

Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos para obras geotécnicas

Ing. Alfonso Rico¹. Ing. Ramiro Gutiérrez².

¹Ingeniero Civil - Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

²Director de trabajo de grado. Director Departamento de Túneles. INGETEC

RESUMEN

Este documento trata sobre los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos. En él puede encontrar la información necesaria como guía básica, para diseñar, construir y supervisar este tipo de trabajos.

Este documento reúne las metodologías y/o recomendaciones de tratamientos con inyecciones, aportando información y orientación, en el diseño, construcción y supervisión de proyectos donde se involucren tratamientos con inyecciones de macizos rocosos; para acoplarse a las necesidades y características de cada proyecto, de acuerdo a las condiciones geológicas y geotécnicas del proyecto y optimizando la ejecución del tratamiento en tiempos prudentes de ejecución.

ABSTRACT

This document deals with treatments with grouting in rock. In it you can find the necessary information as a basic guide, to design, build and supervise this type of work.

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 treatments with grouting of rock mass are involved; to fit the needs and characteristics of each project, according to the geological and geotechnical conditions of the project and optimizing the execution of the treatment in prudent execution times.

1. INTRODUCCIÓN

Este documento reúne las metodologías y/o recomendaciones de tratamientos con inyecciones, aportando información y orientación, en el diseño, construcción y supervisión de proyectos donde se involucren tratamientos con inyecciones de macizos rocosos; para acoplarse a las necesidades y características de cada proyecto, de acuerdo a las condiciones geológicas y geotécnicas del proyecto y optimizando la ejecución del tratamiento de manera efectiva, económica y en tiempos prudentes de ejecución, como guía básica de diseño, que materiales utilizar, que ensayos realizar, como diseñar las mezcla a utilizar, a que presión se inyectan estos materiales, los equipos que se utilizan en estos tratamientos, sugerencias de construcción, sugerencias de inspección y supervisión de los tratamientos y pautas para realizar un adecuado cierre de los tratamiento.

Para entender un poco sobre las inyecciones y sus conceptos, se explica brevemente a continuación:

La inyección es un proceso de 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 dentro de 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 típicamente 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 un estado del arte, dada la complejidad geológica en algunos macizos y el comportamiento impredecible. Por esta razón,

muchos de estos temas 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 y/o semi-analítica.

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

La información recopilada de este documento, se obtuvo de diferentes autores y fuentes. La información es dispersa y estos tratamientos son un estado del arte muy especializado. Este documento ha buscado una revisión bibliográfica y académica en temas de inyecciones en macizos rocosos, pero a la vez se han integrado conceptos de experiencias reales recientes.

2. CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

El objetivo del tratamiento de macizos rocosos con inyecciones, es generalmente utilizado para reducir las filtraciones que se presentan 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, es necesario un conocimiento completo de los tipos de roca en el sitio y su historia geológica.

Las diferentes 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 y las condiciones físicas y geométricas de las discontinuidades se deben considerar como una parte esencial del diseño de un programa de inyección. Las discontinuidades deben ser identificadas e interceptadas para tratarlas de manera efectiva.

Una de las consideraciones geológicas principales a tener en cuenta en el proceso de inyección son; las estructuras geológicas en especial las discontinuidades, fallas, diaclasas y cizallas (Véase Figura 2.1). 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 adecuado tratamiento.

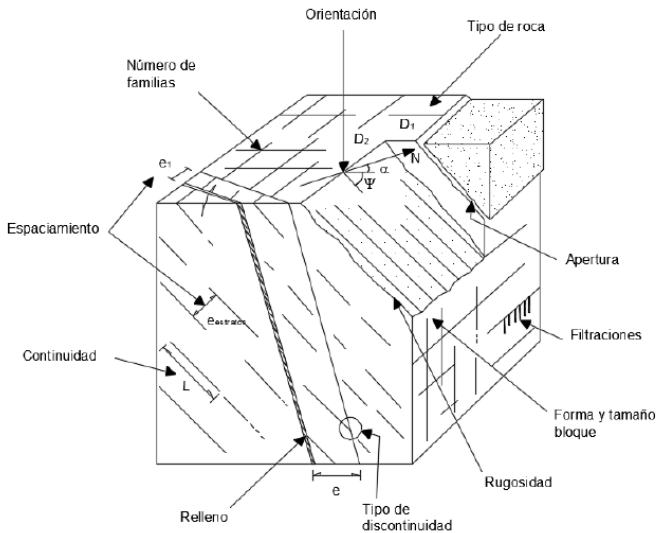


Figura 2.1. Diagrama ilustrativo de las propiedades del macizo rocoso. Adaptado de "Foundations on Rock", Wyllie, Duncan C. (2005).

2.1. INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS

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

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. (Véanse Fotografías 2.1 y 2.2).



Fotografía 2.1. Perforación exploratoria. Fuente del autor.



Fotografía 2.2. Mapeo geológico en galería de exploración. Fuente del autor

Dentro de 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. (Véase Figura 2.2)

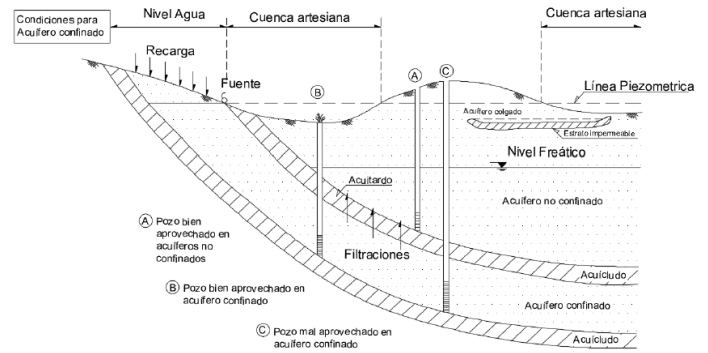


Figura 2.2. Tipos de acuíferos. Adaptado de "Applied Hydrogeology of Fractured Rocks" de Singhal, B.B.S y Gupta, R.P (2010).

2.2. 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 y/o reducir gradientes hidráulicos).

Para los trabajos de inyección, la prueba de permeabilidad utilizada es el tipo radial, donde se bombea agua dentro de una perforación de prueba en intervalos de tiempo y presiones establecidas. La prueba fue establecida por Lugeon en 1933, cuya unidad de permeabilidad está relacionada con la prueba radial que lleva su nombre. (Véase Figura 2.3)

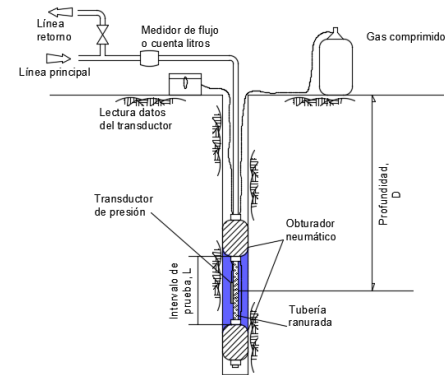


Figura 2.3. Configuración ensayo Lugeon. Tomado de "Lugeon test interpretation, revisited", Quiñones, Camilo. (2010).

La evaluación de permeabilidad para los trabajos de inyección se dividen en tres grupos: (1) aquellos que se realizan en etapa de exploración (etapa de diseño); (2) aquellos que se realizan durante el tratamiento de inyección, antes de inyectar en el sitio; (3) y los que se realizan 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 realizadas durante la ejecución de las inyecciones sirven para evaluar y/o optimizar el diseño del programa de inyección; y las pruebas realizadas después de la ejecución del tratamiento sirven para verificar la efectividad del tratamiento.

2.3. TIPO DE INYECCIÓN

En presas 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 y/o meteorizados. (Véase Figura 2.4).

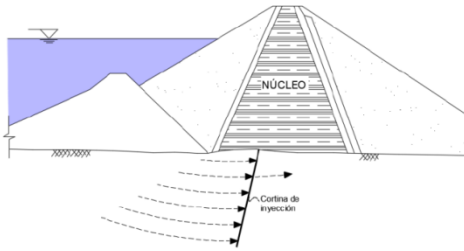


Figura 2.4. Tratamiento de inyecciones en presas. Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Hously, A.C. (1990).

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. (Véase Figura 2.5).

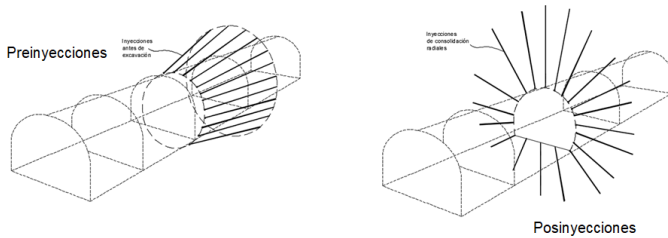


Figura 2.5. Tratamiento de inyecciones en túneles. Elaboración del autor

3. 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.

Solo hasta la década de los 90's, Hously (1990), Weaver (2007) y otros publicaron artículos, libros y publicaciones que promovieron el diseño de las inyecciones de forma racional, basado en la investigación geotécnica del sitio, realizando enfoques semi-analíticos para el diseño las inyecciones y analizando los resultados durante ejecución del tratamiento.

El *Bureau of reclamation* (2014), recomienda el método de espacio dividido para obtener el cierre del tratamiento en macizos rocosos. La inyecciones a espacio dividido se dividen en patrones de cierre de 25.0 m de separación entre perforaciones primarias medidos perpendicularmente del centro la 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. (Véase Figura 3.1)

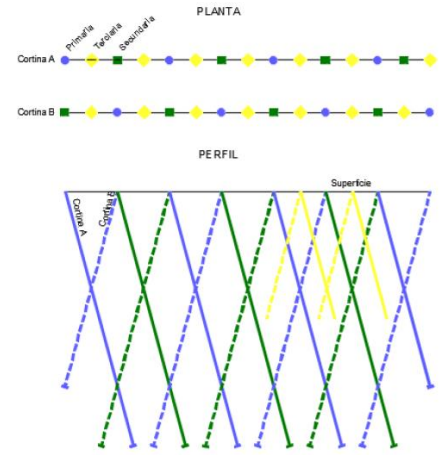


Figura 3.1. Disposición típica de tratamiento de inyección. Adoptado de "Engineering and Design - Grouting Technology. Manual No. 1110-2-3506" de USACE. (2017).

La Figura 3.2, muestra el diseño de las perforaciones para inyección primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria.

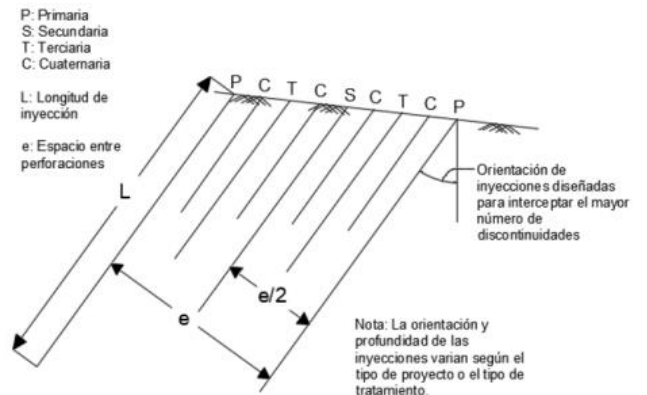


Figura 3.2. Espaciado y profundidad de inyecciones. Adaptado de "Design Standards No. 13 Embankment Dams" de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

3.1. 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, la orientación de las perforaciones debe orientarse de tal forma que atraviese la mayor parte de las discontinuidades. (Véase Figura 3.3).

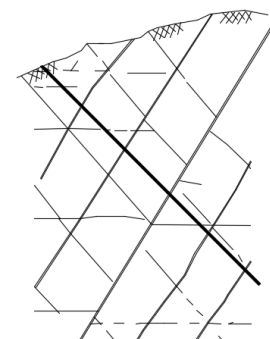


Figura 3.3. Perforación intersectando las discontinuidades abiertas. Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Hously, A.C. (1990).

La inclinación y dirección de las perforaciones se deben especificar en los planos con el espaciamiento entre las perforaciones y con los cambios de nivel y cambios de dirección. (Véase Figura 3.4).

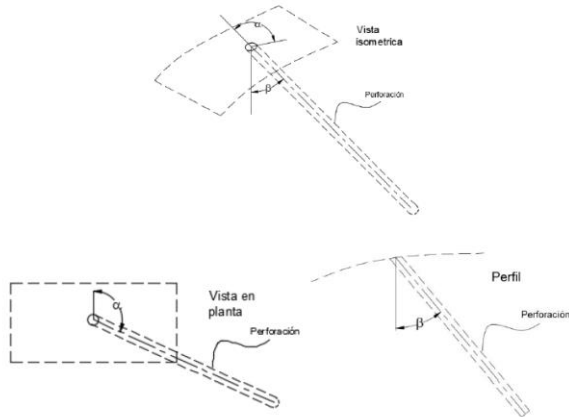


Figura 3.4. Ángulos de inclinación (α y β). Elaboración del autor.

3.2. CORTINAS DE INYECCIÓN

Las cortinas de inyección forman un único tratamiento, con el objetivo de mejorar las condiciones del macizo, o rellenar las discontinuidades. (Véase Figura 3.5).

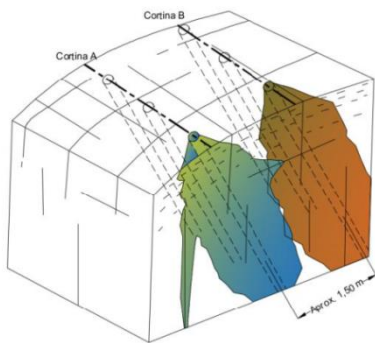


Figura 3.5. Tratamientos con inyecciones con varias cortinas. Elaboración del autor.

3.2.1. Posición de las cortinas de inyección

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

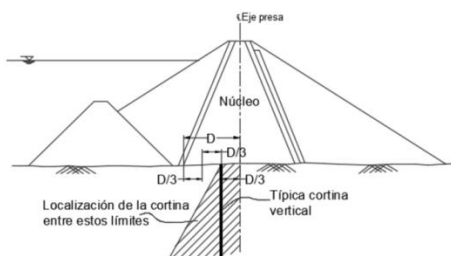


Figura 3.6. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa con núcleo de arcilla. Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Hously, A.C. (1990).

La posición de cortinas en abanico son utilizados para realizar tratamientos de inyección en túneles para mejorar las propiedades mecánicas del macizo rocoso en los frentes de excavación o reducir la permeabilidad previa al avance de la excavación. (Véase Figura 3.7).

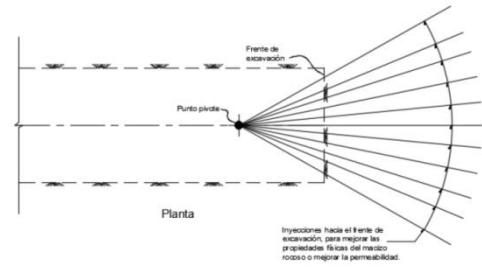


Figura 3.7. Inyecciones hacia el frente en una excavación subterránea. Elaboración del autor

3.2.2. Intersección de las cortinas de inyección

Cuando una excavación subterránea pasa por debajo de una cortina de inyección desde 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 este. (Véase Figura 3.8).

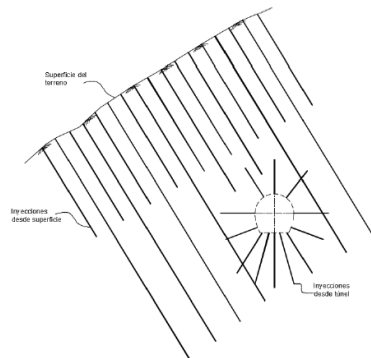


Figura 3.8. Intersección de cortinas desde superficie y desde túneles. Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Hously, A.C. (1990).

3.2.3. Inyecciones de consolidación

Este tratamiento mejora el macizo rocoso y reduce la permeabilidad. Así mismo, este tratamiento reduce las pérdidas de agua por filtración por debajo de las presas, reduce las velocidades de filtración en zonas relativamente permeables y reduce la pérdida del material de la presa. (Véase Figura 3.9).

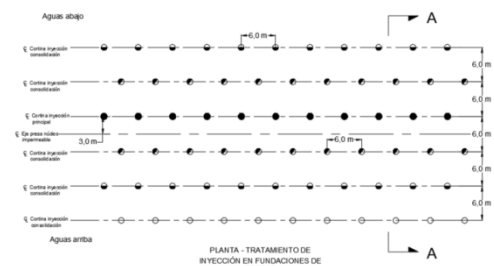


Figura 3.9. Planta de inyecciones de consolidación en tratamientos de fundación para presas. Adaptado de "Design Standards No. 13 Embankment Dams" de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

3.3. MÉTODOS DE INYECCIÓN

3.3.1. 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. (Véase Figura 3.10).

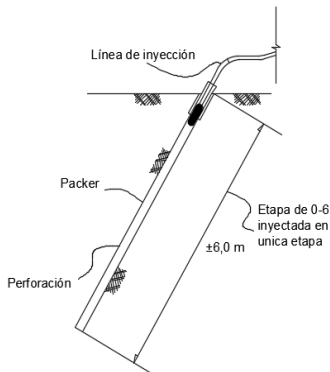


Figura 3.10. Etapa simple de inyección. Adaptado de "Design Standards No. 13 Embankment Dams" de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

3.3.2. 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), luego 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. (Véase Figura 3.11).

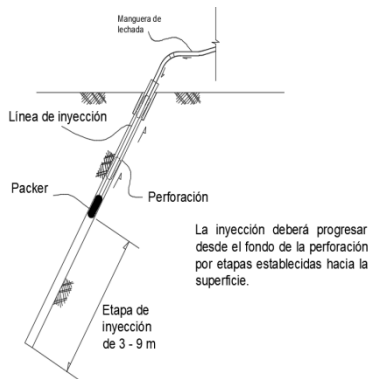


Figura 3.11. Método de inyección ascendente. Adaptado de "Design Standards No. 13 Embankment Dams" de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

3.3.3. 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. Una vez 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. (Véase Figura 3.12).

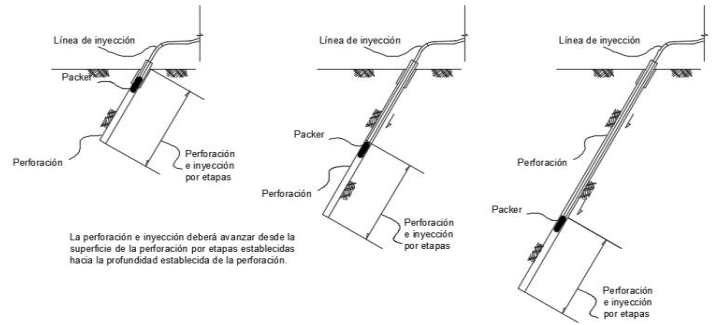


Figura 3.12. Método de inyección descendente. Adaptado de "Design Standards No. 13 Embankment Dams" de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

4. MATERIALES PARA LA INYECCIÓN

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

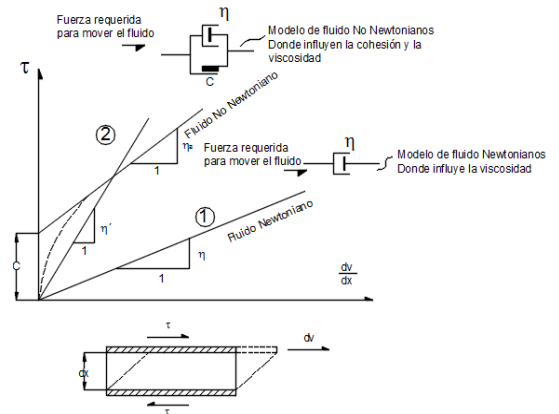


Figura 4.1. Modelos de fluidos Newtonianos (1) y fluidos No Newtonianos (2). Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

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 a base de cemento con bajas relaciones de A: C con aditivos estabilizadores y plastificantes.

Las mezclas 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 utilizar altas presiones de inyección sin tener pérdida de agua en la mezcla. Por lo tanto, este tipo de mezclas son las más utilizadas en los tratamientos con inyecciones. Estas mezclas se basan de diferentes ensayos realizados con diferentes relaciones de agua: cemento, como se muestra en la Figura 4.2.

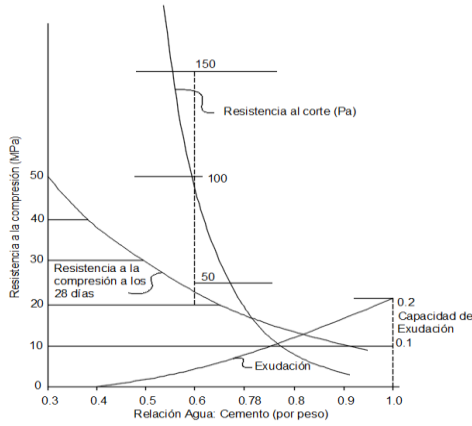


Figura 4.2. Efecto de las relaciones Agua: Cemento en las propiedades de la mezcla. Adaptado de “Dam foundation grouting”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

5. 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 las calidades de las mezclas de inyección antes del inicio de actividades y durante los tratamientos. (Véase Tabla 5.1).

Tabla 5.1. 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).

En la Fotografía 5.1, se muestra el ensayo de viscosidad utilizando el Cono de Marsh. Este ensayo es el ensayo más frecuente utilizado en campo, el cual verifica las propiedades de la mezcla antes de realizar el procedimiento de inyección en el macizo rocoso.



Fotografía 5.1. Cono de Marsh preparado para iniciar el ensayo de viscosidad. Fuente del autor.

6. 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 utilizar este tipo de mezcla es cambiar sus propiedades reológicas por medio de la adición de agua hasta obtener la relación de Agua: Cemento óptima para tratamiento. En la Figura 6.1, 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.

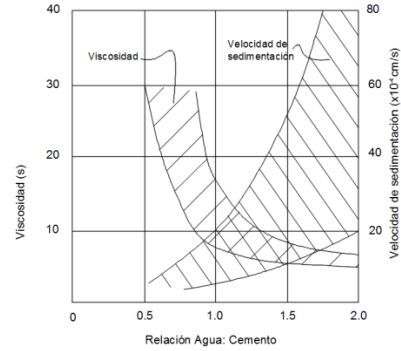


Figura 6.1. Viscosidad y velocidad de sedimentación en mezclas a base de cemento. Adaptado de “Dam foundation grouting”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

7. PRESIONES DE INYECCIÓN

Se requiere criterio ingenieril y experiencia en tratamientos con inyecciones, para escoger una apropiada tasa de presión de inyección según el tipo de macizo rocoso, para 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. En la Figura 7.1, se muestra una descripción gráfica de la presión efectiva en el sitio de inyección y sus pérdidas de energía durante el procedimiento.

Las presiones máximas permitidas para la inyección de mezclas sugeridas por Houlsby (1990), se detallan en la Figura 7.2. En esta figura se muestran las presiones en diferentes condiciones de la roca y profundidades de inyección.

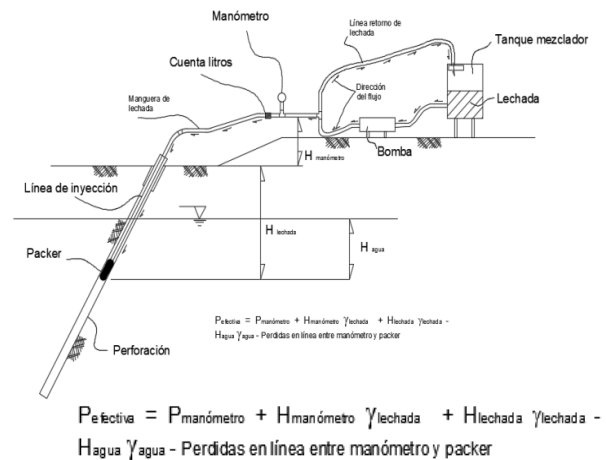


Figura 7.1. Estimación de presión efectiva en la etapa de inyección. Adaptado de “Design Standards No. 13 Embankment Dams” de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

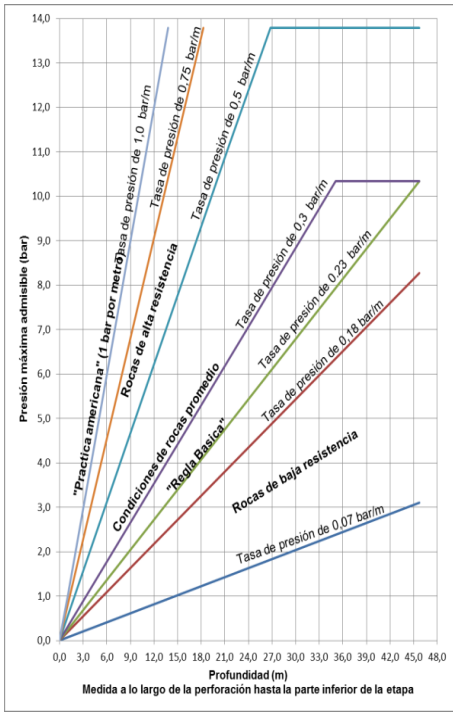


Figura 7.2. Gráficas de presión máxima permitida en diferentes condiciones de la roca y profundidad. En unidades de psi/pie y bar/m. Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houslyb, A.C. (1990).

8. EQUIPOS

Para los procedimientos de perforación e inyección se deben escoger los equipos apropiados según el tipo de macizo a tratar, para obtener un tratamiento efectivo.

8.1. PERFORACIÓN

Las perforaciones para los tratamientos con inyecciones pueden perforarse con métodos con broca de diamante y recobro o de rotoperación sin recobro. Esta última es más rápida y económica que la perforación con recobro, este método tiene resultados satisfactorios siempre y cuando se no se tengan altas desviaciones en la perforación. (Véase Fotografía 8.1).



Fotografía 8.1. Perforadoras de rotación y rotoperación. Fuente del autor.

8.2. EQUIPOS DE INYECCIÓN

Estos equipos se utilizan para mezclar y movilizar la mezcla de inyección al sitio donde se realizara 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 8.2. Planta estacionara de inyecciones. Fuente del autor.

9. PROCEDIMIENTOS DE INYECCIÓN

Los procedimientos de inyección pueden ser: método GIN (*Grouting Intensity Number*), que corresponde a la práctica europea y el método de engrosamiento sucesivo, que es la práctica americana.

En la Figura 9.1, 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 una gráfica de presión de inyección versus volumen inyectado.

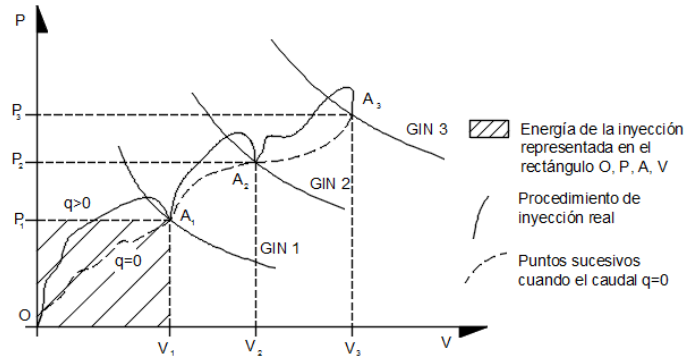


Figura 9.1. Procedimiento de inyección representado en una gráfica de presión versus volumen inyectado. Adaptado de "Grouting of rock masses" de Lombardi (2003).

En la Figura 9.2, se observa que la mezcla base (fluida), no alcanza la presión establecida de diseño, por lo tanto se engrosa la mezcla esperando incrementar la presión y así se alcanza la presión máxima establecida.

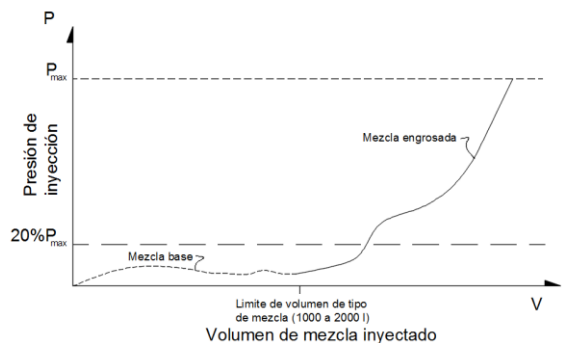


Figura 9.2. Engrosamiento de la mezcla alcanzando la presión máxima establecida. Elaboración del autor.

Estos métodos se diferencian en la forma como es inyectada la mezcla en el macizo, GIN inyecta una única mezcla estable a presiones altas y el método de engrosamiento sucesivo 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 9.3) de acuerdo a sus experiencias en diferentes tratamientos. Estableciendo los límites para terminar el procedimiento de inyección.

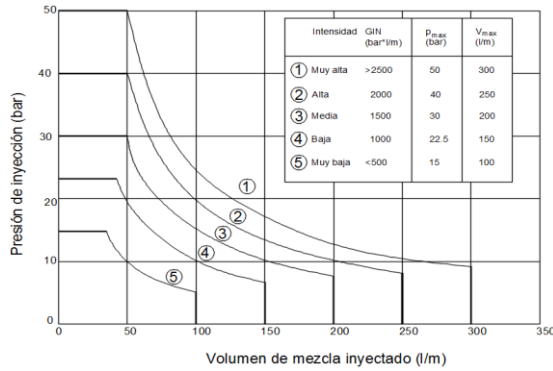


Figura 9.3. Curvas límites GIN, sirve de ayuda como guías iniciales de diseño. Adaptado de "Grouting of rock masses" de Lombardi (2003).

Los volúmenes de inyección en las inyecciones iniciales (primarias y secundarias) con el método de engrosamiento sucesivo son altos y van disminuyendo conforme se realizan inyecciones adicionales (terciarias y cuaternarias), para realizar un cierre adecuado del tratamiento. (Véase Figura 9.4).

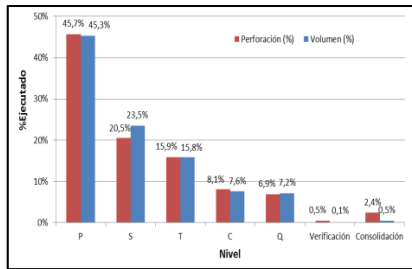


Figura 9.4. Proporción de inyecciones ejecutadas según el nivel de inyección. Elaboración del autor. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

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 algunos vacíos por llenar. (Véase Figura 9.5)

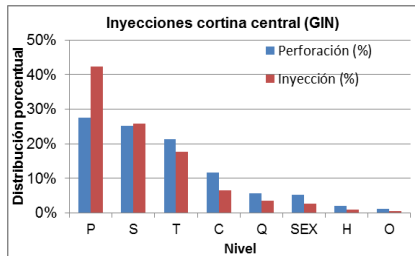


Figura 9.5. Proporción de inyecciones ejecutadas en la cortina central de la presa con el método GIN según el nivel de inyección. Adoptado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa". EPM, 2012.

10. PROGRAMAS DE CONSTRUCCIÓN DE CORTINAS DE INYECCIONES

10.1. PREPARACIÓN DEL TERRENO

Antes de iniciar los trabajos de perforación e inyección en el macizo rocoso, se debe 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. Facilitando el acceso al sitio para ejecutar adecuadamente la perforación y la inyección. (Véase Figura 10.1).

10.2. 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 a las particularidades de cada proyecto para obtener un efectivo tratamiento de inyecciones.

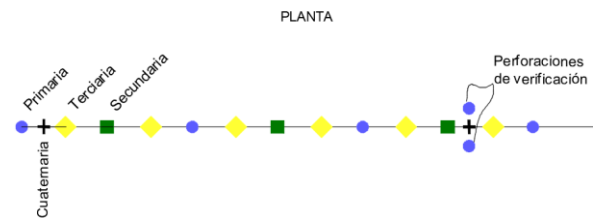
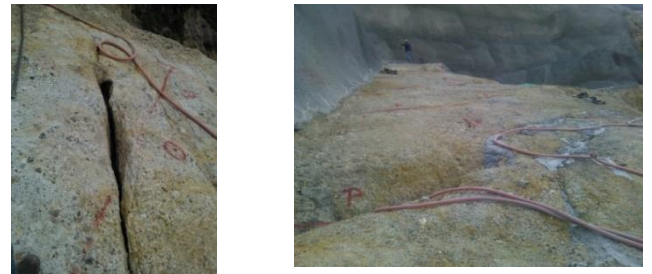


Figura 10.1. Secuencia de inyección en tratamientos con inyecciones. Fuente del autor.

10.3. 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 (3) veces el ancho de la zona de falla. (Véase Fotografía 10.1).



Fotografía 10.1. Cizallas tratadas con inyecciones desde superficie. Fuente del autor.

10.4. TRATAMIENTO DE ZONAS PARTICULARES

Cuando se presente flujos con presión artesiana, puede dificultar la inyección de la mezcla. (Véase Fotografía 10.2).



Fotografía 10.2. Resurgencias de agua en la perforación por efectos de la presión artesiana. Fuente del autor.

En caso de presentarse esta situación cuando realiza la perforación y tenga presencia de agua con presión, es dejar que el agua drene por el mayor tiempo posible e inyectar después. La inyección debe realizar 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, se puede 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 existe 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, tal como lo muestra la Figura 10.2.

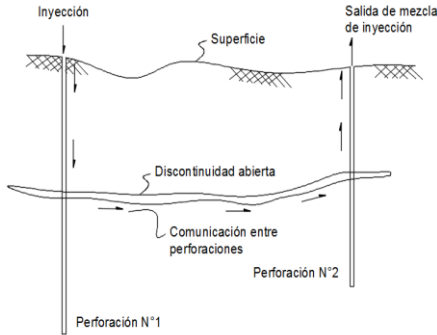


Figura 10.2. Representación esquemática de una conexión de mezcla entre perforaciones. Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

11. INSPECCIÓN Y SUPERVISIÓN DE LOS TRABAJOS DE PERFORACIÓN E INYECCIÓN

La inspección y supervisión de los proyectos con tratamientos con inyecciones en el mundo, se han realizado bajo la dirección del propietario del proyecto o de un consultor geotécnico del propietario. Mientras 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 realizar los trabajos de inyección de acuerdo a las prácticas tradicionales. (Véase Fotografía 11.1).



Fotografía 11.1. Inspector revisando los procedimientos de inyección. Fuente del autor

11.2. ENSAYOS EN CAMPO

De acuerdo a 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 al sitio de inyección. (Véase Fotografía 11.1).



Fotografía 11.2. Pruebas de campo para estimar la presión máxima cerca a la superficie. Fuente del autor.

12. 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 realiza al finalizar los procedimientos de inyección y las pruebas de permeabilidad. Siguiendo el criterio de permeabilidad (Figura 12.1), el criterio de tomas de inyección (Tabla 12.1), el criterio geológico (Figura 12.2), 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 13.3).

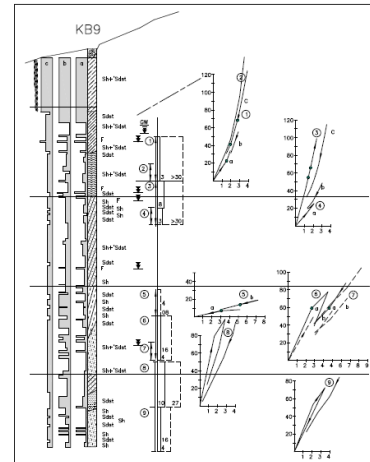


Figura 12.1. Perfil de permeabilidad. Adoptado de "Rock grouting with Emphasis on Dam sites" de Ewert F-K. (1985).

Tabla 12.1. 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". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

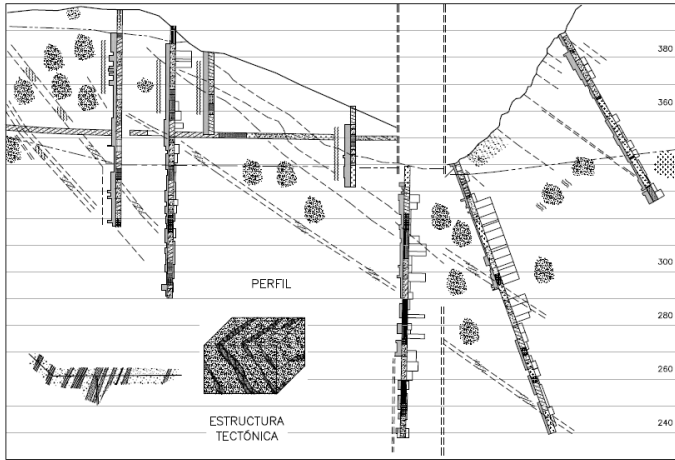


Figura 12.2. Perfil geológico. Adoptado de "Rock grouting with Emphasis on Dam sites" de Ewert F-K. (1985).

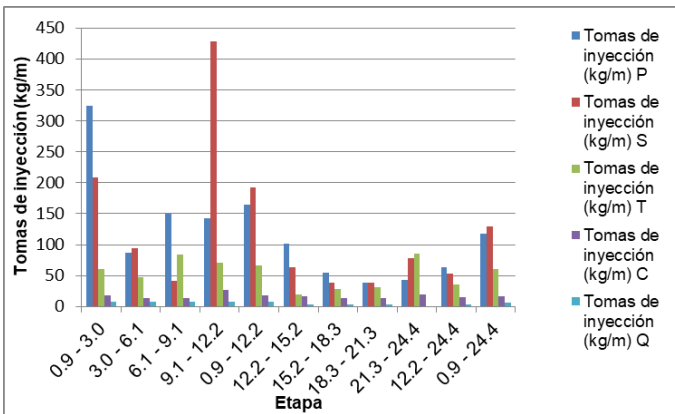


Figura 12.3. Ejemplo de histograma para diferentes tomas de inyección. Elaboración del autor.

13. CASOS HISTÓRICOS

A continuación se, se presentan casos históricos (de forma informativa) donde se aplican exitosamente los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos.

13.1. CENTRAL HIDROELÉCTRICA EL QUIMBO

La central Hidroeléctrica El Quimbo (CHEQ), se encuentra localizado al sur del departamento del Huila, sobre 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 presa con una altura de 151 m y del tipo CFRD fundada sobre rocas de la formación Gualanday Superior (Tgs) del terciario.



Fotografía 13.1. Presa CFRD y obras en el estribo derecho CHEQ. Fuente del autor.

En la Figura 13.1, se observa la distribución de las inyecciones realizadas en la CHEQ en el perímetro de la fundación de la presa 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 presa y del dique auxiliar. Con dicho tratamiento se buscó reducir la permeabilidad de la masa de roca y reducir el gradiente hidráulico hacia aguas abajo del eje de la presa y 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.

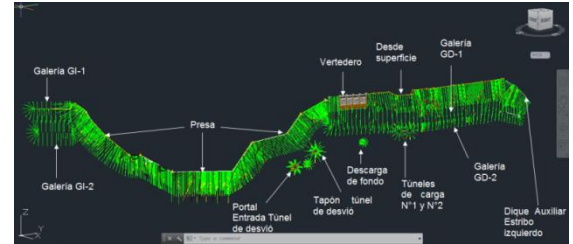


Figura 13.1. Vista isométrica de la distribución del tratamiento con inyecciones en CHEQ. Elaboración del autor. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

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 (1) sacos 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 (1) saco por metro. También se solicitaron, tratamientos dirigidos para tratar sitios con particularidades geológicas, como fueron 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 aproximadamente 40.120 sacos de cemento de 50 kg. En la Figura 13.2, se muestra la distribución de las cantidades del tratamiento, según los niveles de perforaciones a espacio dividido.

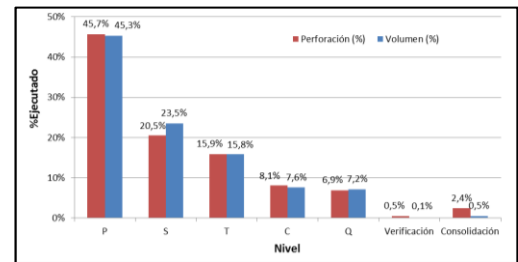


Figura 13.2. Proporción de inyecciones ejecutadas según el nivel de inyección. P: Primarias; S: Secundarias; T: Terciarias; C: Cuaternarias y Q: Quinarias. Elaboración del autor. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

De 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 quedades en una primera fase. También, 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 para el tratamiento en el macizo rocoso, una toma promedio de 0.57 sacos/m.

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 de forma grafica. Los límites fueron: 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 a 4 sacos/m (color rojo). En la Figura 13.3, se detalla la totalidad de las cantidades de perforación e inyección distribuidas en límites de tomas de inyección.

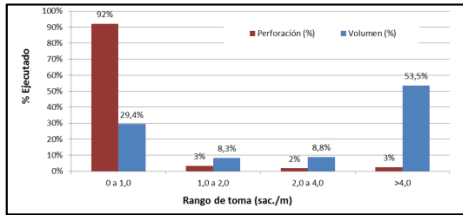


Figura 13.3. Proporción de tomas de inyección del tratamiento. Fuente del autor.

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 solo 3% de la totalidad de perforación. Mientras que el resto las tomas (bajas, medias y altas) se perforo 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.

13.2. 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 presa Porce III, que tiene 148 m de altura y es del tipo CFRD, la presa 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 13.2. Presa CFRD Porce III. Tomado de "Descripción de obras Porce III". EPM, 2019.

El tratamiento con inyecciones para la fundación de la presa principal en cara de concreto, en sus estribos derecho e izquierdo y en la zona central del valle del río Porce, 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 13.4, se observa la distribución de los tratamientos realizados en la presa, 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 presa, fue el llenado de las discontinuidades abiertas, cizallas, zonas de falla u otras particularidades geológicas encontradas durante construcción de la presa. Igualmente, se deseaba reducir el gradiente hidráulico creado por el embalse durante operación hacia aguas abajo del eje de presa.

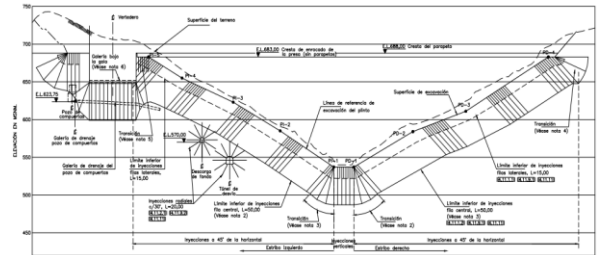


Figura 13.4. Sección por el eje del plinto de la Presa CFRD Porce III, detallando los tratamientos con inyecciones. Tomado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa". EPM, 2012

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

Para cumplir con el cierre del tratamiento en la presa, se perforaron aproximadamente 40.100 m y se inyectaron aproximadamente 34.000 sacos de cemento de 50 kg. Este tratamiento se dividió en dos partes: la primera en la cortina central que fue inyectada 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 en las siguientes figuras:

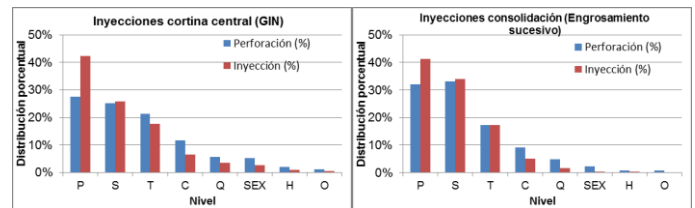


Figura 13.5. Proporción de inyecciones ejecutadas en la cortina central de la presa con el método GIN y método de engrosamiento sucesivo según el nivel de inyección. Adoptado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa". EPM, 2012

De las gráficas anteriores se observa en primera fase, que el cierre llego 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 ambas graficas se observa la disminución gradual de cantidades conforme aumenta el nivel de perforaciones a espacio dividido.

Con el método de engrosamiento sucesivo en las inyecciones de consolidación se observan mayores cantidades de

perforación e inyección en los primeros niveles (Primarios y secundarios), mientras que las inyecciones de la cortina central con el método GIN se observan 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 habían esquistos grafitosos muy fracturados, que tomaron la mayoría del volumen de inyección, llenando 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 presa 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.

13.3. CENTRAL HIDROELÉCTRICA EL GUAVIO (TÚNEL DE FUGA)

La Central Hidroeléctrica El Guavio, se encuentra ubicada en la provincia del 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 Guavio. Este túnel se excavó en rocas sedimentarias de la Formación Fomeque (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.

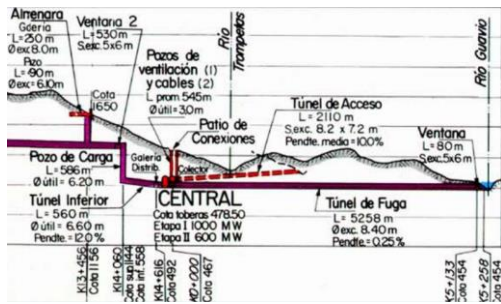


Figura 13.6. Perfil del túnel de fuga. Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

Debido a que la excavación del túnel de fuga, presento 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.



Fotografía 13.3. Flujos y avalanchas de material hacia la excavación en el túnel de fuga. Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

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.

Para identificar el estrato de arenisca friable (Rockflour) que genero las avalanchas, se realizaron una serie de investigaciones geotécnicas con perforaciones en abanico hacia adelante. Estas 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.

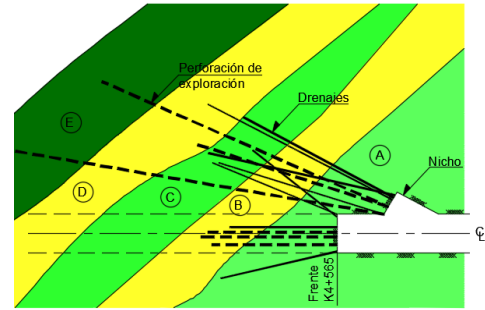


Figura 13.7. Planta túnel de fuga en sector donde se realizaron perforaciones de exploración y drenajes. (A) Arenisca cementada; (B) Arenisca friable; (C) Arenisca cementada; (D) Arenisca friable y (E) limolitas y lutitas. Adoptado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 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 cohesión que en su estado natural no tenía (EEEB, 1989).

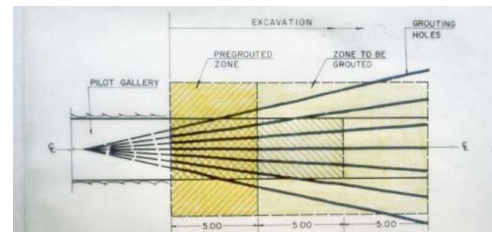


Figura 13.8. Planta con el esquema de inyecciones desde el frente de excavación de la galería piloto. Adoptado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

Con 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 con la excavación a sección completa del túnel de fuga.

14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Un tratamiento efectivo con inyecciones se realiza cuando, se tiene un conocimiento completo de las condiciones geológicas y geotécnicas, estas condiciones afectaran el proceso de inyección y su programación durante construcción.
- Una de las consideraciones geológicas principales a tener 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.
- Dentro 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 reducir 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 realizan inyecciones químicas, 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 se pueden seguir los criterios de diseño sugeridos por varios autores como Houlby (1990), Weaver y Bruce (2007), Bruce (2017), Wilson y 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 los Estados Unidos (USACE, 2017), la Sociedad American 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 estado 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 aquellas 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 con 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, mejorar la resistencia de la mezcla endurecida, mejorar la permeabilidad de la mezcla, mejorar la bombeabilidad y mejorar 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 uso de arenas en la mezclas para inyecciones no se utiliza por que 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 le pueden adicionar aditivos para modificar sus propiedades, como acelerantes, aditivos de control de consistencia, retardantes, plastificantes, inhibidores y agentes estabilizantes.
- Cuando las condiciones particulares geológicas del macizo rocoso o por 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 a 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 que es inyectada la mezcla, el GIN inyecta una única 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 establece un límite de presión de inyección para evitar el fracturamiento del macizo. Mientras que el método GIN puede alcanzar presiones más altas generando posiblemente 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 realizar 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 y/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. Las mezclas utilizadas en casos son 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 requieren un criterio ingenieril y 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. Observando 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 realizadas 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 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.

15. REFERENCIAS

- [1] American Petroleum Institute – API (2005). *API 10. Specifications for Materials and Testing for Well Cements*. Estados Unidos.
- [2] American Petroleum Institute – API (2009). *API RP 13B-1. Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids*. Estados Unidos.
- [3] ASTM (2014). *D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [4] ASTM (2015). *C143/C143M-15a, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] ASTM (2016c). *C260/C260M-10a. Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ASTM (2017b). *C494/C494M-17. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [11] ASTM (2018a). *C94/C94M-18. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.

- [12] 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.
- [13] ASTM (2018c). *C150/C150M-18, Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [14] ASTM (2018d). *C595 / C595M-18, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [15] ASTM (2018e). *C989/C989M-18a. Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [16] ASTM (2018f) *C33/C33M-18. Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [17] Baker, Wallace Hayward (1982). *Grouting in Geotechnical Engineering*. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
- [18] Barton, N. y Quadros (1997). *Joint aperture and roughness, flow and groutability*. New York.
- [19] Barton, N (2002). *Rock Joint Sealing Experiments Using Ultra Fine Cement Grout*. North American Tunnelling.
- [20] Barton, N. (2004a). *The why's and how's of high pressure grouting - Part 1*. TTI p28-30 parte I.
- [21] Barton, N. (2004b). *The theory behind high pressure grouting- Part 2*. TTI p28-30 parte II.
- [22] Bruce, D.A., D.M. Heenan, y D.B. Wilson. (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.
- [23] Bruce, D.A. (2007). *Pregrouting for Tunnels in Rock: The Case for New Thinking*. New Peaks in Geotechnics. ASCE.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams*. Departamento del interior de los Estados Unidos de America.
- [27] 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. Pag. 917–928.
- [28] Carter, T. (2012). *Improved Methods of Design for Grouting Fractured Rock*. Grouting and Deep Mixing 2012. ASCE.
- [29] 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. Pag. 389–403.
- [30] Deere, D. U., and Lombardi, G. (1985). Grout Slurries—Thick or Thin?" In *Issues in Dam Grouting*, Edited by W. H. Baker, ASCE, New York, 156–164.
- [31] Departments of the army and the air force. (1970). *Grouting methods and equipment*. Technical manual No. 5-818-6; Air force manual No. 88-32.
- [32] Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá. (1989). *Proyecto Hidroeléctrico del Guavio. Túnel de Fuga. Reporte de tratamiento de inyecciones*. Bogotá.
- [33] Empresas Públicas de Medellín (2012). *Informe final de consolidación e impermeabilización de la Presa*. Asesoría Porce III. Medellín, Antioquia.
- [34] Empresas Públicas de Medellín (2019). *Descripción de las obras construcción de la presa 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.
- [35] Ewert F-K. (1985). *Rock grouting with Emphasis on Dam sites*. Springer-Verlag: Berlín.
- [36] Ewert F-K. (1996). *The GIN-Principle – helpful method for rock grouting? Part 1 – Part 2*. International Water Power & Dam Constrution. Febrero 1996.
- [37] Ewert F-K. (1997). *The GIN-Principle revisited*. International Water Power & Dam Constrution. Octubre 1997, pp 33-36.
- [38] F. G. Bell. (2007). *Engineering Geology*. Reino Unido: Editorial Elsevier Ltd.
- [39] F.G.H. Blyth y M.H. de Freitas. (1984). *A Geology for Engineers*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Seventh Edition, pp 111-127.
- [40] Fetter, C. (1988). *Applied hydrogeology*. Nueva York: McMillan Publishing Company.
- [41] Gutiérrez, Ramiro. (Enero-Mayo, 2016). *Curso de mecánica de rocas*. Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá.
- [42] Gutiérrez, Ramiro. (Agosto-Diciembre, 2017). *Curso de ingeniería de rocas*. Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá.
- [43] H. Stille (2015). *Rock Grouting – Theories and Applications*. Stockholm.
- [44] Harrinson, Donald M. (2013). *The Grouting Handbook. A Step-by-Step Guide for Foundation Design and Machinery Installation*. Elsevier Inc
- [45] Henn, Raymond W. (1996). *Practical guide of Grouting of underground structures*. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
- [46] Houlsby, A. C. (1976). *Routine interpretation of the lugeon water-test*. Engng Geol. Vol 9 1976 pp. 303-313.

- [47] Houslsby, A. C. (1990). *Construction and Design of Cement Grouting*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [48] INGETEC (2009). *Informe de diseño geotécnico Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo*. Bogotá, Colombia.
- [49] INGETEC (2014). *Comentarios de obra construida del Proyecto Hidroeléctrica El Quimbo*. Asesoría Técnica en obra. Gigante, Huila.
- [50] International Society for Rock Mechanics (1995). *Final report of the commission on rock grouting*. Portugal: ISRM
- [51] Lugeon, M. (1933). *Barrages et Geologie Dunod*, Paris.
- [52] 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 No. 120, 164–197.
- [53] Lombardi, G., and Deere, D. (1993). *Grouting Design and Control Using the GIN Principle*. *Intl. Water Power and Dam Constr.* 45(6), June, 15–22.
- [54] Marulanda, C. (2015). *Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos*. Diplomado de Túneles en suelo y Roca. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.
- [55] Nonveiller, E. (1989). *Grouting Theory and Practice*. Amsterdam, Holanda: Elsevier,
- [56] Quiñones, Camilo. (2010). *Lugeon test interpretation, revisited*. Collaborative Management of Integrated Watersheds. 30th Annual USSD Conference. Sacramento, California, Abril 12-16, 2010.
- [57] Ritchie, D. G.; Garcia, J. P.; Amaya, F.; y Jefferies, M. G. (2003). *Curtain Grouting for the Antamina Dam, Peru: Part 2—Implementation and Field Modifications*. ASCE, *Grouting and Ground Treatment*. Pag. 929–940
- [58] Singhal, B.B.S y Gupta, R.P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Nueva York: Springer.
- [59] U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *Engineering and Design chemical grouting*. Manual No. 1110-1-3500.
- [60] U.S. Army Corps of Engineers. (1997). *Engineering and Design tunnels and shafts in rock*. Manual No. 1110-2-2901
- [61] U.S. Army Corps of Engineers. (2017). *Engineering and Design grouting technology*. Manual No. 1110-2-3506.
- [62] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014). *Design Standards No. 13. Embankment Dams Chapter 15: Foundation Grouting*. DS-13(15)-1: Phase 4 Final.
- [63] Warner, James. (2004). *Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures*. John Wiley & Sons, Inc.
- [64] Weave, Kenneth. y D. Bruce D. A. (2007). *Dam Foundation Grouting*. ASCE.
- [65] Wilson, D. B., y Dreese, T. L. (1998). *Grouting Technologies for Dam Foundations*. Acta de la conferencia anual de Association of State Dam Safety Officials. Las Vegas, Nevada.
- [66] Wyllie, Duncan C. (2005). *Foundations On Rock*. Nueva York: Taylor & Francis e-Library.