



Impermeabilización de una fundación de un sitio de presa mediante inyecciones de cemento

Gianfranco Adams Toledo Leyva

Golder Associates Perú S.A., Lima, Perú (gatoledo@golder.com.pe)

Resumen

La construcción de una cortina de inyección para impermeabilizar la fundación de un sitio de presa implica costos considerables y debería realizarse sólo si fuese absolutamente necesaria. La inyectabilidad de una roca dependerá principalmente del marco geológico, hidrogeológico e hidráulico en particular; siendo dos (02) las variables determinantes: el fracturamiento del macizo rocoso y la tasa de absorción de las pruebas de agua a presión (WPT), las cuales controlarán la profundidad a la que se inicia la inyección, disposición, profundidad y orientación de las perforaciones. La impermeabilización de una fundación de roca consiste en la perforación e inyección de una o más filas de taladros con mezclas de cemento específicas, creando de esta manera una cortina de baja permeabilidad. La inyección de cemento permite rellenar las fisuras y/o vacíos presentes en el macizo rocoso, lo cual dará como resultado la reducción sustancialmente de su permeabilidad.

A lo largo de la construcción de una cortina de inyecciones se requiere un riguroso control de calidad de las mezclas de cemento a inyectar, las cuales deben cumplir con los parámetros especificados por el diseñador (viscosidad, gravedad específica, sedimentación, entre otros). Así mismo, la inyección de cemento debe ser llevada a cabo por un programa a tiempo real, donde se muestren los registros gráficos de la respuesta del terreno durante la inyección.

Palabras Clave: Cortina de inyección, impermeabilización, fundación de roca, inyección, permeabilidad, cemento, perforaciones.

Abstract

The construction of a grout curtain to waterproof the foundation of a dam site involves considerable

costs and should be done only if absolutely necessary. The groutability of a rock will depend mainly on the geological, hydrogeological and hydraulic framework in particular; being two (02) determining variables: the fracturing of the rock mass and the absorption rate of the water pressure tests (WPT), which will control the depth at which the injection begins, the arrangement, depth and orientation of the drills. The waterproofing of a rock foundation consists of the drilling and injection of one or more rows of drills with specific cement mixtures, thus creating a low permeability curtain. The injection of cement allows to fill the fissures and / or voids present in the rock mass, which will result in the substantially reduced permeability.

Throughout the construction of a grout curtain, a rigorous quality control of the cement mixtures to be injected is required, which must comply with the parameters specified by the designer (viscosity, specific gravity, sedimentation, others). Likewise, the cement injection must be carried out by a real-time program, where the graphic records of the response of the land during the injection are shown.

Keywords: Grout curtain, waterproofing, rock foundation, injection, permeability, cement, drills.

CONSIDERACIONES PARA LA INYECCIÓN DE UNA FUNDACIÓN

Para el tratamiento de una fundación de roca mediante inyecciones de cemento se deben tomar en cuenta factores determinantes tales como:

1. MARCO GEOLÓGICO

La geología del sitio donde se construirá una presa es la variable determinante que controlará la profundidad a la que se inician los trabajos de inyec-

ción, las zonas de fundación donde la inyección es eficaz y económica; así como la disposición, profundidad y orientación de las perforaciones. Por lo tanto, se debe tener la información suficiente de la estratigrafía del sitio, así como estructuras presentes como: zonas de fallas, sistemas de fracturamiento, karsticidad.

La colección de información geológica del sitio principalmente podrá ser obtenida mediante técnicas de mapeo; así como, del logeo de testigos de perforación diamantina, de los cuales podremos evidenciar el fracturamiento del macizo rocoso en los tramos a inyectar. El fracturamiento estará relacionado al consumo de agua en las pruebas de agua a presión tipo Lugeon (WPT), así como al de lechada durante la inyección. En la **Figura 1** se pueden observar núcleos de las perforaciones diamantinas, que evidencian las zonas de fracturamiento que presenta el macizo rocoso.

2. MARCO HIDROGEOLÓGICO

Las condiciones hidrogeológicas del sitio de presa serán fundamentales para decidir la construcción de una cortina de inyecciones. Los resultados obtenidos de los ensayos de agua a presión (WPT) serán determinantes en la construcción de una cortina. Una tasa de absorción de agua de 1 litro, por minuto, por metro de perforación a una presión de 10 bares, será equivalente a una unidad Lugeon (Lugeon, 1933), valor ha sido el gran límite de permeabilidad de roca aceptado por décadas. Cuando el ensayo de permeabilidad indica valores más altos, se considera necesario implementar un programa de inyección.

La definición del criterio Lugeon presupone lógicamente que las rocas con mayor permeabilidad son inyectables y, de esta forma, se pueden sellar mediante inyección a un grado específico, y que también deben ser tratadas, de lo contrario, las pérdidas por filtración serían significativas.

Generalmente para la construcción de una cortina de impermeabilización, se debe aplicar un criterio de validez en común; esto quiere decir que las condiciones geológicas individuales controlarán la inyectabilidad de una roca. La conductividad hidráulica y el tipo de roca presente en el área determinarán la inyectabilidad de la roca.

Se debe considerar que los tipos de roca no son igualmente inyectables, sino que tienen sus propias características de inyectabilidad; cada escenario geológico tiene una historia particular, la cual incluirá aberturas conductoras de agua.

CONSTRUCCION DE LA CORTINA DE INYECCIONES

Para llegar a establecer y la magnitud del tratamiento de la fundación de roca es necesario realizar investigaciones que puedan determinar las características geoestructurales, geotécnicas e hidrogeológicas del sitio de presa.

La permeabilidad del macizo rocoso se determina por medio de pruebas de agua a presión tipo Lugeon (WPT) y serán interpretadas según los principios de Houlsby (1990).

EJEMPLO: PRESA POLISHING POND AN-TAMINA



Figura 1. Caja de testigos de perforación que muestra el fracturamiento presente en el macizo rocoso (Caliza micrítica, Formación Jumasha), se diferencian fracturas rellenas y fracturas cerradas.

Es un excelente ejemplo de una cortina de impermeabilización. Inicialmente las investigaciones mostraron permeabilidades relativamente altas (de 5 – 50 UL). En el **Cuadro 1** se muestra un resumen de los resultados obtenidos de las pruebas tipo Lugeon realizadas en el macizo rocoso antes de la ejecución de las inyecciones de cemento, según su profundidad.

MÉTODO DE INYECCIÓN

Para la inyecciones de cemento se utilizó el método ACG (Aperture Controlled Grouting), descrita por Golder, que consiste en el uso de diferentes tipos de mezclas con viscosidades diferentes (como se muestra en el **Cuadro 2**), las cuales fueron inyectadas en tramos de perforación de 5m. La inyección se realizó de manera ascendente y

Cuadro1. Resultados de los ensayos de pruebas de agua a presión tipo Lugeon (WPT) previos a la construcción de la cortina de inyecciones.

Resultados Ensayos Lugeon			
De	A	Long. Tramo	UL
2.50	7.50	5.00	188.334
4.50	12.50	8.00	88.556
17.50	22.50	5.00	12.34
12.50	17.50	5.00	27.856
22.50	27.50	5.00	28.784
27.50	32.50	5.00	3.898
31.50	37.50	6.00	5.28
37.50	42.50	5.00	0.122
42.50	47.50	5.00	5.472
47.50	52.50	5.00	0.084
52.50	57.50	5.00	1.092
57.50	62.50	5.00	6.316
62.50	67.50	5.00	8.476
67.50	72.50	5.00	4.452
72.50	77.50	5.00	9.086
77.50	82.50	5.00	0.9

descendente, según las condiciones encontradas en el terreno.

Las perforaciones fueron espaciadas dependiendo del tipo de roca y su grado de fracturamiento; siendo necesario para realizar el cierre de las inyecciones (impermeabilización), iniciar con perforaciones primarias, separadas ampliamente entre ellas, luego perforaciones secundarias entre las primarias, terciarias en medio de las primarias y secundarias, y así sucesivamente hasta obtener los resultados deseados. (Ver **Figura 2**).

Este método indica realizar los cambios de mezclas según condiciones específicas del terreno:

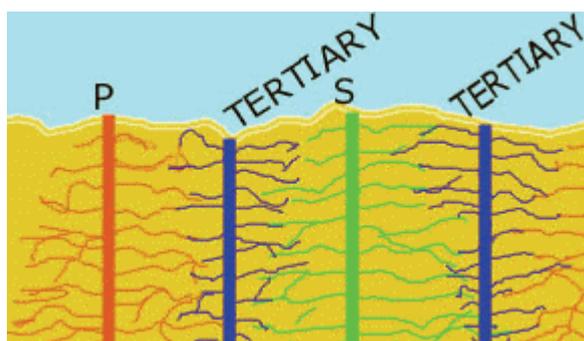
- Por la nula respuesta del terreno (Presión, Caudal y Penetrabilidad)
- Fugas superficiales

Cuadro1. Tipos de mezcla.

	Fluidez (sec)	Densidad (g/cm ³)	Sedimentación (%)	Ensayo de Prensa API			Dosificación (A:C + %Glen + %Mat)
				Agua (mL)	Tiempo (min)	KPF (min ^{-1/2})	
A	31.93	1.51	2.5	31	7.5	0.03	0.88:1+0.53+0.22
B	37.07	1.52	1	15.5	7.5	0.01	0.88:1+0.59+0.40
C	48.42	1.67	0	27	8	0.02	0.60:1+0.63+0.29
D	71.32	1.65	0	37	7.5	0.034	0.60:1+0.59+0.58
E	91.38	1.65	0	27	7.5	0.025	0.60:1+0.57+0.80
F	126.15	1.74	0	28	7.5	0.026	0.50:1+0.58+0.5

- By pass

Los criterios de impermeabilización utilizados para dar por finalizado un tramo inyectado fueron los siguientes:

**Figura 2.** Disposición de perforaciones (primarias, secundarias, terciarias).

- Alcanzar la Presión máxima calculada para el tramo
- Penetrabilidad < 0.1 L/min/m/bar
- Caudal < 0.5 L/min/m

A lo largo de la construcción de una cortina de inyecciones se requiere un riguroso control de calidad de las mezclas de cemento a inyectar, las cuales deben cumplir con los parámetros especificados por el diseñador (viscosidad, gravedad específica, sedimentación, entre otros)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de ejecutado el programa de inyecciones, donde fue necesario realizar taladros primarios, secundarios, terciarios y hasta cuaternarios; se realizaron taladros de comprobación para verificar la disminución de la permeabilidad del macizo rocoso. Se obtuvieron resultados de permeabilidad < 2 UL ($1 \text{ UL} = 10^{-7} \text{ m/s}$), los cuales cumplieron con la permeabilidad requerida en el diseño de la cortina. (Ver **Figura 3**).

CONCLUSIONES

- Para definir la inyectabilidad de una fundación de roca donde se construirá una presa es muy importante conocer el marco geológico e hidrogeológico del sitio.
- El fracturamiento del macizo rocoso y las absorciones obtenidas en los ensayos de agua a presión serán variables determinantes para definir zonas a inyectar.
- El método de inyección ACG permite rell-

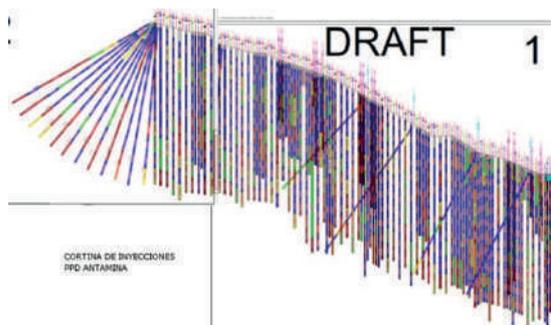


Figura 3. Perfil de las absorciones de lechada (litros) en los distintos taladros inyectados

nar desde fracturas finas a fracturas abiertas, realizando los cambios de mezcla según la respuesta del terreno; además de obtener valores de cierre que evidencia la disminución de la permeabilidad de la cimentación de roca.

- Es importante el monitoreo a tiempo real durante la ejecución de las inyecciones, ya que a partir de los registros gráficos se podrán tomar decisiones que ayuden a la respuesta del terreno.

- Las pruebas de agua a presión (WPT) realizadas en las perforaciones de comprobación determinarán si las inyecciones de cemento realizadas en el macizo rocoso alcanzaron a reducir la permeabilidad requerida para la cortina de inyecciones o si es necesario adicionar más taladros.

REFERENCIAS

- Golder Associates Peru. June 2014. Technical specification drilling and grouting.
- David B. Wilson, P.E And Trent L. Dreese, P.E. Grout curtain design for dams
- F. K. Ewert, The individual groutability of rocks. Water power & dam construction, Vol.44, No.1, January 1992
- C. Kutzner. 1985. Consideraciones sobre permeabilidad rocosa y criterios de inyección
- Dr. Arsenio González Martínez. Hidráulica Del Macizo Rocos. Tema III.
- E. C. Kalkani. 1997. Geological conditions, seepage grouting, and evaluation of piezometer measurements in the abutments of an earth dam
- Dr. Ing. Giovanni Lombardi. Presas de enrocado con cara de hormigón, uso de los criterios GIN para la consolidación e impermeabilización de la roca
- Paulo Henrique Tsingos, Civil Engineer, UFPr. Guidelines for injection in underground construction and tunneling
- Adam Clive Houlsby, M. ASCE. 1977. Normalización de la ingeniería en las cortinas de inyección