

El acceso Nororiente a Santiago de Chile

El túnel de Manquehue I, un reto para la ingeniería tunelera

En este artículo se exponen las características técnicas y constructivas del túnel de *Manquehue I*, de 157 m de longitud y 23 m de anchura -uno de los más ancho del mundo-, y uno de los tres túneles construidos en la autopista Nororiente de acceso a Santiago de Chile. La ingeniería del proyecto ha sido realizada por *Geocontrol* y su filial chilena, y la construcción por las empresas del grupo *Sacyr*, *Cavosa* y *Sacyr Chile*.

El túnel de *Manquehue I* forma parte de la Autopista Nororiente que permitirá conectar el valle de Chacabuco y Chicureo desde la Ruta 5 Norte, con la ciudad de Santiago en las comunas de Huechuraba y Vitacura.

Esta autopista Nororiente se transformará en la quinta autopista urbana de Santiago y en una de las principales vías de la Región Metropolitana. Permitirá unir los sectores Oriente y Norte de la capital en aproximadamente 10 minutos, beneficiando a unas 500 mil personas al conectar ambas zonas de manera rápida, permitiendo un desarrollo integral de la capital.

El trazado de la autopista se ha subdividido en tres grandes sectores, de acuerdo con condiciones topográficas, constructivas, urbanísticas y de uso del suelo:

- **Sector Enlace Centenario:** El Enlace Centenario se configura como uno de los nudos viales más importantes del contrato de concesión Autopista Nororiente. Se emplaza al costado Norte del Río Mapocho y resuelve la conexión de todos los movimientos entre Américo Vespucio, Costanera Norte, Nororiente y la vialidad local. En la *Fig. 1* se muestra una reconstrucción de cómo quedará este enlace.

- **Sector Oriente:** Este tramo concentra las obras más relevantes del proyecto. Abarca las comunas de Vitacura, Huechuraba y Colina, e incluye el enlace El Llano. Dada las características topográficas, el proyecto ha contemplado en este tramo una velocidad de diseño de 80 km/h, resolviendo la conectividad oriente-poniente a través de un trazado de montaña con

una importante presencia de túneles, viaducos y estructuras que dan continuidad a la autopista salvando los accidentes topográficos.

- **Sector Poniente:** El sector poniente del trazado está diseñado para una velocidad de 90 km/h y se caracteriza por atravesar la zona de los desarrollos inmobiliarios del valle de Chicureo y los sectores agrícolas de las comunas de Colina y Lampa. Se extiende desde el denominado enlace Avenida del Valle y termina en la intersección con la Ruta 5 Norte. Este sector ha sido recientemente inaugurado, el pasado 06/02/08, por el ministro de Obras Públicas de Chile, *Sergio Bitar*.

Los túneles de la autopista Nororiente

En esta autopista concretamente en el Sector Oriente, se han construido los siguientes túneles:

- *Túnel de Montegordo*, de 1609 m excavados en mina que alcanzará una longitud final de 1700 m.
- *Túneles de Manquehue II*, de 732 y 805 m respectivamente.
- *Túnel de Manquehue I*, inicialmente previsto como un túnel artificial de 140 m de longitud y que finalmente ha sido construido como túnel en mina.

Palabras clave: AUTOPISTA, AVANCE, CARRIL, EMBOQUILLE, EXCAVACIÓN, MINA, RECUBRIMIENTO, REVESTIMIENTO, SECCIÓN, SOSTENIMIENTO TÚNEL.



Bernardo GONZÁLEZ, *Sacyr Chile*
 Guillermo GARCÍA, *Sacyr Chile*
 Juan Francisco GARCÍA, *Sacyr Chile*
 Lisardo FERNÁNDEZ Cavosa
 Mauricio AHUMADA, *Cavosa*
 Cristián QUIROGA, *Geocontrol Chile*
 Manuel DE CABO, *Geocontrol*
 José Miguel GALERA, *Geocontrol*

Túnel de Manquehue I: ¿en mina o falso túnel?

El inicio desde el enlace Centenario de la Autopista Nororiente, se encuentra en un territorio de alta sensibilidad ambiental pues afecta el Parque Metropolitano de Santiago. Además su cercanía al citado enlace, hace que ambas calzadas discurren paralelas sin apenas mediana entre ellas.

Estos hechos junto con el escaso recubrimiento, unos 45 m sobre el eje, en vertical; hace que en un inicio este túnel se planteara como túnel artificial, que posteriormente casi restituía el terreno natural. En la *Fig. 2* se muestra esta solución inicial.



[Figura 1].- Enlace Centenario.

Sin embargo posteriormente se analizó la conveniencia de excavar este túnel en mina.

El cambio de pasar de un falso túnel a túnel en mina, ha supuesto minimizar los volúmenes de excavación en unos 400.000 m³, así como en aproximadamente 150.000 m³ de rellenos. Esta disminución conlleva mejoras medioambientales adicionales.

Por último, otra mejora medioambiental ha venido como consecuencia de evitar el número de voladuras necesarias a cielo abierto, reduciéndose estas al sector de los portales y mitigando de forma muy efectiva las negativas repercusiones ambientales de las voladuras.

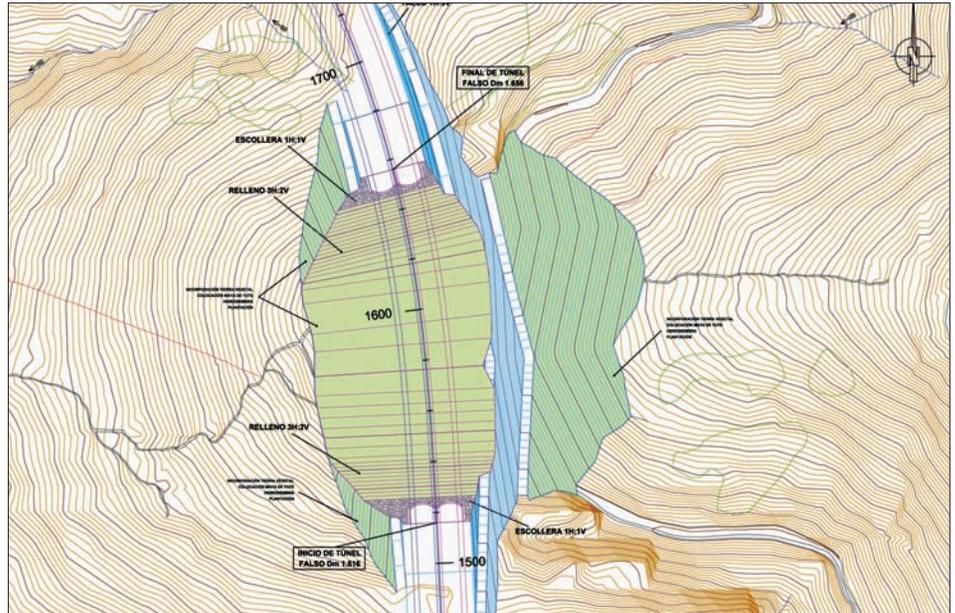
La excavación de un túnel de 21,5 m de anchura útil supone un reto, en especial considerando que el recubrimiento máximo sobre la clave apenas supera los tres diámetros.

De hecho el túnel *Manquehue I*, con una anchura de excavación de 23,01 m y una sección de excavación de 204,4 m² se convertirá en uno de los túneles carreteros más anchos del mundo; quedando por delante de numerosos túneles de tres y cuatro carriles existentes.

En la *Tabla I* se muestran algunos ejemplos de túneles a nivel mundial, que por su anchura, han constituido o constituirán un reto, a la ingeniería tunelera.

Datos del proyecto

Los datos principales relativos al proyecto, se resumen a continuación:



[Figura 2].- Túnel de Manquehue I. Solución falso Túnel.

TÚNEL	CIUDAD	PAÍS	ANCHURA ÚTIL (M)	SECCION (M ²)
Alcazaba	Málaga	España	16,0	123
4º Elba	Hamburgo	Alemania	14,2	158
Maiko	Maiko	Japón	14,25	Sin datos
Romagats	Barcelona	España	16,50	Sin datos
El Pardo	Madrid	España	15,40	215
2º Coen	Amsterdam	Holanda	21,0	En proyecto
Selly Oak	Birmingham	Reino Unido	20,0	En proyecto
Manquehue 1	Santiago	Chile	21,5	204

[TABLA I].- Algunos túneles carreteros anchos en el mundo.

a) Datos funcionales y geométricos

Cuando finalmente se decidió acometer la construcción de *Manquehue I* en mina, el Ministerio de Obras Públicas recordó la necesidad de mantener la funcionalidad vial, sin ningún tipo de merma para la explotación de la Autopista. Esto ha supuesto mantener la siguiente sección funcional: cuatro carriles de circulación de 3,5 m; dos arcones exteriores de 1,5 m; dos arcones interiores de 1,2 m; mediana de 0,6 m; dos aceras de 0,75 m; lo que

supone una anchura útil de 21,5 m, tal como se ilustra en la *Fig. 3*, donde se muestra la sección funcional del Túnel de Manquehue I.

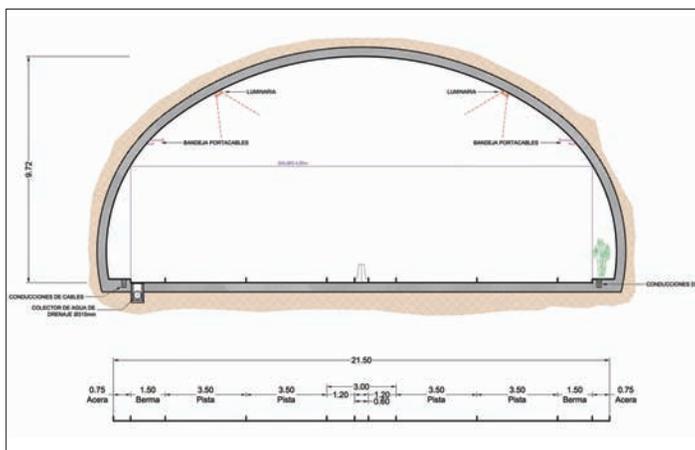
Así mismo en la *Fig. 4* se muestra la planta del Túnel que discurre entre los pk 1+505 y 1+662, lo que supone una longitud, sin falsos túneles de 157 m.

b) Marco geológico

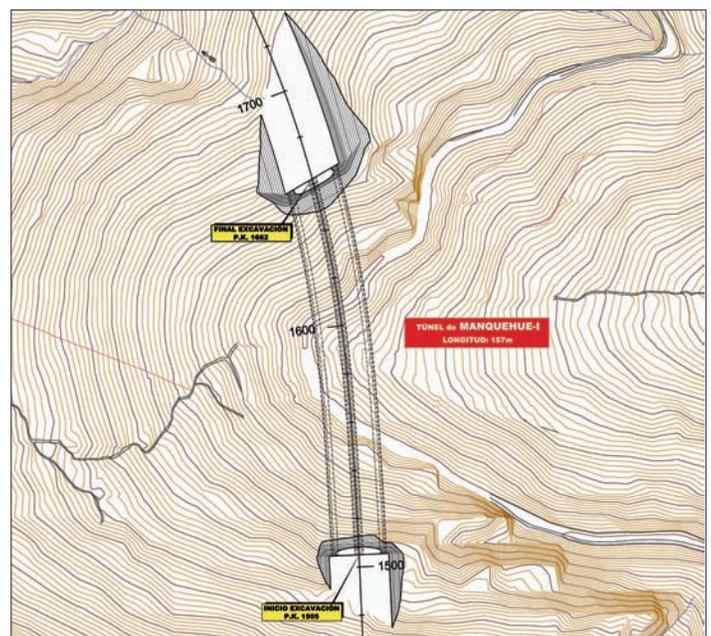
El Túnel de *Manquehue I* se localiza dentro de los *Cordones Precordilleranos Nororientales* de la Cuenca de Santiago; dentro de la cadena montañosa de Manquehue que posee una directriz estructural aproximada Norte-Sur.

La unidad geológica principal corresponde a

[Figura 4].- Túnel de Manquehue I. Solución túnel en mina.



[Figura 3].- Sección funcional.



secuencias estratificadas de materiales volcánicos y volcans sedimentarios pertenecientes a la Formación Abarico. Dentro de esta formación intruyen stocks, diques y cuellos volcánicos de naturaleza andesítica, granodiorítica y dacítica.

En el relieve donde se excava este túnel se han intersectado las lavas andesíticas de esta formación, en diversos grados de meteorización, y un dique porfídico que conforma este relieve.

La tectónica regional de la zona de estudio se caracteriza por coladas en disposición monoclin a ondulada en pliegues abiertos de gran longitud de onda, e inclinación hacia el Este de unos 20°, con dirección NNE a NE.

En la Fig. 5 se muestra el perfil geotécnico por el hastial Oriente del túnel. Dada la anchura del túnel, se realizaron tres perfiles (uno por hastial y otro por el eje) y una planta estructural.

Durante el estudio fotogeológico realizado y la ejecución de la cartografía geológica se han detectado numerosas lineaciones y fracturas en la zona de estudio, cuya orientación ha sido analizada mediante un histograma de frecuencias y diagramas tipo rosa de los vientos.

Además se realizaron estaciones geomecánicas a lo largo del trazado, para estudiar las juntas a escala de afloramiento.

A partir del análisis de estas juntas se detecta la existencia de seis familias; dos pertenecientes a la estratificación y cuatro a la fracturación.

El trazado proyectado se encuentra situado, según la Norma Sismorresistente NCh 433, dentro de la Zona Sísmica 2, como corresponde a su posición en el interior de la Región Metropolitana. La aceleración efectiva máxima obtenida es: $A_0 = 0,3 g$.

En la dirección E-W cabe esperar un régimen de tensiones superior a la carga litoestática, habiéndose adoptado un valor de:

$$K_0 = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} = 1,8$$

En el caso de la dirección N – S, se ha considerado un valor intermedio con un coeficiente de reparto de tensiones de:

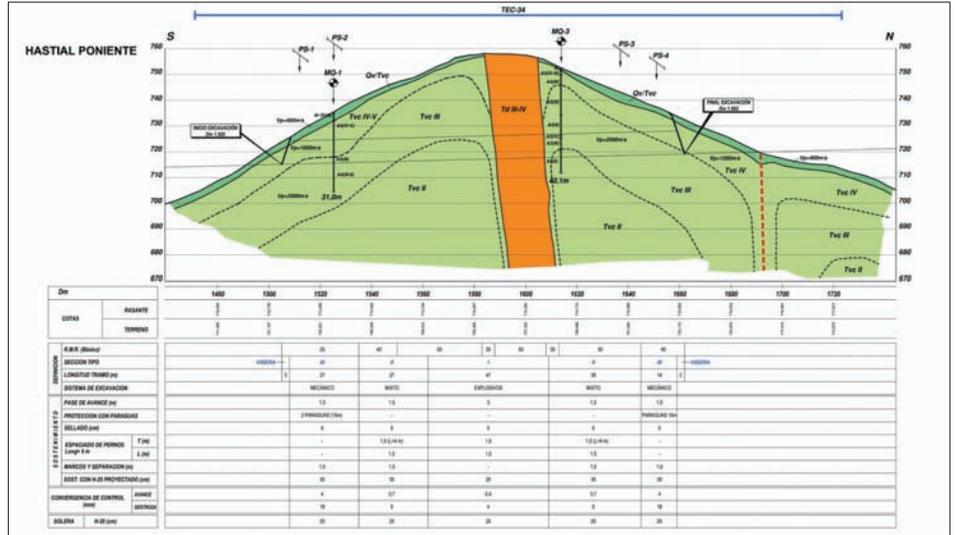
$$K_0 = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} = 0,8$$

La presencia de agua en la excavación será de ligeramente húmedo, con escasa presencia de agua en la excavación desde húmedo a gofeos persistentes, en las zonas de fractura.

c) Datos geotécnicos

Los terrenos han sido minuciosamente caracterizados para obtener los parámetros resistentes y deformacionales que representen de manera real su comportamiento tensodeformacional.

A este respecto se han realizado, para un túnel de 157 m, los siguientes trabajos:



[Figura 5].- Perfil constructivo del hastial Poniente.

- 3 sondeos mecánicos, a añadir a un sondeo anterior existente que totalizan 145 m de sondeo.
- 3 perfiles longitudinales de tomografía eléctrica de 200 m de longitud cada uno.
- 4 perfiles de sísmica de refracción en ambos portales.
- Ensayos de laboratorio.

Como resultado geomecánico de estos trabajos, en la Tabla II se muestran los parámetros mecánicos considerados en los cálculos de dimensionados de los sostenimientos.

d) Método constructivo

El método constructivo fue el NMA, mientras del

diseño del sostenimiento, se basó en el Diseño Estructural Activo (DEA).

El sistema de excavación, que fue mixto (mecánico y voladura) se realizó en avance y destroza, ejecutándose esta última en dos fases por bataches. En la Fig. 6 se muestra el sostenimiento tipo 3, donde se pueden observar las dimensiones de las fases de excavación.

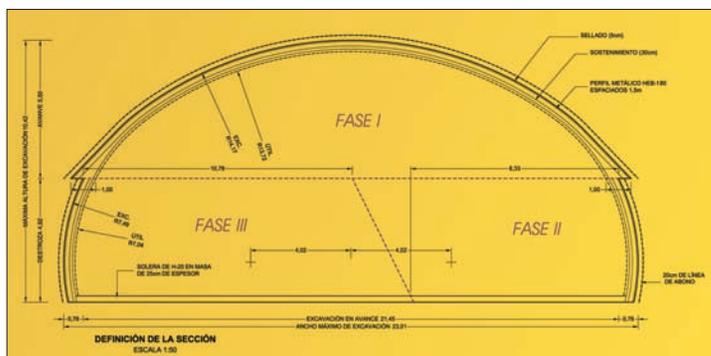
Se diseñaron tres sostenimientos: el primero sin cerchas metálicas para RMR superiores a 50 puntos; el segundo, mixto para terrenos con una calidad comprendida entre 50 y 40 puntos; y el tercero, a base sólo de cerchas, para RMR inferiores a 40 puntos y emboquilles. En la Tabla III se observa en detalle, las principales características de los sostenimientos. Los bulones en la

UNIDAD	GRADO DE METEORIZACIÓN N	RECURRIMIENTO MAX. (M)	RMR	RECURRIMIENTO DE CÁLCULO (M)	C (T/M³)	Φ (MPa)	E (MPa)	MPa		
Tvc	(IV-V)	25	25	40	2,50	0,19	46	1.423	0,3	119
Tvc	(III)	35	50	40	2,67	0,53	54	6.000	0,2	119
Tvc	(II-III)	41	55	40	2,50	0,78	57	8.000	0,2	155
Tp	(III)	43	50	40	2,61	0,75	58	6.000	0,2	211

[TABLA II].- Propiedades de los terrenos aplicadas en la realización de los cálculos.

SECCIÓN TIPO	LONG. PASE (M)	SELLADO (M)	CERCHAS		BULONES			SH-25 (CM)
			TIPO	ESPACIADO (m)	LONGITUD (m)	T (m)	L (m)	
I	3	5	-	-	6,0	1,5	1,5	20
II	1,5	5	HEB-180	1,5	4,0	1,5	1,5	25
III	1,5	5	HEB-180	1,5	-	-	-	30

[TABLA III].- Secciones Tipo de Proyecto en el Túnel de Manquehue I.



[Figura 6].- Fases constructivas y sostenimiento tipo 3.

Túneles

sección I poseen una longitud de 6 m y son de anclaje repartido con lechada, mientras que en la sección II se han considerado bulones de anclaje repartido por fricción, de 4 m de longitud.

e) Revestimiento y acabados

El revestimiento del túnel se ha previsto con hormigón proyectado por vía húmeda.

El túnel se remata con impermeabilización restringida a las zonas con presencia de agua. No obstante, se ha dimensionado un colector de 300 mm con arquetas cada 50 m para la captación de agua y de líquidos vertidos a la calzada, a través arquetas situadas en la zona de arcén.

En lo referente a acabados se han puesto los siguientes elementos:

- Solera no estructural.
- Acera montable de hormigón.
- Barrera de seguridad.
- New Jersey en mediana.
- Revestimiento hasta luminaria con paneles reflectantes.

Las instalaciones de seguridad son:

- Cámaras de televisión.
- Extintores.
- Sistemas de postes SOS.
- Iluminación.
- Control de tráfico, con sistema de comunicación entre túnel y el centro de control de la Autopista Nororiental.
- Suministro de energía eléctrica, redundante con grupos electrógenos y SAI.

Desarrollo de las Obras

Las obras de excavación del túnel de *Manquehue I* se iniciaron en el 27 de septiembre de 2007, habiéndose calado, en avance, el pasado 31 de enero. En la *Tabla IV* se muestran los avances de esos cuatro meses, un promedio obtenido de 2,1 m/día.

Hay que considerar que los trabajos se interrumpieron entre el 18 de diciembre de 2006 y el 22 de enero. Previamente, entre agosto y septiembre de 2007, se realizaron los trabajos de excavación del portal Norte, desde donde se iniciaron los trabajos, y se ejecutó el paraguas pesado de emboquille. Como ya se ha indicado el 31 de enero se produjo el cale del túnel en avance, estando previsto finalizar la destroza para el mes de febrero. En la *Foto 1* se muestra un momento del cale del túnel.

MESES	AVANCE (M)	VELOCIDAD AVANCE (MDIA)
OCTUBRE 2007	30,1	1,8
NOVIEMBRE 2007	77,4	2,6
DICIEMBRE 2007	31,5	1,8
ENERO 2008	11,0	1,8
TOTAL	150	2,1

[TABLA IV].- Avances en el Túnel de Manquehue I.

Los rendimientos incluidos en la tabla anterior hay que interpretarlos como excelentes, habida cuenta que por la elevada sensibilidad ambiental del tramo, sólo han estado permitidos los trabajos en horario diurno.

a) Emboquilles

Los emboquilles del túnel han sido objeto de un minucioso diseño para minimizar la altura de desmonte, tal como se ha mostrado en la *Fig. 4*.

En las *Fotos 2 y 3* se muestran ambos

portales, mientras que en la *Foto 4* se muestra un detalle del fuerte esviaje existente entre el túnel y el talud frontal para optimizar la geometría de los desmontes minimizando la altura de estos. En cada portal se han dispuestos dos perfiles de control topográfico para vigilar posibles deslizamientos de los taludes. El movimiento registrado ha sido inferior al milímetro.

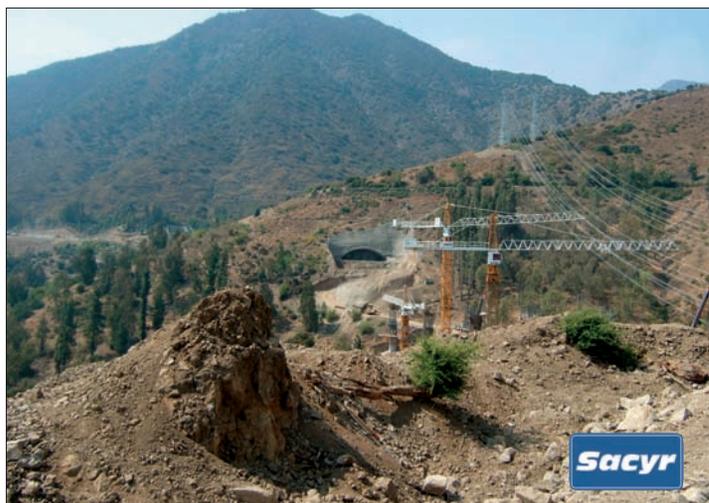
En ambas bocas se ha construido un paraguas pesado de micropilotes de 15 m de lon-



[Foto 1].- Cale del túnel de Manquehue I, el 31 de enero 2008.



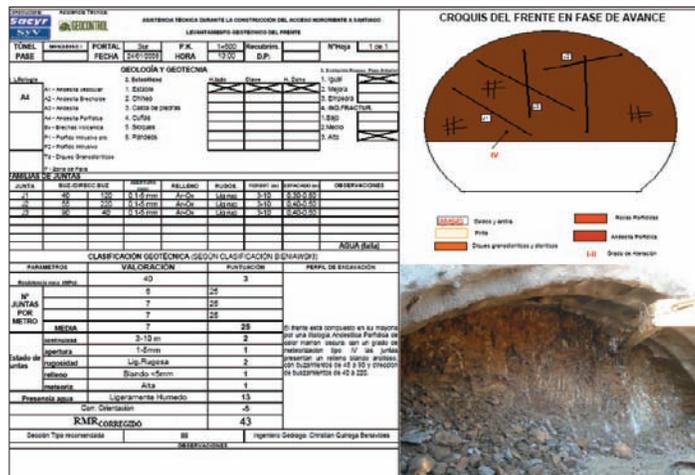
[Foto 2].- Panorámica general del emboquille Norte.



[Foto 3].- Panorámica general del emboquille Sur.



[Foto 4].- Talud frontal esviado, en el Portal Norte, para minimizar la altura de los taludes.



[Figura 7].- Levantamiento geotécnico del frente en el avance del pk 1-500.

gitud para el portal Norte y Sur, solidarizados con una viga de atado.

b) Terrenos atravesados

La litología en la mayor parte del túnel excavado es de composición andesítica con textura porfídica, con una gama de colores que van del gris claro al gris oscuro, y marrón oscuro en zonas con una mayor meteorización. Las texturas varían de grano medio a fino.

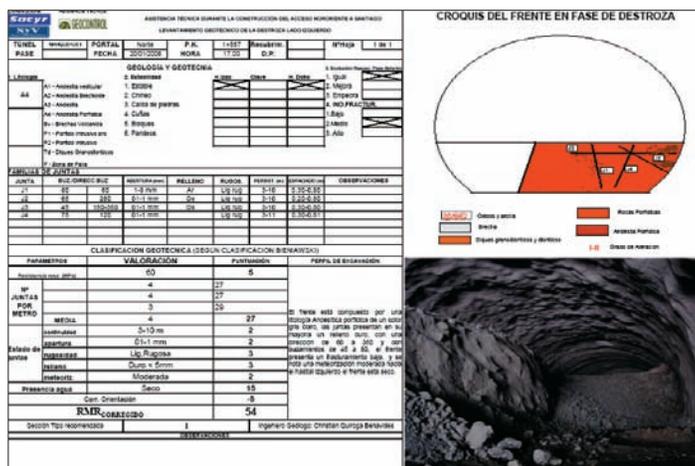
El índice geomecánico **RMR** de la roca excavada en destroza ha arrojado valores de una roca de calidad buena oscilando entre 49 y 56 puntos, con un valor medio de 56 puntos.

Desde el Portal Norte la litología encontrada es de composición andesítica con textura porfídica con una gama de colores que van del gris claro a marrón oscuro en zonas con una mayor meteorización. La textura es de grano medio.

En la excavación en avance en el Portal Norte se ha alcanzado un **RMR** de una roca de calidad media oscilando entre 47 y 49 puntos, con un valor medio de 49 puntos.

Por su parte, la litología del túnel excavado en avance desde el Portal Sur, únicamente 2 m, es de composición andesítica, de un color marrón oscuro producto de la alta meteorización existente, con presencia de óxidos y arcilla entre las juntas. La textura es de grano medio.

[Figura 8].- Levantamiento geotécnico del frente en la destroza del pk 1+557.



El **RMR** de la roca excavada en avance desde Portal Sur ha arrojado valores de una roca de calidad mala con un valor medio de 43 puntos.

En la **Fig. 7** se muestra un levantamiento geotécnico realizado en el avance del **pk 1+500**, mientras que en la **Fig. 8** se muestra el levantamiento geomecánico realizado en la destroza del **pk 1+557**.

c) Secciones tipo aplicadas

Las secciones tipo del sostenimiento se han ido aplicando según las necesidades del terreno. En

la **Tabla V** se presentan las secciones tipo aplicadas desde el inicio de la excavación del túnel.

La excavación se ha realizado mediante métodos mecánicos y con voladura con nagolita, disminuyendo la longitud del pase en la sección tipo 1 a 2,5 m frente a los 3 m previstos en Proyecto.

En las **Fotos 5 y 6** se muestran dos aspectos de la excavación en avance, mientras que en las **Fotos 7 y 8** se han incluido dos fotos correspondientes a la ejecución de la destroza.



[Fotos 5y 6].- Dos aspectos de los trabajos de la excavación en avance.



[Fotos 7 y 8].- Dos momentos de la excavación, en dos fases, de la destroza. Obsérvese las imponentes dimensiones de la excavación.

DE P.K.	A P.K.	MARCOS	SECCIÓN TIPO
1+650	1+629,5	HEB-180	III
1+629,5	1+614,5	HEB-180	II
1+614,5	1+540	-	I
1+540	1+511	HEB-180	II
1+511	1+500	HEB-180	III

[TABLA VI].- Secciones Tipo de sostenimiento aplicadas en el túnel de Manhueque I.

Nº	P.K.	FECHA	DISTANCIA AL FRENTE EN COLOCACIÓN
PC-1	1+641	31/10/2007	18,0
PC-2	1+619	07/11/2007	8,8
PC-3	1+611	11/11/2007	9,0
PC-4	1+586	23/11/2007	13,0
PC-5	1+571	04/12/2007	33,5
PC-6	1+556	04/12/2007	18,5
PC-7	1+541	04/12/2007	3,5
PC-8	1+526	17/12/2007	11,6
PC-9	1+517	17/12/2007	2,6

[TABLA VI].- Localización de las estaciones en el túnel de Manhueque I.

Auscultación

Se han colocado nueve estaciones de convergencia en el interior del túnel, realizándose la lectura de convergencias y la nivelación de clave en las estaciones colocadas.

En la **Tabla VI** se indica la ubicación de las estaciones colocadas en el túnel. Las estaciones PC-1, PC-2 y PC-3 se reinstalaron en avance y se colocaron nuevas en destroza. Las lecturas realizadas indican que las estaciones se encuentran estabilizadas, habiéndose alcanzado un movimiento acumulado máximo que no llega a 6 mm.

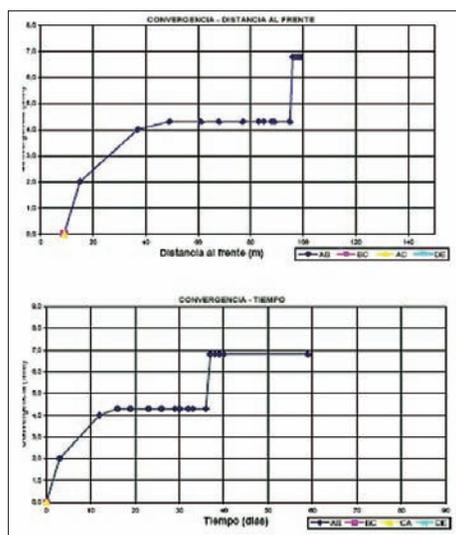
En la **Fig. 8** se muestra la evolución de las estaciones de convergencia, donde puede apreciarse que los mayores movimientos se han obtenido al excavar la destroza.

En la **Tabla VII** se muestran las lecturas topográficas realizadas en la clave del Túnel de Manhueque I.

Las lecturas realizadas indican que los movimientos registrados son de escasa magnitud, siendo el mayor movimiento registrado, de 1 cm.

Desviaciones respecto al proyecto

En la **Tabla VIII** se comparan las secciones tipo previstas en el proyecto con las realmente ejecutadas en obra; y en la **Fig. 9** puede



[Figura 9].- Curva de convergencia, representativa del comportamiento del terreno.

Nº	P.K.	20/11/2007		03/12/2007		19/12/2007		08/01/2007	
		Cota	Cota	Diferencia	Cota	Diferencia	Cota	Diferencia	
PC-1	1+641	725,225	725,227	0,002	725,219	-0,006	725,215	-0,010	
PC-2	1+619	724,614	724,610	-0,004	724,610	-0,004	724,612	-0,002	
PC-3	1+611	724,765	724,763	-0,002	724,761	-0,004	-	-	
PC-4	1+586	-	724,193	-	724,189	-0,004	724,194	0,001	
PC-5	1+571	-	-	-	723,893	-	723,895	0,002	
PC-6	1+556	-	-	-	723,825	-	723,826	0,001	
PC-7	1+541	-	-	-	723,596	-	723,599	0,003	
PC-8	1+526	-	-	-	723,058	-	723,058	0,000	
PC-9	1+517	-	-	-	722,896	-	722,893	-0,003	

[TABLA VII].- Lecturas topográficas realizadas en la clave en el túnel de Manhueque I.

SOSTENIMIENTO PREVISTO EN PROYECTO				SOSTENIMIENTO APLICADO EN OBRA			
DE P.K.	A P.K.	SECCIÓN TIPO PREVISTA	LONGITUD DEL TRAMO (m)	DE P.K.	A P.K.	SECCIÓN TIPO UTILIZADA	LONGITUD DEL TRAMO (m)
1+658	1+645	III	13	1+654	1+645	III	5
1+645	1+629,5	II	15,5	1+645	1+629,5	III	15,5
1+629,5	1+614,5	II	15	1+629,5	1+614,5	II	15
1+614,5	1+609	II	5,5	1+614,5	1+609	I	5,5
1+614,5	1+562	I	52,5	1+609	1+562	I	52,5
1+562	1+540	II	19,5	1+562	1+540	I	19,5
1+540	1+535	II	5	1+540	1+535	I	5
1+535	1+511	III	24	1+535	1+511	II	24
1+511	1+505	III	6	1+511	1+505	III	6

[TABLA VIII].- Comparación de las longitudes de las secciones tipo de Proyecto y las aplicadas en la excavación realizada en el túnel.

apreciarse que el comportamiento del terreno ha sido algo mejor al previsto.

Conclusiones

De los trabajos de ingeniería básica y de detalle, y de la construcción del túnel de Manhueque I, pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- El túnel de Manhueque I se ha diseñado, en mina, minimizando el impacto ambiental en un área sensible como es el Parque Metropolitano de Santiago.
- Su construcción ha constituido un reto pues a pesar de su corta longitud, 157 m; es uno de los túneles carreteros más anchos del mundo, con 23 m de anchura de excavación y 204 m² de sección. Todo ello con un recubrimiento que no supera nunca los tres diámetros sobre clave.
- Su construcción puede considerarse un éxito, alcanzándose en el avance, una velocidad de excavación de 2,1 m/día; con lo que la excavación del túnel se habrá completado en cinco meses.