



# Tratamiento geotécnico de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil mediante inyecciones cementíceas

## Geotechnical treatment of "Ramal H" dam, Tandil through cementitious injections

Giaconi, Luis Mario <sup>1</sup> ✉ - Flores, Roberto M. <sup>2</sup> - Giaconi, Mario Nicolás <sup>3</sup>

Recibido: 17 de Marzo de 2012 • Aceptado: 10 de Octubre 2012

### Resumen

*El presente trabajo trata sobre los aspectos geológicos y geotécnicos del macizo rocoso sujeto de la fundación de la presa del Ramal H sita en Tandil, Provincia de Buenos Aires, y el tratamiento de mitigación geotécnica aplicado mediante inyecciones cementíceas.*

*El área de influencia de la presa abarca la cuenca hidrográfica del arroyo que desemboca precisamente en el denominado Ramal H, desagüe pluvial entubado, siendo que las nacientes de la cuenca se ubican dentro del cordón serrano que domina el área (Sierras de las Ánimas), hacia la zona oriental de la ciudad.*

*La presa posee una longitud de 160 m y una altura sobre su fundación de 18,60 metros, siendo el objetivo de su construcción la laminación de crecidas extraordinarias que anegan los barrios del sector oriental de la ciudad.*

*La misma se proyectó a gravedad en hormigón sobre un macizo rocoso de características geotécnicas heterogéneas, utilizándose para la mitigación de dichas condiciones el método de inyección GIN. El resultado final del tratamiento, a través de la inyección de 340,04 toneladas de cemento mediante la ejecución de 11,968 metros de taladros, se visualiza en los testigos de roca obtenidos en perforaciones de control con la presencia efectiva de lechada fraguada en las discontinuidades y absorciones de agua menores o iguales a 1 UL (Unidad Lugeon), muy excepcionalmente 3 Unidades Lugeon, en sectores donde los ensayos Lugeon previos arrojaron absorciones mayores a 10 UL llegando a máximos de 75 UL, todo lo cual corrobora la efectividad del método empleado.*

**Palabras Clave:** Presa - fundación - macizo rocoso - homogenización - inyecciones cementíceas.

### Abstract

*This paper discusses the rock mass geotechnical conditions for the foundation of the dam H Branch located in Tandil, Buenos Aires and the geotechnical mitigation treatment applied by cement slurry injections.*

*The area of influence of the dam includes the watershed of the*

<sup>1</sup> Cátedra de Geología Aplicada, FCNyM, UNLP

✉ [imgiaconi@gmail.com](mailto:imgiaconi@gmail.com)

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, UNLP - UTN, Regional La Plata

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, UNLP

stream which flows precisely in the so-called "H branch", a piped storm drain. The headwaters of the basin are located within the cord mountain that dominates the area ("Sierra de las Animas"), to the east of the city.

The "H branch" Dam has a length of 160 m and a height above its foundation of 18.60 m, being the objective of the dam the lamination of extraordinary floods that inundate the eastern suburbs of the city.

The dam was projected to a concrete gravity dam above the rock mass with dissimilar geomechanical and hydraulic characteristics, the method used to mitigate these conditions was the GIN injection method. The end result of the treatment, through the injection of 340.04 tons of cement through the execution of 11,968 meters of drilling, is visualized in the witnesses of drilling rock, obtained in after control perforations, the actual presence of grout forged in the discontinuities and water absorptions less than or equal to 1 UL (Lugeon Units), very rarely a value of 3 Lugeon Units, in sectors where previous Lugeon tests threw absorptions values greater than 10 UL reaching peak values of 75 UL., all of which confirms the effectiveness of the used method.

**Keywords: Dam - foundation - solid rock - homogenization - cement slurry injections**

## OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es comunicar los aspectos geológico-geotécnicos del macizo rocoso sujeto de la fundación de la Presa del Ramal H en la Ciudad de Tandil, Provincia de Buenos Aires, y el consecuente tratamiento geotécnico ejecutado mediante inyecciones cementíceas a los fines de homogeneizar las heterogéneas características geomecánicas e hidráulicas del substrato de apoyo.

## ASPECTOS GEOLÓGICOS

La geología del sitio se encuentra integrada por una cubierta de materiales sueltos compuesta por suelos orgánicos, depósitos sedimentarios fluviales y eólicos y materiales friables de origen antrópico por lo que, dadas las características geotécnicas determinadas, el espesor y la disposición de los materiales de cobertura, los mismos fueron excavados mecánicamente hasta el techo de roca a los fines de la fundación de la obra que nos ocupa.

Subyace a estos materiales un macizo rocoso compuesto por rocas del Basamento Cristalino Precámbrico. Litológicamente, en corte delgado, constituyen rocas granudas, milonitas de composición tonalítica y rocas microgranudas, milonitas de un protolito aplítico o granítico, de grano fino. Macroscópicamente, las rocas dominantes en el área de fundación son granitoides, gneises gris verdosos de composición tonalítica que han sido intruidos por rocas de origen pegmatítico de grano muy fino, de color rosado.

En el análisis del grado de la alteración, se detectaron cuatro formas de ocurrencia dentro del modelo geológico de macizo rocoso determinado para la fundación de la presa. Las mismas serán descriptas más adelante, en el análisis litoestructural del macizo.

La estructura regional del macizo rocoso responde a la existencia de una amplia zona de fajas ultramilonitizadas de orientación E-O (Dalla Salda et al., 2006). Consecuencia de la reactivación geodinámica de los antiguos planos estructurales correspondientes a las fases deformacionales producidas desde el Ciclo Transamazónico, la situación estructural se resume según tres orientaciones claramente definidas constituyendo los Dominios Estructurales A, de orientación E-O; B, de orientación NE-SO y C, de orientación NO-SE (Teruggi y Kilmurray, 1980) que se sintetiza en el sitio de la presa de la siguiente manera:

- a) Se visualiza una distinta morfología en ambas márgenes. La izquierda posee una tendencia a la concavidad mientras que la derecha existe tendencia a la convexidad. El cuadro lito-estructural y la diferente disposición y respuesta de las rocas resultantes a la degradación explican las tendencias descriptas.
- b) El cuadro estructural detectado reconoce cuatro familias de discontinuidades a nivel superficial y subsuperficial. Tres de ellas, de orientaciones generales coincidentes con las de los dominios estructurales A, B y C, poseen inclinaciones que varían desde subvertical hasta 30° y la restante es subhorizontal (< 15°).
- c) Las estructuras de cizallamiento son de rumbo subparalelo y de rumbo diagonal al eje de la presa y afectan directamente a la fundación de la presa en ambas márgenes. Corresponderían a líneas estructurales de envergadura mayor, de espesor variable y longitud no detectable pero, por inferencia, extensos. Consecuente con ello, existen evidencias de lajosidad y arenización en margen derecha, en el estribo y en los sondeos a medio faldeo, en margen izquierda a medio faldeo y en el estribo; y en la zona central de la presa coincidente con la vía fluvial del ramal H.
- d) Respecto a las estructuras cortantes de falla son contrastantes en margen derecha y margen izquierda. Mientras en la primera toda una zona de falla o de corte con intensa microfisuración recorre el empotramiento en forma diagonal al mismo siguiendo una orientación desfavorable a los fines de la estabilidad de la presa (progresivas 110 m a 150 m), en la margen izquierda mayormente predomina un macizo fracturado en menor magnitud habiéndose detectado evidencias de falla a medio faldeo (progresivas 45 a 70 m aprox.) y en las cercanías del sitio de empotramiento como lo detectado en progresiva 24 m.

En margen izquierda se detectó, además, la presencia, si bien en menor magnitud que en la otra margen, de un efecto combinado entre fajas de cizalla de orientación diagonal (E-O) al eje e inclinación subvertical hacia aguas abajo y, en profundidad, fallas de corte, de rumbos no conocidos pero de inferencia diagonal al eje, lo cual también constituye una orientación desfavorable de la estructura respecto al eje y el estribo izquierdo constituyendo potenciales vías preferenciales de circulación de agua en el subsuelo.

Como resultado de los relevamientos realizados fueron identificadas y caracterizadas 2 (dos) zonas litoestructurales generales consecuentes con la litología, grado de meteorización/alteración y estructura (Giaconi, 2009).

La zona litoestructural 1 se caracteriza por la predominancia de los procesos de alteración del macizo en contraposición con la zona 2 donde predominan rocas mayormente frescas, inalteradas a muy poco alteradas.

Espacialmente la zona 1 se presentó, en líneas generales, subsuperficialmente paralela pero varió su espesor de acuerdo a la ocurrencia local de los modelos de alteración, por lo que la zona 2 se encontróa veces inmediatamente subyacente, a mayor o menor profundidad, y otras veces de manera lateral, poniendo en contacto neto en ambos casos rocas frescas con rocas muy alteradas. La casuística de tal condición fue localmente aleatoria, cuestión a la que no es ajena la larga historia geológica del Basamento Cristalino en la región.

Las características de cada zona se resumen de la siguiente manera:

- **Zona Litoestructural 1 (ZLE1):** Responde a tres formas de alteración de las cuatro descritas en el macizo:

a) Zona meteorizada paralela a la superficie del terreno y a la roca no alterada (Figura 1).



Figura 1. Detalle del material rocoso aflorante en la margen derecha (ZLE1). Se observa alteración y con precisión las características del complejo diaclasamiento superficial del milonitizado Basamento Cristalino, característico en toda el área de estudio.



Figura 2. Zona de cizalla en margen izquierda, grado de alteración A4 - A5 (ZLE1) en afloramientos de rocas gneissicas levemente meteorizadas (ZLE2)

b) La zona alterada se ubica entre discontinuidades. La alteración se produjo a expensas de las zonas fracturadas de inclinación vertical a subvertical. Se presenta como zonas alteradas de espesor reducido que se ubican entre rocas de menor alteración y que han dejado importante material intersticial de zona fracturada, brecha, microbrecha, etc. Se distribuye en toda el área de la presa.

c) Variante de la anterior pero de mayores dimensiones. Corresponde a la alteración en zonas de cizallamiento (lajosidad y arenización) o de intenso fracturamiento superficial. Rocas alteradas de manera intensa, como mínimo tipo A4 (Dearman, Sergeev y Shibakova, 1989) en los niveles superficiales del macizo presentando subsuperficialmente intensa lajosidad. Se encuentra en margen derecha e izquierda ligado al empotramiento de los estribos y en el subsuelo de la fundación del cuerpo principal de la presa que es precisamente por donde corre la vía fluvial del ramal H (Figura 2).

- **Zona Litoestructural 2 (ZLE2):** Responde a la forma de alteración 4 mencionada: Roca masiva con bajo grado de alteración o no alterada (fresca), exceptuando fallas localizadas. Subyace a la forma de alteración 1 de la ZLE1 y, en ocasiones, se encuentra interceptada vertical y subverticalmente por las formas de alteración 2 y 3 de la ZLE1 anteriormente descritas.

Esta zona ZLE2 ha sido detectada en todas las perforaciones, a distintas profundidades en todo el área de fundación constituyendo rocas frescas o débilmente alteradas, A1 o A1-A2 (Dearman, Sergeev y Shibakova, 1989), con cristales brillantes, observándose en general una leve decoloración del macizo en las paredes de los planos de discontinuidad. Litológicamente son gneises gris verdosos (Figura 3) y pegmatitas aplíticas rosadas (Figura 4). La presencia de estas últimas se detectó mayormente en margen derecha aunque fueron observadas también en margen izquierda en menor grado y en el sector de aguas abajo del área de fundación en el área central de la presa.

En esta ZLE2, las orientaciones de las discontinuidades dominantes respecto al eje de la presa (azimut N40°) guardan una relación desfavorable respecto a la estabilidad de los estribos y cuerpo central de la presa toda vez que las mejor caracterizadas poseen una disposición subparalela o diagonal al eje coincidentes con los dominios estructurales mencionados (mayormente N30° a N300°, llegando a extremos de N90° a N270°)

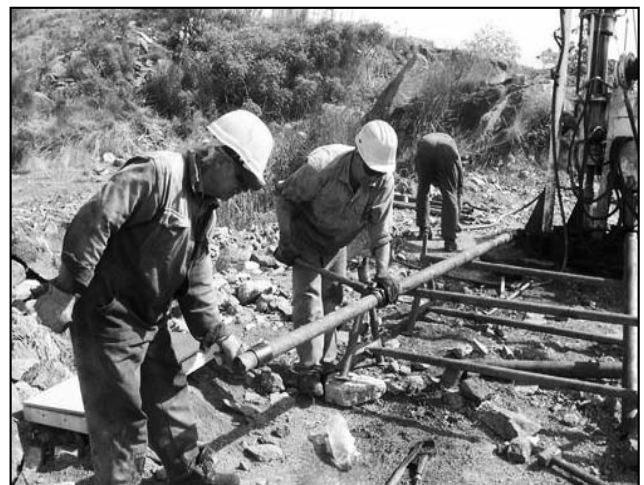


Figura 3. ZLE2. Sondeo S2 en margen izquierda. Testigo de gneis tonalítico, grado de Alteración A1 a A2

con planos de inclinación subverticales, > 60°, 45°, 30° y hasta < 15°, orientados indistintamente hacia aguas abajo y hacia aguas arriba del eje de presa.

En términos generales, la ZLE2 constituye las rocas objeto de la fundación.



**Figura 4. Sondeo S7 en el estribo de margen derecha. Testigo intrusivo aplítico milonitizado, de color rosado, grado de alteración A<sub>1</sub>**

#### Determinaciones geotécnicas de campo - Síntesis

En función de las 12 perforaciones ejecutadas como parte de los trabajos de campo durante la etapa de proyecto y de acuerdo a la zonificación litoestructural realizada, en la ZLE1 se verificó mayormente la presencia de rocas de alteración A4 a A6 por lo que, entre otros parámetros, el RQD (Rock Quality Design) no resultó evaluable. Sin embargo, existieron también áreas subsuperficiales muy fracturadas, donde la alteración y el grado de fracturamiento, de orientación desfavorable, no alcanzaron la magnitud extrema de lo mencionado anteriormente, poseyendo separación de las discontinuidades que variaron entre 0,06 m - 0,2 m y < 0,06 m o brechosa dando como resultado RQD de valores muy bajos a valores 0 (cero), siendo por lo general muy permeables con valores Lugeon muy altos. Giacconi (2009 y 2011).

La zona ZLE2 presentó rocas duras, gneises y pegmatitas aplíticas, de peso específico general entre 2,6 y 2,9 g/cm<sup>3</sup>, poco meteorizadas a frescas, algo fracturadas donde si bien las orientaciones estructurales fueron relevadas de manera desfavorables respecto a la estabilidad de estribos y/o circulación del flujo subterráneo, las matrices rocosas en cuanto al grado de alteración mayoritariamente fueron A1 a A1-A2, cuestión de importancia respecto a la posibilidad de mejoramiento de las condiciones mecánicas e hidráulicas del macizo por tratamiento mediante inyecciones.

En gran parte, aunque existieron excepciones como en las pegmatitas aplíticas de margen derecha (RQD < 25 %), se determinó para esta zona 2 un valor de RQD superior al 75 % con valores modales en 90 a 100 % siendo que las separaciones de las discontinuidades se presentaron por lo general superiores a 0,6 m. con diaclasas cerradas o con muy baja apertura (< 0,1 mm.), rugosas, por lo general sin relleno (excepto en zonas localizadas de fallas o, de manera eventual, en las pegmatitas aplíticas muy fracturadas de la margen derecha: presencia de relleno de arcilla) y donde los planos o paredes de las diaclasas no presentaron alteración o la poseyeron en grado ligero. Los valores de los ensayos Lugeon resultaron bajos a muy bajos, incluso sin

admisiones a excepción de las zonas localizadas de falla y en las pegmatitas aplíticas del estribo de margen derecha donde los valores fueron altos a muy altos (Giacconi, 2009). Cabe destacar que muchas veces no existió correspondencia entre la fisuración relevada de los testigos extraídos en las perforaciones y los valores de absorción de agua de los ensayos Lugeon (Flores y Giacconi, 2010). Finalmente, se obtuvieron numerosas muestras de testigos en zonas de interés geotécnico y se enviaron a laboratorio para realizar ensayos a los fines de conocer los valores de resistencia uniaxial y módulo de deformación con el objeto de clasificar al macizo (Giacconi, 2009 y Flores y Giacconi, 2010)

#### CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO

Se exponen a continuación breves comentarios conceptuales respecto a los parámetros geotécnicos de caracterización del macizo. El análisis detallado ha sido publicado en el Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG) en 2010 (Flores y Giacconi, 2010).

#### Clasificaciones Geomecánicas

Se consideraron tres clasificaciones geomecánicas de uso habitual en Mecánica de Rocas. Son ellas las que se expresan como los índices RMR, Q y GSI.

La clasificación que asigna al macizo rocoso un índice denominado RMR (Rock Mass Ratio) ha sido desarrollada en el Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) de Sud África (Bieniawski, 1979). Si bien esta clasificación tiene su origen en el estudio y predicción de comportamiento de macizos rocosos asociados a obras subterráneas está plenamente difundido su uso para la evaluación de obras en superficie como es nuestro caso. En la misma se utilizan como parámetro de evaluación: la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, el RQD, la valoración de la separación entre discontinuidades, el estado de las mismas y la valoración respecto a la presencia de agua. Finalmente se corrige la clasificación por la influencia de la orientación de las discontinuidades respecto a la orientación de las obras.

El índice Q (Rock Tunnelling Quality Index) ha sido desarrollado en el Norwegian Geotechnical Institute (Barton, Lien y Lunde, 1974). El índice tiene la siguiente expresión:  $Q = (RQD/J_n) (J_r/J_a) (J_w/SRF)$ , siendo  $J_n$  un parámetro que evalúa la cantidad de familias de discontinuidades,  $J_r$  la rugosidad y  $J_a$  el grado de alteración de las discontinuidades,  $J_w$  un parámetro que evalúa la acción del agua y SRF un parámetro que tiene en cuenta la influencia del nivel de tensiones en el macizo. Se debe puntualizar que esta clasificación es específica para el diseño de sostenimiento en túneles. Sin embargo se la presenta como un indicador más sobre el comportamiento del macizo.

Finalmente el índice GSI (Geological Strength Index). Tiene como parámetros el tipo de macizo rocoso atendiendo a su fracturación y la condición de las superficies de las discontinuidades. En nuestro caso este índice fue considerado sólo como referencia a partir de la relación conocida con el índice RMR ( $GSI = RMR - 5$ ).

#### Tensiones Admisibles

La adopción de las tensiones admisibles en el macizo rocoso fue realizada a partir de criterios de evaluación reconocidos en los que se adoptan distintos parámetros geomecánicos. El análisis detallado de las mismas ha sido publicado en CAMSIG 2010 (Flores y Giacconi, 2010) por lo que sólo se mencionarán aquí los criterios utilizados en la adopción de dichos valores.

Uno de los criterios más reconocidos es la vinculación de la tensión admisible con la resistencia a la compresión simple de la roca intacta. Esta recomendación es particularmente válida con diaclasamiento vertical a subvertical. Para una condición más general (con diaclasamiento con orientación variable) muchos reglamentos reducen el valor de la tensión admisible a  $\sigma_{adm} = 0,2 q_u$  (siendo  $q_u$  el valor de la resistencia a compresión simple) (Peck, Hanson y Thornburn, 1982).

Otro de los criterios de aplicación es el que considera la influencia de la fracturación como un limitante de las deformaciones esperables, adoptando valores de tensiones admisibles a partir de la evaluación del RQD. En nuestro caso este criterio es el que proporciona el valor más bajo de la tensión admisible dados los valores de RQD observados. No obstante se debe puntualizar que según esta recomendación el mínimo valor de tensión admisible a considerar es de 1 MPa. (Peck et al, 1982).

El tercer criterio considerado fue el de valorar la resistencia del macizo rocoso ante un estado triaxial de tensiones con la presión de confinamiento limitada a la resistencia a la compresión simple de la roca. En este caso se adoptaron como parámetros de corte del macizo a los que surgen de la clasificación del CSIR comentada anteriormente (valor de RMR). Para esta teoría se adoptó un Factor de Seguridad igual a 5. Este tipo de rotura aparece como la que mejor se ajusta al comportamiento esperable, aunque cuenta con la dificultad en la estimación de la resistencia del macizo ante un estado triaxial que como se dijo se obtuvo de una estimación empírica a partir de la clasificación del mismo. (Goodman, 1989; Suarez, 1985).

### Módulo de Deformabilidad

A partir de los datos de clasificación del macizo rocoso se pudieron obtener valores del módulo de deformabilidad utilizando fórmulas reconocidas en la bibliografía internacional.

Del análisis de las mismas surge que la aplicación de la expresión (1) (Höek y Diederichs, 2006) brinda valores que resultan aproximadamente un promedio del conjunto analizado y pueden ser adoptados como referenciales para la estimación del módulo de deformabilidad del macizo.

$$E_{mr} = (0,02 + ((1-D)/2) / (1 + e^{((60+15D-GSI)/11)})) \quad (1)$$

Dónde:  $E_{mr}$  = Módulo de Deformación del Macizo Rocoso [GPa]; GSI = Índice de Resistencia Geológica (Geological Strength Index) y D = Factor de Perturbación Mecánica (Disturbance Factor).

La aplicación de este criterio permitió zonificar con criterio geotécnico a lo largo de la traza y adoptar valores de cálculo del módulo de deformabilidad (Flores et al, 2010).

### Resistencia al Corte

A los efectos de recomendar parámetros de cálculo para el análisis de estabilidad de la presa se consideraron, con criterio conservador, las recomendaciones de Bieniawski (Bieniawski, 1989).

### Permeabilidad

La realización de pruebas de agua a presión Lugeon no mostró ninguna vinculación directa con la fracturación de la roca, evaluada a partir de la recuperación RQD. Se observó que no existe ninguna tendencia clara que las vincule (Flores y Giacini, 2010).

## ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

A partir de los análisis de los parámetros geotécnicos descriptos, se confeccionó un perfil longitudinal simplificado en el que se han zonificado los parámetros de interés. La Figura 5 muestra tal zonificación.

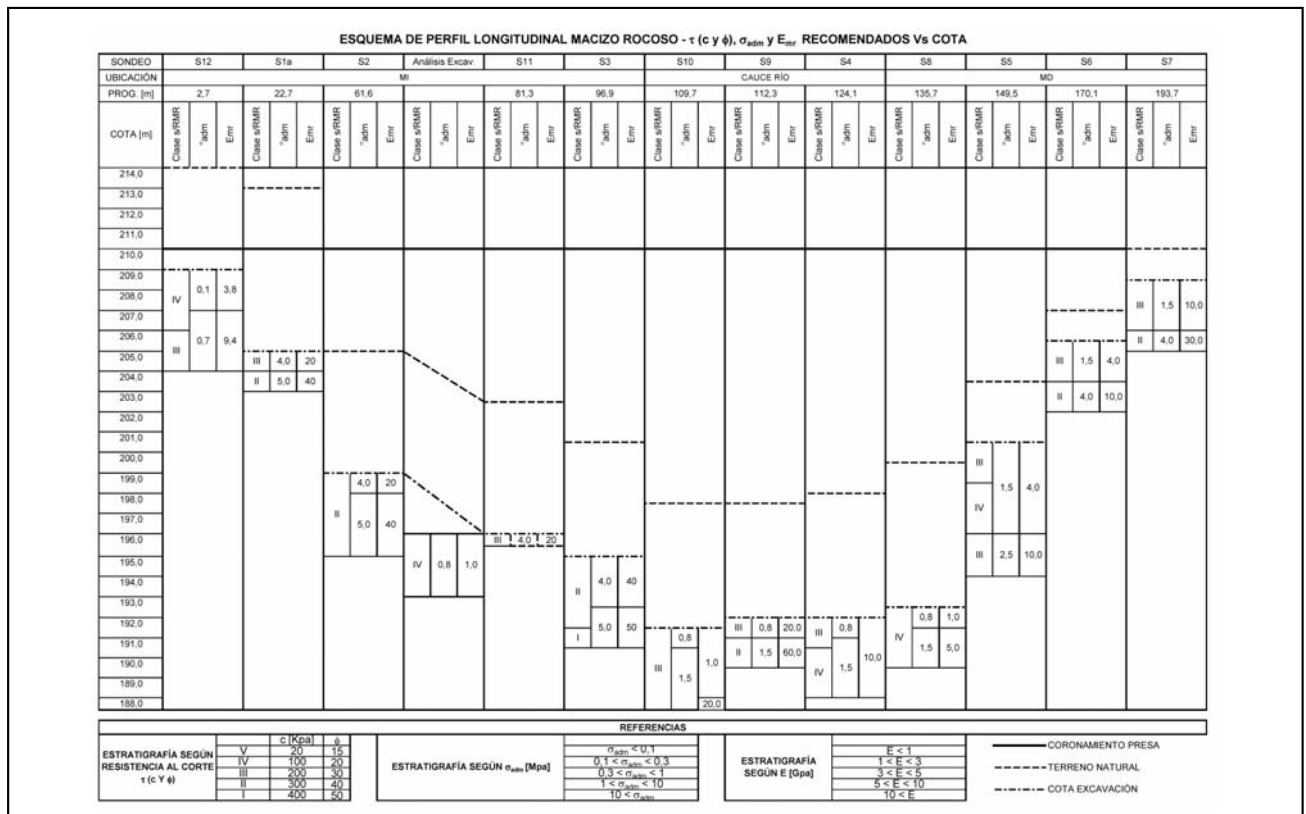


Figura 5. Zonificación geotécnica – Esquema del perfil longitudinal

En conclusión, la investigación geotécnica llevada a cabo a partir de reconocimientos de geología de superficie, rozas y calicatas manuales y 12 sondeos ejecutados durante la etapa del proyecto de detalle mostró un macizo heterogéneo desde el punto de vista de sus propiedades geotécnicas.

La heterogeneidad observada es producto de procesos de fracturamiento y alteración diferencial y significó un difícil escollo en el momento de realizar las recomendaciones sobre los parámetros de cálculo para el diseño de la presa.

Se dispuso de suficiente cantidad de datos por lo que se desarrollaron análisis estadísticos de las distintas variables que intervienen en las clasificaciones geomecánicas más usuales (RMR, Q y GSI). Esto permitió desarrollar un esquema de parámetros de cálculo como el que se muestra en la Figura 5.

El proceso de construcción permitió observar más exhaustivamente las características del macizo y ajustar el esquema de recomendaciones para el análisis de la presa.

La observación del fondo de excavación permitió detectar que, entre las progresivas 80 m a 110 m y 120 m a 145 m, se presentó en aproximadamente la mitad de aguas arriba roca de superior calidad y, en espesores variables entre 2 m y 5 m en la mitad de aguas abajo, un macizo rocoso de calidad inferior.

Asimismo, en los sectores de presa comprendidos entre las progresivas 62 m y 80 m en la margen izquierda, se detectó un sector con condiciones geotécnicas sensiblemente inferiores a las encontradas en los sondeos de investigación previamente ejecutados. En este lugar, como así también entre las progresivas mencionadas en el párrafo anterior, se realizaron labores de investigación complementaria (perforaciones adicionales y ensayos de laboratorio de mecánica de rocas) a efectos de tomar eventuales medidas correctivas (Figura 6).

Como ocurre en general en este tipo de obra, el proceso de investigación geotécnica es dinámico y recibe retroalimentación durante el período de obra, ajustándose las conclusiones a medida que se cuenta con información más detallada.

En la Figura 7 se presenta un resumen de las recomendaciones ajustadas finalmente a las condiciones de obra.

## TRATAMIENTOS DE CIMENTACIÓN Y CONTROL DE FILTRACIONES - INYECCIONES CEMENTÍCEAS

Dadas las condiciones geotécnicas de la superficie de apoyo, una vez finalizadas las tareas de excavación y saneamiento y construido el hormigón de regularización, se ejecutó el tratamiento geotécnico de mitigación a través de la realización de inyecciones cementíceas de consolidación e impermeabilización como tratamientos de la cimentación y control de las filtraciones en el área del macizo rocoso sujeto a la fundación de la presa. (Giaconi et al., 2011)

### Problemas geológicos y soluciones adoptadas

En fundaciones rocosas como la presente, cabe precisar que la presencia de discontinuidades de gran longitud frente al tamaño de la presa, horizontales o de bajo ángulo inclinando hacia aguas abajo, que eventualmente pudieron encontrarse durante las excavaciones representa a priori un problema geológico-geotécnico de importancia, muy común en rocas duras. Cuando estas discontinuidades se encontraron a escasa profundidad, la solución fue la excavación completa. Cuando así no fue y se encontró en profundidad, se excavaron y rellenaron esas discontinuidades con hormigón H-13 hasta una profundidad determinada durante los trabajos, procediéndose luego a la construcción del hormigón de regularización de la fundación y las consecuentes tareas de inyección.



Figura 6. Progresiva 130 m. Sondeo complementario SC1. Perforación con extracción continua de testigos en el área del pie de presa sobre margen derecha (Actual Bloque 7).

PROGRESIVAS [m]		ROCA TIPO	c	$\phi$	$\sigma_{adm}$	$E_{mr}$	OBSERVACIONES	
De	A		[KPa]	[°]	[MPa]	[Gpa]		
0	62	III	200	30	4,0	20		
62	80	IV	100	20	0,8	1	Ajustar con nueva investigación	
80	110	III	200	30	4,0	4	Caso General	
80	110	III	200	30	4,0	4	Mitad Aguas Arriba	Verificación
		IV	100	20	0,8	1	Mitad Aguas Abajo	Particular
110	145	IV	100	20	0,8	1	Caso General	
110	145	III	200	30	4,0	4	Mitad Aguas Arriba	Verificación
		IV	100	20	0,8	1	Mitad Aguas Abajo	Particular
145	189	III	200	30	1,5	4		

Figura 7. Recomendaciones finales, corregidas por observaciones durante la construcción.

### Presencia de fallas y zonas de trituración tectónica

En este caso, y como fue establecido en los sondeos de la investigación, los tratamientos variaron en función de cada problema. En general estas discontinuidades son de escaso espesor y el tratamiento común es la excavación de la zona superficial reemplazando el material saneado por hormigón para luego realizar inyecciones desde superficie. Las zonas de fracturación intensa están asociadas a permeabilidades altas y compresibilidades elevadas con baja resistencia al corte requiriéndose tratamientos de consolidación.

### Presencia de zonas de cizalla

En este caso, y como fue establecido en los estudios previos y fundamentalmente a la luz de la excavación, los tratamientos aplicados fueron la remoción profunda del material cizallado y alterado. En general estas discontinuidades son de mayor espesor y el tratamiento común es la excavación de la zona reemplazando el material saneado por hormigón para luego realizar inyecciones desde superficie.

### INYECCIONES CEMENTÍCEAS

Finalmente se procedió al tratamiento correctivo o de mejoramiento de las condiciones de la fundación de la presa a través de la inyección de lechada de cemento con los siguientes objetivos:

- Reducir las deformaciones
- Aumentar la resistencia
- Controlar las filtraciones y permitir el drenaje

Para ello las medidas adoptadas fueron las siguientes:

**Control de la deformación.** La inyección de consolidación de fracturas mejora las condiciones de deformación del macizo ya que el módulo de deformación depende principalmente de la apertura de fracturas en macizos diaclasados, siendo este tratamiento en general el más apropiado.

**Aumento de la resistencia.** En general, el control de las deformaciones mediante inyecciones cementíceas en macizos rocosos diaclasados conlleva implícito el aumento de la resistencia del mismo. En los casos donde la matriz rocosa se encuentra alterada, el eventual relleno cementíceo de pequeñas oquedades en dicha matriz coadyuva a la ligazón y en consecuencia al incremento resistente.

**Control de la permeabilidad.** Se utilizan inyecciones localizadas. Las altas permeabilidades suelen localizarse en fracturas abiertas.

**Control de las subpresiones.** Mediante pantalla de inyección y drenajes se reducen las subpresiones consiguiendo aumentar la estabilidad de la presa.

### CONSIDERACIONES RESPECTO AL MÉTODO ELEGIDO DE INYECCIÓN

El principio empleado para el control de las inyecciones fue el método GIN (Grouting Intensity Number). El mismo ha sido desarrollado primigeniamente por *G. Lombardi, 1990* y descrito más extensamente por *G. Lombardi y D. Deere, 1993*. Por tal razón se consigna en este documento solamente una descripción general para referencia del lector y la adaptación del método a la obra de referencia.

El método GIN elegido para el control de las inyecciones cementíceas se sostiene bajo la línea argumental que la limita-

ción por intensidad (Número GIN) evita la combinación de presiones elevadas con volúmenes de mezcla o lechada elevados, lo cual significa presiones elevadas actuando sobre grandes superficies. *Lombardi (Lombardi, 2001)*, expresa que "...se elimina de esta manera o por lo menos se reduce substancialmente el riesgo de hidrofracturación y de hidrogateo".

En un macizo rocoso las tareas de inyección afectan tanto las diaclasas de gran espesor como a las máscerradas. En las primeras la solución técnica y económica más aconsejable para limitar el radio de acción de la lechada es utilizar un volumen limitado siendo que para el caso de las diaclasas de pequeño espesor la alternativa más segura para evitar una hidrofracturación, es continuar con la misma lechada pero aumentando la presión delimitando los volúmenes de inyección.

Así el método GIN permite la utilización de presiones altas ya que ello es necesario "pues la presión máxima de inyección debe ser lo suficientemente alta (2 o 3 veces la presión futura del agua en el sitio, es decir la boca del taladro) como para que al llenar el embalse las fisuras no se abran de nuevo por hidrogateo" (*Lombardi, 2001*).

De esta manera se definen dos límites claros para la inyección de un macizo rocoso. Ellos son: la *Presión límite* y el *Volumen límite* utilizados en el principio del método GIN.

El GIN utiliza el concepto de *energía específica consumida* que indica que en un tramo de inyección determinado la energía consumida es directamente proporcional al producto de la presión final "p" por el volumen final inyectado "V". Este producto  $p \times V$  es el llamado *Numero de Intensidad de Inyección o GIN*.

Si se grafica el producto  $p \times V$ , se obtiene una curva hiperbólica que junto con la presión y volumen límite componen la curva envolvente de inyección.

El volumen está referido a la longitud del tramo inyectado en litros por metro (l/m) o peso de cemento inyectado, en kilogramos por metro (kg/m) y la presión se mide en Bares. (1 Bar = 1 kg/cm<sup>2</sup> = 100 KNm<sup>2</sup> = 0,1 MPa)

La aplicación del presente método permite que la decisión de la realización de uno o más órdenes de inyección a los efectos de una mitigación efectiva dependa de lo que se denomina Valor Crítico Teórico de Inyectabilidad (VCTI). El mismo se encuentra dado por la ecuación:  $VCTI = 0,5GIN/Presión\ máxima$ .

Es decir, las inyecciones de orden superior (que se intercalan entre los taladros ya inyectados en el orden precedente dependiendo su arreglo geométrico al tipo de inyecciones que se aplica) se realizaron cuando se registró, una vez alcanzada la envolvente del Número GIN, una toma superior a lo calculado mediante la ecuación anterior.

### Control de la ejecución de las inyecciones

Consecuentemente, el método GIN requiere un monitoreo completo por medio de gráficos de computadora entre los que se destacan las curvas de tiempo real de la presión contra el tiempo, de la velocidad de flujo de la lechada contra el tiempo, y del volumen total inyectado contra el tiempo, además de la curva derivada de la penetrabilidad (velocidad de flujo dividida por la presión, q/p) contra el tiempo. Esta última curva es de un valor particular ya que señala el alcance del rechazo de la inyección o por lo menos las absorciones que se van reduciendo.

Para ello el monitoreo de los trabajos de inyección fue realizado mediante el empleo de ordenadores especialmente adaptados para la adquisición, procesamiento, y graficación en *tiempo real* de los datos de inyección y su comparación con el modelo teórico de los autores o el ocasionalmente contrastado en obra. Se utilizó un sistema computarizado integrado por los siguientes elementos: bomba de inyección de lechada cementícea, unidad central de control de presión y caudal de inyección (marca Maquesonda), caballote de inyección compuesto por caudalímetro y sensores de presión, registrador continuo de presión y caudal de lechada, unidad PC, monitor color con impresora para el registro de las curvas GIN en tiempo real y la explotación de los datos de inyección. El sistema permitió controlar a través del monitor de la PC el desarrollo de la inyección en *tiempo real* mostrando la curva característica de la intensidad GIN adoptada, y los gráficos: presión-tiempo, caudal-tiempo, penetrabilidad-tiempo, penetrabilidad-volumen y presión-volumen, y en forma numérica los valores instantáneos de caudal, presión, volumen, presión x volumen, velocidad y tiempo.

### Características de la Mezcla o Lechada

Se utilizó para la inyección del macizo rocoso una misma mezcla estable que se comporta como un flujo binghamiano con cohesión y viscosidad dinámica, denominada 0,5/1, cuya dosificación final se obtuvo a partir de pruebas de laboratorio dando una relación agua:cemento 0,5:1 + el agregado del 1% en peso de cemento de un superplastificante. Por razones de disponibilidad de mercado, se utilizó cemento compuesto en bolsa denominado CP40.

Se controló la estabilidad de la misma realizando un ensayo cada 2 toneladas de cemento inyectadas. En dicho ensayo se verificó que la decantación a las 2 horas en probeta de 1 litro fuera menor de 5%.

La mezcla utilizada poseyó los siguientes parámetros medios: una cohesión menor a igual 0,2 mm, un tiempo en el cono de Marsh (viscosidad) menor o igual a 34 segundos y una densidad de 1,9 gr/cm<sup>3</sup>.

La resistencia de la mezcla se controló en obra realizando un ensayo cada 5 toneladas de cemento inyectadas. En dicho caso se verificó que la Resistencia a Edad de Referencia  $\geq 15$  MPa y, dado que se utilizó cemento compuesto, se estableció como edad de referencia 30 días.

La lechada elegida posee una densidad alta. Ello se decidió debido a las características relevadas del macizo de fundación con presencia de rocas gneissicas alteradas y zonas de cizalla, existiendo en algunos sectores relleno de arcilla en las fracturas. Por otra parte, dado el complejo geotécnico a ser inyectado, durante la vida útil en el seno de discontinuidades rocosas (diacclasas y fallas, fisuras o fracturas en general), la lechada descripta endurecida asegura: a) menor contracción durante el fraguado y con esto una mayor ligazón a lo largo de las paredes de la fisura en la roca y menor riesgo de reapertura. b) mayor densidad y mayor resistencia mecánica debido al mayor contenido de cemento. Con ello subsecuentemente se obtiene una mayor resistencia a la erosión física y a la tubificación. c) menor porosidad, menor permeabilidad y una mayor resistencia mecánica o de liga. Subsecuentemente se obtiene una resistencia química mayor contra la lixiviación y una mayor durabilidad del material inyectado.

### INYECCIONES - PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

En función de las características del macizo, se representó en un plano la ubicación de la malla de taladros primarios tanto para la ejecución de las inyecciones de consolidación como para la ejecución de la pantalla de impermeabilización (Figura 8). La Figura 9 muestra en perfil la pantalla de impermeabilización mientras que en la Tabla 1 se brindan las profundidades adoptadas de los taladros de inyección tanto los de las inyecciones de consolidación como los de la pantalla de impermeabilización. En la determinación de dichas profundidades se tuvo en cuenta lo solicitado en los informes previos (Giaconi, 2009) como se verá más adelante y el relevamiento del espesor del hormigón de regularización de la fundación desde donde se ejecutaron los taladros.

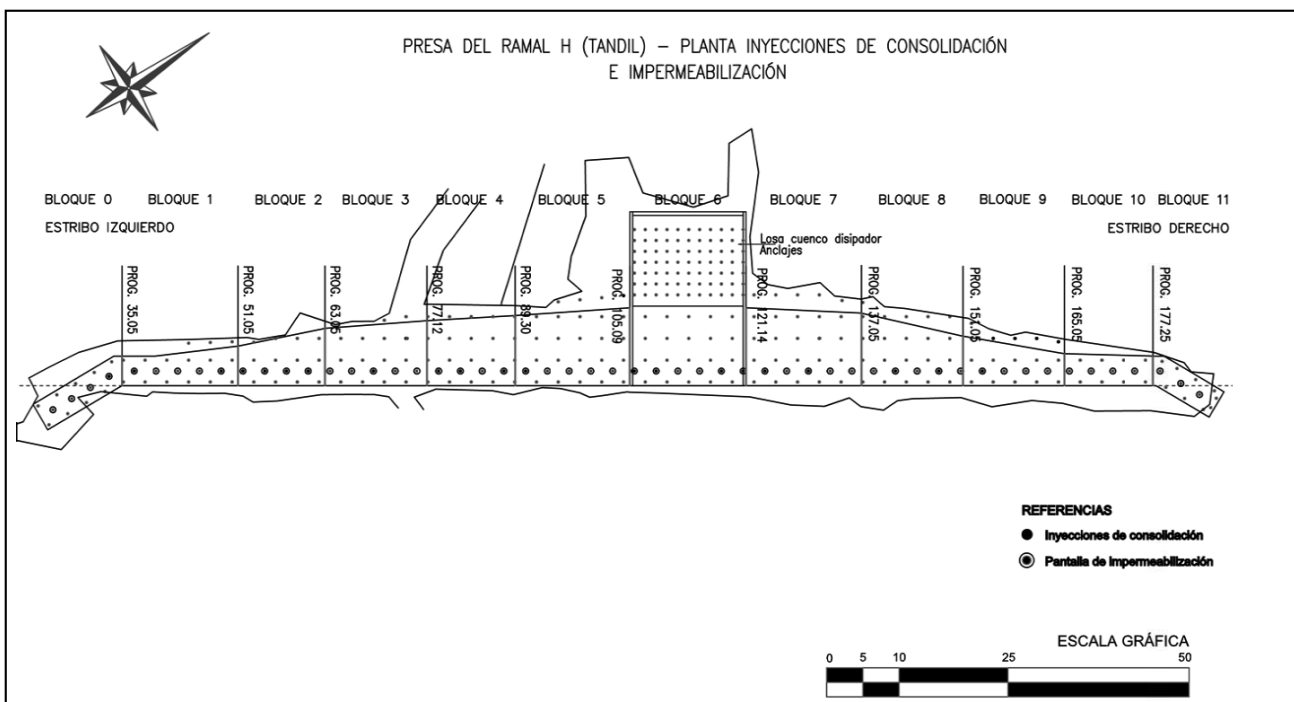


Figura 8. Ramal H - Planta - Plano de inyecciones primarias



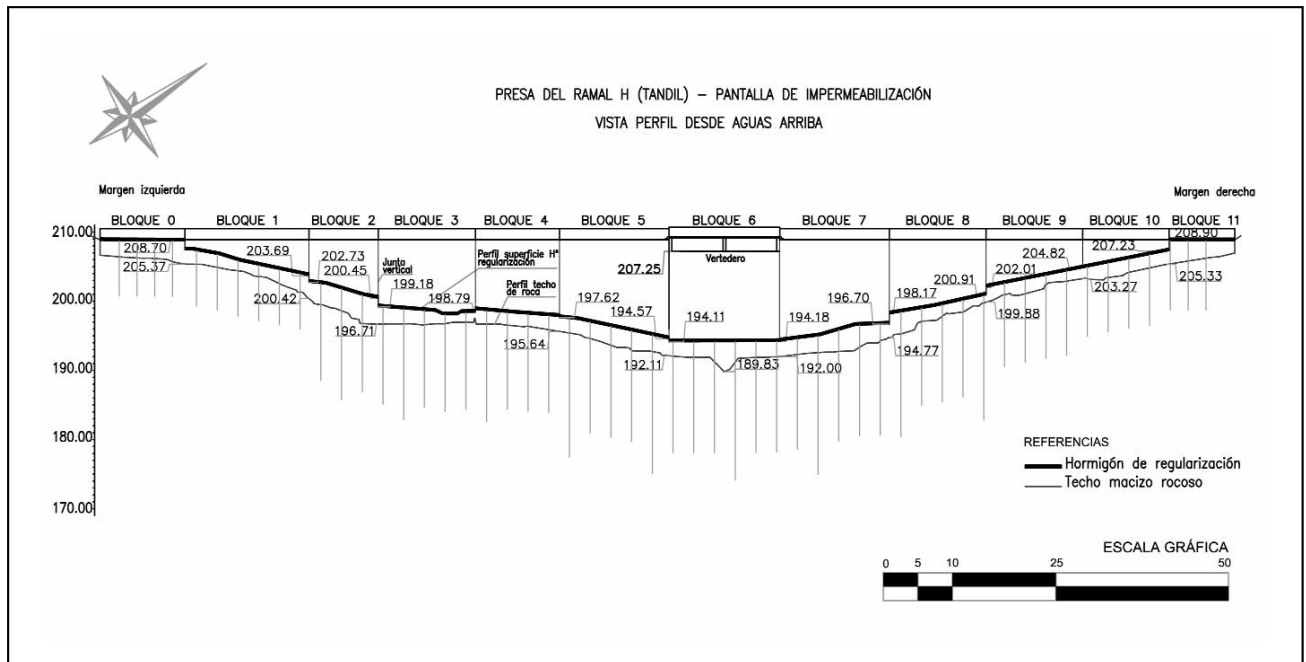


Figura 9. Ramal 11 - Perfil inyecciones primarias

Tabla 1. Profundidades de los taladros de inyección desde el hormigón de regularización

TALADROS INYECCIONES / BLOQUES	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Taladros de Consolidación Profundidad (m)	8	8	10	10	10	12	14	12	12	10	8	8
Taladros de Impermeabilización (orden primario) Profundidad (m)	8	8	16	16	16	20	20	20	18	12	10	10
Taladros de Impermeabilización (órd. subsecuentes) Profundidad (m)	8	8	14	14	14	16	16	16	14	12	10	10

En la Figura 10, se ilustra sobre la heterogeneidad geotécnica descrita en párrafos anteriores mediante el mapeo de la alteración de las rocas (Dearman et al., 1989) en la superficie de fundación a la cual se sobre impuso a escala la malla de taladros primarios de inyección (Giacconi, 2011).

Los taladros de inyección se dispusieron de manera vertical tomando en cuenta la distribución de las discontinuidades y la configuración y dimensión de la presa. Previamente en estereogramas se plotearon los diferentes juegos de diaclasas que se obtuvieron en el mapeo de la superficie de la fundación. Para el caso de la pantalla de impermeabilización, vale indicar que es común configurar los taladros de inyección en forma perpendicular a la superficie del terreno (Weaver y Bruce, 2007). Sin embargo resulta óptimo para la inclinación de discontinuidades entre 0° y 60°, la disposición vertical o, en su defecto, ejecutar los taladros con una inclinación a 60° respecto a la

horizontal ya que se intersecan la mayor cantidad de fracturas posibles (Houlsby, 1990), cuestión no aplicable en nuestro caso.

En ambos tipos de inyecciones, se inyectó de manera ascendente desde fondo de taladro en tramos de longitud decreciente hasta el contacto roca - hormigón de regularización. En este último tramo se inyectó siempre a presiones menores llegando hasta un límite máximo de 10 bares.

#### Tratamiento de consolidación - Parámetros

Estas inyecciones tienen como objetivos específicos homogeneizar el comportamiento del macizo de fundación mejorando las características geomecánicas y, subsecuentemente, la impermeabilidad de la roca de cimentación a profundidades someras, en donde algunas discontinuidades pudiesen estar abiertas y conectadas, sea debido a la calidad intrínseca de la roca o por efecto de las excavaciones mediante voladura.

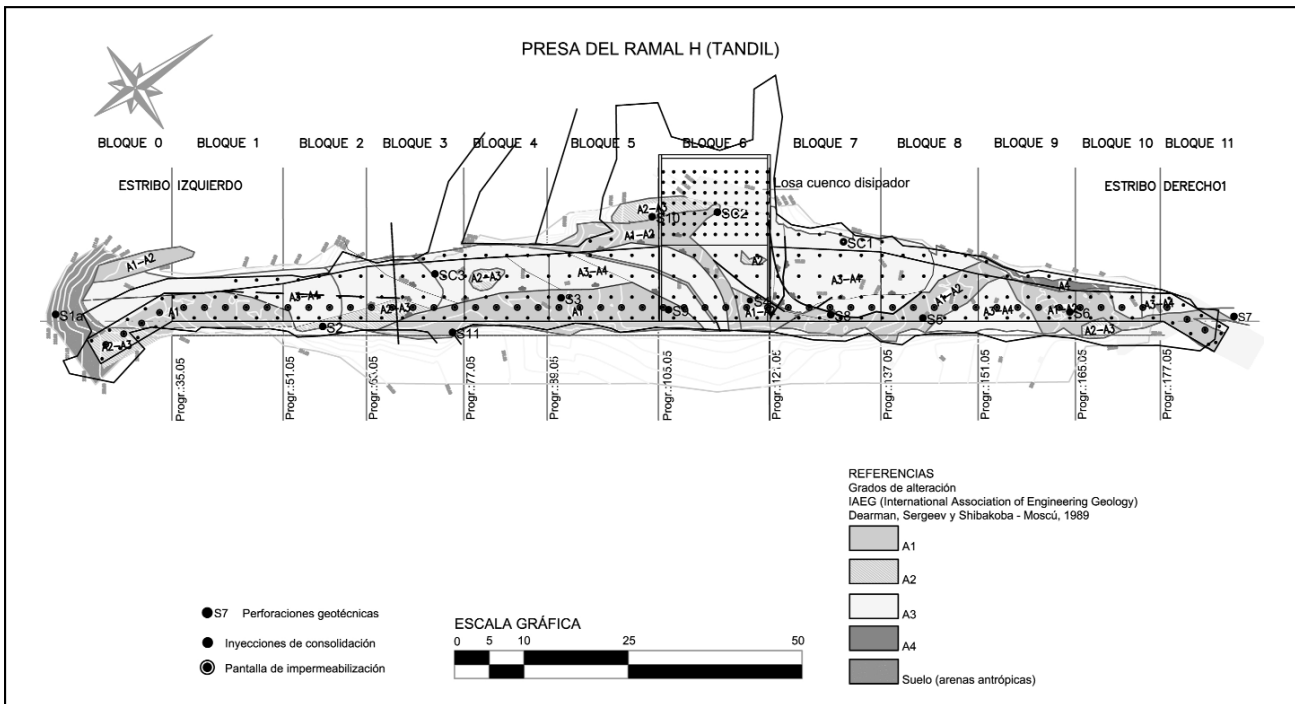


Figura 10. Planta - Plano Relevamiento Geotécnico - Alteración / Planta taladros de inyección primarios.

La malla de inyecciones primarias de consolidación es un arreglo de barrenos dispuestos en filas espaciadas a igual distancia en ambas direcciones. La matriz básica cubrió una zona establecida por dos hileras separadas por 3 metros entre sí, adaptándose dicho espaciamiento en el área de los estribos a las dimensiones de los mismos. La primera fila de las inyecciones de consolidación se dispuso a partir de 0,5 m. aguas abajo de la línea de empuje de aguas arriba de la presa. Luego se dispusieron las sucesivas líneas hacia agua abajo dentro del área de la presa disponiéndose finalmente una fila adicional fuera de ella hacia aguas abajo a los efectos de reforzar el tratamiento con el objeto de mitigar posibles deformaciones de la fundación ante requerimientos excepcionales en el pie de presa.

La Figura 11 ilustra sobre el equipo utilizado para la perforación de los taladros de inyección.



Figura 11. Sobre la superficie del hormigón de regularización se observa el equipo de perforación de los taladros de inyección sobre el lateral derecho de la fundación de la presa y personal colocando el sistema de obturación para la inyección de un tramo en un taladro de consolidación.

Por otra parte y respecto a la profundidad de los taladros, en los estudios previos se sugirió profundizar las inyecciones de consolidación hasta cotas inferiores a 184 metros en la zona central de la presa, desde progresivas 110 a 150 m. En ese sector se relevaron fallas cortantes hasta cota 185 m en los sondeos S8 y S4 (ver Figura 10), "...debiéndose tener en cuenta que la presencia de dichas fallas podrá ameritar, incluso, el uso de las inyecciones de "puntada". (Giaconi, 2009).

El GIN determinado para este tipo de tratamiento en función de la parametrización realizada y su ajuste en pruebas de campo de intensidad de inyección ejecutadas previamente al tratamiento definitivo, fue GIN 1000 (intensidad moderada-baja).

Sus parámetros fueron: Presión Máxima: 20 kg/cm<sup>2</sup> - Volumen Máximo: 150 litros/m - Caudal Máximo de Inyección por metro de taladro: 3 litros/minuto - VCTI = 25 l/m.

### Tratamiento de impermeabilización mediante pantalla - Parámetros

El objetivo de la ejecución de esta pantalla es producir una barrera al paso de los filetes de flujo subterráneo de tal manera de aumentar el recorrido de los mismos y, de ese modo, disminuir el gradiente de permeabilidad por debajo del área de la presa a los efectos finales de mitigar el efecto de subpresión. Su ejecución fue posterior a la ejecución de las inyecciones de consolidación.

Para el análisis de las operaciones de inyección en roca, el uso internacional ha estandarizado a las Unidades Lugeon, más que en un término de volumen de agua admitido en determinado tiempo, en un término de velocidad de ingreso. Así, una Unidad Lugeon es muy aproximadamente igual a 1,2 a 1,4 x 10<sup>-5</sup> cm/seg.

La inyectabilidad del macizo se estima a partir del ensayo Lugeon, según los siguientes criterios:

- 1 Lugeon es el grado de permeabilidad encontrado en aquellas fundaciones casi compactas que no requieren de inyección.
- 3 Lugeons representa una fundación en donde puede llegar a requerirse algo de inyección más, si la presa será de concreto o en donde el agua es tan preciosa o la formación de canales probable, cualquier filtración debe ser detenida.
- 5 lugeons garantiza una inyección extensiva para una presa de concreto o una inyección leve para algunas presas de tierra o de enrocado.
- 10 lugeons ( $1,4 \times 10^{-4}$  cm/seg.) garantiza la inyección para la mayoría de los tipos de presa, siendo 20 lugeons la expresión típica de sitios altamente diaclasados con relativamente poca abertura de diaclasas.
- 100 lugeons ( $1,4 \times 10^{-3}$  cm/seg.) se encuentra en sitios altamente diaclasados con diaclasas relativamente abiertas. Cabe aclarar en este punto que 100 lugeons representa el límite máximo de razonabilidad, de tal manera que admisiones mayores de 100 se registran mejor como "100" que especificando el valor medido. Son tan grandes que su valor exacto no tiene significado.

Enunciadas las pautas de inyectabilidad de un macizo en base a la valoración de los ensayos Lugeon, vale la reflexión que se estima demarca el tratamiento general respecto a la necesidad y características de una pantalla de impermeabilización ya que las consideraciones que se viertan respecto a este tópico *"deberán estar en un acuerdo con las hipótesis de subpresión que fije el proyecto, sobre todo teniendo en cuenta que la presa permanecerá llena sólo unas 24 horas y muy esporádicamente..."* (Giacconi, 2009)

Independientemente de ello, la permeabilidad del macizo rocoso sigue constituyendo, aunque no único como se verá inmediatamente, el aspecto dominante respecto a la pertinencia de la ejecución de inyecciones de impermeabilización. Para dilucidar sobre esta cuestión se analizó específicamente la zona geotécnica 2 por lo que se excluyó del análisis de permeabilidad a las rocas alteradas de la zona geotécnica 1 ya que la misma fue excavada. Para esta evaluación en el caso del ramal H se podría discurrir, de manera equivocada, que los ensayos de presión o absorción de agua tipo Lugeon realizados no habrían demostrado absorciones de gran importancia ya que los promedios indicarían valores bajos. Sin embargo, así como se han registrado valores 0 (cero) de absorción también se han detectado zonas de absorción muy alta por la presencia de discontinuidades en el subsuelo. Entra aquí en consideración el "efecto alcance" de las investigaciones (Giacconi, 2009).

Por otra parte, una cortina de inyecciones, además de 1) la absorción de agua bajo presión en Unidades Lugeon, también se evalúa teniendo en cuenta otros factores de entrada: 2) el valor del agua en casos de pérdidas de la misma por filtración (despreciable, muy valiosa, etc.). Este es un valor económico social y no un valor cualicuantitativo a los efectos técnicos. 3) Las posibilidades de erosión interna (piping) de la fundación en caso de que la misma sea atravesada por flujos de agua. 4) Tipo de presa.

En definitiva, como resultado de la evaluación de los factores propuestos se determinó:

- 1) Respecto a la absorción de agua bajo presión: Existe anisotropía. El estribo de margen derecha presenta valores Lugeon superiores a 10 llegando incluso a 100. En la zona media de la presa sobre margen izquierda se aprecian valores de 9 Lugeon y 6 Lugeon y en el estribo de la misma margen valores muy altos (UL 79), estando todos los valores mencionados referidos a ensayos en la zona geotécnica 2. 2) Valor del agua en caso de existir filtraciones = despreciable ya que la presa es para control de crecidas extraordinarias temporarias y no para almacenamiento y consumo, sea humano y/o para riego. 3) Prevención de erosión interna (piping) = Sí, ya que hay materiales alterados que pueden sufrir este proceso. 4) Tipo de presa: gravedad de hormigón.

Acreditada la necesidad de impermeabilización al influjo que el criterio de permeabilidad máxima eventual de un macizo rocoso para la implantación de una presa de hormigón es de 3 Unidades Lugeon, se dispuso la realización de una cortina de inyecciones ubicada entre la primera y segunda hilera de inyecciones de consolidación, es decir a 2 metros de la línea de empate de aguas arriba y cuyo dimensionado se encuentra ilustrado en las Figuras 8 y 9 y en la Tabla 1 precedentes. Las inyecciones de impermeabilización serán realizadas una vez finalizadas las inyecciones de consolidación.

Para ello, el GIN determinado en pruebas previas de campo realizadas para este tipo de tratamiento en función de las condiciones geológico-geotécnicas de la fundación fue GIN 1500 (intensidad moderada) adoptando una presión máxima de 25 kg/cm<sup>2</sup> y volumen máximo de 150 l/m, lo cual indica la adopción de una envolvente de rasgos particulares para el caso respecto a la estándar de los autores del método. El objeto de tal determinación encuentra fundamento en las características del macizo y la necesidad de evitar desplazamientos superficiales, hidrofracturación y eventual hidrogateo, teniéndose además en cuenta que la presión máxima de mayor compromiso que deberá soportar el macizo con el embalse lleno sólo será durante 24 hs., cuando ocurran precipitaciones de recurrencia milenaria. En este aspecto cabe consignar que la altura máxima de la presa sobre la superficie de fundación es de 18,60 metros.

Sus parámetros fueron: Presión Máxima: 25 kg/cm<sup>2</sup> - Volumen Máximo: 150 litros/m - Caudal Máximo de Inyección por metro de taladro: 3 litros/minuto - VCTI = 16 l/m. (Figura 12).

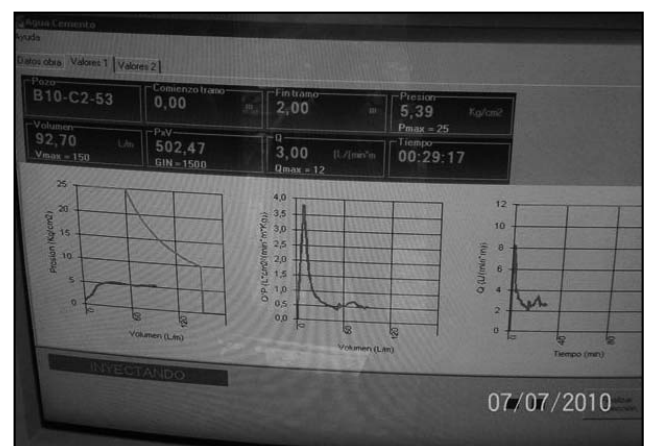


Figura 12. Método GIN. Monitor de control parámetros de inyección de prueba, previo a la definición de los parámetros definitivos de tratamiento.

La marcha de inyecciones de impermeabilización se realizó en forma secuente y obligatoria para los taladros primarios, luego los secundarios y terciarios. De los valores de absorción determinados y en función del valor crítico resultante para la intensidad de GIN adoptada, se realizó la intensificación de la pantalla en órdenes sucesivos intercalados entre los anteriores conforme lo descripto por Lombardi (Lombardi, 2003).

## RESULTADOS OBTENIDOS

En total se realizaron 11968 metros de perforación en los cuales se inyectaron 340,04 toneladas de cemento, lo cual determina un promedio general de 28,4 kg de cemento por metro de taladro inyectado, tal como se destaca en la Tabla 2, en tanto que en la Figura 13 se brinda información sobre la disposición final del des13 se observa la intensidad de tratamiento desarrollado, debiéndose tener en consideración que la heterogeneidad geotécnica detectada en todas las fases del trabajo, tanto de estudio como constructivas, arrojó como resultado que existiera una marcada absorción diferencial de las inyecciones en función de la calidad de roca objeto de la fundación.

### Inyecciones de consolidación

En las inyecciones de consolidación se inyectaron 288,4 toneladas de cemento en 9564 metros de taladros. Ello arroja un promedio de 33,2 kg de cemento por metro de taladro, lo

cual significa un valor de absorción moderado-bajo (Deere, 1982). Sin embargo, el tratamiento poseyó valores de absorción muy dispares en algunos sectores respecto de otros como puede observarse en la Figura 6 donde la concentración de taladros es referencia manifiesta de un tratamiento laborioso con la necesidad de ejecución de taladros de órdenes superiores hasta lograr cerrar las absorciones por debajo del valor crítico.

En el bloque 6 (vertedero) las tareas de saneamiento y tratamiento dental efectuados determinaron que, en las posteriores tareas de inyección, los valores de absorción superficiales y subsuperficiales registrados fueran de bajo rango y sólo en los sectores donde se mapeó en dicho bloque la presencia de pegmatitas fisuradas se registraron absorciones de alto valor puntual lo cual ameritó el tratamiento puntual de tal situación. En el área del cuenco de disipación se realizaron inyecciones de consolidación para finalmente construir anclajes.

Por tanto, existió consonancia entre los relevamientos geológico-geotécnicos, el tratamiento de la fundación efectuado mediante saneamiento tratamiento dental y la intensidad de la disposición de los taladros de inyección y su absorción respectiva.

Un caso aparte fue la concreción del tratamiento en ambos estribos. Las características morfológicas de la presa y las cotas respectivas de excavación coadyudaron a la existencia de un mayor gasto relativo de lechada de inyección por su afloramiento en superficie en sectores adyacentes al área de fundación.

Tabla 2. Inyecciones cementíceas. Valores de absorción registrados en el tratamiento.

INYECCIONES CEMENTÍCEAS	Taladros (m)	Cemento (t)	t/m	kg/m
TRATAMIENTO DE CONSOLIDACIÓN	9564	288,438	0,0332	33,2
PANTALLA DE IMPERMEABILIZACIÓN	2404	51,602	0,0215	21,5
<b>TOTALES</b>	<b>11968</b>	<b>340,04</b>	<b>0,0284</b>	<b>28,4</b>

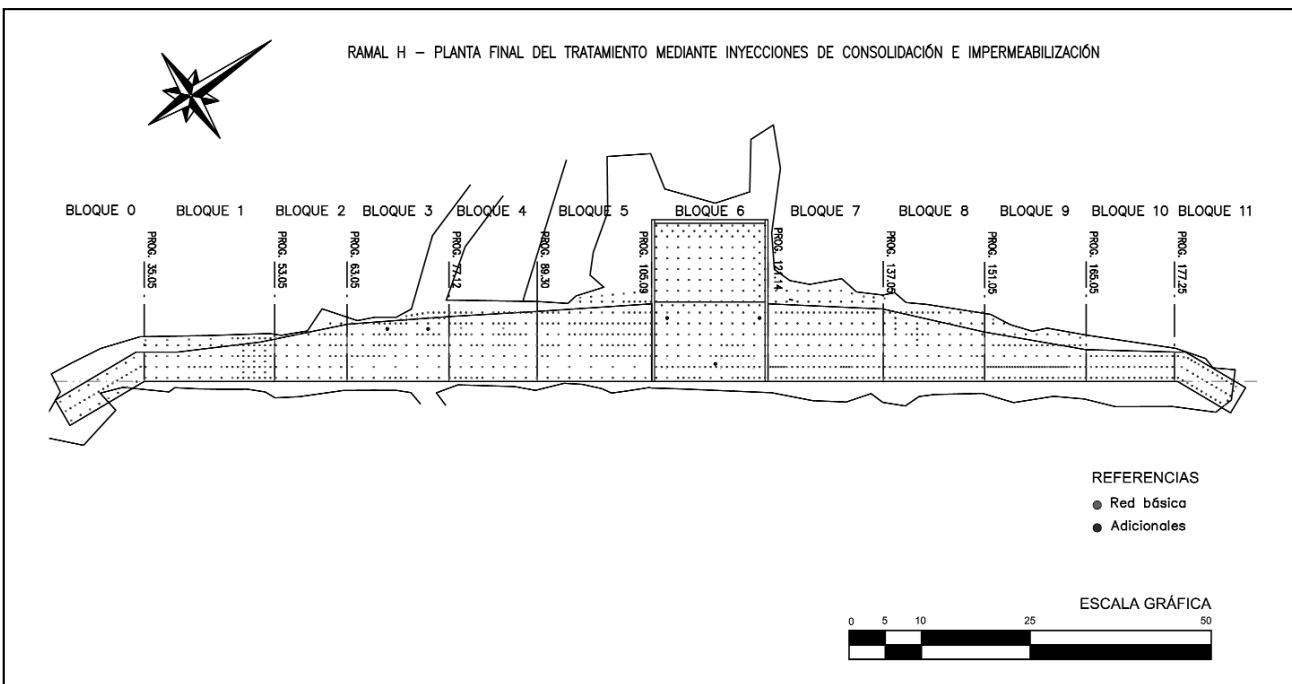


Figura 13. Ramal H

En definitiva se cumplió con la técnica en cuanto a que las inyecciones primarias llenaran las fisuras mayores, la serie siguiente de inyecciones secundarias llenaran las fisuras más anchas no colmatadas con las primarias, y así siguiendo hasta la inyección de las fisuras más finas. En la Figura 14 se visualiza la disposición de los taladros de inyección de diferentes órdenes en un sector de la presa.



**Figura 14. Bloque 1. Al fondo, obturador instalado en un taladro de inyección. En primer plano se observan los taladros de inyección de consolidación finalizados y demarcados para su individualización y control del desarrollo de la operación del tratamiento.**

### Inyecciones de impermeabilización

Respecto a la pantalla de impermeabilización, la discriminación entre taladros de distintos órdenes y sus respectivas admisiones en toneladas/metro (t/m) y kilogramos/metro (kg/m), arroja el detalle ilustrado en la Tabla 3.

Para su ejecución se realizaron 2404 metros de taladros y se inyectaron 51,6 toneladas de cemento. La absorción promedio fue de 21,5 kg/m, el cual responde a un valor bajo (Deere, 1982)

La admisión de lechada de inyección en la pantalla de impermeabilización en los bloques 7 a 10 (mayormente pegmatitas poco alteradas muy fisuradas) fue mucho más significativa que lo acontecido respecto a la misma pantalla de impermeabilización en los bloques 2 a 5 (rocas gneissicas inalteradas a poco alteradas con baja intensidad de fisuración). El relativo elevado consumo de cemento por metro de taladro inyectado en el orden cuartario respecto a la marcha de los demás

órdenes de la pantalla de impermeabilización que se referencia en la Tabla 3 (28,7 kg/m) se debe precisamente a la inyección de las pegmatitas muy fisuradas en el lateral derecho de la presa en contacto con gneis alterado. En el bloque central de la presa (Bloque 6) la marcha de la pantalla no mostró mayores dificultades al influjo de los ya mencionados previos tratamientos superficiales y subsuperficiales de saneamiento existiendo en profundidad también muy bajos valores de absorción, signo de la existencia de condiciones hidráulicas de baja conductividad.

Al igual que en las inyecciones de consolidación, la concreción del tratamiento de impermeabilización en ambos estribos poseyó las mismas dificultades por las mismas razones.

### EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO REALIZADO - SÍNTESIS

Las perforaciones de control ejecutadas luego de finalizadas las tareas de inyección arrojaron como resultado la efectiva respuesta del macizo al tratamiento visualizándose la presencia efectiva de lechada fraguada en las discontinuidades. (Figura 15)



**Figura 15. Control de la inyección. Lechada fraguada relleno fisuras en fragmento de testigo de perforación (gneis alterado y cizallado).**

Si bien existen controversias respecto a la utilización de los ensayos Lugeon post tratamiento mediante inyecciones como elemento de evaluación de la efectividad alcanzada, en las perforaciones de control del tratamiento se realizaron dichos ensayos fundamentalmente en la zona de consolidación del macizo no así en la verificación de la pantalla de impermeabilización debido al tipo y características del cierre de los taladros verificado durante las tareas y a las recomendaciones de reconocidos investigadores (G. Lombardi, 2001) que desaconsejan tal práctica.

**Tabla 3. Inyecciones de impermeabilización. Detalle de absorciones por número de orden**

PANTALLA DE IMPERMEABILIZACIÓN	Taladros (m)	Cemento (t)	t/m	kg/m
Primarias, Secundarias y Terciarias (cada 3 m)	758	16,671	0,0220	22,0
Cuartarias (cada 1,5 m)	546	15,667	0,0287	28,7
Quintarias (cada 0,75 m)	792	13,927	0,0176	17,6
Sextarias (cada 0,375 m)	260	3,747	0,0144	14,4
Otras (puntuales)	48	1,59	0,0331	33,1
<b>TOTALES</b>	<b>2404</b>	<b>51,602</b>	<b>0,0215</b>	<b>21,5</b>

La decisión respecto a la realización de dichos ensayos se fundamenta en las absorciones Lugeon registradas en sectores críticos, no sólo en los estudios previos (Giaconi, 2009 y Flores, 2009) sino también en los realizados en el ámbito de la excavación durante el desarrollo de las perforaciones geotécnicas complementarias realizadas a los fines de ajustar la cota definitiva de fundación en los bloques de mayor compromiso estructural (Giaconi, 2011). Las ubicaciones de las perforaciones se encuentran en la Figura 11 y sus coordenadas se informan en la Tabla 4.

La descripción sintética de las características litológicas de los testigos extraídos en las perforaciones adicionales puede

observarse en la Tabla 5, lo cual ameritó también estudios geotécnicos complementarios realizados en laboratorio respecto a la determinación de las características geomecánicas de resistencia y deformación (Giaconi, 2011).

Los ensayos de admisión de agua realizados, previos al tratamiento mediante inyecciones, en dichas perforaciones complementarias SC1 a SC3, arrojaron valores Lugeon muy altos, evidencia de la presencia de un macizo de características geotécnicas comprometidas (Tabla 6).

**Tabla 4. Ubicación y coordenadas de las perforaciones geotécnicas realizadas en los estudios previos (S) y durante las tareas de excavación (SC)**

BLOQUE	PERFORACION	X	Y	COTA (m)
	Mojón Eje MI	5578413,83	5867539,14	214,07
0	S12	5578413,8	5867539,19	213,91
0	S1a	5578427,4	5867559,09	212,83
2	S2	5578450,56	5867589,82	204,86
3	S11	5578461,82	5867604,75	202,35
3	SC3	5578453,5	5867607,41	196,73
5	S3	5578466,56	5867620,43	200,73
5	S10	5578464,34	5867637,84	197,74
6	S9	5578476,71	5867632,22	197,55
6	SC2	5578489,1	5867645,96	192,10
6	S4	5578482,23	5867642,64	197,87
7	S8	5578490,5	5867651,06	199,61
7	SC1	5578482,9	5867658,50	192,80
8	S5	5578498,39	5867661,72	203,57
9	S6	5578509,62	5867679,66	206,78
11	S7	5578523,52	5867698,78	209,89
	Mojón Eje MD	5578527,56	5867705,03	211,04

**Tabla 5. Características litológicas relevadas en las perforaciones geotécnicas complementarias**

BLOQUE	PERFORACIÓN	LITOLOGÍA
B7	SC1	De 0,00 m a 7,70 m: Gneis muy alterado y fisurado. RQD muy malo
B6	SC2	De 0,00 m. a 4,75 m: Gneis muy alterado y fisurado. RQD muy malo
B3	SC3	De 0,00 m a 3,90 m: Gneis muy alterado. RQD muy malo. De 3,90 a 6,00 m: Gneis sano. RQD 100%

**Tabla 6. Valores Lugeon en perforaciones complementarias, previo a las tareas de inyección.**

BLOQUE	PERF.	COTA (m)	PROF. TOTAL (m)	ENSAYO LUGEON 1 Intervalo (m)	VL 1	ENSAYO LUGEON 2 Intervalo (m)	VL2
7	SC1	192,80	7,70	1 a 2,3	75	2,7 a 7,7	15
6	SC2	192,10	4,75	1,5 a 4,75	Pérdida de agua	-	-
3	SC3	196,73	6,00	0,50 a 3,90	60	3,90 a 6,00	0

Los ensayos Lugeon en las perforaciones de verificación post tratamiento mediante inyecciones fueron ejecutados de manera especialmente controlada no verificándose en las curvas de inyección, determinadas por la marcha de presiones de ensayo (tres ascendentes y dos descendentes) vs. sus respectivas admisiones, los efectos de hidrofracturación.

Como puede observarse en la Tabla 7 respecto a la condición litológica del macizo descrita en cada perforación post tratamiento, las profundidades de auscultación no fueron ma-

yormente profundas debido precisamente a que la búsqueda se orientó básicamente a detectar la eficacia del tratamiento de consolidación cerrando las fisuras preexistentes donde precisamente, por arbitrio de las características litológicas del macizo superior, pudiera haber un mayor compromiso mecánico e hidráulico frente a la estabilidad de la presa.

El resultado de los ensayos Lugeon post tratamiento arroja como dato emergente que las absorciones se redujeron de manera manifiesta, tal como lo ilustra la Tabla 8. (Figura 16)

**Tabla 7. Características litológicas de las perforaciones de control post tratamiento.**

BLOQUE - PERF.	LITOLOGÍA
B7 - A	De 3,80 (techo roca) a 10 m: Gneis poco alterado. RQD regular a bueno. De 10 a 13 m: Gneis poco alterado a sano. RQD > 75 %.
B7 - B	De 6,00 (techo roca) a 9,70 m: Gneis poco alt. a sano. RQD reg. a bueno. De 9,70 a 13,85 m: Gneis sano. RQD > 75 %.
B4 - C	De 2,00 (techo roca) a 3,80 m: Gneis alterado a sano. RQD regular. De 3,80 a 7,10 m: Gneis inalterado. RQD > 75 %.
B4 - D	De 2,25 (techo roca) a 4,6 m: Gneis alterado a sano. RQD regular a malo. De 4,6 a 9 m: Gneis inalterado. RQD 100%
B5 - E	De 2,85 (techo roca) a 5,50 m: Gneis inalterado. RQD 100 %
B5 - F	De 3,60 (techo roca) a 5,00 m: Gneis poco alterado a inalt. RQD > 75 %.
B6 - G	De 4,65 (techo roca) a 11,40 m: Gneis alterado. RQD regular a malo. De 11,40 a 12,30 m: Pegmatita inalterada y muy fracturada (RQD < 25 %)
B6 - H	De 5,3 (techo roca) a 6,9 m.: Pegmatita inalt. y muy fracturada (RQD < 25%) De 6,9 a 7,9 m: Gneis alterado. RQD < 25% De 7,9 a 9,1: Gneis sano. RQD > 75% De 9,1 a 9,8 m: Pegmatita inalterada y muy fracturada (RQD < 25%) De 9,8 a 12,9 m.: Gneis sano. RQD 100%.
B3 - I	De 2,70 (techo roca) a 4,70 m: Gneis poco alterado a inalt. RQD > 75 % De 4,70 a 7,30 m. = Gneis inalterado. RQD 100 %.

Cabe consignar que desde la superficie (0,00 m) hasta la profundidad del techo de roca corresponde al espesor del H° de reemplazo mediante tratamiento dental y/o H° de regularización

**Tabla 8. Valores Lugeon en perforaciones de control post tratamiento inyecciones.**

BLOQUE - PERF.	COTA (m)	Prof. Total (m)	Prof. H° tratamiento dental y/o regularización (m)	Prof. en roca° (m)	ENSAYO LUGEON 1 Intervalo (m)	VL 1	ENSAYO LUGEON 2 Intervalo (m)	VL2
B7 - A	196,7	13	3,8	9,2	5 a 9,9	0	10 a 13	0
B7 - B	196,7	13,85	6	7,85	6 a 9,7	0	9,7 a 13,85	0
B4 - C	198,5	7,1	2	5,1	2,10 a 7,10	1	-	-
B4 - D	198,1	9	2,25	6,75	2,25 a 6,00	0	6,00 a 9,00	0
B5 - E	197,2	5,5	2,85	2,65	2,85 a 5,50	0	-	-
B5 - F	195,6	5	3,6	1,4	3,60 a 5,00	1	-	-
B6 - G	194,11	12,3	4,65	7,65	6,00 a 11,00	3	-	-
B6 - H	194,11	12,9	5,3	7,6	5,80 a 10,80	3	-	-
B3 - I	198	7,3	2,7	4,6	3,00 a 7,30	2	-	-



Figura 16. Control del tratamiento de inyecciones. Ejecución de ensayos Lugeon en el Bloque 4 - Perforación C.

## CONCLUSIONES

- 1) La investigación geotécnica llevada a cabo durante la etapa del proyecto de detalle y estudios complementarios mostró un macizo heterogéneo desde el punto de vista de sus propiedades geotécnicas. La heterogeneidad observada es producto de procesos de fracturamiento y alteración diferencial.
- 2) El proceso de construcción permitió observar más exhaustivamente las características del macizo y ajustar el esquema de recomendaciones para el análisis de la presa. La observación del fondo de excavación permitió detectar que, entre las progresivas 80 m a 110 m y 120 m a 145 m, se presentó en aproximadamente la mitad de aguas arriba roca de superior calidad y, en espesores variables entre 2 m y 5 m en la mitad de aguas abajo, un macizo rocoso de calidad inferior. Asimismo, en los sectores de presa comprendidos entre las progresivas 62 m y 80 m en la margen izquierda, se detectó un sector

subsuperficial con condiciones geotécnicas sensiblemente inferiores.

- 3) Para la mitigación de las heterogeneidades registradas se dispuso la realización de tratamiento geotécnico mediante inyecciones cementíceas.
- 4) Las intensidades de inyección aplicadas fueron GIN 1000 (moderada-baja) para la consolidación y GIN 1500 (moderada) para la ejecución de la pantalla de impermeabilización
- 5) Las absorciones promedio de lechada de inyección para toda la presa, 28,4 kg/m, responden al límite inferior de clase la moderada-baja (Deere, 1982).
- 6) La heterogeneidad detectada del macizo rocoso en todas las fases del trabajo, tanto de estudio como constructivas, y la absorción de lechada de inyección arrojó como resultado que existiera una marcada absorción diferencial de las inyecciones en función de la calidad de roca objeto de la fundación.
- 7) En los sectores donde los ensayos Lugeon previos al tratamiento dieron como resultado valores de orden de magnitud alta, luego del tratamiento efectuado se registraron valores no mayores de 3 UL, siendo en la mayoría de los casos menores o iguales a 1 UL.
- 8) Tales condiciones ameritan como resultado final un tratamiento efectivo del macizo acorde a los objetivos originalmente planteados.
- 9) Finalmente, se logró el objetivo impuesto de homogeneización de las condiciones mecánicas e hidráulicas del macizo de apoyo de la presa, siendo que las intensidades GIN adoptadas bajo control del sistema computarizado de las inyecciones permitió llevar a cabo los trabajos con un alto grado de eficacia y seguridad controlándose los volúmenes inyectados y fundamentalmente las presiones del tratamiento en tiempo real evitando desplazamientos no queridos y la consecuente posibilidad de hidrofracturación dadas las características comentadas del macizo rocoso de fundación.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BIENIAWSKY, Z.T. 1989.  
Engineering Rock Mass  
Classifications. Wiley
- BARTON, N. LIEN, R. AND LUNDE, J. 1974.  
Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support.  
*Rock Mechanics. Springer Verlag, vol. 6, pp 189-236.*
- DALLA SALDA, L.; SPALLETTI, L; POIRÉ, D.; DE BARRIO, R.; ECHEVESTE, H.; BENIALGO, A. 2006.  
Tandilia. Temas de Geología Argentina I.  
*INSUGEO, Serie Correlación Geológica, 21: 17-46. Págs. 17 a 45.*
- DEARMAN, W., SERGEEV, E Y SHIBAKOVA, V. 1989.  
Engineering Geology of the Earth, Moscú
- DEERE, D. U. 1982.  
Cement-bentonite grouting. Grouting in Geotechnical Engineering.  
*Proceedings of conference sponsored by the Geotechnical Engineering Division.*
- FLORES, R. M. 2009.  
Presa del Ramal H - Informe de Ingeniería Geotécnica.  
(Inédito).



- FLORES, R. M. Y GIACONI, L. M..2010.  
Aspectos geotécnicos de la fundación de la Presa del Ramal H.  
*Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG). Mendoza (Argentina).*
- FLORES, R.M. Y MASSABIE, A.C. 2008.  
Ejecución de una galería piloto para investigar un macizo granítico muy figurado.  
*XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG)*
- GIACONI, L. M. 2009.  
Presa del Ramal H -  
*Informe de Geología y Geotécnia. (Inédito).*
- GIACONI, L. M. 2011.  
Presa del Ramal H -  
*Informe complementario de Geología y Geotécnia. (Inédito).*
- GOODMAN, R.E. 1989.  
Introduction to Rock Mechanics.  
*John Wiley & Sons.*
- HÖEK, E Y DIEDERICHS, M.S. 2006.  
Empirical estimation of rock mass modulus,  
*International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.*
- HOULSBY, A. C. 1990.  
Construction and design of cement grouting.  
*A guide to grouting in rock foundations. John Willey and Sons. New York. 442 pp*
- LOMBARDI, G. 1990.  
La Permeabilite et L'injectabilite des massifrocheuxfissures.  
*Geotech N-51.Págs.5-29.*
- LOMBARDI, G. AND DEERE, D.1993  
Grouting desing and control using the GIN principle,  
*Water Power & Dam Construction.p 15 - 22*
- LOMBARDI, G. 2001.  
Presa de enrrocados con cara de hormigón.  
*Usos de los criterios GIN para consolidación e impermeabilización de la roca. N. Ref.: 102.1-R-141*
- LOMBARDI, G. 2003.  
Grouting of Rock Masses.  
*Third International Conference on Grouting Treatment. Geotechnical Special Publication.N° 120.Págs. 164 - 197*
- PECK, R.B., HANSON, W.E. Y THORNBURN, T. H. 1982.  
Ingeniería de Cimentaciones.  
*Editorial Limusa.*
- SERRANO, A. Y OLALLA, C. 2001.  
Cálculo de Cimentaciones Superficiales en Roca.  
*Ingeopres N° 90.*
- WEAWER, K. D. Y BRUCE, D.A. 2007.  
Dam Foundation Grouting.  
*Revised and expanded. Edition ASCE press. 473 pp.*