

*Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2010  
CAMSIG 2010, Mendoza, Argentina*

## Aspectos geotécnicos de la fundación de la presa Ramal H, Tandil

Ing. Roberto Mario Flores

[robmarflores@ciudad.com.ar](mailto:robmarflores@ciudad.com.ar)

*UTN – Facultad Regional La Plata*

Lic. en Geología Luis Mario Giaconi

[lmgiaconi@gmail.com](mailto:lmgiaconi@gmail.com)

*Cátedra de Geología Aplicada. Facultad de Ciencias Naturales y Museo UNLP*

**RESUMEN:** El presente artículo tiene por objeto explicitar los criterios de diseño adoptados para la elección de los parámetros resistentes para el cálculo de la estabilidad al deslizamiento, de los parámetros de deformabilidad, de las tensiones admisibles y la distribución de permeabilidades en la roca de fundación de la presa para laminación de crecidas – Ramal H - Tandil. Se trata de una presa de gravedad de hormigón rodillado en curso de ejecución con una altura máxima de 18,35 m. Se presenta el marco geológico del área de la obra y la metodología utilizada para la zonificación geotécnica y la elección de los parámetros de diseño. Esto se realizó sobre la base de la aplicación de teorías de Mecánica de Rocas reconocidas a partir de la comparación con macizos de similar comportamiento a través de la aplicación de clasificaciones geotécnicas. Los datos fueron obtenidos sobre la base de una campaña de investigación geotécnica realizada a tal efecto. Se muestran análisis estadísticos según las clasificaciones geomecánicas más usuales (RMR, Q y GSI). Los trabajos de excavación han permitido la definición final de las superficies de fundación mediante la realización de algunas correcciones respecto a la estimación original.

*Palabras clave:* Fundación – Presa – Macizo rocoso – Clasificaciones Geomecánicas

**ABSTRACT:** This article aims to explain the design criteria adopted for the choice of the resistant parameters to calculate the sliding stability, the deformability parameters, the allowable pressure and the permeability distribution in the rock foundation of the flood control dam - Ramal H - Tandil. This is a rollcrete gravity dam under construction with a maximum height of 18.35 m. It is presented the geological setting of the area and the methodology used for geotechnical mapping and the selection of the design parameters. This was done on the basis of the application of theories of Rock Mechanics recognized from the comparison with rock mass of similar behavior through the application of geotechnical classifications. The input data were obtained from a geotechnical survey research made to this effect. It is shown a statistical analysis that has been established according to the most common geomechanical classifications (RMR, Q and GSI). The excavation works have led to the final definition of the areas of foundation according to some corrections on the original assumption.

*Key Words:* Foundation – Dam – Rock mass – Geomechanical classification

## 1 INTRODUCCIÓN

La denominada Presa del Ramal H (en construcción), sita en la ciudad de Tandil (Prov. de Buenos Aires), tiene una longitud de coronamiento de 160 m. y una altura sobre el plano de fundación de 18,35 m. El cuerpo de la presa es de gravedad, de hormigón rodillado. Se encuentra asentado sobre un macizo rocoso que ha sido investigado mediante sísmica de refracción y estudios directos mediante la ejecución de doce perforaciones a rotación con extracción continua de testigos y ejecución de ensayos Lugeon y veintiuna calicatas ejecutadas con retroexcavadora. Fue licitada por la Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas y está siendo construida por la Empresa Constructora Daniel Giacoia. El objetivo de su construcción es la laminación de crecidas extraordinarias que anegan los barrios de sector oriental de la ciudad.

## 2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

### 2.1 *Cubierta de material suelto*

Está compuesta por suelos orgánicos, depósitos sedimentarios fluviales y eólicos y materiales friables de origen antrópico. 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 del cuerpo de la presa y del cuenco disipador.

### 2.2 *Macizo rocoso*

Está compuesto por Rocas del Basamento Cristalino Precámbrico. Macroscópicamente, las rocas dominantes en el área de fundación son granitoides, gneises gris verdosos de composición tonalítica que han sido intruídos por rocas de origen pegmatítico de grano muy fino, de color rosado. La presencia de estas últimas se detecta mayormente en margen derecha aunque se han observado también en margen izquierda. En corte delgado las rocas no alteradas o con poco grado de alteración básicamente constituyen rocas granudas, milonitas de composición tonalítica y rocas microgranudas, milonitas de un protolito aplítico o granítico, de grano fino.

### 2.3 *Grado de alteración*

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:

Forma 1: La zona alterada es paralela a la superficie del terreno y a la roca no alterada. Representado por una capa alterada, de espesor variable, que suprayace a la roca no alterada y que es sinuosa pero paralela/subparalela al terreno natural o superficie topográfica.

Forma 2: La zona alterada se ubica entre discontinuidades. La alteración se produjo a expensas de las zonas fracturadas de inclinación vertical a subvertical, que han dejado importante material intersticial de zona fracturada, brecha, microbrecha, etc.

Forma 3: Variante de la anterior pero de mayores dimensiones. Corresponde a la alteración en zonas de cizallamiento (arenización) y/o de intenso fracturamiento superficial. Roca alterada de manera intensa, como mínimo tipo A4 (completamente alterada) en los niveles superficiales del macizo presentando también en ocasiones intensa lajosidad.

Forma 4: Roca masiva con bajo grado de alteración o no alterada (fresca). Subyace a la forma 1 y muy posiblemente se encuentre interceptada vertical y subverticalmente por las formas 2 y 3 anteriormente descriptas. En términos generales las rocas objeto de fundación, gneises gris verdosos y pegmatitas aplíticas rosadas, son rocas frescas o débilmente alteradas, A1 o A1-A2, con cristales brillantes, observándose en general una leve decoloración del macizo en las paredes de los planos de discontinuidad.

### 2.4 *Estructura*

La estructura del macizo rocoso responde a la existencia de un amplia zona regional de fajas ultramilonitizadas de rumbo E-O. Consecuencia de la reactivación terciaria producida por la Orogenia Andina 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.

En resumen, estructuralmente:

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 explicarían las tendencias descriptas.

b) El cuadro estructural detectado reconoce cuatro familias de discontinuidades a nivel superficial y subsuperficial. Tres de ellas poseen inclinación subvertical y la restante es subhorizontal. Los rumbos generales son NE-SO, NO-SE y E-O.

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 arenización (modelo de alteración 3) en el estribo de margen derecha y en los sondeos a medio faldeo y en margen izquierda a medio faldeo y en el estribo subyacentes a los depósitos arenosos de origen antrópico. Las rocas alteradas resultantes fueron excavadas a los fines de la fundación.

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.

#### 2.4.1 Orientación de discontinuidades

El rumbo de la traza elegida es N40°E. En margen derecha, en general los rumbos de las discontinuidades dominantes respecto al eje de la presa guardan una relación desfavorable respecto a

la estabilidad del estribo toda vez que las mejor caracterizadas poseen una disposición subparalela o diagonal al eje unos 30° al norte con planos de inclinación de alto ángulo y/o a 45 ° mayormente hacia aguas abajo. Coadyuva a esta definición la existencia de cuatro familias de discontinuidades y sus orientaciones generales.

En margen izquierda se detecta la presencia, si bien en menor magnitud aparente que en la otra margen, de fajas de cizalla de rumbos diagonales (E-O) al eje de hábito 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 vías preferenciales de circulación de agua en el subsuelo.

### 3 CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

#### 3.1 Clasificaciones Geomecánicas

Para caracterizar el macizo rocoso se han considerado 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 por Z.T.Bieniawski y otros del Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) de Sud África (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 (Rock Quality Design), 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 Tunneling Quality Index) ha sido desarrollado por Barton, Lien y Lunde en el Norwegian Geotechnical Institute. El índice tiene la siguiente expresión:  $Q = (RQD/J_n) (J_r/J_w/SRF)$ , siendo  $J_n$  un parámetro que evalúa la cantidad de familias de discontinuidades,  $J_r$  la rugosidad y  $J_w$  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), desarrollado por Evert Hoek y que 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 solamente como referencia a partir de la relación conocida con el índice RMR ( $GSI = RMR - 5$ ).

En la Fig. 1 se puede apreciar que los valores de RQD son bajos mejorando con la profundidad. En la misma figura se muestra un análisis estadístico del índice de clasificación RMR (valores promedio, máximo y mínimo para cada profundidad). En la misma se aprecia que, como es lógico también la clasificación del macizo tiene una mejora progresiva con la profundidad.

Profundidad		RMR			RQD		
de [m]	a [m]	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
0	0,5	29,0	29	29	0	0	0
0,5	1	33,3	29	39	0,0	0	0
1	1,5	39,7	20	66	3,9	0	43
1,5	2	37,8	20	66	4,5	0	50
2	2,5	40,3	28	66	4,5	0	50
2,5	3	47,3	25	71	33,4	0	100
3	3,5	41,6	24	70	18,6	0	71
3,5	4	44,7	24	74	31,5	0	92
4	4,5	46,4	24	72	30,1	0	100
4,5	5	44,0	25	75	14,1	0	100
5	5,5	43,3	25	73	1,5	0	17
5,5	6	47,7	25	69	22,0	0	100
6	6,5	48,5	25	76	25,2	0	100
6,5	7	49,8	25	76	35,5	0	100
7	7,5	52,1	39	81	26,2	0	100
7,5	8	53,4	40	81	32,2	0	100
8	8,5	54,5	40	81	27,3	0	100
8,5	9	54,5	35	76	26,0	0	100
9	9,5	60,4	40	86	36,1	0	100
9,5	10	59,7	35	86	27,8	0	100

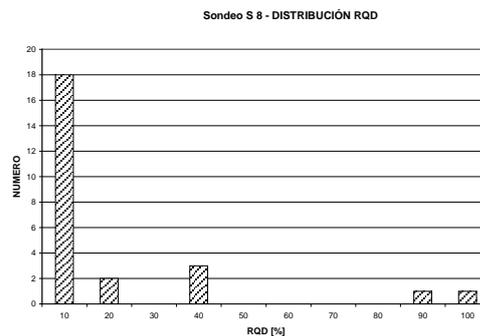
**Figura 1.** Análisis estadístico variación RMR y RQD con la profundidad.

La variación del índice de clasificación Q fue analizada con histogramas de frecuencia para cada parámetro como el que se muestra en la Fig. 2 para el RQD. En la Fig. 3 se muestra en el caso de un

sondeo el análisis de dispersión de la citada clasificación.

### 3.2 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.



**Figura 2.** Análisis estadístico variación RQD en cada sondeo.

SONDEO S 8 - Q - ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD					
$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$					
$Q = \frac{10}{20} \cdot \frac{0,5}{2} \cdot \frac{1}{2,5} = 0,050$	Típico				
$Q = \frac{30}{17} \cdot \frac{3}{1} \cdot \frac{1}{1} = 5,294$	Máximo				
$Q = \frac{10}{20} \cdot \frac{0,5}{4} \cdot \frac{1}{2,5} = 0,025$	Mínimo				
Rango de Aproximación					

**Figura 3.** Análisis estadístico variación RQD en cada sondeo.

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). Ref. [1].

Otro de los criterios de aplicación es el que desarrollado por R.Peck 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. Ref. [1].

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 han adoptado como parámetros de corte del macizo a los que surgen de la clasificación del CSIR comentada más arriba (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. Ref. [2] y [3].

En este caso se consideró:

$$\sigma_{adm} = \sigma_{rot} / 5 = (q_u * N\phi + 2c (N\phi)^{1/2}) / 5 \quad (1)$$

$$\text{Donde } N\phi = \text{tg}^2(45^\circ + \phi / 2), \quad (2)$$

con  $\phi$  = ángulo de fricción interna y  $c$  = cohesión del macizo rocoso estimados a partir de su clasificación RMR.

Finalmente se ha considerado una teoría de evaluación más moderna, desarrollada por Serrano y Olalla y publicada en el 2001, Ref. [4]. En la misma se define una Carga de hundimiento como:

$$P_h = \beta (N_\beta - \zeta) \quad (3)$$

Donde

$$\beta = m \sigma_{ci} / 8 = (m_i \sigma_{ci} / 8) e^{((RMR - 100)/28)} \quad (4)$$

y

$$\zeta = 8 s / m^2 = (8 / m_i^2) e^{((RMR - 100)/25.2)} \quad (5)$$

Siendo  $m_i$  un parámetro que depende del tipo de roca y RMR el parámetro de clasificación. El valor de  $N_\beta$  se obtiene a partir de la inclinación de la carga (denominada  $i_2$ ) y de la denominada sobrecarga externa normalizada:

$$\sigma_{01}^* = \sigma_1 / \beta + \zeta \quad (6)$$

Con  $\sigma_1$  = sobrecarga en el plano de fundación.

Se debe poner de resalto que dado que se trata de una presa resulta trascendente que el método de evaluación incluya la inclinación de la carga.

Según el método el coeficiente de seguridad a considerar tiene la expresión:

$$F = F_p * F_m \quad (7)$$

en la cual el primer término ( $F_p$ ) tiene en cuenta la variación estadística y se obtiene a partir del valor de la resistencia a compresión simple y el índice RMR y el segundo la incertidumbre respecto al comportamiento plástico del macizo. Éste último depende del tipo de fracturación del macizo y de la resistencia a la compresión simple del material.

Se compararon resultados entre los distintos métodos y se adoptaron las tensiones admisibles en distintos niveles y sectores de presa, zonificando la recomendación con criterio geotécnico.

En la Fig. 4 se muestran gráficos, a título de ejemplo, con los resultados obtenidos en uno de los sondeos realizados.

### 3.3 Módulo de Deformabilidad

A partir de los datos de clasificación del macizo rocoso presentados en los puntos anteriores se pueden obtener valores del módulo de deformabilidad utilizando fórmulas reconocidas en la bibliografía internacional. Del análisis de las mismas (Ref. [5]) surge que la aplicación de la expresión (8) de Höek and Diederichs (2005) 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.

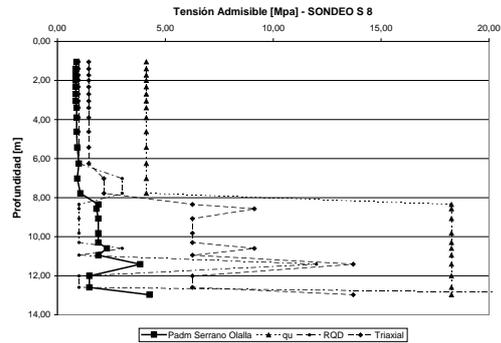


Figura 4. Variación de  $\sigma_{adm}$  según distintas teorías.

$$E_{mr} = (0,02 + ((1-D)/2) / (1 + e^{((60+15D-GSI)/11)})) \quad (8)$$

Dónde:  $E_{mr}$  = Módulo de Deformación del Macizo Rocoso [GPa]; GSI = Índice de Resistencia Geológica (Geological Strength Index) según Höek; D = Factor de Perturbación Mecánica (Disturbance Factor), Ref. [6].

La aplicación de este criterio ha permitido zonificar con criterio geotécnico a lo largo de la traza y adoptar valores de cálculo del módulo de deformabilidad.

La tabla de la Fig. 5 muestra los valores medios y la dispersión observada en un paso intermedio de la evaluación de la tensión admisible y el módulo de deformabilidad a lo largo de toda la traza.

### 3.4 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 (1989) (Ref. [7]). Ver la tabla de la Fig. 6.

Profundidad		$\sigma_{adm}$ [Mpa]			$E_{mr}$ [Gpa]		
de [m]	a [m]	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
0	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
0,5	1	2,0	0,6	4,2	0,9	0,5	1,2
1	1,5	5,5	0,6	12,8	1,4	0,5	3,3
1,5	2	4,4	0,6	10,9	1,2	0,5	3,3
2	2,5	5,6	0,6	12,8	1,3	0,5	3,3
2,5	3	12,9	0,6	45,7	1,7	0,1	3,9
3	3,5	11,2	0,4	45,7	1,7	0,1	4,8
3,5	4	14,0	0,4	47,4	2,1	0,1	5,0
4	4,5	13,7	0,4	47,4	1,9	0,1	5,0
4,5	5	9,7	0,8	29,0	1,8	0,1	5,2
5	5,5	9,2	0,6	29,0	1,5	0,1	3,4
5,5	6	16,5	1,0	47,0	2,3	0,1	6,1
6	6,5	17,9	0,7	47,0	2,6	0,1	9,0
6,5	7	20,9	1,1	61,3	2,6	0,1	9,0
7	7,5	22,3	1,1	61,3	3,0	0,7	11,9
7,5	8	23,1	1,1	73,8	3,1	0,7	11,9
8	8,5	21,4	1,3	52,2	3,7	0,7	11,9
8,5	9	22,4	0,8	52,2	3,4	0,7	9,0
9	9,5	26,2	2,2	53,9	3,7	0,8	9,0
9,5	10	29,6	8,7	53,9	3,7	0,8	9,0

Figura 5. Dispersión observada en la evaluación de la Tensión Admisible y el Módulo de Deformabilidad.

CLASIFICACIÓN RMR	TIPO DE ROCA	c [Kpa]	$\phi$ [°]
0 < RMR < 20	V	20	15
21 < RMR < 40	IV	100	20
41 < RMR < 60	III	200	30
61 < RMR < 80	II	300	40
81 < RMR	I	400	50

Figura 6. Parámetros de corte recomendados.

### 3.5 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. En la Fig. 7 se muestra un gráfico en el que se relaciona ésta última con los valores de una permeabilidad equivalente K en m/s calculada a partir de las pruebas de agua. Se observa que no existe ninguna tendencia clara que las vincule.

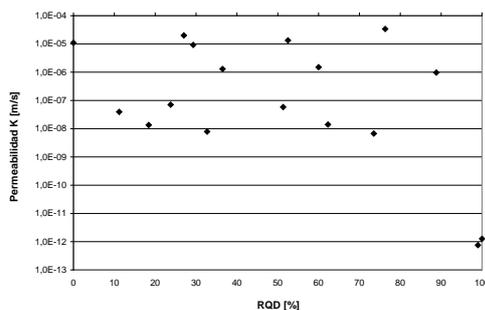


Figura 7. Relación entre la permeabilidad equivalente K y el RQD medio en el tramo ensayado.

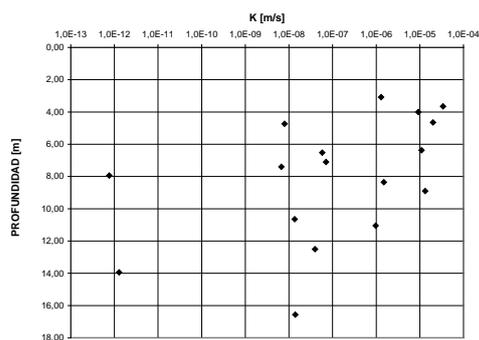
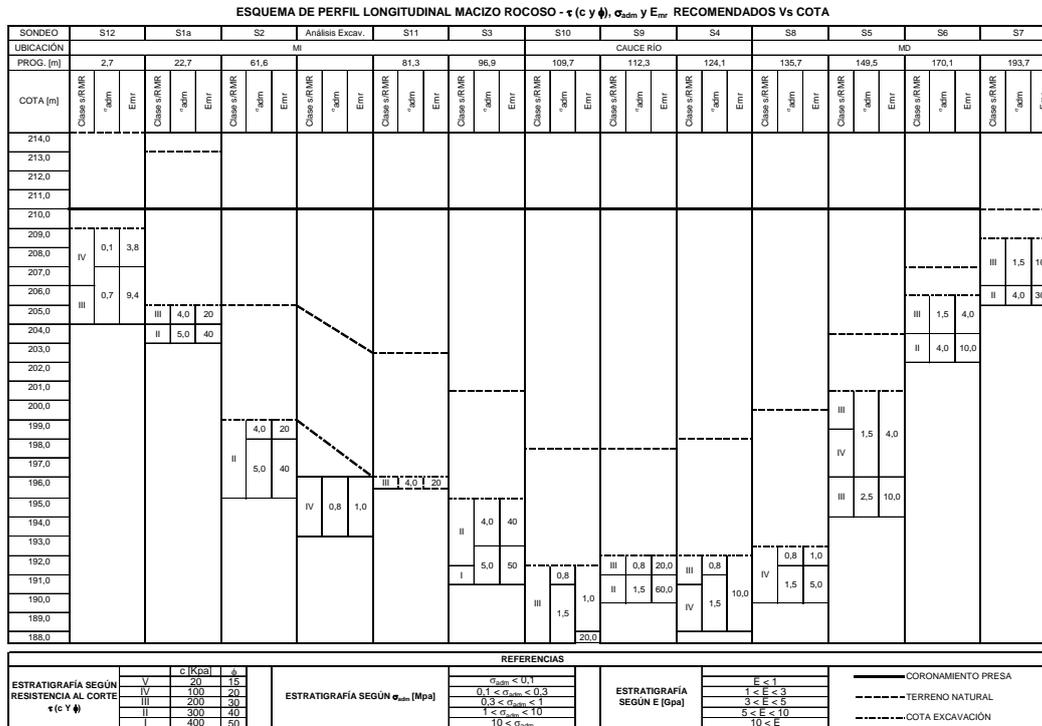


Figura 8. Relación entre la permeabilidad equivalente K y la profundidad en distintos sondeos.

### 3.6 *Zonificación Geotécnica*

A partir de los análisis de parámetros geotécnicos mostrados en los puntos anteriores se confeccionó un perfil longitudinal simplificado en el que se han zonificado los parámetros de interés. La Fig. 9 muestra tal zonificación.



**Figura 9.** Esquema de Perfil Longitudinal.

#### 4 CONCLUSIONES

La presa Ramal H se encuentra ubicada en la Ciudad de Tandil, interactúa con un macizo rocoso de rocas ígneas del Basamento Cristalino Precámbrico.

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 detalles 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 Fig. 9.

El proceso de construcción, en curso de ejecución en la actualidad, 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 ha permitido detectar que entre las progresivas 80 m a 110 m y 120 m a 145 m se presenta en aproximadamente la mitad de aguas arriba roca de superior calidad y en espesores variables entre 2 m y unos 5 m en la mitad de aguas abajo un macizo rocoso de calidad inferior.

En la Fig. 10 se presenta un resumen de las recomendaciones ajustadas a las condiciones de obra.

Asimismo, en los sectores de presa comprendidos entre las progresivas 62 m y 80 m en la margen izquierda, entre los sondeos S 2 y S 11 se ha

detectado un sector con condiciones geotécnicas sensiblemente inferiores a las encontradas en los sondeos de investigación previamente ejecutados. En este momento se están realizando labores de investigación complementaria en ese lugar a efectos de tomar eventuales medidas correctivas.

PROGRESIVAS [m]		ROCA TIPO	c	$\phi$	$\sigma_{adm}$	$E_{nr}$	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 10.** Recomendaciones finales, corregidas a partir de observaciones de campo durante la construcción.

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.

## 5 REFERENCIAS

- [1] Peck, R.B., Hanson, W.E. y Thornburn, T. H.. Ingeniería de Cimentaciones. Limusa. 1982.
- [2] Goodman, R.E. Introduction to Rock Mechanics. John Wiley & Sons. 1989.
- [3] Suárez, J:A. Lecciones de Mecánica de Rocas. CEILP. 1985.
- [4] Serrano, A. y Olalla, C. Cálculo de Cimentaciones Superficiales en Roca. Ingeopres N° 90. 2001.
- [5] Flores, R.M., Massabie, A.C.. Ejecución de una galería piloto para investigar un macizo granítico muy figurado. XIX CAMSIG. 2008.
- [6] Hoek, E, Diederichs, M.S., Empirical estimation of rock mass modulus, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2006.
- [7] Bieniawski, Z.T. Engineering rock mass classifications, Wiley, 1989.

