

Procedimiento SAM-PR-21

Procedimiento:	Procedimiento de inyecciones de pre y post-excavación			
Versión:	Preparado por:	Revisado por:	Aprobado por:	Fecha:
A	OA/BS			05-08-2015
B	BS	SM/UG	KG	18-11-2015
C	AT	AC	JV	13-05-2017
D	AT/JM	HLS	CG	30-01-2018
E	AT	HLS	CG	22-03-2018

Tabla de contenidos

1.	Descripción	2
2.	Objetivo de las inyecciones	2
3.	Metodologías de inyección	3
4.	Antecedentes para la definición de las inyecciones	3
5.	Criterios técnicos para la definición de las inyecciones	4
6.	Metodología de inyección y aplicación de otras medidas, umbrales de activación	5
6.1.	Criterios técnicos para excavaciones mediante TBM	5
6.1.1	Pre-grouting.....	7
6.1.2	Post-grouting	8
6.2.	Criterios técnicos para excavaciones mediante Drill & Blast	9
6.1.3	Pre-grouting.....	11
6.1.4	Post-grouting	12
7.	Registros de aplicación de medidas de control de afloramiento	13
8.	Modificaciones y cambios en el procedimiento	14

1. Descripción

Este documento muestra el procedimiento general y las directrices técnicas de las herramientas utilizadas en el proyecto, para el control de ingreso de agua en los túneles, así como para los trabajos de consolidación del macizo rocoso.

Los trabajos para el control de ingreso de agua y consolidación del macizo rocoso, ejecutados por el contratista, contemplan principalmente la inyección de lechadas de cemento y/o productos químicos durante la excavación de las obras. Adicionalmente, en función de los diferentes rangos de afloramiento se determinará el uso de medidas alternativas para el control de afloramiento, tal como el uso de revestimientos en base a concreto o acero.

Las especificaciones técnicas del diseño y los productos utilizados para el control de ingreso de agua y consolidaciones, varían en base al tipo de tecnología utilizada en la excavación, la que puede ser mediante Máquina Tuneladora (TBM) o excavación tradicional con perforación y tronadura, esta última también conocida como Drill & Blast (D&B). Además, la definición del diseño y productos están sujetas a diferentes criterios tanto para campañas de inyección de pre-excavación (pre-grouting) y de post-excavación (spot y post-grouting).

Los trabajos de inyección, su definición e instructivos seguirán las indicaciones o lineamientos establecidos en los siguientes documentos:

- i. EIA, Anexo 45, Hidrogeología de las Obras Subterráneas.
- ii. ENV-PCD-013, Manejo de Contingencia por Superación de Capacidad del Sistema de Tratamiento de Aguas de Afloramiento.
- iii. "Update GW inflow assessment for water tunnels", SAM-EM-0156-A, Enero 2018
- iv. Instrucciones para inyecciones del Contratista
- v. Procedimiento de Pre-Grouting para TBM del Contratista PCD-TBM-009.
- vi. El presente documento.

2. Objetivo de las inyecciones

Las secciones de túneles intervenidas mediante inyecciones tienen por objeto modificar las propiedades locales del macizo rocoso tanto mecánicas como de conductividad hidrogeológica en el contorno de los túneles, las cuales se indican a continuación:

a) *Reducción de Ingreso de Agua en los Túneles*

Los métodos de inyección utilizados para reducir el ingreso de agua en los túneles se basan en la reducción de la permeabilidad que posee el macizo rocoso, mediante las técnicas grouting de pre-excavación y de post-excavación. Ambas técnicas pueden ejecutarse usando productos químicos o lechadas cementicias.

b) Consolidación

Los métodos utilizados para realizar consolidaciones se basan en la modificación y mejora de las propiedades mecánicas, mediante las técnicas de grouting de pre-excavación, grouting de contacto, relleno de oquedades e inyecciones. Cada una de éstas técnicas puede ser ejecutada usando productos químicos o lechadas cementicias.

Para los efectos de este reporte se entenderá que “grouting” corresponde al método de inyecciones a presión en el macizo rocoso, con el objetivo de disminuir la conductividad hidráulica y mejorar sus propiedades mecánicas.

3. Metodologías de inyección

Las metodologías de inyección dependerán de las condiciones geológicas y técnicas particulares para su aplicación, las mismas pueden ser agrupadas en tres tipos: pre-grouting, post-grouting y spot-grouting, cuyas características se pueden describir como sigue:

a) Pre-grouting

El método de inyección de pre-grouting es utilizado para reducir la alta permeabilidad y afloramientos de agua a fin de mejorar las condiciones del macizo rocoso previo a la excavación. Además de reducir la afluencia de agua al túnel, el pre-grouting también se aplica para mejorar la estabilidad general de macizo rocoso.

b) Post-grouting

El método de inyección de post-grouting se realiza en secciones ya excavadas y se aplica en caso de ser necesario el control de agua detrás de la frente para efectos de reducir los niveles de afloramiento y continuar con los trabajos de excavación.

El post-grouting se puede considerar como una medida de apoyo al pre-grouting o como una medida independiente en función de las condiciones geológicas y niveles de afloramiento o condiciones de estabilidad del macizo rocoso.

c) Spot-grouting

Ya sea como herramienta complementaria del pre-grouting o del post-grouting o como medida independiente de control, tiene por objetivo controlar afloramientos puntuales del macizo rocoso.

4. Antecedentes para la definición de las inyecciones

En base a lo descrito en el presente documento, en lo específico, el Contratista elaborará los instructivos de inyecciones a ejecutar según los siguientes antecedentes:

- i. Condiciones geológicas locales en la sección del túnel.
- ii. Flujo de agua esperado en la zona no excavada.
- iii. Presión de agua aflorada que se encuentra en la zona no excavada.
- iv. Flujo de agua existente en la zona excavada y su evolución en el tiempo.

- v. Capacidad disponible de las plantas de tratamiento de aguas.
- vi. Umbral de alerta antes del surgimiento de descarga de contingencia, conforme a lo indicado en el procedimiento ENV-PCD-013, Manejo de Contingencia por Superación de Capacidad del Sistema de Tratamiento de Aguas de Afloramiento
- vii. Descarga de contingencia por superación de capacidad de tratamiento.

Los antecedentes mencionados se recopilarán o determinarán según los siguientes puntos:

- a) **Sondajes exploratorios:** La realización de sondajes exploratorios de manera sistemática, permitirá estimar cuál es el caudal de agua y presión localmente detectado en la zona no excavada por delante de las frentes de avance. Los criterios para su especificación y cantidad se apoyarán en la geología detectada, las proyecciones geológicas, condiciones operacionales y los mapeos geológicos específicos de los frentes de excavación. Podrán corresponder a perforaciones de longitud, número y ubicación variables en base a la condiciones de las frentes. Típicamente entre uno y tres sondajes.

De este modo los sondajes exploratorios constituyen la fuente de información para determinar los antecedentes i, ii, y iii del listado anterior.

- b) **Mapeo de aguas al interior de los túneles:** De forma regular, el Contratista realizará caminatas al interior de los túneles, con el fin de establecer el estado de las zonas que presentan afloramientos. Estos mapeos permitirán establecer la necesidad de inyecciones de post-excavación y las técnicas a aplicar.

De este modo los mapeos de aguas al interior de los túneles serán la fuente de información para determinar el antecedente iv del listado anterior.

- c) **Procedimiento de contingencia:** En este documento se establece la información y definiciones relacionadas con los antecedentes v, vi y vii del listado anterior para cada frente de trabajo del Proyecto.

5. Criterios técnicos para la definición de las inyecciones

Los criterios para la definición de las acciones son los siguientes:

- a) *Criterio Operacional*
Este considera los umbrales de afloramiento compatibles con el avance de la excavación de forma segura para los trabajadores, equipos y estabilidad del túnel respectivo.
- b) *Criterio de Capacidad Disponible de Tratamiento*
Considera la capacidad instalada de tratamiento en cada frente y los caudales disponibles de tratamiento específicos, al momento de definir las inyecciones y metodologías a aplicar. Esto considerando la definición de los umbrales de alerta y

contingencia establecidos en el documento ENV-PCD-013.

Estos criterios aplicados sobre los antecedentes descritos en la sección anterior, serán utilizados por el Contratista para la elaboración de los instructivos de inyección por frente de trabajo.

6. Metodología de inyección y aplicación de otras medidas, umbrales de activación

La metodología de inyección a utilizar para el control de ingreso de agua o consolidación estructural difiere para los túneles excavados mediante TBM y para Drill & Blast, detallando a continuación las características técnicas para cada tipo de excavación.

6.1. Criterios técnicos para excavaciones mediante TBM

Los diferentes niveles de actuación para medidas operacionales y de aplicación de grouting se han definido tomando en consideración los límites de caudales WL1 y WL2 del Anexo 45, junto con los límites establecidos en el documento ENV-PCD-013.

Adicional y específicamente para los túneles excavados mediante TBM, las medidas de control se activarán según los resultados obtenidos de sondajes exploratorios, la capacidad libre de las plantas de tratamiento, mapeos de agua al interior de los túneles y condiciones operacionales de la TBM, según los siguientes niveles (figura 1):

- 1. Nivel 1:** Si los STI poseen una capacidad de operación normal según ENV-PCD-013, se activará pre-grouting, cuando los sondajes exploratorios revelan un caudal de agua mayor a 8.0 l/s. En caso que el caudal de agua posea una presión mayor a 8 Bar, el umbral de activación será de 5.0 l/s. De encontrarse zonas de agua en el área excavada, se recurrirá a la evaluación mediante los mapeos de agua, activándose pre-grouting en secciones a lo largo del túnel.
- 2. Nivel 2 (Alerta):** Si se declara Alerta según ENV-PCD-013 y durante el período que en dicho documento se indica, se activará pre-grouting, cuando los sondajes exploratorios revelan un caudal de agua mayor a 5.0 l/s. Si el agua posee una presión mayor a 8 Bar, el caudal de activación será de 2.5 l/s. En caso de encontrarse zonas de agua en el área ya excavada, se recurrirá a la evaluación mediante los mapeos de agua, activándose post-grouting en secciones a lo largo del túnel.
- 3. Nivel 3:**
 - a)** Si se declara Contingencia según ENV-PCD-013 y durante el período que en dicho documento se indica, se suspenderán las actividades de excavación al interior del túnel y se activará pregrouting sin la evaluación de sondajes exploratorios. De manera complementaria, se realizará postgrouting en las zonas con afloramientos presentes a lo largo del túnel. Dadas las restricciones geométricas de la máquina tuneladora, es posible que se realicen avances controlados para poder acceder a las zonas que necesitan tratamiento por inyección.
 - b)** Habiéndose cumplido el período definido para el Nivel 3 en a), sin lograr controlar

la situación, en base al nivel de fracturamiento o calidad del macizo y de afloramiento específicas, se considerará la aplicación de revestimiento de concreto normal o armado e inyecciones de consolidación entre la roca y el concreto. En casos especiales se considerará la aplicación de revestimiento de concreto con membrana impermeable; y en casos extremos, la membrana podría reemplazarse por revestimiento de acero.

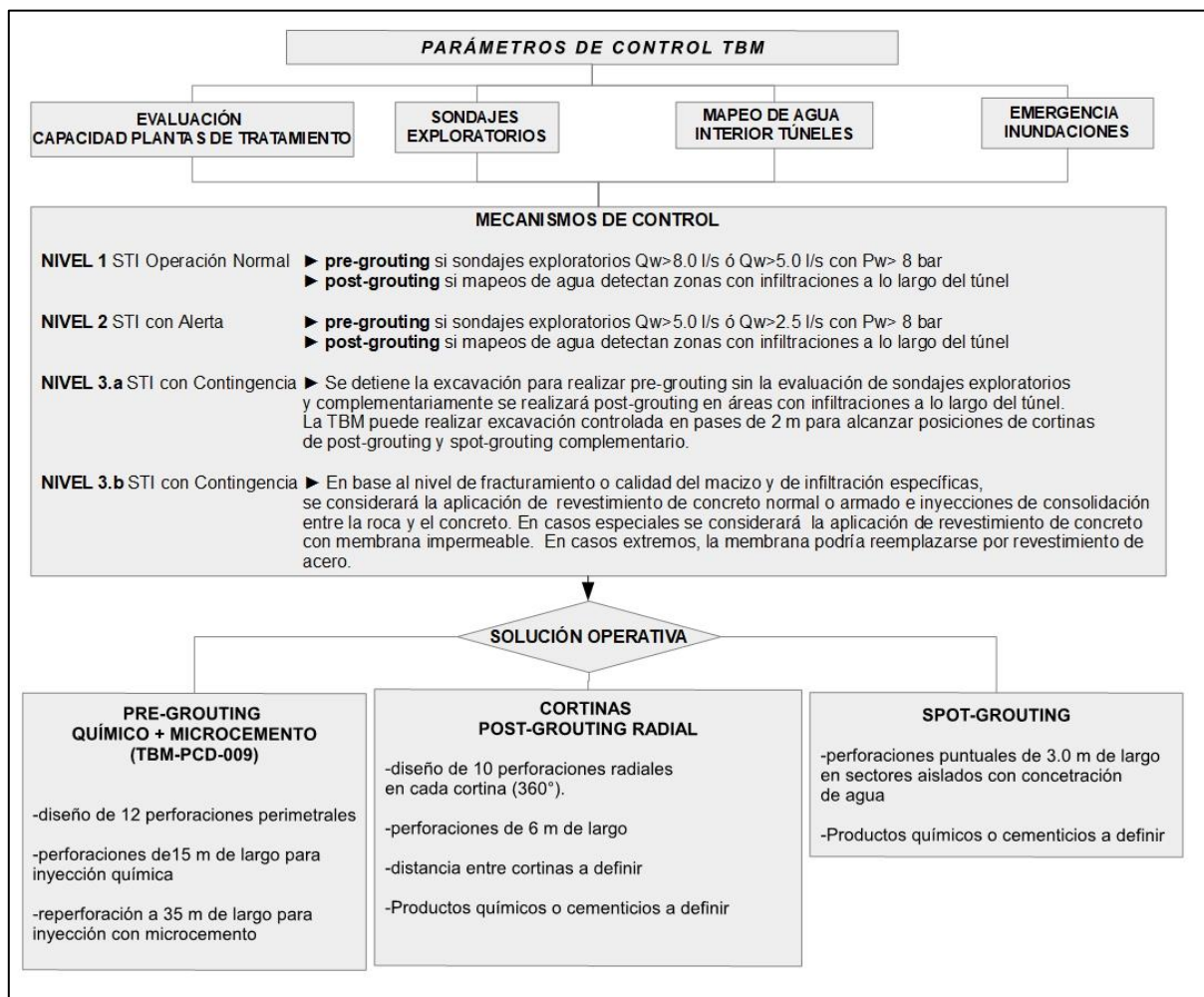


Figura 1: Flujograma de parámetros de control y soluciones operativas de grouting para túneles excavados mediante TBM.

Las técnicas de grouting en máquinas tuneladoras se adaptarán a su geometría y tomarán en cuenta las restricciones propias que poseen las máquinas en términos de espacio y equipamiento. Se considera utilizar la totalidad de los elementos de perforación disponibles a lo largo de la máquina y también los espacios disponibles para posicionar el equipamiento de grouting.

6.1.1 Pre-grouting

Corresponde al método que tiene por objetivo realizar inyecciones mediante perforaciones proyectadas hacia la zona no excavada por delante de la TBM, creando una cortina periférica alrededor del contorno de la proyección de la excavación.

Las directrices técnicas a utilizar son las referidas en el documento TBM-PCD-009 del Contratista, el cual considera realizar dos etapas de inyección. Una primera etapa de grouting químico, seguido de una segunda etapa de grouting con cemento o micro-cemento (figura 2).

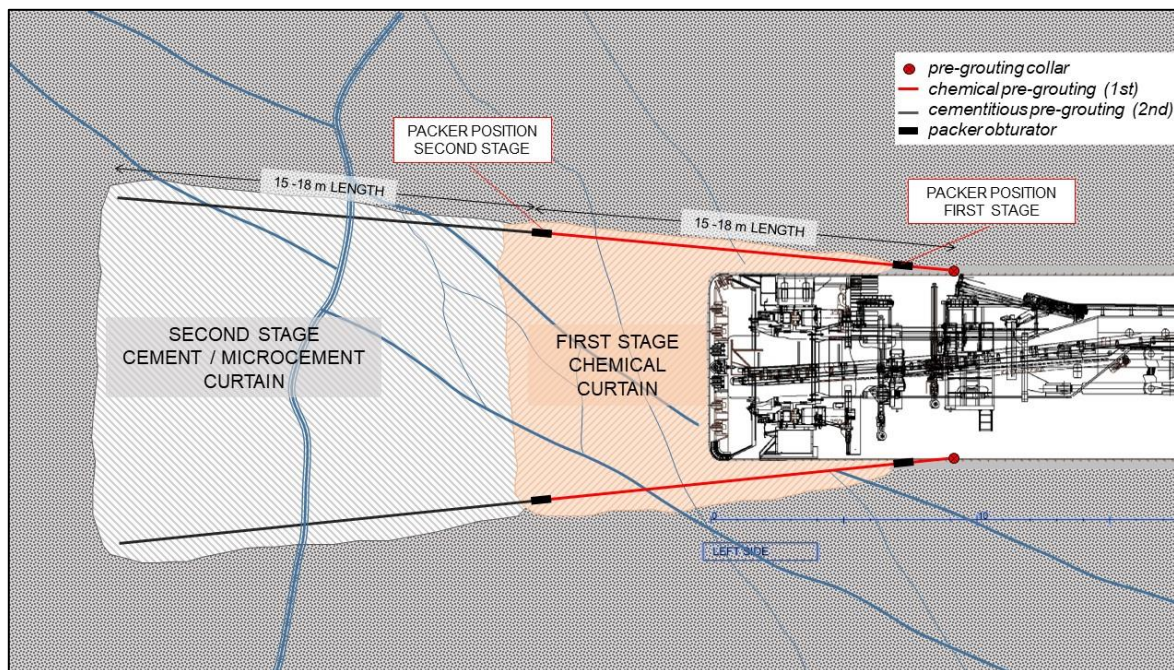


Figura 2: Esquema general de grouting de pre-excavación en dos etapas para TBM.

Los productos químicos, a utilizar en la etapa 1, corresponden a espumas expansivas y/o resinas, según se defina en sitio dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

Los productos basados en cemento, a utilizar en la etapa 2, corresponden a Cemento Portland Normal o Micro-cemento, según se defina en sitio dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

Un ejemplo de patrón de perforaciones para la generación de la cortina de pre-excavación se muestra en figura 3 y se puede adaptar dependiendo del tamaño de la excavación y de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

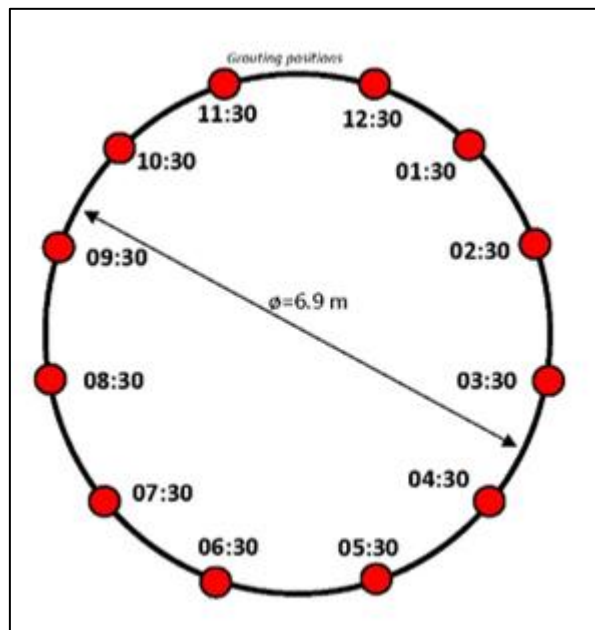


Figura 3: Ejemplo de patrón de diseño de grouting de pre-excavación para TBM.

6.1.2 Post-grouting

Las medidas de control en la zona excavada se definen como post-grouting e incluyen técnicas para el tratamiento específico de zonas con concentración de afloramientos de agua. A modo de ejemplo:

1. *Post-grouting en cortinas radiales (figura 4):* Corresponde a la ejecución de perforaciones perpendiculares a la periferia de los túneles, con el objetivo de realizar cortinas radiales de inyección. Esta medida de control se puede tomar como complemento de las campañas de pre-excavación o se puede ejecutar de manera independiente. En el caso, que las zonas a tratar se encuentren fuera del alcance del equipamiento de perforación, es posible realizar avances de ajuste con la TBM.

Dependiendo de la capacidad operativa de los STI y los resultados de los mapeos de agua, se definirá la distancia entre las cortinas y el tipo de producto a utilizar, como sigue:

- *En Nivel 1:* Realización de post-grouting si los mapeos de agua encuentran zonas con concentraciones mayores a 3.0 l/s. La distancia entre las cortinas se definirá en sitio dependiendo de las condiciones encontradas. Se utilizarán productos químicos y/o cementicios.
- *En Nivel 2 (Alerta):* Si se declara “Alerta”, se realizará post-grouting si los mapeos de agua encuentran zonas con concentraciones mayores a 1.0 l/s. La distancia entre las cortinas se definirá en sitio dependiendo de las condiciones encontradas. Se utilizarán productos químicos y/o cementicios.

- *En Nivel 3 (Contingencia):* Si se declara “Contingencia”, se realizará post-grouting sistemático en todas las zonas L1, L2 y L3. La distancia entre las cortinas se definirá en sitio dependiendo de las condiciones encontradas. Se utilizarán productos químicos y/o cementicios.
2. *Spot-grouting (figura 4):* Corresponde a la ejecución de perforaciones específicas directas en puntos de afloramiento de agua. Esta medida es complementaria a la realización de campañas de pre-excavación y de post-excavación. Se utilizarán productos químicos y/o cemento dependiendo de los caudales y presiones encontrados.

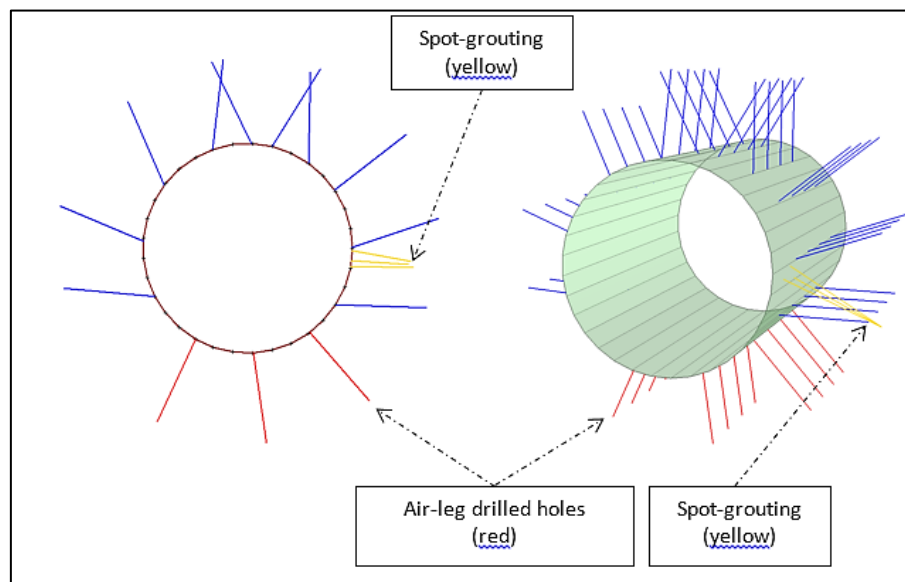


Figura 4: Ejemplo de patrón de diseño de grouting de post-excavación y spot-grouting complementario para TBM

6.2. Criterios técnicos para excavaciones mediante Drill & Blast

Los diferentes niveles de actuación para medidas operacionales y de aplicación de grouting se han definido tomando en consideración los límites de caudales WL1 y WL2 del Anexo 45, junto con los límites establecidos en el documento ENV-PCD-013.

En los túneles excavados mediante Drill & Blast, las medidas de control se activarán según los resultados obtenidos de sondajes exploratorios, la capacidad libre de las plantas de tratamiento, mapeos de agua al interior de los túneles y condiciones operacionales, según los siguientes niveles:

1. **Nivel 1:** Si los STI poseen una capacidad de operación normal según ENV-PCD-013, se activará pre-grouting, cuando los sondajes exploratorios revelan un caudal de agua mayor a 5.0 l/s. En caso que el caudal de agua posea una presión mayor a 8 Bar, el umbral de activación será de 2.5 l/s. De encontrarse zonas de agua en el área excavada, se recurrirá a la evaluación mediante los mapeos de agua, activándose post-grouting en áreas a lo largo del túnel.

2. Nivel 2 (Alerta): Si se declara Alerta según ENV-PCD-013 y durante el período que en dicho documento se indica, se activará pre-grouting, cuando los sondajes exploratorios revelan un caudal de agua mayor a 4.0 l/s. Si el agua posee una presión mayor a 8 Bar, el caudal de activación será de 1.5 l/s. En caso de encontrarse zonas de agua en el área ya excavada, se recurrirá a la evaluación mediante los mapeos de agua, activándose post-grouting en áreas a lo largo de túnel.

3. Nivel 3:

a) Si se declara Contingencia según ENV-PCD-013 y durante el período que en dicho documento se indica, se suspenderán las actividades de excavación al interior del túnel y se activará pre-grouting sin la evaluación de sondajes exploratorios. De manera complementaria, se realizará post-grouting en todas las zonas con afloramientos presentes a lo largo del túnel.

b) Habiéndose cumplido el período definido para el Nivel 3 en a), sin lograr controlar la situación, en base al nivel de fracturamiento o calidad del macizo y de afloramiento específicas, se considerará la aplicación de revestimiento de concreto normal o armado e inyecciones de consolidación entre la roca y el concreto. En casos especiales se considerará la aplicación de revestimiento de concreto con membrana impermeable; y en casos extremos, la membrana podría reemplazarse por revestimiento de acero.

El siguiente flujograma (figura 5), muestra los parámetros de control y las soluciones operativas de pre-grouting y post-grouting.

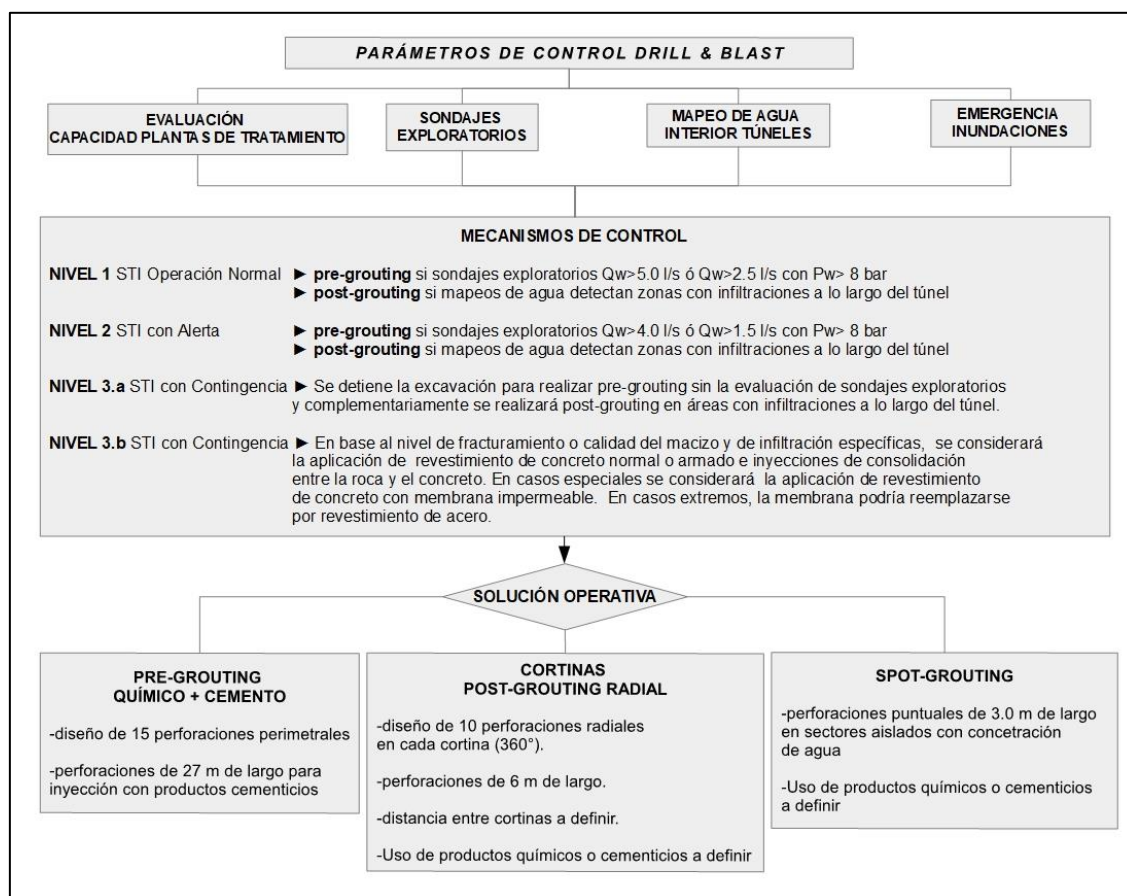


Figura 5: Flujograma de parámetros de control y soluciones operativas de grouting para túneles excavados mediante Drill & Blast.

Las técnicas de grouting que se detallan a continuación, poseen características de diseño específicas para túneles excavados mediante con Drill & Blast. Los detalles operativos para cada una de las técnicas, variará dependiendo del tipo de productos usados.

Las técnicas de grouting en túneles excavados mediante Drill & Blast se ejecutarán como inyecciones de pre-grouting y post-grouting, como sigue:

6.1.3 Pre-grouting

Corresponde al método que tiene por objetivo realizar inyecciones mediante perforaciones proyectadas hacia la zona no excavada, creando una cortina periférica alrededor del contorno de la excavación proyectada.

Las directrices técnicas a utilizar contemplan la realización de perforaciones en el contorno del túnel, incluyendo el piso, con el objetivo de conseguir un cierre perimetral.

Un ejemplo de patrón de perforaciones para la generación de la cortina de pre-excavación se muestra en figura 6 y se puede adaptar dependiendo del tamaño de la excavación y de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

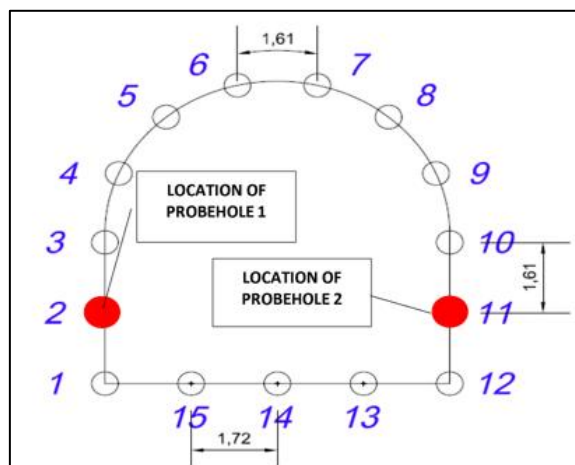


Figura 6: Ejemplo de patrón de pre-grouting para Drill and Blast.

Las inyecciones generalmente se realizarán utilizando Cemento Portland Normal o Micro-cemento pudiendo utilizar excepcionalmente productos químicos, dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona a tratar.

6.1.4 Post-grouting

Las medidas de control en la zona excavada se definen como post-grouting e incluyen técnicas para el tratamiento específico de las zonas con concentración de afloramientos de agua, como por ejemplo:

1. *Post-grouting en cortinas radiales (figura 7):* Corresponde a la ejecución de perforaciones perpendiculares a la periferia de los túneles, con el objetivo de realizar cortinas radiales de inyección. Esta medida de control se puede realizar como complemento de las campañas de pre-excavación o ejecutar de manera independiente.

Dependiendo de la capacidad operativa de los STI y los resultados de los mapeos de agua, se definirán las cortinas:

- *En Nivel 1:* Realización de post-grouting si los mapeos de agua encuentran zonas con concentraciones mayores a 3.0 l/s. La distancia entre las cortinas se definirá en sitio dependiendo de las condiciones encontradas. Para las inyecciones, se utilizarán productos químicos y/o cementicios.
- *En Nivel 2 (Alerta):* Si se declara "Alerta", se realizará post-grouting si los mapeos de agua encuentran zonas con concentraciones mayores a 1.0 l/s. La distancia entre las cortinas se definirá en sitio dependiendo de las condiciones encontradas. Para las inyecciones, se utilizarán productos químicos y/o cementicios.
- *En Nivel 3 (Contingencia):* Si se declara "Contingencia", se realizará post-grouting sistemático en las zonas requeridas. La distancia entre las cortinas se definirá en sitio dependiendo de las condiciones encontradas. Se utilizarán

productos químicos y/o cementicios.

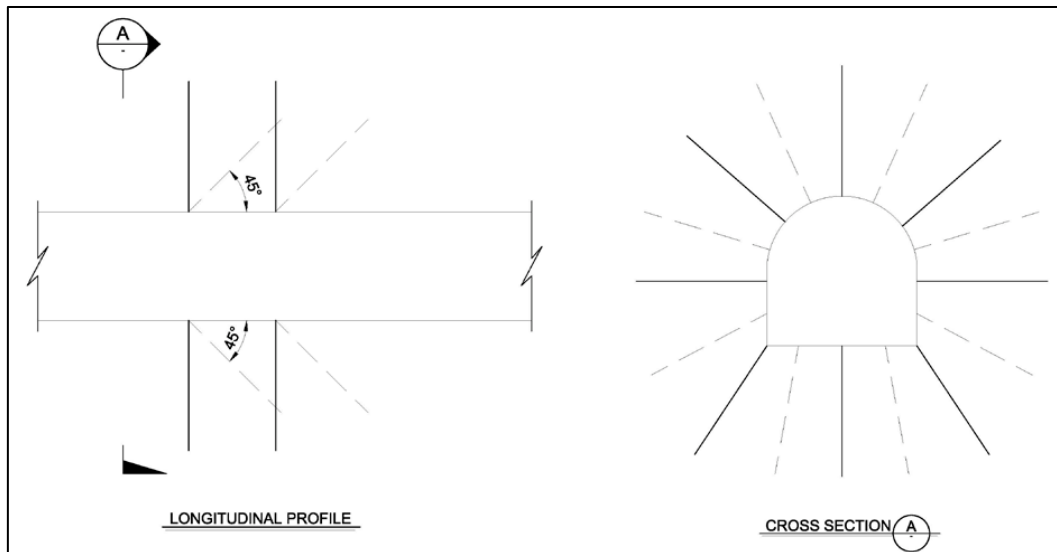


Figura 7: Ejemplo de patrón de diseño de grouting de post-excavación complementario para Drill & Blast.

2. *Spot-grouting (figura 8):* Corresponde a la ejecución de perforaciones específicas directas en puntos de afloramiento de agua. Esta medida es complementaria a la realización de campañas de pre-excavación y cortinas radiales sistemáticas de post-excavación. Para las inyecciones se utilizarán productos químicos y/o cementicios.

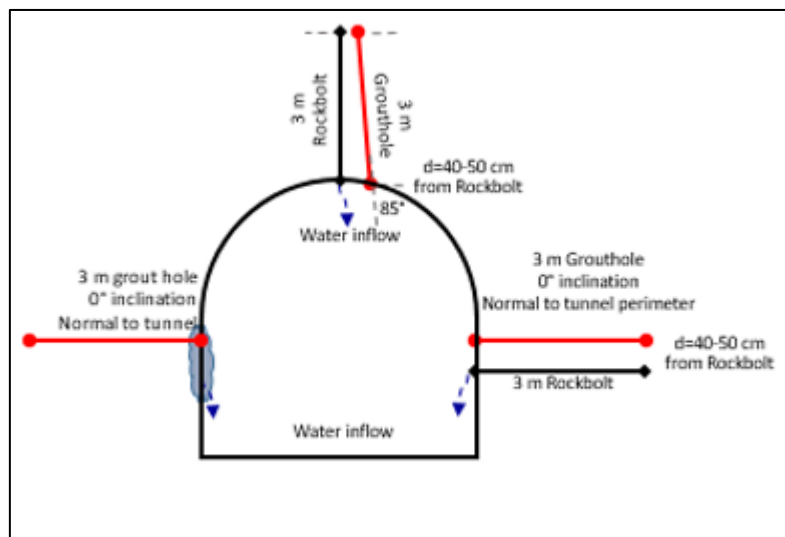


Figura 8: Ejemplo de patrón de diseño de spot-grouting complementario para Drill & Blast.

7. Registros de aplicación de medidas de control de afloramiento

Los registros de aplicación de medidas de control especificarán:

- Descripción del tipo de medida implementada.
- Estatus respecto a los niveles definidos en el procedimiento de emergencia, es decir, si corresponden a acciones preventivas o correctivas.
- Volúmenes de materiales empleados correspondientes a las medidas implementadas
- Tiempo empleado en las aplicaciones,
- Extensión del tramo implementado, con el pk respectivo
- Registros fotográficos del antes y después.

8. Modificaciones y cambios en el procedimiento

Respecto a la versión anterior, se realizan las siguientes modificaciones:

- Se unifica la mención de aguas afloradas o afloramientos en referencia a las aguas que afloramiento al túnel.