la superficie y los volúmenes finalmente acopiados, la magnitud de los caudales máximos de entrada y de salida, al igual que el volumen de la piscina de retención.

- **Periodo de retorno.** Debido a las condiciones del sistema, se tienen dos propósitos: el primero es asegurar la sedimentación del material transportado por la escorrentía, para lo cual es necesario asegurar un tiempo de viaje de los volúmenes ingresados en la piscina para que el sedimento se deposite. El otro propósito es amortiguar, mediante un almacenamiento temporal, la escorrentía proveniente del botadero. De acuerdo con estos criterios, se requiere que el periodo de retorno del evento de entrada sea mayor que el periodo de retorno del evento de salida, si se exige un almacenamiento temporal que asegure adicionalmente un amortiguamiento del evento extraordinario. Para la determinación del periodo de retorno para el dimensionamiento de las piscinas de sedimentación del material proveniente de escombreras, se recomienda usar las sugerencias presentadas en el libro *Surface Mining*, especialmente en el capítulo “Planning and Design of Surface Mines”, en el cual se propone dimensionar las piscinas de tal manera que su volumen permita el almacenamiento del volumen de escorrentía que genera un evento de lluvia con una recurrencia de diez años (consecuente con el tiempo de operación de la zona de acopio). Para el diseño y estimación del número de alcantarillas ubicadas en la parte inferior, el caudal establecido corresponde a un periodo de retorno de cinco años y deben funcionar a superficie libre. Para el dimensionamiento de todo el sistema de descarga, que puede incluir unas alcantarillas adicionales localizadas en la parte superior de la primera batería, se determinó un periodo de retorno de diez años. En este caso, la batería de tuberías inferiores trabaja a presión y la batería superior, a superficie libre.

- **Curvas de intensidad - duración - frecuencia. Lluvia de diseño.** La intensidad de la lluvia de diseño se puede calcular con base en las curvas de intensidad - duración - frecuencia (IDF) disponibles para las estaciones ubicadas en la zona de estudio. Estas estaciones deben tener registros de precipitación con duraciones inferiores a un día y un número de años adecuado.

Alternativamente, si no existiera información pluviográfica, es posible construir curvas IDF sintéticas a partir de datos de estaciones pluviométricas de la zona de estudio o cercanas a ellas. Así, por ejemplo,

Wilches (2001) propone la teoría de escalamiento simple y multiescalamiento utilizando la precipitación máxima en 24 horas, tomada de los registros de un año para obtener la intensidad de la lluvia con una duración cualquiera, inferior a 24 horas; por tanto, a partir de registros diarios de precipitación, se pueden obtener valores de intensidad. En esta metodología, la relación entre intensidades es función de la duración de la lluvia, así:

$$\frac{I_T^d}{I_T^{105}} = \frac{46,2}{d^{0,75}} - \frac{43,05}{d}, \text{ para } 5 \leq d \leq 105$$

$$I_{d,q} = \frac{E[I_{24}]^2}{\sqrt{E[I_{24}^2]}} \text{EXP} \left[\phi_q \sqrt{\ln \left(\frac{E[I_{24}^2]}{E[I_{24}]^2} \right)} \right]$$

$$\left(\frac{d}{1440} \right)^{-0,85} \text{ para } 105 \leq d \leq 105$$

Ecuación 1. Curvas de intensidad - duración - frecuencia sintéticas.

Fuente: Wilches (2001).

Donde:

d: Duración de la lluvia en minutos.

q: Probabilidad de no excedencia (asociada al periodo de retorno).

$E[I_{24}]$: Valor esperado de la intensidad máxima para una duración de 24 horas.

$E[I_{24}^2]$: Valor del momento de orden dos de la intensidad para una duración de 24 horas.

ϕ_q : Cuartil de la distribución normal acumulada estándar inversa para una probabilidad de no excedencia *q*. Para duraciones de entre 5 y 105 minutos, las anteriores ecuaciones pueden escribirse como:

$$I_T^d = K \left(\frac{46,2}{d^{0,75}} - \frac{43,05}{d} \right)$$

En tanto que para duraciones de entre 105 y 1440 minutos, se pueden escribir así:

$$I_T^d = K d^{-0,85}$$

Donde *I* es la intensidad mm/min, *d* es la duración en minutos, *T* es el periodo de retorno en años

y *K* es la constante para cada periodo de retorno (Tabla 1).

Tabla 1
Constante de las curvas IDF por el método de Wilches (2001)

105<d<1440		5<d<105	
T (periodo de retorno)		T (periodo de retorno)	
T	K	T	K
2,33	1464,2	2,33	30,8
5	1938,2	5	40,7
10	2334,5	10	49,0
25	2846,7	25	59,8
50	3236,0	50	68,0
100	3631,3	100	76,3

Fuente: Wilches (2001).

A renglón seguido se muestra una curva IDF sintética, creada a partir de una estación pluviométrica ubicada en el departamento del Cesar (Colombia) (Figura 1).

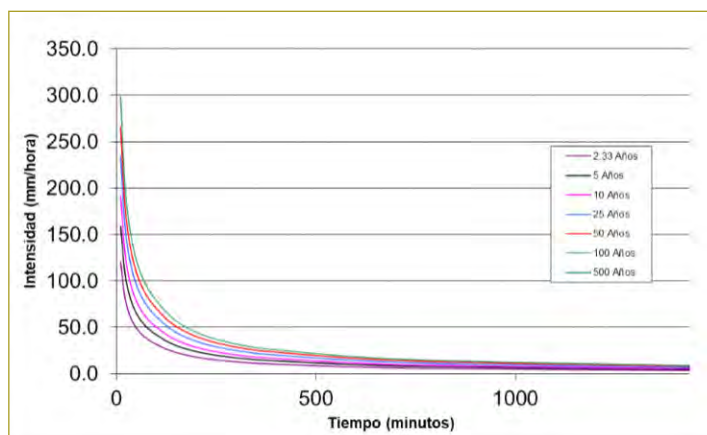


Figura 1. Curva IDF sintética de una estación pluviométrica. Cesar (Colombia).

- **Tiempo de concentración.** El tiempo de concentración depende de las características físicas de la cuenca, tales como la pendiente, el área, el tipo de suelo, la topología de la superficie, la longitud del drenaje, etc. Debido al tamaño de las áreas de drenaje definidas por las escombreras, se recomienda emplear ecuaciones utilizadas para cuencas con superficies de entre 0,1 y 5 km². Ecuaciones como

las de Chow et al. (1994), Smith y Vélez (1997), Linsley et al. (1990), Viessman y Lewis (2003), Vélez y Botero (2011) pueden resultar útiles para evaluar el tiempo de concentración en las superficies de las escombreras (tabla 2).

Tabla 2
Ecuaciones sugeridas para evaluar el tiempo de concentración en una escombrera

California Culvert Practice (1942)	$t_c = 60 \cdot \left[\frac{0,87075 \cdot L^3}{H} \right]^{0,385}$
Kirpich (1940)	$t_c = 0,0078 \cdot L_p^{0,77} \cdot S^{-0,385}$
Temez (1978)	$T_c = 0,3 \cdot \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76}$
Johnstone Cross (1949)	$T_c = 5 \cdot \left(\frac{L_m}{\sqrt{S}} \right)^{0,5}$
California USBR	$T_c = 0,066 \cdot \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0,77}$

Fuente: Diferentes referencias bibliográficas.

- **Tiempo de retardo, t_{lag} .** Definido como el tiempo transcurrido entre la mediatriz del hietograma y el

pico del hidrograma, el SCS recomienda que este valor de t_{lag} se tome como $0,6 \cdot T_c$, valor que se sugiere que también se emplee en este tipo de superficies.

- **Lluvia de diseño.** Se calcula como la lluvia de diseño que tiene una duración de 24 horas y un periodo de retorno de 10 años, con el propósito de obtener el hidrograma con el cual se dimensionará la piscina. De la misma manera, es necesario calcular otra lluvia de diseño para el dimensionamiento de la descarga. Esta lluvia tiene una duración de 24 horas y un periodo de retorno de 5 años.

Para el análisis de la distribución temporal de estas lluvias de diseño es posible utilizar diferentes recomendaciones de la bibliografía¹. Parte de estos estudios corresponden al análisis temporal de las tormentas y de los aguaceros más intensos en la zona del departamento del Cesar (Colombia).

A continuación se presentan los resultados del análisis temporal de la lluvia definidos por la Escuela. Se puede observar, para una duración dada de la lluvia, el porcentaje de precipitación acumulada con respecto a la precipitación total en 24 horas. Así mismo, más adelante se presenta el valor acumulado de la lluvia de 24 horas obtenida de los análisis realizados en la referencia 1, para una duración de la lluvia de 24 horas expresada en porcentaje (figura 2).

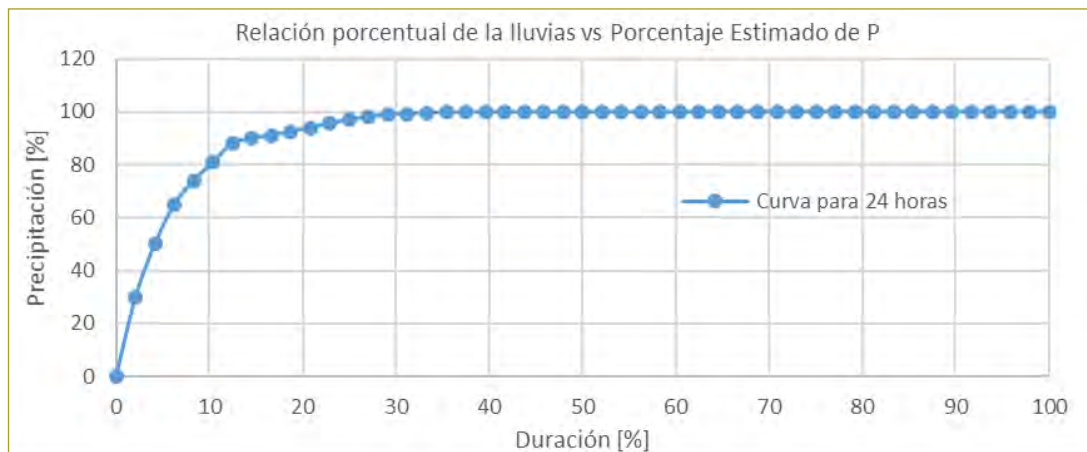


Figura 2. Relación porcentual de la duración de la lluvia vs. porcentaje estimado de la precipitación en 24 horas.

Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2020).

1. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Informe de consultoría para la evaluación de estudios hidrológicos e hidráulicos en las cuencas en estado natural que conforman el área minera del centro del Cesar. Caudales máximos y mínimos.

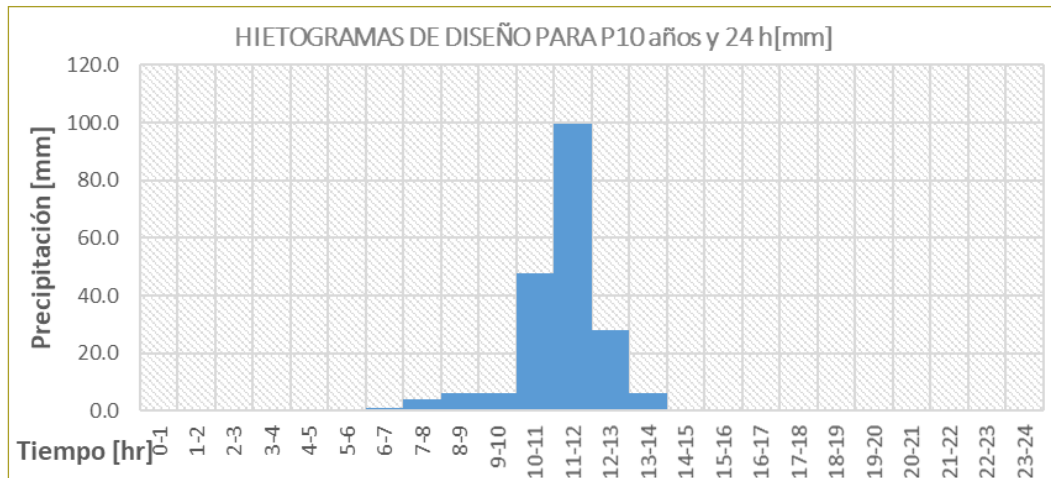


Figura 3. Histograma de diseño para una lluvia de 10 años de periodo de retorno y 24 horas de duración.

Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2020).

A continuación se presenta la distribución temporal de una lluvia con una duración de 24 horas, con base en los datos de la figura anterior. Los pulsos de lluvia se han organizado (distribuido) utilizando el método de los bloques alternos (figura 3).

- **Infiltración inicial** La infiltración inicial (I_a) se estima utilizando la recomendación del SCS, que propone el 20 % del encharcamiento máximo o potencial (S). En la Ecuación 2 se presenta la expresión para realizar dicha evaluación.

$$I_a = 0,2S \text{ con } S[\text{mm}] = \frac{25.400}{\text{CN}} - 254$$

Ecuación 2. Infiltración inicial. Abstracción, método SCS.

- **Escorrentía superficial. Modelo HEC-HMS.** Para la estimación de los caudales máximos hay un número importante de ecuaciones empíricas y metodologías desarrolladas a partir de los conceptos de transformación lluvia-escorrentía. El modelo de dominio público HEC-HMS, del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, y particularmente el método del hidrograma unitario del Soil Conservation Service, es uno de los métodos más utilizados y el que se propone para la estimación de los caudales máximos.

Criterios hidráulicos

Para el dimensionamiento de las piscinas de sedimentación es necesario establecer criterios hidráulicos que permitan el diseño de las tuberías para la descarga de la escorrentía desde la piscina hacia la corriente receptora.

- **Volumen de las piscinas.** Tal como se mencionó anteriormente, el volumen de la piscina debe permitir el almacenamiento del volumen de escorrentía generada por un evento de lluvia con una recurrencia de 10 años y con una duración de 24 horas, para que el mantenimiento de la piscina no se convierta en un proceso muy frecuente. Para la estimación del hidrograma de salida de la cuenca (hidrograma de entrada a la piscina) y el volumen producido por la lluvia de 10 años de recurrencia y 24 horas de duración, se recomienda utilizar el modelo HEC-HMS.
- **Altura de la piscina.** Esta altura dependerá de las particularidades del sedimento de la zona de explotación minera y de la configuración del botadero. Se sugiere utilizar profundidades de sedimentación entre 3 y 5 m, teniendo en cuenta las características medias del sedimento. Esta profundidad deberá permitir almacenar en su totalidad el volumen de escorrentía.
- **Área superficial de las piscinas.** Con base en la profundidad de la piscina y tomando como referencia el volumen de escorrentía producido por el

evento de lluvia establecido, se puede estimar el área superficial así:

$$\text{Volumen piscina [m}^3\text{]} = \text{Área [m}^2\text{]} * \text{Profundidad [m]}$$

Ecuación 3. Determinación del volumen de las piscinas.

- **Dimensiones de la piscina.** Para la determinación de la longitud (L) y el ancho (B) de las piscinas, se recomienda que la relación entre L/B sea cercana a 4,0, relación que, de acuerdo con la experiencia, asegura procesos adecuados de sedimentación. Adicionalmente, de acuerdo con la experiencia, la relación L/H debería estar entre 5 y 9. De no ser así, habría que hacer un proceso de tanteo para cumplir estas relaciones.
- **Revisión de la longitud mínima para la sedimentación.** Con el propósito de verificar que las longitudes de las piscinas son adecuadas para permitir la depositación del material transportado por la escorrentía superficial proveniente de los botaderos, se sugiere estimar la longitud necesaria para remover el 100 % de las partículas con diámetros superiores o iguales al D_{50} de la curva granulométrica disponible. Si se desea mayor sedimentación, es posible utilizar el D_{75} .
Con base en el diámetro de las partículas, las propiedades del fluido y las propiedades del suelo, se puede estimar la velocidad de caída del material sedimentable en la piscina (V_s). A renglón seguido se presenta una expresión general utilizada para la estimación de la velocidad de caída (ecuación 4).

$$V_s = \frac{g}{18} * \frac{(\rho_s - \rho_{H_2O})}{\mu} * D_j^2$$

Ecuación 4. Velocidad de caída de las partículas.

Donde:

V_s = Velocidad de caída de las partículas cm/s.

g = Gravedad en cm/s².

ρ_s = Densidad del suelo en ton/m³.

ρ_{H_2O} = Densidad del agua en ton/m³.

μ = Viscosidad del agua en cm²/s.

D_i = Diámetro de características de las partículas para porcentaje del material en la curva granulométrica (en cm).

Para la estimación del tiempo de caída de las partículas, la velocidad de caída será V_s , la profundidad de la piscina, h , sobre el tiempo de caída, t_s . Finalmente, el volumen total de la piscina es el producto del caudal por el tiempo de caída, t_s , mayorado por un factor de ampliación del tiempo, α . Se sugiere un factor entre 2,0 y 3,0 para este valor de α .

Este volumen debe ser inferior al volumen del hidrograma con el cual se realizó el diseño. En caso contrario, debe redimensionarse la piscina de tal manera que el volumen sea igual o superior al volumen estimado con base en la sedimentación.

Número de alcantarillas del sistema de descarga de la piscina de sedimentación

Las características del sistema de descarga exigen dos filas de tuberías: una inferior y otra superior.

Para la estimación del número de alcantarillas inferiores necesarias para la descarga de la piscina de sedimentación al cuerpo receptor, se ha establecido que las tuberías deben permitir la descarga de un evento de lluvia máxima con una recurrencia de 5,0 años y una duración de 24 horas, de modo que la lámina de agua no sobrepase el 0,936 del diámetro de la tubería.

Para completar el diseño del sistema de descarga de la piscina, este sistema debe descargar el hidrograma laminado correspondiente a un evento de 10 años de periodo de retorno y una duración de 24 horas. Como ya se hizo el diseño de las alcantarillas inferiores, se supone que la lámina de agua se encuentra muy cerca de la cota clave de estas tuberías, por lo que se procede a realizar el tránsito hidráulico de esta creciente en la piscina, para un número diferente de tuberías en la parte superior. De acuerdo con los resultados del tránsito hidráulico en la piscina, es posible determinar, con base en diferentes iteraciones, el número, distribución y tamaño de las tuberías de descarga necesarias para asegurar un nivel en la piscina especificado previamente.

CONCLUSIONES

1. Se elaboró una metodología general para el dimensionamiento de piscinas de sedimentación que permitirán el tratamiento de la escorrentía proveniente de botaderos en zonas de explotación minera a cielo abierto.

2. Se recomienda complementar esta metodología con modelos o sistemas de información geográfica que integren la información, para que de esta manera sea fácil realizar múltiples escenarios con múltiples variables.
3. Se probó exitosamente esta metodología con botaderos ubicados en zonas mineras en el sur del departamento del Cesar (Colombia).
4. Esta metodología, dinámica, general y básica, depende fundamentalmente de la calidad de la información de entrada proveniente de los registros hidrológicos en la zona de estudio y de los datos del tipo de suelo en la cuenca.

REFERENCIAS

- Chow, V. T. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, D.C.: McGraw-Hill Interamericana.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2015). Estudio hidrológico proyecto La Loma. Drummond Ltd. Bogotá, D.C.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2012). Informe de consultoría para la evaluación de estudios hidrológicos e hidráulicos en las cuencas en estado natural que conforman el área minera del centro del Cesar. Caudales máximos y mínimos. Bogotá, D.C.
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá, D.C.: Invías y Ministerio del Transporte.
- Kennedy, B. A. (1990). Planning and Design of Surface Mines. En B. A. Kennedy (ed.), *Surface Mining*. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- López Cualla, R. (2004). *Elementos de diseño de acueductos y alcantarillados* (2ª ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- US Army Corps of Engineers (2010). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. *Quick Start Guide*. Davis, CA.

Competencias ciudadanas y de liderazgo en IES de carácter científico-tecnológico: una aproximación conceptual

Citizenship and leadership competences in scientific-technological higher education institutions: A conceptual approach

JOSEPH ROBERT VOELKL PEÑALOZA¹ - JUAN CARLOS LOPERA TÉLLEZ²

1. Ingeniero industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. M.Sc. in Engineering Management School of Engineering University of Greenwich (UK). Profesor de planta de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Filósofo de la Universidad de los Andes. Magister en Ciencia Política de la Universidad de los Andes. Profesor de planta de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

joseph.voelkl@escuelaing.edu.co - juan.lopera@escuelaing.edu.co

Recibido: 08/08/2019 Aceptado: 25/08/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

El presente artículo es el resultado de una investigación de programa, de carácter exploratorio, sobre competencias ciudadanas y de liderazgo, llevada a cabo en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Comienza con un acercamiento a la importancia del desarrollo de competencias personales (o blandas) en las instituciones de educación superior, haciendo hincapié en la necesidad de fortalecer aquellas relacionadas con el liderazgo y el ejercicio de la ciudadanía, especialmente en instituciones educativas de carácter científico-tecnológico. El artículo continúa con un acercamiento a las más recientes aproximaciones teóricas sobre estos dos tipos de competencias, para finalizar subrayando la necesidad de trabajarlas en conjunto y proponiendo una opción para su integración.

Palabras claves: competencias personales, liderazgo, ciudadanía.

Abstract

This article is the result of an exploratory research about citizenship and leadership competences, developed at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. It first makes an approach to the importance of developing personal (soft) skills in higher education institutions, highlighting the need to strengthen those regarding leadership and citizenship, especially in scientific-technological institutions. Then, the article addresses the most recent theoretical approaches about these two types of competences, to end by pointing out the need to work with both of them together and proposing an option for integration

Keywords: personal competences, leadership, citizenship.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las competencias ciudadanas y de liderazgo, incluidas en lo que comúnmente se denomina “competencias personales o genéricas”, han ganado gran relevancia en el ámbito de la educación superior. En el caso específico colombiano, la creciente importancia de éstas se explica por la persistencia de factores socioestructurales que continúan manifestándose y dificultando el desarrollo del país, tales como la violencia, la corrupción, la intolerancia, la falta de empatía y la debilidad en el pensamiento crítico y sistémico en los profesionales. En este sentido, desde el Departamento de Humanidades e Idiomas, el Laboratorio de Liderazgo y los grupos de investigación Innovad-IE y Cimser, se ha dado inicio a un proceso de investigación orientado al mejoramiento y la construcción de herramientas pedagógicas que permitan un mejor desarrollo de dichas competencias en la comunidad de estudiantes de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Reconociendo la complejidad del tema, los autores de este artículo pretenden presentar los resultados de una primera investigación, de carácter cualitativo y exploratorio, realizada entre mayo y octubre de 2019, cuyo objetivo era establecer el estado del arte en esta materia, así como construir una perspectiva teórica que se pudiera utilizar como marco de referencia para desarrollar competencias ciudadanas y de liderazgo en el contexto de una institución de educación superior de carácter científico-tecnológico, como la Escuela.

METODOLOGÍA

Como se mencionó en líneas anteriores, la investigación realizada es tanto exploratoria como cualitativa, y en ella se usó información secundaria. En este marco, se desarrollaron tres objetivos: 1) Establecer el estado del arte en el campo del desarrollo de competencias ciudadanas y de liderazgo en instituciones de educación superior; 2) elaborar un marco teórico sobre competencias ciudadanas y de liderazgo, aplicable al contexto de una institución de educación superior de índole científico-tecnológica, como la Escuela Colombiana de Ingeniería; 3) identificar objetivos de futuras investigaciones, tendientes a construir herramientas pedagógicas para el desarrollo de competencias ciudadanas y de liderazgo en la Escuela. En las líneas siguientes se presentarán los resultados de los dos primeros objetivos.

RESULTADOS

Competencias personales

Desde hace algunas décadas, la comunidad internacional, liderada por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco), viene realizando esfuerzos para construir los derroteros de la educación a escala mundial a mediano y largo plazo. Uno de los primeros esfuerzos en esta tarea, en lo que a educación superior se refiere, se concretó en la primera Conferencia Mundial sobre Educación Superior (CMES), conferencia en la que se identificó, como una de las acciones prioritarias de los establecimientos de educación superior a la hora de determinar las prioridades de sus programas y estructuras, “tener en cuenta el respeto de la ética, del rigor científico e intelectual, y el enfoque multidisciplinario y transdisciplinario” (Unesco, 1998).

En el mismo sentido, en la declaración final de la CMES de 2009 se reconoció el papel central de la educación superior y la investigación en la erradicación de la pobreza y en el fomento del desarrollo sostenible; además, se identificó como tendencia internacional la necesidad de que la educación superior avance en la comprensión holística de los problemas, en sus dimensiones sociales, económicas, científicas y culturales. Por lo anterior, desde allí se hizo un llamado a los centros de educación superior para “centrarse aún más en los aspectos interdisciplinarios y promover el pensamiento crítico y la ciudadanía activa, contribuyendo así al desarrollo sostenible, la paz y el bienestar” (Unesco, 2009).

Al tiempo que reconocen que las instituciones de educación superior en el mundo responden a diferentes realidades y tienen orientaciones académicas diversas, las CMES siempre han señalado que el compromiso social es lo que debería configurar la razón de ser de todas ellas, compromiso que sólo puede alcanzarse con modelos académicos que propendan al análisis contextual y holístico de los problemas.

Por su parte, en varios encuentros regionales sobre educación superior este objetivo también ha quedado plasmado. Por ejemplo, en la declaración de la última Conferencia Regional de Educación Superior de América Latina y el Caribe (CRES) de 2008, se establecieron, entre otros, los siguientes lineamientos:

- “Reivindicamos el carácter humanista de la educación superior, en función del cual ella debe estar

orientada a la formación integral de personas, ciudadanos y profesionales, capaces de abordar con responsabilidad ética, social y ambiental los múltiples retos implicados en el desarrollo endógeno y la integración de nuestros países, y participar activa, crítica y constructivamente en la sociedad.

- Las instituciones de educación superior deben avanzar en la configuración de una relación más activa con sus contextos. La calidad está vinculada a la pertinencia y la responsabilidad con el desarrollo sostenible de la sociedad. Ello exige impulsar un modelo académico caracterizado por la indagación de los problemas en sus contextos; la producción y transferencia del valor social de los conocimientos; el trabajo conjunto con las comunidades; una investigación científica, tecnológica, humanística y artística fundada en la definición explícita de problemas a atender, de solución fundamental para el desarrollo del país o la región, y el bienestar de la población; una activa labor de divulgación, vinculada a la creación de conciencia ciudadana sustentada en el respeto a los derechos humanos y la diversidad cultural; un trabajo de extensión que enriquezca la formación, colabore en detectar problemas para la agenda de investigación y cree espacios de acción conjunta con distintos actores sociales, especialmente los más postergados” (Unesco, 2008).

En esta misma línea, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por la Asamblea General de la ONU en 2015, soportándose en dichos encuentros, estableció como su objetivo número 4 “la educación de calidad”, objetivo cuyo marco de acción se sustenta en la idea de superar el enfoque utilitarista de la educación, para pasar a uno que contribuya al desarrollo humano y la sostenibilidad económica, social y ambiental.

La tendencia aquí identificada, como ya se ha insinuado, corresponde a la discusión académica sobre los conceptos de desarrollo sostenible y responsabilidad social, discusión que en las últimas décadas se ha visto impulsada por los rápidos avances tecnológicos y sus impactos socioambientales (Didier & Derouet, 2013). En desarrollo de esta discusión, viene en aumento el consenso sobre la necesidad que tienen ingenieros y científicos de apropiarse de la práctica del desarrollo sostenible y de ser conscientes de las responsabilidades que tienen con el entorno, lo que está abriendo un nuevo

paradigma en los mismos procesos de formación (Wiek, Whitycombe & Redman, 2011).

Dentro de dicho paradigma se destaca el rol de las ciencias sociales y las humanidades en la formación de pensamiento crítico, pensamiento que debe ser capaz de concebir no sólo las expectativas técnicas de la labor del ingeniero y el científico, sino también las expectativas económicas, ecológicas y sociales ligadas a la sostenibilidad (Trbusic, 2013). En otras palabras, la labor de las instituciones de educación superior siempre deberá estar enmarcada en el reconocimiento de la complejidad del entorno, de la existencia de sistemas sociales complejos, lo que implica la obligación de proporcionar nuevas habilidades a los futuros profesionales, para que ellos puedan gestionar adecuadamente los procesos de toma de decisiones a los cuales se verán enfrentados. En últimas, cambiar la idea “un problema simple, una solución simple”, por la idea “un problema complejo, más de una solución adecuada”.

Por esto, desde la Unesco se plantea un reto para la educación superior del futuro, pues ante los rápidos cambios sociales y ecológicos, el desarrollo cultural y económico que afrontamos día tras día, la universidad está llamada a transformarse y renovarse para poder superar la crisis de valores, lo que permite trascender los intereses económicos y dar paso a espacios en los cuales lo moral y lo espiritual tengan mayor cabida (Unesco, s.f.).

Ahora bien, para abordar la relación entre la formación en ciudadanía y en liderazgo de ingenieros y científicos con el mercado laboral, es necesario, en primer lugar, hacer referencia al concepto de “competencia”, concepto cuya relevancia no emerge en el contexto universitario sino en el ámbito del trabajo, en el momento en que surge la necesidad de buscar criterios científicos que expliquen la eficiencia de las personas en el desarrollo de sus labores (McClelland, 1973) (Mertens, 1996).

Aunque en un principio las competencias se entendieron de manera simplista como cualidades personales enfocadas en conocimientos específicos de la función desempeñada, con el paso de los años éstas se comenzaron a entender como capacidades funcionales de los sujetos, en las que se integran conocimientos, habilidades, valores, motivaciones, etc.; estos elementos se enmarcan en contextos sociales particulares, que terminan expresándose en el desempeño profesional. Actualmente, hay

consenso sobre la existencia de dos grandes grupos de competencias: las genéricas (personales) y las específicas (Corominas, 2001). Las competencias específicas son aquellas relacionadas con el “saber hacer” o “saber profesional”, mientras que las genéricas o personales son las que se dirigen al “saber estar” y al “saber ser”.

Como se señala en un estudio llevado a cabo por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en el mercado laboral cada vez es más evidente la necesidad que tienen las empresas de vincular empleados (colaboradores) que no solamente cuenten con competencias específicas, sino también con un alto grado de competencias personales (Bassi, Busso & Urzúa, 2012). En tal sentido, las instituciones de educación superior están llamadas a cerrar esa brecha entre la demanda y la oferta de competencias, proyectándose a formar profesionales que no sólo tengan habilidades de conocimiento, sino también habilidades socioemocionales, y en este punto, como se dijo anteriormente, la formación en ciudadanía y en liderazgo tiene mucho que ofrecer a la formación de ingenieros y científicos.

Para el contexto colombiano, según el artículo 67 de la Constitución Política de Colombia de 1991, la educación se entiende como un derecho y un servicio público con función social, y su deber es formar ciudadanos “en el respeto a los derechos humanos, a la paz y a la democracia; y en la práctica del trabajo y la recreación, para el mejoramiento cultural, científico, tecnológico y para la protección del ambiente”. Igualmente, en el artículo 41 se establece que “En todas las instituciones de educación, oficiales o privadas, serán obligatorios el estudio de la Constitución y la instrucción cívica. Así mismo, se fomentarán prácticas democráticas para el aprendizaje de los principios y valores de la participación ciudadana. El Estado divulgará la Constitución”.

Por su parte, la Ley 30 de 1992, como norma que regula la educación superior, establece que entre sus objetivos se encuentra “profundizar en la formación integral de los colombianos, dentro de las modalidades y calidades de la educación superior, capacitándolos para cumplir las funciones profesionales, investigativas y de servicio social que requiere el país”, así como “Trabajar por la creación, el desarrollo y la transmisión del conocimiento en todas sus formas y expresiones, y promover su utilización en todos los campos para solucionar las necesidades del país”.

Este amplio marco normativo refleja una de las principales misiones que fijó el Estado colombiano para toda institución de educación superior: aportar a la formación de ciudadanos con visión ética, con sentido de lo público y con capacidad para convivir pacíficamente, lo que soporta la necesidad de incluir en los programas académicos, de manera transversal, la formación en ciudadanía y en liderazgo.

En cuanto a los lineamientos de la Escuela Colombiana de Ingeniería en esta materia, cabe destacar su misión, la cual se enfoca en “contribuir al desarrollo de la persona, del conocimiento y de la sociedad, mediante la formación integral y la construcción y desarrollo del conocimiento, con pertinencia y anticipación, en el contexto de la realidad colombiana”, idea que se fundamenta en la Declaración de Principios suscrita por sus fundadores. En esta última se sostiene que la Escuela se orienta hacia “la formación integral del ingeniero tanto en los aspectos científico y técnico como en los aspectos humanísticos y sociales”; e igualmente, “que tanto la formación integral de ingenieros como las demás tareas que lleve a cabo la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito estarán referidas a un marco conceptual centrado en el estudio y conocimiento de la realidad colombiana, para que los ingenieros en ella formados estén en condiciones de formular soluciones de carácter autóctono a los problemas nacionales y de llevar a feliz término tales soluciones”.

Competencias ciudadanas

A partir de estos marcos en los ámbitos nacional, internacional e institucional, en cuanto a competencias ciudadanas se refiere, en los últimos quince años se ha visto en Occidente un creciente interés por revisar y revitalizar los lineamientos existentes para su fortalecimiento, interés que parte de la necesidad de encontrar nuevas formas de cohesión social que sean capaces de generar un balance entre el individualismo y el bien colectivo. Estos esfuerzos han generado un cambio no sólo en la terminología, sino también un cambio de perspectiva. Conceptos como el de “educación en ciudadanía democrática” o “educación en ciudadanía responsable” se entienden al querer superar aquella visión estrictamente estado-céntrica, basada sólo en el saber, para dar paso a una visión que también incluya el saber hacer y el saber ser. (Himmenmann, 2013).

En otras palabras, este proceso de revisión ha significado una suerte de transición desde una educación centrada en la memorización de conocimientos, como, por ejemplo, el funcionamiento del Estado, hasta una educación que pone el acento en las aptitudes personales, en la moral y el comportamiento en sociedad; en últimas, en el ejercicio de la ciudadanía en un mundo lleno de conflictos cotidianos (Callan, 2004). En consecuencia, la ampliación de conocimientos en este campo de la educación ha sido significativa, y ahora ningún aspecto de la vida en comunidad se considera irrelevante en la educación en ciudadanía.

En este contexto de revisión y revitalización, la formación en ciudadanía se ha convertido en una tarea fundamental dentro de las instituciones de educación superior (Arthur, 2005), entendiendo, además, que ésta no es una labor que se deba y pueda desarrollar exclusivamente en un curso sobre ciudadanía y valores (Print & Lange, 2013; Chaux, Lleras & Velásquez, 2004; Hoskins, Barber, Nijlen & Villalba, 2011). Al respecto, para el caso colombiano, el profesor Enrique Chaux y su equipo de trabajo en la Universidad de los Andes han venido desarrollando una serie de parámetros, utilizados desde hace unos años por el Ministerio de Educación Nacional de Colombia, que han servido de marco para la formación en competencias ciudadanas. Desde su perspectiva, es necesario tener en cuenta los siguientes principios (Chaux & Ruiz, 2004):

- Abarcar todas las competencias necesarias para la acción.
- Brindar múltiples oportunidades para la práctica de las competencias.
- Integrar la formación ciudadana de manera transversal en las áreas académicas.
- Involucrar a toda la comunidad educativa.
- Evaluar.

Igualmente, aquí se reconoce la existencia de tres ámbitos fundamentales de la ciudadanía:

- Convivencia y paz.
- Participación y responsabilidad democrática.
- Pluralidad, identidad y valoración de las diferencias.

Y es a partir de estos tres ámbitos desde los cuales se desprenden las competencias ciudadanas propiamente

dichas. Estas competencias son, entonces, conocimientos y habilidades que deberían adquirir y desarrollar los ciudadanos para poder participar activamente en una sociedad democrática, a saber: competencias de conocimientos, cognitivas, emocionales, comunicativas e integradoras. En la tabla siguiente se encuentra el desglose de dichas competencias, junto a sus principales características (tabla 1).

Como se mencionó anteriormente, este marco conceptual lo tomaron como referencia el Ministerio de Educación de Colombia y el Icfes para estructurar el componente de competencias ciudadanas para las pruebas Saber 11 y Saber Pro. Con respecto a esta última, el ministerio ha venido elaborando guías para identificar las afirmaciones y evidencias de cada una de las competencias ciudadanas que se buscan medir en la prueba. Más adelante se relaciona la información socializada por el Icfes en 2019, referente a estas competencias (tabla 2).

Competencias de liderazgo

Si bien al hablar de liderazgo aparecen diferentes definiciones, la más genérica y aplicable a todo contexto y nivel educativo podría ser la tratada por Daniëls, Hondeghem & Dochy (2019), quienes definen el liderazgo en términos de un proceso de persuasión en el cual un individuo ejerce influencia intencional sobre otros para estructurar actividades y relaciones en un grupo u organización. En esta misma línea, en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ya se ha adoptado un concepto de liderazgo, aprobado tanto en Consejo Académico como en Consejo Directivo, en el segundo semestre de 2017; en éste se señala al líder como “un rol que asume alguien en un determinado contexto y situación y que se expresa cuando esta persona declara un futuro sostenible y hace que este futuro ocurra”, y el liderazgo como “un proceso continuo de interacción y aprendizaje entre el mundo interior y el exterior y entre los dominios individual y colectivo de quienes pretenden lograr un objetivo común” (Montejo & Villegas, 2017).

Este modelo de liderazgo se plantea con las siguientes premisas del ejercicio del líder:

- Declarar un futuro sostenible y realizar las acciones para conseguirlo.

Tabla 1

Competencia		Características
Conocimientos		Las competencias de conocimientos son aquellas que se refieren a la información que debe saber y comprender una persona para ejercer su ciudadanía. Por ejemplo, conocer la estructura del Estado colombiano, los mecanismos de participación, derechos y deberes ciudadanos, entre otros.
Cognitivas	Toma de perspectiva	Habilidad para comprender el punto de vista que tiene otra persona sobre un asunto en particular.
	Interpretación de intenciones	Capacidad para evaluar las intenciones y propósitos de las acciones de los demás.
	Generación de opciones	Capacidad para imaginarse creativamente muchas maneras de resolver un conflicto o un problema social.
	Consideración de consecuencias	Capacidad para considerar los distintos efectos que pueda tener cada alternativa de acción.
	Metacognición	Capacidad para mirarse a sí mismo y reflexionar sobre ello.
	Pensamiento crítico	Capacidad para cuestionar y evaluar la validez de cualquier creencia, afirmación o fuente de información.
Emocionales	Identificación de las propias emociones	Capacidad para reconocer las emociones en sí mismo.
	Manejo de las propias emociones	Tener cierto dominio sobre las propias emociones.
	Empatía	Capacidad para sentir lo que otros sienten o por lo menos algo compatible.
	Identificación de las emociones de los demás	Capacidad para identificar lo que pueden sentir otras personas, tanto por medio de sus expresiones verbales y no verbales, como teniendo en cuenta la situación en la que se encuentran.
Comunicativas	Saber escuchar o escucha activa	Capacidad de comprender lo que dicen los demás y de hacerles saber que los están escuchando.
	Asertividad	Capacidad para expresar las necesidades, intereses, posiciones, derechos e ideas propias de manera clara y enfática.
	Argumentación	Capacidad de expresar y sustentar una posición, de manera que los demás puedan comprenderla y evaluarla.
Competencias integradoras		Las competencias integradoras son aquellas competencias más amplias y abarcadoras que, en la práctica, articulan los conocimientos y las competencias cognitivas, emocionales o comunicativas. Por ejemplo, la capacidad para manejar conflictos pacífica y constructivamente.

Tomado de: Chau, Lleras & Velásquez, 2004.

- Hacerse cargo juntos de algo que les importa a todos, para lograr resultados óptimos que, a la vez, generan bienestar para todos.
- Actuar en un contexto y en relación con otros.

Así mismo, las competencias aprobadas institucionalmente, asociadas al liderazgo, en la misma sesión ya mencionada del Consejo Directivo y del Consejo Académico, se relacionan en otra tabla (tabla 3).

Cuando se hace referencia al liderazgo, se pueden encontrar diferentes modelos conceptuales para su desarrollo, entre los que sobresalen el informal, formal,

situacional, humanista, líquido, positivo, transformacional, carismático, instruccional, distributivo, pedagógico o educativo, liberal, ético, transaccional, estratégico, entre muchos otros. Sin embargo, no existe un consenso frente a cuál de estos modelos es el mejor; ya que su uso depende, principalmente, de las necesidades, las características y las situaciones a las que se deba enfrentar el líder y al equipo de personas que debe persuadir (Ganga & Navarrete, 2012).

Por otro lado, como lo mencionan varios autores (Aguilar & Correa-Chica, 2017; Gómez, Lacasta, Martínez-Tur & Rodríguez, 2018; Iordanoglou &

Tabla 2

Competencia	Afirmación	Evidencia
Conocimientos	1. Comprende qué es la Constitución Política de Colombia y sus principios fundamentales.	1.1 Conoce las características básicas de la Constitución. 1.2 Reconoce que la Constitución promueve la diversidad étnica y cultural del país, y que es deber del Estado protegerla. 1.3 Comprende que Colombia es un Estado social de derecho e identifica sus características.
	2. Conoce los derechos y deberes que la Constitución consagra.	2.1 Conoce los derechos fundamentales de los individuos. 2.2 Reconoce situaciones en las que se protegen o vulneran los derechos sociales, económicos y culturales consagrados en la Constitución. 2.3 Conoce los derechos colectivos y del ambiente consagrados en la Constitución. 2.4 Conoce que la Constitución consagra deberes de los ciudadanos.
	3. Conoce la organización del Estado de acuerdo con la Constitución.	3.1 Conoce las funciones y alcances de las ramas del poder y de los organismos de control. 3.2 Conoce los mecanismos que los ciudadanos tienen a su disposición para participar activamente en la democracia y para garantizar el respeto de sus derechos.
Argumentación	4. Analiza y evalúa la pertinencia y solidez de enunciados-discursos	4.1 Devela prejuicios e intenciones en enunciados o argumentos. 4.2 Valora la solidez y pertinencia de enunciados o argumentos.
Multiperspectivismo	5. Reconoce la existencia de diferentes perspectivas en situaciones en las que interactúan varias partes.	5.1 En situaciones de interacción, reconoce las posiciones o intereses de las partes presentes y puede identificar un conflicto. 5.2 Reconoce que las cosmovisiones, ideologías y roles sociales determinan diferentes argumentos, posiciones y conductas.
	6. Analiza las perspectivas presentes en situaciones en las que interactúan diferentes partes.	6.1 Compara las perspectivas de diferentes actores. 6.2 Establece relaciones entre las perspectivas de los individuos presentes en un conflicto y propuestas de solución.
Pensamiento sistémico	7. Comprende que los problemas y soluciones involucran distintas dimensiones y reconoce relaciones entre éstas.	7.1 Establece relaciones que hay entre dimensiones presentes en una situación problemática. 7.2 Analiza los efectos en distintas dimensiones que tendría una solución.

Tomado de Icfes, 2019.

Tabla 3

Competencia	Definición
Comunicación	Facilidad de interacción personal, de selección y clasificación de información, y de comprensión e intercambio de información verbal, escrita y simbólica.
Productividad intelectual	Dominio adecuado de los conocimientos, habilidades de pensamiento y metodologías que corresponden a los niveles de pregrado o posgrado.
Colaboración y liderazgo	Demostración de actitudes éticas y sociales; de capacidades de trabajo en equipo, organización y desarrollo de proyectos, y de realización de tareas administrativas y de dirección.
Innovación y cambio	Capacidad para identificar problemas y generar ideas que contribuyan a su solución en condiciones de riesgo e incertidumbre.
Compromiso solidario	Visión para comprender, interpretar y proponer soluciones a los problemas sociales, especialmente los que afectan a la dignidad humana.
Autonomía personal	Capacidad para reflexionar y discernir sobre su proyecto de vida personal y profesional en el contexto social que lo rodea y tomar decisiones personales y laborales.

Tomado de Montejo & Villegas, 2017.

Ioannidis, 2014), aunque no hay un modelo o listado de competencias único por desarrollar en el líder, sí es posible plantear algunas características y competencias que se espera que éste desarrolle y que tenga la habilidad para gestionar en forma asertiva, de acuerdo con lo que anteriormente se mencionaba referente a los retos a los cuales se enfrenta. En la siguiente tabla (tabla 4) aparecen las más nombradas por los autores revisados:

Así mismo, se plantea que el anterior listado de características debe desarrollarse desde el saber (conocimiento), el saber ser (desde un plano individual y colectivo) y el saber hacer (que implica ya la acción o aplicación de las dos anteriores).

Dentro de este desarrollo del líder, en el sistema educativo se plantea que existen elementos que facilitan e influyen a los estudiantes, siendo el primer

Tabla 4

Competencia	Características
Enfoque en resultados	Esfuerzo realizado para cumplir con las metas planteadas en los indicadores de los objetivos propuestos, mediados incluso por el sentido de urgencia si la situación lo amerita.
Inteligencia y madurez emocional	Capacidad para reconocer los sentimientos propios y ajenos, y así mismo actuar en consecuencia de éstos para el manejo de las relaciones interpersonales.
Integridad	Capacidad de actuar en forma coherente y asumiendo la responsabilidad de sus acciones.
Autocontrol	Habilidad de dominar y regular las emociones, pensamientos, acciones y deseos de sí mismo como persona, de manera consciente y voluntaria, con el objetivo de alcanzar un mayor equilibrio personal y relacional.
Confianza	Fortaleza emocional que empieza por cada uno, con el propio sentimiento de valor y propósito, frente a lo que es y es capaz de hacer, y que puede extenderse hacia las personas con las que se interactúa.
Pensamiento sistémico	Actitud para percibir, comprender y analizar los elementos de un sistema, de manera integral y articulada.
Visión estratégica	Capacidad para plantear una planeación estratégica, que tenga en cuenta los plazos corto, mediano y largo, con lo que esto puede implicar.
Gestión eficaz y eficiente, tanto de él como del equipo	Principio de realidad para la administración de los recursos a su cargo, con el objeto de que se logren resultados beneficiosos tanto para él como para el equipo que lidera.
Trabajo en equipo	Capacidad para crear, delegar, motivar y desarrollar el potencial y talento de las personas con las que trabaja, frente a un objetivo común.
Flexibilidad y adaptabilidad	Idoneidad para realizar una gestión y anticipación del trabajo, teniendo en cuenta las normativas impuestas, situaciones que se presenten, sabiendo ajustar los elementos bajo su responsabilidad para el correcto desempeño.
Comunicación asertiva (oral, escrita, no verbal)	Habilidad para comunicarse por el canal adecuado, asegurando y validando que el mensaje enviado y la intencionalidad de éste sea el recibido por quien lo recibe en el momento que corresponda, teniendo en cuenta canales de comunicación a su disposición y sabiéndolos usar.
Carisma	Capacidad de atraer y cautivar a las demás personas.
Empatía	Habilidad de sentir e interpretar las emociones que está sintiendo una persona ante determinada situación, permitiendo ayudar, comprender, apoyar y motivar a las otras personas, estableciendo buenas relaciones interpersonales.
Ética	Actitud y comportamiento coherentes, basados en los valores.
Compromiso	Capacidad para tomar conciencia de la importancia que tiene cumplir con los acuerdos a los que se ha llegado.
Negociación	Habilidad para resolver conflictos entre dos o más partes, logrando resultados concretos.
Perseverancia	Capacidad de luchar continuamente por un objetivo, a pesar de que el proceso para su logro presente dificultades y no sea alcanzable como inicialmente se había previsto.
Priorización	Aptitud para clasificar actividades por orden de importancia e impacto, con el objeto de poder organizar y coordinar el trabajo que se requiere realizar, para una adecuada gestión de los recursos disponibles.
Creatividad	Capacidad de generar y analizar nuevas o diferentes ideas para la solución de problemas.
Toma de decisiones	Capacidad de evaluar y elegir una o varias opciones dentro de un conjunto de posibilidades, a partir de un proceso de razonamiento y voluntad, y llevar a la acción lo elegido, con la responsabilidad que implica.

Elaboración propia.

modelo vital de este proceso el “profesor”, como eje fundamental en el aula de clase que siembra las bases para que el proceso de aprendizaje y desenvolvimiento de los estudiantes se afiance (Bernal & Ibarrolla, 2016). Por su parte, Murillo & Hernández (2015) indican que el desarrollo del liderazgo en los estudiantes también se encuentra influenciado por los directivos de las instituciones educativas y los administrativos con quienes estos estudiantes se relacionan, como parte de todo el contexto y la cultura organizacional que son elementos constitutivos del sistema educativo en el que están inmersos.

De igual manera, se plantea que en las instituciones educativas el objetivo no sea únicamente la calidad del proceso formativo para que los estudiantes sean exitosos laboralmente, sino que el éxito se defina en la medida en que ellos sean capaces de poner en práctica todo lo aprendido en su vida, para ser exitosos en sus dimensiones personales, más allá de sólo la profesional; esto redundará en resultados positivos tanto para los individuos como para la institución y la sociedad a la que pertenecen (Murillo & Hernández, 2015).

Por otra parte, para hablar de las características del proceso que aportan al crecimiento de un individuo en su formación, desde la perspectiva de las competencias asociadas al liderazgo y a su vez a las competencias ciudadanas, se plantean los siguientes elementos:

- Una relación más allá del agente que transmite información y conocimientos a otras personas, para que el profesor sea un maestro que se preocupe por desarrollar en el estudiante su potencial, entendiendo las dificultades que éste puede llegar a tener desde su entorno, planteando un rol de profesor-consejero (Pàmies-Rovira, Senent-Sánchez & Essomba, 2016).
- Los profesores deben tener una formación previa a su exposición frente a los estudiantes, en términos de herramientas para desarrollar las habilidades complementarias a los temas particulares y técnicos de las asignaturas a su cargo, que les permitan facilitar el empoderamiento de los estudiantes para que maduren sus habilidades (Llorent-Bedmar, Cobano-Delgado & Navarro-Granados, 2017).
- El entorno del que provienen los estudiantes no siempre es el mismo, y hay ciertas comunidades de estudiantes que tienen mayores características de vulnerabilidad y con mayores necesidades de aten-

ción. Esto lleva a comprender que existen entornos VICA (con volatilidad, incertidumbre, complejidad y ambigüedad), lo que debe contemplarse para que en el momento de establecer estrategias que apunten a esta población sean acordes con sus realidades (Bravo, 2018).

- Actividades de aprendizaje basado en proyectos de aplicación práctica, en organizaciones externas a las instituciones de educación donde los estudiantes se estén formando (Hahn & Gangeness, 2019).
- Espacios de interacción con líderes experimentados, para que personas con experiencia de liderazgo en diversos entornos, tanto en contextos personales como profesionales, puedan compartir sus experiencias con personas en proceso de desarrollo (Boak & Crabbe, 2018).

En materia de metodologías, herramientas e instrumentos para evaluar estas competencias en los estudiantes, luego de la revisión bibliográfica no se han encontrado experiencias significativas en las que las instituciones de educación superior hayan incorporado en sus procesos este tipo de elementos, lo único que se ha encontrado es lo reportado por Perilla & Martínez (2009), donde, como mencionan otros autores, se valen de herramientas independientes diseñadas para evaluar competencias a escala organizacional, dentro de los procesos de selección empresarial. Algunas de las pruebas que se mencionan son DISC, Wartegg y Assessment Centers.

Propuesta de integración para las competencias ciudadanas y de liderazgo

La revisión bibliográfica relacionada en las líneas anteriores nos muestra que no existe algo que relacione directamente las competencias asociadas al liderazgo y al ejercicio de la ciudadanía, como elemento de formación común en una institución de educación superior de carácter científico-tecnológico. De esta manera, para los autores se considera de vital importancia, dada la naturaleza de los programas de formación existentes en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, que se construya un modelo en el que estas competencias se desarrollen de manera armónica, encontrando los puntos comunes y particulares en los que desde la apuesta institucional se debería trabajar.

Tabla 5

Competencia Integradora	Competencia	Habilidades
COMPROMISO SOLIDARIO / ACTITUD CIUDADANA	Conocimientos	Comprende qué es la Constitución Política de Colombia y sus principios fundamentales.
		Conoce los derechos y deberes que la Constitución consagra.
		Conoce la organización del Estado de acuerdo con la Constitución.
		Reconoce el aporte social que puede dar desde su ejercicio profesional.
	Multiperspectivismo	Reconoce la existencia de diferentes perspectivas en situaciones donde interactúan diferentes partes.
		Analiza las diferentes perspectivas presentes en situaciones donde interactúan diferentes partes.
Pensamiento sistémico	Comprende que los problemas y soluciones involucran distintas dimensiones y reconoce relaciones entre éstas.	
	Capacidad para plantear escenarios desde una visión estratégica.	
	Identifica que toda acción y decisión tiene un impacto en el entorno.	
COMUNICACIÓN	Lectura crítica	Capacidad de identificar y entender los eventos, ideas, afirmaciones y demás elementos locales que componen un texto.
	Escucha activa	Capacidad de comprender lo que dicen los demás y de hacerles saber que los están escuchando.
	Asertividad	Expresa las necesidades, intereses, posiciones, derechos e ideas propias de manera clara y enfática.
		Utiliza el canal adecuado de comunicación (radio, prensa, televisión, internet, teléfono, e-mail, SMS...), teniendo en cuenta la intencionalidad y el público receptor.
		Utiliza la "no verbalidad" como elemento complementario dentro del proceso de comunicación.
Argumentación	El estudiante es capaz de expresar y sustentar una posición, de manera que los demás puedan comprenderla y evaluarla.	
PRODUCTIVIDAD INTELLECTUAL	Conocimientos	Capacidad para utilizar los conocimientos técnicos y profesionales adquiridos durante su formación en pregrado y posgrado.
COLABORACIÓN, LIDERAZGO Y TRABAJO EN EQUIPO	Relaciones interpersonales	Capacidad de atraer y persuadir a las demás personas.
		Reconocimiento y planteamiento de objetivos comunes.
		Identifica y actúa en coherencia frente a los valores compartidos para el desarrollo de los objetivos.
Gestión de recursos	Capacidad para gestionar todos los recursos asociados al logro de un resultado y cumplimiento de un objetivo (técnicos, tiempo, financiero, talento humano, entre otros).	
INNOVACIÓN Y CAMBIO	Negociación y manejo de conflictos	Capacidad para gestionar disensos y conflictos, a través de una negociación.
	Generación de opciones	Capacidad para proponer opciones sostenibles para dar respuesta a una necesidad.
	Aprendizaje continuo	Capacidad para capitalizar las experiencias, en las decisiones tomadas.
Identificación de vacíos en el conocimiento propio y actuar en coherencia con éstos.		
AUTONOMÍA PERSONAL	Perseverancia	Capacidad para reponerse ante las dificultades y continuar buscando el resultado esperado.
		Compromiso con su propio proceso de desarrollo personal y profesional.
	Gestión emocional	Capacidad para reconocer las emociones en sí mismo.
		Capacidad para reconocer las emociones del otro.
		Capacidad para gestionar las emociones en forma positiva.
	Autoconocimiento	Capacidad para mirarse a sí mismo y reflexionar sobre ello (creencias, prejuicios, etc.).
Autogestión	Capacidad para autogestionarse y lograr las metas propuestas.	

Fuente: Elaboración propia.

Para tal efecto, luego del análisis de la información recolectada, se plantea que el desarrollo de las competencias ciudadanas y de liderazgo estén enmarcadas dentro del siguiente modelo de competencias integradoras, competencias y habilidades (tabla 5).

Como se observa en la tabla 5, se identificaron seis competencias integradoras, las cuales estaban inicialmente aprobadas por el Consejo Directivo y el Consejo Académico de la Escuela, cuyo enfoque principal era el liderazgo. Con el ánimo de integrar las competencias ciudadanas a este trabajo previo y teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, el alcance de algunas de estas competencias se amplió, lo que implicó desagregarlas en competencias específicas y éstas, a su vez, se desagregaron en las que serían sus habilidades asociadas.

En el caso de la competencia integradora de compromiso solidario y actitud ciudadana, se amplió su alcance, incluyendo los elementos asociados al ejercicio de la ciudadanía que se consideran fundamentales para el ejercicio profesional; así mismo, estos nuevos elementos constituyen aspectos objeto de evaluación por parte del Ministerio de Educación y el Icfes.

De igual manera, en la competencia integradora de colaboración, liderazgo y trabajo en equipo, se complementó el alcance en lo referente al trabajo en equipo, ya que se plantea que para que un líder tenga un impacto que sobrepase la esfera individual, se requiere un trabajo colaborativo con otras personas, para el cumplimiento de objetivos comunes.

CONCLUSIONES

Existen diversas corrientes sobre las cuales el liderazgo y el ejercicio de la ciudadanía se pueden desarrollar, cada uno haciendo énfasis en diferentes elementos y habilidades asociados a éstos; sin embargo, se parte en todos de la necesidad de trabajar primero en el individuo (el ser), segundo en el actuar individual (el hacer), para luego trascender a ser y hacer con otros. Otro elemento común en la revisión realizada por los autores es la necesidad de formar profesionales con habilidades y competencias más allá de las técnicas, que generalmente son las trabajadas en los procesos de formación impartidos en las instituciones de educación superior.

Las competencias de liderazgo y cultura ciudadana tienen una estrecha relación, y al trabajarse de manera

conjunta se podría facilitar el desarrollo integral de los individuos de una comunidad, en este caso de la comunidad de la Escuela; lo anterior llevaría a generar un impacto mayor en la sociedad, que es parte de los objetivos fundacionales de esta institución. Así mismo, dada la naturaleza científico-tecnológica de la formación impartida en la Escuela, la integración de estas competencias permite dar respuesta a los requerimientos de la sociedad y los entornos empresariales, donde cada vez más se buscan profesionales con características diferenciales, que puedan adaptarse fácilmente a las condiciones de los entornos cambiantes, las tendencias de los mercados y la globalización; la idea es que sean asertivos en sus relaciones, abiertos al cambio, capaces de liderar equipos, procesos y organizaciones, sin importar las diferencias socioculturales, y que sean conscientes de la necesidad de generar constantemente impactos positivos para ellos mismos, las personas a su alrededor, las organizaciones para las que trabajan y el mundo en el que viven.

REFERENCIAS

- Aguilar, M., & Correa-Chica, A. (2017). Análisis de las variables asociadas al estudio del liderazgo: una revisión sistemática de la literatura. *Universitas Psychologica*, 16(1), 1-13.
- Arthur, J. (2005). *Citizenship and Higher Education: The Role of Universities in Communities and Society*. Londres: Routledge.
- Bassi, M., Busso, M., & Urzúa, S. (2012). *Desconectados: habilidades, educación y empleo en América Latina*. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Bernal, A., & Ibarrolla, S. (2016). Liderazgo del profesor: objetivo básico de la gestión educativa. *Revista Paraguaya de Educación*, 1(6), 59-73.
- Boak, G., & Crabbe, S. (2018). Experiences that develop leadership capabilities. *Leadership & Organization Development Journal*, 40(1), 97-106.
- Bravo, O. (2018). De los buenos días a la productividad: liderazgo y desempeño en entornos VICA. *Revista Debates IESA*, 23(1), 19-24.
- Callan, E. (2004). Citizenship and education. *Annual Review of Political Science*, 7, 71-90.
- Chaux, E., & Ruiz, A. (2004). *La formación de competencias ciudadanas*. Bogotá: Ascofade, MEN.
- Chaux, E., Lleras, J., & Velásquez, A. M. (2004). *Competencias ciudadanas. De los estándares al aula*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Corominas, E. (2001). Competencias genéricas en la formación universitaria. *Revista de Educación*(325), 299-321.
- Daniëls, E., Hondeghem, A., & Dochy, F. (2019). A review on leadership and leadership development in educational settings. *Educational Research Review*, 27, 110-125.
- Didier, C., & Derouet, A. (2013). Social responsibility in french engineering education: a historical and sociological analysis. *Science and Engineering Ethics*, 12(4), 1577 - 1588.

- Ganga, F., & Navarrete, E. (2012). Enfoques asociados al liderazgo eficaz para la organización. *Revista Gaceta Laboral*, 19(1), 52-77.
- Gómez, F., Lacastra, J., Martínez-Tur, V., & Rodríguez, C. (2018). Avances en el liderazgo: marco de competencias de los líderes profesionales. *Siglo Cero*, 49(4), 7-34.
- Hahn, C., & Gangeness, J. (2019). Business, leadership and education: a case for more business engagement in higher education. *American Journal of Business Education*, 12(1), 19-31.
- Himmenmann, G. (2013). Competences for teaching, learning and living democratic citizenship. En D. Lange, *Civic education and competences for engaging citizens in democracies* (pp. 3-7). Boston: Sense Publishers.
- Hoskins, B. L., Barber, C., Nijlen, D. V., & Villalba, E. (2011). Comparing civic competence among European youth: composite and domain-specific indicators using IEA civic education study data. *Comparative Education Review*, 55(1), 82-110.
- Icfes (2019). *Guía de orientación Saber Pro. Módulo de competencias genéricas*. Bogotá: Icfes.
- Iordanoglou, D., & Ioannidis, K. (2014). Essential leadership skills for young professionals in times of crisis. *Economics and Management*, 359-364.
- Llorent-Bedmar, V., Cobano-Delgado, V., & Navarro-Granados, M. (2017). Liderazgo pedagógico y dirección escolar en contextos desfavorecidos. *Revista Española de pedagogía*, 75(268), 541-564. doi:10.22550/REP75.3-2017-04.
- McClelland, D. (1973). Testing for competencies rather than intelligence. *American Psychologist*, 46(1), 1-14.
- Mertens, L. (1996). *Competencia laboral: sistemas, surgimiento y modelos*. Montevideo: Cinterfor.
- Montejo, M., & Villegas, C. (2017). *Propuesta para el desarrollo de la capacidad de liderazgo en la Escuela Colombiana de Ingeniería*. Bogotá.
- Murillo, J., & Hernández, R. (2015). Liderazgo para el aprendizaje: ¿qué tareas de los directores y directoras escolares son las que más inciden en el aprendizaje de los estudiantes? *Revista Electrónica de Investigación y Evaluación Educativa*, 21(1), 1-20.
- Pàmies-Rovira, J., Senent-Sánchez, J., & Essomba, G. (2016). El liderazgo pedagógico y la implicación del profesorado como factores de éxito en centros de entornos desfavorecidos en España. *Revista Electrónica de Investigación y Evaluación Educativa*, 22(2), 1-14.
- Perilla, L., & Martínez, M. (2009). Evaluación del liderazgo por competencias en los estudiantes de administración de empresas. *Sotavento* (13), 46-66.
- Print, M., & Lange, D. (2013). *Civic education and competences for engaging citizens in democracies*. Boston: Sense Publishers.
- Trbusic, H. (2013). Holistic education: the social reality of engineering. *Journal of Education, Culture and Society*, 2, 227-238.
- Unesco (1998). *La educación superior en el siglo XXI: visión y acción*. París: Unesco.
- Unesco (2008). *Declaración y Plan de Acción*. París: Iesalc, Unesco.
- Unesco (2009). *La nueva dinámica de la educación superior y la investigación para el cambio social y el desarrollo*. París: Unesco.
- Unesco (s.f.). Unesco. Recuperado el 25 de julio de 2017, de <http://www.unesco.org/new/es/education/themes/strengthening-education-systems/higher-education/reform-and-innovation/>.
- Wiek, A., Whitycombe, L., & Redman, C. (2011). Key competencies in sustainability: a reference framework for academic program development. *Sustainable Science*, 6(2), 203-218.

Aplicación de métodos de análisis en geotecnia no convencionales a empuje lateral de tierras, siguiendo procesos estocásticos de segundo orden en suelos cohesivos uniformes

Application of non-conventional geotechnics analysis methods for lateral earth pressure, following second-order stochastic processes in uniform cohesive soils

FABIÁN ANDRÉS AVELLA CUBIDES¹ - RICARDO SALAZAR FERRO²

1. Magister en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Profesor de la Maestría en Ingeniería Civil, consultor e investigador en geotecnia.

fabian.avella-c@escuelaing.edu.co - ricardo.salazar@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/08/2019 Aceptado: 31/08/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

A partir de las teorías de probabilidad y empuje lateral de tierras, se ha logrado obtener un modelo de cálculo de probabilidades de falla alternativo a las metodologías convencionales, que permite considerar la variación de las propiedades del suelo desde el planteamiento mismo del problema y no haciendo una aleatorización de una expresión determinística. El modelo se plantea asumiendo las propiedades de resistencia del suelo no como variables aleatorias, sino como campos aleatorios que siguen un proceso estocástico de segundo orden, teniendo en cuenta que en un depósito de suelo estas propiedades cambian punto a punto. Las probabilidades de falla que se obtienen asumiendo las propiedades de resistencia del suelo, como procesos aleatorios y variables aleatorias, presentan resultados diferentes y algunas veces superiores, asumiendo la primera de estas opciones, lo que permite generar diseños más confiables y seguros.

Palabras claves: variables aleatorias, procesos estocásticos, empuje lateral de tierras, probabilidades de falla, presión activa.

Abstract

Probability and lateral earth pressure theories has helped obtain a model for estimating fault probability as an alternative to conventional methodologies, which allows to consider the variation of soil properties from the very problem statement and not through randomizing a deterministic expression. This model is set assuming the properties of soil resistance not as random variables, but as random fields that follow a second-order stochastic process, considering that in a soil deposit, these properties change from point to point. Fault probabilities obtained by assuming soil resistance properties, as random processes and random variables, show different, and sometimes superior, results assuming the former option, which allows to generate safer and more reliable designs

Keywords: random variables, stochastic process, lateral earth pressure, fault probability, active pressure.

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas en la ingeniería geotécnica tiene que ver con la incertidumbre en la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de depósitos de suelo de una manera precisa, partiendo de su naturaleza aleatoria, y a su vez, poder determinar los parámetros de análisis y diseño.

En la práctica, es común realizar diseños a partir de métodos determinísticos, los cuales no tienen en cuenta la heterogeneidad del suelo, lo que puede arrojar resultados poco confiables, que se traducen, ya sea en sobrecostos asociados a sobredimensionamientos de las estructuras o, peor aún, a la falla de éstas. Por esta razón, los diseños basados en confiabilidad han tenido un crecimiento importante durante los últimos años, debido a que éstos logran ser superiores a los basados en teorías determinísticas.

Existen ventajas a la hora de hacer un diseño basado en confiabilidad en comparación con el enfoque tradicional: como primera medida, valores de factores de seguridad superiores a la unidad no garantizan la estabilidad de una estructura. Un mismo factor de seguridad puede producir dos diseños con diferentes confiabilidades (Wu, Gilbert, Tank & Fenton, 1997). Por ejemplo, autores como Hoeg y Muraka han demostrado que una probabilidad de falla tan grande como el 30 % puede ocurrir con factores de seguridad de 3 o 4 para problemas de capacidad portante (Kirsten, 1983). Por otra parte, Wu (1997) y otros autores concuerdan en afirmar que el factor de seguridad se basa en la experiencia con diseños similares; sin embargo, ¿qué pasaría si no existiera la experiencia o si ésta no fuera del todo buena? Por este motivo un diseño enfocado en términos probabilísticos proporciona la capacidad de desarrollar nuevas metodologías que permiten tomar decisiones basadas en la confiabilidad y no en el factor de seguridad.

Con el objeto de ampliar el conocimiento sobre los métodos probabilísticos, en este artículo se pretende desarrollar un método alternativo para trabajar análisis probabilísticos en problemas de empuje lateral de tierras, introduciendo la variabilidad de las propiedades de resistencia del suelo (en este caso, la resistencia al corte no drenada) en el planteamiento del problema, y no como se ha realizado hasta el momento en la mayoría de los casos, aleatorizando una expresión determinística.

RESULTADOS

El desarrollo del planteamiento está basado en el modelo desarrollado por el ingeniero Ricardo Salazar en su tesis doctoral “Métodos de análisis en geotecnia no convencionales” (Salazar, 1983).

Como ya se ha explicado, en el método se presume que S_u , la resistencia al corte no drenada, es un *proceso aleatorio* en cada posición vertical del suelo, idénticamente distribuida con media (μ_{Cu}) y varianza ($Var(Cu)$), y para este caso la presión activa se calculará mediante una integral, tomando elementos infinitesimales sobre la superficie de falla. También se supone una función de correlación para un proceso estocástico de orden 2:

$$\rho(Cu(z_1), Cu(z_2)) = e^{-\lambda|z_1-z_2|} [\cos(|z_1 - z_2| \theta) + \tan \varphi \operatorname{sen}(|z_1 - z_2| \theta)]$$

Partiendo de la definición de varianza

$$Var(Pa) = E(Pa^2) - [E(Pa)]^2$$

Se calculan los valores $E(Pa)$ y $E(Pa^2)$. Para esto se realizó una maximización de la ecuación de presión activa y se introdujo la función de correlación enunciada dentro del planteamiento.

Debido a que los depósitos de suelo trabajados son netamente cohesivos, se introdujo el concepto de grieta de tracción (Z_o), zona en la cual las presiones sobre un muro de contención son negativas. Por esto, los valores que se obtuvieron contemplan sólo valores de presiones positivas. Los resultados son:

$$E(Pa) = \left(- \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha \cdot \tan \alpha + \cos \alpha}{\cos(90 - \alpha)} \right) * Cu * H + W_{\text{cuña}} \tan \alpha \right) - \left(- \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha \cdot \tan \alpha + \cos \alpha}{\cos(90 - \alpha)} \right) * Cu * Z_o + W_{\text{cuña hasta } Z_o} \tan \alpha \right)$$

$$E(Pa^2) = \left\{ \left(- \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha \cdot \tan \alpha + \cos \alpha}{\cos(90 - \alpha)} \right) * Cu * H + W_{\text{cuña}} \tan \alpha \right) - \left(- \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha \cdot \tan \alpha + \cos \alpha}{\cos(90 - \alpha)} \right) * Cu * Z_o + W_{\text{cuña hasta } Z_o} \tan \alpha \right) \right\}^2$$

Con el valor de la varianza de la presión activa, es posible realizar cálculos de probabilidades de falla en

problemas de empuje lateral de tierras. Suponiendo una distribución normal para Pa, se tiene

$$\Pr \text{ falla} \left(\frac{Pa - \mu}{\sigma} > \frac{\left(\frac{W_{\text{muro}} * \bar{x}}{\bar{y}} \right) - E(Pa)}{\sqrt{\text{var}(Pa)}} \right)$$

Para obtener resultados de comparación entre probabilidades de falla presumiendo Su como un

proceso aleatorio (metodología propuesta), probabilidades de falla suponiendo que Su es una variable aleatoria y métodos determinísticos. Se hicieron cálculos variando las dimensiones de un muro de contención, obteniendo factores de seguridad fijos y calculando probabilidades.

Los valores de λ, θ, Φ son parámetros obtenidos de correlogramas (curvas de espaciamentos vs coeficientes de correlación) que se realizaron a partir de reportes técnicos de ensayos de penetración estática de cono.

Fs	Método determinístico
Pr falla 1 (%)	Cu como proceso aleatorio
Pr falla 2 (%)	Cu como variable aleatoria

CPT 1		FS	Pr falla 1 (%)	Pr falla 2 (%)	Dimensiones de muro (m)		
					Altura	Base	Corona
Cu	3,88	1	50,21	50,36	10	2	1,2
σ(Cu)	1,76						
γ	1,7	2	5,80	0,38	10	3	1
λ	0,3						
φ	2,4	3	0,1	≈ 0	10	3,5	1,9
θ	0,28						

CPT 2		FS	Pr falla 1 (%)	Pr falla 2 (%)	Dimensiones de muro (m)		
					Altura	Base	Corona
Cu	3,97	1	48,94	48,7	10	2	1
σ(Cu)	3,43						
γ	1,7	2	13,76	9,03	10	2,9	1
λ	0,45						
φ	2,15	3	1,38	0,34	10	3,4	2
θ	0,25						

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método alternativo para efectuar análisis probabilísticos en ejercicios de empuje lateral de tierras. Con este modelo se ha demostrado que introducir la variación de las propiedades del suelo en el planteamiento del problema resulta ser más racional que aleatorizar una expresión determinística. Vale la pena recalcar que generalmente la resistencia al corte no dre-

nada se toma como una variable aleatoria dentro de una ecuación, en este caso, la presión activa. Sin embargo, la metodología nace a partir de una deducción matemática, considerando las propiedades del suelo variando punto a punto, es decir, como un proceso aleatorio.

Los valores de probabilidad de falla obtenidos cuando se toma la resistencia al corte no drenada como un proceso aleatorio y no como una variable aleatoria, en

algunos casos resultan ser mayores, lo cual demuestra que es de suma importancia tener en cuenta la variabilidad del suelo y que en la práctica de la ingeniería geotécnica es necesario analizar distintos modelos que permitan reducir la incertidumbre y poder realizar diseños de estructuras confiables, seguros y duraderos.

Por otra parte, hay que considerar que un factor de seguridad “alto” no necesariamente resulta ser el más confiable o seguro; todo esto depende de la variabilidad y el grado de incertidumbre en las propiedades de un depósito.

Para aplicar la metodología propuesta, debe destacarse que los profesionales en la ingeniería geotécnica no deben tener, necesariamente, conocimientos profundos en la teoría de probabilidades; basta con conocer las definiciones de media, varianza y coeficientes de correlación para el planteamiento de la metodología. A partir de ahí es posible replantear modelos tradicionales, introduciendo probabilidades de falla y no factores de seguridad.

Cabe destacar que para el desarrollo de esta metodología y el problema que se plantea, se presume

que el suelo detrás del muro es netamente cohesivo, con terreno horizontal y pared vertical del espaldar del muro.

Igualmente, y a partir del tipo de suelo que se trabaja, la altura de la grieta de tracción (altura típica en suelos cohesivos) se supone que es constante, debido a que la finalidad de la metodología propuesta es trabajar la presión activa positiva, es decir, donde existe contacto suelo-muro.

Como se dijo, el trabajo continuo para reducir la incertidumbre en la ingeniería geotécnica como en ejecución de diseños, obtención de parámetros del suelo, entre otros, es un proceso de nunca acabar. Por tal razón, este modelo podría extenderse a situaciones más complejas, como la introducción del ángulo de fricción, la existencia de diferentes estratos con características específicas, inclinación del talud detrás del muro, variabilidad no sólo vertical sino también horizontal, pero esta última presenta una limitación debido a que no existen ensayos (CPT o SPT) que permitan caracterizar los procesos aleatorios de forma horizontal.

Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos para obras geotécnicas

Grouting methodologies for treating rock mass for geotechnical works

ALFONSO RICO RODRÍGUEZ¹ - RAMIRO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil de la Universidad Javeriana. Consultor. Director del Departamento de Túneles de Ingetec.

alfonso.rico-r@escuelaing.edu.co - rgutier@ingetec.com.co

Recibido: 20/08/2019 Aceptado: 10/09/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se habla sobre los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos, y además se puede encontrar la información necesaria, como guía básica, para diseñar, construir y supervisar este tipo de trabajos.

Así mismo, están las metodologías o recomendaciones de tratamientos con inyecciones, al igual que información y orientación en el diseño, construcción y supervisión de proyectos en los que se involucren tratamientos con inyecciones de macizos rocosos; para acoplarse a las necesidades y características de cada proyecto, de acuerdo con las condiciones geológicas y geotécnicas de éste, y optimizando la ejecución del tratamiento en tiempos prudentes de ejecución.

Palabras claves: georecnia, inyecciones, macizos rocosos.

Abstract

This document deals with grouting treatments in rock mass. The necessary information, as a basic guide, to design, build, and supervise this type of work can be found.

This document gathers the methodologies and / or recommendations of treatments with grouting, providing information and guidance, in the design, construction and supervision of projects where rock mass grouting treatments are involved, to fit the needs and characteristics of each project, considering the project's geological and geotechnical conditions and optimizing treatment execution in prudent times.

Keywords: geotechnics, grouting, rock mass.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se habla sobre las metodologías o recomendaciones de tratamientos con inyecciones, al igual que información y orientación en el diseño, construcción y supervisión de proyectos en los que se involucren tratamientos con inyecciones de macizos rocosos, para acoplarse a las necesidades y características de cada proyecto, de acuerdo con las condiciones geológicas y geotécnicas de éste, y optimizando la ejecución del tratamiento de manera efectiva, económica y en tiempos prudentes de ejecución.

Es una especie de guía básica de diseño, en la que se recomienda qué utilizar, qué ensayos hacer, cómo diseñar las mezcla que se van a usar, a qué presión se inyectan estos materiales, los equipos que se utilizan en estos tratamientos, recomendaciones de construcción, sugerencias de inspección y supervisión de los tratamientos, y pautas para realizar un adecuado cierre de los tratamientos.

A continuación se explica brevemente en qué consisten las inyecciones y sus conceptos:

La inyección es un proceso para hacer penetrar materiales o fluidos en el macizo rocoso, que se acumulan en las discontinuidades existentes o en oquedades, llenándolas en su totalidad o parcialmente. Estos materiales inyectados penetran en la matriz de material, rellenando los poros o vacíos intrínsecos, mejorando sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

El objetivo principal de los tratamientos de inyección en macizos rocosos es reducir o detener los flujos de agua dentro del macizo, mejorar las propiedades mecánicas del macizo, o ambas. En obras subterráneas, los tratamientos con inyecciones se realizan con el fin de reducir y controlar la infiltración de agua, aunque también sirve para mejorar el módulo de deformación del macizo.

El tratamiento con inyecciones en macizos rocosos es de última generación, dada la complejidad geológica en algunos macizos y el comportamiento impredecible. Por tal razón, muchos de estos asuntos de inyecciones se enmarcan dentro de un proceso observacional, es decir, de prueba y error. Tampoco existe un desarrollo matemático claro para enmarcar el tema de inyecciones en macizos rocosos. El proceso se revisa a través de una cadena empírica o semianalítica.

En este artículo se dan las recomendaciones, las reglas y los procedimientos que tienden a mejorar el proceso observacional.

La información recopilada en el presente artículo se obtuvo de varios autores y fuentes. La información es dispersa y estos tratamientos son muy especializados. Además, se ha hecho una revisión bibliográfica y académica en temas de inyecciones en macizos rocosos, pero a la vez se han integrado conceptos de experiencias reales recientes.

CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

El objetivo del tratamiento de macizos rocosos con inyecciones se utiliza generalmente para reducir las filtraciones que se presenten en el macizo rocoso, donde se apoyan o se construyen las obras civiles, mediante el sellado o taponamiento de las discontinuidades y los pasos preferenciales de flujo de agua.

Por esta condición es necesario conocer las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio para diseñar un adecuado programa de inyección, buscando identificar, de manera apropiada y efectiva, las discontinuidades y el macizo rocoso.

Para el diseño y el tratamiento del macizo rocoso, se debe tener un conocimiento completo de los tipos de roca en el sitio y su historia geológica.

Las propiedades de varios tipos de roca, por naturaleza de su origen, litología y estructura, influirán en las condiciones de inyección.

El conocimiento de las condiciones geológicas del sitio, así como de las condiciones físicas y geométricas de las discontinuidades, se debe considerar como una parte esencial del diseño de un programa de inyección. Las discontinuidades se deben identificar e interceptar para tratarlas de manera efectiva.

Una de las consideraciones geológicas principales que hay que tomar en cuenta en el proceso de inyección son las estructuras geológicas, en especial las discontinuidades, fallas, diaclasas y cizallas (figura 1). Estas estructuras y sus características (apertura, rugosidad, espaciamiento, relleno, etc.) definen los diseños del tratamiento, el proceso de inyección y el tipo de mezcla para tener un tratamiento adecuado.

Investigaciones geotécnicas

Para conocer las condiciones geológicas del sitio donde se realizará el tratamiento, se debe caracterizar dicho sitio con exploración directa e indirecta.

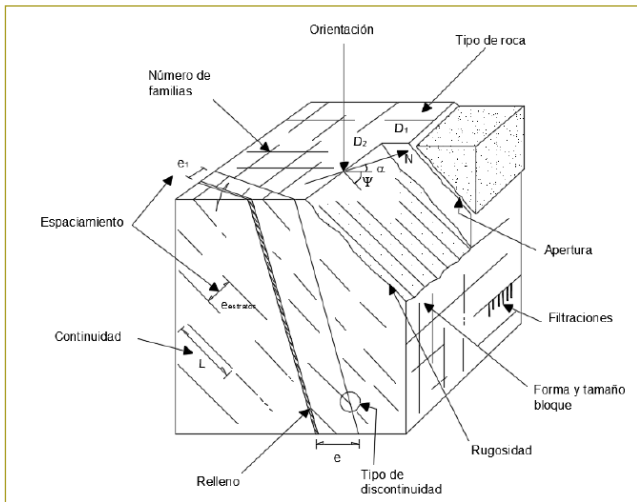


Figura 1. Diagrama ilustrativo de las propiedades del macizo rocoso.

Adaptado de *Foundations on Rock*, Duncan C. Wyllie (2005).

En primera fase, investigando y revisando información secundaria de los datos disponibles del sitio (mapeos geológicos existentes, fotografías aéreas, fotointerpretación, sondeos, entre otros).

Con la información anterior, se debe preparar un plan de investigaciones geotécnicas (perforaciones, métodos geofísicos y ensayos de permeabilidad) en los sitios apropiados, para complementar la información anterior y así tener un modelo geológico - geotécnico apropiado de las condiciones del macizo (fotografías 1 y 2).



Fotografía 1. Perforación exploratoria.
Fuente: Los autores.



Fotografía 2. Mapeo geológico en galería de exploración.
Fuente: Los autores.

Entre las consideraciones para el diseño de los tratamientos, se deben realizar los estudios hidrogeológicos, para conocer las condiciones de flujo, filtraciones y gradientes hidráulicos en el macizo rocoso (figura 2).

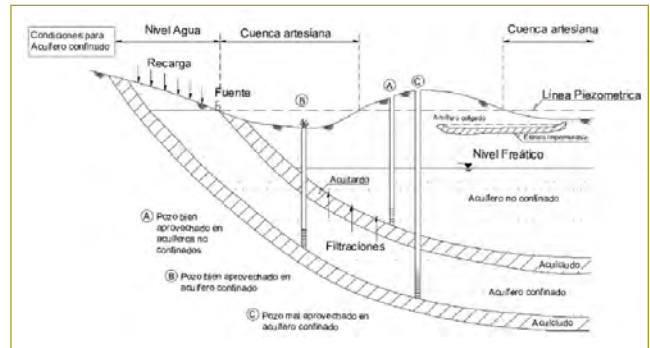


Figura 2. Tipos de acuíferos. Adaptado de *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*, de B.B.S. Singhal y R.P. Gupta, (2010).

Permeabilidad del macizo rocoso

Conocer la permeabilidad del macizo es esencial para diseñar los programas de inyección e identificar el propósito del tratamiento del macizo (reducir filtraciones, mejorar las propiedades físicas del macizo o reducir gradientes hidráulicos).

La prueba de permeabilidad utilizada para los trabajos de inyección es el tipo radial, donde se bombea agua dentro de una perforación de prueba en intervalos de tiempo y presiones establecidas. La prueba la instauró Lugeon en 1933, cuya unidad de permeabilidad está relacionada con la prueba radial que lleva su nombre (figura 3).

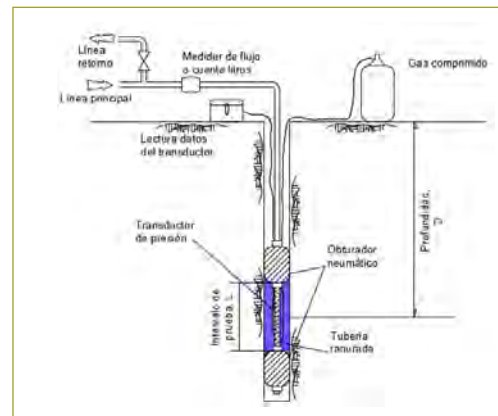


Figura 3. Configuración de ensayo Lugeon. Tomado de *Lugeon test interpretation, revisited*, de C. Quiñones (2010).

La evaluación de permeabilidad para los trabajos de inyección se divide en tres grupos: 1) aquellos que se realizan en etapa de exploración (etapa de diseño); 2) aquellos que se hacen durante el tratamiento de in-

yeción, antes de inyectar en el sitio; 3) aquellos que se efectúan para verificación del tratamiento de inyección.

Las pruebas de permeabilidad (pruebas de conductividad hidráulica), que se realizan durante la exploración, sirven para evaluar la profundidad adecuada de inyección; las pruebas efectuadas durante la ejecución de las inyecciones sirven para evaluar u optimizar el diseño del programa de inyección, y las pruebas realizadas después de la ejecución del tratamiento sirven para verificar la efectividad del tratamiento.

Tipo de inyección

En represas y diques, el propósito principal de los tratamientos con inyecciones es minimizar la filtración a través de la roca de fundación, al igual que el mejoramiento de las propiedades mecánicas de macizos rocosos fracturados o meteorizados (figura 4).

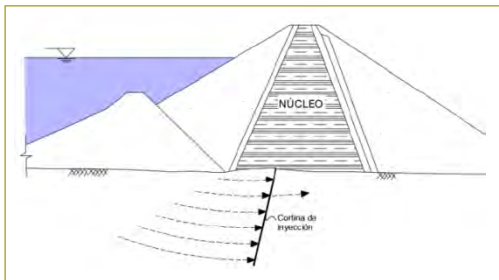


Figura 4. Tratamiento de inyecciones en represas. Adaptado de *Construction and design of cement grouting*, de A.C. Hously (1990).

En obras subterráneas, los tratamientos con inyecciones sirven para reducir y controlar la infiltración de agua, aunque también se utilizan para mejorar el módulo de deformación del macizo (figura 5).

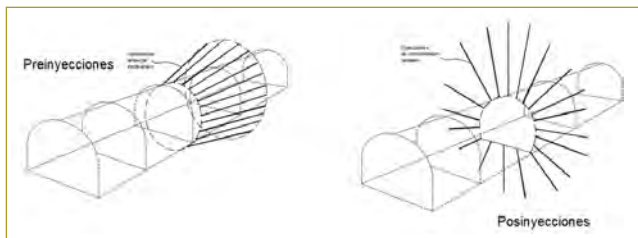


Figura 5. Tratamiento de inyecciones en túneles.

Fuente: Elaboración del autor.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Los criterios de diseño de tratamientos con inyecciones se realizaban con reglas empíricas, relacionadas con la carga hidrostática aplicada en el macizo y al tipo de obra.

Apenas en la década de los noventa, Hously (1990), Weaver (2007) y otros autores publicaron artículos y libros que promovieron el diseño de las inyecciones en forma racional, con base en la investigación geotécnica del sitio, realizando enfoques semianalíticos para el diseño de las inyecciones y analizando los resultados durante la ejecución del tratamiento.

El Bureau of Reclamation (2014) recomienda el método de espacio dividido para obtener el cierre del tratamiento en macizos rocosos. Las inyecciones aplicadas con este método se dividen en patrones de cierre de 25,0 m de separación entre perforaciones primarias, medidos perpendicularmente del centro de una perforación a la otra. Consta de inyecciones primarias (P), secundarias (S), terciarias (T) y cuaternarias (C). La separación entre perforaciones primarias de 25,0 m disminuye la posibilidad de comunicación de la inyección a las perforaciones primarias adyacentes durante la inyección (figura 6).

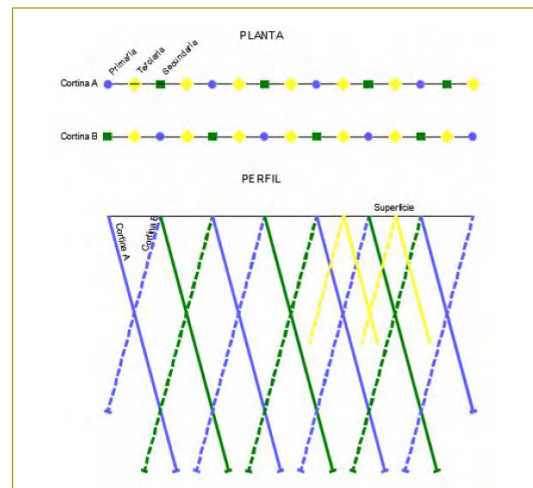


Figura 6. Disposición típica de tratamiento de inyección. Adoptado de *Engineering and Design - Grouting Technology. Manual 1110-2-3506*, de Usace (2017).

En esta figura se muestra el diseño de las perforaciones para inyección primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria (figura 6).

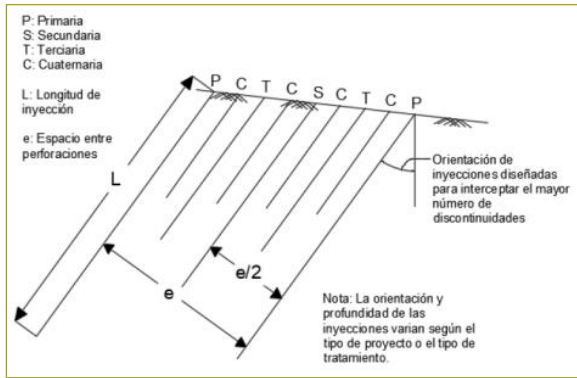


Figura 7. Espaciamiento y profundidad de inyecciones. Adaptado de *Design Standards N.º 13. Embankment Dams* de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2014).

Orientación de las perforaciones

El principal objetivo del tratamiento con inyecciones es interceptar tantas discontinuidades como sea posible. Si las discontinuidades son verticales y horizontales, las perforaciones deben orientarse de tal forma que atraviesen la mayor parte de las discontinuidades (figura 8).

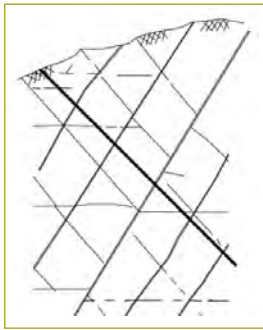
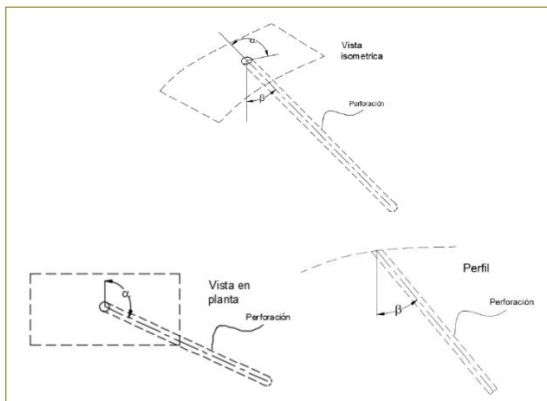


Figura 8. Perforación intersectando las discontinuidades abiertas. Adaptado de *Construction and design of cement grouting*, de A.C. Houlsby (1990).

La inclinación y la dirección de las perforaciones se deben especificar en los planos con el espaciamiento entre las perforaciones y con los cambios de nivel y de dirección (figura 9).

Figura 9. Ángulos de inclinación (α y β).

Fuente: Elaboración del autor.



Cortinas de inyección

Las cortinas de inyección forman un único tratamiento, con el objetivo de mejorar las condiciones del macizo o rellenar las discontinuidades (figura 10).

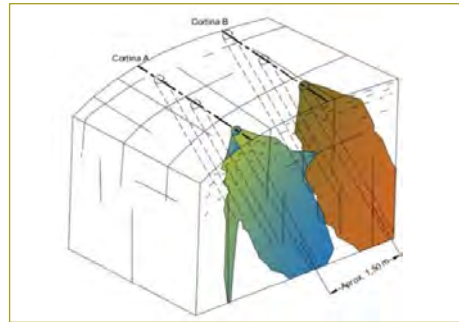


Figura 10. Tratamientos con inyecciones con varias cortinas.

Fuente: Elaboración de los autores.

Posición de las cortinas de inyección

La posición de las cortinas para el tratamiento con inyecciones en represas y túneles depende del tipo de represa y del tipo de obra subterránea, así como la geología del sector, las preferencias de diseño, y otras condiciones que pueden hacer variar el diseño de la posición de la cortina.

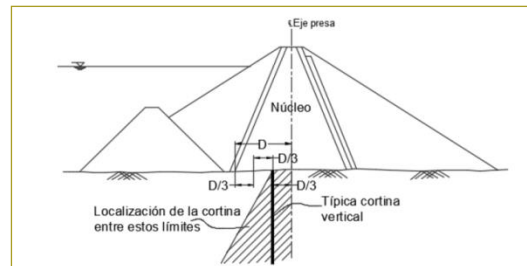


Figura 11. Ubicación típica de una cortina profunda en una represa con núcleo de arcilla. Adaptado de *Construction and design of cement grouting*, de A.C. Houlsby (1990).

La posición de cortinas en abanico se utiliza para realizar tratamientos de inyección en túneles, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del macizo rocoso en los frentes de excavación o reducir la permeabilidad previa al avance de la excavación (figura 12).

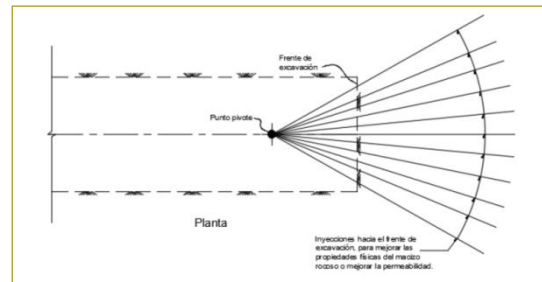


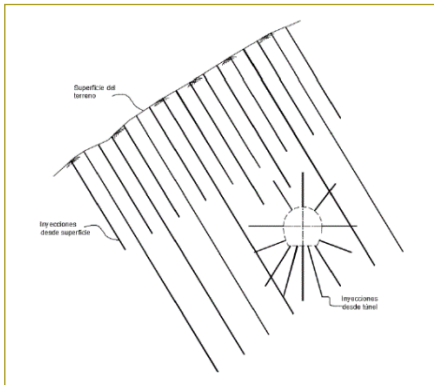
Figura 12. Inyecciones hacia el frente en una excavación subterránea.

Fuente: Elaboración de los autores.

Intersección de las cortinas de inyección

Cuando una excavación subterránea pasa por debajo de una cortina de inyección desde la superficie, se debe asegurar el empalme entre la cortina desde la superficie y el tratamiento de inyección desde el túnel, para que no pasen los flujos de agua alrededor del túnel o por debajo de éste (figura 13).

Figura 13. Intersección de cortinas desde superficie y desde túneles. Adaptado de *Construction and design of cement grouting*, de A.C. Houlsby (1990).



Inyecciones de consolidación

Este tratamiento mejora el macizo rocoso y reduce la permeabilidad. Así mismo, ayuda a disminuir las pérdidas de agua por filtración por debajo de las represas, aminora las velocidades de filtración en zonas relativamente permeables y reduce la pérdida del material de la represa (figura 14).

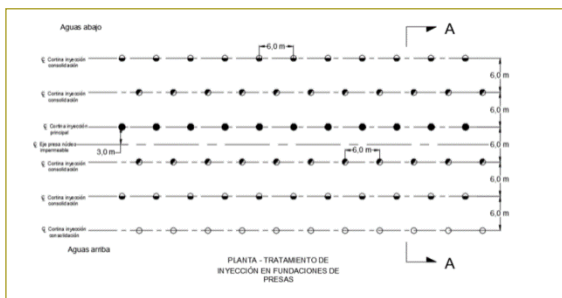


Figura 14. Planta de inyecciones de consolidación en tratamientos de fundación para represas. Adaptado de *Design Standards N.º 13. Embankment Dams*, del U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2014).

Métodos de inyección

Etapa simple

El método de inyección en una sola etapa consiste en inyectar perforaciones poco profundas ($\pm 6,0$ m) en macizos rocosos poco fracturados en superficie (figura 15).

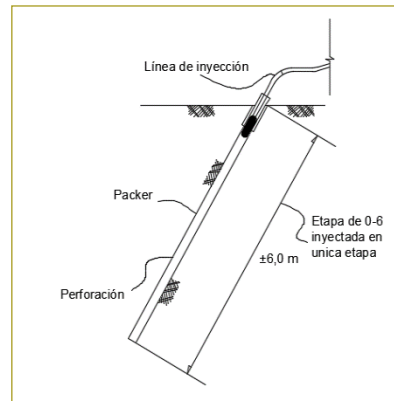


Figura 15. Etapa simple de inyección. Adaptado de *Design Standards N.º 13. Embankment Dams*, del U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2014).

Inyección ascendente

La inyección se ejecuta con etapas predeterminadas a cualquier profundidad. La inyección ascendente consiste en perforar el macizo rocoso para inyección hasta la profundidad máxima (diseño), y después lavar la perforación hasta que no salgan partículas de cemento. Posteriormente, se coloca el packer en la parte superior de la etapa más baja y se realiza la inyección hasta alcanzar el rechazo. Luego se pasa a la siguiente etapa superior y así sucesivamente hasta la superficie (figura 16).

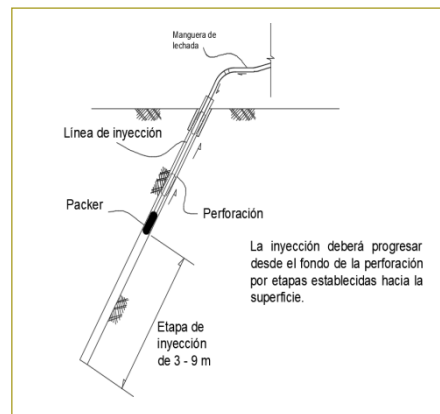


Figura 16. Método de inyección ascendente. Adaptado de *Design Standards N.º 13. Embankment Dams*, del U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2014).

Inyección descendente

El proceso de inyección descendente se realiza desde la parte superior hacia abajo, perforando e inyectando una etapa de inyección a la vez. Después que se perfora y se inyecta la primera etapa se deja fraguar la mezcla de inyección lo suficiente en el macizo, luego se reperfora la etapa ya inyectada y se continúa a la siguiente etapa inferior y así sucesivamente hasta alcanzar la profundidad de diseño (figura 17).

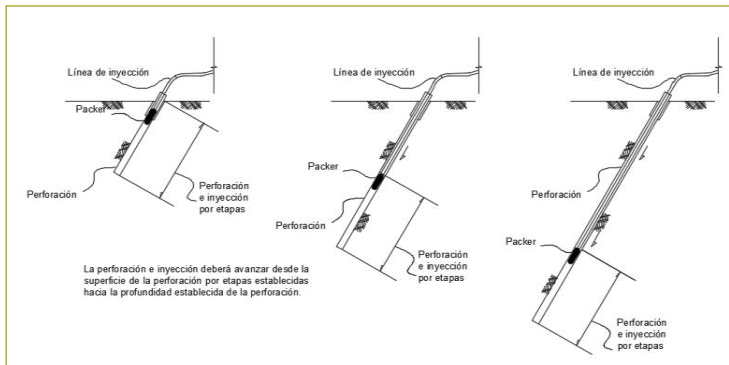


Figura 17. Método de inyección descendente. Adaptado de *Design Standards N.º 13. Embankment Dams*, del U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2014).

MATERIALES PARA LA INYECCIÓN

Existen diferentes materiales utilizados en los tratamientos con inyecciones, que se clasifican según sus propiedades reológicas. Estas propiedades, en estados fluido y sólido, definen la garantía de un tratamiento exitoso y son importantes debido a que las mezclas usadas son fluidos no newtonianos que requieren esfuerzos de desplazamiento mayores que los fluidos newtonianos; esto se explica en la siguiente figura.

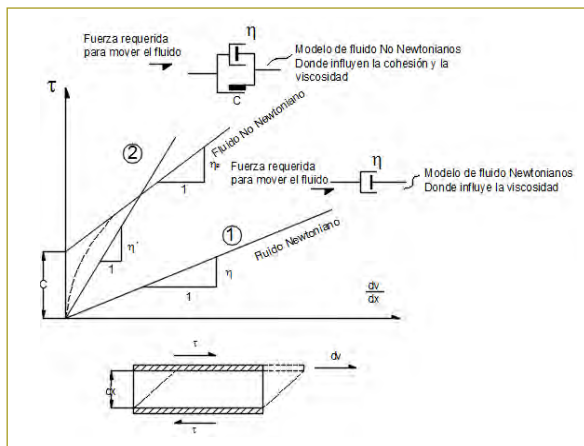


Figura 18. Modelos de fluidos newtonianos (1) y fluidos no newtonianos (2). Adaptado de *Dam foundation grouting*. Kenneth D. Weave & D.A. Bruce (2007).

Las mezclas de inyección más utilizadas son aquellas de baja viscosidad, baja cohesión, baja exudación y bajos coeficientes de presión de filtración. Estas son mezclas hechas a base de cemento, con bajas relaciones de A: C con aditivos estabilizadores y plastificantes.

Las mezclas con bajas relaciones de A: C con aditivos estabilizadores y plastificantes generan mezclas de baja viscosidad (tiempo menor de 50 segundos, en el

ensayo de viscosidad del cono de Marsh). Estas mezclas con aditivos son de cohesión baja, con poca exudación (<5 %) y con bajos coeficientes de presión de filtración (<0,02); se pueden usar altas presiones de inyección, sin tener pérdida de agua en la mezcla. Por lo tanto, este tipo de mezclas, las más utilizadas en los tratamientos con inyecciones, se basan en diferentes ensayos realizados con diversas relaciones de agua: cemento (figura 19).

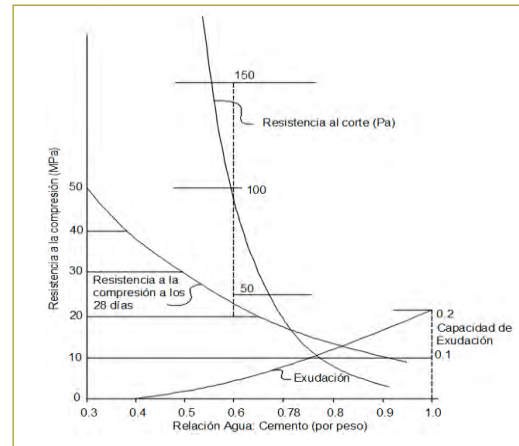


Figura 19. Efecto de las relaciones agua: cemento en las propiedades de la mezcla. Adaptado de *Dam foundation grouting*. Kenneth D. Weave & D.A. Bruce (2007).

ENSAYOS

Como procedimiento de control de calidad y verificación de la efectividad del tratamiento con inyecciones, se requieren ensayos de campo y laboratorio para verificar la calidad de las mezclas de inyección antes del inicio de actividades y durante los tratamientos (tabla 1).

Tabla 1
Ensayos utilizados para mezclas de inyección, ubicación y frecuencia

Propiedad	Ensayo	Norma u autor	Equipo	Ubicación ensayo	Frecuencia
Cohesión	Cohesión de la mezcla	Deere y Lombardi (1985)	Plato de Lombardi	Laboratorio	Poco frecuente
Viscosidad	Viscosidad de la mezcla	ASTM C939	Cono de Marsh	Campo	Muy frecuente
Exudación	Exudación	ASTM C940	Probeta graduada	Campo	Frecuente
Presión de filtración	Presión de filtración	API 13B-1	Filtro de presión	Laboratorio	Poco frecuente
Resistencia al lavado	Resistencia al lavado	Khayat, K. and Yahia, A. (1998)	Equipos especiales	Laboratorio especializado	No se realiza (En pocos casos se requiere)
Peso específico	Peso específico	API (2009)	Balanza de lodos	Campo	Muy frecuente
Fraguado	Prueba de aguja de Vicat	ASTM C191	Aguja de Vicat	Laboratorio	Poco frecuente
Resistencia a la compresión	Resistencia a la compresión	ASTM C109	Formaleta de acero	Laboratorio (se toman las muestras en campo)	Poco frecuente (según proyecto es frecuente)

Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

A renglón seguido se muestra el ensayo de viscosidad utilizando el cono de Marsh. Este ensayo es el que se emplea con mayor frecuencia en campo, el cual verifica las propiedades de la mezcla antes de realizar el procedimiento de inyección en el macizo rocoso.

Fotografía 3. Cono de Marsh preparado para iniciar el ensayo de viscosidad.

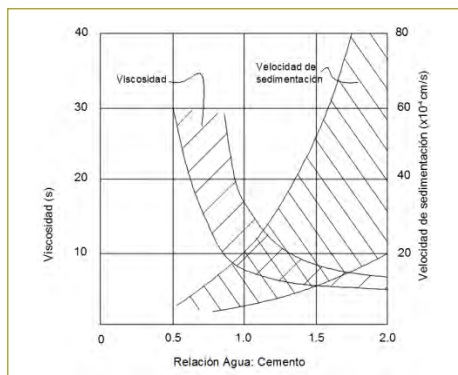
Fuente: Los autores.



MEZCLAS PARA INYECCIONES

La mezcla de inyección a base de cemento es la más utilizada en los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos, debido a su fácil manejo y disposición en obra. La ventaja de emplear este tipo de mezcla es que permite cambiar sus propiedades reológicas por medio de la adición de agua hasta obtener la relación de agua: cemento óptima para tratamiento. A continuación se detalla una relación entre la mezcla de inyección, la viscosidad y la velocidad de sedimentación, donde se entiende que la mezcla óptima se encuentra entre una relación de agua: cemento 0,6 a 0,8 (figura 20).

Figura 20. Viscosidad y velocidad de sedimentación en mezclas a base de cemento. Adaptado de *Dam foundation grouting*, Kenneth D. Weave & D.A. Bruce (2007).



PRESIONES DE INYECCIÓN

Se requieren criterio ingenieril y experiencia en tratamientos con inyecciones para escoger una apropiada tasa de presión de inyección según el tipo de macizo rocoso, con el fin de que la mezcla penetre donde se

requiere y que la presión no fracture el macizo, teniendo en cuenta el estado de esfuerzos del macizo en profundidad. A renglón seguido se muestra una descripción gráfica de la presión efectiva en el sitio de inyección, así como sus pérdidas de energía durante el procedimiento (figura 21).

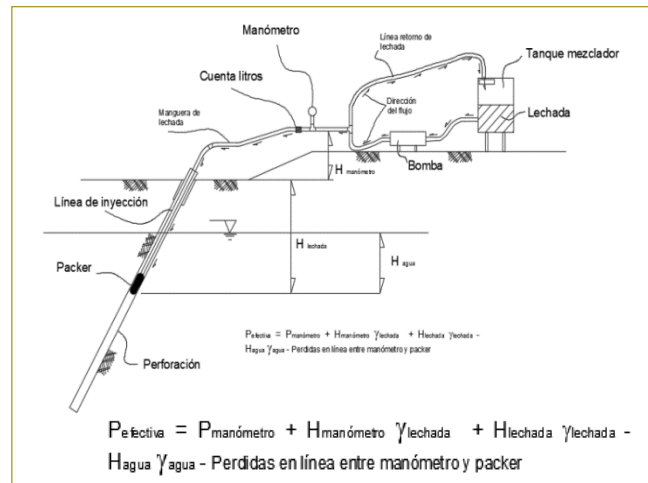


Figura 21. Estimación de presión efectiva en la etapa de inyección. Adaptado de *Design Standards N.º 13. Embankment Dams*, del U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2014).

Las presiones máximas permitidas para la inyección de mezclas sugeridas por Houlsby (1990) se detallan en la figura siguiente (figura 22), en la que se muestran las presiones en diferentes condiciones de la roca y profundidades de inyección.

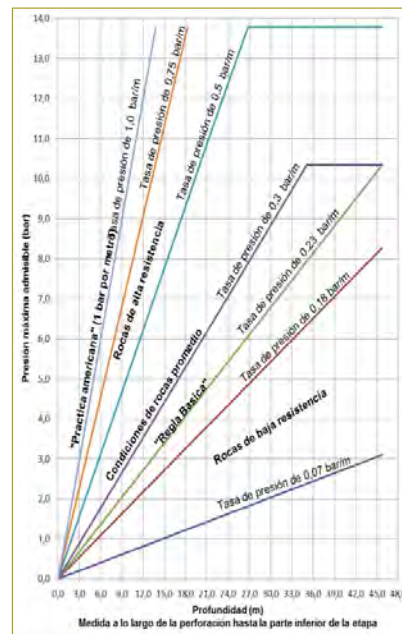


Figura 22. Gráficos de presión máxima permitida en diferentes condiciones de la roca y profundidad, en unidades de psi/pie y bar/m. Adaptado de *Construction and design of cement grouting*, de A.C. Houlsby (1990).

EQUIPOS

Para los procedimientos de perforación e inyección se deben escoger los equipos apropiados según el tipo de macizo que se va a tratar, para que el trabajo sea efectivo.

Perforación

Las perforaciones para los tratamientos con inyecciones pueden hacerse con métodos con broca de diamante y recobro o de rotopercusión sin recobro. Este último es más rápido y económico que la perforación con recobro, y ofrece resultados satisfactorios, siempre y cuando se no se tengan altas desviaciones en la perforación (fotografía 4).



Fotografía 4. Perforadoras de rotación y rotopercusión.
Fuente: Los autores.

Equipos de inyección

Estos equipos se usan para mezclar y movilizar la mezcla de inyección al sitio donde se hará el tratamiento, por medio de mezcladoras, agitadores, bombas y plantas de inyección. En el sitio de inyección se utilizan cabezales de inyección, manómetros, empaques y sistemas de control de inyección para controlar que el procedimiento de inyección se realice adecuadamente.

Fotografía 5. Planta estacionaria de inyecciones.

Fuente: Los autores.



PROCEDIMIENTOS DE INYECCIÓN

Los procedimientos de inyección pueden ser dos: el método GIN (*Grouting Intensity Number*), que corresponde

a la práctica europea, y el método de engrosamiento sucesivo, que es la práctica americana.

A continuación se muestra la representación de una estimación de la energía requerida en el proceso de inyección en un macizo rocoso con el método GIN, en un gráfico de presión de inyección versus volumen inyectado (figura 23).

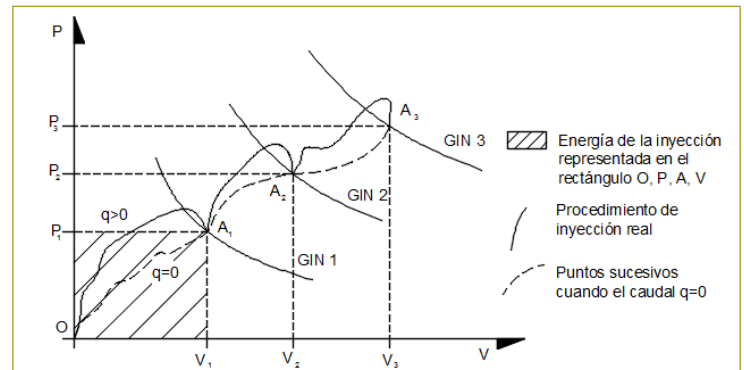


Figura 23. Procedimiento de inyección representado en un gráfico de presión versus volumen inyectado. Adaptado de *Grouting of rock masses*, de Lombardi (2003).

En la figura siguiente se observa que la mezcla base (fluida) no alcanza la presión establecida de diseño, por lo que se engrosa la mezcla; con esto se espera incrementar la presión y alcanzar la presión máxima establecida (figura 24).

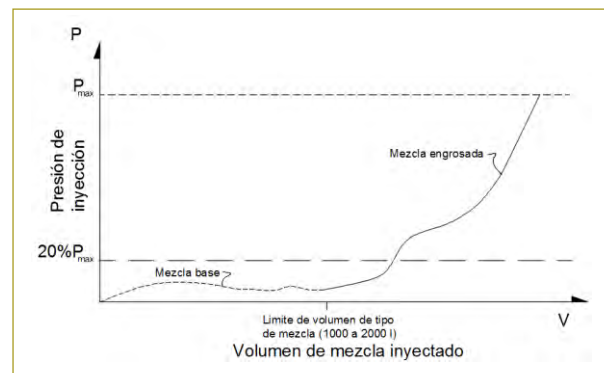


Figura 24. Engrosamiento de la mezcla para alcanzar la presión máxima establecida.

Fuente: Elaboración de los autores.

Estos métodos se diferencian en la forma como se inyecta la mezcla en el macizo. Mediante el método GIN se inyecta una única mezcla, estable a presiones altas, y por el método de engrosamiento sucesivo se inyecta una mezcla base que se engrosa poco a poco (con cambios de propiedades reológicas), cuando el procedimiento de inyección lo requiera.

Lombardi (2003) sugiere límites de valores GIN (figura 25), de acuerdo con sus experiencias en diferentes tratamientos, y establece los límites para terminar el procedimiento de inyección.

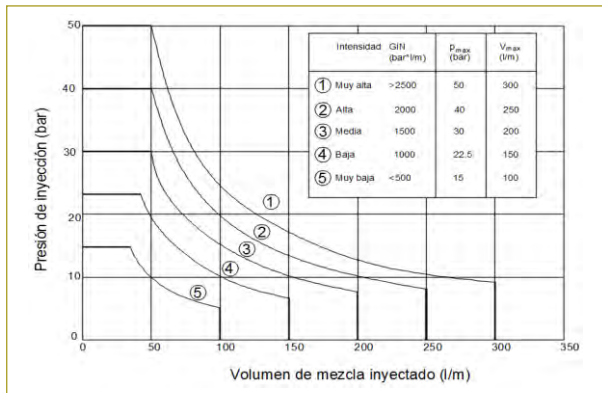
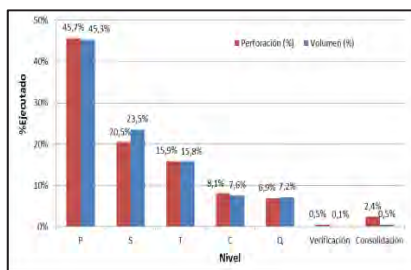


Figura 25. Curvas límites GIN que sirven de ayuda como guías iniciales de diseño. Adaptado de *Grouting of rock masses*, de Lombardi (2003).

Los volúmenes de inyección en las inyecciones iniciales (primarias y secundarias) con el método de engrosamiento sucesivo son altos y van disminuyendo a medida que se aplican inyecciones adicionales (terciarias y cuaternarias), para realizar un cierre adecuado del tratamiento (figura 26).

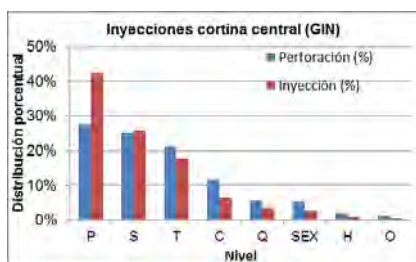
Figura 26 Proporción de inyecciones ejecutadas según el nivel de inyección. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

Fuente: Elaboración de los autores.



Con el método GIN se pueden alcanzar niveles de inyección más altos (hasta septenarios), porque las inyecciones iniciales finalizan por límite de volumen establecido y dejan algunos vacíos por llenar (figura 27).

Figura 27. Proporción de inyecciones ejecutadas en la cortina central de la represa con el método GIN, según el nivel de inyección. Adoptado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la represa" (EPM, 2012).



PROGRAMAS DE CONSTRUCCIÓN DE CORTINAS DE INYECCIONES

Preparación del terreno

Antes de iniciar los trabajos de perforación e inyección en el macizo rocoso, hay que preparar la superficie o el terreno para ayudar a optimizar la eficiencia de los trabajos de perforación e inyección, teniendo en cuenta las particularidades del tratamiento. De este modo, se facilita el acceso al sitio para ejecutar adecuadamente la perforación y la inyección (figura 28).

Secuencia de inyección

La secuencia de inyección en tratamientos debe alcanzar el objetivo del tratamiento. Para esto, se debe realizar una secuencia de inyección acorde con las particularidades de cada proyecto para obtener un efectivo tratamiento de inyecciones.

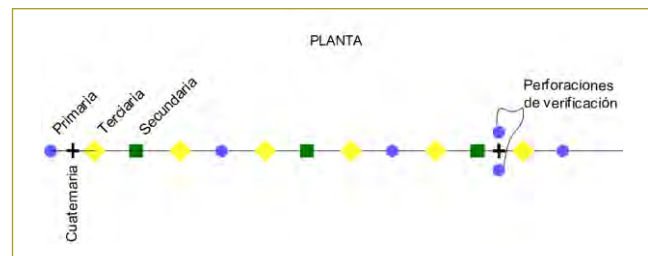


Figura 28. Secuencia de inyección en tratamientos con inyecciones.

Fuente: Los autores.

Tratamiento de discontinuidades abiertas en superficie

Se deben tratar o limpiar en superficie, removiendo el material de roca triturado, según Bruce (2007), en al menos tres veces el ancho de la zona de falla (fotografía 6).



Fotografía 6. Cizallas tratadas con inyecciones desde superficie.

Fuente: Los autores.

Tratamiento de zonas particulares

Cuando se presenten flujos con presión artesiana, esto puede dificultar la inyección de la mezcla (fotografía 7).



Fotografía 7. Resurgencias de agua en la perforación por efectos de la presión artesiana.

Fuente: Los autores.

Si se presentar esta situación cuando se hace la perforación y surge agua con presión, se debe dejar que el agua drene por el mayor tiempo posible e inyectar después. La inyección debe hacerse con presiones que sean más altas que la presión artesiana, sin superar la presión máxima de inyección, para que la presión sea lo más alta posible. En estos casos, es posible utilizar mezclas con aditivos con resistencia al lavado.

En caso de existir comunicación de mezcla de inyección durante un procedimiento de inyección en una perforación cercana, es decir, que haya flujo de mezcla de una perforación a otra, se deben inyectar ambas perforaciones de manera simultánea lo más rápido posible, sin detener el primer procedimiento de inyección (figura 29).

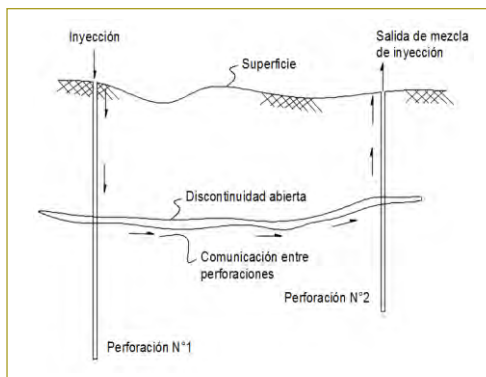


Figura 29. Representación esquemática de una conexión de mezcla entre perforaciones. Adaptado de Dam foundation grouting, Kenneth D. Weave & D.A. Bruce (2007).

INSPECCIÓN Y SUPERVISIÓN DE LOS TRABAJOS DE PERFORACIÓN E INYECCIÓN

La inspección y la supervisión de los proyectos con tratamientos con inyecciones en el mundo se han realizado

con la dirección del propietario del proyecto o de un consultor geotécnico del propietario, en tanto que el contratista suministra la mano de obra y los equipos, con facultades y experiencia para realizar los tratamientos. Sin embargo, existen contratistas que no proporcionan los aportes técnicos necesarios o la garantía de ejecutar un tratamiento adecuado. Por esta razón, se debe proporcionar la orientación apropiada al personal de obra para hacer los trabajos de inyección de acuerdo con las prácticas tradicionales (fotografía 8).



Fotografía 8. Inspector revisando los procedimientos de inyección.

Fuente: Los autores.

Ensayos en campo

Según los datos de los primeros procedimientos de inyección, se podrán solicitar pruebas de campo para observar la presión máxima de inyección que resiste el macizo y se compara con la presión máxima establecida, con el fin de verificar que los parámetros escogidos sean acordes con el sitio de inyección (fotografía 9).



Fotografía 9. Pruebas de campo para estimar la presión máxima cerca de la superficie.

Fuente: Los autores.

CRITERIOS DE CIERRE O TERMINACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INYECCIÓN

El cierre o terminación de los trabajos de inyección es un método observacional de los datos obtenidos durante los procedimientos de inyección, que requieren un criterio ingenieril y asesoría de un experto en tratamientos con inyecciones.

El cierre se hace al finalizar los procedimientos de inyección y las pruebas de permeabilidad, siguiendo el

criterio de permeabilidad (figura 30), el criterio de tomas de inyección (tabla 2), el criterio geológico (figura 31), el criterio de datos de instrumentación, el criterio de evaluación detallada del tratamiento y el criterio de evaluación estadística de los procedimientos de inyección (figura 32).

Figura 30. Perfil de permeabilidad. Adoptado de *Rock grouting with Emphasis on Dam sites*, de F.-K. Ewert (1985).

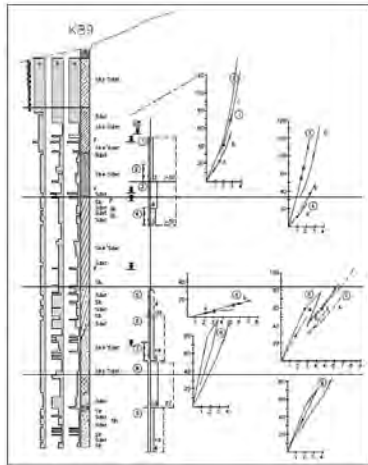


Tabla 2

Sistema de clasificación de tomas de inyección

Clasificación	Toma		Símbolo
	(kg/m)	(sacos/m)*	
Muy baja	0 – 12.5	0 – 0.29	MB
Baja	12.5 – 25	0.29 – 0.58	B
Moderadamente baja	25 – 50	0.58 – 1.17	MeB
Moderada	50 – 100	1.17 – 2.33	M
Moderadamente alta	100 – 200	2.33 – 4.67	MeA
Alta	200 – 400	4.67 – 9.33	A
Muy alta	> 400	> 9.33	MA

*Sacos de 42.85 kg

Adaptado de *Dam foundation grouting*, Kenneth D. Weave & D.A. Bruce (2007).

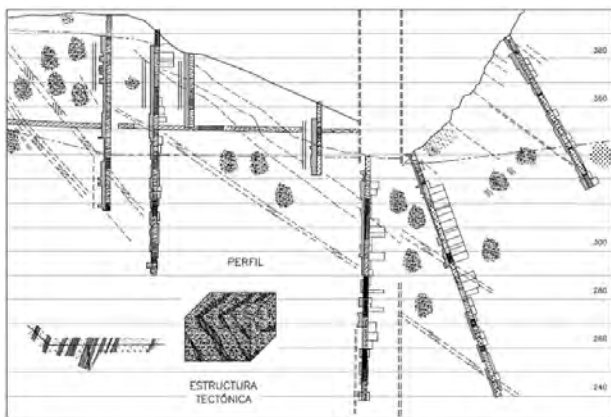


Figura 31. Perfil geológico. Adoptado de *Rock grouting with emphasis on dam sites*, de F.-K. Ewert (1985).

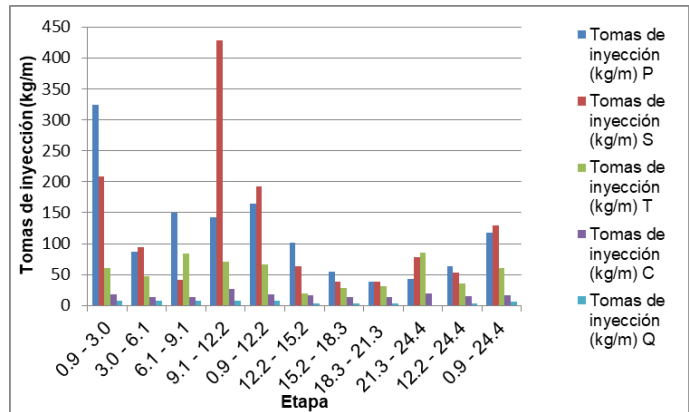


Figura 32. Ejemplo de histograma para diferentes tomas de inyección.

Fuente: Elaboración de los autores.

CASOS HISTÓRICOS

A renglón seguido se presentan casos históricos (a manera de informativa) en los que se aplican exitosamente los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos.

Central Hidroeléctrica El Quimbo

La Central Hidroeléctrica El Quimbo (CHEQ) se encuentra localizada en el sur del departamento del Huila, sobre el valle superior del río Magdalena, aproximadamente 1,3 km aguas arriba de la confluencia con el río Páez, en jurisdicción del municipio de Gigante. Una de las obras que conforman la central es la represa, con una altura de 151 m y del tipo CFRD, fundada sobre rocas de la formación Gualanday Superior (Tgs) del Terciario.



Fotografía 10. Represa CFRD y obras en el estribo derecho CHEQ.

Fuente: Los autores.

A continuación se observa la distribución de las inyecciones realizadas en la CHEQ en el perímetro de la fundación de la represa CFRD y hacia ambos estribos (izquierdo y derecho, respectivamente). El objetivo principal de los tratamientos con inyecciones fue llenar adecuadamente las discontinuidades que se presentaron abiertas en la zona de fundación de la represa y del dique

auxiliar. Con dicho tratamiento se buscó reducir la permeabilidad de la masa de roca y disminuir el gradiente hidráulico hacia aguas abajo del eje de la represa, para así proteger las laderas y la zona de casa de máquinas. Para lograr lo anterior, el tratamiento con inyecciones se complementó a través de galerías ubicadas en dos niveles en ambos estribos (figura 33).

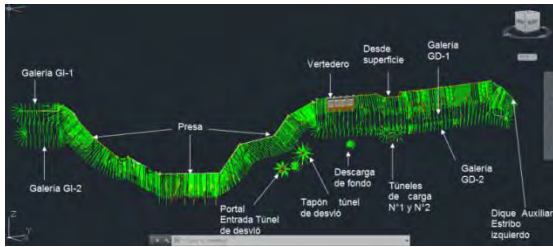


Figura 33. Vista isométrica de la distribución del tratamiento con inyecciones en CHEQ. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

Fuente: Elaboración de los autores.

El criterio de cierre de las inyecciones del tratamiento se definió en términos de consumo de sacos de cemento, asumiendo la buena práctica para este tipo de macizo rocoso (rocas sedimentarias) como una toma alta de un saco de cemento de 49,85 kg por metro de etapa inyectada (1,0 saco/m). Es decir, que para dar cierre a un tramo se solicitaron perforaciones adicionales hasta obtener tomas menores a un saco por metro. También se solicitaron tratamientos dirigidos para tratar sitios con particularidades geológicas, como algunas discontinuidades abiertas y zonas de falla o cizallas.

Para cumplir con el criterio de cierre del tratamiento, se perforaron aproximadamente 72.000 m y se inyectaron cerca de 40.120 sacos de cemento de 50 kg. A continuación se muestra la distribución de las cantidades del tratamiento, según los niveles de perforaciones a espacio dividido (figura 34).

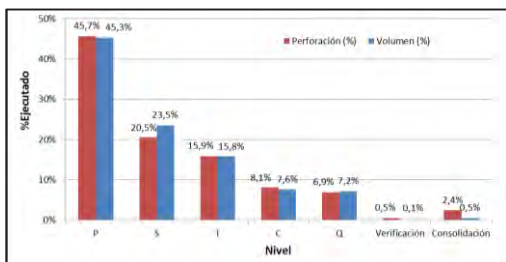


Figura 34. Proporción de inyecciones ejecutadas según el nivel de inyección. P: Primarias; S: Secundarias; T: Terciarias; C: Cuaternarias y Q: Quinarias. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

Fuente: Elaboración de los autores.

En la anterior figura se observa una evaluación estadística con histogramas de distribución (capítulo 12), donde las perforaciones primarias obtuvieron un 45,3 % del volumen de las tomas, llenando las discontinuidades abiertas y oquedades en una primera fase. Así mismo, se detalla la disminución de cantidades conforme se ejecutaba el cierre con los siguientes niveles de inyección (secundaria, terciaria, cuaternaria y quinaria).

Con los anteriores datos de perforación y tomas, se obtuvo una toma promedio de 0,57 sacos/m para el tratamiento en el macizo rocoso.

Como el criterio de cierre del tratamiento era con el criterio de toma, se adoptó la tabla sugerida por Deere (1976). Para el tratamiento se establecieron unos límites de tomas diferenciadas por colores, para facilitar la interpretación del cierre en forma gráfica. Los límites fueron los siguientes: tomas bajas entre 0-1 sacos/m (color verde), una toma media entre 1-2 sacos/m (color amarillo), una toma alta entre 2-4 sacos/m (color morado) y una toma muy alta, mayor de 4 sacos/m (color rojo). A renglón seguido se detalla la totalidad de las cantidades de perforación e inyección, distribuidas en límites de tomas de inyección (figura 35).

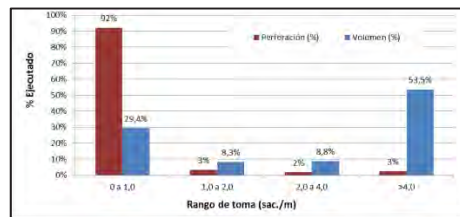


Figura 35. Proporción de tomas de inyección del tratamiento.

Fuente: Elaboración de los autores.

De la anterior figura se entiende que las tomas muy altas (>4,0 sacos/m) tomaron un volumen de 53,5 % del tratamiento, y para esto se requirió perforar apenas 3 % de la totalidad de perforación, mientras que en el resto de las tomas (bajas, medias y altas) se perforó el 97 %, para alcanzar el 46,5 % del volumen de mezcla inyectado. Con estos resultados de tomas se cumplió el criterio de cierre de tomas y el objetivo de rellenar adecuadamente los sitios particulares donde se obtuvieron tomas muy altas.

Central Hidroeléctrica Porce III

La Central Hidroeléctrica Porce III se ubica en la jurisdicción de los municipios de Amalfi, Guadalupe, Gómez Plata y Anorí, en el nordeste de Antioquia. Forma parte de la cadena de aprovechamiento del río Porce

(EPM, 2019). Una de las obras civiles que conforman la central es la represa Porce III, que tiene 148 m de altura y es del tipo CFRD; la represa está apoyada sobre un macizo rocoso de origen metamórfico de la unidad de esquistos (Pes), esquistos cuarzo grafitos (Pesgr) y esquistos cuarzosos (Pesqz) (EPM, 2012).

Fotografía 11. Presa CFRD Porce III. Tomado de "Descripción de obras Porce III" (EPM, 2019).



El tratamiento con inyecciones para la fundación de la represa principal en cara de concreto, en sus estribos derecho e izquierdo y en la zona central del valle del río Porce, consiste en inyecciones por la fundación de la estructura de control del vertedero, la pared izquierda del canal de aproximación del vertedero, inyecciones radiales desde el túnel de conducción, inyecciones radiales en el tapón de cierre del túnel de desviación, en la estructura de concreto ubicada en el portal de entrada del túnel de desvío, e inyecciones radiales en la zona blindada del túnel de la descarga de fondo.

En la figura siguiente (figura 36) se observa la distribución de los tratamientos realizados en la represa, bajo el vertedero, el túnel de desvío y el túnel de descarga de fondo. El objetivo del tratamiento con inyecciones en la fundación de la represa fue el llenado de las discontinuidades abiertas, cizallas, zonas de falla u otras particularidades geológicas encontradas durante la construcción de la represa. Igualmente, se deseaba reducir el gradiente hidráulico creado por el embalse durante operación hacia aguas abajo del eje de la represa.

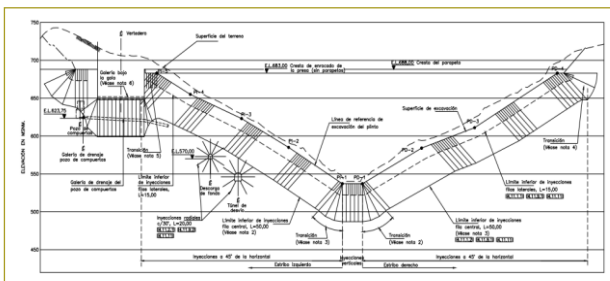


Figura 36. Sección por el eje del plinto de la rePresa CFRD Porce III, detallando los tratamientos con inyecciones. Tomado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la represa" (EPM, 2012).

Los tratamientos realizados en el proyecto se ejecutaron con el método GIN, con excepción de las inyecciones de consolidación, donde se adoptó el método de engrosamiento sucesivo.

Para cumplir con el cierre del tratamiento en la represa, se perforaron aproximadamente 40.100 m y se inyectaron cerca de 34.000 sacos de cemento de 50 kg. Este tratamiento se dividió en dos partes: la primera en la cortina central, que se inyectó con el método GIN, y la segunda en dos cortinas de consolidación aguas arriba y aguas abajo de la cortina central, inyectadas con el método convencional de engrosamiento sucesivo. Los resultados de perforación e inyección se muestran a continuación (figura 37):

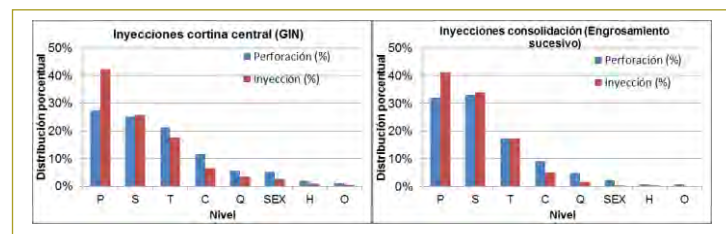


Figura 37. Proporción de inyecciones ejecutadas en la cortina central de la represa con el método GIN y con el método de engrosamiento sucesivo, según el nivel de inyección. Adoptado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la represa" (EPM, 2012).

En los gráficos anteriores se puede apreciar, en primera fase, que el cierre llegó hasta niveles octonarios (separación entre perforaciones de 2,5 cm). Se observa además que las cantidades de inyección son mayores con el método GIN que con el método de engrosamiento sucesivo.

En ambos gráficos se observa la disminución gradual de cantidades a medida que aumenta el nivel de perforaciones a espacio dividido.

Con el método de engrosamiento sucesivo en las inyecciones de consolidación se ven mayores cantidades de perforación e inyección en los primeros niveles (primarios y secundarios), mientras que en las inyecciones de la cortina central con el método GIN se aprecian mayores cantidades en niveles altos (cuaternarios).

Según EPM (EPM, 2012), los consumos altos de mezcla se debieron a que en la zona intermedia y la zona alta de la presa, donde había esquistos grafitos muy fracturados, que tomaron la mayoría del volumen de inyección, se llenaron adecuadamente estas zonas.

Con los datos de perforación y tomas anteriores, se obtuvo una toma promedio de 0,53 sacos/m para

el tratamiento en la cortina central de la represa y una toma promedio de 1,57 sacos/m para el tratamiento en las inyecciones de consolidación en las cortinas, aguas abajo y aguas arriba de la cortina central.

Central Hidroeléctrica El Guavio (túnel de fuga)

La Central Hidroeléctrica El Guavio se encuentra ubicada en la provincia de El Guavio, departamento de Cundinamarca, aproximadamente a 80 km al oriente de Bogotá, D.C., cerca de las poblaciones de Ubalá, Gachalá y Mámbita. Una de las obras que conforman la central subterránea es el túnel de fuga, que se encarga de devolver el agua turbinada de la central subterránea al río El Guavio. Este túnel se excavó en rocas sedimentarias de la formación Fómeque (Kif), la formación Une (Ksu) y la formación Bata (Kijb), compuestas con intercalaciones de estratos permeables (arenisca friable y arenisca cementada) y poco permeables (limolitas y lutitas). El túnel tiene una longitud de 5258 m y una sección de excavación de 8,40 m de diámetro.

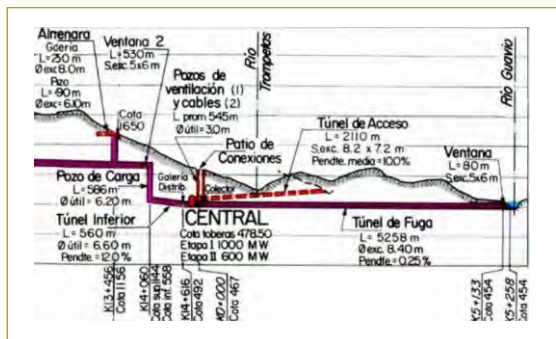


Figura 38. Perfil del túnel de fuga. Tomado de *Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y máquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos.* C. Marulanda (2015).

Debido a que la excavación del túnel de fuga presentó avalanchas de material hacia la excavación por fenómenos de terreno que fluye, fue necesario ejecutar durante la excavación del túnel un tratamiento con inyecciones y drenajes en el frente de excavación donde se presentó el fenómeno.

El fenómeno de terreno que fluye se concentró en una zona de areniscas friables con un banco de roca muy triturada llamada *Rockflour*, o harina de sílice, con agua a presión, alcanzando cerca de los 30 bares.



Fotografía 12. Flujos y avalanchas de material hacia la excavación en el túnel de fuga. Tomado de *Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y máquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos.* C. Marulanda (2015).

Con el fin de identificar el estrato de arenisca friable (*Rockflour*) que generó las avalanchas, se realizaron una serie de investigaciones geotécnicas con perforaciones en abanico hacia adelante. Éstas permitieron identificar los estratos de arenisca friable y sirvieron de drenajes hacia adelante del frente de la excavación, para disminuir las presiones hidrostáticas. En estos drenajes se instalaron sistemas antiavalancha que permitieron medir los caudales y presiones, así como controlar los flujos de arena.

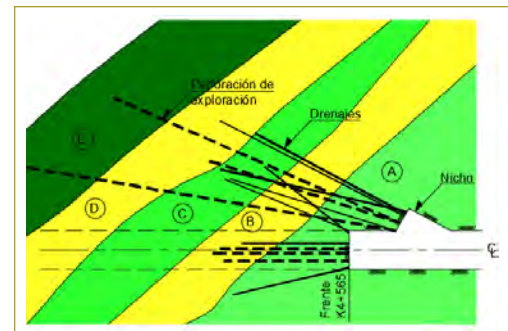


Figura 39. Planta túnel de fuga en el sector donde se realizaron perforaciones de exploración y drenajes. (A) Arenisca cementada; (B) Arenisca friable; (C) Arenisca cementada; (D) Arenisca friable, y (E) Limolitas y lutitas. Adoptado de *Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y máquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos.* C. Marulanda (2015).

Para pasar a través de estos estratos de arenisca friable, se excavó una galería piloto. Para excavar la galería en tramos, se realizaron inyecciones en el frente de excavación y alrededor de la galería piloto. Inicialmente se procedió a inyectar hacia adelante con mezclas a base de cemento. No obstante, dada las condiciones del material compuesto por *Rockflour* o roca molida, no se pudo impregnar la masa. Debido a esto, se tuvo que modificar el procedimiento de inyección mediante inyecciones químicas, con geles de silicato de sodio que podían impregnar y consolidar el material alrededor del túnel. Estas inyecciones químicas (silicatos) lograron penetrar intergranularmente en la arenisca friable y las discontinuidades muy cerradas, donde las mezclas a base

de cemento y bentonita no lograron penetrar. Estos tratamientos mejoraron las propiedades mecánicas de la arenisca y redujeron sustancialmente la permeabilidad primaria, aglutinando el material fino, densificándolo y dándole una cohesión que en su estado natural no tenía (EEEE, 1989).

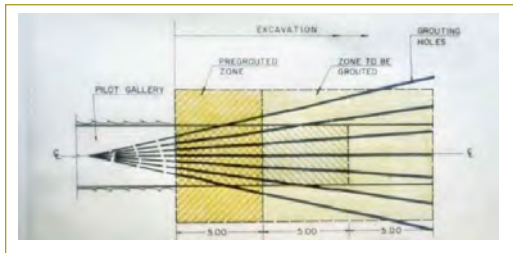


Figura 40. Planta con el esquema de inyecciones desde el frente de excavación de la galería piloto. Adoptado de *Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y máquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos*. C. Marulanda (2015).

Estos tratamientos, sistemas combinados de inyección y drenaje, dieron los resultados deseados para reducir los gradientes hidráulicos; con esto se pudo excavar la galería piloto y luego excavar la sección completa del túnel de fuga.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Un tratamiento efectivo con inyecciones se realiza cuando se tiene un conocimiento completo de las condiciones geológicas y geotécnicas. Estas condiciones afectarán el proceso de inyección y su programación durante construcción.
- Una de las consideraciones geológicas principales que hay que tomar en cuenta en el proceso de inyección son las estructuras geológicas, en especial las discontinuidades, fallas, diaclasas y cizallas. Estas estructuras y sus características (apertura, rugosidad, espaciamiento, relleno, etc.) definirán los diseños del tratamiento, el proceso de inyección y el tipo de mezcla para tener un adecuado tratamiento.
- Entre las consideraciones para el diseño de los tratamientos se deben realizar los estudios hidrogeológicos, para conocer las condiciones de flujo, filtraciones y gradientes hidráulicos en el macizo rocoso.
- Los objetivos principales de los tratamientos con inyecciones en macizo rocosos es disminuir o detener los flujos de agua (impermeabilización), reducir gradientes hidráulicos, mejorar las propiedades físicas y mecánicas y rellenar discontinuidades existentes. En la mayoría de los tratamientos se utilizan mezclas a base de cemento, aunque en algunos casos se aplican inyecciones químicas, o inyecciones con resinas o con otros materiales.
- Si se desea tener mayor detalle de las condiciones del macizo rocoso antes del inicio de los tratamientos, se podrán solicitar pruebas de inyecciones en el sitio, para resolver dudas en el diseño del programa de inyección. Con estas pruebas se tendrá información técnica con datos del sitio en escala real, para mejorar los diseños y los procedimientos de inyección.
- Durante el diseño de los tratamientos es posible seguir los criterios de diseño sugeridos por varios autores como Houlsby (1990), Weaver & Bruce (2007), Bruce (2017), Wilson & Dreese (2003), Ewert (1985), Deere (1985), Lugeon (1933) y Lombardi (2003). Igualmente, se pueden seguir criterios de diferentes corporaciones y asociaciones de ingenieros del mundo, como el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (Usace, 2017), la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) y el U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (Usdibr, 2014).
- Existen diferentes materiales utilizados en los tratamientos, que se clasifican según sus propiedades reológicas. Estas propiedades, en estados fluido y sólido, definen la garantía de un tratamiento exitoso. En estado fluido, se deben tener propiedades adecuadas para que la mezcla sea estable (sin pérdida de agua y sin sedimentación de partículas) y pueda penetrar o “viajar” por las discontinuidades existentes del macizo rocoso. Estas mezclas en estado sólido deben ser resistentes para evitar fenómenos de disolución (*leaching*) del tratamiento.
- Las mezclas de inyección más utilizadas son las de baja viscosidad, cohesión baja, baja exudación y bajos coeficientes de presión de filtración. Estas son mezclas a base de cemento, con bajas relaciones de A: C y aditivos estabilizadores y plastificantes.
- Al cemento de las mezclas cementosas de inyección se le pueden agregar puzolanas que proporcionan propiedades a la mezcla para modificar el tiempo de fraguado, y mejorar la resistencia de la mezcla

endurecida, la permeabilidad de la mezcla, la bombeabilidad y la cohesión.

- La adición de bentonita o arcillas en las mezclas ayuda a que durante los procedimientos de inyección no “viajen” más allá de lo requerido.
- El uso de otros materiales en las mezclas, como las arenas, ayudan a rellenar más rápido las discontinuidades abiertas del macizo rocoso. Sin embargo, el empleo de arenas en las mezclas para inyecciones no se recomienda porque tiende a sedimentarse y a obstruir los equipos. La arena también es abrasiva, por lo que tiende a desgastar más rápido los equipos utilizados en el tratamiento.
- A las mezclas de inyección se les pueden adicionar aditivos para modificar sus propiedades, tales como acelerantes, aditivos de control de consistencia, retardantes, plastificantes, inhibidores y agentes estabilizantes.
- Cuando las condiciones geológicas particulares del macizo rocoso o los requerimientos del proyecto no permitan realizar el tratamiento con mezclas cementosas, se pueden utilizar inyecciones con mezclas con resinas para reducir la permeabilidad y mejorar las propiedades mecánicas de macizos rocosos muy fracturados. Estas resinas, al ser inyectadas, se expanden y obtienen propiedades apropiadas para los tratamientos.
- Como procedimiento de control de calidad y verificación de la efectividad del tratamiento con inyecciones, se requieren ensayos de campo y laboratorio para verificar las calidades de las mezclas de inyección antes del inicio de actividades y durante los tratamientos.
- Para los procedimientos de perforación e inyección se deben escoger los equipos apropiados según el tipo de macizo que hay que tratar, para obtener un tratamiento efectivo con tiempos y costos apropiados.
- Los procedimientos de inyección son el método GIN y el método de engrosamiento sucesivo.
- Estos procedimientos se diferencian en la forma en que se inyecta la mezcla. El GIN inyecta una sola mezcla estable a presiones altas y el método de engrosamiento sucesivo inyecta una mezcla base, que se engrosa (cambia propiedades reológicas) cuando el procedimiento de inyección lo requiera.
- En el método de engrosamiento sucesivo se establece un límite de presión de inyección para evitar el fracturamiento del macizo, mientras que el método GIN puede alcanzar presiones más altas, generando un posible fracturamiento del macizo.
- Las presiones iniciales del método GIN son altas en las primeras etapas de inyección, o en la superficie del terreno, lo que llevaría a resurgencias de mezcla de inyección en superficie, o al levantamiento de estructuras.
- Con el método de engrosamiento sucesivo la mezcla sobrante se puede inyectar en el macizo, mientras que con el método GIN esta mezcla sobrante se tendrá que disponer en botaderos, porque el proceso es automático y no permite la inyección de mayor volumen establecido en los límites, lo cual generaría costos adicionales de transporte y disposición.
- Los volúmenes de inyección en las inyecciones iniciales (primarias y secundarias) con el método de engrosamiento sucesivo son altos y van disminuyendo conforme se realizan inyecciones adicionales (terciarias y cuaternarias), para hacer un cierre adecuado del tratamiento, mientras que con el método GIN se pueden alcanzar niveles de inyección más altos (hasta septenarios), porque las inyecciones iniciales finalizan por límite de volumen establecido y dejando vacíos por llenar.
- Cuando en ambos métodos se alcancen niveles de inyección superiores (sextantarios o septenarios) con tomas altas, es posible que se esté llenando un gran vacío o una caverna; para estos casos se deben inyectar grandes cantidades de mezcla, hasta obtener rechazo por volumen. En estos casos se emplean mezclas de baja viscosidad y mezclas de cemento-espuma que incrementa su volumen al ser inyectados en el macizo.
- El cierre o terminación de los trabajos de inyección es un método observacional de los datos obtenidos durante los procedimientos de inyección, que requiere un criterio ingenieril y la asesoría de un experto en tratamientos con inyecciones.
- En los casos del uso de tratamientos con inyecciones en presas, se utiliza el criterio de cierre en términos de consumo de sacos de cemento y no de permeabilidad. Debido a que en ambos casos el objetivo principal de los tratamientos es el relleno de discontinuidades.
- En la explicación de los casos históricos, se observa que se realizan adecuadamente los cierres de los

tratamientos, haciendo una evaluación estadística por medio de histogramas de distribución. Se observa una disminución en cada nivel de inyección. Sin embargo, cuando se utiliza el método de engrosamiento sucesivo el cierre ocurre en niveles más bajos (terciarios), mientras que con el método GIN se alcanzan niveles más altos de inyección (cuaternarios y quinarios).

- Cuando se tienen posibles fenómenos de terreno que fluye en túneles, se deben tomar una serie de medidas que permiten disminuir el efecto de este fenómeno: 1) Instalación de drenajes, con sistema antiavalancha, en el frente de excavación, con el fin de disminuir las presiones en el frente. Así mismo, en estos drenajes se deja la instrumentación necesaria para medir presiones y caudales; 2) Tratar el frente de excavación con inyecciones hacia adelante e inyecciones de consolidación (radiales), para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de material (que fluye). Las mezclas de inyección utilizadas para este tipo de tratamientos requieren materiales muy finos (cementos ultrafinos) o inyecciones químicas (silicatos), para que la mezcla pueda penetrar dentro de la matriz arenosa del material. El sistema de inyección en este tipo de material se realiza con tubos A. Manchette, y 3) Construcción de *by pass* para desviar los flujos de material hacia otro sitio.
- Las inyecciones hechas desde excavaciones subterráneas mejoran las propiedades del macizo alrededor o al frente de la excavación, según el tipo de inyección si son hacia adelante o si son inyecciones radiales. Estas inyecciones se realizan en etapas, iniciando el procedimiento de inyección en el fondo de la perforación de inyección para tratar en una primera fase el macizo y crear de esta forma un anillo o capa protectora para las siguientes etapas de inyección hacia la superficie de excavación.

REFERENCIAS

- American Petroleum Institute (API) (2005). *API 10. Specifications for Materials and Testing for Well Cements*. Estados Unidos.
- American Petroleum Institute (API) (2009). *API RP 13B-1. Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids*. Estados Unidos.
- ASTM (2014). *D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2015). *C143/C143M-15a, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2016a). *C939/C939M-16a, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2016b). *C109/C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2016c). *C260/C260M-10a, Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2016d). *C940-16, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2017a). *C157/C157M-17, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2017b). *C494/C494M-17, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2018a). *C94/C94M-18, Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2018b). *C191-18, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2018c). *C150/C150M-18, Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2018d). *C595 / C595M-18, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2018e). *C989/C989M-18a, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM (2018f). *C33/C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- Baker, Wallace Hayward (1982). *Grouting in Geotechnical Engineering*. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
- Barton, N. & Quadros (1997). *Joint aperture and roughness, flow and groutability*. Nueva York.
- Barton, N (2002). *Rock Joint Sealing Experiments Using Ultra Fine Cement Grout*. North American Tunnelling.
- Barton, N. (2004a). *The why's and how's of high pressure grouting - Part 1*. TTI p28-30, parte I.
- Barton, N. (2004b). *The theory behind high pressure grouting-Part 2*. TTI p28-30, parte II.
- Bruce, D.A., Heenan, D.M. & Wilson, D.B. (2005). *Quality and Quantification in Rock Drilling and Grouting*. Geo-Frontiers Geotechnical Special Publications 130-142 and GRI-18; Sponsored by The Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers Geosynthetic Materials Association of the Industrial Fabrics Association International Geosynthetic Institute, January 24–26, Austin, Texas, 10 pp.
- Bruce, D.A. (2007). *Pregrouting for Tunnels in Rock: The Case for New Thinking*. New Peaks in Geotechnics. ASCE.
- Bruce, D.A. (2011). *Rock Grouting for Dams and the Need to Fight Regressive Thinking*. USSD Annual Conference, April 12-13, San Diego, CA, 16 pp.

- Bruce, D.A. (2012). *Computer Monitoring in the Grouting Industry*. Geo-Institute GeoCongress, State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering Conference, San Francisco, CA, Marzo 25-29, 16 pp.
- Bureau of Reclamation (1987). *Design of small dams*. Departamento del Interior de Estados Unidos de América.
- Carter, T. G., Amaya, F., Jefferies, M. G., & Eldridge, T. L. (2003). *Curtain Grouting for the Antamina Dam, Peru: Part 1—Design and Performance*. Grouting and Ground Treatment. ASCE. pp. 917-928.
- Carter, T. (2012). *Improved Methods of Design for Grouting Fractured Rock*. Grouting and Deep Mixing 2012. ASCE.
- Carter, T. G., Jefferies, M. G., Rombough, V., Hassler, L., & Granata, R. (2017). *A Retrospective Evaluation of the Progress of Computer Monitored Grouting*. Grouting. ASCE, pp. 389-403.
- Deere, D. U., & Lombardi, G. (1985). Grout Slurries—Thick or Thin? In *Issues in Dam Grouting*, Edited by W. H. Baker, ASCE, New York, pp. 156-164.
- Departments of the Army and the Air Force (1970). *Grouting methods and equipment*. Technical manual N.º 5-818-6; Air Force, manual N.º 88-32.
- Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá (1989). *Proyecto Hidroeléctrico del Guavio. Túnel de fuga. Reporte de tratamiento de inyecciones*. Bogotá.
- Empresas Públicas de Medellín (2012). *Informe final de consolidación e impermeabilización de la represa*. Asesoría Porce III. Medellín, Antioquia.
- Empresas Públicas de Medellín (2019). *Descripción de las obras construcción de la represa de Porce III*. Recuperado de <https://www.epm.com.co/site/home/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/premio-por-construccion-de-presa-porce-iii> en mayo de 2019.
- Ewert, F.-K. (1985). *Rock grouting with emphasis on dam sites*. Berlín: Springer-Verlag.
- Ewert, F.-K. (1996). *The GIN-Principle – helpful method for rock grouting? Part 1 – Part 2*. International Water Power & Dam Construction. Febrero 1996.
- Ewert, F.-K. (1997). *The GIN-Principle revisited*. International Water Power & Dam Construction. Octubre 1997, pp. 33-36.
- Bell, F. G. (2007). *Engineering Geology*. Reino Unido: Editorial Elsevier Ltd.
- Blyth, F.G.H. & de Freitas, M.H. (1984). *A Geology for Engineers*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Seventh Edition, pp. 111-127.
- Fetter, C. (1988). *Applied hydrogeology*. Nueva York: Mc Millan Publishing Company.
- Gutiérrez, R. (enero-mayo, 2016). *Curso de mecánica de rocas*. Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Gutiérrez, R. (agosto-diciembre, 2017). *Curso de ingeniería de rocas*. Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Stille, H. (2015). *Rock Grouting – Theories and Applications*. Stockholm.
- Harrison, D.M. (2013). *The Grouting Handbook. A Step-by-Step Guide for Foundation Design and Machinery Installation*. Elsevier Inc.
- Henn, R.W. (1996). *Practical guide of Grouting of underground structures*. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
- Houlsby, A. C. (1976). Routine interpretation of the lugeon water-test. *Engng Geol.* 9, 303-313.
- Houlsby, A. C. (1990). *Construction and Design of Cement Grouting*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.
- Ingetec (2009). *Informe de diseño geotécnico Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo*. Bogotá, Colombia.
- Ingetec (2014). *Comentarios de obra construida del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo*. Asesoría Técnica en obra. Gigante, Huila.
- International Society for Rock Mechanics (1995). *Final report of the Commission on Rock Grouting*. Portugal: ISRM.
- Lugeon, M. (1933). *Barrages et Geologie Dunod*, Paris.
- Lombardi, G. (2003). Grouting of Rock Masses. In *Grouting and Ground Treatment*. Editado por L. F. Johnsen, D. A. Bruce, and M. J. Byle. ASCE, Reston, Va. *Geotechnical Special Publication 120*, 164-197.
- Lombardi, G., & Deere, D. (1993). *Grouting Design and Control Using the GIN Principle*. *Intl. Water Power and Dam Constr.* 45(6), June, 15-22.
- Marulanda, C. (2015). *Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y máquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos*. Diplomado en Túneles en suelo y roca. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Nonveiller, E. (1989). *Grouting Theory and Practice*. Amsterdam, Holanda: Elsevier, Inc.
- Quiñones, C. (2010). *Lugeon test interpretation, revisited*. Collaborative Management of Integrated Watersheds. 30th Annual USSD Conference. Sacramento, California, Abril 12-16.
- Ritchie, D. G., García, J. P., Amaya, F. & Jefferies, M. G. (2003). *Curtain Grouting for the Antamina Dam, Peru: Part 2—Implementation and Field Modifications*. ASCE, Grouting and Ground Treatment, pp. 929-940.
- Singhal, B.B.S. & Gupta, R.P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Nueva York: Springer.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *Engineering and design chemical grouting*. Manual N.º 1110-1-3500.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1997). *Engineering and design tunnels and shafts in rock*. Manual N.º 1110-2-2901
- U.S. Army Corps of Engineers. (2017). *Engineering and design grouting technology*. Manual N.º 1110-2-3506.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2014). *Design Standards N.º 13. Embankment Dams Chapter 15: Foundation Grouting*. DS-13(15)-1: Phase 4 Final.
- Warner, J. (2004). *Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.
- Weave, K. & D. Bruce, D. A. (2007). *Dam Foundation Grouting*. ASCE.
- Wilson, D. B., & Dreese, T. L. (1998). *Grouting Technologies for Dam Foundations*. Acta de la conferencia anual de la Association of State Dam Safety Officials. Las Vegas, Nevada.
- Wyllie, D.C. (2005). *Foundations on Rock*. Nueva York: Taylor & Francis e-Library.

Estado del arte en la impermeabilización de túneles en roca. Casos, aplicaciones y recomendaciones

State of the art of rock tunnel waterproofing. Cases, applications, and recommendations

LUIS ALEJANDRO RUIZ PIRAGAUTA¹ - RAMIRO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ²

1. Ingeniero de Minas. Magíster en ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil de la Universidad Javeriana. Consultor. Director del Departamento de Túneles de Ingetec.

luis.ruiz-p@escuelaing.edu.co - rgutier@ingentec.com.co

Recibido: 23/08/2019 Aceptado: 12/09/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Durante las fases de excavación y construcción de los túneles, la infiltración de agua es inevitable; ésta tiene efectos en la estabilidad y seguridad de la obra, y afecta el entorno natural, por lo que se deben definir acciones para su control.

En el presente artículo se describen los conceptos generales de geología e hidráulica, así como las actividades de investigación y exploración del agua. Se habla del contexto histórico de los túneles y de las características constructivas, se exponen las directrices y pautas para el control y medición de las tasas de infiltración. Además, se exponen las técnicas para el control del agua subterránea, y se presentan los elementos instalados como parte de los revestimientos, materiales y equipos utilizados. También se describen las actividades de caracterización de materiales y resultados de los ensayos de laboratorio en especímenes de concreto y adiciones de elementos de cristalización y minerales, para obtener elementos impermeables.

Por último, se presenta el desarrollo y análisis para estimar y cuantificar el agua que podría irrumpir en una excavación, y se describen las técnicas de modelación, su abordaje conceptual y numérico, al igual que los requerimientos y la restricción para su adopción.

Palabras claves: túnel, impermeabilidad, flujo, agua subterránea, hidrogeología, excavación, irrupción, concreto, control del agua.

Abstract

During the excavation and construction phases of tunnels, water infiltration is inevitable, it has effects on the stability and safety of the works, and on the natural environment. For this reason, actions must be defined for their control.

The document describes the general concepts of geology and hydraulics, research activities and water exploration. The historical context of tunnels is presented, as well as constructive characteristics, the guidelines for the control, and measurement of infiltration rates. In addition, the techniques for groundwater control are exposed, that is, the elements installed into the linings, materials, and equipment used. It also describes the activities of materials characterization and laboratory tests results on concrete specimens and additions of crystallization elements and minerals, to obtain waterproof elements.

Finally, the development and analysis to estimate and quantify the water that could break into an excavation is presented, describing the modeling techniques, its conceptual, numerical approach, its requirements, and restriction for its adoption.

Keywords: tunnel, waterproofing, flow, groundwater, hydrogeology, excavation, irruption, concrete, water control.

INTRODUCCIÓN

Las obras de ingeniería de túneles presentan desafíos en el diseño, construcción y operación del proyecto, así como en la seguridad de trabajadores y usuarios del proyecto. El control del agua es uno de los retos principales para una excavación, debido a la complejidad de la obra y a la interacción con el medio natural.

En Colombia, gran parte de los proyectos subterráneos se localizan en el núcleo de las cordilleras, asociados a basamentos ígneos metamórficos y sedimentarios, en rocas de diversa naturaleza en resistencia mecánica, así como en múltiples zonas de cizallamiento o fracturamiento en macizos con características variables, anisotropía y cambios mineralógicos en la roca, además de variación en las propiedades hidráulicas que controlan el movimiento del agua en subsuelo.

En un proyecto de ingeniería de túneles, hay que profundizar en el conocimiento de los sistemas naturales y estructurales que controlan el flujo y almacenamiento del agua en el subsuelo, así como en los aspectos ya citados.

En condiciones hidrológicas y del macizo rocoso para el flujo y transmisión del agua, es común que en el contorno de una obra subterránea se presenten fenómenos de goteo e infiltración, los cuales se deben anticipar en la etapa de planeación y diseño, en la que se deberá priorizar en el desarrollo de las técnicas de control y manejo del agua.

A lo largo de esta investigación se efectuó un proceso en etapas que incluyeron la recolección de información bibliográfica existente; casos históricos; revisión de manuales técnicos acerca de las características constructivas y de normativa referente a sistemas de impermeabilización; realización de ensayos de laboratorio en especímenes de concreto para túneles, con diferentes adiciones y elementos de mejoramiento para verificar la efectividad de los elementos impermeables. Se describen los resultados obtenidos en los ensayos a concretos de revestimiento, buscando que éstos sean menos permeables.

Posteriormente se evaluó un caso real de tunelería, en el que se analizaron las características litológicas, geomecánicas e hidrológicas del macizo natural. En este caso, se hizo una evaluación de la permeabilidad por diferentes metodologías mediante análisis retrospectivos a partir de los índices de infiltración de agua reales que se presentaron en la obra. De ese modo, se compararon los resultados con los datos registrados

antes y después de la excavación subterránea y se realiza el análisis del caso evaluado, para su posible aplicación en los futuros proyectos.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros proyectos de ingeniería de túneles, con énfasis en obras viales.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La mayoría de los túneles en roca por excavar se deben ejecutar en áreas de alta montaña en la zona andina, donde se encuentran rocas de tipo sedimentario, ígneo y metamórfico.

Hacia las partes media y baja de las cordilleras se encuentran los valles aluviales, depósitos sedimentarios y no consolidados, donde además se presentan cinco vertientes y principales hoyas hidrográficas del país, como Amazonas, Caribe, Cauca, Orinoco y Pacífico, donde confluyen los principales drenajes del país.

Hidrogeológicamente, en el país se han identificado dieciséis provincias (Vargas, 2005), desde sistemas acuíferos propicios para almacenar y transmitir el agua hacia los Llanos Orientales y la costa norte del país, o hacia el Pacífico al occidente. Hacia la zona andina y las cordilleras se encuentran ambientes ígneos metamórficos, con una baja posibilidad de almacenar agua debido a sus características hidrogeológicas, donde actúan como barreras poco permeables del país. Sin embargo, se pueden presentar buenos acuíferos en zonas de cizalla con capacidad para la transmisión y almacenamiento del agua.

A continuación se ilustran, en términos generales, las provincias hidrogeológicas en Colombia, de acuerdo con el Ideam (2014) (figura 1).



Figura 1. Provincias hidrogeológicas de Colombia.

Fuente: Estudio Nacional del Agua (Ideam, 2014).

Así mismo, en los macizos de la cordillera Oriental se presentan rocas preferencialmente de tipo sedimentario, que a su vez forman acuíferos confinados, con grandes reservorios de agua subterránea, y hacia la cordillera Occidental se presentan cuerpos de rocas de origen volcánico y sedimentario, donde también es frecuente encontrar zonas con grandes posibilidades de presencia de agua subterránea en la construcción de túneles.

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Las cantidades de agua que se precipitan, evaporan, descargan y se infiltran en el medio natural definen el balance hidrológico en el subsuelo y dependen de las características del medio, discontinuidades y espacios donde puede transitar el agua.

En los medios rocosos se definen variables como la permeabilidad, la cual es la medida de paso de los fluidos a través de un medio en los canales de poros naturales. Depende del tamaño, la forma, la dificultad y el número de canales de poro en el medio rocoso.

Así mismo, la porosidad determina la cantidad de vacíos que se encuentran en el medio poroso. Estos parámetros están relacionados en la comunicación de los vacíos y efectividad del paso de agua en el medio. Un esquema simple ilustra los conceptos entre permeabilidad y porosidad, respectivamente (figura 2).

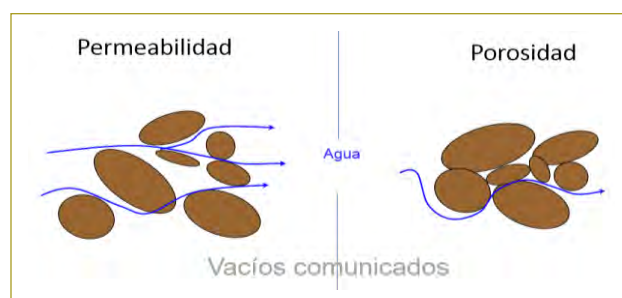


Figura 2. Características de transmisión del agua en el medio.

Fuente: Los autores.

Mientras en el balance hidrológico se establecen las cantidades de agua que se precipitan, evaporan, descargan y se infiltran en el medio natural, en el subsuelo dependen de las características del medio, las discontinuidades y los espacios donde puede transitar el agua (figura 3).

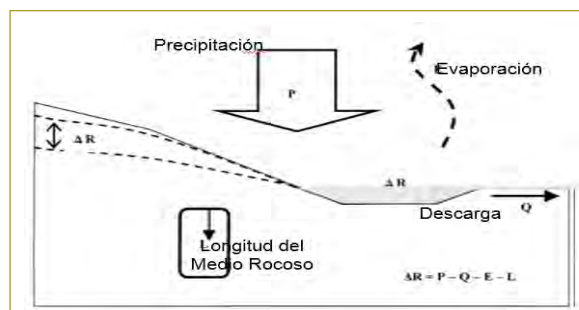


Figura 3. Balance hidrológico.

Fuente: Los autores.

De manera general, se pueden considerar tres clases de macizos: a) los blandos, constituidos por rocas poco densas, con permeabilidad alta, controlada por las características y la granulometría del material; b) terrenos y roca fracturada, y (c) macizos duros de rocas consolidadas, de baja permeabilidad, controlada por las discontinuidades (figura 4).

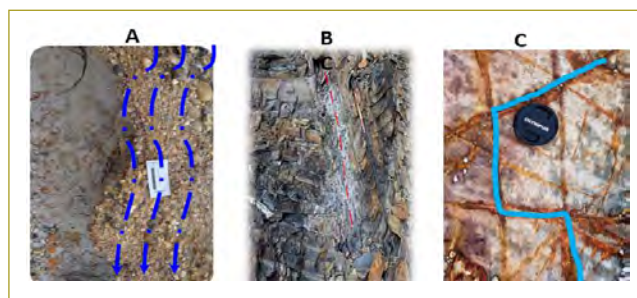


Figura 4. Características de los terrenos y tipos de macizos.

Fuente: 2016, Aluviales Topos SAS, Mineral Intelligence, 2017. Resource Au – Australia, Stage Exploration.

Existen cuatro tipos de acuíferos, según su capacidad de almacenamiento y transmisión del agua (tabla 1). Los macizos compuestos por gravas, arenas y materiales sedimentarios, materiales descompuestos y fracturados son considerados buenos acuíferos, dado que cuentan con mayor capacidad de drenaje y almacenamiento, mientras que los depósitos de rocas ígneas y metamórficas compactas presentan una baja capacidad de almacenamiento y drenaje, y éstos se consideran como acuíferos pobres, denominados acuícludos y acuífugos.

Tabla 1
Características de los sistemas acuíferos

Clase	Capacidad de almacenamiento	Capacidad de drenaje	Capacidad de transmisión	Características litológicas
Acuíferos	Alta	Alta	Alta	Gravas, arenas, calizas
Acuitardos	Alta	Media / baja	Baja	Limos, arenas limosas, arcillas
Acuicludos	Alta	Muy baja	Nula	Arcillas
Acuifugos	Nula	Nula	Nula	Granitos, gneis, mármoles

Fuente. Vallejo, Ferrer, & Ortuño (2002). *Ingeniería geológica*.

ESPECIFICACIONES

En el ámbito internacional existen especificaciones que deben cumplir los proyectos de tunelería para el control de agua de infiltración en operación. Éstas son definidas en rangos de valores de aguas de infiltración permitidas (caudal de agua de infiltración por unidad de longitud de túnel o área de la sección). Los rangos permisibles dados en las directrices de varios países varían según el tipo de proyecto. Como ejemplo se describen dos extremos: en Alemania, en recintos de almacenamiento y posibilidad de permanencia de personal, las obras deben ser secas y con un tasa menor de 0,01 L/m².día, mientras que en túneles de alcantarillado se permiten goteos ocasionales, con valores máximos de tasa de infiltración

de 1 L/m².día. En otros países de Europa, Oceanía y Norteamérica, se presentan valores de infiltración de agua menores de 1 L/m².día, para diferentes tipos de túneles y longitudes de éstos.

La especificación más acogida en el gremio internacional es la norma UNE 104424, de la directriz europea, la cual especifica siete niveles, desde obras secas para almacenes y con estancia de personal, hasta túneles de alcantarillado con valores con goteos ocasionales, menores de 1 L/m².día (tabla 2).

En Colombia aún no hay una normativa clara para las obras subterráneas, en especial para los túneles viales.

Tabla 2
Definición de impermeabilidad para el diseño de túneles y galerías. Norma UNE - 104424

Grado de impermeabilidad	Características de humedad	Utilización de la obra	Filtraciones de agua L/m ² en 24 horas
1	No permitida la difusión de vapor desde el exterior.	<ul style="list-style-type: none"> - Lugares secos. - Locales refrigerados. - Presencia continua de personas. - Almacenes sensibles a la humedad (papel, alimentos). 	0
2	SECO Permitida la difusión de vapor.	<ul style="list-style-type: none"> - Instalaciones militares y locales húmedos (baño). - Locales con instalación de suministro de energía (subestaciones). - Locales subterráneos de uso general. 	0
3	SECO.	<ul style="list-style-type: none"> - Almacenes y locales comerciales. - Estaciones de metro. 	< 0,001
4	CASI SECO.	<ul style="list-style-type: none"> - Túneles de autopista. - Túneles de montaña. - Túneles ferroviarios de alta velocidad. 	< 0,01
5	Filtraciones capilares.	<ul style="list-style-type: none"> - Parqueaderos. - Túneles de carretera y en roca. 	< 0,1
6	Ligero goteo de agua.	<ul style="list-style-type: none"> - Túneles de ferrocarril. - Líneas de metro. 	< 0,5
7	Goteo de agua.	<ul style="list-style-type: none"> - Túneles de alcantarillado. 	< 1,0

Fuente: Aenor (2015).

En el diseño de un túnel se deben tomar en cuenta la geología y el tipo de obra, con el fin de definir los sistemas de control apropiados para el manejo o la aceptación de agua subterránea.

Durante las etapas de excavación del túnel, las medidas se deben enfocar en drenaje del agua, medición de caudales y comprobación de las hipótesis de análisis, que determinarán de cierta manera el sistema de impermeabilización previa para el control del fluido (figura 5).

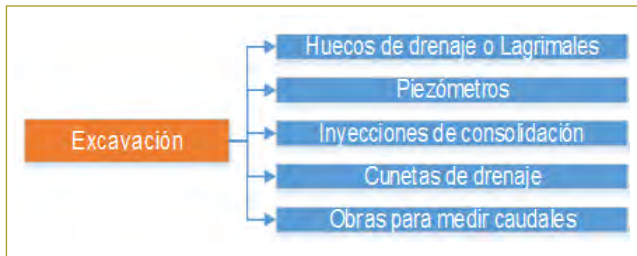


Figura 5. Medidas de infiltración en una obra subterránea durante la fase de excavación.

Fuente: Los autores.

Con esto se establecen técnicas como direccionamiento y drenaje del agua que irrumpen en la obra, con zanjas e inyecciones de mejoramiento, además de la evaluación de los niveles piezométricos y caudales, con un control del túnel drenado. En la figura anterior y en la siguiente se ilustran de manera general las medidas para control del agua de infiltración (figuras 5 y 6).

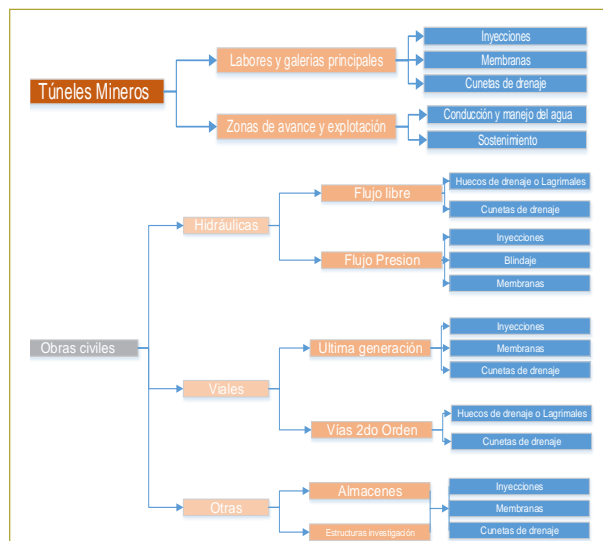


Figura 6. Medidas de infiltración en una obra subterránea, fase de operación y tipo de obra.

Fuente: Los autores.

En la fase de operación, las técnicas se planifican de acuerdo con el tipo de proyecto y las características hidrogeológicas del macizo. Por ejemplo, para túneles mineros en las labores principales y zonas de explotación se definirán medidas de revestimiento y control de estabilidad, impermeabilización parcial, con un enfoque para mantener el túnel drenado (figura 6).

Para las obras civiles, en proyectos hidráulicos (como túneles con flujo de agua a presión) se definen obras drenadas durante construcción, mientras que para operación, dependiendo de criterios de permeabilidad y fractura hidráulica, las medidas serán más estrictas, con inyecciones, membranas o blindajes de acero, con un enfoque de lograr los túneles estancos (figura 6).

Para proyectos viales con túneles de última generación para autopistas, se busca aplicar técnicas más completas, orientadas a mantener los túneles estancos en lo posible para aumentar la seguridad vial, reducir trabajos de mantenimiento sobre la vía y minimizar los impactos en superficie. En otro tipo de obras, las medidas variarán según el tipo de proyecto; por ejemplo, en caso de almacenes y obras con estancia de personal, las medidas deberían ser completas, con miras a mantener las obras subterráneas estancas.

Los usos de materiales y elementos empleados para el control del agua o reducción de infiltraciones de agua están relacionados con el tipo de macizo, las características de soporte y revestimiento, y el grado de impermeabilización requerido, en los cuales se pueden tener estructuras rígidas o flexibles de concreto, acompañados de elementos como las membranas impermeabilizantes. Las inyecciones de mejoramiento del macizo como medidas de impermeabilización del terreno pueden variar, dependiendo tanto del tipo de material que se va a impregnar como del tipo de compuesto y soluciones químicas utilizadas (poliuretanos, silicatos y bases cementicias).

TÉCNICAS DE CONTROL DEL AGUA

Obras de drenaje

Esta técnica en obras de túneles viales consiste en el direccionamiento del agua de infiltración, con sistemas primarios previos con huecos de drenaje y geotextil y mangueras o tuberías, y sistemas secundarios con geotextiles y materiales impermeables que permiten

conducir el agua hacia sistemas de drenaje longitudinales a lo largo del túnel para la evacuación en forma controlada del agua de infiltración. Es común, antes de la instalación de la membrana, aplicar el sistema Oberhasli, el cual se basa en tuberías en forma de espina de pescado que están interconectadas y que recogen el agua de las paredes del túnel hacia los sitios de evacuación que se ubican en las partes bajas del túnel.

Además, los geotextiles se utilizan como una técnica de drenaje para evitar que las membranas se dañen, por lo que deben ser resistentes a las condiciones de ataques por aguas agresivas. El sistema está formado por una lámina drenante y un geotextil filtro no tejido.

Sintéticos

El uso de materiales plásticos es una técnica muy utilizada en túneles. Estos elementos están constituidos por grandes moléculas llamadas polímeros, en largas cadenas a base de carbono e hidrógeno, con excelentes propiedades para restringir el paso del agua. Se clasifican en elastómeros, duroplástico y termoplástico.

Los más aplicados en obras de tunelería son los termoplásticos, entre los cuales se encuentran los materiales de poliésteres, que son constituyentes de los geotextiles. También están los polímeros vinílicos, que son elaborados con procesos de presión y temperatura en técnicas de extrusión, que forman láminas de PVC y

polietileno, como los más utilizados en materiales aptos para los trabajos de ingeniería.

El empleo de membranas de polietileno es poco común en túneles viales. Éstas son elementos rígidos, que no se acomodan bien a las geometrías irregulares de las obras y dejan vacíos, debido a que presentan propiedades de deformación plástica y elástica que resultan poco aptas para los trabajos subterráneos, puesto que se pueden rasgar o dañar en las juntas.

Por otro lado, el uso de membranas de PVC en túneles viales es muy común porque el PVC es uno de los materiales de mejor aceptación, debido a las propiedades de flexibilidad, resistencia y control del agua, y presenta ventajas frente al punzonamiento.

Estos elementos se adaptan mejor a la geometría de los túneles, resistencia a las aguas agresivas o soluciones alcalinas, y están elaborados en sistemas de monocapas para identificar daños y desgarros del material. Tienen ventaja en cuanto a que no se inflaman con facilidad y su material es autoextinguible.

Sin embargo, las membranas deberán cumplir ensayos de elongación, punzonamiento, plegado, resistencia al fuego y ataque por microorganismos, de acuerdo con lo especificado en la norma UNE 104424 (Aenor, 2015). Estas membranas se instalan en sistema de capas y las uniones se sueldan con temperatura (tabla 3).

Las láminas de PVC presentan una resistencia contra aguas subterráneas agresivas, son fáciles y confiables de

Tabla 3
Requisitos de láminas de PVC-P para impermeabilización de túneles

Característica	Norma	Unidades	Especificaciones
Espesor nominal	UNE-EN 1849-2	mm	2
Resistencia a la tracción	UNE-EN ISO 527-1 UNE-EN ISO 527-3	N/mm ²	L ≥ 15 T ≥ 15
Alargamiento a la rotura	UNE-EN ISO 527-1 UNE-EN ISO 527-3	%	L ≥ 300 T ≥ 300
Resistencia al desgarro	UNE-ISO 34-1	kN/m	≥ 40
Estabilidad dimensional tras envejecimiento acelerado (6 h y 80 °C)	UNE-EN ISO 1107-2	%	≤ 2
Resistencia a punzonado estático (CBR)	UNE-EN ISO 12236		≥ 2,2
Resistencia a perforación a raíces	UNE-CEN/TS 14416 EX		Conforme
Resistencia a la oxidación	UNE-EN 14575		Conforme
Comportamiento frente al fuego. Inflamabilidad ante llama única.	UNE-EN ISO 11925-2		Clase E
Plegabilidad a baja temperatura	UNE-EN 495-5		Sin roturas a -20 °C
Color	Opacas, opacas bicolor o traslúcidas		

Fuente: Norma UNE EN 104424.

instalar y soldar, tienen alta flexibilidad y resistencia al fuego; además, presentan una larga expectativa de vida.

Membranas rociables

Es común utilizar en las obras materiales impermeables rociados, constituidos a base de polímero (polietileno-metacrilato de metilo), con alta fuerza de adhesión, que previene la circulación del agua en ambos lados de la membrana (figura 7).



Figura 7. Aplicación en dos colores de la membrana impermeabilizante (primera capa de color naranja, segunda capa de color blanco).

Fuente: Tunnel Waterproofing - General (CTS, 2016).

Estos sistemas presentan una aplicación rápida y logística cómoda, requieren pruebas de adherencia del material al sustrato, y tienen resistencia tanto química como a la inflamabilidad. Se pueden poner como una capa intermedia al revestimiento primario y secundario instalado, o sobre las membranas de PVC instaladas. Tienen la desventaja de que su aplicación se limita para túneles relativamente secos, dado que en presencia de agua no es posible hacerlo.

En Colombia, en túneles viales de última generación o de autopistas, ha habido una tendencia equivocada a poner membranas impermeables de tipo poliuretanos reticulados o de PVC a la vista, con el fin de reducir costos. Sin embargo, esto es un error debido a que se incumplen normas internacionales de seguridad en túneles, ya que dichos sistemas producen gases tóxicos en un incendio, y en el caso del poliuretano extienden el fuego y no es un elemento autoextinguible. Además, las membranas expuestas tienden a rasgarse por diferentes factores externos (como el vandalismo), que hace que la operación de los túneles se tenga que interrumpir para hacer mantenimiento.

Blindaje

Consiste en la utilización de láminas metálicas en el contorno de la obra, con lo que se logra completa estanqueidad. Este sistema se emplea comúnmente en túneles con flujo de agua a presión para terrenos de alta permeabilidad y para evitar el fenómeno de la fractura hidráulica, que puede ocurrir cuando el esfuerzo principal menor (σ_3) que tiene el macizo es inferior a la presión interna hidrostática dentro del túnel. Es una medida costosa.

Inyecciones

Esta técnica consiste en el mejoramiento del macizo por medio de soluciones de lechada cementosas, minerales, poliuretanos y acrilato, que disminuyen la permeabilidad de la masa de roca, por medio de perforaciones e inyecciones a presión. En este sistema se aplican soluciones que se introducen al terreno, y pueden realizarse antes de la excavación, durante la obra o una vez terminada ésta (figura 8). La técnica de inyecciones también contribuye a la estabilidad del terreno, mejorando el módulo de deformación. Para su ejecución, hay que evaluar el tipo de solución química aplicable y las características de fracturamiento del macizo rocoso.

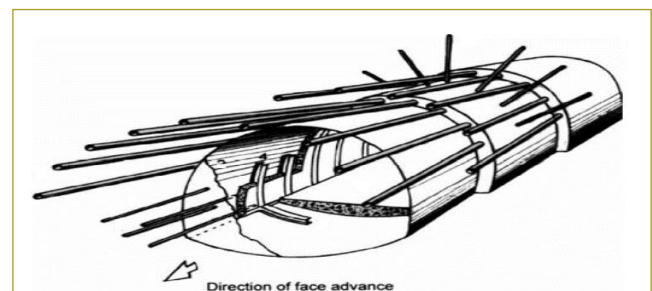


Figura 8. Penetración de las soluciones.

Fuente: CTS, 2016. Tunnel Waterproofing - General.

Sistemas combinados

Los materiales combinados de concreto lanzado, sintéticos, elementos de acero y tuberías de drenaje, se han aplicado mucho en épocas recientes.

Concreto impermeable y aditivos

El concreto como material de revestimiento ha sido una técnica muy aplicada en las obras de ingeniería de

túneles, el cual se puede especificar para tener características de impermeabilidad con el fin de reducir el paso del agua; su desempeño dependerá de factores como los siguientes: a) Adecuados procesos de elaboración; b) proporciones ajustadas de la relación agua/cemento; c) incorporación de aditivos para mejorar las características del material frente al paso del agua.

ENSAYOS DE LABORATORIO

Pruebas de presión de agua en concreto

Como parte de la investigación de la tesis de grado, se realizaron ensayos a especímenes de concreto para verificar la efectividad de combinaciones con aditivos y procesos de deterioro del material, y así evaluar su respuesta frente al paso del agua.

Para las mezclas de concreto de los especímenes ensayados se usaron materiales de agregados de río, con proporciones de arena de 55 % y grava del 45 %, con relaciones de agua/cemento de 0,45 a 0,49, con resistencia de 28 MPa, y con las características de concretos típicos de soporte y revestimiento para túneles viales.

A continuación se presentan detalles de los componentes de la mezcla utilizados (tabla 4).

Tabla 4

Características y proporciones de los materiales utilizados en la mezcla de concreto

Material	Peso, W kg/m ³	Densidad, D kg/m ³	Volumen, V m ³ /m ³
Cemento	461	3072	0,150
Agua	225	1000	0,225
Aire	0	0	0,030
Grava	719	2680	0,268
Arena	879	2688	0,327
Total	2283		1,00

Fuente: Los autores.

Las características de los especímenes que se evaluaron en los ensayos de permeabilidad fueron las siguientes:

1. Muestras con microfisuración producida por procesos de carga, e impregnación superficial de los cilindros con soluciones de aditivos.
2. Grupos de muestras con aditivos por cristalización agregados al cemento en la mezcla.
3. Especímenes con adición de metacaolín durante el mezclado.
4. Concretos con fibras, con agrietamiento producido por procesos de carga, y luego saturados con soluciones concentradas de aditivos.
5. Especímenes en combinación de fibras, relación $A/C = 0,45$.

A renglón seguido, se presentan detalles de la elaboración de los especímenes de concreto para las pruebas de permeabilidad (figura 9).

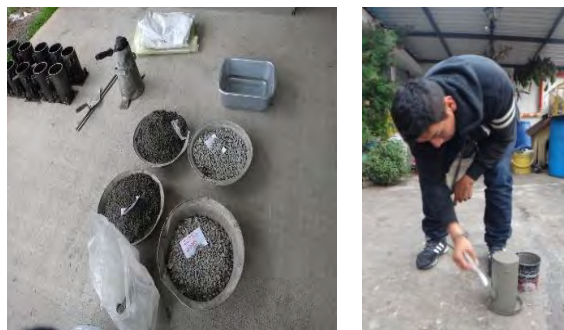


Figura 9. Materiales y elementos utilizados para la elaboración de los especímenes de concreto, e impregnación superficial con activos en muestras prefisuradas.

Fuente: Los autores.

En los laboratorios de Asocreto se hicieron las pruebas a presión de agua, de acuerdo con la NTC 4483 (Icontec, 1998), para medir la permeabilidad a los grupos de especímenes de concreto, en los que se requirió exponer el núcleo fresco de los cilindros; luego se aplicaron soluciones epóxicas impermeabilizantes en la superficie lateral de los cilindros, y cada muestra se montó en un dispositivo, lo que generó una hermeticidad total de la muestra.

Posteriormente, se aplicó agua a presión de 0,5 MPa, por 96 horas, y luego se desmontó la muestra, se fracturó lateralmente y se midió la profundidad de infiltración del agua.

Así mismo, se realizaron pruebas de caracterización de los materiales elaborados, en las que se determinaron la porosidad, gravedad específica y absorción, con procesos de secado y saturación de los especímenes elaborados, en hornos de laboratorio de geotecnia, agua



Figura 10. Características del montaje en la prueba de presión de agua ejecutada a las muestras de concreto.

Fuente: Laboratorios Asocreto.

hervida y humedad natural. En éstas se registraron los pesos secos y saturados del material en cada fase, y por medio de expresiones matemáticas se determinaron las características de permeabilidad de los elementos de concreto evaluados. En la figura siguiente se presentan detalles de los procesos de saturación y secado (figura 11).



Figura 11. Procesos de saturación y secado para definir características de los elementos de concreto.

Fuente: Los autores.

Posteriormente, se presentan los resultados de infiltración de agua en la pruebas para los especímenes considerados de baja permeabilidad (figura 12).

En esas pruebas se obtuvieron los siguientes resultados: a) para las muestras patrón/profundidad se logró un promedio de 27 mm de infiltración; b) para las muestras con aditivos de Xipex se reportó 9,83 mm; c)

para los especímenes con aditivos Sika se obtuvo una penetración de agua de 10,80 mm; d) para las muestras con aditivos de metacaolín con edad de 28 días se obtuvo una profundidad de 26 mm; e) para los especímenes con adiciones de metacaolín en la mezcla se determinó una infiltración media de 3,75 mm, y f) en especímenes con fibra y relación agua/cemento igual a 0,45, se obtuvo una profundidad de 7,35 mm.

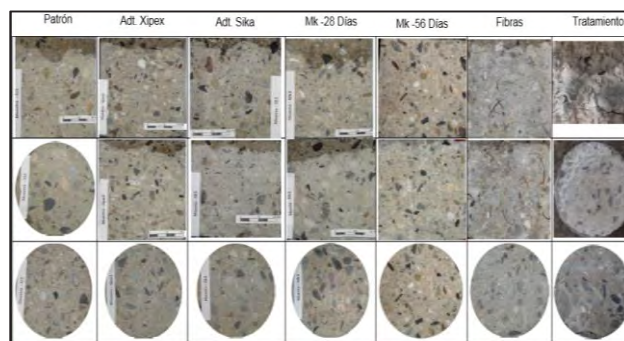


Figura 12. Resultados e infiltración en las muestras de concreto evaluadas.

Fuente: Los autores.

Por otra parte, en los especímenes con fibras que se sometieron a procesos de carga y prefisuración, los cuales luego se sometieron a procesos de tratamiento con saturación de aditivos, se obtuvo una penetración de infiltración de 18,09 mm.

Como se observa a continuación, las muestras prefisuradas son las que tienen los valores más altos de penetración de infiltración de agua, aunque se logró una reducción en la profundidad de infiltración en las muestras impregnadas con aditivos por cristalización (figura 13).



Figura 13. Resultados de valores de infiltración reportados en cada una de las muestras analizadas.

Fuente: Los autores.

En el grupo de muestras de metacaolín con edad de 28 días, no se presentó una reducción con respecto a la muestra patrón; sin embargo, el valor de penetración a los 56 días se redujo considerablemente en relación con la muestra patrón.

En las muestras con incorporación de los aditivos de cristalización durante el proceso de mezcla se obtuvieron índices de penetración de infiltración de agua en promedio menores de 10 mm, mientras que en las probetas con fibras agrietadas por procesos de carga, en las cuales se efectuaron procesos de tratamiento con soluciones de aditivos, se determinaron índices de penetración de infiltración de agua inferiores a 20 mm en promedio.

Finalmente, en los especímenes con fibras metálicas y sintéticas se estableció una reducción en los índices de penetración de infiltración de agua con respecto a la muestra patrón, con valores en promedio de 7 mm.

A renglón seguido se muestran los valores de porosidad para cada una de las muestras, las cuales variaron entre 11 y 17 %, con valor medio de 14,5 %, densidad aparente de 2,4 g/cm³ y absorción de 6,91 % (figura 14).



Figura 14. Características y resultados de porosidad reportados en los ensayos.

Fuente: Los autores.

Las muestras patrón reportaron índices de penetración de infiltración de agua promedio de 27 mm, similares a las muestras con adiciones de metacaolín, con edad de 28 días, que se consideran de baja permeabilidad, mientras que las muestras prefisuradas e impregnadas superficialmente tuvieron índices mayores de 50 mm, que se clasifican como concretos de media a alta permeabilidad.

Las muestras con aditivos de cristalización presentaron valores en promedio de 10 mm, y con adiciones

de metacaolín a edades de 56 días reportaron valores de penetración de agua de 3,75 mm, clasificándose dentro de los concretos de baja permeabilidad, mientras que los especímenes con relación agua/cemento de 0,45 en las muestras con fibras y tratadas con aditivos de cristalización en procesos de reparación, se obtuvieron valores de 18 mm.

Finalmente, en las muestras con fibras y relación a/c de 0,45, se obtuvieron valores de penetración del agua de 7,35 mm, los cuales se consideran concreto de baja permeabilidad. A continuación se ilustra la relación a/c y el índice de penetración de infiltración para varias de las muestras ensayadas.

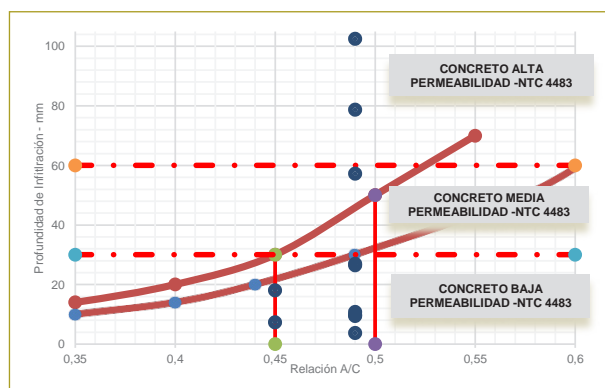


Figura 15. Resultados de infiltración frente a la NTC 4483.

Fuente: Los autores.

A partir de la expresión de la ecuación 1, se determinaron las tasas de permeabilidad para cada una de las muestras, lo cual indica que los valores más altos se presentaron para las muestras prefisuradas, en tanto que los índices más bajos se determinaron en los concretos con aditivos de cristalización, metacaolín y fibras, respectivamente.

$$k = \frac{D^2 \cdot v}{2 \cdot T \cdot h} \tag{1}$$

k = Coeficiente de permeabilidad en m/s.

D = Profundidad de penetración del agua en la muestra de concreto, en m.

T = Tiempo para penetrar la profundidad D, en segundos.

h = Cabeza de presión, en metros.

v = Porosidad del concreto en el ensayo, determinada mediante la norma ASTM C-642.

Las muestras prefisuradas presentan profundidades de infiltración mayores de 50 mm e índices de permeabilidad mayores de 1×10^{-11} m/s, que se clasifican como concretos de media y alta permeabilidad. Las muestras patrón y con metacaolín registraron valores de profundidad de penetración de 26 mm y permeabilidad de 1×10^{-12} m/s, los cuales se clasifican como concretos de baja permeabilidad, mientras que las muestras con aditivos de cristalización presentaron valores de profundidad de penetración promedio de 10 mm y permeabilidad de 1×10^{-13} m/s, con índices similares a las muestras con fibras, clasificando como concretos de baja permeabilidad (figura 16).

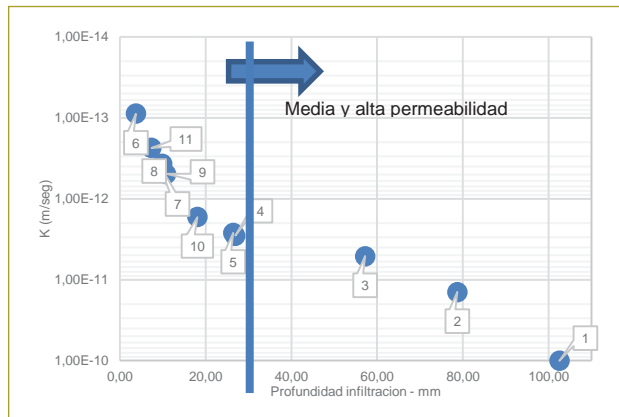


Figura 16. Valores de permeabilidad frente a la infiltración obtenida de los especímenes evaluados.

Fuente: Los autores.

ANÁLISIS TEÓRICO DE INFILTRACIONES

Las expresiones matemáticas que predicen el flujo de agua en túneles se fundamentan en la ley de Darcy y conservación de la energía, así como en los parámetros hidráulicos de los materiales que componen la unidad geológica y las características constructivas de la obra.

Para el análisis de caudales de infiltración en túneles se pueden emplear métodos empíricos, analíticos y numéricos.

En régimen estacionario, las expresiones analíticas se fundamentan en que el flujo y la presión hidráulica permanecen constantes a lo largo de la obra subterránea, en un tiempo determinado, debido a que las recargas del sistema acuífero son infinitas, aun cuando se presente irrupción del agua hacia la obra (figura 17).

Es decir, en términos del balance hidráulico, la cantidad de agua que sale por infiltración del túnel, por

descarga y almacenamiento del sistema, será la misma que la que entra por la recarga del sistema.

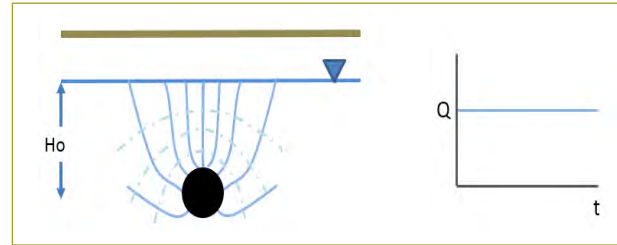


Figura 17. Régimen estacionario en un túnel.

Fuente: Los autores.

Dentro del régimen estacionario se encuentran las expresiones desarrolladas por Goodman, Lei y Tani, descritas en Chen (2010), que tienen en cuenta variables como permeabilidad, altura piezométrica y geometría del túnel.

En régimen transitorio, los modelos evalúan un flujo variable desde un medio infinito hasta la pared del túnel. Este régimen considera los cambios de la cabeza hidráulica en el tiempo debido a periodos de estiaje y cambios en la red superficial de recarga, además de las variaciones de la altura piezométrica con el avance de la obra, el tiempo de excavación y las características litológicas de los materiales donde se emplaza el túnel.

Con el concepto anterior, se han desarrollado expresiones matemáticas, como las de Perrochet & Dematteis (2007) y Goodman, descrita en Chen (2010), que tienen en cuenta el tiempo de excavación, variación piezométrica, características hidráulicas de los terrenos excavados y geometría de la excavación (figura 18).

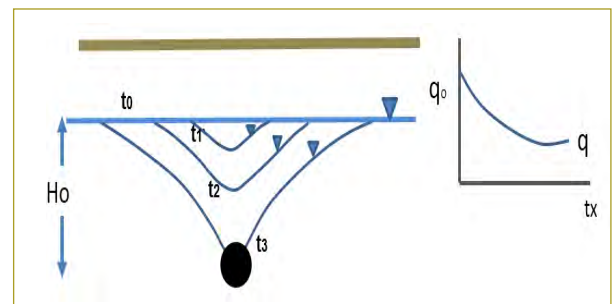


Figura 18. Régimen transitorio en un túnel.

Fuente: Los autores.

Evaluación de caso de análisis

Para comparar las metodologías de análisis de caudales de infiltración en túneles, se analizó un caso de un túnel

hidráulico a flujo libre, con longitud de 4 km, cobertura máxima de 280 m, excavado en rocas metamórficas compuestas por esquistos grises y cloríticos, donde el caudal máximo registrado en construcción fue de 329 L/s. En algunos tramos del túnel se instaló revestimiento en concreto de 20 cm de espesor y resistencia a compresión de 21 MPa (a los 28 días), por requerimiento de estabilidad a largo plazo en terrenos de mala calidad geotécnica. Detalles de la sección se muestran a continuación (figura 19).

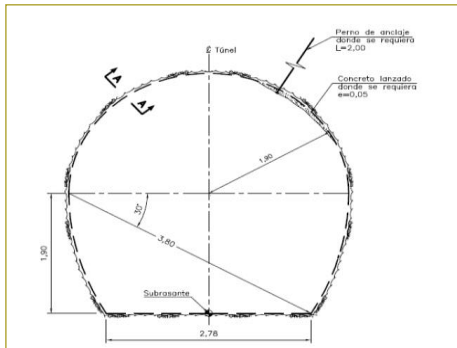


Figura 19. Sección geométrica de la excavación.

Fuente: Análisis parcial del comportamiento del cono de abatimiento del nivel freático, proyecto túnel El Manso (Ingetec, 2013).

El macizo está compuesto por esquistos grises y verdes de buena calidad de resistencia, y tiene características de autosoporte. Detalles del perfil litológico se muestran a renglón seguido (figura 20).

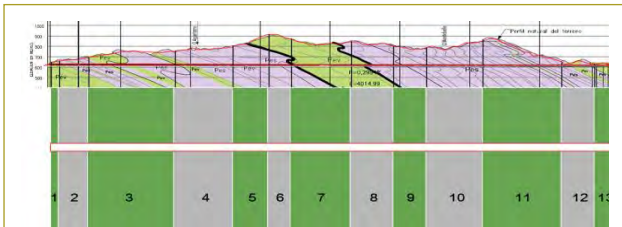


Figura 20. Perfil geológico y tipos de terrenos del túnel.

Fuente: Ingetec, Modelación del comportamiento de aguas de infiltración en el túnel del Manso con la construcción del revestimiento Completo (2012).

En la evaluación del caso se recopilaron los caudales obtenidos en la obra durante la fase de excavación y posteriormente se hizo un retrocálculo, con el fin de obtener valores de permeabilidad con base en las aproximaciones matemáticas de Goodman, descritas en Chen (2010) y Perrochet y Dematteis (2007), respectivamente; luego se efectuó el análisis empírico de

valores de permeabilidad según Aliaga (2015), y el retrocálculo, empleando métodos numéricos (FEM - elementos finitos), de acuerdo con Phase2 (2011). Y finalmente se compararon los valores de permeabilidad del macizo rocoso.

Mediante la expresión de Goodman, descrita en Chen (2010) (ecuación 2), se evaluó el caso subdividiendo el túnel en tramos. Aquí se tomaron en cuenta la longitud, el tiempo de excavación, la geometría (radio) y los niveles piezométricos, y se evaluaron los registros de infiltración de agua. A partir de esto se determinaron los valores característicos de conductividad hidráulica para cada tramo, y se obtuvo un valor medio fue del orden de 1×10^{-5} m/s, siendo los valores más altos estimados hacia los portales de la obra, mientras dicho coeficiente de permeabilidad fue más bajo hacia la parte media del túnel. Las variaciones en el caudal acumulado por cada tramo definido de la obra se presentan seguidamente (figura 21).

$$Q(t) = \sqrt{8 \cdot \frac{C}{3}} \cdot k \cdot H_0^3 S_y \cdot t \quad (2)$$

$Q(t)$ = Flujo acumulado por unidad de longitud del túnel en el tiempo de excavación.

K = Conductividad hidráulica del macizo (m/s).

H_0 = Cabeza de agua subterránea inicial sobre el eje central del túnel (m).

C = Constante entre 0,75.

S_y = Rendimiento específico.

t = Rendimiento promedio de excavación.

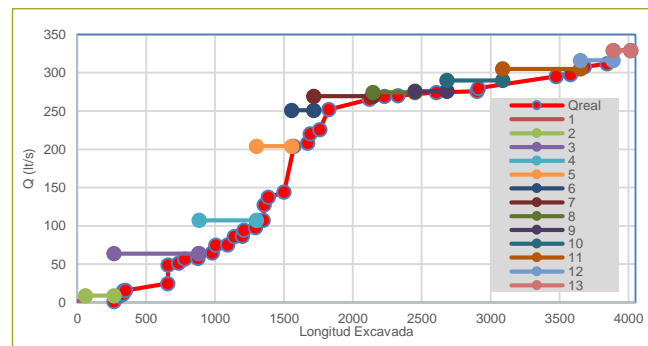


Figura 21. Registros acumulados de la infiltración reportados en cada uno de los tramos definidos de la obra.

Fuente: Ingetec (2013).

Así mismo, se utilizó la solución de Perrochet & Dematteis (2007), ecuación 3, de acuerdo con las condiciones de los terrenos, la geometría de la excavación

(radio), altura piezométrica, tasa de excavación y datos de infiltración de agua. Con esto se determinaron los valores de permeabilidad para cada tramo, con valores medios de 1×10^{-6} m/s, y valores más bajos hacia la parte media de la excavación.

$$Q(\alpha) = 2 \cdot \pi \sum_{j=1}^N H(t - t_j) x \int_0^{vt} \frac{KS_t \cdot H(L - x)}{\ln \left(1 + \sqrt{\frac{\pi K}{S_i r o^2}} (t - t_j - \frac{x}{v}) \right)} dx \quad (3)$$

Donde:

$$t_i = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_j}{v_j} \quad t_1=0, \text{ y } t_{N+1} = \text{Tiempo total de la excavación.}$$

$Q(t)$ = Flujo acumulado por unidad de longitud del túnel en el tiempo de excavación.

K = Conductividad hidráulica del macizo (L/I).

r = Radio de la excavación (L).

H_0 = Cabeza de agua subterránea inicial sobre el eje central del túnel. (L).

S_i = Rendimiento específico (L⁻¹).

t = Tiempo de excavación (I).

V = Tasa de excavación (L/I).

Igualmente, se evaluó la permeabilidad del macizo aplicando la calificación RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski, de acuerdo (Vallejo, Ferrer & Ortuño, 2002) con índices de calidad de media y buena para los tramos de roca excavados, y por medio de la expresión 4, según la metodología presentada por Aliaga (2015), en la que se determinaron los valores de permeabilidad característicos de cada tramo.

Con esto se establecieron índices de conductividad hidráulica del orden de 1×10^{-6} m/s.

$$k = 0,2 \cdot e^{-0,19 \times RMR} \quad (4)$$

También se evaluaron las infiltraciones para cada tramo aplicando el método numérico (FEM), con el código RS² de Rocscience y con base en las infiltraciones de agua reportadas en cada tramo, para lo cual se asignaron las características de conductividad hidráulica, la altura piezométrica y la geometría de la excavación. Con este método se determinó un valor medio de permeabilidad del orden de 1×10^{-4} m/s (figura 22).

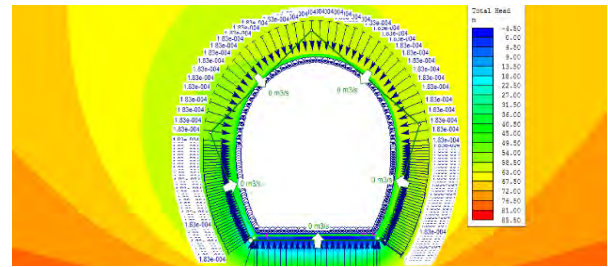


Figura 22. Geometría y características hidráulicas determinadas con el código RS2.

En la figura siguiente se presenta una comparación de resultados de permeabilidad del macizo rocoso evaluado con cada metodología. La línea roja continua es la curva de infiltración de agua real reportada en la obra, donde los valores más altos de permeabilidad se obtuvieron empleando elementos finitos, en tanto que los valores más bajos se consiguieron con la expresión de analítica de Perrochet & Dematteis (2007). Los índices intermedios se calcularon con la expresión de Goodman y empírica de Aliaga (con índices de permeabilidad de 1×10^{-5} a 1×10^{-6} m/s).

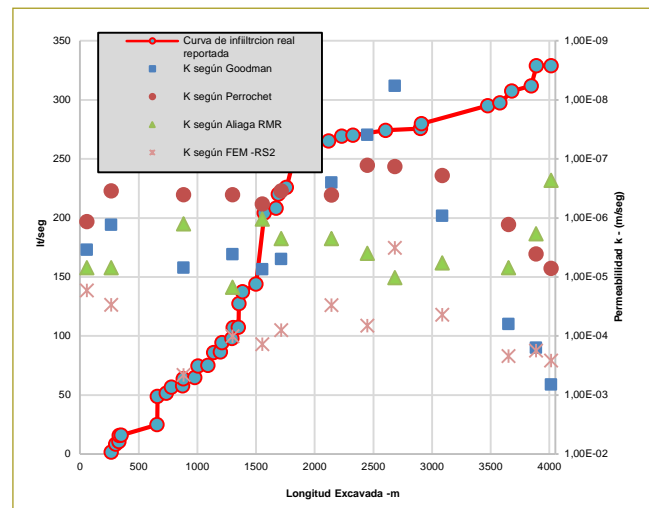


Figura 23. Curva base de caudal de infiltración reportada frente a los valores de conductividad de cada tramo por cada método de análisis.

Fuente: Los autores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones de esta investigación fueron las siguientes:

- Las infiltraciones en los túneles son inevitables, y están condicionadas por la hidrogeología, la pro-

fundidad, el diámetro y la longitud de la obra, las características del terreno y el método constructivo.

- Es prácticamente imposible construir túneles estancos, pero es posible controlar y reducir las infiltraciones de agua a niveles razonables para la construcción.
- Hay que evitar que ingrese agua de infiltración en túneles durante operación, como en túneles viales; para esto se requerirían trabajos de impermeabilización bastante costosos y demorados, haciendo necesario revestimientos en concreto demasiado gruesos para soportar las presiones hidráulicas externas que se generarían una vez recuperado el régimen hidrogeológico, por lo que los proyectos serían poco viables. Por eso, el concepto es disponer de drenaje e impermeabilización, de una manera razonable de la sección, con los sistemas mencionados en esta publicación.
- Los resultados de los ensayos para reducir la permeabilidad del concreto de revestimiento demuestran que un adecuado proceso de elaboración de éste, así como el uso de metacaolín y aditivos de cristalización, ayudan en ese proceso, a la vez de que a mayor edad del concreto el índice de penetración de infiltración de agua se disminuye. La adición de metacaolín y el efecto de la edad, mostraron una reducción efectiva de la penetración de infiltración de agua a valores de 4 mm en promedio. Esto ayudaría, además, a reducir problemas de corrosión del acero de refuerzo y mejorar la durabilidad del concreto.
- Los aditivos de impermeabilización del concreto por cristalización determinaron valores de penetración de infiltración del agua menores de 10 mm.
- Los resultados obtenidos en las muestras de concreto demuestran que los aditivos de impermeabilización se pueden adaptar a las diferentes etapas o procesos constructivos.
- Empleando valores de relación a/c entre 0,45 y 0,50, es posible obtener concretos de baja permeabilidad según la NTC 4483 (1998). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que valores más bajos pueden condicionar las características de trabajabilidad de la mezcla.
- Se recomienda ampliar la investigación para medir reducción de permeabilidad en el concreto con adiciones hasta del 10 % de metacaolín, y de esa forma evaluar sus efectos para el control del agua.
- En futuras investigaciones se propone hacer un análisis de los costos de elaboración del concreto con adiciones de fibras, elementos de cristalización y metacaolín, ya que estos últimos presentan buenas perspectivas económicas cuando se busca reducir permeabilidad en el concreto.
- Se podría ampliar la investigación frente a diferentes relaciones de a/c, donde se evalúen los efectos de los aditivos en concretos con edades tempranas para el control del agua.
- Así mismo, en futuros proyectos se proponen evaluar los efectos físico-químicos del concreto elaborado con la incorporación de aditivos y características de los agregados, frente al contacto con aguas o soluciones agresivas.
- Existe un campo amplio de investigación frente al desarrollo de las obras subterráneas y buenas prácticas para el manejo de agua, donde se podrían publicar cartillas didácticas para su aplicación por parte de los contratistas y constructores de obra.
- Se deben establecer términos de referencia y rangos máximos permitidos de infiltraciones de agua en obras subterráneas, los cuales deberán tener en cuenta el contexto geológico, etapas y características constructivas, el tipo de proyecto y efectos del entorno, sin hacer las obras inviables.

Agradecimientos

A la empresa Cipsa; a los ingenieros Jorge Ladrón de Guevara de la empresa Xipex, a Eduardo Claros de Argos y a Óscar Ruiz de Sika. Al señor Jorge Santos de Kaolink, al ingeniero Camilo Ríos de Asocreto, así como al personal de los laboratorios de Geotecnia y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería, por los aportes y ayuda en la ejecución de este trabajo.

REFERENCIAS

- Acero, P. (2017). Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Aenor (2015). Norma UNE-104424. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P. Madrid: Aenor.
- Aliaga, P. (2015). Relación entre la permeabilidad *in situ* y la calidad del macizo rocoso. *Integrating Innovations of Rock Mechanics*, 407 - 413.
- Asocreto (2010). *Tecnología del concreto*. Tomo 1, Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Bogotá: Asocreto.
- Chen, R. (2010). *Groundwater Inflow Into Rock Tunnels*. Austin: University of Texas.

- Engineering, A. (2016). Waterproofing. Seminario de Túneles (p. 6). Suiza: CTES.
- Icontec (1998). NTC 4483. Método de ensayo para determinar la permeabilidad en el concreto al agua. Bogotá: Icontec.
- Icontec (2008). NTC 5653. Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido. Bogotá: Icontec.
- Ideam (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Ingeominas (2004). Programa de Exploración de Aguas Subterráneas. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- Ingetec (2012). Modelación del comportamiento de aguas de infiltración en el túnel El Manso con la construcción del revestimiento completo. Bogotá: Ingetec.
- Ingetec (2013). Análisis parcial del comportamiento del cono de abatimiento del nivel freático, proyecto túnel El Manso. Bogotá: Ingetec.
- ITA (2012). *Descripción general del uso del espacio subterráneo*. Oaxaca: ITA.
- Jimeno, C. (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Grafico.
- Maidl, B. T. (2014). *Handbook of Tunnel Engineering II*. Basics and Additional Services for Design and Construction. Berlín: British Library Cataloguing-in-Publication Data.
- NTS (2010). Introduction to water control in Norwegian Tunneling. Noruega: Norwegian Tunneling Society.
- Perrochet, P., & Dematteis, A. (2007). Modeling Transient Discharge into a Tunnel Drilled in a Heterogeneous Formation. *Ground Water*, 45, 1-5.
- Phase2 (2011). *Tutorial Manual. Drawdown due to tunnel excavation*. Toronto: Rocscience.
- Pinillos, L. (2013). *Túnel en macizos calcáreos karstificados*.
- Posiva (2001). *Leakage and groutability*. Finlandia: Working Report.
- Salik, M. (2012). *Drainage Systems*. Croacia: InTech.
- SCT (2016). *Manual de diseño y construcción de túneles en carretera*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México.
- Sievanen, U. (2001). *Leakage and groutability*. Helsinki: Posiva OY.
- SIKA (2004). *Concreto proyectado en la construcción de túneles*. Bogotá: SIKA.
- SIKA (2015). Impermeabilización de túneles. Sistemas flexibles. Argentina: SIKA.
- Society for Mining Colorado (2011). *Concrete for underground structures: guidelines for design and construction*. Colorado, USA: SME.
- Vallejo, L., Ferrer, M., & Ortuño, L. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson.
- Vargas, N. (2005). *Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia*. Bogotá: Ideam.

Herramienta computacional para el diseño de lagunas naturales de estabilización

Computational tool to design of natural stabilization ponds

JORGE LUIS GONZÁLEZ CASTRO¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Magister en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jorge.gonzalez-ca@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 01/09/2019 Aceptado: 15/09/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de la herramienta computacional Dislag para el diseño de lagunas naturales de estabilización, teniendo como base el programa LAG, desarrollado por el ingeniero Ricardo López Cualla en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en la década de los noventa. El aplicativo Dislag consta de varios módulos que van guiando al usuario en el diseño del proceso de tratamiento de la laguna, hasta culminar con su dimensionamiento geométrico y con la presentación de la totalidad de resultados en forma gráfica y numérica. Dislag posee cinco tipos de configuración para el sistema de tratamiento, proporcionando opciones para el análisis del diseño más conveniente. Los resultados fueron satisfactorios en cuanto a capacidad de cálculo de la herramienta, exactitud de resultados y tiempos de ejecución, lo que convierte a Dislag en un excelente instrumento de diseño para los ingenieros de tratamiento de aguas residuales.

Palabras claves: lagunas de estabilización, *software*, tratamiento de aguas residuales (STAR), diseño.

Abstract

This article presents the development of the Dislag computational tool to design natural stabilization ponds, based on the LAG program developed by Ricardo López Cualla P.E., at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, in the 90s. Dislag consists of several modules that guide the user in the design of the pond's wastewater treatment process, step by step, until it ends by showing results such as geometric sizing, graphics, and numerical tables. Dislag has five types of configuration for the wastewater treatment system, providing alternatives for the analysis of the most convenient design. The results were satisfactory in terms of calculation tool capacity, results accuracy, and execution times, making Dislag an excellent tool for engineers to design wastewater treatment systems.

Keywords: stabilization ponds, software, wastewater treatment, design.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las disponibilidades de recursos tecnológicos avanzados, como por ejemplo los computadores, son la mejor opción para hacer cálculos complejos en tiempos muy cortos, evitando tener que realizar simplificaciones del problema o demandar la ejecución de tareas muy lentas. Lo anterior proporciona la motivación de crear herramientas tecnológicas ambientales, que permitan al ingeniero de diseño de sistemas de tratamiento de agua ahorrar en tiempos de cálculo.

Con el ánimo de suministrar una herramienta que permita a los diseñadores optimizar y mejorar su trabajo para tipos de tratamiento viables en el ámbito nacional, tales como las lagunas de estabilización, se establece la conveniencia de construir un programa de computador que permita hacer cálculos, dimensionamientos y análisis de alternativas de este tipo de estructuras de manera rápida y confiable, utilizando datos de ingreso explícitos de las condiciones locales por evaluar.

Consciente de la importancia de las lagunas naturales para el tratamiento de aguas residuales, en el año 1997 el ingeniero Ricardo López Cualla desarrolló el “Programa LAG de computador para el diseño de lagunas de estabilización”, instrumento valioso para ser actualizado y modernizado dadas las disponibilidades informáticas actuales y futuras, por lo que este programa se considera la base de concepción para desarrollar una nueva herramienta computacional.

METODOLOGÍA

Se concibió el desarrollo de la herramienta computacional como una serie de pasos ordenados y lógicos que permitieran estructurar el ciclo de vida de un programa informático.

Fase 1. Estructuración de los contenidos de la herramienta computacional y su mecanismo de implementación

Esta fase comprendía todas las tareas de búsqueda, investigación y definición de los elementos que constituirán la herramienta, las cuales se deben llevar a cabo antes del comienzo de su implementación (modelos de diseño de STAR, construcción de diagramas de flujo y algoritmos, y selección del lenguaje de programación).

Fase 2. Implementación de la herramienta computacional

Una vez seleccionado el lenguaje de programación (Visual Basic) y definido el diagrama de flujo, como componentes primordiales de esta fase, se realizaron la escritura y la conformación de las rutinas del código del programa, es decir, la implementación de la herramienta, tarea que consumió la mayor demanda de tiempo y fue de gran cuidado, ya que su resultado sería el producto de este proyecto.

Fase 3. Validación de la herramienta computacional

Se dio comienzo a esta fase una vez realizada la verificación que, finalizada la implementación de la herramienta, no presentaba errores de compilación o ejecución. Esto se hizo principalmente con los ejemplos de ejecución encontrados en el capítulo 11, “Programa de computador”, del texto *Acuitratamiento por lagunas de estabilización* (Romero, López Cualla & Díaz, 1994), en el cual se tiene una recopilación de los trabajos hechos con el aplicativo LAG, principal guía de este trabajo. Posteriormente, se realizó un ejercicio en forma manual, con las mismas condiciones y restricciones utilizadas en el programa, con el fin de confrontar sus resultados, exactitud y tiempos de cálculo.

Fase 4. Construcción del manual del usuario

Después de superar las fases 2 y 3, se plasmaron en un documento todos los requerimientos, indicaciones, aclaraciones y explicaciones necesarios para que cualquier ingeniero ejecute de manera satisfactoria la herramienta computacional. Dicho documento se llamó el *Manual del usuario*.

RESULTADOS

Se construyó la herramienta computacional Dislag, con los siguientes módulos de interfaz del usuario.



Figura 1. Menú de entrada Dislag.



Figura 5. Configuración del tren de tratamiento Dislag.

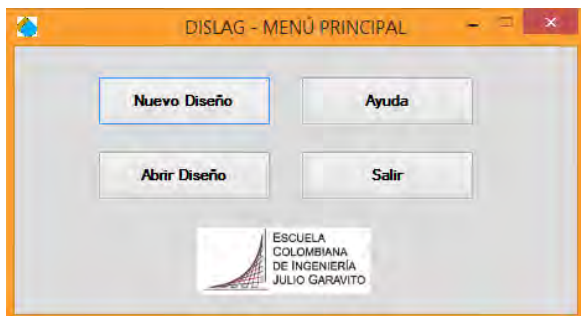


Figura 2. Captura de pantalla del menú principal Dislag.

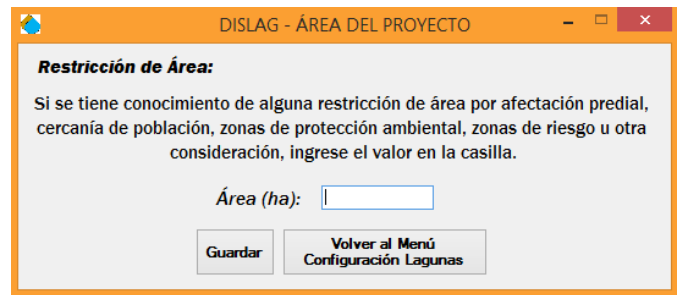


Figura 6. Restricción de área Dislag.

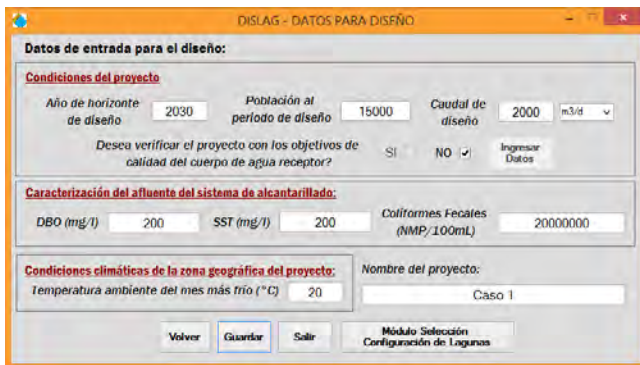


Figura 3. Captura de pantalla del módulo de datos Dislag.

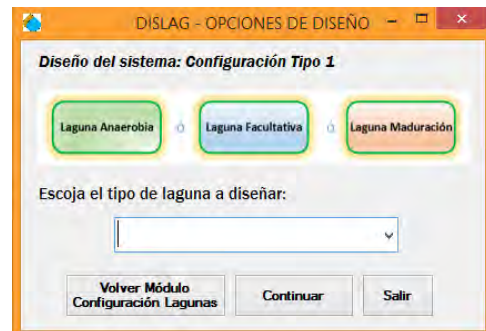


Figura 7. Diseño tipo 1 Dislag.

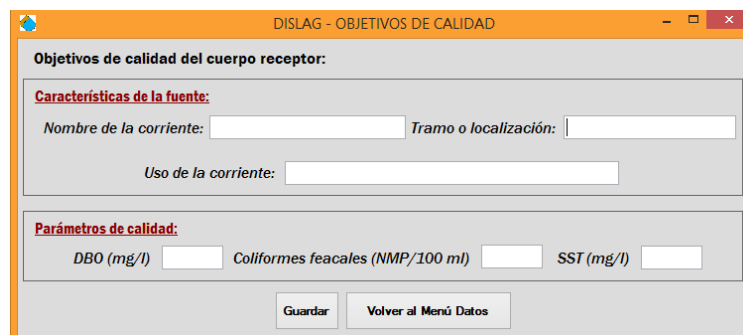


Figura 4. Objetivos de calidad Dislag.



Figura 8. Diseño de laguna anaerobia Dislag.

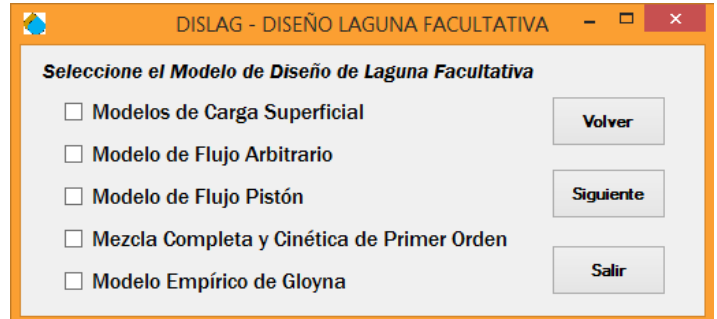


Figura 9. Diseño de laguna facultativa Dislag.

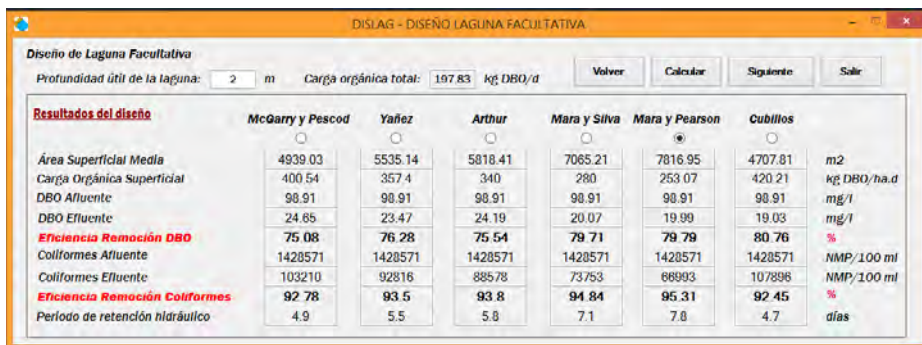


Figura 10. Diseño de laguna facultativa por carga orgánica superficial Dislag.

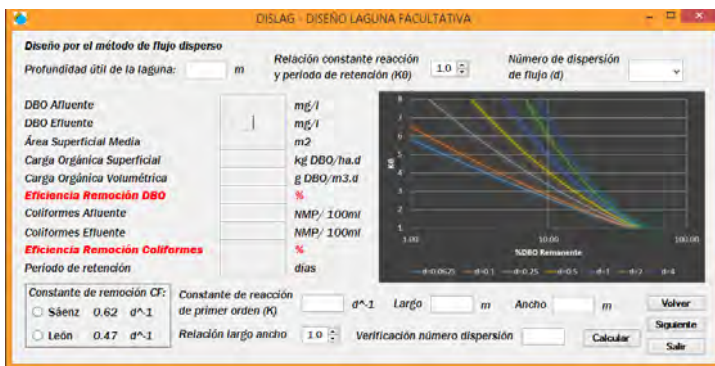


Figura 11. Diseño de laguna facultativa por flujo disperso Dislag.

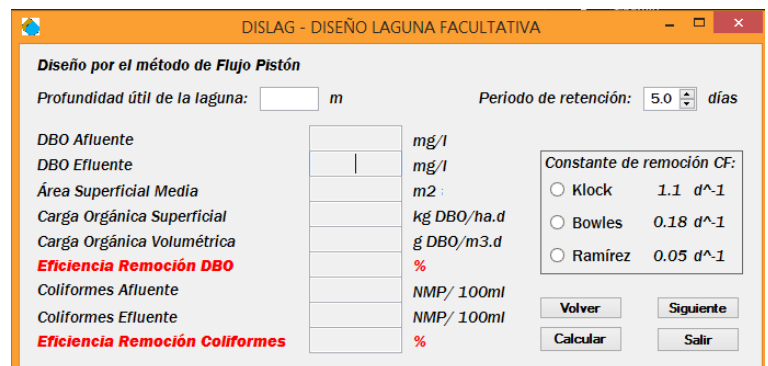


Figura 12. Diseño de laguna facultativa por flujo pistón Dislag.

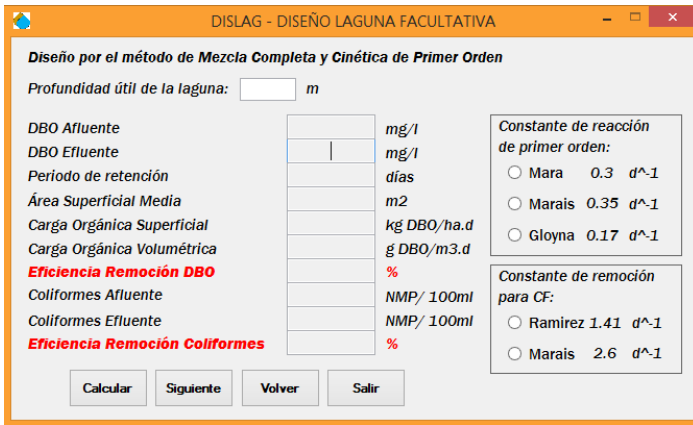


Figura 13. Diseño de laguna facultativa por mezcla completa Dislag.

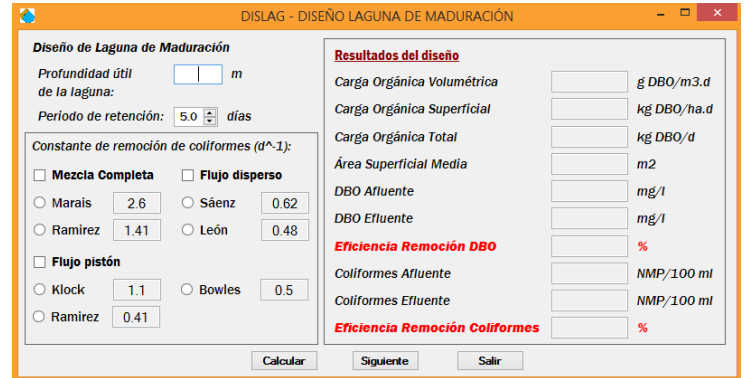


Figura 15. Diseño de laguna de maduración Dislag.

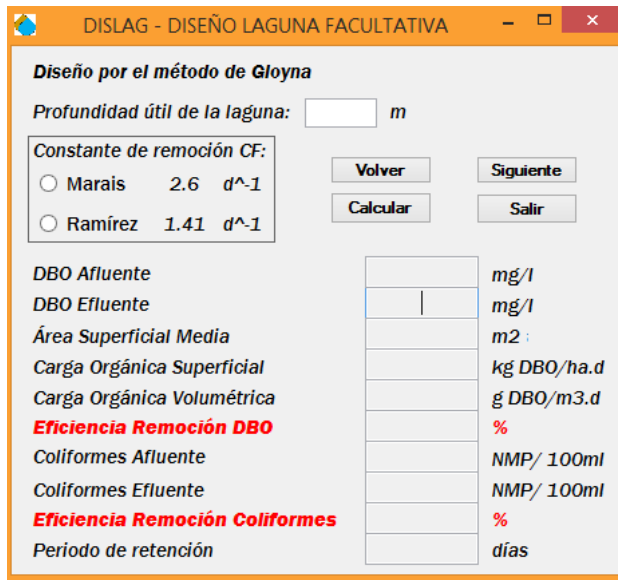


Figura 14. Diseño de laguna facultativa por el método Gloyna Dislag.

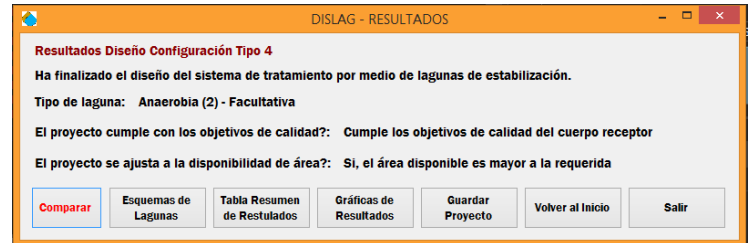


Figura 17. Resultados Dislag.

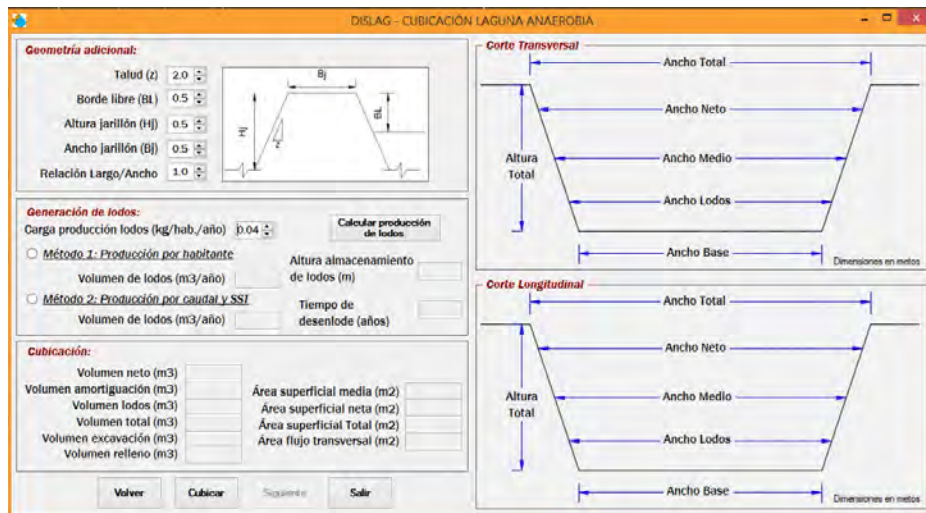


Figura 16. Cubicación de laguna anaerobia y facultativa Dislag.



Figura 18. Esquema de la planta de resultados Dislag.

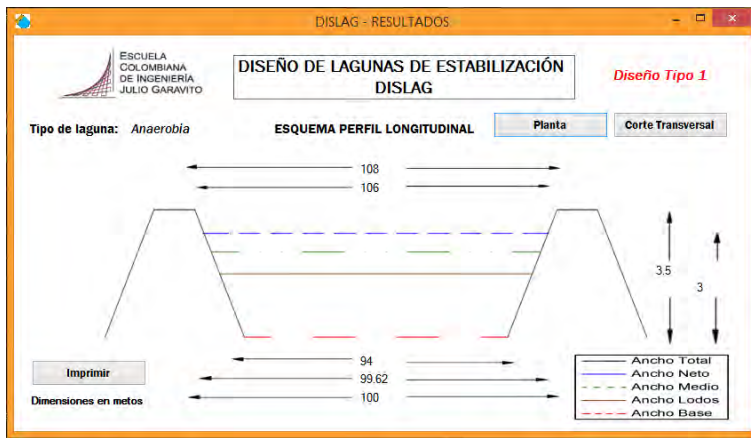


Figura 19. Esquema del perfil longitudinal de resultados Dislag.

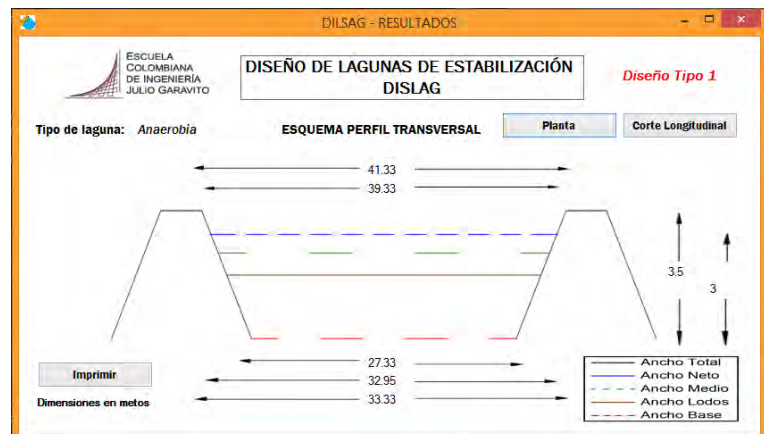


Figura 20. Esquema del perfil transversal de resultados Dislag.

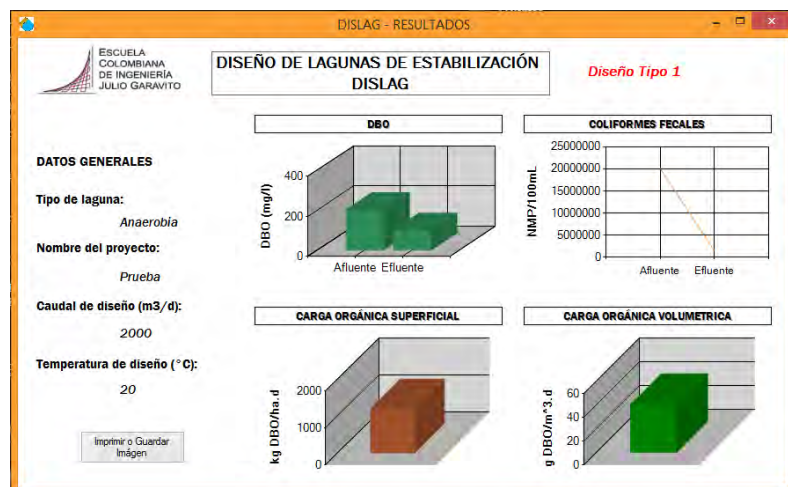


Figura 21. Gráficos de resultados Dislag.

DISLAG - RESULTADOS

DATOS GENERALES

Tipo de laguna:
Anaerobia-Facultativa-Maduración

Nombre del proyecto:
Prueba

Caudal de diseño (m3/d)
2000

Temperatura de diseño (°C):
20

PARAMETRO	ANAEROBIA	FACULTATIVA	MADURAC
Carga orgánica superficial (kg/ha.d)	1800	400.54	73.94
Carga orgánica volumétrica (kg/m3.d)	60	20.03	7.39
Carga orgánica total (kg/d)	600	296.74	73.94
DBO afluente (mg/l)	300	148.37	36.97
DBO efluente (mg/l)	148.37	36.97	9.09
Eficiencia de remoción DBO (%)	50.54	0.75	75.42
Coliformes Fecales afluente (NMP/100)	2000000	142857.14	7050.42
Coliformes Fecales efluente (NMP/100)	142857.14	7050.42	503.6
Eficiencia de remoción Coliformes Fecales (%)	92.86	95.06	92.86
Periodo de retención (días)	5	7.41	5

Figura 22. Tablas de resultados Dislag.

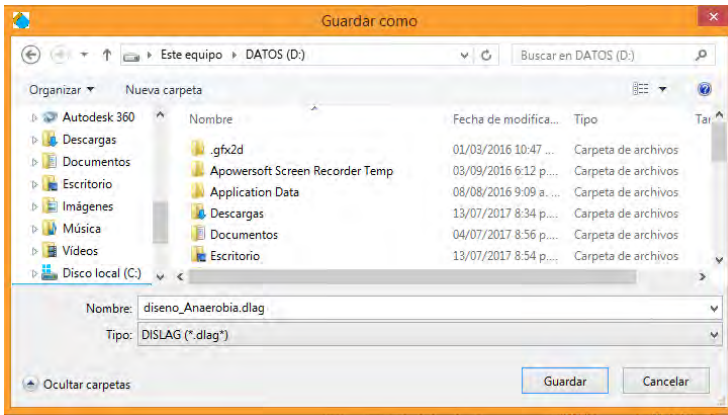


Figura 23. Guardar Dislag.

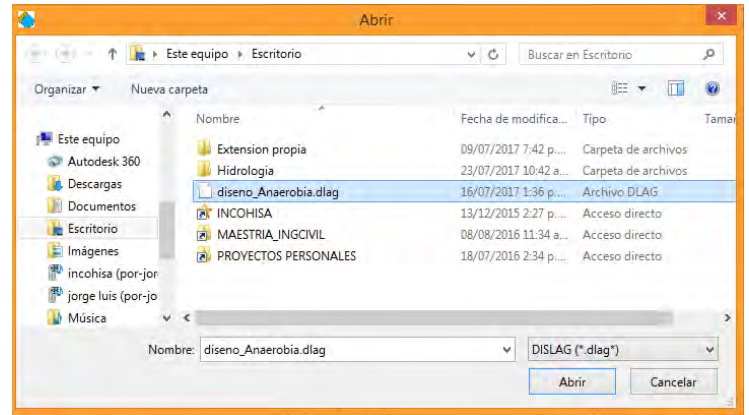


Figura 24. Abrir Dislag.

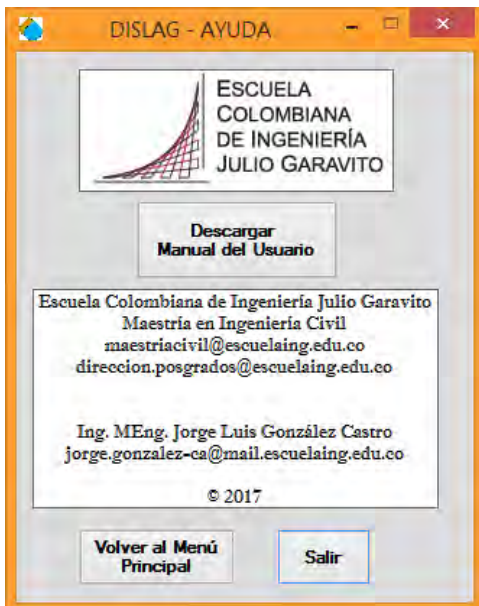


Figura 25. Módulo de ayuda Dislag.

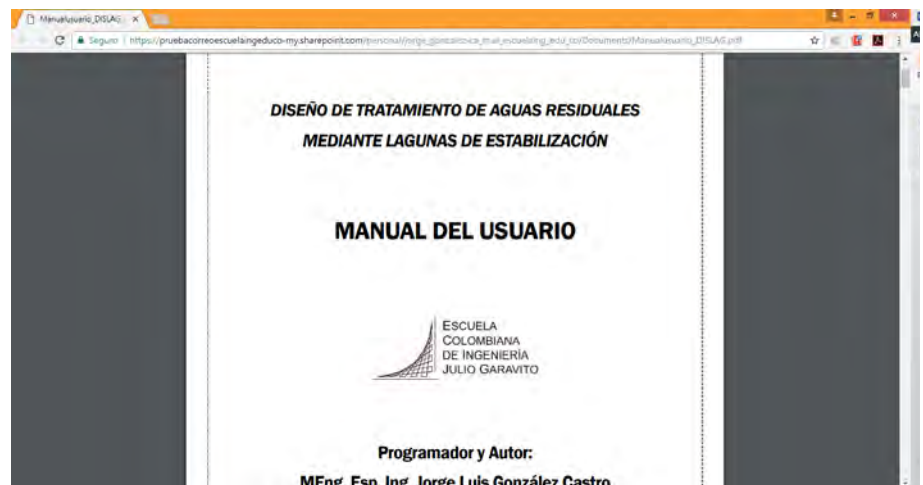


Figura 26. Conexión al Manual del usuario Dislag.

En la información de referencia del programa LAG se tenía un ejemplo desarrollado en su momento con el programa, lo que se convirtió en la mejor forma de validar los resultados de Dislag, obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a exactitud y tiempos de ejecución. La validación permitió perfeccionar la programación de los métodos de diseño, ya que en ocasiones se encontraron diferencias bastante considerables o notorios errores en la escritura de las ecuaciones o manejo de unidades, los cuales se ajustaron de manera inmediata y se corroboraron en una nueva ejecución del programa para verificar que se corrigieron adecuadamente.

En cuanto a la aplicación del programa en un caso real del sector, se evidenció que trabajar con la herramienta computacional Dislag permite ahorrar un tiempo considerable en comparación con tener que realizar manualmente el mismo procedimiento, y más en los escenarios donde habrá que probar varias configuraciones, cambio de parámetros y presentación en forma clara y ordenada de los resultados.

Se tiene la seguridad de que con todas las verificaciones que se realizaron mediante comparación de ejercicios prácticos, los cálculos y resultados del programa Dislag son correctos y pertinentes para un proyecto de ingeniería conceptual.

CONCLUSIONES

- Se evaluó la capacidad del programa LAG y se identificaron las fortalezas que hay que tener en cuenta en la actualización Dislag.
- La base del programa Dislag conservó la misma estructura del programa LAG desarrollado por el ingeniero Ricardo López Cualla.
- Se utilizaron los últimos recursos tecnológicos disponibles, en el plano académico de un trabajo de grado, para el desarrollo del aplicativo computacional.
- Se hizo un exhaustivo análisis de las alternativas de lenguaje de programación que se va a utilizar, seleccionando a partir de un puntaje ponderado la opción más adecuada según sus ventajas y desventajas.
- La disponibilidad tecnológica para la construcción de este tipo de aplicativos es muy variada; por eso es importante evaluar, de acuerdo con el objetivo del trabajo, cuál es la mejor alternativa de recursos de implementación.
- La selección del lenguaje de programación Visual Basic permitió un aprendizaje relativamente rápido

para el desarrollo del programa en Visual Studio 2015.

- La estructura del programa Dislag permite que el usuario siga paso a paso, de manera amigable, el diseño asistido por computador de las lagunas de estabilización.
- De acuerdo con el estado del arte del diseño de lagunas de estabilización, se complementaron algunos modelos de diseño.
- Se realizaron distintas validaciones del aplicativo a partir de ejercicios encontrados en la bibliografía especializada y los textos relacionados con la estructura del programa LAG.
- Se construyó el *Manual del usuario* de la herramienta computacional, el cual dará la ayuda necesaria para aprender a manejar todas las opciones del programa por parte del nuevo usuario.
- Los tiempos de ejecución del diseño con el programa Dislag son considerablemente menores respecto al necesario para realizar la misma actividad en forma manual.
- Si se desea, el código permitirá hacer actualizaciones o agregar elementos a la herramienta computacional.

REFERENCIAS

- Cubillos, Z. (2001). Estado del arte en el diseño de lagunas de estabilización. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 3(2), 80-91.
- Donaires Flores, T. (2005). Un nuevo enfoque en el estado del arte en el diseño de lagunas de estabilización. XXI Congreso Interamericano de Ingeniería Química.
- Dwarampudi, V., Dhillon, S. S., Shah, J., Sebastian, N. J., & Kanigicharla, N. (2010). Comparative study of the Pros and Cons of Programming languages Java, Scala, C++, Haskell, VB .NET, AspectJ, Perl, Ruby, PHP & Scheme - a Team 11 COMP6411-S10 Term Report. Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Hassan, A. B., Abolarin, M. S., & Jimoh, O. H. (2006). The Application of Visual Basic Computer Programming Language to Simulate Numerical Iterations. *Leonardo Journal of Sciences*, (9), 125-136.
- López Cualla, R. (1997). Programa LAG de computador para el diseño de lagunas de estabilización. *Manual del usuario* (1ª. ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Oakley, S. (2005). *Manual de diseño, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad de lagunas de estabilización en Honduras*. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (Usaid).
- Oguntunde, B. O. (2007). Comparative analysis of some programming languages. *Transnational Journal of Science and Technology*, 2(5), 107-118.
- Romero, J. (2005). *Lagunas de estabilización de aguas residuales* (1ª. ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Romero, J., López Cualla, R., & Díaz, M. C. (1994). *Acuitratamiento por lagunas de estabilización* (1ª. ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Alcance y política

El objetivo de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* es difundir artículos técnicos que contribuyan al desarrollo del país a través de una publicación con alta calidad editorial y rigor científico.

La revista acepta prioritariamente los siguientes tipos de trabajos, que le permiten mantener su categorización:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento producto de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica.

También admite artículos de las siguientes tipologías:

4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico.
6. **Revisión de tema.** Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

Cabe destacar que se privilegian para la revista los tipos de artículos de los numerales 1, 2 y 3.

La revista circula trimestralmente y recibe sólo artículos inéditos. Los trabajos recibidos se someten al concepto de pares académicos y del Consejo Editorial.

Requisitos para la publicación de artículos

Los artículos presentados a la revista deben remitirse por correo electrónico a revista@escuelaing.edu.co, adjuntando los siguientes formatos debidamente diligenciados: autor.doc, clasificación.doc y tipo.doc, cuyos archivos se pueden descargar de <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. En este mismo sitio está disponible la plantilla guía que contiene la estructura determinada por la revista para los artículos.

Scope and policy

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería disseminates technology articles helping to our country development. It emphasises on its high quality print and its scientific rigour. Articles submitted for publication shall be classified into one of the following categories— which allow it keeps its indexation:

1. **Scientific and technological research article.** These documents offer a detailed description about the original findings of research projects. In general, the usually used structure contains four important sections: introduction, methodology, results and conclusions.
2. **Reflection article.** These documents present the results of a research project on a specific, interpretative, or critical view by the author about a particular topic by using original sources.
3. **Review.** A document resulting from a finished research, where the published and/or unpublished findings of investigation in a particular field of science or technology are analysed, systematised and integrated to report the progress and the development tendencies. These documents include a careful bibliographic review.

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería also accepts the following types of articles:

4. **Short article.** A brief text presenting the original, preliminary and/or partial results of a scientific or technological study, which normally need to be disseminated as quickly as possible.
5. **Case report.** A document that presents the results of a study on a specific situation in order to report the technical and methodological experiences considered in a particular case.
6. **Thematic review.** These documents are the product of a critical review of literature on a particular topic.

Our revista privilege articles as the highlight ones in numbers 1, 2 and 3.

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería is a quarterly publication that only accepts unpublished articles. The revista submits all the papers to the verdict of two academic peers, who evaluate the article.

Ruling for publication

The article must be sent by e-mail to revista@escuelaing.edu.co with 3 files attached: Author.doc, Classification.doc and Type.doc available in <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. There is also a template guide for the structure of the article (template guide.doc).



Confía en 4-72,
el servicio de envíos
de Colombia

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional

.....

www.4-72.com.co