VARIACION DE LA RESISTENCIA AL CORTE DE LOS RESIDUOS MINEROS CON SU GRADO DE CONSOLIDACION (1)

M.ª D. CANCELA (*)
C. S. OTEO (**)

RESUMEN. En este artículo se presenta un análisis experimental sobre la variación de la resistencia al corte con el grado de consolidación de muestras procedentes de la industria minera española. Este tipo de material, debido a su origen artificial y al proceso de vertido en la balsa experimenta cambios importantes en sus propiedades, en función de una serie de factores, entre ellos, la distancia al punto de vertido y el ángulo de consolidación. Los resultados obtenidos muestran que el grado de rozamiento aumenta de forma considerable con el grado de consolidación. Este fenómeno tiene mayor importancia en los suelos con menor contenido de finos. Se ha analizado la repercusión de este fenómeno sobre la estabilidad de las balsas mineras, mediante un ejemplo real.

ABSTRACT. *This article presents on experimental analysis of the variation of shearing strength with the degree of consolidation, in samples coming from the Spanish mining industry. This kind of material, because of it artificial origin and the process whereby it is dumped in pits undergoes considerable property changes and these changes are dependant on a series of factors, among which are, the distance from the dumping point and the degree of consolidation. The results obtained show that the friction angle increases considerably with the degree of consolidation. This phenomenon is all the more important in soil that has a higher fines content. The effects of this phenomeron on the stability of mining pits has been analyzed using a real example.*

1. INTRODUCCION

El proceso de consolidación de los suelos se caracteriza por la disipación de los excesos de presión interticial, unido al aumento de la presión efectiva media y la densidad del material. Este fenómeno se traduce en una mejora notable de las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante y la deformabilidad. En este estudio nos ocuparemos sólo de als primeras.

La velocidad de consolidación depende fundamentalmente de la permeabilidad de los materiales y de las condiciones de drenaje impuestas, por lo tanto, estas variaciones de los parámetros de resistencia al corte serán más notorias en aquellos materiales con mayor capacidad para expulsar el agua de sus huecos.

Para evaluar estos cambios de resistencia aparente, se han realizado ensayos de corte rápido partiendo de muestras consolidadas parcialmente bajo carga vertical.

En la presente comunicación se resumen algunos estudios realizados para evaluar la resistencia al corte de estos residuos, en función de su grado de consolidación, para lo que se han realizado diversos trabajos de laboratorio, cuyos resultados se han aplicado a un caso real.

2. MATERIALES ENSAYADOS

El estudio de las propiedades de los residuos mineros se caracteriza por las dificultades que se plantean al evaluar la resistencia al corte de los materiales, debido a la importancia que tiene el proceso de consolidación en el desarrollo de la misma.

Las muestras ensayadas son procedentes de la minería española y barren la amplia gama de granulometrías existentes. Se disponía de muestras procedentes de dos explotaciones mineras denominadas I y II, de características diferentes.

La muestra procedente del Sitio I fue tomada al pie de salida de la planta de lodos. Para su estudio, se prepararon en el laboratorio tres muestras de diferente granulometría:

(1) Artículo presentado en el Congreso de la S.I.M.S. celebrado en Río de Janeiro. Agosto, 1989.

(*) Profesor Titular Interino de Mecánica del Suelo de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
(**) Director del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (MOPU). Profesor Titular de Geotecnia y Cimientos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

— Muestra Total (T): Fracción total de lodos.
— Muestra Fina (F): Fracción que pasa por el tamiz 200.
— Muestra Gruesa (G): Fracción retenida por el tamiz 200.

Las muestras procedentes del Sitio II fueron tomadas en la playa de vertido de una balsa en explotación. Se obtuvieron ocho muestras denominadas M1 a M8.

Se han estudiado todas las muestras, seleccionando finalmente como más representativas del estudio realizado las siguientes:

— Muestra T procedente del Sitio I.
— Muestra 7 procedente del Sitio II.

La tabla I resume las propiedades de las dos muestras.

	MUESTRA T	MUESTRA 7
% Pasa 200	49	79
Limite líquido (%)	NP	32,7
Limite plástico (%)	NP	21,5
Indice plástico (%)	NP	11,2
Densidad inicial g/cm^3	1,239	1,395
Humedad inicial (%)	42	40
Permeabilidad cm/sg	10^{-5}	10^{-8}

TABLA 1. Propiedades de los materiales.

La figura 1 presenta las envolventes granulométricas de los residuos estudiados. Puede observarse en ella la gran variación entre los diferentes materiales estudiados.

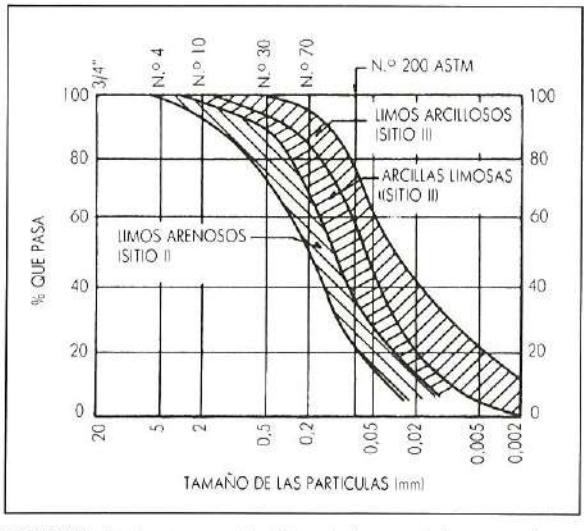

FIGURA 1. Envolventes granulométricas de los materiales ensayados.

3. METODOLOGIA

Una vez determinadas las propiedades índice de las muestras estudiadas, se realizaron ensayos edométricos destinados al estudio de la compresibilidad de los materiales. Se emplearon células edométricas hidráulicas, tipo Rowe de 3" y 10" de diámetro y células convencionales de 70 mm de diámetro, con el objeto de analizar la influencia del tipo de ensayo sobre los parámetros medios.

En las células tipo Rowe los residuos se depositan por etapas, simulando así el proceso de vertido y evitando la segregación del material. En las células convencionales, el vertido se hizo en una sola etapa.

La figura 2 muestra un esquema de la técnica de preparación de probetas mediante vertido de una suspensión de lodos. Esta técnica ha sido especialmente útil para simular las densidades a las que se depositan los lodos en la balsa. Se observó una buena repetición de las densidades obtenidas en cada caso. En algunos tipos de lodos, cuyo contenido de finos es superior al 90 %, la densidad obtenida en la probeta es variable según la concentración de la suspensión de lodos. Este fenómeno ha sido observado también por VICK (1983) en el interior de las balsas de lodos, quien destacó que las fluctuaciones de la concentración de la suspensión inicial afectan la densidad de los lodos depositados en la balsa.

Para los ensayos de corte simple y corte directo se empleó un procedimiento análogo, obteniendo buenos resultados. Posteriormente se ensayó una técnica de vertido en seco a la densidad mínima que dio excelentes resultados en cuanto a la repetitividad y valores de las densidades.

Esta segunda técnica es de gran utilidad en el caso

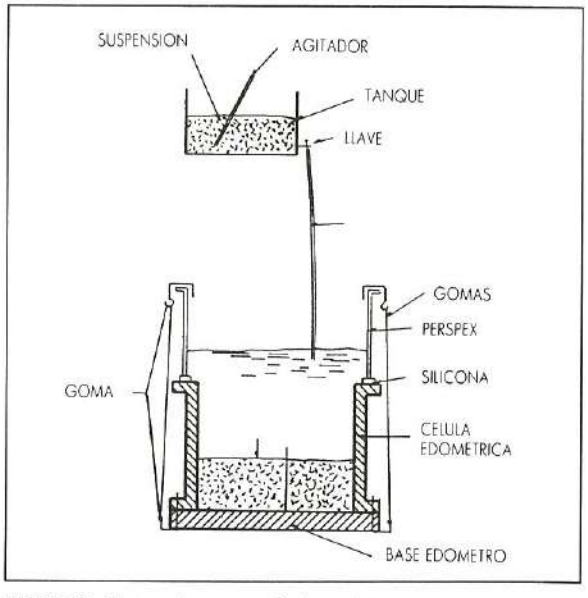

FIGURA 2. Técnica de preparación de probetas.

de muestras cuyo contenido de finos sobrepasa el 65 %.

Las probetas se remoldeaban a su densidad mínima, una vez saturadas, se les aplicaba la carga vertical y se dejaba actuar el tiempo requerido para alcanzar el grado de consolidación deseado que oscilaba entre 0, 60, 80 y 100 %. Una vez alcanzado se cortaba la probeta sin drenaje y se obtenían las envolventes de resistencia al corte representativas para cada uno de los grados elegidos.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

La figura 3 presenta las envolventes de variación de la densidad seca con la presión vertical efectiva de consolidación para los residuos procedentes del Sitio 2. Se observa un aumento significativo de la densidad a lo largo del proceso de consolidación. Este aumento es más notorio en las fracciones limosas y arenosas, siendo menos acusado en las arenas limosas. El comportamiento antes descrito es análogo al observado en suelos naturales, salvo por el hecho de que los residuos exhiben variaciones más acusadas debidas al bajo índice de huecos inicial.

La figura 4 muestra la variación del módulo edométrico de los residuos procedentes de los Sitios I y II con la densidad seca. Se observa un aumento significativo del módulo edométrico con el incremento de densidad. Las fracciones más arenosas procedentes del Sitio I experimentan un aumento superior en el módulo edométrico para los mismos niveles de densidad, lo cual puede atribuirse al efecto de la angulosidad y tamaño de las partículas arenosas, las cuales durante el proceso de densificación son capaces de generar estructuras más rígidas con menores incrementos de la presión de consolidación. El hecho de que las fracciones arcillosas alcancen densidades superiores es un efecto de la mejor gradación de los residuos, pero si se observan los niveles de presiones verticales requeridos para esos valores, se puede concluir que los mismos son inalcanzables en la práctica constructiva actual.

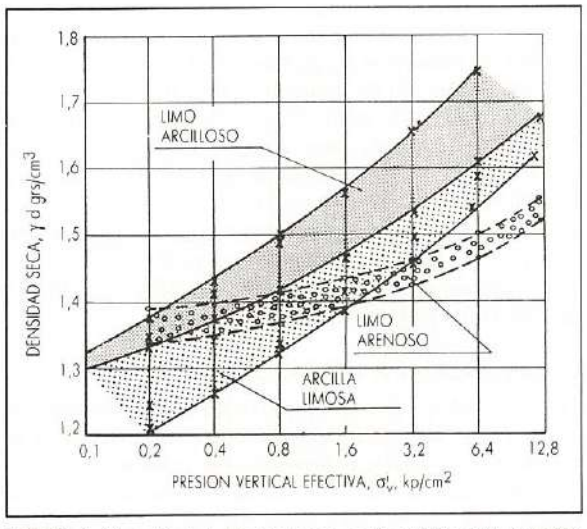

FIGURA 3. Variación de la densidad seca con la presión vertical efectiva (Sitio III.

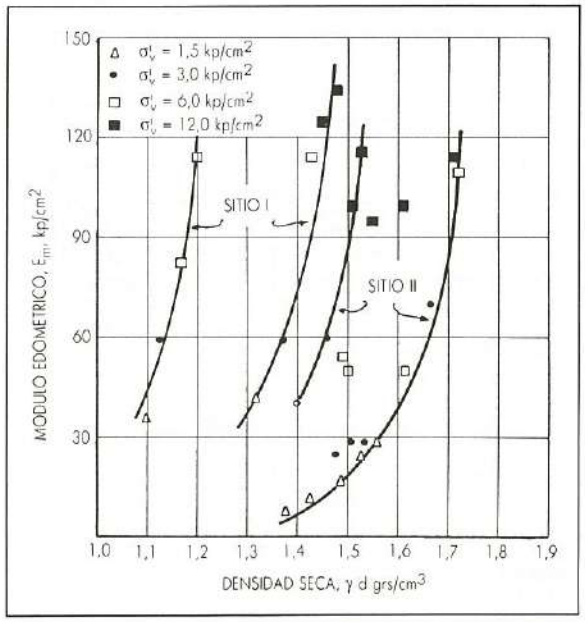

FIGURA 4. Variación del módulo edométrico con la densidad seca.

Las figuras 5 y 6 muestran la variación de los parámetros de resistencia al corte en función del grado de consolidación. Se observa en primer lugar, la gran diferencia de comportamiento entre los materiales arenosos y arcillosos; mientras que los primeros exhiben casi el 50 % de su rozamiento máximo en condiciones no drenadas, los segundos necesitan un grado de consolidación del 80 % para alcanzar el mismo porcentaje de su rozamiento máximo.

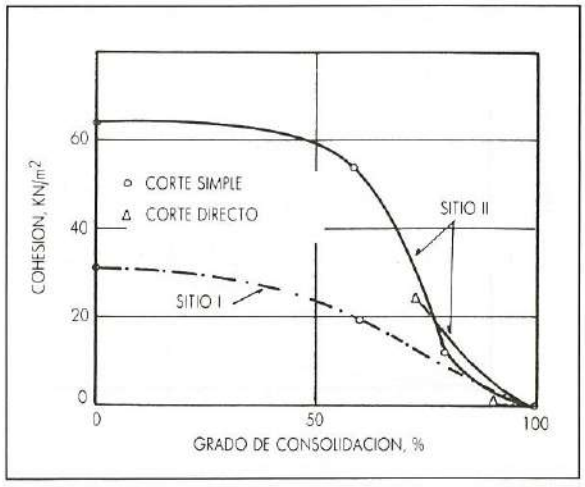

FIGURA 5. Variación de la cohesión con el grado de consolidación.

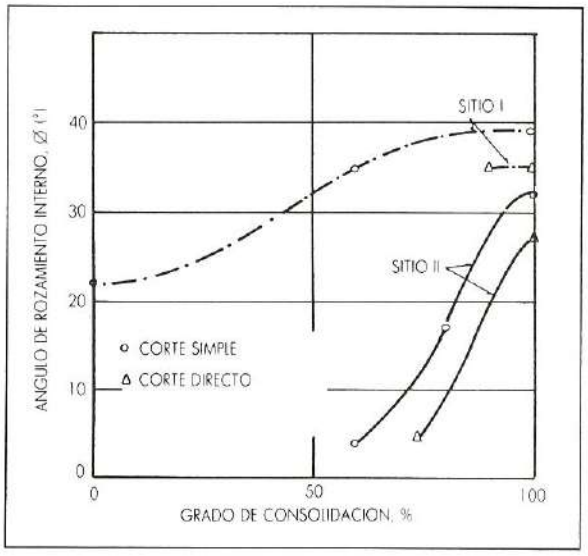

FIGURA 6. Variación del ángulo de rozamiento interno con el grado de consolidación.

Los materiales arenosos presentan el 90 % de su máximo rozamiento para el 60 % de la consolidación en tanto que los arcillosos necesitan el 94 % de consolidación para alcanzar el mismo nivel.

En la figura 7 se ha representado la trayectoria de evolución del ángulo de rozamiento con el grado de consolidación, en función de la permeabilidad del material. Se observa que a medida que se reduce la permeabilidad se necesitan grados de consolidación superiores al 60 % para alcanzar un mínimo desarrollo del 20 % del roza-

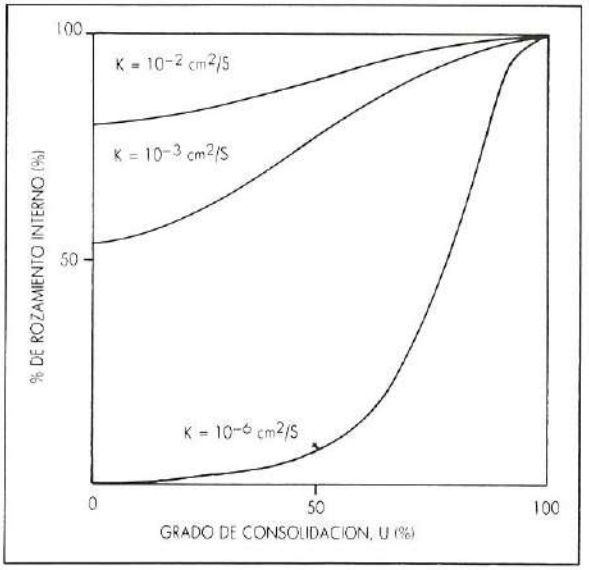

FIGURA 7. Variación del ángulo de rozamiento interno con el grado de consolidación y la permeabilidad.

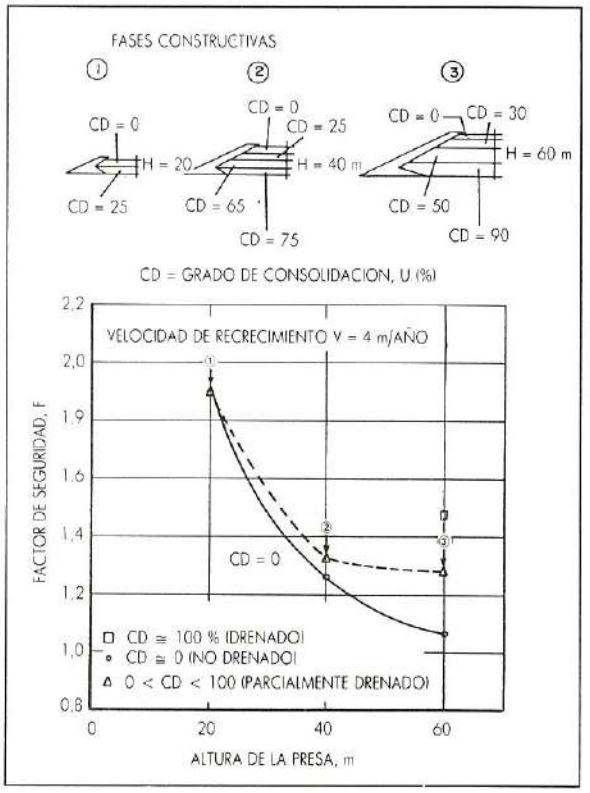

FIGURA 8. Variación del coeficiente de seguridad en función de la altura de la presa.

miento máximo. Para permeabilidades del orden de 10 cm^2/s o superiores, las condiciones no drenadas ($U = 0$) permiten alcanzar hasta el 50 % del rozamiento máximo.

La diferencia de comportamiento entre ambos materiales es más notoria en la evolución del rozamiento, ello se debe al papel que juegan las presiones intersticiales en todo el proceso de desarrollo de la fricción.

Los ensayos de corte directo muestran parámetros inferiores a los obtenidos a partir de los ensayos de corte simple, este fenómeno se debe a varias razones: las diferencias propias de cada uno de los ensayos y el fenómeno de falla progresiva en el plano de corte debido a la pérdida de material en el ensayo de corte directo. Este fenómeno ha sido observado también por OTEO y ESPINACE (1983).

5. APLICACION A UN CASO REAL

Los resultados obtenidos a partir de esta investigación, se aplicaron al análisis de estabilidad de una presa de residuos. La figura 8 presenta los resultados obtenidos. Se indica la variación del coeficiente de seguridad con la altura de la presa, para una velocidad de recrecimiento de 4 m/año. Se observa que este efecto es más importante a medida que transcurre el tiempo, y el gra-

do de consolidación es mayor. Para la hipótesis más desfavorable, a una altura de 60 m el factor de seguridad es de 1,07 en condiciones de rotura sin drenaje, en cambio, considerando el aumento de resistencia de los lodos, se obtiene un factor de seguridad de 1,29, que si es aceptable en este tipo de obra. En un futuro, el proyecto de presas basadas en estas ideas, y el control de la velocidad de recrecimiento, puede, sin duda, llevar a un diseño más económico, más seguro y por ende, más racional de este tipo de obras.

6. CONCLUSIONES

— Los materiales estudiados presentan densidades iniciales muy bajas que varían entre 1,23 y 1,40 g/cm^3; sin embargo, los parámetros de resistencia al corte son elevados, una vez que el material ha consolidado. El ángulo de rozamiento interno efectivo oscila entre 28 y 40° según la granulometría del residuo. En condiciones drenadas, se caracterizan por no exhibir cohesión.

— El proceso de consolidación afecta notablemente a la densidad de los residuos, así como a su módulo edométrico. Este hecho tiene mayor importancia en las fracciones arenosas, las cuales para pequeñas variaciones de la densidad sufren importantes cambios en su módulo edométrico.

— El grado de consolidación afecta de manera importante a las propiedades de los residuos, haciéndolos más densos, menos deformables y más resistentes. Esta afirmación es de gran importancia en el análisis de estabilidad de las presas construidas con estos materiales, puesto que el control de ejecución puede aumentar de manera importante el coeficiente de seguridad de los terraplenes sin variar las pendientes previamente establecidas, dejando que el material mejore debido a la consolidación por adición de nuevas cantidades de material.

— Las curvas de variación de los parámetros de resistencia al corte con el grado de consolidación presentan formas más acusadas en la medida en que el material es más permeable.

— Este estudio pone en evidencia la importancia del análisis de la variación de las propiedades de resistencia al corte con el grado de consolidación para el análisis de los residuos mineros.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha formado parte de una tesis doctoral presentada en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Por ello, agradecemos la colaboración prestada por esta entidad y por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX MOPU, que han hecho posible el desarrollo de este trabajo.

8. BIBLIOGRAFIA

CANCELA, M. D. (1987). «Comportamiento geotécnico de presas de residuos bajo acciones estáticas y dinámicas». Tesis Doctoral. U.P.M. Madrid.

OTEO, C. S., y ESPINACE, R. (1983). «Influencia del grado de compactación de rellenos arcillosos en su deformabilidad bajo acciones estáticas y cíclicas». Cuadernos de Investigación. CEDEX.

VICK, S. G. (1983). «Planning, Design and Analysis of Tailing Dams». Ed. Wiley, New York. 369 p.