

Aplicación a la excavación de túneles en terrenos de resistencia media/baja y con humedad

## Caracterización de rocas sensibles al agua

En este artículo, que fue presentado en la Jornada sobre *Caracterización del Terreno*, organizada por Adif en Junio de 2011, Madrid, se abordan diversas experiencias sobre construcción de túneles en terrenos sensibles al agua, remarcando que en muchos casos los problemas surgidos se resolvieron muy positivamente; aunque en otros como el Túnel de Archidona su construcción ha sido extremadamente dificultosa. En todos los casos se trata de la construcción de túneles en terrenos de resistencia media/baja, con valores de  $\sigma_{ci} \approx 40$  MPa, que al aumentar su contenido en humedad pueden llegar a perder más del 90% de su resistencia. Se expone una nueva metodología para caracterizar los terrenos sensibles al agua, en los que deben construirse obras subterráneas.

**E**n este artículo se propone una nueva metodología para la caracterización de aquellas rocas, básicamente de origen arcilloso o limoso, cuya resistencia es sensible a su contenido de humedad.

Estas rocas, en estado seco, pueden llegar a tener una resistencia a compresión del orden de 40 MPa; lo cual las aleja mucho del concepto clásico de *suelos* e incluso de lo que se entiende por *rocas blandas*, cuya resistencia a compresión simple es inferior a 10 MPa.

A pesar de su apreciable resistencia, en estado seco, **estas rocas pueden llegar a perder casi en su totalidad su resistencia; si el contenido en humedad es suficiente alto.**

### Antecedentes

#### Túnel de Can Rabetlla (Barcelona)

El Túnel de Can Rabetlla forma parte de la conexión entre Barcelona y el Vallès, conocida como los *Túneles de Vallvidriera*, que fue construida a principios de los años 90.

Dicho túnel está en la falda de la Sierra de Collserola, próxima al Vallès; su tipología es de una estructura triarticulada, construida en falso túnel, que permite albergar cuatro carriles de circulación. El terreno sobre el que se cimentaba la estructura del túnel era una argilita, del Mioceno, conocida localmente como *hígado de vaca*.

Durante la construcción de este túnel se planteó la necesidad de reducir las zapatas de cimentación de la estructura triarticulada; lo cual exigía transmitir al terreno  $13 \text{ kp/cm}^2$ , en vez de los  $11 \text{ kp/cm}^2$  previstos en el proyecto.

Para poder emitir una opinión fundada sobre si el *hígado de vaca* podía admitir una tensión de  $13 \text{ kp/cm}^2$ , se hicieron dos tipos de ensayos. Por un lado se perforaron testigos en bloques de *hígado de vaca*, sensiblemente secos, que fueron ensayados a compresión simple con una resistencia del orden de  $30 \text{ kp/cm}^2$ . Por otro, se hicieron ensayos triaxiales en el Laboratorio de la Escuela de Caminos de Barcelona, que dieron resistencias a compresión simple inferiores a  $5 \text{ kp/cm}^2$ .

Analizando la posible presencia de agua en el terreno, se llegó a la conclusión de que las

**Palabras clave:** AGUA, ARCILLA, AVANCE, CARACTERIZACIÓN, EMBOQUILLE, ENSAYO, HUMEDAD, LIMO, MUESTRA, PORO, RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TÚNEL.



**Benjamín CELADA TAMAMES,**  
Director de GEOCONTROL, S.A.

zapatas de la estructura se apoyarían en terreno seco; por lo que se decidió aceptar el incremento de presión de  $11 \text{ kp/cm}^2$  a  $13 \text{ kp/cm}^2$  y el túnel se construyó sin ningún problema.

#### Túnel de Sant Celoni (Barcelona)

El tramo Llinars-Riels forma parte de la LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa y fue proyectado por Ayesa-Geocontrol, que también controlaron su construcción.

En este tramo se encuentra el Túnel de Sant Celoni, de 780 m de longitud y una **sección excavada** de  $157 \text{ m}^2$ .

Los terrenos a excavar estaban constituidos por argilitas, limolitas y gravas con arenas del Mioceno y el nivel freático se encontraba entre 15 y 17 m sobre la clave del túnel; cuya

caracterización, en la fase de proyecto, fue muy problemática. **Fig. 1.**

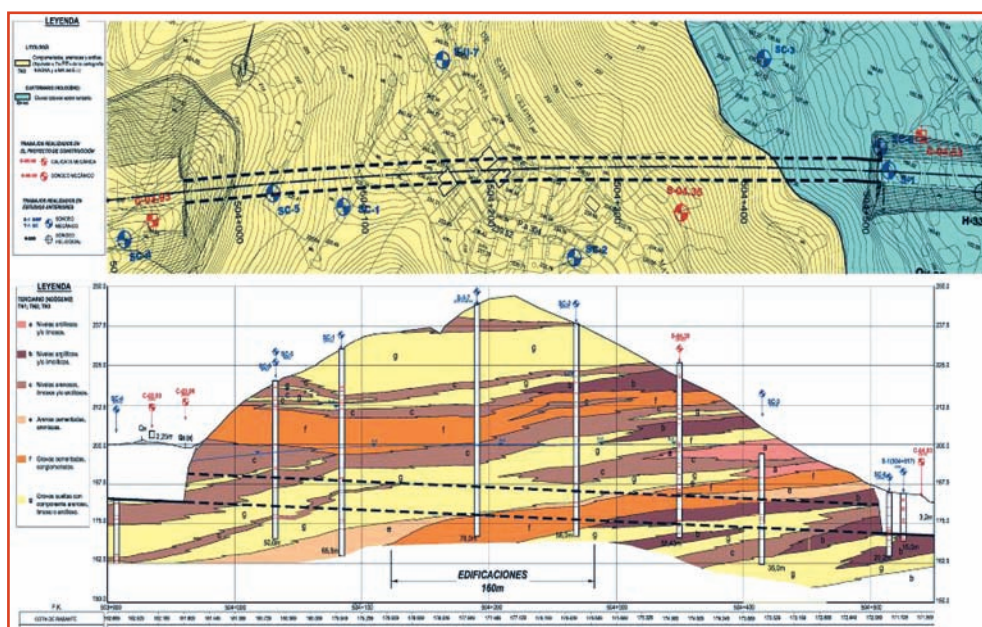
Este túnel tenía la dificultad añadida de tener que pasar bajo la *Urbanización Els Virgili*, con un recubrimiento sobre clave de 68 m (ver Fig. 1).

La construcción del túnel se realizó en las tres fases clásicas de *Avance*, *Destroza* y *Contrabóveda*.

Desde el inicio de la excavación se pudo comprobar que su comportamiento era excelente (**Foto 1**), lo cual hizo que se estudiaran unas *Secciones Tipo* de sostenimiento más ligeras; eliminando los paraguas que se había previsto de *Avance*, salvo al pasar bajo la *Urbanización Els Virgili* (**Fig. 2**).

El Túnel de Sant Celoni se construyó sin problemas de ningún tipo. Las convergencias en la fase de *Avance* se estabilizaron, bajo la *Urbanización Els Virgili*, entre 6 y 12 mm; mientras que tras la construcción de la *Destroza* y *Contrabóveda* se incrementaban entre 20 y 40 mm (**Fig. 3**).

En la superficie de la *Urbanización Els Virgili* la subsidencia máxima fue de 26 mm; tal como se muestra en la **Fig. 4**.

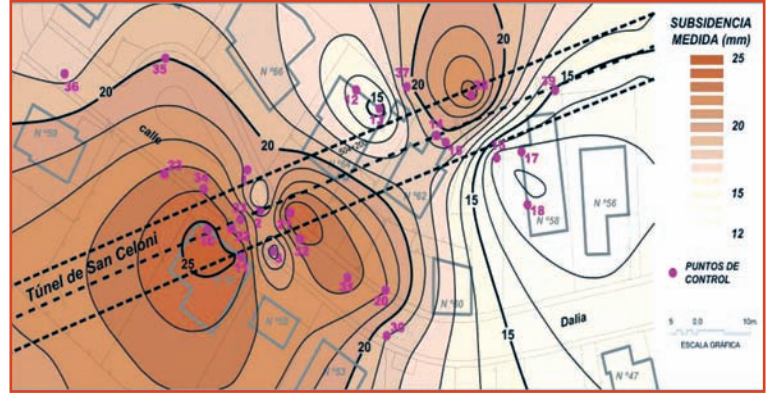


■ [Figura 1] .- Planta y perfil del Túnel de Sant Celoni.

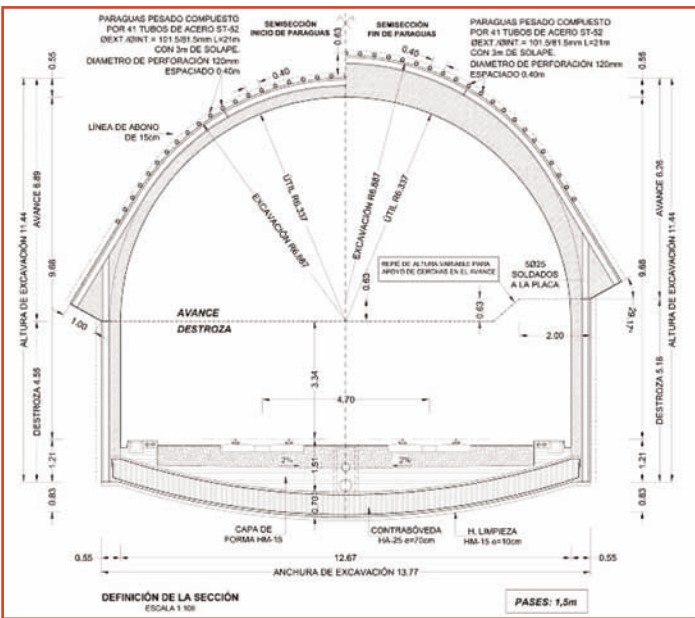
# Caracterización



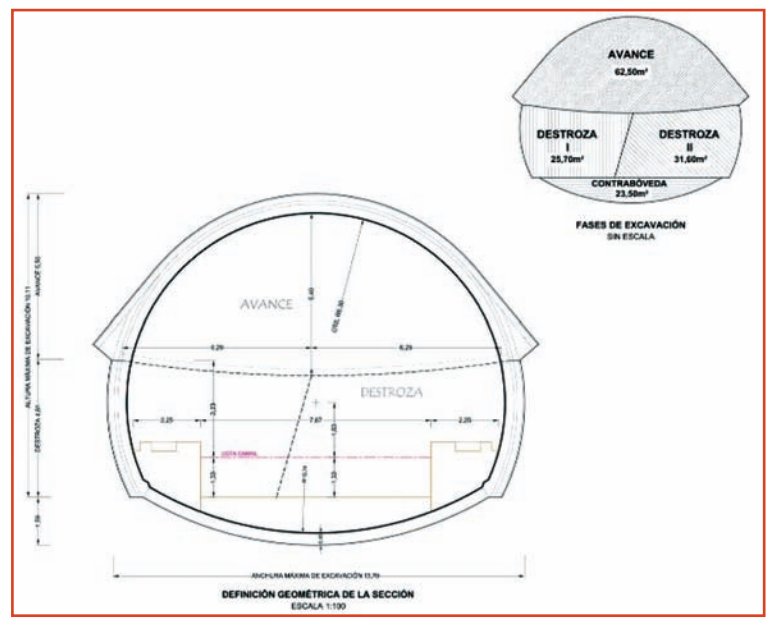
[Foto 1] .- Aspecto del frente del Avance del Túnel de Sant Celoni.



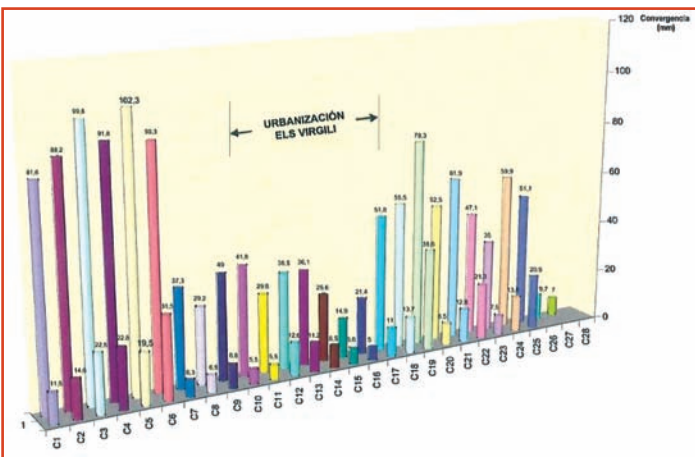
[Figura 4] .- Subsistencia en la superficie de la urbanización Els Virgili tras la construcción del Túnel de Sant Celoni.



[Figura 2] .- Sección Tipo bajo la Urbanización Els Virgili.



[Figura 5] .- Definición geométrica del Túnel de Archidona.



[Figura 3] .- Convergencias medidas al final del Avance y tras la construcción de la contrabóveda.

## Tramo en margas del Túnel de Archidona

El Túnel de Archidona tiene 1.051 m de longitud y formará parte de la nueva línea de alta velocidad Antequera-Granada.

Para minimizar los efectos aerodinámicos sobre los viajeros, éste túnel tiene una sección

libre de aire, sobre la cota de carril, de 85 m<sup>2</sup>; lo cual, tal como se ilustra en la Fig. 5, supone una **excavación total** de 143,3 m<sup>2</sup>.

Tal como se ilustra en la Fig. 6, en este túnel se pueden distinguir dos tramos muy diferentes. Los primeros 720 m se deben excavar en calizas y dolomías del Jurásico, que están ca-

balgando sobre los restantes 370 m; que son argilitas del Keuper y margas del Cretácico.

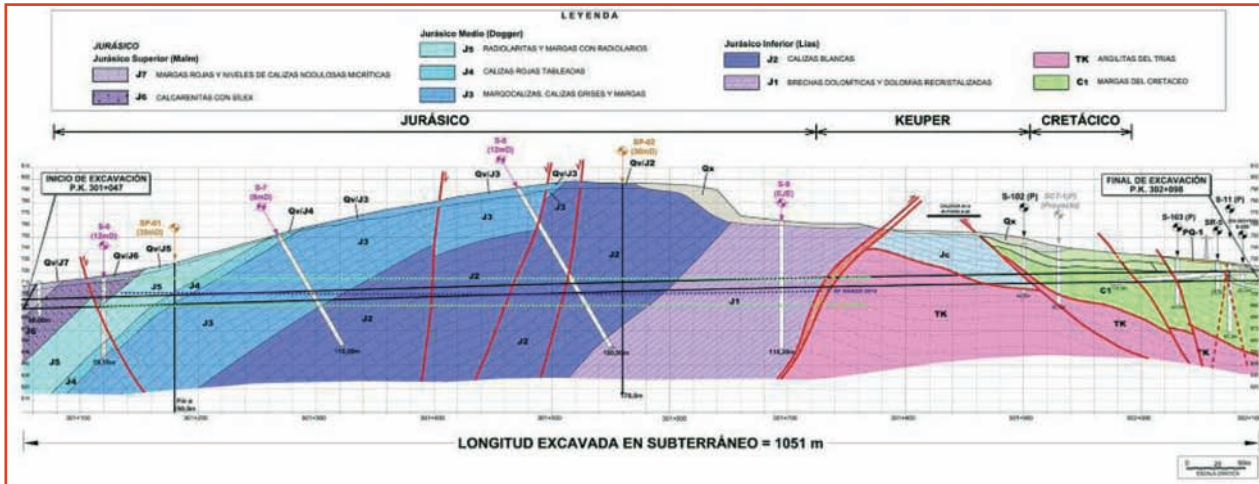
Los efectos del cabalgamiento de los materiales jurásicos sobre los del Keuper han dado lugar a secciones transversales muy complejas; tal como se ilustra en la Fig. 7.

## Proyecto del Emboquille Este

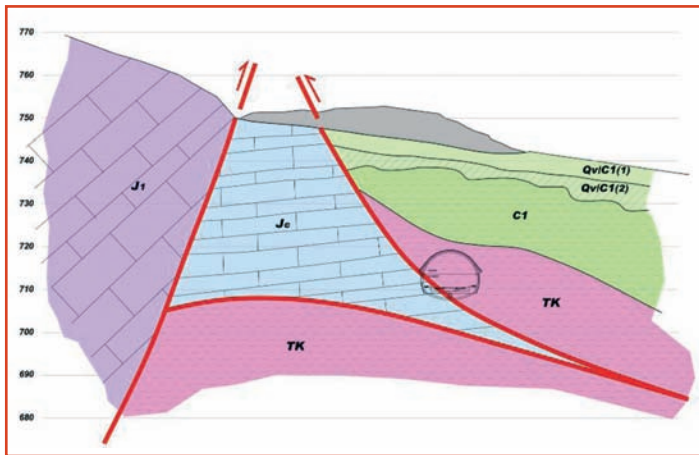
La información que se tenía sobre los terrenos del portal Este indicaba que éstos tenían una disposición homogénea, Fig. 8; lo cual se alejó bastante de la realidad; sobre todo por la presencia de varias fallas, cuya posición ya se ha reflejado en la Fig. 6.

De acuerdo con todo lo anterior, este portal se diseñó tal como se indica en el Plano de la Fig. 9; los túneles laterales se consideraron autoestables, con una pendiente 3H:2V (33,7°); mientras que el talud frontal tenía dos pendientes 3H:2V en la coronación y 1H:2V, con refuerzo a base de bulones, en la parte inferior.

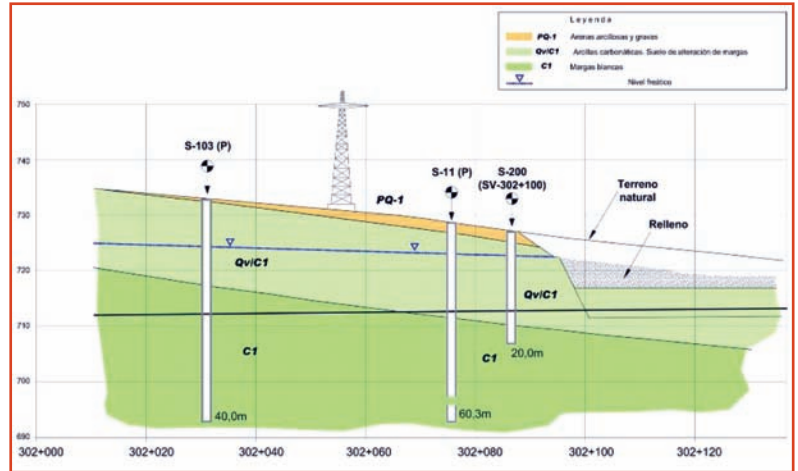
# Caracterización



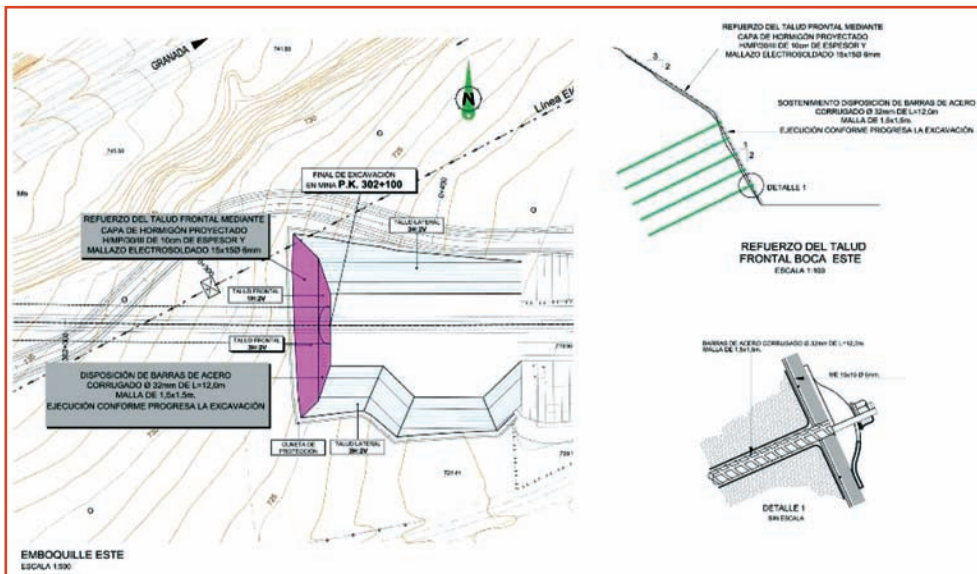
[Figura 6] .- Perfil longitudinal del Túnel de Archidona.



[Figura 7] .- Sección transversal al Túnel de Archidona, en el p.k. 301+900.



[Figura 8] .- Previsión inicial sobre los terrenos en el Portal Este



[Figura 9].- Plano del diseño original del talud Este del Túnel de Archidona.

## Construcción del Emboquille Este

En la tarde del día 30 de septiembre de 2009, después de una intensa lluvia, cuando se habían excavado unos 8 m en el talud frontal del emboquille este del Túnel de Archidona, sin haber colocado sostenimiento de ningún tipo, se produjo una inestabilidad local. Esto hizo

aconsejable paralizar la excavación, rellenando el hueco excavado con tierras y proyectando la capa de hormigón, de 10 cm de espesor, que estaba prevista en el Proyecto. Foto 2.

En la Foto 3 se muestra un detalle del talud frontal en el que se aprecia las roturas circulares inducidas en la cara del talud.



[Foto 2] .- Relleno con tierras del Portal Este.



[Foto 3] .- Roturas circulares en la cara del talud frontal del Túnel de Archidona.



[Foto 4].- Zona tectonizada en el talud frontal por la presencia de una falla.

Una inspección detallada del talud puso en evidencia la existencia de una zona tectonizada, debido a la presencia de una falla; tal como se ilustra en la Foto 4.

## Nuevo método constructivo para el Emboquille Este

A la vista de las inestabilidades que se produjeron en el talud frontal del emboquille Este, se adoptó un nuevo proceso constructivo que se fundamentó en *modificar lo menos posible los rellenos apilados en la excavación ya realizada*; para ello se construyó un recinto de pilotes, de 1 m de diámetro y 16 m de profundidad.

Sobre el recinto de pilotes se construyó una bóveda de hormigón armado, encofrada contra el terreno, y sobre ella se colocaron las tierras de relleno que conformaban la superficie final.

En las Figs. 10 y 11 se ilustra el nuevo proceso constructivo planteado y en el Plano de la Fig. 12 la posición de los pilotes en el terreno.

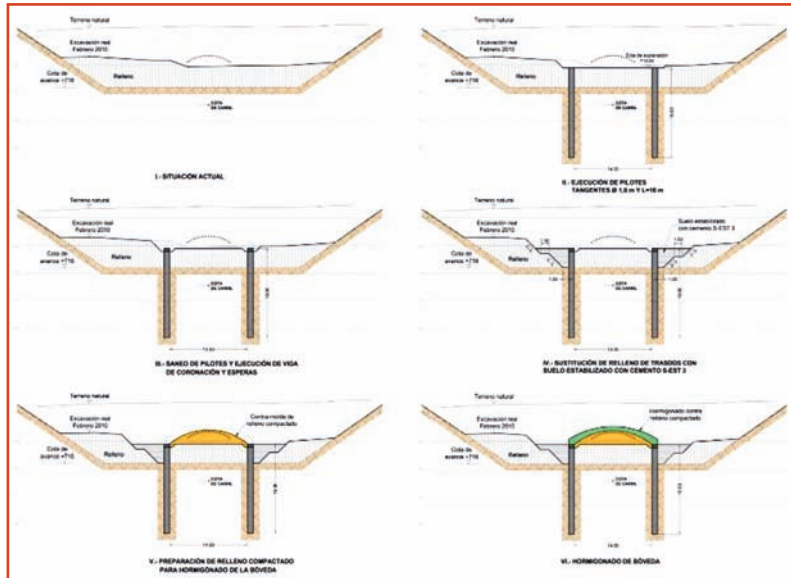
A la vista de las características del terreno en el que se debía excavar el portal Este, se llegó a la conclusión de que *el mayor peligro que había que afrontar en este emboquille era el hincamiento en las argilitas de la estructura que formaba el sostenimiento del túnel de la fase de Avance*.

Para hacer frente a este peligro se pensó en *recalar con micropilotes el sostenimiento del Avance*, construyendo una viga de atado para repartir las cargas transmitidas por los micropilotes y adelantar la construcción del revestimiento; para que trabajaran conjuntamente el sostenimiento y el revestimiento.

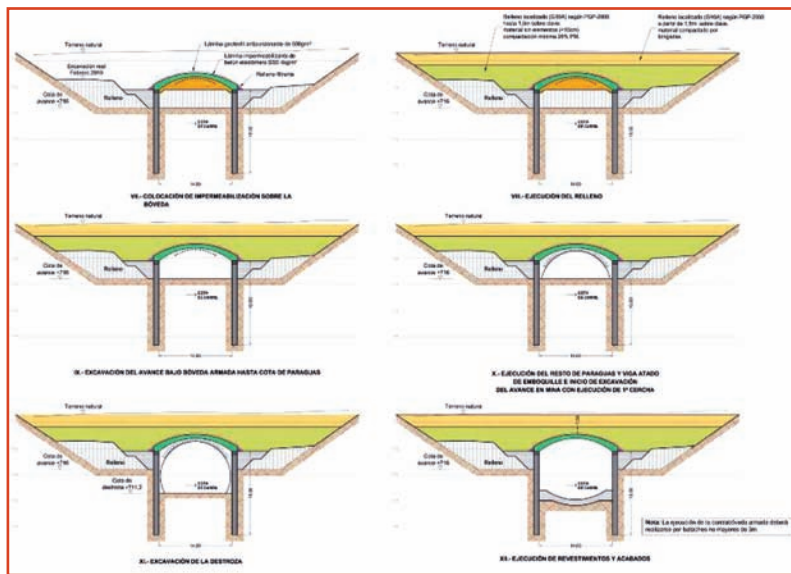
En el Plano de la Fig. 13 se muestra la definición del nuevo concepto adoptado.

## Construcción final del Emboquille Este

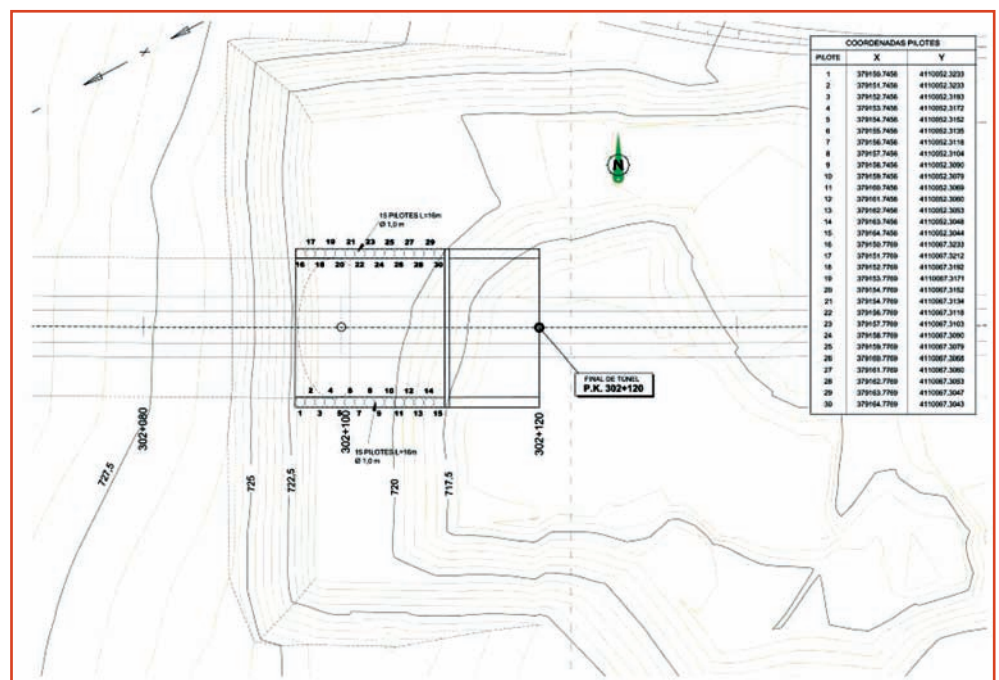
La pantalla de pilotes de la nueva estructura del emboquille y los micropilotes de recalce se construyeron sin problemas. En la Foto 5 se muestra una vista de los pilotes y de la ejecución de un micropilote; mientras que en la Foto 6 se muestra un micropilote ya terminado.



[Figura 10].- Nuevo proceso constructivo para el emboquille (I).

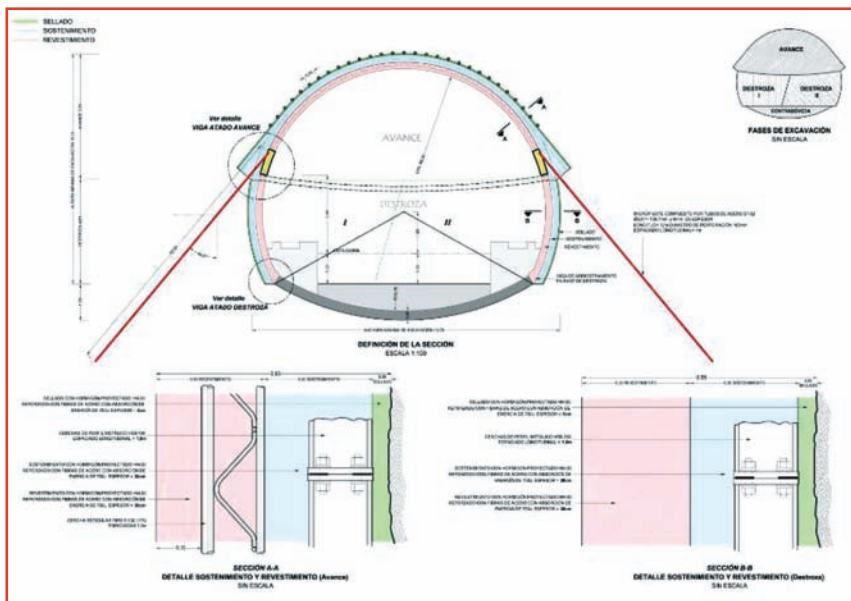


[Figura 11].- Nuevo proceso constructivo para el emboquille (II).

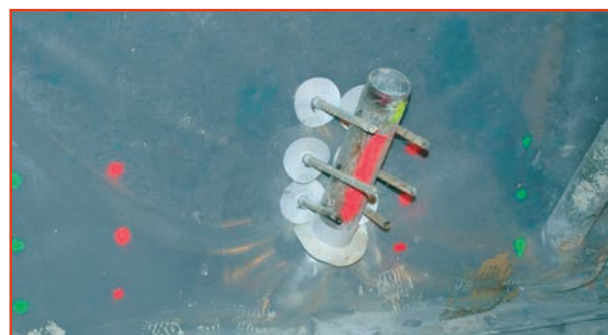


[Figura 12].- Posición de los micropilotes de emboquille

# Caracterización



[Foto 5].- Estructura de pilotes y ejecución de un micropilote.



[Figura 13].- Nueva solución de sostenimiento y revestimiento en la parte final del túnel.

[Foto 6].- Detalle de un micropilote de recalce.



[Foto 7].- Viga de atado y revestimiento ya construido.



[Foto 8].- Estructura del Emboquille Este ya terminada.

En la **Foto 7** se muestra una vista de la viga de atado y del recubrimiento ya colocado; mientras que en la **Foto 8** se muestra una vista de la estructura del emboquille ya terminada.

La excavación de la *Destroza* se inició el 7

de marzo de 2011; pero el fin de semana siguiente, 12 y 13 de marzo de 2011, estuvo lloviendo intensamente.

A media mañana del lunes 14 de marzo, cuando se llevaban avanzados unos 12 m del primer frente de *destroza*, **Foto 9**, se produjo un incremento brusco de 2 cm en la

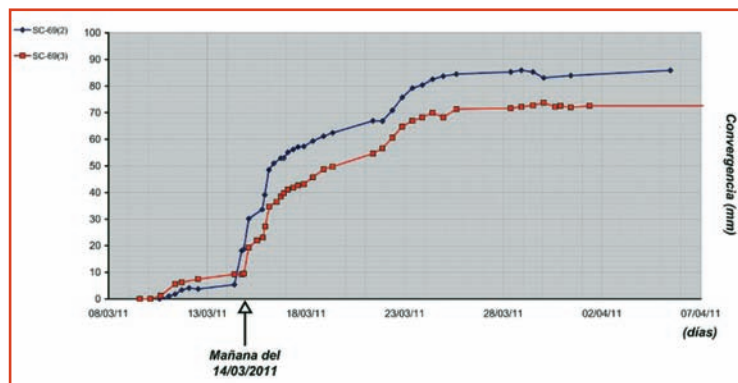
convergencia de la estación SC-69-2; tal como se muestra en la **Fig. 14**.

A lo largo del día 14 las sucesivas medidas de convergencia indicaban que ésta seguía creciendo y alcanzó 48 mm el día 15. Por ello se decidió alinear los dos bataches y construir la contrabóveda a 4 m del frente.

Tras adoptar esta medida, **Foto 10**, las convergencias se estabilizaron en unos diez días.



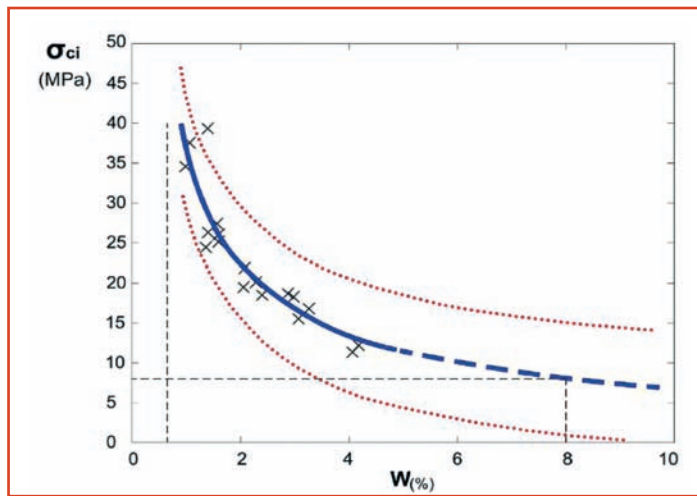
[Foto 9].- Construcción de la *destroza* y la contrabóveda del Túnel de Archidona (14/03/2011).



[Figura 14].- Evolución de las convergencias en el primer batache de la *Destroza* del Túnel de Archidona.



[Foto 10] .- Construcción de la Destroza y la Contrabóveda del Túnel de Archidona.



[Figura 15] .- Variación de la resistencia a compresión simple de la creta del Canal de La Mancha con el contenido de humedad.

### Efecto del contenido en humedad sobre la resistencia de algunas rocas

Las difíciles experiencias habidas en la construcción del Emboquille Este del Túnel de Archidona pusieron de manifiesto la necesidad de establecer una metodología para caracterizar la variación de la resistencia de estos terrenos, en función del grado de humedad que contengan; metodología que también debía ser compatible con las positivas experiencias habidas en la construcción del Túnel de S. Celoni.

Para establecer esta metodología se ha cuantificado el efecto que tiene el contenido de humedad, en algunos terrenos, sobre su resistencia; tal como se expone en los apartados siguientes.

#### Creta del Canal de La Mancha

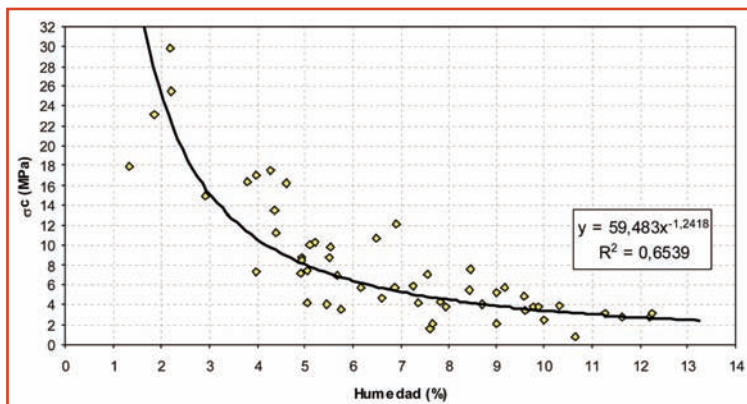
En la Fig. 15, obtenida de una publicación del Centre d'Études des Tunnels (CETU), muestra la variación de la resistencia a Compresión Simple de la creta en la que se excavó el Túnel bajo el Canal de La Mancha. En esta figura se aprecia que la resistencia a Compresión Simple es del orden de 40 Mpa, cuando la humedad de la muestra es del 1%; pero esta resistencia desciende a unos 8 Mpa, si la humedad aumenta hasta el 8%.

#### Margas del Túnel de San Formerio (Burgos)

Geocontrol, en UTE con TRN, fue encargada por ADIF de redactar el proyecto constructivo del tramo Armiñón-La Puebla de Arganzón de la Línea de Alta Velocidad entre Burgos y Vitoria; tramo en el que debe construirse el Túnel de San Formerio, que tiene una longitud de 3,6 km. Este túnel debe ser excavado en areniscas y margas del Mioceno inferior.

En las muestras de estas margas, ensayadas a compresión simple, se hicieron determinaciones del contenido de humedad; lo cual ha permitido obtener la relación que se presenta en la Fig. 16.

Estas margas presentan una disminución de la resistencia a compresión simple al aumentar la humedad muy similar a la creta del Canal de La Mancha; pues para una humedad del 2% su resistencia a compresión simple oscila entre 23 y 30 MPa, mientras que si la hu-



[Figura 16] .- Variación de la resistencia a compresión simple de las margas del Túnel de San Formerio (Burgos) con la humedad.

medad es del 8% la resistencia esta comprendida entre 3 y 7 MPa.

#### Areniscas margosas del Túnel de Sorbas (Almería)

En el Túnel de Sorbas, que formará parte de la Línea de Alta Velocidad Murcia-Almería, Gecontrol con la colaboración de ADIF está desarrollando un proyecto de I+D que tiene por objeto relacionar los cambios del terreno con los parámetros de funcionamiento de la tuneladora que construye el túnel.

Dentro de este proyecto se han realizado ensayos de compresión simple con muestras de las areniscas margosas del Mioceno Superior, que se están excavando en este túnel.

En la Fig. 17 se incluye la representación de las resistencias a compresión simple obtenidas en función del grado de humedad de cada muestra.

En dicha figura se aprecia que las areniscas margosas del Túnel de Sorbas son terre-

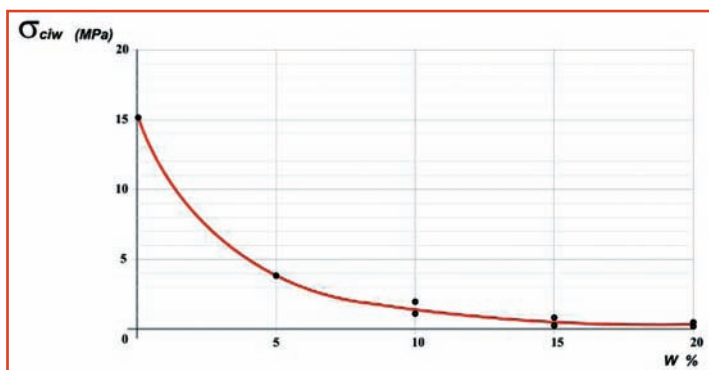
nos mucho menos resistentes que los del Túnel de San Formerio o la creta del Canal de La Mancha; pues en estado seco su resistencia a compresión simple es sólo de 15 MPa.

Pero al igual que en los terrenos anteriores; en estas areniscas también disminuye claramente su resistencia al aumentar su humedad, bajando a tan solo 2 MPa si la humedad es del 10%.

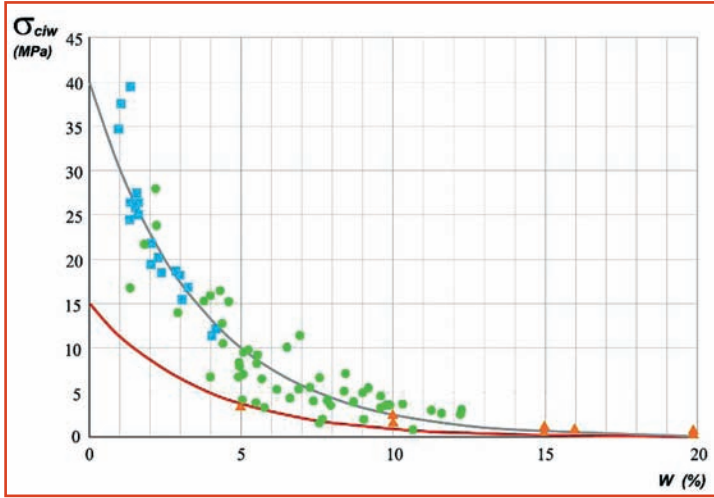
#### Variación de la resistencia a compresión simple con la humedad

En la Fig. 18 se han representado los datos de la resistencia a compresión simple obtenidos con muestras de la creta del Canal de La Mancha, margas del Túnel de San Formerio (Burgos) y areniscas margosas del Túnel de Sorbas; junto con los correspondientes datos de la humedad de cada muestra ensayada.

En esta figura se aprecia claramente que los puntos representativos de las areniscas margosas del Túnel de Sorbas constituyen un grupo diferente del que integran los otros terrenos.



[Figura 17] .- Variación de la resistencia a compresión simple de las areniscas margosas del Túnel de Sorbas con la humedad.



■ [Fig 18].- Variación de la resistencia a compresión simple con la humedad.



■ [Foto 11].- Elementos de una batería triple.

Después de analizar detalladamente estos datos, se ha llegado a la conclusión de que la pérdida de resistencia de una muestra, en función de su grado de humedad, depende de la resistencia a compresión simple de la muestra seca y la ecuación que mejor se ajusta a este fenómeno es:

$$\sigma_{ciW} = \sigma_{ci\text{seca}} \cdot 10^{\frac{-W}{8}}$$

donde:

$\sigma_{ciW}$  = resistencia a compresión simple de la roca intacta con un grado de humedad  $w$ .

$\sigma_{ci\text{seca}}$  = resistencia a compresión simple de la roca intacta para  $w = 0$ .

$w$  = grado de humedad de la muestra.

### Metodología para caracterizar los terrenos sensibles al agua

De lo expuesto anteriormente se deduce que el grado de humedad natural que presentan algunos terrenos, de resistencia media a pequeña, tiene dos efectos:

- I.- Creación de una presión de poro, cuando se alcanza la saturación; que, como ya se sabe rebaja las tensiones efectivas que puede soportar el terreno.
- II.- Disminución de la resistencia del terreno a medida que aumenta su contenido en humedad.

En los apartados siguientes se presenta la metodología que se recomienda para tener en cuenta correctamente estos efectos; durante la fase de redacción del proyecto de un túnel.

### Obtención de las muestras del terreno

El objetivo básico al obtener muestras de un terreno es que éstas puedan considerarse *suficientemente representativas*; lo cual, en el caso de terrenos cuya resistencia es sensible al agua, implica que las muestras no vean alterada el contenido de humedad que contienen de forma natural.

Para cumplir este objetivo, las muestras obtenidas mediante sondeos deben tener el mayor diámetro que sea posible y la perforación debe hacerse con una batería triple; que protege el testigo extraído mediante dos semitubos, además de la habitual camisa de acero y el varillaje de perforación (Foto 11).

### Determinación de la humedad natural

La humedad natural del terreno varía apreciablemente con la profundidad; ya que depende de la compacidad del terreno.

La mejor forma de determinar la humedad del terreno en profundidad es aprovechar los testigos de perforación; determinando la humedad en fragmentos de terreno obtenidos en la parte central de los testigos.

Para que las medidas sean suficientemente representativas es necesario que las perforaciones se hagan con batería triple, tipo PQ3, que tiene un diámetro de perforación de 122,6 mm y proporciona testigos de 83 mm de diámetro.

### Estimación de la presión del poro

Cuando un túnel vaya a ser construido bajo el nivel freático es imprescindible estimar la presión de poro que se produce en el terreno próximo a la excavación.

La presión de poro que se produzca depende de que el agua existente en el terreno tenga la posibilidad de desplazarse hacia la excavación; es decir depende de la permeabilidad del terreno y del efecto drenante de la excavación.

Si debido a la baja permeabilidad del terreno no se produce flujo de agua hacia la excavación se puede asumir que no existirá presión de poro en el terreno próximo a la excavación, durante la construcción del túnel.

Una vez construido el túnel, si éste se considera completamente estanco, se desarrollará una presión de poro en el terreno que irá creciendo hasta alcanzar, a largo plazo, la correspondiente a la posición del nivel freático.

### Estimación de la resistencia real del terreno según su contenido en humedad

En primer lugar hay que hacer ensayos de resistencia a compresión simple con muestras completamente secas, para determinar el valor  $\sigma_{ci\text{seca}}$ ; tras lo cual se podrá calcular la resistencia del terreno ( $\sigma_{ciW}$ ) para un grado de humedad ( $w$ ), mediante la expresión ya presentada:

$$\sigma_{ciW} = \sigma_{ci\text{seca}} \cdot 10^{\frac{-W}{8}}$$

En segundo lugar hay que determinar la humedad en fragmentos de testigos, obtenidos a distinta profundidad, con dos objetivos:

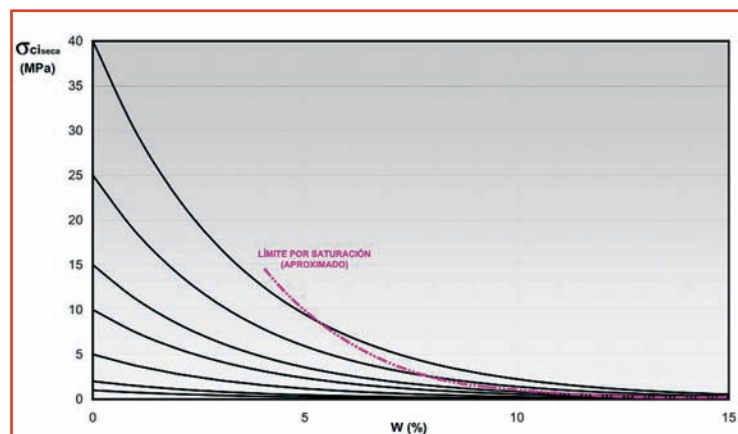
- I.- Comprobar que la expresión de la ecuación anterior es válida.
- II.- Estimar, con el debido fundamento, los contenidos de humedad de los terrenos involucrados en la construcción del túnel.

Finalmente, utilizando el ábaco de la Fig. 19, se debe calcular la resistencia real del terreno para los contenidos de humedad determinados.

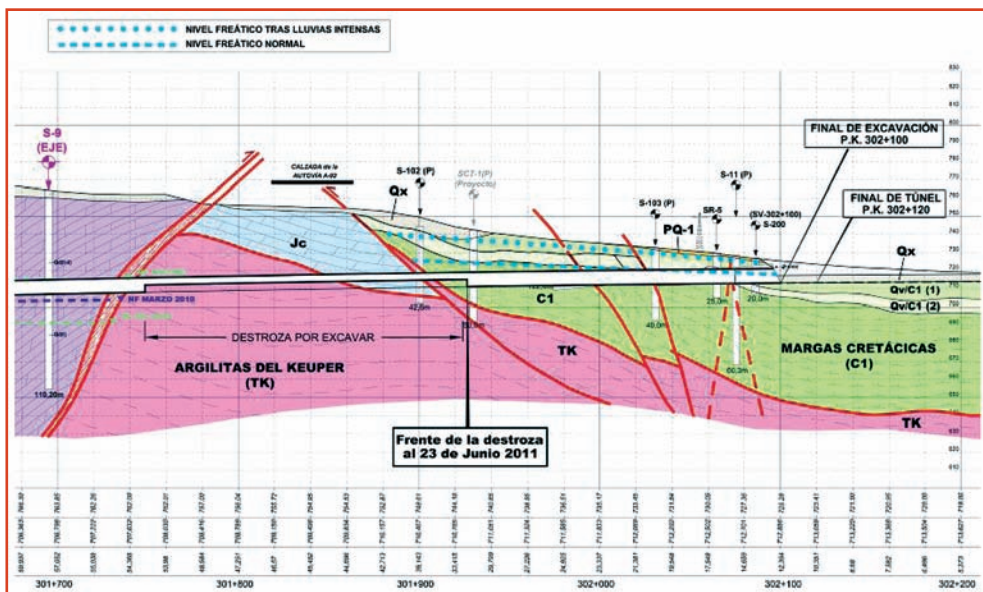
### Aplicación al Emboquille Este del Túnel de Archidona

En el Emboquille Este del Túnel de Archidona se han distinguido tres terrenos cretácicos, que tienen un origen común: Arcillas de alteración; Argilitas de transición y Margas arcillosas; tal como se ilustra en la Fig. 20.

Los ensayos a compresión simple, realizados con muestras secas de estos terrenos, han dado los siguientes resultados:



■ [Figura 19] .- Ábaco para determinar la resistencia real del terreno en función de su grado de humedad.



■ [Figura 20] .- Perfil estratigráfico del Emboquille Este del Túnel de Archidona.

- **Arcillas de alteración:**  
 $\sigma_{ciseca} = 0,34 \text{ MPa}, 0,65 \text{ MPa}$
- **Argilitas de transición:**  
 $\sigma_{ciseca} = 1,2 \text{ MPa}$
- **Margas arcillosas:**  
 $\sigma_{ciseca} = 5,2 \text{ MPa}$

Tal como se ilustra en la Fig. 20 el nivel freático varía sensiblemente en la zona del Emboquille Este; pues en condiciones normales está situado en la clave del túnel, pero cuando se producen fuertes lluvias el nivel freático se sitúa prácticamente en la superficie del terreno. En estas condiciones, teniendo en cuenta el efecto de las fallas, se considera que estos terrenos tienen los contenidos en humedad que se muestran en el Cuadro I.

A partir de los valores de  $\sigma_{ciseca}$  y de  $W$  se ha determinado la resistencia real de los tres terrenos, utilizando la expresión:

$$\sigma_{ciW} = \sigma_{ciseca} \cdot 10^{\frac{-W}{8}}$$

y obteniendo los resultados expuestos en el Cuadro II.

A partir de los resultados anteriores; resulta que la elevación del nivel freático produce en el Emboquille Este del Túnel de Archidona una pérdida de resistencia, respecto a la resistencia calculada con el nivel freático bajo, del 90% en las arcillas, del 96,4% en las argilitas y del 76,2% en las margas. Esta importante pérdida de resistencia, unida al incremento de la presión de poro generada por la subida del nivel freático, justifica los problemas de estabilidad sufridos en el Emboquille Este del Túnel de Archidona en época de fuertes lluvias.

### Conclusiones

- La experiencia indica que la resistencia de algunos terrenos Terciarios, básicamente de origen arcilloso o limoso, disminuye al aumentar su contenido en humedad.
- La situación más frecuente es que estos terrenos sean claramente impermeables; con lo cual si se construye en ellos un tú-

nel bajo el nivel freático, la excavación anulará la presión de poro en los terrenos próximos al contorno del túnel, la ventilación hará que disminuya su contenido en humedad y, consecuentemente, aumentará su resistencia. La construcción de túneles en estos casos se suele desarrollar sin dificultades; como en el caso del Túnel de Sant Celoni.

- En otros casos, debido a la presencia de niveles arenosos de elevada permeabilidad o de fallas en el terreno, en las excavaciones que se realicen bajo el nivel freático se producirá el flujo de agua y no se podrá asumir que la presión de poro se anule. Además, la humedad del terreno aumentará, y su resistencia disminuirá; con lo que se crearán importantes problemas, como en el caso del Túnel de Archidona.
- La variación de la resistencia con el contenido de humedad se cuantifica muy bien, a partir de la resistencia a compresión simple de muestras secas, mediante la expresión:

$$\sigma_{ciW} = \sigma_{ciseca} \cdot 10^{\frac{-W}{8}}$$

- Para determinar el grado de humedad de un terreno, en función de la profundidad, se recomienda obtener testigos mediante sondeos con triple batería, con coronas tipo PQ3; que tiene un diámetro de perforación de 122,6 mm y proporcionan testigos de 83 mm de diámetro.
- Con fragmentos del núcleo de estos testigos se deben hacer determinaciones del contenido en humedad, y en base a estos resultados se podrá establecer la variación de la humedad con la profundidad.
- Una vez que se establezca una previsión realista del perfil de la humedad con la profundidad se podrá determinar la resistencia real del terreno; que debe ser empleada en los cálculos; para que éstos reflejen adecuadamente la realidad.
- Estos parámetros realistas harán posible proyectar túneles más baratos en los casos en los que no se manifieste la presencia de agua en la excavación y cuando deba considerarse la presencia de agua, esta metodología permitirá proyectar túneles suficientemente seguros.

TERRENO	NIVEL FREÁTICO BAJO		NIVEL FREÁTICO ALTO	
	HUMEDAD (%)	GRADO DE SATURACIÓN (%)	HUMEDAD (%)	GRADO DE SATURACIÓN (%)
Arcillas	16	43	32	86,5
Argilitas	10	46	21	95,5
Margas	4	47	9	100

■ [CUADRO I].- Contenido de humedad de los terrenos en función del nivel freático.

TERRENO	$\sigma_{ciseca}$ (MPa)	NIVEL FREÁTICO BAJO		NIVEL FREÁTICO ALTO		PÉRDIDA DE RESISTENCIA AL SUBIR EL NIVEL FREÁTICO $100 \left( 1 - \frac{(A)-(B)}{(A)} \right)$
		HUMEDAD (%)	$\sigma_{ciW}$ (MPa) (A)	HUMEDAD (%)	$\sigma_{ciW}$ (MPa) (B)	
Arcillas	0,65	16	0,0065 (0,65 t/m <sup>2</sup> )	32	0,00065 (0,065 t/m <sup>2</sup> )	90,0%
Argilitas	1,20	10	0,067 (6,7 t/m <sup>2</sup> )	21	0,0024 (0,2 t/m <sup>2</sup> )	96,4%
Margas	5,20	4	1,64	9	0,39	76,2%

■ [CUADRO II].- Resistencia real de los terrenos.

**GEOCONTROL, S.A.**  
Cristóbal Bordiú, 19 - 21, 5ªA  
28003 Madrid  
☎: 915 531 763 • Fax: 915 549 396  
E-m: [geocontrol@geocontrol.es](mailto:geocontrol@geocontrol.es)  
Web: [www.geocontrol.es](http://www.geocontrol.es)