

Situados en la Ruta 68 que une Santiago con Valparaíso (Chile).

## Construcción de los túneles *Lo Prado II y Zapata II*

Antonio TOVAR SABIO, Gerente; Jesús Alberto JIMENO VÁZQUEZ, Jefe de túneles; y Mauricio AHUMADA DÍAZ, Supervisor Jefe de túneles. Constructora ACS-SACYR Chile, S.A. Enrique UGARTE LOZANO, ACS. Manuel MANRIQUE CECILIA, SACYR, S.A. José Miguel GALERA FERNÁNDEZ; e Isidoro TARDÁGUILA VICENTE. GEOCONTROL, S.A.

Palabras clave: AVANCE, CONSTRUCCIÓN, CONTROL, EXCAVACIÓN, FRENTE, GEOTECNIA, RECUBRIMIENTO, SECCIÓN, SOSTENIMIENTO, TELEASISTENCIA, TÚNEL.

En este artículo se resumen las condiciones de excavación y sostenimiento de los túneles *Lo Prado II* y *Zapata II*, de 2.800 y 1.223 m de longitud, construidos por ACS-SACYR para el desdoblamiento de dos túneles anteriores del mismo nombre en la Ruta 68 de Chile. Estos túneles han sido realizados a sección completa, alcanzándose unos rendimientos excelentes, con un total de 3.758 m de túnel construido en menos de dieciséis meses.

La Unidad Ejecutiva de Concesiones de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas de Chile, adjudicó a *Rutas del Pacífico, S.A.* la explotación, en régimen de peaje, de la *Ruta 68* que conecta Santiago con Valparaíso, atravesando la Cordillera Litoral.

El contrato de concesión incluye el acondicionamiento de la autopista así como el desdoblamiento de los túneles actuales de *Lo Prado* y *Zapata*, de 2.800 y 1.223 m de longitud, respectivamente.

Estas obras fueron adjudicadas a *Constructora ACS-Sacyr Chile S.A.*, que encargó a *Geocontrol, S.A.* la redacción del proyecto constructivo de los nuevos túneles y el acondicionamiento de los existentes, así como una asistencia técnica durante su construcción.

El cale del Túnel de *Zapata II*, más occidental, se produjo en noviembre de 2000, mientras que el pasado mes de marzo de 2001 tuvo lugar el cale del Túnel de *Lo Prado II*, situado más cercano a la capital.

### Características de los túneles

A continuación se resumen las principales características de los Túneles de *Lo Prado II* y *Zapata II*.

La sección de los túneles es de 84,95 m<sup>2</sup>, con dos carriles de circulación, un arcén de

1,75 m y una acera de 0,75 m, ambos junto al carril lento; y un resguardo de 0,25 m a la izquierda del carril rápido. En la *Fig. 1* se muestra la sección de los túneles.

La longitud excavada de los nuevos túneles es de 2.673 y 1.085 m respectivamente, a lo que hay que añadir los tramos en falso túnel a construir en todos los emboquilles y cuya longitud es variable en función de la problemática existente en cada portal con objeto de favorecer su integración ambiental y los posibles riesgos geotécnicos en los taludes laterales y frontal.

En las *Fotos 1* y *2* se muestran los dos portales del Túnel de *Lo Prado II*.

El recubrimiento máximo en el Túnel de *Lo Prado II* es de unos 550 m, mientras que

en el Túnel de *Zapata II* se alcanzan aproximadamente 225 m.

Los aspectos generales de los dos túneles, incluidos otros, tales como instalaciones, acabados y sistemas de seguridad y control, pueden consultarse en la reciente publicación (*Celada y Ugarte, 1999*), donde se describen los aspectos generales del proyecto de ambos túneles.

### Datos geológicos y geotécnicos

El Túnel de *Lo Prado II* se sitúa en un área, geológicamente hablando, de relativa complejidad. Bien estudiada por *Elgueta, (1970)*, pudiendo diferenciarse dentro de la

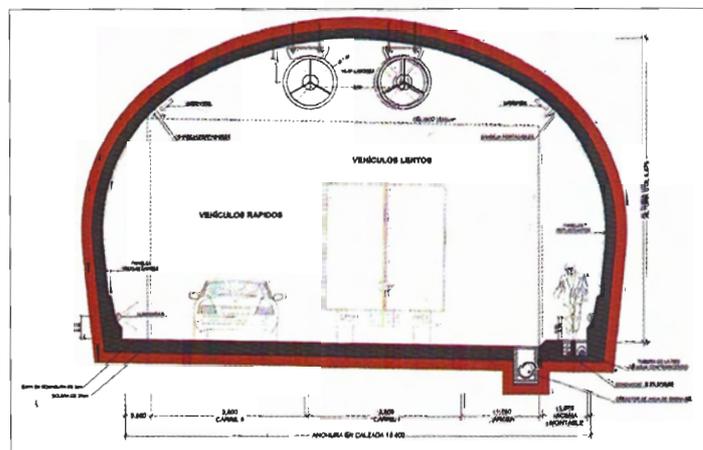


Fig. 1. Sección del túnel



Foto 1.- Portal Oriente del Túnel de Lo Prado II.



Foto 2.- Portal Poniente del Túnel de Lo Prado II.

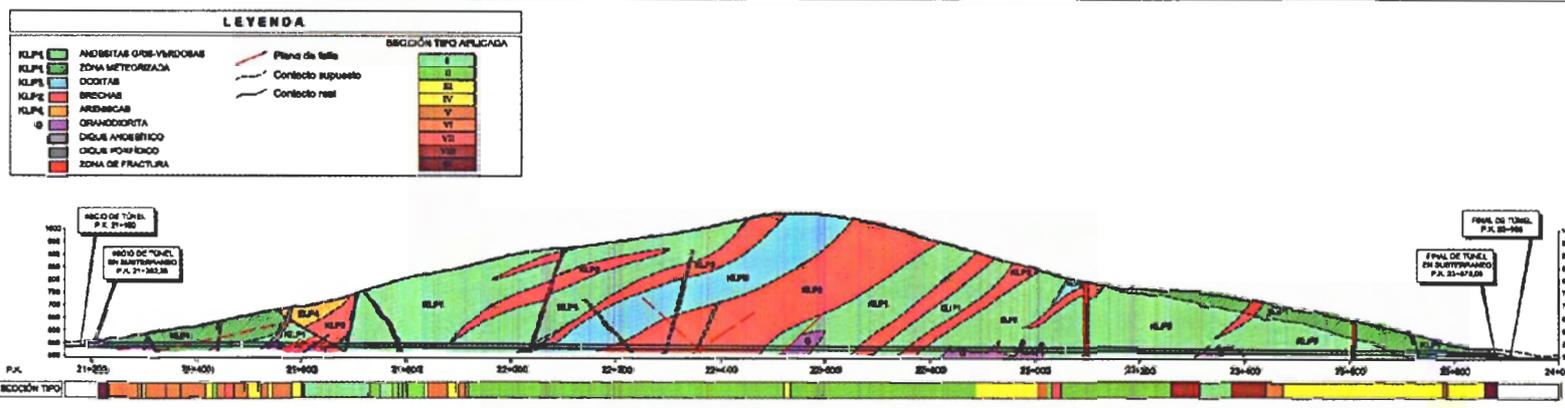


Fig. 2.- Perfil longitudinal de Lo Prado II.

formación *Lo Prado*, tanto materiales sedimentarios (brechas rojizas (*KLP2*) y calcarinitas (*KLP4*) como, sobre todo, andesitas (*KLP1*) y ocoitas (*KLP3*) y existiendo, además rocas intrusivas ácidas de tipo porfídico (*G*).

A este contexto hay que señalar la presencia de zonas de falla con terrenos de baja calidad geotécnica y presencia de agua.

Los *RMR* han oscilado entre 40 y 64 puntos, correspondiendo por tanto en su mayor parte, a un macizo rocoso de calidad geotécnica media.

En la *Fig. 2* se muestra el perfil sintético del túnel.

El Túnel de *Zapata II* se encuentra situado en un relieve formado por una granodiorita de buena calidad geotécnica con *RMR*, en general, superiores a 60, correspondiendo los tramos más problemáticos a ambos emboquilles donde el macizo rocoso se encuentra alterado a jabre (conocido localmente como *maicillo*), debiendo resaltarse la existencia de una falla situada en la boca Oriente, donde la calidad

geotécnica disminuyó sensiblemente y, sobre todo, se produjo un apreciable flujo de agua.

En la *Fig. 3* se muestra un perfil sintético del Túnel de *Zapata II*.

### Secciones Tipo previstas

En los *Cuadros I y II* se muestran las secciones tipo previstas en el proyecto constructivo de ambos túneles.

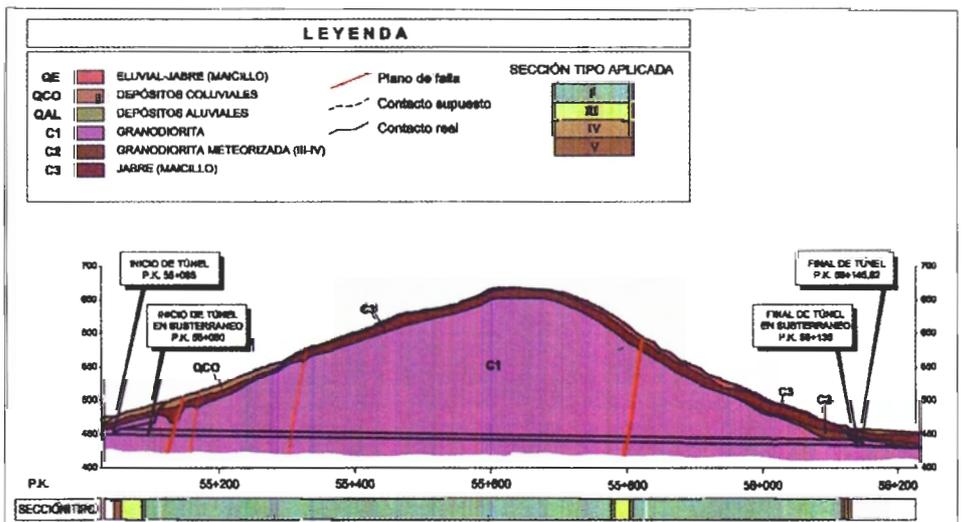


Fig. 3.- Perfil longitudinal del túnel Zapata II.

SECCIÓN TIPO	SELLADO (cm)	CERCHAS		BULONES			HP-25 (cm)
		TIPO	ESPACIADO	TIPO	T (m)	L (m)	
I	3			Ø 25	1,5	2	5
II	3			Ø 25	1,5	2	10
III	3			Ø 25	1,5	1,5	15
IV	3			Ø 25	1,5	1,5	10+10
V*	3	THN-29	1	Ø 25	1,5	2	7+13
VI*(1)	3	THN-29 (2)	1	Ø 25			13+7
VII*(1)	3	THN-29	0,75	Ø 25			13+17
IX	3	THN-29	1	Ø 25			15

\* AVANCE Y DESTROZA  
(1) CON CONTRABÓVEDA  
(2) CON PATA DE ELEFANTE

Cuadro I.- Secciones Tipo de Proyecto del Túnel de Lo Prado II.

SECCIÓN TIPO	LONG. PASE (m)	SELLADO (cm)	CERCHAS		BULONES			HP-25 (cm)
			TIPO	ESPACIADO	TIPO	T(m)	L(m)	
I	4	3			Ø 25	1,5	2	5
II	4	3			Ø 25	1,5	2	10
III	4	3			Ø 25	1,5	1,5	15
IV	3	3		1	Ø 25	1,5	1,5	10+10
V	2	3	TH-29	1	Ø 25	1,5	2	7+13

CUADRO II.- Secciones Tipo de Proyecto para el Túnel de Zapata II.

## Desarrollos de las obras

Básicamente la maquinaria empleada en cada frente ha sido la siguiente:

- Jumbo *Boomer 352*, de *Atlas Copco*.
- Plataforma elevadora *Himec 9810*, de *Normet*.
- Robot de gunitado *WKM 102/R41*, de *Putzmeister*.
- Pala cargadora *Caterpillar 966G*.

En las *Fotos 3 y 4* se muestran dos de estas máquinas, el jumbo y la gunitadora, empleadas.

A continuación se analizan los principales datos relativos al desarrollo de las obras considerando los aspectos relacionados con la excavación, sostenimiento y revestimiento de los túneles.

## Avances

En el *Cuadro III* se muestran los avances mensuales que se ha obtenido en los tres frentes existentes. Hay que resaltar que en todo momento la excavación se ha realizado a sección completa y una optimización del ciclo de avance, con la consecuente re-

ducción de los plazos previstos inicialmente.

Además de ello hay que considerar la excavación y sostenimiento durante el intervalo considerando tres galerías de comunicación en *Lo Prado* de unos 135, 86 y 60 m de longitud respectivamente y una cuarta galería de comunicación de 35 m situada en el Túnel de Zapata.

En las *Fotos 5 y 6* se muestran dos de estas galerías.

Por lo tanto, al total de 3.758 m excavados en túnel a sección completa hay que añadir 316 m de galerías de comunicación, lo que totaliza 4.074 m de túnel excavado.

Como puede apreciarse, salvando el mes de octubre de 1999 donde tan sólo se excavaron los ocho primeros metros correspondientes al portal oriente de *Lo Prado* y los últimos quince metros previos al cale de este mismo túnel, la totalidad de la obra se ha realizado mayoritariamente con tan sólo dos equipos trabajando simultáneamente, en 16 meses, frente a los 27 previstos en el proyecto.

El avance medio, por tanto, ha sido de 117,4 m/mes por frente, si bien una vez superados los primeros meses, como se aprecia, el avance medio ha sido de 176,3 m/mes en cada frente con puntas superiores a los 200 m/mes.

## Ciclo de avance

En el *Cuadro IV* se muestra el control de tiempo según la Sección Tipo colocada en el Túnel de *Lo Prado II*.

Así mismo, en la *Fig. 4* se puede apreciar como se ha ido reduciendo el tiempo, en horas, de los ciclos entre los meses de



Foto 3.- Perforación en el frente Oriente del Túnel de Lo Prado II.



Foto 4.- Gunitado en el frente oriental del Túnel de Lo Prado II.

MES	LO PRADO		ZAPATA Poniente	TOTAL (m)
	Oriente	Poniente		
Octubre 99	8			8,0
Noviembre 99	51			51,0
Diciembre 99	64			64,0
Enero 2000	71			71,0
Febrero 2000	85,6			85,6
Marzo 2000	104			104,0
Abril 2000	178,8		11,0	189,8
Mayo 2000	101,2		89,0	190,2
Junio 2000	151,6		146,0	297,6
Julio 2000	184,7		141,6	297,6
Agoto 2000	200		172,7	326,3
Sept. 2000	204	13,0	183,8	372,7
Octubre 2000	206,5	124,5	167,0	400,8
Nov. 2000	183,6	169,5	174,0	498,0
Dic. 200	22,5	134,1	-----	527,1
Enero 2001	112,0	81,4		193,4
Febrero 2001	96,7	109,6		206,3
Marzo 2001		15,3		15,3
<b>TOTAL</b>	<b>2.025,2</b>	<b>647,4</b>	<b>1.085</b>	<b>3.757,6</b>

**CUADRO III.- Avances mensuales obtenidos.**

abril y noviembre de 2000, en el túnel de Zapata.

Como puede apreciarse en ambos túneles se ha producido una apreciable optimización de los tiempos empleados en el ciclo de avance

### Control cualitativo de las obras: la Telesistencia

Otro de los hitos de esta obra lo constituye la Telesistencia. De acuerdo con el Pliego de Condiciones Generales de la obra, el Contratista estaba obligado a ejercer su propio Plan de Autocontrol de la Calidad, incluyendo el Control geotécnico de la obra. Esta telesistencia ha consistido en desplegar a un geólogo a pie de obra cuya labor, entre otras, ha sido:

- La caracterización geotécnica del frente.
- La medida de las convergencias.
- El seguimiento de las nivelaciones de clave.
- El seguimientos de los ensayos de resistencia y de punzonamiento-flexión del hormigón proyectado

SECCIÓN TIPO	TIPO I		TIPO II		TIPO III		TIPO V		TIPO IX	
Tiempo	h	h/m	h	h/m	h	h/m	h	h/m	h	h/m
Long. Pase (m)	3,5		3,5		2,5		1,5		1,5	
Perforación	3	0,86	3,5	1,00	1	0,40	1	0,67	0,75	0,50
Carga explos..	1,5	0,43	1,5	0,43	1,5	0,60	1	0,67	1	0,67
Ventilación	0,5	0,14	0,5	0,14	0,5	0,20	0,5	0,33	0	0,00
Saneo	0,5	0,14	0,5	0,14	0,5	0,20	0	0,00	0	0,00
Excav. Mecánica	0	0,00	0	0,00	2,5	1,00	3	2,00	4,25	2,83
Desescombro	4,25	1,21	4,25	1,21	1,5	0,60	2	1,33	2,5	1,67
Sellado	1	0,29	1	0,29	2,25	0,90	2,5	1,67	2,5	1,67
Pernos	0,5	0,14	0,5	0,14	0,5	0,20	0,5	0,33	0	0,00
Cerchas	0	0,00	0	0,00	2	0,80	2	1,33	2	1,33
Total sostenimiento	1,5		1,5		4,75		5		4,5	
	Hrs		Hrs		Hrs		Hrs		Hrs	
<b>TOTAL (h)</b>	<b>11,25</b>	<b>3,21</b>	<b>11,75</b>	<b>3,36</b>	<b>12,25</b>	<b>4,90</b>	<b>12,5</b>	<b>8,33</b>	<b>13</b>	<b>8,67</b>

**CUADRO IV.- Control de tiempos según tipo de sección. Túnel Lo Prado II.**

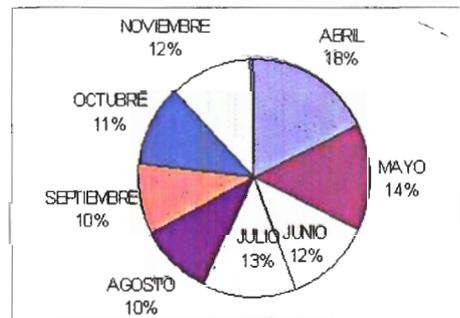


**Foto 5.- Entronque con la galería central de comunicación.**



**Foto 6.- Perforación en galería Poniente.**

Todos estos datos convenientemente procesados en obra han sido enviados con pe-



**Fig 4.- Rendimiento de los ciclo por meses para el Túnel de Zapata II.**

riodicidad casi diaria, vía e-mail, a la oficina de Madrid, de manera que se ha dispuesto con continuidad de un completo seguimiento de la obra por parte de un equipo de técnicos especialistas en túneles. Lógicamente, cuando ha sido necesario, esta periodicidad se ha aumentado.

Como complemento, cada tres meses aproximadamente, se han producido visitas a la obra de los técnicos especialistas que han servido para resolver los problemas más singulares planteados.

Esta *teleasistencia* ha servido, por tanto, para atender la cotidianidad de los problemas geotécnicos y constructivos del túnel, y plantear, a tiempo real, las soluciones más adecuadas.

El control realizado se puede sintetizar en los siguientes datos:

- 96 estaciones de convergencia en el Túnel de *Lo Prado II*.
- 42 estaciones de convergencia en el Túnel de *Zapata II*.
- 2 puntos de nivelación de clave, por cada uno de los cuatro emboquilles.

Además de ello, se han realizado, como ya se ha mencionado, continuos ensayos de compresión simple y de punzonamiento-flexión sobre muestras de hormigón proyectado, habiéndose proporcionado en todo momento, sin problemas, las resistencias a compresión y flexo-tracción requeridas en el Pliego.

## Desviaciones respecto al proyecto constructivo

Con objeto de valorar las desviaciones que se han producido con respecto al Proyecto Constructivo, se han comparado la distribución de los **RMR** y de las Secciones Tipo previstas, con las realmente encontradas y colocadas en obra.

A este respecto en el **Cuadro V** se presenta la comparación entre los **RMR** de proyecto y los reales.

Así mismo, en los **Cuadros VI y VII** se comparan las Secciones Tipo previstas en proyecto con la realmente empleadas en ambos túneles.

Como se puede apreciar en el Túnel de *Lo Prado* el terreno ha sido mayoritariamente de calidad media (60,80 %) frente al 22 % previsto, lo que conlleva un mayor empleo de las Secciones Tipo II y III frente a la I. Por contra, los tramos de mala calidad han disminuido de un 24 a un 17,9 %, lo que ha supuesto una disminución de sostenimiento más pesado.

En el Túnel de *Lo Prado II*, globalmente las secciones sin cerchas han supuesto el

TÚNEL	PREVISTO EN PROYECTO			REALMENTE ENCONTRADO		
	CLASE GEOTÉCNICA	LONGITUD (m)	%	CLASE GEOTÉCNICA	LONGITUD (m)	%
LO PRADO	II	1435	54	II	569,2	21,3
	III	584,5	22	III	1625,0	60,8
	IV	637,5	24	IV	478,4	17,9
ZAPATA	II	929	91,1	II	1006,4	91,8
	III	90	8,9	III	89,40	8,2
	IV	—	—	IV	—	—

**CUADRO V.- Comparación entre los RMR reales y de proyecto.**

PREVISTO EN PROYECTO			REALMENTE UTILIZADO		
SECCIÓN TIPO	LONGITUD DE APLICACIÓN (m)	%	SECCIÓN TIPO	LONGITUD DE APLICACIÓN (m)	%
I	596,9	22,4	I	175,6	6,6
II	912,5	34,1	II	1038,3	38,8
III	382	14,3	III	856,6	32,1
IV	123	4,6	IV	10,5	0,4
V	340,2	12,7	V	526,6	19,7
VI	75,8	2,8	VI	17,8	0,6
VII	42,1	1,6	VII	0	0,0
VIII	141,5	5,3	VII	0	0,0
IX	59	2,2	IX	47,6	1,8

**CUADRO VI.- Porcentaje de las Secciones Tipo del Proyecto y las realmente aplicadas en la obra en el Túnel de Lo Prado.**

PREVISTO EN PROYECTO PARA EL TRAMO CONSTRUIDO HASTA AHORA			REALMENTE UTILIZADO EN EL TRAMO CONSTRUIDO		
SECCIÓN TIPO	LONGITUD DE APLICACIÓN (m)	%	SECCIÓN TIPO	LONGITUD DE APLICACIÓN (m)	%
I	643,6	59,3	I	996	91,8
II	410	37,8	II	62	5,7
IV	20	1,8	IV	14,5	1,3
V	12	1,1	V	13	1,2

**CUADRO VII.- Porcentaje de las Secciones Tipo de Proyecto y las aplicadas en la obra del Túnel de Zapata.**

77,9 % del túnel frente al 75,4 % previsto en proyecto.

Por su parte, en el Túnel de *Zapata* la distribución del **RMR** real coincide con la previsión de proyecto, siendo la aplicación de las secciones tipo aplicadas similar, con un notable incremento de empleo de la Sección Tipo I.

Por último, la comparación entre la previsión de la duración del ciclo de avance contenida en proyecto (*Celada y Ugarte, 1999*) indica que frente a los 975,85 y 1.127,5 minutos previstos para una sección media con cerchas, se han alcanzado valores medios de 735 y 750 minutos respectivamente, lo que ha permitido obtener los espectaculares ratios de avance conseguidos.

## Conclusiones

Los túneles de *Lo Prado II* y *Zapata II* situados en la Ruta 68 que une Santiago con Valparaíso, suponen un total de 4.047 m de obra subterránea.

Estos túneles se han excavado a sección

completa en 16 meses, lo que supone una velocidad media de 117,4 m/mes por frente de excavación, con puntas mantenidas superiores a 200 m/mes.

La optimización de los ciclos de avance ha permitido la disminución de la duración de los trabajos de excavación, sostenimiento y revestimiento de 27 meses a 16 meses.

Un servicio de *teleasistencia* vía e-mail ha permitido resolver a tiempo casi real las principales incidencias acaecidas.

Las previsiones del Proyecto acerca de la calidad geotécnica del terreno y de las Secciones Tipo, coincide aceptablemente con las realmente encontradas en obra.

## Bibliografía

- CELADA, B. Y UGARTE E. (1999). Proyecto de los túneles Zapata nº 2 y Lo Prado nº 2. *INGEOPRES*, nº 76, pp 26-36.
- ELGUETA, R. (1970). Geología del área de Lo Prado y estudios geotécnicos relacionados con el proyecto y excavación del Túnel de Lo Prado. Tesis doctoral. Universidad de Chile. Escuela de Geología.