

Análisis de la resistencia de escolleras mediante ensayos de corte directo en caja de 1 x 1 m²

JOSÉ ESTAIRE (*) y CLAUDIO OLALLA (*)

RESUMEN En este artículo se realiza un análisis de la resistencia al corte de escollera basándose en los resultados obtenidos de 20 ensayos de corte directo realizados en una caja de 1m³, perteneciente al Laboratorio de Geotecnia (CEDEX) en los que se rompieron 87 probetas. Los ensayos fueron realizados con ocho tipos de escolleras procedentes de distintas canteras y con diferentes características. El material fue colocado en la caja mediante simple vertido, en algunos de los ensayos, y mediante una ligera compactación, en otros. Las cargas verticales utilizadas en los ensayos variaron entre 50 y 800 kPa. Los resultados de los ensayos se analizaron mediante tres criterios diferentes: utilizando el modelo de Mohr-Coulomb, con y sin cohesión y mediante curvas de ajuste de tipo parabólico. El análisis de los resultados permite deducir algunas conclusiones sobre la variación del ángulo de rozamiento con la presión de confinamiento y sobre el modelo que mejor reproduce el comportamiento observado.

ANALYSIS OF THE STRENGTH OF ROCKFILLS BASED ON DIRECT SHEAR TESTS MADE IN 1 m³ BOX

ABSTRACT *In this paper an analysis of the shear strength of rockfill is made based on the results obtained in 20 direct shear tests made in a 1 m³ box, belonging to CEDEX, in which 87 probes were broken. The tests were performed with eight types of rockfills coming from different quarries and with different characteristics. The material was placed in the shear box by simple dropping, in some tests, and with light mechanical compaction in other ones. The vertical stresses used in the tests varied from 50 to 800 kPa. The results of the tests were analysed with three different criteria: using the Mohr-Coulomb strength model, with and without cohesion and using parabolic fitting curves. Some conclusions are drawn from the results analysis about the variation of the shear resistance angle with the confining pressure and the mathematical model that best fits the results obtained.*

Palabras clave: Presas, Escollera, Resistencia, Corte directo.

1. INTRODUCCIÓN

Las escolleras, como material de construcción, tienen un papel preponderante en el diseño de las capas exteriores de las presas. Un diseño adecuado de estas capas requiere el conocimiento de las propiedades mecánicas de las escolleras. La determinación de dichas propiedades es complicada dado el gran tamaño de los granos o bloques que constituyen este material, lo que hace necesario la utilización de equipos de grandes dimensiones y de muestras de gran peso y volumen. Un equipo que cumple con los requisitos necesarios para ejecutar los ensayos que permiten determinar la resistencia al corte de escolleras es el ensayo de corte directo realizado en caja de grandes dimensiones, tal como el que posee el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

Dadas las dificultades que presentan estos ensayos, el objetivo de este artículo es recopilar todos los resultados obtenidos en la caja de corte directo de 1 x 1 m², ejecutados desde su construcción, realizados con escolleras. La interpretación de los ensayos permite disponer de un marco de referencia claro y amplio sobre las características mecánicas de las escolleras.

2. EQUIPO DE ENSAYO

Todos los ensayos se realizaron en un caja de corte directo que tiene 1,20 m de altura y un plano de corte de 1 x 1 m² de superficie, perteneciente al Laboratorio de Geotecnia (CEDEX). La máxima carga vertical que se puede aplicar a las muestras es de 1000 kN. El máximo desplazamiento horizontal que se puede imponer en la caja de ensayo es de 25 cm. La carga horizontal, con un máximo de 1000 kN, se puede imponer a velocidad constante, que puede variar entre 0,5 y 45 mm/min. En la figura 1 puede verse una fotografía del equipo utilizado en los ensayos.

3. ENSAYOS REALIZADOS

Con este equipo, se realizaron 20 ensayos de corte directo, en los cuales se rompieron 87 probetas. Los ensayos se realizaron con ocho tipos de escolleras procedentes de diferentes canteras y con distintas características en cuanto a material y resistencia intrínseca. El material se colocó en la caja de corte por simple vertido, en algunos ensayos, y con una ligera compactación mecánica en otros. Las presiones verticales utilizadas en los ensayos fluctuaron entre 50 y 800 kPa.

(*) Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Madrid, Spain.



ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE ESCOLLERAS MEDIANTE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN CAJA DE 1 X 1 M²



FIGURA 1. Equipo utilizado en los ensayos.

Las rocas utilizadas en los ensayos se pueden definir mayoritariamente como calizas. La resistencia a la compresión simple de la roca intacta varió entre 45 y 75 MPa, con un valor medio de 60 MPa. Este valor corresponde a roca dura de acuerdo a la clasificación de la ISRM (Brown [1]). La densidad del material, una vez colocado en la caja de corte, estuvo comprendida entre 14,0 y 18,5 kN/m³ con un valor medio de 16,5 kN/m³, en los ensayos realizados con escollera vertida. En el caso de los ensayos realizados con escollera compactada, la densidad varió entre 17,0 y 20,8 kN/m³, siendo el valor medio de 19,5 kN/m³. Estos datos implican que el incremento en densidad, debido a la compactación realizada en los ensayos, fue casi del 20%.

4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

4.1. INTERPRETACIÓN UTILIZANDO EL MODELO DE RESISTENCIA DE MOHR-COULOMB

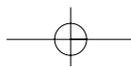
La forma clásica de interpretar los resultados de los ensayos en rotura es mediante la utilización del modelo de Mohr-Coulomb, bajo la teoría de la plasticidad asociada. Este método de interpretación se aplicó teniendo en cuenta dos alternativas: suponiendo una cohesión aparente y suponiendo un comportamiento puramente friccional, lo que implica considerar nula la cohesión, como puede verse en la Figura 2 para uno de los ensayos realizados.

Valores	Hipótesis 1 (sin cohesión)			Hipótesis 2 (con cohesión)		
	c (kPa)	φ (°)	R ²	c (kPa)	φ (°)	R ²
Media	45	43	0,99	0	46	0,96
Máximo	115	49	0,99	0	52	0,99
Mínimo	7	37	0,98	0	41	0,94

TABLA 1. Valores de resistencia (Escollera vertida).

TABLA 2. Valores de resistencia (Escollera compactada).

Valores	Hipótesis 1 (sin cohesión)			Hipótesis 2 (con cohesión)		
	c (kPa)	φ (°)	R ²	c (kPa)	φ (°)	R ²
Media	80	45	0,99	0	50	0,94
Máximo	142	48	0,99	0	52	0,97
Mínimo	35	40	0,98	0	45	0,89





ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE ESCOLLERAS MEDIANTE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN CAJA DE 1 X 1 M²

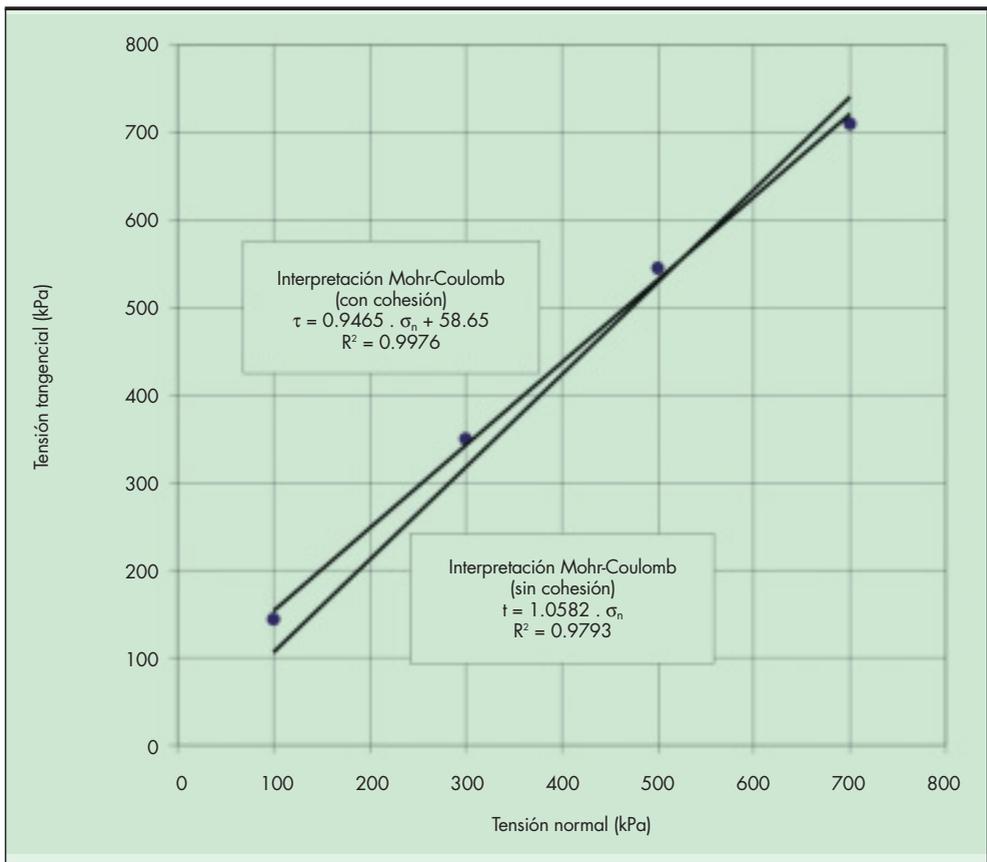


FIGURA 2. Interpretación de uno de los ensayos.

Los resultados obtenidos con esas dos alternativas, identificadas como Hipótesis 1 y 2, respectivamente, se han re- presentado en la Figura 3 para facilitar la interpretación. En las Tablas 1 y 2 se han recogido los valores principales.

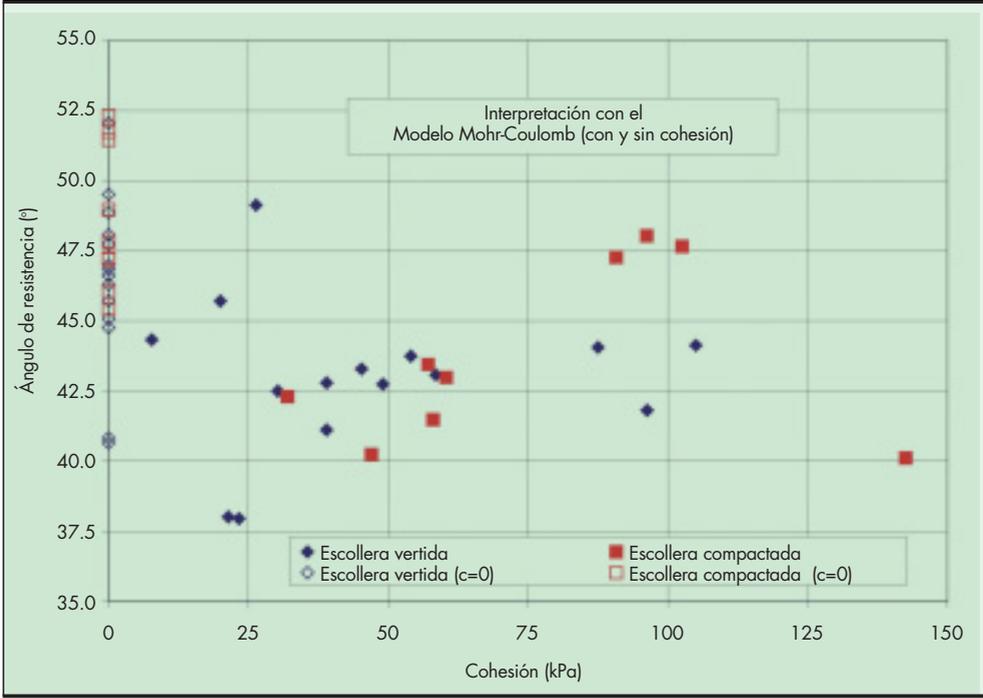
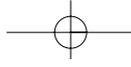
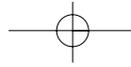


FIGURA 3. Resultados de la interpretación utilizando el modelo de Mohr-Coulomb.





ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE ESCOLLERAS MEDIANTE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN CAJA DE 1 X 1 M²

El análisis de los resultados permite destacar los siguientes aspectos experimentales:

- Ambas interpretaciones, considerando o no la existencia de cohesión aparente, tienen valores elevados del coeficiente de regresión, superiores a 0,95.
- Los valores medios de la cohesión y del ángulo de rozamiento obtenidos de los resultados son: $c = 45$ kPa; $\phi = 43^\circ$ para los ensayos realizados con material vertido y $c = 80$ kPa; $\phi = 45^\circ$ para los ejecutados con material compactado.
- La interpretación de los resultados suponiendo un comportamiento puramente friccional indica un ángulo de rozamiento medio de 46° , para los ensayos con escollera vertida y de 50° , para los ejecutados con material compactado.
- La comparación de los resultados indica el efecto beneficioso de la compactación en la resistencia de la escollera, tanto en términos de cohesión como de ángulo de rozamiento.

Otra forma de interpretación es analizar los resultados de los ensayos de manera global, como si las 87 probetas ensayadas hubieran sido rotas para un único ensayo. Los resultados obtenidos de esta manera se han recogido en la Tabla 3. Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de todos los ensayos y las líneas representativas de las envolventes de Mohr obtenidas cuando se realiza una interpretación global

de los ensayos preparados con escollera vertida y compactada, respectivamente.

Los resultados obtenidos con la interpretación global de los valores de los ensayos son bastante similares a los obtenidos previamente, por lo que se pueden realizar los mismos comentarios.

Una tercera forma de interpretar los resultados de los ensayos es calcular el ángulo de rozamiento secante de cada muestra, suponiendo comportamiento friccional, es decir, cohesión nula. Los resultados obtenidos mediante esta forma de interpretación se han representado en la Figura 6.

El análisis de los resultados permite realizar los siguientes comentarios:

- Los valores obtenidos del ángulo de rozamiento secante para escollera compactada son, para todas las cargas verticales, mayores que los correspondientes a escollera vertida.
- Se aprecia claramente en la figura el carácter no lineal de la resistencia al corte de la escollera. El ángulo de rozamiento secante decrece a medida que aumenta la carga vertical impuesta.
- Los valores del ángulo de rozamiento secante varía entre 55° y 45° , para cargas verticales bajas y altas, respectivamente, en el caso de escollera vertida. Para escollera compactada, los valores fluctúan entre 60° y 50° , es decir, unos 5° más que la escollera vertida.

Preparación probeta	Hipótesis 1 (sin cohesión)			Hipótesis 2 (con cohesión)		
	c (kPa)	ϕ (°)	R ²	c (kPa)	ϕ (°)	R ²
Vertida	25	45	0,975	0	46,5	0,971
Compactada	55	46	0,95	0	49	0,94

TABLA 3. Valores de resistencia (Interpretación global).

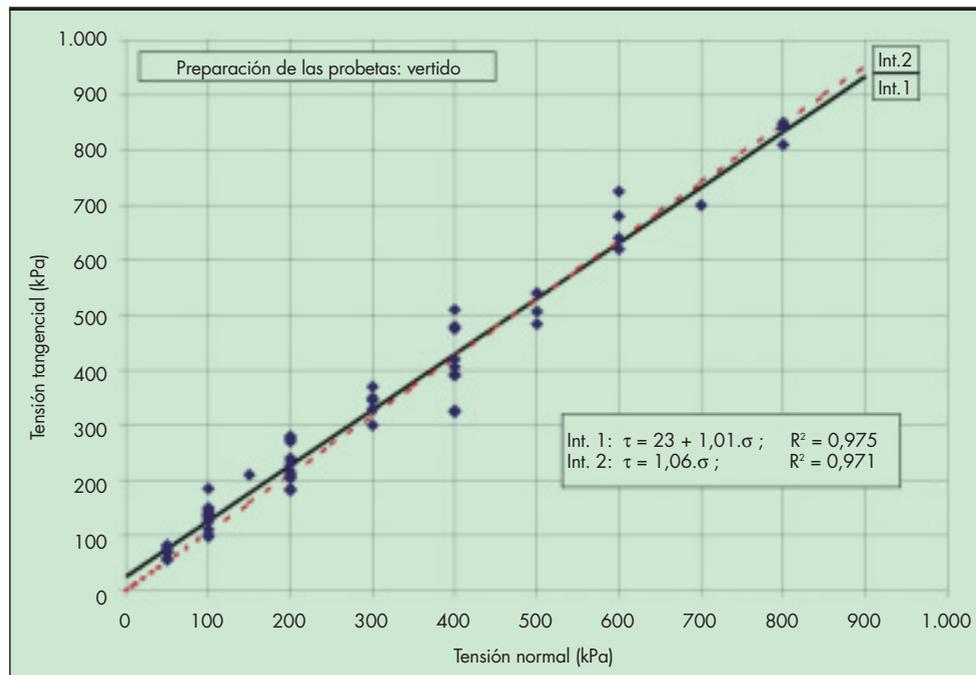
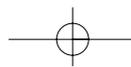


FIGURA 4. Líneas de resistencia intrínseca (escollera vertida).





ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE ESCOLLERAS MEDIANTE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN CAJA DE 1 X 1 M²

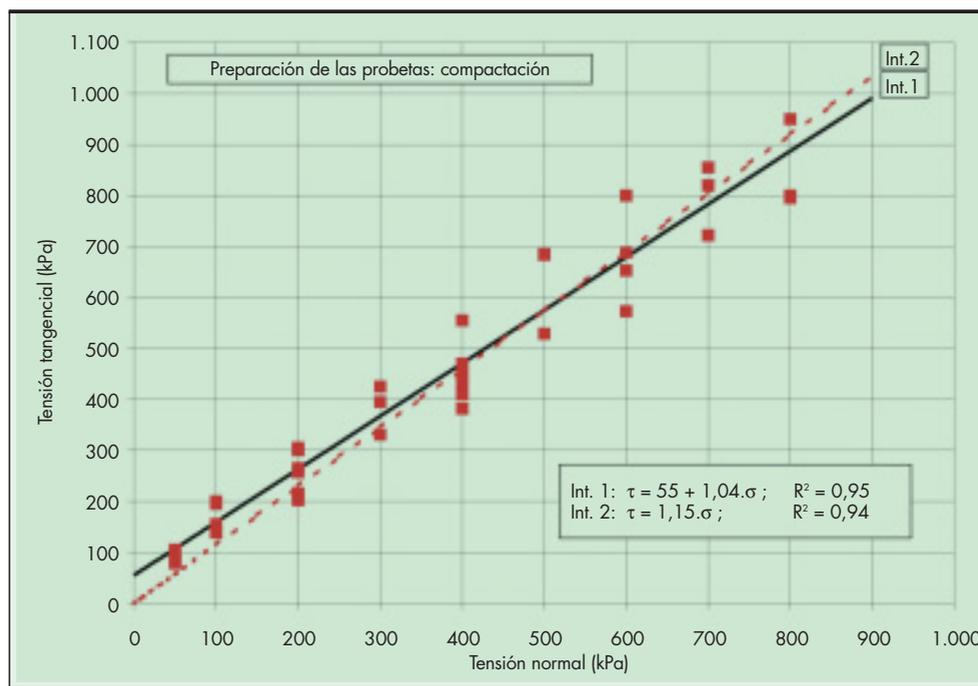


FIGURA 5. Líneas de resistencia intrínseca (escollera compactada).

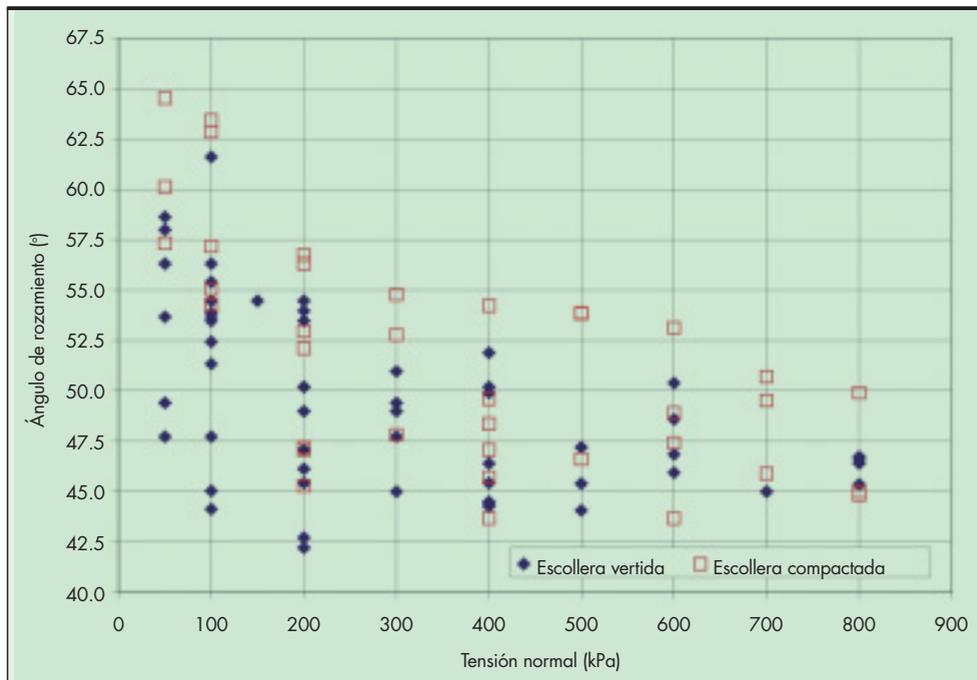


FIGURA 6. Ángulos de rozamiento secantes en función de la tensión normal.

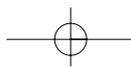
4.2. INTERPRETACIÓN UTILIZANDO CRITERIOS DE ROTURA NO LINEALES

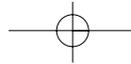
Los resultados de los ensayos también se pueden interpretar utilizando expresiones parabólicas de la forma $\tau = a \sigma^b$. Los valores obtenidos de los parámetros (a y b) de esa expresión se han representado en la Figura 7.

Los valores principales de esta interpretación se han recogido en la Tabla 4.

Los aspectos principales que se pueden destacar de los resultados anteriores son:

- Los coeficientes de regresión de las curvas parabólicas son incluso superiores a los correspondientes a las curvas lineales, lo que indica que el comportamiento en rotura de estos materiales es no-lineal.
- Los valores correspondientes a la escollera compactada indican un comportamiento menos lineal que el correspondiente a la escollera vertida, tal como se pone de manifiesto mediante los menores valores del exponente.





ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE ESCOLLERAS MEDIANTE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN CAJA DE 1 X 1 M²

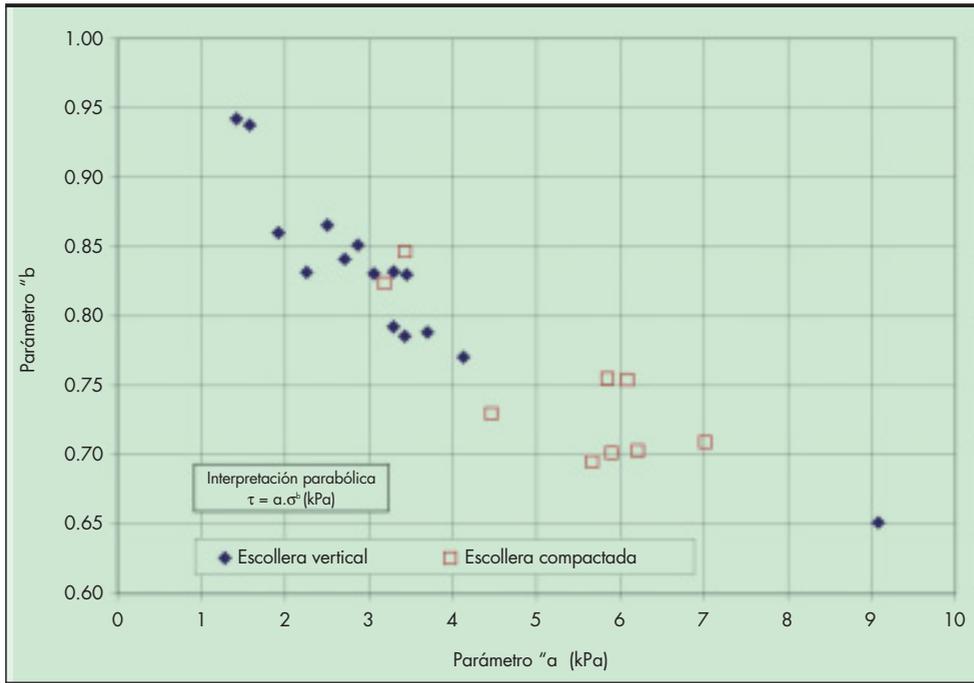


FIGURA 7. Parámetros deducidos de la interpretación de los resultados de ensayos mediante expresiones parabólicas.

TABLA 4. Parámetros obtenidos de la interpretación parabólica de los resultados.

Valores	Escollera vertida			Escollera compactada		
	a (kPa)	b	R ²	a (kPa)	b	R ²
Media	2,80	0,85	0,99	5,75	0,75	0,99
Máximo	4,13	0,95	0,99	7,01	0,85	0,99
Mínimo	1,06	0,77	0,98	3,18	0,70	0,98

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

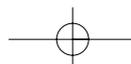
En este apartado se comparan los resultados obtenidos mediante las diferentes interpretaciones de los ensayos realizados con los valores publicados en la literatura técnica.

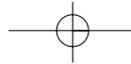
- I) El clásico gráfico de Leps [2], que muestra la relación entre el ángulo de rozamiento y la tensión normal efectiva, se recoge en la Figura 8, junto con los valores deducidos en este trabajo a partir de los ensayos realizados con escollera vertida. Se puede ver que los resultados obtenidos en este trabajo están en la parte superior del rango definido por Leps.
- II) La interpretación mediante expresiones parabólicas ha sido utilizada por diversos autores. De Mello [3], al interpretar ensayos realizados por Marsal [4], obtuvo valores del exponente (b) de la expresión parabólica entre 0,81 y 0,88. De forma similar, Matsumoto y Wanatabe [5] ajustaron 49 ensayos triaxiales y obtuvieron valores de b que fluctuaron entre 0,77 y 0,97 con un valor medio de 0,85. Todos estos valores están en consonancia con los resultados obtenidos en este trabajo. Además, Charles y Watts [6] sugirieron usar un valor alrededor de 0,75 para el parámetro b, cuando la escollera es compactada. Este valor es el mismo que el deducido de los resultados de los ensayos de este trabajo. (Figura 8).
- III) Hoeg et al [7] realizaron siete ensayos de resistencia a escala real en terraplenes que fueron llevados a rotura. La in-

terpretación de sus resultados indica que el ángulo de resistencia al corte de escollera competente y compactada es superior a lo que se supone habitualmente en los cálculos de estabilidad de taludes, tal como indicaba anteriormente Leps [2]. Aunque no se especificaban valores concretos del ángulo de rozamiento del material utilizado en los terraplenes, la conclusión obtenida de los ensayos es similar a la deducida con los resultados de este trabajo.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

- Se realizaron 20 ensayos de corte directo, en los que se rompieron 87 probetas, en la caja de corte directo de 1x1 m² perteneciente al Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Se ensayaron ocho tipos de escollera diferente con las que se prepararon muestras mediante vertido o compactación.
- Los valores del criterio de rotura de Mohr-Coulomb que mejor representan los resultados de los ensayos, teniendo en cuenta todas las interpretaciones, se han recogido en la Tabla 5.
- Se ha confirmado el carácter no-lineal de la resistencia de la escollera, ya que el ángulo de rozamiento decrece cuando se incrementa el valor de la tensión normal impuesta a la probeta.
- Los valores del ángulo de rozamiento secante varían entre unos 55° y 45°, para cargas verticales bajas y altas,





ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE ESCOLLERAS MEDIANTE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN CAJA DE 1 X 1 M²

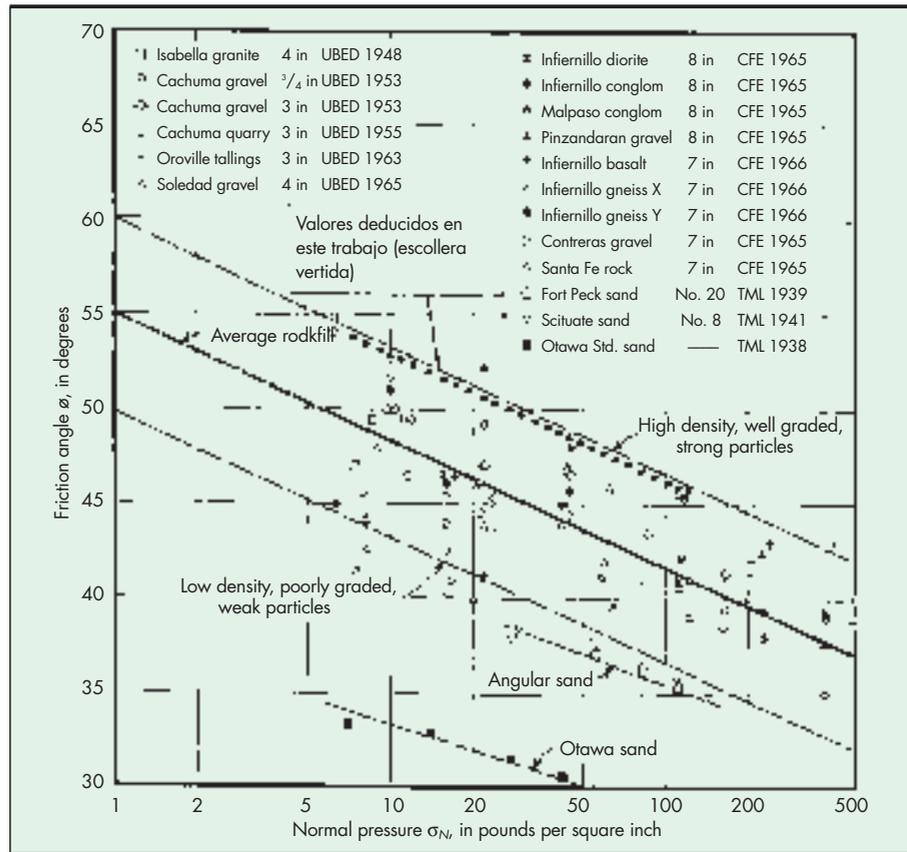


FIGURA 8. Resistencia al corte de escolleras (Leps [2]).

Escollera	Con cohesión		Sin cohesión	
	c (kPa)	φ (kPa)	c (kPa)	φ (kPa)
Vertida	35	44	0	46
Compactada	70	46	0	50

TABLA 5. Parámetros de resistencia.

respectivamente, en el caso de escollera vertida. Para la escollera compactada, los valores fluctúan entre 60° y 50°, es decir, unos 5° más que la escollera vertida.

- Se ha comprobado que el mejor ajuste de los resultados se consigue utilizando expresiones parabólicas ($\tau = a + b\sigma^2$; en kPa). Los valores más representativos de los parámetros a y b son 2,80 y 0,85 para la escollera vertida y 5,75 y 0,75 para escollera compactada.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer la colaboración prestada por las personas que han realizado los ensayos (Clemente Arias, José L. Gómez, José L. Toledo, José A. Casado y Manuel Fernández) por su entusiasta dedicación y esfuerzo.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Brown E.T. (Ed). *Rock Characterization, Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods*. Pergamon, Oxford, pp.171-183,1981.

[2] Leps, T.M. Review of shearing strength of rockfill. *J. Soil Mech.ans Found. Div. ASCE*, Vol. 96, No. SM4, pp. 1159-1170, 1970.

[3] De Mello, V. Reflections on Design Conditions of Practical Significance to Embankment Dams. *17 th Rankine Lecture. Geotechnique*, Vol. 27, No. 3, pp. 281-354, 1977.

[4] Marsal, R.J. Mechanical Properties of Rockfill. *Embankment Dam Engineering. Casagrande Volume*. J. Wiley & Sons, 1973.

[5] Matsumoto, N. & Wanatabe, K. The Shear Strength of Rockfill Materials. *Tsuchi-to-Kiso. ISSMFE*. 35, No. 12, 1987, (in Japanese).

[6] Charles, J.A. & Watts, K.S. The Influence of Confining Pressure on the Shear Strength of Compacted Rockfill. *Geotechnique*, Vol. 30, No. 4, pp. 353-367, 1980.

[7] Hoeg, K., Lovoll, A. & Vaskinn, K.A.. Stability and breaching of embankment dams: field tests on 6 m high dams. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 11, Issue 1, pp. 88-92, 2004.

