



GEOLOGÍA Y GEOTECNIA DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE ADUCCIÓN CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUACOLDA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

Javier Lizandro Mendoza Recabal

Profesor Guía: Msc. Abraham Elías González Martínez
Profesores Comisión: Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn
Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Resumen.

Se realizó una evaluación geológica y geotécnica de las rocas que conforman la península Guacolda, con miras a definir el diseño y la construcción del túnel de aducción de la central termoeléctrica proyectada en este sitio. La litología predominante del trazado del túnel corresponde a granodioritas y dioritas de grano medio a fino, moderadamente alteradas, con intrusiones de diques andesíticos, pertenecientes a la subunidad Brechas Magmáticas del Complejo Intrusivo Carrizal Bajo (Arévalo y Welkner, 2008). Las estructuras principales corresponden a planos de falla de hasta 2 m de ancho con orientación NS a NNW-SSE con manteos subverticales y sistemas de diaclasas cuya frecuencia aumenta de poniente a oriente. Los tres sondajes y ensayos de permeabilidad realizados en la etapa de ingeniería básica, permitieron estimar las calidades de roca, donde se aplicó el sistema de clasificación RMR (Rock Mass Rating) propuesto por Bieniawski (1989) y el índice Q de Barton (2000). Este último método se utilizó para definir el sostenimiento necesario para asegurar la estabilidad del túnel, el cual se basa en una combinación de pernos de roca, malla de acero y hormigón proyectado con fibras.

Palabras Claves: Túnel de aducción, Clasificación geomecánica, RMR, índice Q.

1 Introducción

El Complejo Termoeléctrico Guacolda, ubicado en la comuna de Huasco (Figura 1.1), comienza en el año 2008 un proyecto de ampliación de sus instalaciones con el fin de aumentar al doble su capacidad de generación eléctrica, alcanzando una potencia instalada de 608 MW. Para el funcionamiento de las nuevas unidades generadoras se ha diseñado un sistema de refrigeración de turbinas mediante un túnel de aducción que conduce el agua de mar desde la bocatoma hasta las unidades de generación. El lineamiento del túnel tiene una longitud de 318 m y un trazado de orientación aproximada EW. La sección de la excavación es de tipo arco de medio punto de 14 m².

1.1 Objetivo General

El objetivo de este estudio es evaluar la condición geológica y geotécnica de las rocas de la Península Guacolda para el diseño y construcción del túnel de aducción de la central termoeléctrica.

1.2 Objetivos Específicos

- Mapeo geológico, geotécnico y estructural del lineamiento del túnel.
- Definir, supervisar y registrar la campaña de sondajes geotécnicos en la etapa de proyecto.
- Interpretación y análisis de ensayos de permeabilidad.
- Clasificación geomecánica de las rocas que conforman el lineamiento del túnel en la etapa de ingeniería aplicando el sistema Q de Barton



Figura 1.1. Ubicación y vista panorámica de la península Guacolda en la comuna de Huasco.

(2000) y el RMR (Rock Mass Rating) propuesto por Bieniawski (1989).

- Definición de los elementos de soporte de la excavación según las calidades geotécnicas de la roca.
- Comprobación del sostenimiento del túnel mediante análisis de estabilidad de cuñas.

2 Marco Geológico

En el área de estudio se distinguen unidades de rocas metamórficas de edad Paleozoico Superior, definidas como Complejo Epimetamórfico Chañaral (Godoy y Lara, 1998). Estas se encuentran intruidas por un cuerpo de composición bimodal diorítica-granítica denominado Complejo Plutónico Carrizal Bajo de edad Triásico Superior (Arévalo y Welkner, 2008), cuyos afloramientos en el borde costero conforman la península Guacolda. Las unidades sedimentarias afloran principalmente en las terrazas altas del valle del río Huasco y se encuentran

representadas por la Formación Canto del Agua (Moscoso, 1982). Los afloramientos rocosos están parcialmente cubiertos por depósitos eólicos que conforman campos de dunas y arenales ampliamente distribuidos en la zona (Figura 1.2).

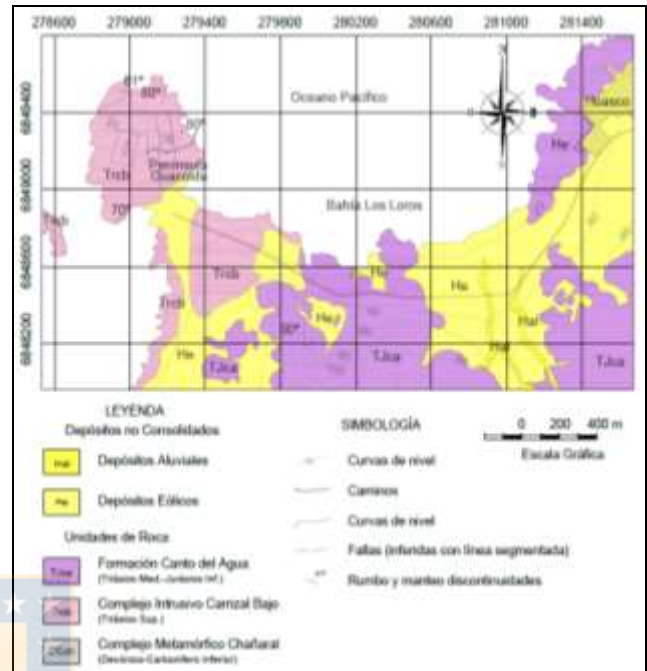


Figura 1.2. Mapa Geológico Regional del área de estudio (Modificado de Arévalo y Welkner, 2008).

2.1 Rocas Metamórficas

2.1.1 Complejo Epimetamórfico Chañaral (Devónico-Carbonífero Inferior)

Las rocas metamórficas fueron denominadas inicialmente por Moscoso (1979) como Metamorfitas de la Costa, posteriormente Godoy y Lara (1998) las definen como Complejo Epimetamórfico Chañaral, asignándole una edad Devónico-Carbonífero. Se exponen principalmente en el área de Chañaral y aflora, de forma discontinua, paralela a la costa entre los 25°-29°S (Godoy y Lara, 1998). La litología predominante corresponde a metareniscas, cuarcitas, pizarras y filitas, con un grado de metamorfismo bajo a muy bajo. El protolito sedimentario de este complejo corresponde a depósitos de corrientes de turbidez, en un ambiente de abanico submarino, de facies intermedias a distales. Las asociaciones litológicas han llevado a proponer que este complejo se habría formado en un prisma de acreción (Welkner *et al.*, 2006).

2.2 Rocas Intrusivas

2.2.1 Complejo Intrusivo Carrizal Bajo (Triásico Superior)

Corresponde a un complejo intrusivo bimodal de edad Triásico constituido por cuerpos plutónicos homogéneos relativamente contemporáneos, enjambres de diques y brechas magmáticas. Internamente el complejo está formado por un apilamiento de cuatro cuerpos plutónicos subtabulares paralelos, de composiciones alternantes entre dioritas y granitos que intruyen al Complejo Epimetamórfico Chañaral, desarrollando en éste un halo de metamorfismo de contacto (Arévalo y Welkner, 2008).

En el área de estudio los afloramientos corresponden principalmente a cuerpos irregulares de brechas magmáticas que se distribuyen en una franja discontinua en el borde costero. Las brechas magmáticas están formadas por fragmentos dioríticos a diorítico-cuarcíferos de piroxeno y anfíbola, inmersos en una matriz granodiorítica a tonalítica de anfíbola y biotita. Estos cuerpos aparecen frecuentemente inyectados por una red de diques cortos felsíticos o vetillas de la misma composición (Arévalo y Welkner, 2008).

2.3 Rocas Sedimentarias

2.3.1 Formación Canto del Agua (Triásico Medio-Jurásico Inferior)

Unidad de rocas sedimentarias que corresponden a una secuencia de areniscas y conglomerados cuarcíferos, lutitas, calizas y calcarenitas con abundante contenido fósil (Moscoso, 1982), cuya potencia total alcanza los 2.100 m. Los afloramientos en el área se extienden al este de la península Guacolda, donde sobreyace en discordancia al Complejo Epimetamórfico Chañaral.

2.4 Depósitos no consolidados

2.4.1 Depósitos aluviales

Corresponden a depósitos no consolidados constituidos por gravas y arenas, con escasa o nula estratificación y selección pobre, que se encuentran rellenando las quebradas actuales. Estos materiales son el resultado de un conjunto de procesos de transporte y sedimentación de origen aluvial.

2.4.2 Depósitos eólicos

Conjunto de depósitos compuestos principalmente por arenas, que conforman campos de dunas y arenales, ampliamente distribuidos en la zona costera.

3 Metodología

El trabajo se dividió en dos etapas: la primera comprende los estudios para el diseño básico del túnel y la segunda corresponde a las labores efectuadas durante la excavación del túnel.

3.1 Estudios para el diseño básico

En esta etapa se realizaron los levantamientos geológicos y estructurales en superficie, los sondajes exploratorios y ensayos de permeabilidad, se definieron las características geológicas y geotécnicas del macizo rocoso en el trazado del túnel y determinaron los criterios de diseño. Se definió el tipo de soporte de acuerdo al sistema de Clasificación Geomecánica de Barton (2000) y al finalizar esta etapa una revisión del sostenimiento a partir de un análisis de estabilidad de cuñas en la sección del túnel mediante el software *Unwedge*.

3.2 Etapa de construcción

Consistió en la inspección técnica del túnel en terreno, incluyendo el mapeo geológico y geotécnico diario durante el avance de la excavación, en la clasificación geomecánica de acuerdo al sistema Q y RMR y la recomendación del soporte del túnel.

4 Resultados

4.1 Condición geológica en el lineamiento del túnel

El trazado del túnel está proyectado en su totalidad a través de brechas magmáticas pertenecientes al Complejo Intrusivo Carrizal Bajo. Estas rocas se presentan en la península Guacolda, como un conjunto heterogéneo de granodioritas de biotita y anfíbol de grano medio a fino, con clastos de diorita de tamaño que van desde algunos centímetros a decímetros e intrusiones de diques andesíticos. Tanto la matriz como los clastos se encuentran moderadamente alterados a clorita y epidota con abundante presencia de vetillas de cuarzo, calcita y óxidos.

Desde el punto de vista estructural, las rocas que conforman la península han experimentado un continuo proceso de deformación frágil, que se

manifiesta en el desarrollo de zonas de fallas y sistemas de diaclasas.

Fallas: estas estructuras se observan en superficie como zonas o planos de discontinuidades de trazado recto, de disposición principalmente vertical a subvertical, a través de los cuales la roca se encuentra intensamente fracturada y cizallada, con planos que en ocasiones corresponden a espejos de falla. La traza superficial de las fallas varía entre 10 a 40 m de longitud y sus espesores van desde 3 cm, (para el caso de los planos rectos) hasta 2 m (para el caso de zonas de falla).

La proyección estereográfica (Figura 4.1), obtenida con el software *Dips 5.1*, de los polos de las fallas reconocidas en el trazado del túnel muestra una tendencia general NS a NNW-SSE y manteos principalmente subverticales con inclinaciones que van de 77° a 82° en ambos sentidos.

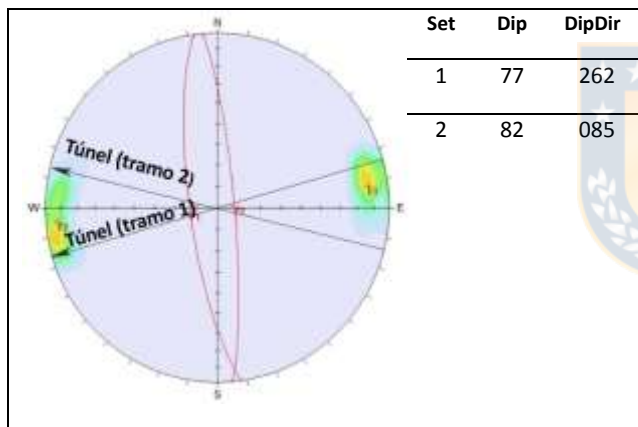


Figura 4.1. Proyección estereográfica de concentración de polos, con las orientaciones de los sistemas de fallas principales. Las flechas negras muestran las orientaciones principales del trazado del túnel.

Diaclasas: las diaclasas son las estructuras frágiles predominantes en la península Guacolda. En general se presentan como sistemas de discontinuidades muy penetrativas y persistentes en la roca, definiendo planos levemente espaciados. Algunos sistemas de diaclasas se encuentran en estrecha relación con las zonas de falla, atravesando a las rocas en frecuencias diversas y que le confiere al macizo rocoso un hábito de bloques muy bien trabados entre sí.

La proyección estereográfica (Figura 4.2) indica que la tendencia general de las diaclasas es de orientación NS y NWW-SEE, con manteos subverticales principalmente.

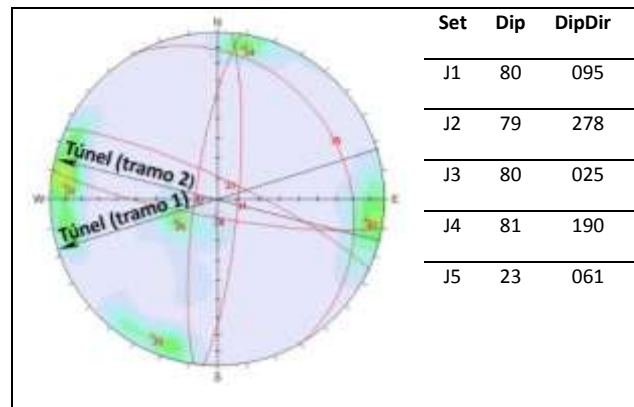


Figura 4.2. Proyección estereográfica de concentración de polos, con las orientaciones de los sistemas de diaclasas principales. Las flechas negras muestran las orientaciones principales del trazado del túnel.

4.2 Sondajes geotécnicos

Para los efectos del diseño del túnel, se realizaron 3 sondajes geotécnicos y ensayos de permeabilidad que permiten reconocer la presencia de un macizo rocoso denso, de alta resistencia, con grados de fracturamiento variable e impermeable, especialmente a partir de los 3 a 4 m de profundidad. Los resultados se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de los resultados obtenidos en los sondajes ejecutados en la etapa de ingeniería.

Sondaje	Prof. Desde-hasta (m)	Grado de Met.(1)	FF	RQD	Resist. (MPa)
STG-1 (30 m)	0,0 -2,95	IV	30-40	20	44
	2,95-30,0	II	10-12	35	72
STG-2 (40 m)	0,0-3,20	IV	25-35	30	34
	3,20-40,0	II	6-9	60	188
STG-3 (33 m)	0,0- 4,0	III-IV	20-30	35	36
	4,0-33,0	II	5-10	80	65

(1) ISRM 1981; (2) Resistencia de ensayos de laboratorio UCS.

El sondaje STG-1 de 30 m de longitud, ubicado hacia el extremo oriental del eje del túnel, a 50 m del portal de entrada, se perforó en una brecha magmática de matriz granodiorítica intensamente intruida por diques andesíticos. El registro

estratigráfico indica que desde la superficie hasta los 2,95 m de profundidad la roca se encuentra meteorizada con planos de fracturas abiertos y levemente alterados. A partir de los 2,95 m hasta los 30 m se observa una disminución en el fracturamiento (ff= 10-12), alcanzando un RQD promedio de 35, considerado bajo (Tabla 4.1).

El sondaje STG-2 de 40 m de longitud, ubicado en la zona central del lineamiento del túnel, la litología corresponde a granodioritas de biotita y anfíbol. La roca está muy meteorizada desde la superficie hasta los 3,20 m. Luego de este horizonte la frecuencia de fracturas disminuye considerablemente (ff= 6-9), mientras que el RQD promedio llega a 60, valor considerado regular (Tabla 4.1).

El sondaje STG-3 de 33 m de longitud, ubicado a 20 m del portal de salida, presenta una alternancia de granodioritas y tonalitas con escasa alteración. Desde la superficie hasta los 4 m de profundidad se aprecia un horizonte de roca meteorizada, cuyas propiedades coinciden con las otras perforaciones. Desde los 4 hasta el fondo de la perforación la roca es más resistente y está menos fracturada, con una frecuencia de fracturas de 5 a 10 y un RQD de 80 (Tabla 4.1).

Las discontinuidades observadas en los testigos de sondaje permiten reconocer dos tipos principales de fracturas. En los tramos más superficiales (hasta 6 m de profundidad) las fracturas se presentan como planos rugosos e irregulares, parcialmente alterados y con rellenos limo arenosos de hasta 3 cm de espesor. Mientras que, en profundidades mayores a 6 m, las fracturas son más cerradas, con planos ondulados y ligeramente rugosos, con un relleno fino y alterado, principalmente con pátinas de óxido en la superficie (Fotografía 4.1).



Fotografía 4.1 Fracturas superficiales y en profundidad observadas en granodiorita de anfíbol encontrada en el sondaje STG-3.

Se realizaron un total de 8 ensayos de permeabilidad Lugeon en los 3 sondajes ejecutados (Tabla 4.2). Los resultados obtenidos indican valores que varían entre 0,82 y 1,79 UL (Unidad Lugeon), considerados bajos, lo que indica que el macizo rocoso en general es muy impermeable, con discontinuidades cerradas y con baja capacidad de conductividad hidráulica a través de sus planos.

Tabla 4.2 Resumen de los resultados de ensayos de permeabilidad Lugeon ejecutados en los sondajes.

Sondaje	Profundidad	UL	Permeabilidad (cm/s) ⁽¹⁾	Régimen flujo (Houlsby, 1976)
STG-1	7,0 – 12,0	0,82	5,62 E-06	Laminar
	11,0 -16,0	0,55	3.75 E-06	Laminar
	15,0 – 20,0	0,38	2,62 E-06	Laminar
STG-2	10,0 – 15,0	0,89	6.06 E-06	Laminar
	15,0 – 20,0	1,43	7,84 E-06	Laminar
STG-3	8,0 – 13,0	1,79	1,23 E-05	Dilatación
	13,0 – 18,0	0.09	5.84 E-07	Laminar
	17,0 – 22,0	0.42	2.87E-06	Laminar

$$(1) k = \frac{Q}{2\pi Lh} \ln\left(\frac{L}{r}\right)$$

4.3 Unidades geotécnicas en el lineamiento del túnel

Como resultado del mapeo geológico y estructural de superficie y los tres sondajes de exploración llevados a cabo en el trazado del túnel, se realizó un perfil geológico-geotécnico que resume las características del terreno, definiéndose las siguientes unidades geotécnicas (Figura 4.3 fuera de texto).

La Unidad Geotécnica 1 (UG-1), corresponde a una alternancia de granodioritas y tonalitas con leve alteración e intrusión de diques andesíticos. Macizo rocoso con fracturamiento moderado y levemente meteorizado. Se extiende desde el portal de entrada en el Pk 0+00 hasta el 0+090.

La Unidad Geotécnica 2 (UG-2) constituida principalmente por una granodiorita de biotita y anfíbol con fragmentos dioríticos. Macizo rocoso con fracturamiento alto y moderadamente meteorizado. Se extiende entre el Pk0+090 al 0+202.

La Unidad Geotécnica 3 (UG-3) conformada por una brecha magmática de matriz granodiorítica intensamente intruida por diques andesíticos. Macizo rocoso intensamente fracturado. Su dominio se extiende desde el Pk 0+202 al Pk 0+318 aproximadamente.

La Unidad Geotécnica 4 (UG-4), se asocia a las zonas de falla y comprende seis tramos que afectan el trazado del túnel. Se presentan como zonas o planos de discontinuidades muy rectos, de disposición principalmente vertical a subvertical, a través de los cuales la roca se encuentra intensamente fracturada y cizallada, en ocasiones con presencia de salbanda. Esta unidad fue observada en superficie y proyectada hacia el lineamiento del túnel.

4.4 Clases de roca y sostenimientos recomendado

Para clasificar el macizo rocoso y definir el sostenimiento del túnel se ha utilizado el sistema de clasificación de Barton (2000) (Figura 4.5).

Para definir el sostenimiento mediante este método se debe determinar el Diámetro Equivalente del túnel (De), que se define como $De = D/ESR$.

$$De = \frac{D}{ESR} = \frac{4,4}{1,6} = 2,75$$

Donde D es el diámetro de la excavación y ESR (*Excavation support ratio*) es un factor de seguridad en función del tipo de excavación.

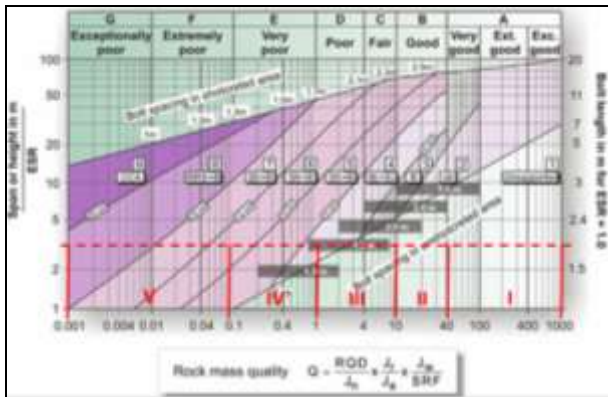


Figura 4.5 Gráfico de Barton (2000), donde se definen los rangos de calidades de roca y el sostenimiento recomendado para el túnel.

A partir de este ábaco y otras adaptaciones basadas en experiencias similares, se elaboró una clasificación con 5 Clases de Roca según su índice Q con los sostenimientos recomendados (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Clases de roca según índice Q con su respectiva descripción geotécnica y soporte recomendado para el túnel.

Clases de roca (índice Q)	Descripción	Soporte recomendado
Roca I Muy Buena (Q>40)	Roca masiva con baja frecuencia de fracturas. Planos de discontinuidades cerrados en roca de alta resistencia e inalterada.	Acuñamiento y pernos puntuales de 2,4m de longitud.
Roca II Buena (Q=10-40)	Roca resistente levemente alterada. Frecuencia de fracturas moderada. Con relleno presente en algunos planos de discontinuidades.	Acuñamiento, capa de hormigón proyectado reforzado con fibras donde se requiera, con un espesor de 5 cm y pernos de 2,4 m cada 2,5 m.
Roca III Regular (Q=1-10)	Roca de resistencia moderada a alta, generalmente con fracturas rellenas y/o selladas. El macizo rocoso puede estar levemente meteorizado. Frecuencia de fracturas moderada a alta.	Acuñamiento, pernos sistemáticos en rondas alternadas de 4 y 5 pernos de 2,4 m de longitud, cada 1,5 m. Capa de 5 cm de hormigón proyectado reforzado con fibras y
Roca IV Mala (Q=0,1-1)	Macizo rocoso moderada a altamente meteorizado, con alto desarrollo de discontinuidades rellenas de material blando que pueden favorecer el desprendimiento de cuñas inestables. Presencia de goteos moderados en sectores bien delimitados. Frecuencia de fracturas alta.	Acuñamiento. Pernos sistemáticos en rondas alternadas de 5 y 6 pernos de 2,4 m de longitud, cada 1,2 m. Capa de 10 cm de hormigón proyectado reforzado con fibras.
Roca V Muy Mala (Q=0,001-0,1)	Roca intensamente meteorizada y fracturada con alto contenido de minerales de alteración. En ocasiones estas rocas pueden presentarse como suelos residuales de naturaleza blanda que sometidas a flujos de agua pueden causar deformación plástica. Se asocia a zonas de falla.	Acuñamiento. Pernos sistemáticos en rondas alternadas de 6 y 7 pernos de 2,4 m de longitud, cada 1,2 m Capa de 20 cm de hormigón proyectado reforzado con fibras. Malla de acero en bóveda y/o paredes, donde se requiera.

A partir de los antecedentes obtenidos en la etapa de ingeniería básica se realizó una sectorización geotécnica del túnel (Tabla 4.4) que, entre otros aspectos, permite identificar el método de excavación más apropiado, el tipo de fortificación y la estimación de los costos de la obra.

Tabla 4.4 Clases de roca estimadas en el túnel de aducción en la etapa de diseño básico.

Unidad Geotécnica	Longitud tramo (m)	Clase de roca (%)				
		I	II	III	IV	V
UG-1	81,5		15	35	40	10
UG-2	111,5	5	20	45	25	5
UG-3	95,0	10	25	40	20	5
UG-4	30,0					100
Total	318	5	18	37	25	15

4.5 Modelación Numérica

Se realizó un análisis de estabilidad de cuñas o bloques en la sección del túnel a excavar. Para este análisis se utilizó el software *Unwedge* que, a partir de la geometría del túnel, la orientación de las distintas familias de discontinuidades y sus propiedades de resistencia, permiten determinar el tamaño y el Factor de Seguridad (FS) de las cuñas que se generan en la excavación.

Los parámetros de resistencia de las discontinuidades se determinaron a partir de ensayos de corte directo en distintos planos, aplicando el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Resistencia al corte en discontinuidades. Se han considerado los valores más conservadores (mínimos) a partir de ensayos de laboratorio

Tipo de discontinuidad	C (MPa)	ϕ (°)	ϕ_r (°)
Diaclasas ($J_1 - J_5$)	0,1	30	26
Fallas	0	19	10

Para el análisis de estabilidad de bloques se ha modelado el escenario con excavación sin fortificación y las 5 Clases de Sostenimiento, utilizando la orientación de discontinuidades registradas en el mapeo de superficie. A modo de

ejemplo se muestra el resultado obtenido para un bloque totalmente inestable representado por la cuña N°8 en la clave de la excavación (Figura 4.4), donde se aprecia que al aplicar el soporte para Roca Clase II la cuña queda completamente estabilizada, aumentando el Factor de Seguridad de 0 a 18.

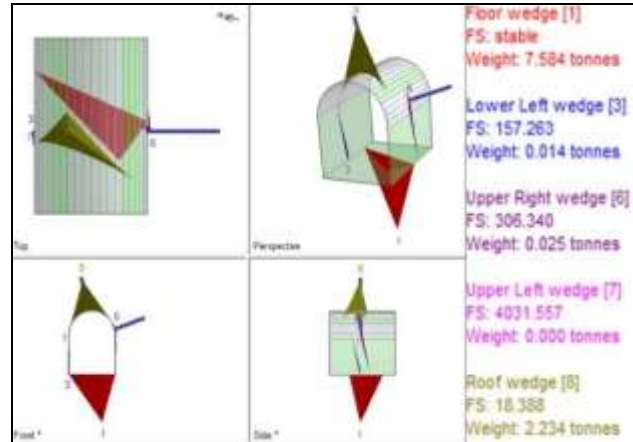


Figura 4.4 Análisis de estabilidad de cuñas con soporte Tipo II, La cuña 8 sin soporte indica un Factor de seguridad (FS=0), mientras que con fortificación el FS aumenta a 18 (Software Unwedge).

Se realizó un análisis estadístico de las cuñas de mayor volumen y menor Factor de Seguridad (Gráfico 4.1), con el fin de determinar la validez de las clases de soporte definidas en esta etapa de diseño. A partir del análisis de estabilidad es posible determinar que al aplicar las Clases de Sostenimiento III, IV y V como elementos de fortificación del túnel, los bloques y en general la sección excavada quedan plenamente estabilizados (FS>1,5).

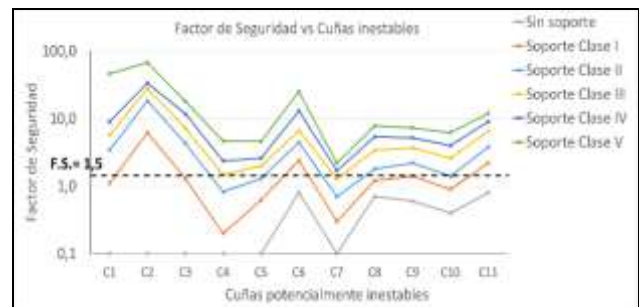


Gráfico 4.1 Variación del FS de las cuñas potencialmente inestables respecto a las distintas clases de soporte. Se han seleccionado las cuñas de mayor volumen y menor FS. Desde cuña C1 a C6 corresponden al tramo N76°E y desde C7 a C11 corresponde al tramo N105°E.

5 Discusión

Los estudios de terreno basados en mapeos de superficie y sondajes permiten confirmar que las rocas que conforman la península Guacolda corresponden a granodioritas de biotita y anfíbol de grano medio a fino, con clastos de diorita centimétricos a decimétricos, e intrusiones de diques andesíticos pertenecientes al Complejo Intrusivo Carrizal Bajo. Esta observación concuerda con lo planteado por Arévalo y Welkner (2008) y se contrapone a Moscoso (1982) quien define a estas rocas como Metamorfitas de La Costa.

Para la clasificación geomecánica del macizo se utilizó el sistema de clasificación Q de Barton y RMR. La definición de los sostenimientos se realizó en función de las condiciones de estabilidad de las secciones excavadas tratando de adaptar la fortificación en base a las cinco clases predefinidas en la etapa de ingeniería básica.

Aunque en un primer periodo la roca excavada se mostró estable, sin convergencias, luego de transcurrido 30 días o más, experimentó un fenómeno progresivo de descompresión que generó una separación paulatina de sus planos de fractura, provocando que los diversos bloques definidos por los numerosos sistemas de fractura se desprendieran. Para combatir este fenómeno fue necesario considerar soluciones de soporte complementarias que generó diferencias, en algunos casos importantes, en la cantidad de sostenimiento utilizado en comparación a lo estimado en la etapa de ingeniería (Gráfico 5.1).

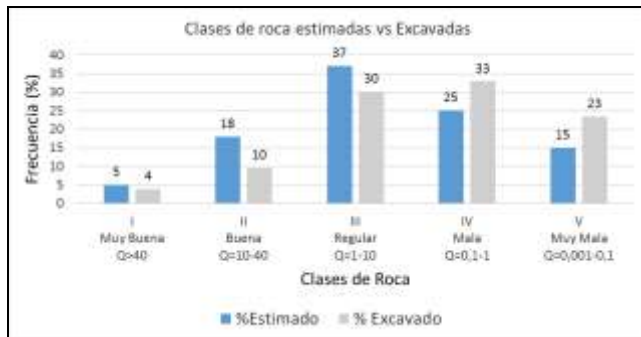


Gráfico 5.1 Comparación entre las clases de roca estimadas en la etapa de ingeniería básica y las clases de roca excavadas durante la construcción del túnel.

Las diferencias observadas entre las calidades de roca estimadas originalmente y las reales encontradas en el túnel permiten determinar un margen de error, calculado en términos de costos, equivalente al 10%.

Se realizó una correlación entre los valores de calidad de roca obtenidos con los sistemas de clasificación Q y RMR (Gráfico 5.2). Los datos corresponden a los levantamientos geológicos de la frente de excavación del túnel Guacolda.

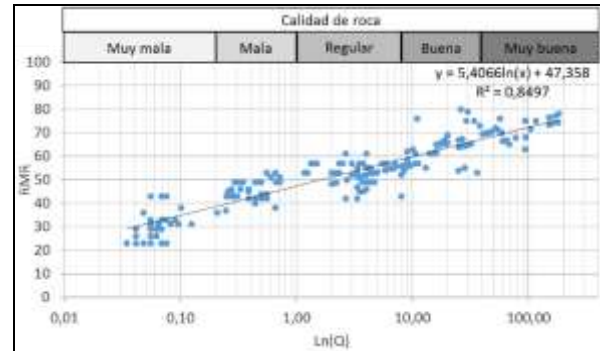


Gráfico 5.2 Correlación entre los valores de RMR y Q obtenidos a partir de los mapeos realizados durante la excavación del túnel.

En este trabajo la ecuación resultante a partir de la regresión logarítmica es:

$$RMR = 5,4 \ln Q + 47,3 \quad R^2 = 0,84$$

El coeficiente de determinación (R^2) indica una buena correlación obtenida a partir de la nube de datos. Al comparar con datos bibliográficos de otros proyectos de túnel, la ecuación de correlación de RMR y Q del túnel Guacolda presenta similitud con ecuaciones obtenida en otros proyectos de túneles con condiciones geológicas similares (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Correlaciones entre índice RMR y Q en otros proyectos de túnel (Tomado de Moreno-Tallón, 1980).

Autor, año	Procedencia	Descripción	R^2
Rutledge and Preston, 1978	9 túneles Nueva Zelanda	$RMR = 5,9 \cdot \ln Q + 43$	0,66
Moreno Tallón, 1982	4 túneles en España	$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 55,2$	0,30
Sunwo and Hwang, 2001	Distintas litologías Corea del Sur	$RMR = 5,9 \cdot \ln Q + 49,5$	0,79
Alkorta-Lertxundi et al., 2014	Proyecto de túnel en Vizcaya, España	$RMR = 6,7 \cdot \ln Q + 45,4$	0,88

El uso de métodos empíricos para la selección del soporte puede también llevar a una fortificación inadecuada. En el caso del diagrama de soporte de Q (Figura 5.3), este se basa en una gran base de datos de soporte empíricos (más de 1000 casos) y en general se observa una alta dispersión entre el valor del Q y el soporte recomendado por el diagrama.

A modo de ejemplo, en la Figura 5.3 se muestra el espaciamiento entre pernos en áreas sin shotcrete versus Q. La línea continua representa el espaciamiento recomendado según el diagrama de soporte de Q. Sin embargo, se aprecia una gran dispersión. Para una calidad de roca tipo II por ejemplo, el diagrama recomienda un espaciamiento de aproximadamente 2,5 m, pero se observa que algunos túneles tienen distancia entre pernos que varían desde menos de 1 hasta más de 6 m. Esto indica que la recomendación de 2,5 m, como todo el diagrama de soporte de Q, es solo una guía general de recomendación basada en datos con alta dispersión.

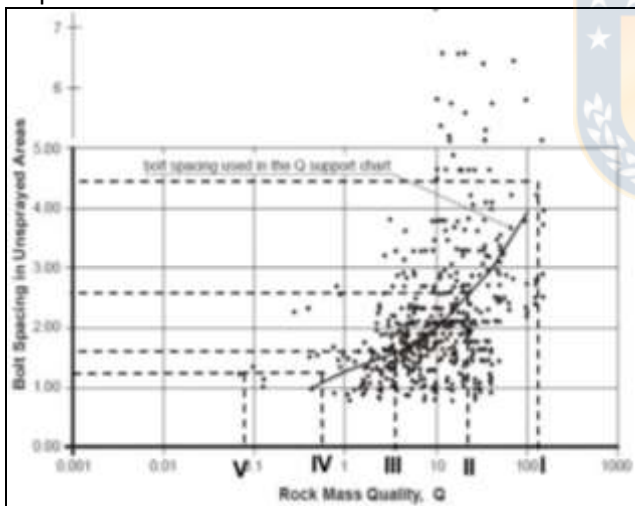


Gráfico 5.3 Espaciamiento entre pernos versus Q. La línea continua representa la recomendación del diagrama de soporte Q (Palstrom and Brosh 2006).

En este sentido Palmstrøm y Broch (2006) proponen que el sistema de clasificación Q puede ser usado como un indicador de soporte durante el diseño y construcción y es una herramienta útil de documentación, esto siempre que las indicaciones estén sujetas al juicio de un experto.

6 Conclusiones

Tal como estaba previsto, el túnel de aguas de refrigeración y las excavaciones abiertas que

permitieron la materialización de sus portales de acceso, se excavaron totalmente en la unidad de brechas magmáticas pertenecientes a la Formación Carrizal Bajo.

Los sistemas de diaclasas constituyen las estructuras mayoritariamente presentes en el área, constituyendo un factor importante en la definición de las calidades geotécnicas de las rocas. Sus planos son principalmente ondulados con superficies ligeramente rugosas, cubiertos con pátinas de óxidos. Estas se agrupan en cinco sistemas o familias que, en orden de frecuencia, presentan las siguientes orientaciones: 80/095, 79/278, 80/025, 81/190 y 23/061.

Las fallas registradas en el lineamiento del túnel (6 en total), representan zonas de intenso fracturamiento e inestabilidad. Estas se encuentran agrupadas en 2 sistemas, cuyas orientaciones principales son: 77/262 y 87/085, es decir cortan casi ortogonalmente el trazado del túnel.

Los sondajes mostraron en general la presencia de una roca más meteorizada desde la superficie hasta los 3 a 4 m aproximadamente. A partir de los 4 m de profundidad el macizo rocoso se presenta menos meteorizado, observándose un progresivo mejoramiento de la calidad de la roca de este a oeste (STG1 a STG-3). Los parámetros geotécnicos medidos son los siguientes. Frecuencia de fracturas (5-12); RQD (35-80%); Resistencia a compresión (65 a 188 MPa). Por su parte, los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad Lugeon permitieron determinar las condiciones de impermeabilidad del macizo rocoso, lo que fue confirmado durante la construcción del túnel.

Para clasificar el macizo rocoso y determinar el diseño básico de la fortificación del túnel se utilizó el sistema de clasificación Q de Barton (2000). A partir de este se definieron 5 clases de roca.

Se realizó un análisis de estabilidad de cuñas mediante el uso del software Unwedge. Este método es especialmente aplicable en rocas de buena calidad geotécnica y donde las tensiones in situ son bajas (Martin y otros, 1995), como es el caso del

túnel Guacolda. El análisis de estabilidad de cuñas permitió confirmar la validez del diseño del sostenimiento basado en la aplicación racional de pernos, malla y hormigón proyectado con fibras.

Al comparar la estimación de las calidades de roca realizada en la etapa de diseño, con la realmente excavada en la construcción del túnel, es posible distinguir un aumento en los requerimientos de soporte que, en términos de costos económicos, equivale a un aumento del 10%, valor considerado en el límite de lo aceptable por la *Association for the Advancement of Cost Engineering (AACE)* (Bredehoeft, 2005).

Respecto a la excavación del túnel, este se construyó mediante el método *drill and blast* (perforación y tronadura). Las excavaciones se terminaron en los tiempos previstos en el programa de construcción, alcanzando un promedio de avance de 2,9 m/día, en los 108 días que se tardaron los trabajos de excavación.

Como una recomendación transversal, se enfatiza la importancia que tiene planificar la ejecución de prospecciones, ensayos y modelamientos numéricos que permitan obtener en forma temprana, una suficiente identificación del subsuelo y de los problemas potenciales que el macizo rocoso pudiese presentar durante la excavación del túnel.

7 Referencias

Arévalo, C.; & Welkner, D. 2008. Geología del área Carrizal Bajo-Chacritas, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° 111. Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.

Barton, N. 2000. El sistema Q para la selección del sostenimiento con el método noruego de excavación de túneles. *Ingeotúneles*, Vol. 3: 215-225. Madrid.

Barton, N.; Lien, R. & Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. Vol. 6: 189-236.

Bieniawski, Z. T. 1979. Geomechanic Classification in Rock Engineering Application. *Proceedings of 4° International Congress on Rock Mechanics*, Vol II. ISRM. Montreux.

Bredehoeft, P.; Dysert, L. & Hoolmann, J. 2005. Cost Estimate Classification System - as applied in engineering, procurement, and construction for the process industries. Framework 7.3 – Cost Estimating and Budgeting. AACE International Recommended Practice N° 18R-97. 2 pp.

Godoy, E. & Lara, L. 1998. Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos N° 5-6, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Grimstad, E. & Barton, N. 1993. Updating of the Q-system for NMT. In: *International Symposium on Sprayed Concrete*: 46-66. Fagernes.

Hoek, E.; Kaiser, P.K. & Bawden, W.F. 1995. Support of underground excavations in hard rock. Funding by Mining Research Directorate and Universities Research Incentive Fund: 225 pp. Rotterdam.

Houlsby, A.C. 1976. Routine interpretation of the Lugeon water-test. *Journal of Engineering Geology*. Vol. 9: 301-313.

Kumar, N.; Samadhiya, N.K. & Anbalagan, R. 2004. Application of rock mass classification systems for tunneling in Himalaya, India. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 41: 852-857.

Martin, C.D; Kaiser, P.K. & McCreath, D.R. 1999. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 36: 136-151. London.

Moreno-Tallon, E. 1980. Aplicación de las Clasificaciones Geomecánicas a los Túneles de Pajares. II Curso de Sostenimientos Activos en Galerías y Túneles. Fundación Gomez-Parto: 139 pp. Madrid.

Moscoso, R.; Nasi, C. & Salinas, P. 1982. Hoja Vallenar y Parte Norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 55: 100 pp. 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.

Palmstrøm, A. & Broch, E. 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnels and Underground Space Technology*. Vol. 21: 575-593. Oslo.

Welkner, D.; Arevalo, C. & Godoy, E. 2006. Geología del Área Freirina-El Morado, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 100: 50 pp., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.



Figura 4.3 Perfil longitudinal geológico-geotécnico del túnel de aducción Central Termoeléctrica Guacolda.