

Para la fase de pre-stripping de la corta minera de Cobre Las Cruces (Sevilla)

# Caracterización de detalle de las margas azules del Guadalquivir mediante ensayos *in situ* y de laboratorio

En el presente artículo se describen los trabajos llevados a cabo en cuestión de ensayos *in situ* y de laboratorio que han servido para la caracterización geotécnica de las margas donde, además, se ha podido definir una zonificación geotécnica de éstas en diferentes niveles en profundidad. En segundo lugar, se realiza una comparación de los resultados obtenidos en laboratorio entre las muestras procedentes de sondeos y las muestras talladas durante la excavación de la corta. En tercer lugar, se discute sobre la deformabilidad de las margas a partir de los resultados obtenidos de los ensayos presiométricos. Finalmente, se expone el comportamiento post-rotura tipo *strain-softening* o reblandecimiento, observado en los ensayos de compresión simple con medida de la deformación tras la rotura.

**C**obre Las Cruces es una mina a cielo abierto que se localiza en Gerena, provincia de Sevilla y constituye actualmente el mayor proyecto minero de Europa. La mina es propiedad de INMET y Leucadia, siendo explotada por INMET.

La Fig. 1 incluye la localización geográfica de la mina, así como el estado de la excavación a finales de julio de 2009.

Se trata de un yacimiento de sulfuros masivos que se engloba dentro de la gran provincia metalogénica de la Faja Pirítica del Suroeste de la Península Ibérica, del cual se explota mineral de cobre secundario. La mineralización se encuentra encajada en rocas volcánicas, metamórficas y sedimentarias del Paleozoico, bajo un recubrimiento de sedimentos del Terciario constituidos por unos 140 m de arcillas carbonatadas, conocidas como *Margas Azules del Guadalquivir*. Las reservas se han estimado en 17,62 Mt de mineral con una ley de 6,21% de cobre. La dimensión de la corta en su mayor desarrollo alcanzará 1.600 metros de longitud en dirección Este-Oeste, 900 metros de anchura en dirección Norte-Sur y una profundidad máxima de 250 metros.

Además en un futuro próximo se prevé la explotación de una pequeña mina subterránea, en la cual, el mineral de cobre se explotará usando métodos de galería, relleo y corte por subniveles.

**Palabras clave:** CORTA, COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO, DEFORMACIÓN, ENSAYOS, MARGAS.



J.M. GALERA (\*); M. CHECA, C. PÉREZ, y B. WILLIAMS (\*\*); y V. POZO (\*\*\*)

(\*) GEOCONTROL CHILE, S.A.

(\*\*) COBRE LAS CRUCES, S.A.

(\*\*\*) GEOCONTROL, S.A.

Antes de alcanzar la mineralización, es necesario realizar un *pre-stripping* de 120 a 150 m del recubrimiento constituido por las arcillas carbonatadas, conocidas como *Margas Azules del Guadalquivir* (Ayala, F., 1978; Oteo, C., 1976; Tsige, M., 1999). Estas pertenecen a la

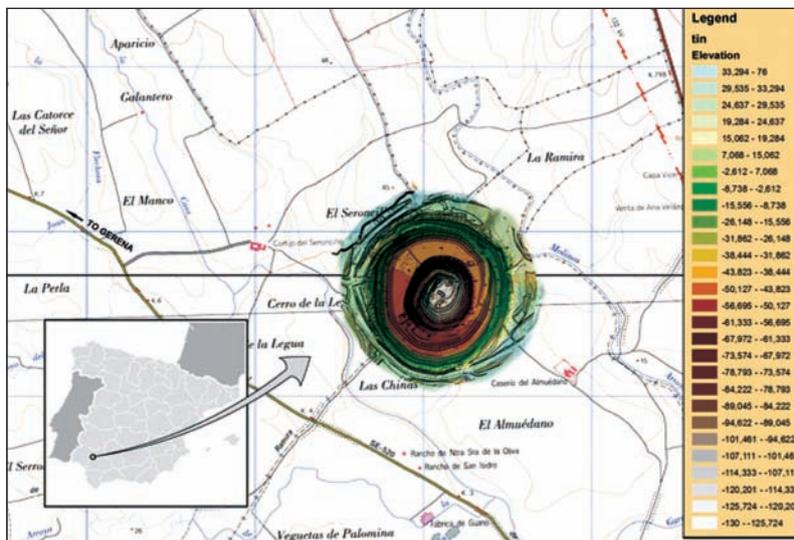
formación terciaria de origen marino del Tortonense (Mioceno). Desde el punto de vista geomecánico, estas margas presentan una resistencia débil y parámetros deformacionales excepcionalmente bajos, así como una baja permeabilidad a pesar de la presencia de discontinuidades. En consecuencia, su comportamiento geotécnico anisótropo constituye un problema en las obras que sobre estos materiales se desarrollan.

Por esta razón, desde la superficie hasta la cota de -150 msnm, el talud global posee un ángulo medio de 28°, dividido gradualmente en bancos de 10 m altura y 60° de inclinación, exceptuando los dos primeros, en los cuales se ha adoptado una inclinación de 45°.

Hasta el momento del presente trabajo, la primera fase de excavación se ha finalizado, mientras que la segunda, homotética respecto a la primera, se encuentra al 50%.

## Caracterización geotécnica de las margas

A continuación se describen los trabajos llevados a cabo en cuestión de ensayos "in situ" y de laboratorio realizados, tanto en el estudio geotécnico de la corta minera como en la fase de seguimiento geotécnico de la excavación, que han servido para la caracterización geomecánica de las margas. De esta forma se ha podido definir una zonificación geotécnica de éstas en diferentes



[Figura 1] .- Mapa de localización que muestra el modelo de elevación digital de la corta.

niveles en función de la evolución de su resistencia y deformabilidad en profundidad.

## Ensayos de laboratorio

Para llevar a cabo la zonificación geotécnica del paquete margoso se ha realizado una intensiva campaña de ensayos geotécnicos que incluye 412 ensayos de laboratorio (tanto de muestras procedentes de sondeos como de muestras talladas durante la excavación de la corta), así como 75 ensayos presiométricos en sondeos.

### • Parámetros mineralógicos

Para el conocimiento mineralógico y petrológico de las margas se dispone de 44 difracciones de Rayos X y 154 determinaciones del contenido en carbonatos.

La **Fig. 2** muestra la distribución de los minerales de la arcilla y el contenido en carbonatos respecto a la profundidad.

Como se observa, el mineral arcilloso más abundante es la illita, con un contenido comprendido entre 20% y 40%. La caolinita disminuye en profundidad hasta llegar a desaparecer a los 100 m, mientras que la presencia de esmectita aumenta a partir de esa profundidad. El contenido en carbonatos muestra una elevada dispersión en los niveles más superficiales, la cual debe estar relacionada con procesos de meteorización, mientras que, en profundidad, en general se mantiene un rango del 15% al 30%.

### • Parámetros petrofísicos y de estado

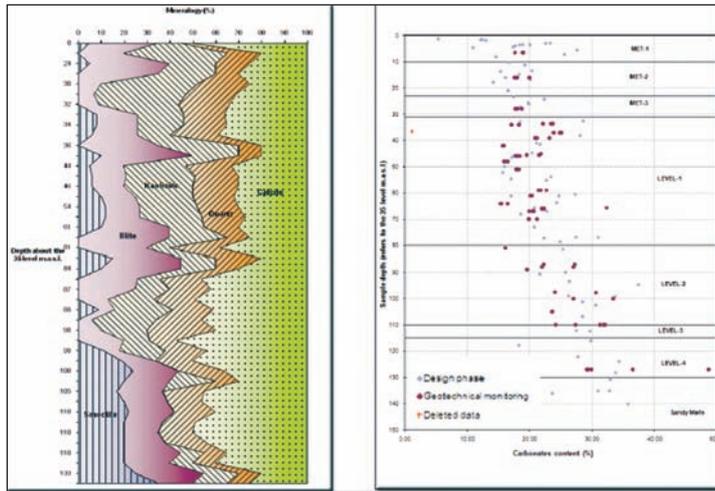
Para caracterizar los principales parámetros físicos de las margas, se dispone de la siguiente información:

- 352 determinaciones de densidad seca.
- 115 determinaciones del peso específico de las partículas sólidas.
- 359 determinaciones de humedad.
- 221 determinaciones del Índice de Plasticidad.

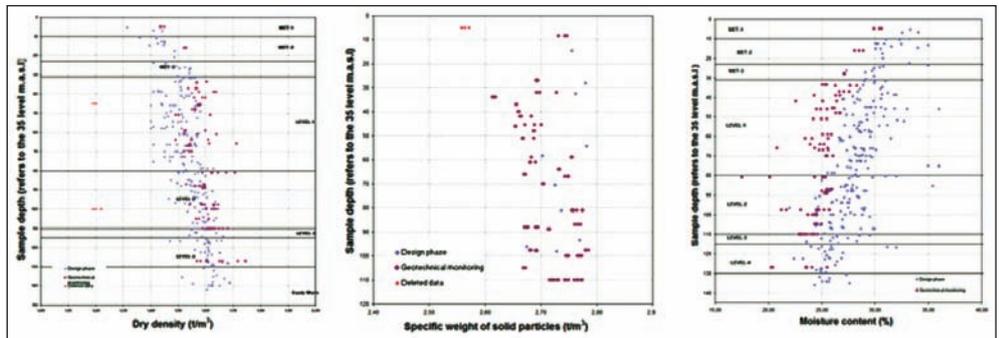
La **Fig. 3** muestra la evolución de estos parámetros con la profundidad. Se observa que la densidad de las muestras talladas in situ es mayor que la obtenida en las muestras inalteradas procedentes de sondeos. Como era de esperar, el contenido en agua es mayor en las muestras procedentes de sondeos, indicando una pérdida de humedad en las margas conforme se desarrolla la excavación.

Se observa un claro aumento de la densidad seca en los primeros 31 m de profundidad, si bien esta tendencia no se aprecia de los 31 m a los 80 m de profundidad, es a partir de esta profundidad cuando se vuelve a observar dicho incremento. Por su parte, la humedad disminuye linealmente con la profundidad.

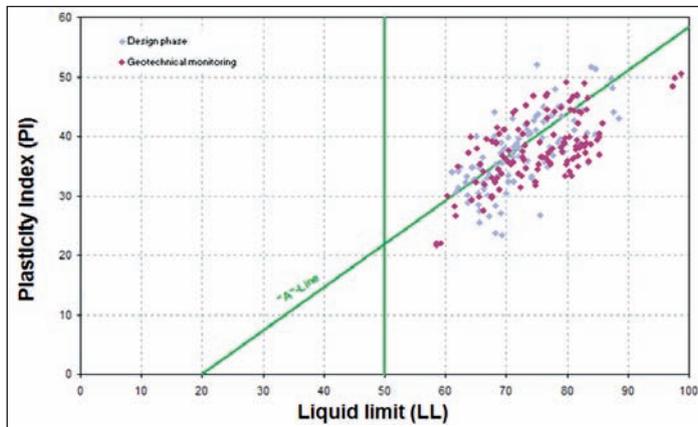
En la **Fig. 4** se representa la plasticidad de los niveles margosos en la carta de plasticidad de Casagrande. Como se observa, las margas



[Figura 2] .- Mineralogía y contenido en carbonatos.



[Figura 3] .- Densidad seca, Peso específico de las partículas sólidas y contenido en Humedad.



[Figura 4] .- Carta de plasticidad.

se clasifican como arcillas y limos de alta plasticidad. Las muestras se sitúan de forma paralela a la línea A lo que indica una génesis similar, aunque no se observan variaciones significativas con la profundidad.

En la mayor parte de los casos la humedad

natural de las muestras es inferior a la humedad del límite plástico, de tal forma que las margas se encuentran en un estado sólido de elevada rigidez relativa.

En la **Tabla 1** se resumen los principales parámetros físicos de las margas.

TRAMO	PROF. (m)	PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS (t/m³)	DENSIDAD SECA (t/m³)	HUMEDAD (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)
MET-1	0-10	2,714	1,415	30,3	34,3
MET-2	10-23	2,714	1,459	28,5	30,2
MET-3	23-31	2,714	1,496	27,1	30,8
NIVEL-1	31-80	2,714	1,528	25,5	38,1
NIVEL-2	80-110	2,714	1,585	24,2	39,1
NIVEL-3	110-115	2,714	1,579	24,2	38,5
NIVEL-4	115-130	2,714	1,620	23,1	37,0
MARGAS ARENOSAS	130-140	2,714	1,622	25,7	35,3

[TABLA 1].- Principales parámetros físicos en las margas.

## • Resistencia a la compresión simple

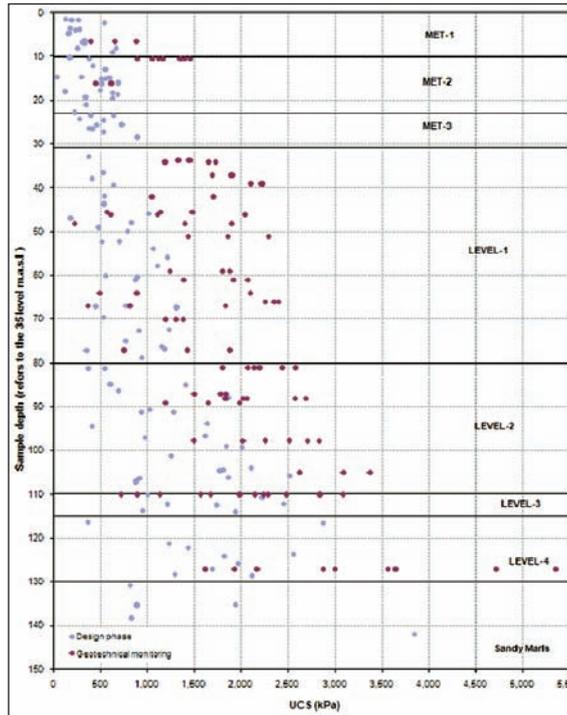
La determinación de la *Resistencia a Compresión Simple (RCS)* resulta un parámetro básico utilizado en los análisis de estabilidad de la corta. Para ello se dispone de 122 ensayos realizados en la fase de Proyecto, antes de la excavación, y 106 realizados en la fase de seguimiento geotécnico.

La **Fig. 5** muestra la evolución de la *RCS* con la profundidad, pudiéndose destacar los siguientes aspectos:

- Los valores obtenidos en las muestras procedentes de sondeos son inferiores a los obtenidos en las muestras talladas *in situ*.
- Si bien se observa un cierto aumento de la resistencia con la profundidad los primeros 31 m, la dispersión es elevada. En el tramo comprendido entre los 31 m y 80 m la dispersión también es elevada, aunque en este caso no se observa una tendencia creciente.
- A partir de los 80 m se observa un claro aumento de la resistencia a compresión simple con la profundidad.
- En el tramo comprendido entre los 115 m y los 130 m existe una dispersión notable de los resultados, donde los valores de resistencia superiores sugieren un comportamiento de roca blanda.
- Debe resaltarse la buena correlación existente entre la resistencia a compresión con el contenido en carbonatos.

## Evolución de la deformabilidad de las margas con la profundidad

En este apartado se exponen los parámetros deformacionales obtenidos de los 178 ensayos

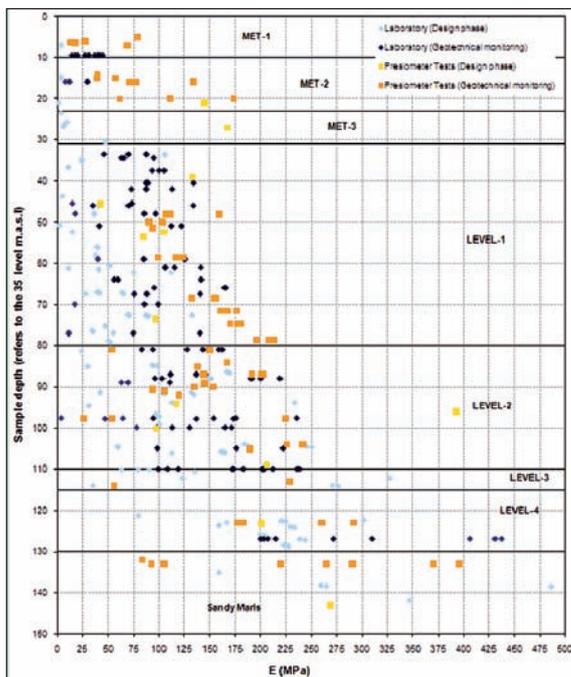


■ [Figura 5].- Resistencia a Compresión Simple.

de laboratorio, con determinación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, y de los 75 ensayos presiométricos realizados en sondeos. Todos los ensayos disponibles corresponden tanto a la fase de Proyecto como a la fase de seguimiento geotécnico de la excavación.

La determinación de la deformabilidad de las margas es fundamental para los cálculos de estabilidad donde la rotura produce al superar cierta deformación crítica y se alcanzan propiedades resistentes residuales.

La **Fig. 6** muestra la distribución con la profundidad de los valores obtenidos.



■ [Figura 6].- Evolución del módulo de elasticidad con la profundidad.

■ [Figura 7].- Valores de cálculo y rango de dispersión del módulo de elasticidad recicladas en diferentes países (Fuente: EAPA, 2006).

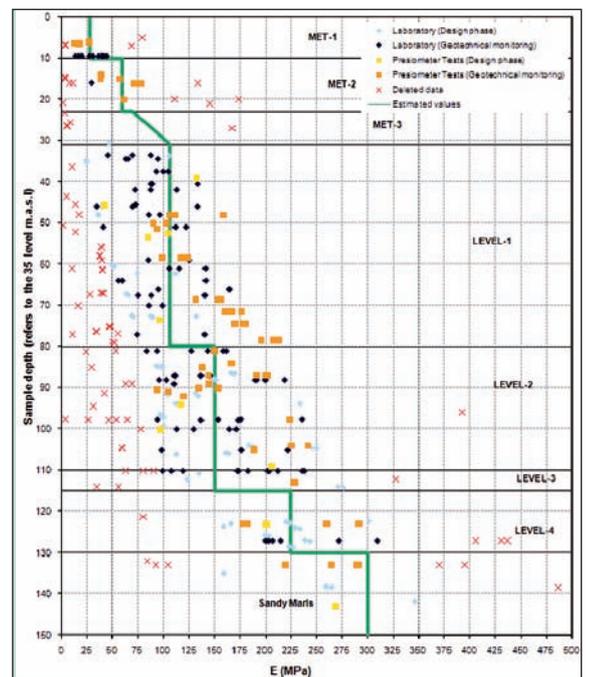
Se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Los módulos elásticos obtenidos a partir de los ensayos a compresión simple en el Proyecto resultan inferiores a los obtenidos en el seguimiento geotécnico a partir de muestras talladas. Este fenómeno, ya comentado con anterioridad, se observa también en relación al parámetro RCS.
- Los módulos presiométricos obtenidos en Proyecto en sondeos profundos resultan similares a los obtenidos en la fase de seguimiento en sondeos superficiales. Del mismo modo, existe una buena correlación entre los ensayos de laboratorio sobre muestras talladas y los ensayos presiométricos, lo que confirma la calidad de las muestras talladas y la pequeña influencia del efecto escala en el paquete margoso.
- Se observa una clara tendencia del incremento del módulo de elasticidad con la profundidad.

Por último, en la **Fig. 7** se muestra gráficamente el rango de dispersión de los valores y los valores de cálculo asignados a cada nivel del paquete margoso.

## Zonificación geotécnica de las margas en profundidad

Aunque el paquete margoso resulta homogéneo en apariencia, un análisis detallado permite definir, según su comportamiento geotécnico, diferentes niveles en profundidad. De esta forma, el paquete margoso puede dividirse en los siguientes tramos:



. Además de la envuelta de los áridos, los aspectos críticos en la ejecución de las obras con estas mezclas son:

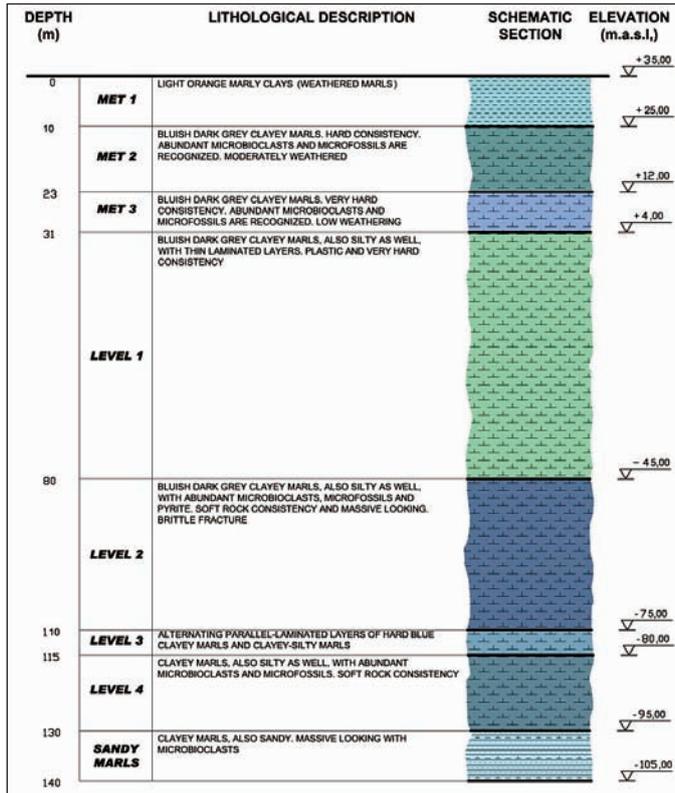
a) **Margas Meteorizadas (MET):** las margas en los niveles superficiales se encuentran altamente meteorizadas. Aunque inicialmente sólo se diferenciaron dos niveles, durante la excavación fue posible distinguir tres:

- **MET-1**, margas muy meteorizadas, de tonalidad anaranjada y 10 m de espesor.
- **MET-2**, hasta los 23 m de profundidad. Se trata de margas azules que presentan signos apreciables de meteorización con presencia de grietas verticales de desecación con espaciado métrico.
- **MET-3**, hasta los 31 m de profundidad. Se trata de margas con signos débiles de meteorización en las cuales las grietas de desecación aumentan su espaciado hasta la decena de metros. La distinción de este tercer tramo posee una índole descriptiva, ya que desde el punto de vista geomecánico sus parámetros resistentes no difieren de los del nivel **MET-2**.

b) **Margas sanas:** desde los 31 m de profundidad no existen signos de meteorización y las margas muestran su característico color gris azulado. Pueden subdividirse en los siguientes tramos:

- **Nivel-1, marga blanda**, desde los 31 a los 80 m de profundidad. No existen grietas de desecación pero sí diaclasas subverticales y planos de estratificación con un espaciado en torno a los 5 m.
- **Nivel-2, marga media**, hasta los 110 m de profundidad. Presenta consistencia de roca blanda grado 0 a grado 0-1, con rotura frágil.
- **Nivel-3, marga blanda**, presenta las mismas características que las del **Nivel-1** con una potencia media entre los 5 y 10 m, que, además, no se reconoce en todo el yacimiento. Sus propiedades geotécnicas presentan una elevada dispersión, si bien sus parámetros medios son similares a los del nivel suprayacente.
- **Nivel-4, marga dura**. Presenta una consistencia de roca blanda grado 0-1, en la cual la Resistencia y la rigidez aumenta de forma muy significativa.
- **Marga arenosa**, se trata de un nivel masivo de margas, de espesor en torno a los 5 m, con presencia de arenas al situarse justo por encima de la formación arenosa del acuífero *Niebla-Posadas*.

En la **Fig. 8** se muestra la tramificación descrita del paquete margoso.



[Figura 8] .- Sección litológica esquemática de las margas azules.

## Comparación entre los resultados de los ensayos realizados sobre muestras inalteradas y sobre bloques tallados de marga

A continuación se realiza una comparación entre los resultados de los ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes de los sondeos previos a la excavación de la corta y los ensayos realizados sobre muestras obtenidas tallando la marga in situ. Puede apreciarse un elevado efecto de alterabilidad en la toma de muestras inalteradas de manera que los resultados que se obtienen sobre muestras talladas in situ son mucho más elevados.

Así los ensayos realizados sobre muestras inalteradas obtenidas en sondeo presentan una menor densidad y una mayor humedad que aquellos realizados sobre muestras obtenidas tallando manualmente en la marga durante el progreso de la excavación del cielo abierto.

Este hecho evidencia la imposibilidad, en este tipo de rocas blandas, de obtener muestras realmente inalteradas. Este mismo fenómeno se manifiesta cualquiera que sea el método de obtención de la muestra durante la perforación del sondeo (*californiana*, *Shelby*, etc).

Como consecuencia de esta alterabilidad de las muestras, los valores de resistencia a la compresión uniaxial y de los módulos de deformación son claramente menores que los que se han obtenido durante el seguimiento geotécnico efectuado durante la excavación de la corta.

Esta alterabilidad no solo se traduce en una mayor humedad y menor densidad, sino que

pueden llegar a apreciarse deformaciones en la muestra derivadas del propio proceso de su obtención.

## Comportamiento en la post-rotura

En este apartado se presenta el marcado comportamiento de reblandecimiento o *strain-softening* de estas margas azules. Para valorar este comportamiento adecuadamente, se han realizado ensayos de compresión a deformación constante, lo que permite el seguimiento de la deformación tras la rotura.

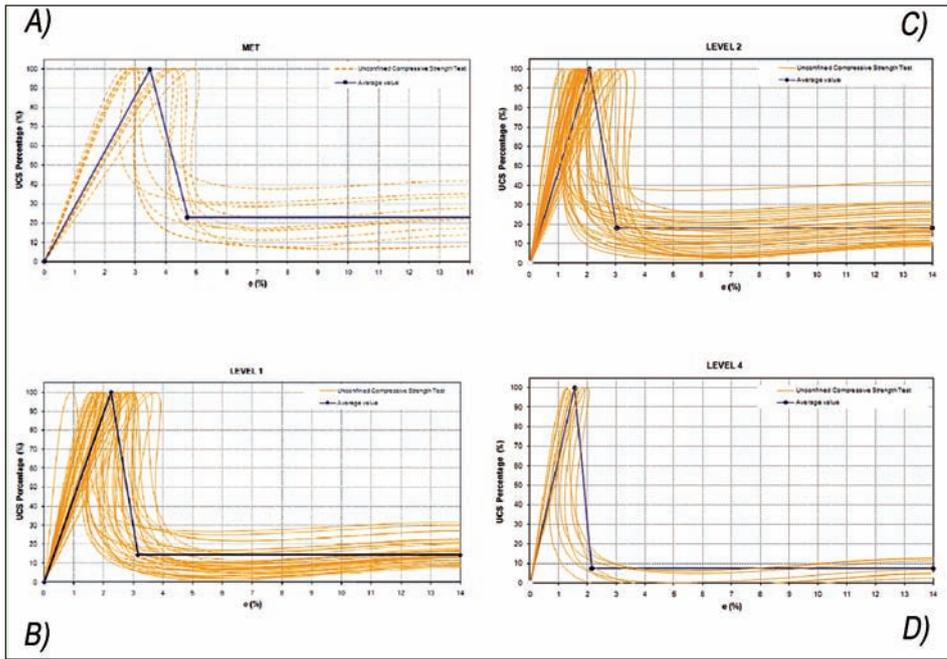
A partir de este comportamiento de rotura progresiva se ha definido un modelo constitutivo con reblandecimiento de la marga, en el que la resistencia al corte, cohesión, ángulo de fricción y dilatancia, se definen como una función que depende de la deformación plástica.

Este modelo se ha basado en los resultados obtenidos sobre 118 ensayos realizados en prensa servo controlada a deformación constante, midiendo el comportamiento en la post-rotura.

Las **Figs. 9a, 9b, 9c y 9d**, muestran el resultado de estos ensayos para cada uno de los niveles geotécnicos adoptados, así como el valor promedio en cada uno de ellos.

Puede observarse una relativamente elevada dispersión en los resultados, especialmente en el nivel meteorizado (**MET**). Este nivel muestra un comportamiento claramente más dúctil, con una mayor deformabilidad y una menor diferencia entre la resistencia de pico y residual.

La respuesta en los niveles 1 y 2 es muy similar, mientras que el nivel 3 posee un compor-



■ [Figura 9] .- Comportamiento en la post-ruptura en los cuatro niveles geotécnicos.

NIVEL	PROF. (m)	DEF. ROTURA $E_p$ (%)	DEFORMACION RESIDUAL $E_R$ (%)	DIFERENCIA PICO/RESIDUAL (%)	Nº DE ENSAYOS
MET	0-31	3,5	4,7	23	12
LEVEL-1	31-80	2,2	3,2	14	47
LEVEL-2	80-110	2,1	3,0	18	50
LEVEL-4	115-130	1,6	2,1	7	9

■ [TABLA II] .- Principales valores en la post ruptura de las margas.

tamiento apreciablemente más frágil siendo más rígido y mostrando mayor salto entre los parámetros de pico y residual.

La **Tabla II** resume los principales valores obtenidos para cada nivel y que definen su comportamiento tras la ruptura.

Para determinar los valores de cohesión y ángulo de fricción de cada nivel geotécnico se ha realizado un ajuste estadístico considerando los 178 ensayos de compresión realizados, los 122 ensayos de corte y los 112 triaxiales consolidados sin drenar efectuados.

La principal ventaja de este método para evaluar la resistencia al corte de la marga reside en poder aplicar modelos constitutivos no lineales que dependen de las tensiones principales ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ), y de las tensiones definidas como tensiones de corte en la ruptura ( $\tau$  y  $\sigma_n$ ).

De este modo se ha considerado el modelo de *Hoek-Brown* que no es lineal (*Hoek et al, 2002*). Como resulta bien conocido en este modelo constitutivo la envolvente de ruptura, cuasi-parabólica, se define en el plano  $\sigma_n - \tau$  como una función de  $m$ ,  $s$  y  $\sigma_c$ .

Una vez ajustada la envolvente de ruptura es posible realizar para un determinado estado tensional  $\sigma_n$ , una linealización obteniendo parejas de valores *instantáneos* de cohesión  $c$  y ángulo de fricción  $\Phi$ .

Los ensayos de compresión uniaxial, compresión triaxial y brasileño, proporcionan, cada

uno, pares de valores  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , que obviamente pueden ser representados de forma directa en un diagrama  $\sigma_1 - \sigma_3$ . Sin embargo los ensayos de corte proporcionan pares de valores ( $\tau - \sigma_n$ ), que se representan directamente en un diagrama con estos ejes pero no pueden ser representados en un diagrama  $\sigma_1 - \sigma_3$ .

Si se desea, sin embargo, emplear los resultados de todos los ensayos, es necesario

homogeneizar los planos de tensiones, a través de una equivalencia tensional entre los estados de rotura definidos en el plano  $\sigma_n - \tau$ , y en el plano  $\sigma_1 - \sigma_3$ . Esta homogenización viene dada por las expresiones:

$$\sigma_1' = \sigma_n + \tau \operatorname{tg} \phi_i + \frac{\tau}{\cos \phi_i} \quad (1)$$

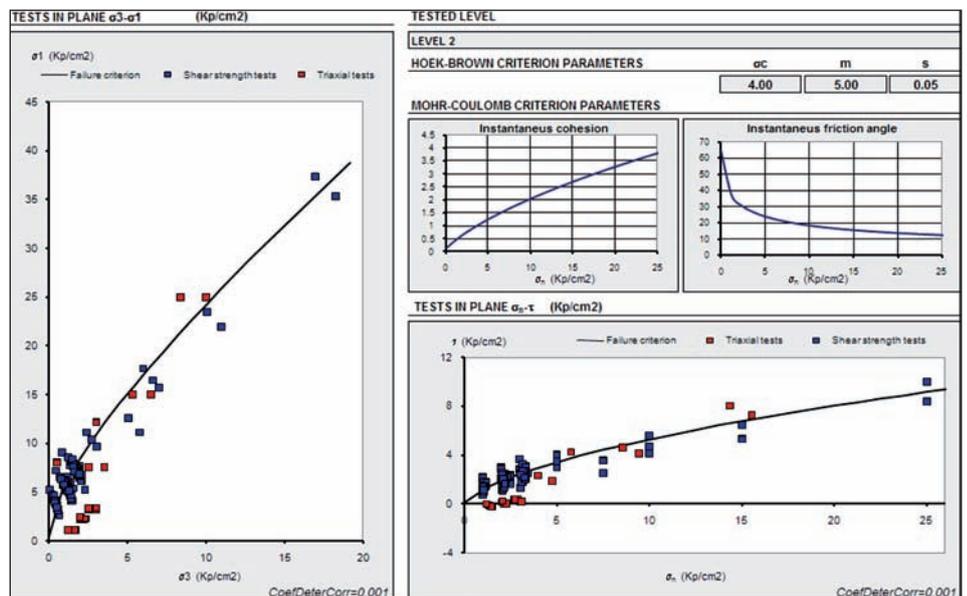
$$\sigma_3' = \sigma_n + \tau \operatorname{tg} \phi_i - \frac{\tau}{\cos \phi_i} \quad (2)$$

Como claramente se observa esta relación no es directa y depende del valor de la tangente de la curva de rotura no lineal para un determinado valor de tensiones, depende del valor del ángulo de fricción interna  $\phi_i$  relacionado con  $m$ .

Para resolver esta equivalencia ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ) se ha desarrollado un algoritmo matemático que hace posible calcular los valores de  $\phi_i$ ,  $h$  y  $\tau$  para cada trío ( $m$ ,  $s$ ,  $\sigma_c$ ). Consecuentemente los valores correspondientes a ensayos de compresión uniaxial/triaxial y a los ensayos brasileños se expresan como pares ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ), mientras que los ensayos de corte se representan como pares ( $\sigma_1'$  y  $\sigma_3'$ ). Posteriormente el algoritmo minimiza el error para la estimación del ajuste al criterio no lineal ( $m$ ,  $s$ ,  $\sigma_c$ ), minimizando la distancia  $r^2$  entre los valores ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ) y la curva de rotura de *Hoek - Brown*.

Una vez realizado el mejor ajuste para los valores de  $m$ ,  $s$  y  $\sigma_c$ , que se deduce de los ensayos, el algoritmo calcula una relación lineal a la curva de *Hoek - Brown* para cada valor de  $\sigma_n$ , estimando los valores de cohesión y el ángulo de fricción  $\Phi$  del criterio de rotura de Mohr-Coulomb para cada rango de tensiones.

La **Fig. 10** muestra un ejemplo de uno de estos ajustes estadísticos, concretamente el efectuado para el nivel geotécnico 2. Como puede apreciarse el algoritmo proporciona una



■ [Figura 10] .- Ajuste estadístico del criterio de rotura de Hoek and Brown.

# Caracterización

representación en ambos planos  $\sigma_n - \tau$  y  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , la curva ajustada para el criterio de Hoek-Brown y la evolución de los pares de cohesión y ángulo de fricción en función del rango de tensiones.

## Conclusiones

Este artículo describe la caracterización mediante ensayos *in situ* y de laboratorio de las *margas azules del Guadalquivir*, efectuado antes y durante la fase de excavación del *pre-stripping* de la corta minera de *Cobre Las Cruces*.

Las *margas azules del Guadalquivir* constituyen una formación compleja de caracterizar desde el punto de vista mecánico, pues es una formación a caballo entre un suelo duro (arcillas sobreconsolidadas) y una roca blanda que evidencia la existencia de planos de estratificación y discontinuidades diagenéticas.

Los ensayos efectuados evidencian una evolución de los parámetros de resistencia y de deformación de la margas en profundidad. Como consecuencia se han diferenciado hasta cinco niveles geotécnicos.

La intensiva campaña de ensayos realizada antes del inicio de la excavación así como los ensayos realizados durante el desarrollo de la corta, evidencian la alterabilidad que se produce durante la toma de muestras inalteradas en sondeo, al comparar los resultados de estos ensayos con los que se obtienen sobre muestra de bloque talladas a mano, obtenidas durante los trabajos de excavación de la corta. Así estas últimas muestras proporcionan una mayor resistencia y una mayor rigidez.

NIVEL	PROF.(m)	$\sigma_{Cl}$ (kp/cm <sup>2</sup> )	m	s	c (kp/cm <sup>2</sup> )	$\Phi$ (°)	R <sup>2</sup> ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )	R <sup>2</sup> ( $\sigma_n - \tau$ )	Nº UCS	Nº TRIAXIAL C T	Nº ENSAYOS CD
MET-1	0-10	3,5	2	1	1,10	22	0,91	0,80	4	0	9
MET-2	10-23	3,8	4	1	1,50	21	0,21	0,73	7	5	18
MET-3	23-31	3,8	4	0,07	1,50	21	0,49	0,51	11	11	6
NIVEL-1	31-80	4,0	6	0,05	2,1	20	0,61	0,65	73	83	126
NIVEL-2	80-110	4,0	6	0,05	2,7	18	0,81	0,74	0	23	129
NIVEL-4	115-130	6,0	6	0,01	2,8	18	-	0,87	0	0	48

Estas margas poseen un marcado comportamiento con reblandecimiento (strain-softening) que ha sido cuantificado mediante ensayos con medida en la post-rotura. De acuerdo a estos resultados se ha definido una ley de reblandecimiento con la deformación, como modelo constitutivo para las margas

Finalmente, se ha realizado un ajuste estadístico con los resultados obtenidos en todos los ensayos efectuados. La ventaja que este ajuste presenta estriba en la posibilidad de determinar los valores de la cohesión y ángulo de fricción para cada rango de tensiones a partir de un ajuste no lineal de los ensayos función de las tensiones principales máxima  $\hat{U}^1$  y mínima  $\hat{U}^3$  en la que se tienen en cuenta también los resultados de los ensayos de corte.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a todo el equipo técnico de la empresa *Cobre Las Cruces* que han participado en este trabajo.

Así mismo queremos expresar nuestro agradecimiento especial al equipo de gerencia de la empresa por el permiso para publicar este artículo.

## Bibliografía

1. J.A. BOTÍN, P. RAMÍREZ OYANGUREN. *Mecanismo de rotura del depósito de estériles de la mina de Aznalcóllar*, Industria y Minería, Madrid, Spain, 1999.
2. M. TSIGE. *Microfábrica y mineralogía de las arcillas azules del Guadalquivir y su relación con las propiedades geotécnicas*, Monografía 67, Ministerio de Fomento, CEDEX; Madrid, Spain, 1999.
3. M. TSIGE, L. GONZÁLEZ DE VALLEJO, M. DOVAL, C. OTEO, AND C. BARBA. *Microfabric of Guadalquivir blue marls and its engineering geological significance*. Int. Assoc. of Engineering Geology, 1995.
4. F. Ayala. *Engineering Properties of the Guadalquivir river Marly Clays in Cordoba*. 3rd International Conference, International Association of Engineering Geology, Madrid, Spain, 1978, Vol 1, 117-122.

**[TABLA III] .- Valores de Cohesión y ángulo de fricción de los niveles geotécnicos.**