

ENSAYOS DE CORTE EN LABORATORIO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA RESIDUAL DE ARCILLAS SOBRECONSOLIDADAS

Shear lab tests to determine residual shear strength of overconsolidated clays

Natalia S. Montero-Cubillo^a, José Estaire^a

^a Laboratorio de Geotecnia, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)

RESUMEN – Durante los deslizamientos en suelos arcillosos sobreconsolidados, la resistencia que realmente actúa en discontinuidades, zonas de cizalla, fisuras, y zonas de reorientación de arcillas es la resistencia al corte residual. En este artículo se comparan los valores de parámetros resistentes obtenidos mediante el análisis retrospectivo de un deslizamiento, considerado como el valor más fiable a lo largo del plano de rotura, y los obtenidos mediante diferentes ensayos de resistencia al corte en laboratorio. De este modo, se determina el ensayo de laboratorio que proporciona los valores de resistencia más cercanos a los presentes en el momento de la rotura en campo. Por otro lado, gracias a las elevadas tensiones efectivas aplicadas en los ensayos se incluye un nuevo intervalo de índices de fragilidad de la formación de estudio. Adicionalmente, se propone un procedimiento de ensayo de corte anular alternativo, que combina los métodos propuestos en las normativas europea (EN ISO 17892-10:2018), británica (BS 1377-7:1990) y norteamericana (ASTM D6467-06a:2006).

SYNOPSIS – During landslides of overconsolidated clay soils, the strength that really acts in discontinuities, shear zones, fissures, and clay reorientation zones is the residual shear strength. The strength parameters achieved through different shear strength lab tests and by means of back analysis, considered to be the most reliable value along the failure surface, are compared in this research. Thus, the lab test that can be used to provide the strength values more similar to the ones obtained by back-analysis is ascertained. Thanks to the high effective stresses applied in the tests, a new range of brittleness indexes of the material studied is included. Additionally, an alternative ring shear test procedure is proposed, combining the methods proposed in the European (EN ISO 17892-10:2018), British (BS 1377-7:1990) and north American (ASTM D6467-06a:2006) standards.

Palabras Clave – resistencia residual, arcillas sobreconsolidadas, ensayos de corte en laboratorio.

Keywords - residual shear strength, overconsolidated clays, shear lab tests.

1 – INTRODUCCIÓN

Margas Azules del Guadalquivir es la denominación que recibe un conjunto de materiales arcillosos que ocupan gran parte de la depresión del Guadalquivir (España). Estos materiales se encuentran ampliamente representados, tanto por el espesor de sus sedimentos como por la extensión de los mismos, en las provincias de Córdoba, Jaén, Sevilla y Huelva (España). Las Margas Azules del Guadalquivir se generaron a partir de depósitos neógenos, que se depositaron

E-mails: natalia.montero@cedex.es (N. Montero), jose.estaire@cedex.es (J. Estaire)

ORCID: orcid.org/0000-0003-0278-1931 (N. Montero)

durante la intrusión del mar miocénico. Al igual que otras rocas blandas y suelos duros de carácter arcilloso (p.e. las Arcillas Azules de Londres), estos materiales generan numerosos problemas de inestabilidad de taludes, por lo que sus propiedades geotécnicas han sido estudiadas por diversos autores españoles en numerosas ocasiones (Fernández, 1979; Oteo y García de la Oliva, 1995; Oteo, 1997; Tsige, 1998; Galera et al., 2009). La formación está compuesta por unas arcillas sobreconsolidadas que presentan un comportamiento geotécnico singular, caracterizado por una fragilidad muy elevada. Sus principales parámetros geotécnicos se pueden cuantificar, de acuerdo a los autores anteriores, en:

- contenido en finos del orden de 70-95%;
- plasticidad media a alta (límite líquido en el entorno de 40-65%);
- contenido en carbonatos entre 18 y 30% ($CaCO_3$);
- expansividad media a alta, con hinchamientos libres en el entorno del 1 al 4%;
- y resistencia a compresión simple de 600 a 3000 kPa, característica de arcillas rígidas a muy rígidas.

Por otra parte, la resistencia al esfuerzo cortante ha sido estudiada por diversos autores con resultados bastante dispares al ser muy dependiente, entre otros factores, del contenido en carbonatos y del grado de alteración del material, como puede verse en la Tabla 1.

Tabla 1 - Parámetros de resistencia (estado de pico) de las Margas Azules del Guadalquivir.

Fuente	Profundidad (m)	c' (kPa)	ϕ' (°)	σ _c (MPa)
Oteo (1998)	---	20 - 60	25 - 30	0,2 - 3,0
Tsige (1998)	0 - 12	50 - 120	27 - 42	<1,5
Olalla y Cuéllar (2001)	---	30	24	0,5
Alonso y Gens (2006)	0 - 75	65	24	0,2 - 0,3
Galera et al. (2009)	0 - 130	210 - 280	18 - 20	0,2-3,5

Nota: Los valores de cohesión y ángulo de rozamiento efectivos provienen de ensayos de corte directo y triaxiales tipo consolidado drenado y no drenado.

Tsige (1998) menciona que esta formación puede ser considerada litológicamente como homogénea, al presentar parámetros de identificación geotécnica muy similares, según los distintos autores. Sin embargo, en términos de resistencia y deformabilidad, se deberían considerar como materiales con comportamientos mecánicos muy diferentes, como demuestra la Tabla 1. Este comportamiento depende principalmente de su grado de alteración que, a veces, es difícil de establecer con ensayos rutinarios de identificación. Es conocido que estos materiales están fuertemente afectados por numerosas microdiscontinuidades estructurales, la mayoría de ellas no identificables a simple vista, que son las principales causantes de su baja durabilidad y alta alterabilidad (Tsige et al., 2001). Las microdiscontinuidades presentes en las Margas Azules del Guadalquivir se pueden agrupar en tres tipos: 1) los planos de cizalla de origen tectónico (denominados en mucho textos como “slickensides”); 2) las microfisuras sistemáticas con dirección dominante horizontal o semihorizontal coincidente con el plano de sedimentación (estratificación); y 3) orientación preferente de láminas de arcilla.

En el caso de las Margas Azules, en estos tres tipos de discontinuidades, la máxima resistencia al corte movilizable es la resistencia residual (Oteo, 1998). Los valores de esta resistencia residual están en general en el entorno de los 10-15° de ángulo de rozamiento, con cohesiones nulas (Oteo,

1998; Alonso y Gens, 2006), coincidentes básicamente con las pendientes naturales estables, existentes en las zonas con predominancia de estos materiales (Fernández, 1979).

El valor de esta resistencia al corte residual depende fundamentalmente del tipo de mineral predominante de la arcilla y de su quimismo, en función del tipo de cationes de intercambio de las arcillas y de la concentración del agua intersticial. Así, en suelos con mayor contenido de esmectita sódica la resistencia será mucho menor que en suelos con otros minerales de la arcilla, como pueden ser por ejemplo, illita y caolinita (Olson, 1974; Kenney, 1977; Moore, 1991).

El objetivo de esta investigación es averiguar, para el caso de las Margas Azules del Guadalquivir, los ensayos o métodos de laboratorio que proporcionan el valor de resistencia al corte residual más aproximado al de la rotura real que se produce en las roturas en campo. Este último valor se considera semejante al proporcionado por el análisis retrospectivo de los deslizamientos de taludes que se producen en estos materiales.

2 – MATERIALES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO

2.1 – Procedencia

Los datos de campo y laboratorio empleados en esta investigación han sido obtenidos gracias al estudio geotécnico del deslizamiento de un terraplén de carretera, situado en la provincia de Jaén (España). El área afectada está formada por unas margas sobreconsolidadas consideradas dentro de las Margas Azules del Guadalquivir. En esa zona, la carretera discurre a media ladera con una pendiente del terreno natural de unos 11° . Los problemas en el terraplén aparecieron, en forma de agrietamientos, un mes después de uno de los meses más lluviosos de los últimos 30 años.

2.2 – Perfiles geológico-geotécnicos

El estudio geotécnico del deslizamiento incluyó una campaña de campo consistente en sondeos a rotación, con pruebas de penetración SPT en su interior, y en ensayos de penetración dinámica tipo DPSH. En dicho estudio, se elaboraron varios perfiles geológico-geotécnicos de las zonas donde se produjeron los movimientos. En la Figura 1 se muestra el perfil más representativo, con indicación de la posición de algunos de los sondeos realizados (SI-21, SI-22 y SI-24).

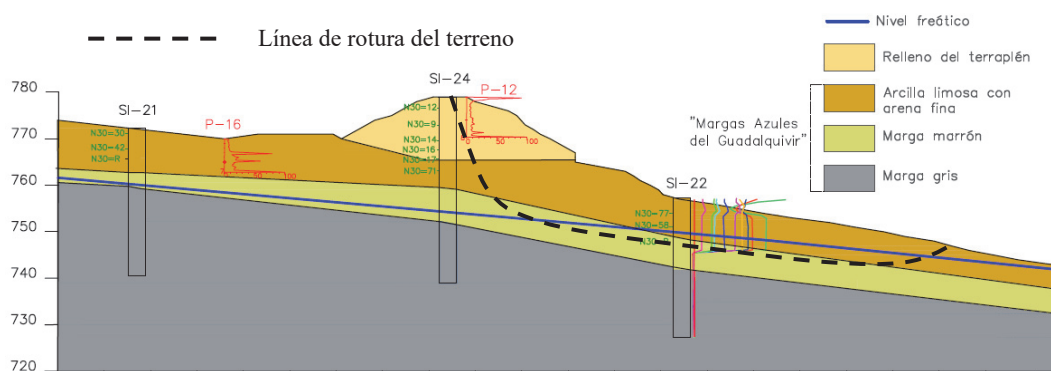


Fig. 1 – Perfil geológico-geotécnico representativo del área afectada por el deslizamiento.

En los perfiles, se diferenciaron cuatro unidades geotécnicas, consideradas las tres inferiores como pertenecientes a las Margas Azules del Guadalquivir. De techo a muro, son las siguientes:

- *Relleno del terraplén*: unidad geotécnica formada principalmente por limos arcillosos o arenosos. Presenta valores del índice N_{SPT} que varían entre 9 y 25 golpes. La baja resistencia de los materiales con los que se construyó el terraplén fue una causa añadida al desarrollo de la inestabilidad.
- *Arcilla limosa con arena fina*: capa más superficial del terreno natural compuesta por materiales procedentes de la alteración de las margas, con valores del índice N_{SPT} que varían desde 30 golpes al Rechazo y parámetros de identificación geotécnica similares a las unidades geotécnicas subyacentes, como cabría esperar. Presenta un espesor variable entre unos 5 y 13 m.
- *Marga marrón*: unidad geotécnica formada por margas arcillosas o arcillo-arenosas de color marrón verdoso, con pasadas más amarillentas de niveles de arenisca de espesores centimétricos y decimétricos (ver Fig. 2). Los testigos obtenidos de los sondeos se encontraban bastante cementados y poco húmedos. Se obtuvo Rechazo en todos los ensayos SPT y valores superiores a 600 kPa con el penetrómetro de bolsillo. Estos materiales, considerados como suelo duro-roca blanda, aparecen con potencias variables entre 4 y 12 m.



Fig. 2 – Fotografías de las muestras de la unidad geotécnica Marga marrón.

- *Marga gris*: unidad geotécnica compuesta por margocalizas arenosas, de color gris oscuro, con intercalaciones de niveles decimétricos de arenisca en los primeros metros (ver Figura 3). De aspecto muy competente y espesores que pueden llegar a alcanzar unos 280 m, según datos de la geología local.

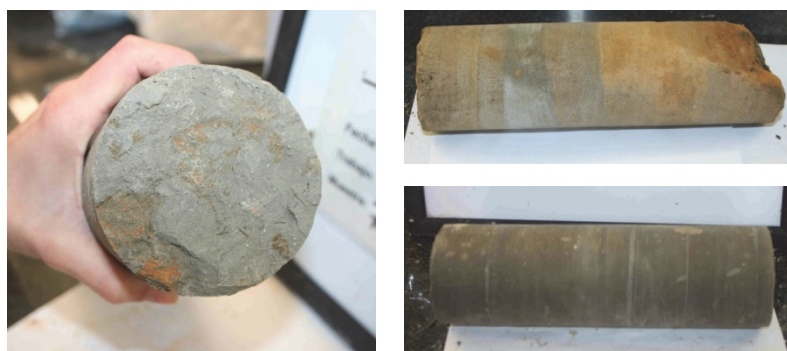


Fig. 3 – Fotografías de las muestras de la unidad geotécnica Marga gris.

Alguno de los sondeos se equipó con tubería inclinométrica, lo que permitió detectar los movimientos del terreno en profundidad, como puede verse en la Figura 4 que revela la existencia clara de movimientos horizontales a una profundidad de unos 12 m. Además, a esa profundidad se aprecian movimientos considerables, de unos 8 mm aproximadamente. Este hecho permite

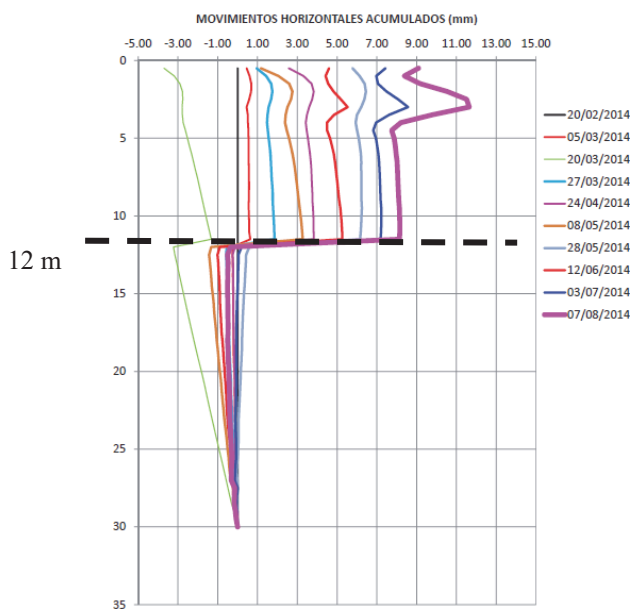


Fig. 4 – Registro del inclinómetro SI-22.

confirmar la hipótesis de que la rotura se produjo bajo condiciones resistentes residuales en las margas.

En los perfiles de estudio se ha trazado la línea de rotura supuesta (Fig. 1), cuya geometría ha sido definida gracias a los inclinómetros y a la observación directa de puntos de rotura y zonas de hundimiento en la calzada, en el talud del terraplén y en una obra de drenaje transversal (Fig. 5). Durante la inspección visual del área afectada también se observó que no existía ningún revestimiento en la cuneta del terraplén, lo que podría haber facilitado la entrada directa de agua en el terreno.



Fig. 5 – Fotografías de la inspección en campo.

Por otro lado, la profundidad del nivel de agua indicada en los perfiles proviene de las únicas mediciones piezométricas disponibles, que se llevaron a cabo tras la ejecución de los sondeos, en un mes muy lluvioso. Esta profundidad es la considerada en el análisis retrospectivo.

La investigación geotécnica se completó con la realización de ensayos de laboratorio con las muestras inalteradas tomadas de los sondeos; además de los ensayos de identificación y estado usuales se realizaron ensayos de resistencia a compresión simple, triaxiales, y de corte directo. A este respecto, es de destacar que las muestras empleadas para esta investigación pertenecían a las unidades geotécnicas denominadas Marga marrón y Marga gris.

2.3 – Análisis retrospectivo

Con la finalidad de averiguar el valor de la resistencia real de las margas de estudio en el momento de la rotura y gracias a la posibilidad de definir con precisión la línea de rotura del deslizamiento, se ha llevado a cabo un análisis retrospectivo de estabilidad del deslizamiento.

Como se puede apreciar en la Figura 1, se trata de un deslizamiento profundo cuya línea de rotura adquiere primeramente una forma circular a su paso por las unidades geotécnicas clasificadas como suelo (Relleno y Arcilla limosa) para, a continuación, seguir una superficie planar a una profundidad de unos 12-14 m, dentro de la unidad geotécnica Marga marrón. La coincidencia de esas profundidades con unos niveles areniscosos llevó a pensar que el agua, circulando favorablemente por estos, reblandeciera el contacto inferior entre la arenisca y la marga, generando en esta última un plano de debilidad. El material margoso, rígido y sobreconsolidado, sufrió un proceso en el cual la resistencia se fue degradando desde el estado de pico al residual.

Una vez establecida la superficie de rotura se realizaron cálculos retrospectivos de estabilidad mediante métodos de equilibrio límite. Los resultados revelaron unas condiciones resistentes residuales en las margas, caracterizadas por una cohesión nula y un ángulo de rozamiento de unos 11-11,5°.

Para poder comprender el cambio brusco de un estado de resistencia a otro, cabe destacar el tipo de mecanismo de degradación que sufre este tipo de materiales arcillosos sobreconsolidados. Tsige et al. (2001) establecen dos mecanismos principales de alteración que afectan a las margas de estudio: descompresión y desmoronamiento. La fase de descompresión es producida por la relajación de tensiones a consecuencia de la disminución de los esfuerzos tanto de consolidación como tectónicos durante la erosión o excavación. Las discontinuidades que aparecen por la descompresión producen una disminución importante de la resistencia al corte y provocan que el material presente una muy baja durabilidad debido al aumento de la permeabilidad local in-situ. La segunda fase de alteración es el desmoronamiento o disgregación del suelo en bloques relativamente grandes. Este fenómeno se produce por la rotura de las fuerzas de enlace entre los agregados estables, debido a la acción agua-suelo. En esta fase el papel del agua resulta fundamental: ésta queda atrapada dentro del suelo, tanto por absorción como por adsorción, produciendo presiones de compresión en los poros que se encuentran entre los agregados y dando lugar a la desintegración del suelo en bloques cada vez más pequeños.

Las anteriores condiciones geomecánicas han de combinarse con las ambientales. La zona del deslizamiento se puede clasificar climáticamente como árida o semiárida, en la que aparecen precipitaciones torrenciales puntuales causantes de gran cantidad de inestabilidades. A este respecto, se pueden consultar numerosos casos de roturas en Margas Azules del Guadalquivir, estudiados por Oteo (1997), y desencadenados tras las lluvias del invierno del 96-97 (ver Figura 6), con mecanismos de rotura muy similares al estudiado en este trabajo.

En el presente estudio, los testigos correspondientes al material suprayacente al nivel del deslizamiento presentaban una gran alteración, con fisuras horizontales y disgregación del suelo en bloques de agregados. Así, es coherente suponer la hipótesis de que se hayan producido los procesos de alteración mencionados, alcanzando profundidades de 12-15 m y permitiendo que el agua produjera un estado bastante alterado de la unidad geotécnica Marga marrón. De este modo se comprende que su estado sea el equivalente al residual favorecido por la acumulación de agua en niveles inferiores menos permeables. La profundidad de alteración observada en este caso está dentro del rango de los 20 m indicados por Tsige et al. (2001) para las Margas Azules del Guadalquivir.

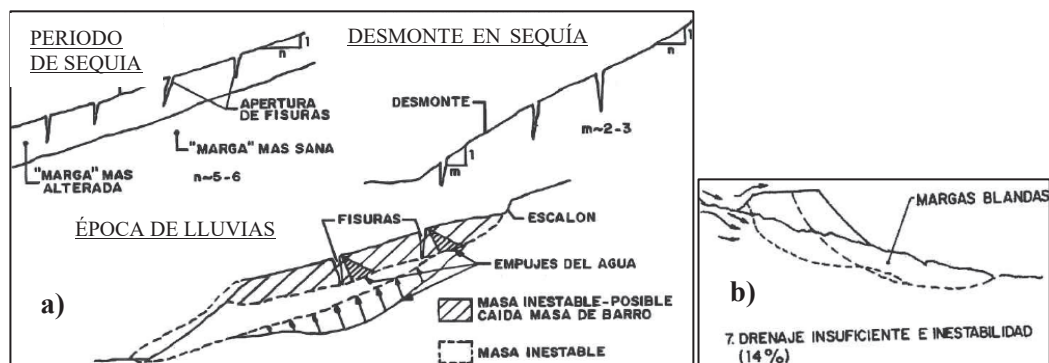


Fig. 6 – Esquema sobre el efecto del agua en los mecanismos de rotura (a) y mecanismo de rotura causante del 14% de los deslizamientos producidos en el invierno 1996-1997 (b).

Por lo tanto, en el caso de este deslizamiento, se puede considerar que se dieron los siguientes factores desencadenantes: a) terraplén de baja resistencia ($N_{SPT} = 9-25$ golpes); b) cuneta del terraplén sin revestimiento; c) últimos meses muy lluviosos lo que produjo acumulación de agua infiltrada; d) presencia de minerales expansivos en todos los niveles de terreno afectados, que aceleraron la degradación debido a los esfuerzos cíclicos producidos por hinchamiento y retracción en periodos de lluvias y sequía, respectivamente; e) alterabilidad de las margas por posible presencia de microdiscontinuidades; y f) fragilidad muy elevada de las margas.

2.4 – Caracterización geotécnica

En la Tabla 2 se muestran los parámetros obtenidos a partir de los ensayos de identificación, de estado natural y de resistencia realizados en muestras de las unidades geotécnicas de Marga marrón y Marga gris.

Tabla 2 – Parámetros de identificación, estado natural y resistencia de las margas sobreconsolidadas de estudio (Unidades geotécnicas: Marga marrón y Marga gris).

Parámetro	Número de ensayos	Valor		
		Medio	Mínimo	Máximo
Contenido de finos (%)	4	70	50	98
Límite líquido, w_L (%) ¹	24	43	26	58
Índice de plasticidad, IP (%)	24	16	4	32
Peso específico de las partículas sólidas, G_s	20	2,61	2,47	2,72
Contenido en carbonatos, $CaCO_3$ (%)	14	38	32	45
Humedad natural, w_{nat} (%)	18	17	13	24
Densidad seca, γ_d (g/cm^3)	23	1,8	1,6	2,2
Resistencia a compresión simple, σ_c (MPa)	15	18	8	27
Presión de hinchamiento (kPa)	2	-	34	235
Hinchamiento libre (%)	2	-	0,9	8,5

Nota (1): 9 de las 24 muestras resultaron no plásticas debido a posibles coincidencias con niveles arenosos frecuentes. La mayoría de las muestras se clasificaron como CL (clasificación USCS).

Nótese que los valores de contenido en $CaCO_3$ (entre 32 y 45 %) son superiores a los indicados por otros autores para estos materiales (20-30 %). El carácter más carbonatado del material ensayado en este trabajo puede ser la causa principal de su mayor resistencia.

Los valores de resistencia a compresión simple (σ_c) en muestras inalteradas permiten clasificar a las Margas Azules como una roca blanda (ISRM, 1981) e indican, al igual que otros parámetros, una cementación y competencia mucho mayor que la presentada por los autores citados anteriormente, más característica de una marga o lutita ($\sigma_c > 20$ MPa; González de Vallejo et al., 2002).

Por otra parte, el índice de huecos representativo se estableció en 0,4. La mayoría de las muestras se encontraban saturadas, con humedades de campo cercanas o inferiores al límite plástico del material, por lo que los índices de fluidez eran negativos, indicativos de consistencias o estados sólidos o semi-sólidos.

En general, resulta de especial interés el conocer el tipo de filosilicatos presentes en este tipo de materiales, dada su relación con los problemas de estabilidad que se generan debidos, en parte, a los agrietamientos por retracción e hinchamiento y los valores bajos de resistencia al corte residual. Con la finalidad de conocer los elementos y minerales presentes en las margas de estudio, se llevaron a cabo ensayos de Fluorescencia y Difracción de Rayos X.

Los ensayos de Fluorescencia de seis muestras revelaron la existencia, de mayor a menor, de los siguientes elementos mayoritarios: Si, Ca, Al, Fe, K, Mg y Na. Estos resultados están en concordancia con el contenido típico en calcita y en minerales de la arcilla (filosilicatos de aluminio, hierro y magnesio) de las Margas Azules del Guadalquivir.

En los ensayos de Difracción de Rayos X, se emplearon dos tipos de análisis realizando un barrido (de 2° a 70 ° 2 θ): el método general que analiza la muestra en polvo con los agregados desorientados, y la técnica de agregados orientados (AOT) para determinar el tipo de filosilicatos presentes en las muestras (Figura 7). Con esta segunda técnica se analizaron las siguientes muestras: una muestra secada a temperatura ambiente (T^a ambiente en Figura 8a); una segunda secada en estufa, durante unas 3 horas, a 550°C (550°C en Figura 8b); y una tercera, incorporando etilenglicol para que adsorbiera toda la humedad posible, que después es secada en estufa durante 48 h, a 60°C (EG en Figura 8c).

En la Figura 7 se incluyen los difractogramas de AOT de las siete muestras estudiadas en los que se puede apreciar una homogeneidad muy importante en la composición del material. Los minerales constituyentes principales son los mismos para todas las muestras: filosilicatos, calcita y cuarzo, de mayor a menor, en orden de proporción.

De los datos obtenidos en el análisis de los agregados orientados (Figura 8), se observa que los tres componentes principales son esmectita, mica y caolinita. El filosilicato predominante varía entre la esmectita y la mica, para las distintas muestras analizadas. Véase como en el tratamiento con etilenglicol (EG en Figura 8c), la esmectita hincha y se expande hasta 17,3 Å (5,12°), mientras que en el tratamiento a temperatura ambiente (Figura 8a) aparece con el espaciado característico del mineral de 14,8 Å (5,95°). Cuando las muestras se calentaron a 550° (Figura 8b) la esmectita colapsó a unos 10 Å, por lo que se ve sumada al pico de la mica (9,96 Å). Esta última aparece de manera estable en todos los tratamientos. Como mineral acompañante aparece siempre la caolinita, sin grandes cambios de proporción en todas las muestras. Se puede apreciar el pico de la caolinita (7Å) en los tratamientos con etilenglicol (EG) y a temperatura ambiente, mientras que a 550° desaparece, al volverse su estructura amorfa.

Observando los parámetros geotécnicos de la Tabla 2 y los resultados de los análisis por Fluorescencia y Difracción de Rayos X, se puede concluir, que las margas sobreconsolidadas de estudio pertenecen a los materiales enmarcados dentro de las Margas Azules del Guadalquivir.

Las muestras estudiadas se encuentran dentro de los rangos de valores de los parámetros de identificación geotécnica de esta formación, excepto los correspondientes al contenido en carbonatos y a la resistencia a compresión simple que son notablemente superiores a los indicados por otros autores. Por lo tanto, se puede establecer que, en esta zona, tras un nivel más meteorizado de las margas (5 a 13 primeros metros) aparecen directamente unas margas marrones de mayor competencia que las de otras zonas del Valle del Guadalquivir, que no se pueden unificar en

cuanto a parámetros resistentes en condiciones inalteradas. No obstante, sí parece que se puede establecer una relación directa con los parámetros residuales, al ser los obtenidos en este estudio muy similares a los presentados por todos los autores ya citados, como se verá más adelante dado que es esta resistencia el principal objetivo de esta investigación.

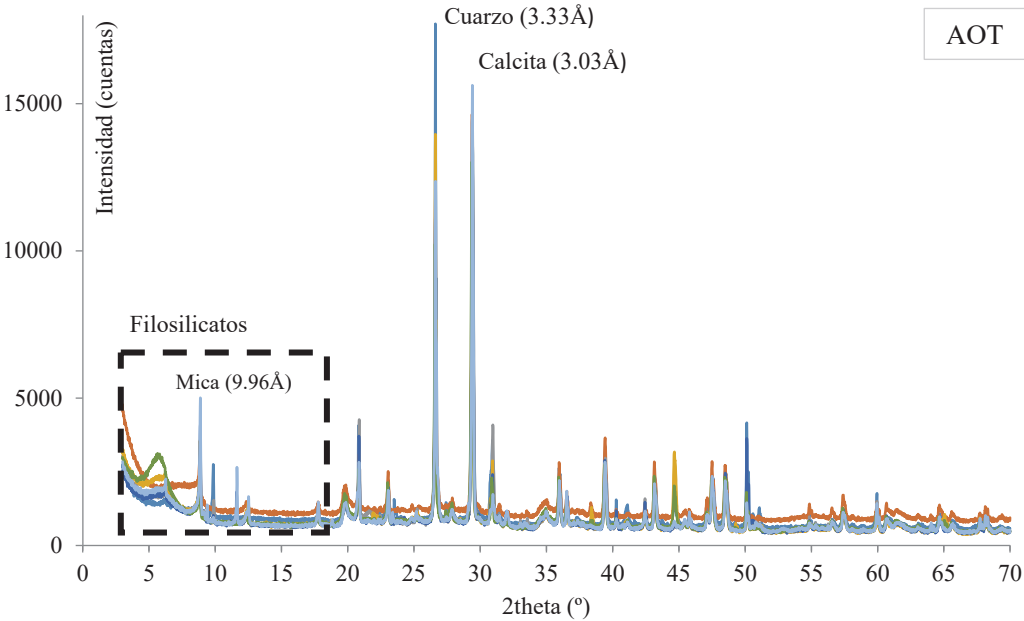


Fig. 7 – Difractogramas de las siete muestras analizadas.

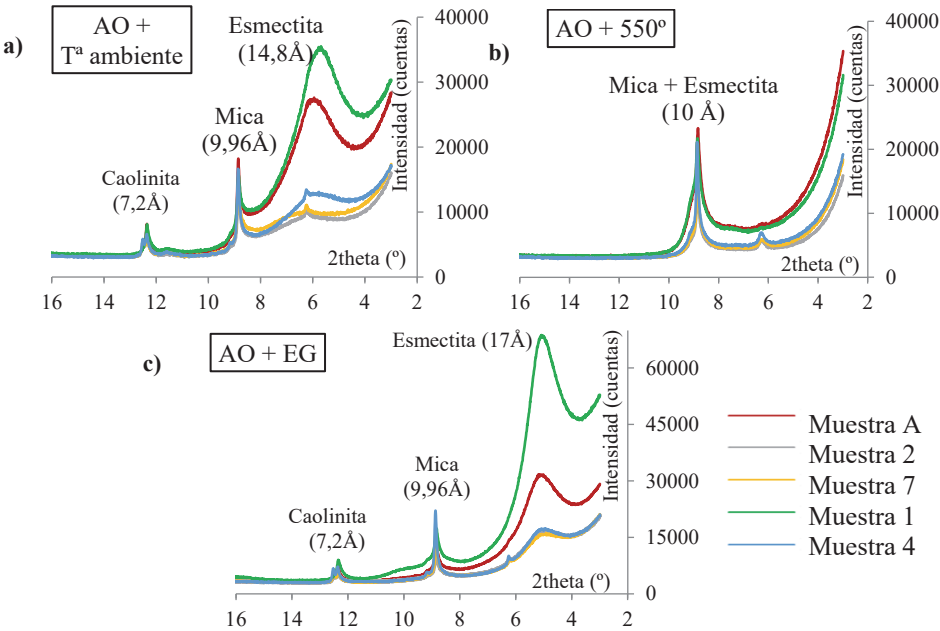


Fig. 8 – Difractogramas de las muestras analizadas mediante la técnica de agregados orientados.

3 – ENSAYOS DE RESISTENCIA AL CORTE EFECTUADOS

3.1 – Diferenciación de las muestras ensayadas

Como se ha venido comentando, el objetivo de esta investigación es averiguar los ensayos o métodos de laboratorio que proporcionan el valor de resistencia al corte más aproximado al de la rotura real que se produce en los deslizamientos en campo de estos materiales. Con esta finalidad, se han empleado siete tipos de ensayos o métodos para averiguar la resistencia al corte con un total de 16 muestras procedentes del área afectada por el deslizamiento. En la Tabla 3 se pueden apreciar los diferentes grupos de muestras ensayadas mediante un método u otro.

Tabla 3 - Agrupación de las muestras empleadas en función de su método de ensayo

	Nº muestras	Corte Directo (DST)				Triaxial (TX)	Corte anular (RST)	
		Pico	Residual (1º ciclo)	Residual (5 ciclos)	Remoldeada a WL		Remoldeada a WL	Remoldeada a WP
Grupo I	7 (*5)	X	X	X	-	-	X	*X
Grupo II	1	-	-	-	-	-	X	-
Grupo III	5	-	-	-	-	X	-	-
Grupo IV	3	-	-	-	X	-	X	-

Grupo I: muestras inalteradas procedentes de los niveles afectados por el deslizamiento;

Grupo II: muestra procedente de la zona por la que pasaba la banda de deslizamiento;

Grupo III: muestras alteradas (procedentes de las cajas de sondeos sin mantenimiento en cámara húmeda durante un tiempo prolongado) procedentes de los niveles afectados por el deslizamiento;

Grupo IV: muestras más cementadas procedentes de profundidades mayores a la superficie de deslizamiento.

* Solo 5 de estas 7 muestras se ensayaron al límite plástico en el equipo de corte anular.

3.2 – Ensayos de corte directo con muestras inalteradas

Se llevaron a cabo siete ensayos de corte directo consolidado-drenado con muestras inalteradas del Grupo I, en caja de corte circular de 60 mm de diámetro. Las velocidades de corte empleadas fueron de entre 0.005 y 0.008 mm/min. Las tensiones verticales aplicadas variaron entre unos 100 y 1100 kPa. Este valor tan elevado de tensión vertical se utilizó para compensar la presión de hinchamiento que presentaron algunas muestras, con valores de hasta 700 kPa.

Las curvas tensión-deformación muestran un comportamiento frágil fuertemente marcado. La Figura 9 recoge un patrón muy característico de las probetas ensayadas, en las que se aprecia: i) un incremento brusco de la tensión de corte hasta alcanzar la resistencia de pico, a un desplazamiento relativo muy bajo, ii) una rápida y fuerte degradación de la resistencia tangencial, en la zona de post-ruptura, y iii) una reducción más suavizada de la tensión hasta alcanzar, para desplazamientos horizontales elevados, una resistencia menor, denominada “residual (primer ciclo)” en esta investigación.

Posteriormente, se determinó una segunda resistencia de corte mediante la realización manual de 5 pasadas o ciclos (que suponen 10 cambios de sentido) de la caja de corte, a una velocidad superior a la del ensayo anterior, para generar con nitidez el plano de corte y favorecer la orientación de las partículas arcillosas. Una vez realizada esa operación, se dejó la muestra en reposo durante 24 horas para establecer el equilibrio de presiones, y se efectuó un nuevo ensayo de corte directo, de la manera habitual. De este modo se obtuvo una nueva resistencia del material, denominada “residual (5 ciclos)” (también en Figura 9), con valores inferiores a la “residual

(primer ciclo)”, debido a una mayor reorientación de los minerales arcillosos en la dirección de la tensión tangencial aplicada. A este respecto, es interesante destacar que la norma europea sobre corte directo (EN ISO 17892-10) recoge explícitamente este procedimiento de ensayo para determinar la resistencia residual de un suelo, llevando a cabo el número de ciclos necesarios hasta alcanzar una resistencia residual constante.

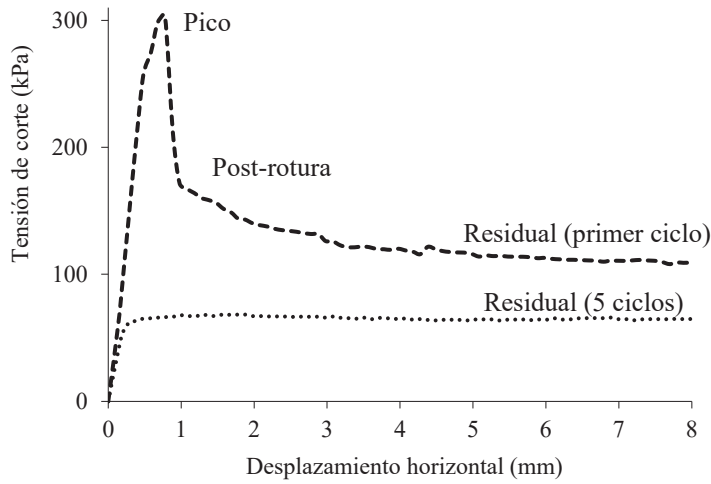


Fig. 9 – Comportamiento frágil detectado en ensayos de corte directo con muestra inalterada.

Como se aprecia en la Figura 10, la resistencia de pico se alcanzó mayoritariamente para desplazamientos de entre 0.5 y 1.5 mm, valores que concuerdan con los presentados por Alonso y Gens (2006). Estos autores sugieren, observando la representación de sus valores y para el rango de valores que alcanzan, que no parece existir una relación clara entre el desplazamiento de pico alcanzado y la tensión vertical aplicada. Sin embargo, con los valores obtenidos en este estudio se intuye cierto aumento de los desplazamientos alcanzados en la rotura, a partir de 500-600 kPa de tensión vertical aplicada.

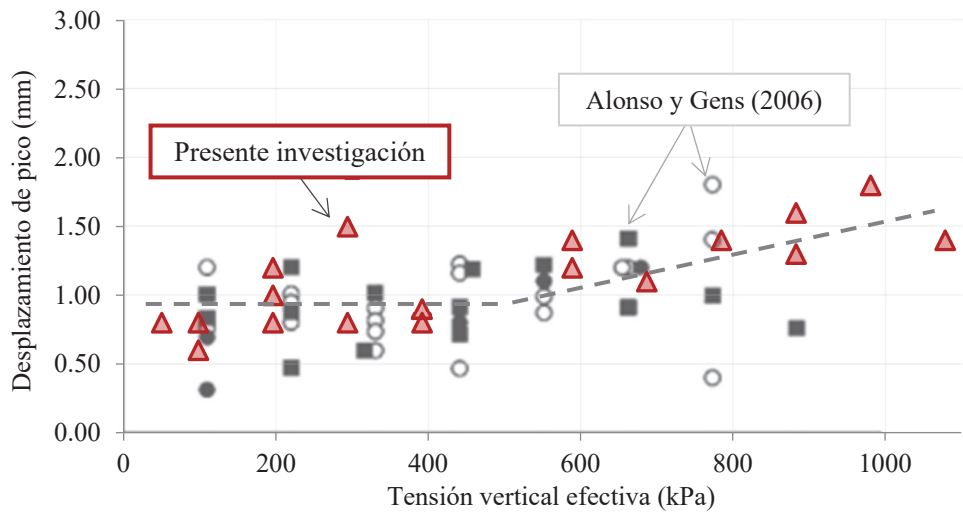


Fig. 10 – Desplazamiento alcanzado en estado de pico.

Por su parte, la interpretación de las curvas tensión-deformación ha dado lugar a resultados dispares en los parámetros de Mohr-Coulomb que modelizan la resistencia de pico, como puede verse en la Figura 11. Los valores de cohesión varían entre 0 y 520 kPa y los ángulos de rozamiento entre 35 y 58°, con un valor medio de 225 kPa de cohesión y un ángulo de rozamiento de 47°. Por su parte, la "residual (primer ciclo)" se puede cuantificar mediante ángulos de rozamiento entre 23 y 45°, y cohesiones nulas. En el caso de los ensayos tras varias pasadas, los ángulos de rozamiento representativos de la "residual (5 ciclos)" resultaron inferiores, oscilando entre 17 y 38°, y cohesiones nulas (también en la Figura 11).

Con objeto de hacer un análisis global de todas las probetas ensayadas, consideradas como si se trataran de un único ensayo, la Figura 12 recoge sus resultados individuales. De forma general

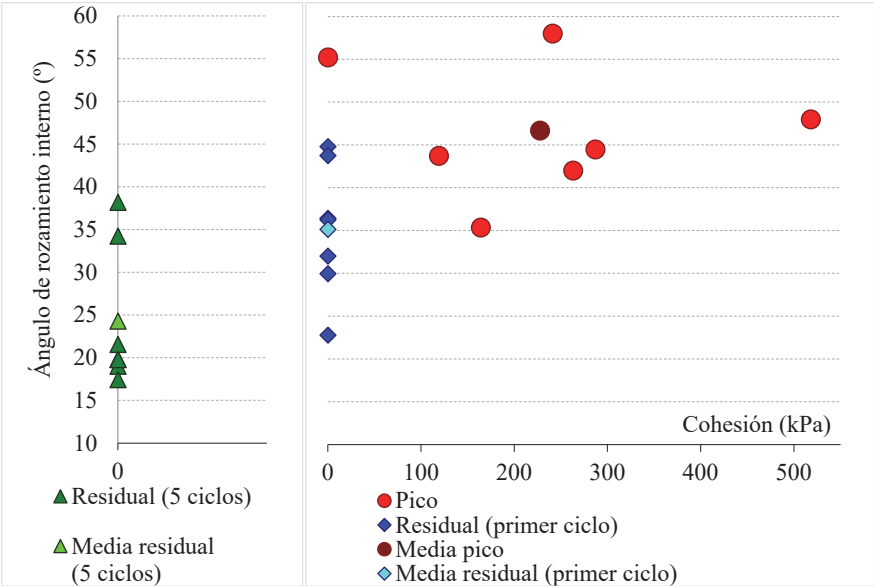


Fig. 11 – Parámetros de resistencias de pico y residuales.

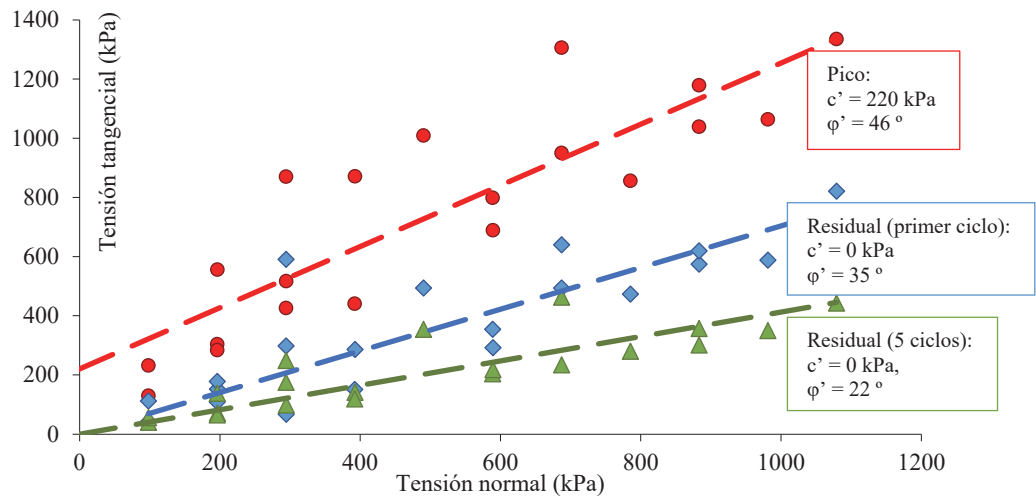


Fig. 12 – Análisis global: ensayos de corte directo.

se podría decir que el ángulo de rozamiento para la resistencia de pico es de unos 46° con una cohesión de 220 kPa, y para la “residual (primer ciclo)” y “residual (5 ciclos)” es de 35° y de 22° , respectivamente, ambas con cohesiones nulas.

3.3 – Ensayos triaxiales con muestras alteradas

Se realizaron cinco ensayos triaxiales de tipo consolidado-drenado, con muestras de 70 mm de diámetro del Grupo III (Tabla 3). Las velocidades de corte empleadas variaron entre 0,007 %/min y 0,008 %/min. Las curvas de rotura de estos ensayos muestran de nuevo el comportamiento rígido y frágil de este material (Figura 13a). En la Figura 13b se incluye el análisis global que recoge, en un único gráfico, todas las probetas ensayadas. Este análisis permite realizar un buen ajuste con el que se obtiene una cohesión nula y un ángulo de rozamiento de unos 56° para el estado de pico, algo superior al obtenido con los ensayos de corte directo. Por su parte, el estudio de las tensiones desviadoras que se obtienen para grandes deformaciones permite caracterizar esa resistencia, con una cohesión nula y un ángulo de rozamiento de unos 39° . Esta resistencia para grandes deformaciones es algo superior a la denominada “residual (primer ciclo)” del ensayo de corte directo. El hecho de que las resistencias obtenidas con ambos ensayos sean diferentes es debido a que la superficie de rotura generada y el estado tensional, no son los mismos. Ambas se pueden comparar en cuanto a que son las resistencias residuales obtenidas tras la primera rotura de las probetas en ambos ensayos, triaxial y de corte directo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en el ensayo triaxial la rotura del material se produce en múltiples direcciones (no horizontales), siendo esperable que las probetas deformadas a través de planos inclinados presenten una mayor resistencia al corte. En este tipo de materiales, con elevada presencia de microdiscontinuidades paralelas a la estratificación, su comportamiento resistente este fuertemente influido por las fisuras horizontales o semi-horizontales.

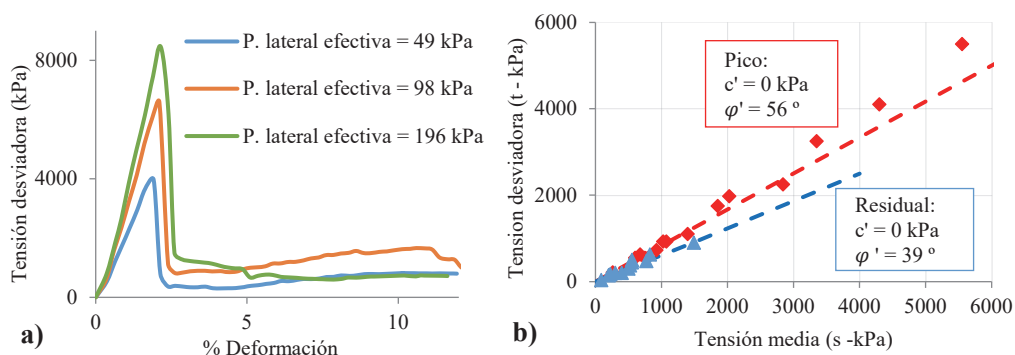


Fig. 13 – a) Comportamiento frágil en ensayo triaxial sobre muestra alterada. b) Análisis global de los ensayos triaxiales realizados.

3.4 – Ensayos de corte anular con muestras remoldeadas

3.4.1 – Ideas previas

Se han llevado a cabo ensayos de corte anular, con muestras de los Grupos I, II y IV, como se indicaba en la Tabla 3. Todos los ensayos se realizaron en un equipo tipo Bromhead (Tipo B en EN ISO 17892-10:2018).

Durante la realización de los primeros ensayos se produjo gran cantidad de expulsión de muestra durante el proceso de consolidación y precorte (Figura 14a), llegándose a registrar asientos de casi un 20 %. Como indican Stark y Vettel (1992), conforme la placa porosa superior asienta en el portamuestras puede dar lugar a la expulsión de muestra, quedando esta última atrapada entre el portamuestras y la placa superior, lo que genera una mayor resistencia al corte. Estos autores sugieren un nuevo procedimiento de ensayo limitando el asiento de la placa a 0,75 mm. A este respecto la normativa europea (EN ISO 17892-10:2018) señala que si el proceso de consolidación supone una reducción del espesor inicial de la muestra superior a un 10%, se debe añadir más muestra y repetirse esta etapa del ensayo.

Por otro lado, se observaron, en las curvas de rotura, unos picos que se repetían a una frecuencia de desplazamiento más o menos constante, y que, en ocasiones, desviaban enormemente la tendencia normal de las curvas. Se pensó que una de las razones de la repetición de estos saltos era que el plano de corte generado estuviera en el contacto entre la muestra y la tapa superior de la caja que tiene ciertas hendiduras, dado que el espesor de la muestra es pequeño (8-9 mm) y se había constatado salida del material durante la consolidación (Figura 14a). Esto hizo que en los ensayos posteriores, se pusiera un cierto esfuerzo en la búsqueda del plano de corte.

En algunas muestras, como la incluida en la Figura 14b, se observaron marcas externas de un posible plano de corte que, sin embargo, no continuaban en la sección transversal, donde se debería observar una reorientación más clara (ni siquiera al microscopio). Por lo que no se encontraron hechos concluyentes a este respecto a pesar de que los parámetros resistentes obtenidos en el presente estudio, derivados de este ensayo, son acordes a los presentados por otros autores para esta formación. En este sentido, es conveniente destacar que hay autores como Feda (1992) y Zhang et al. (2011), entre otros, en cuyos ensayos se aprecia claramente la formación del plano de corte, quizás debido a la utilización de otros equipos de corte anular.

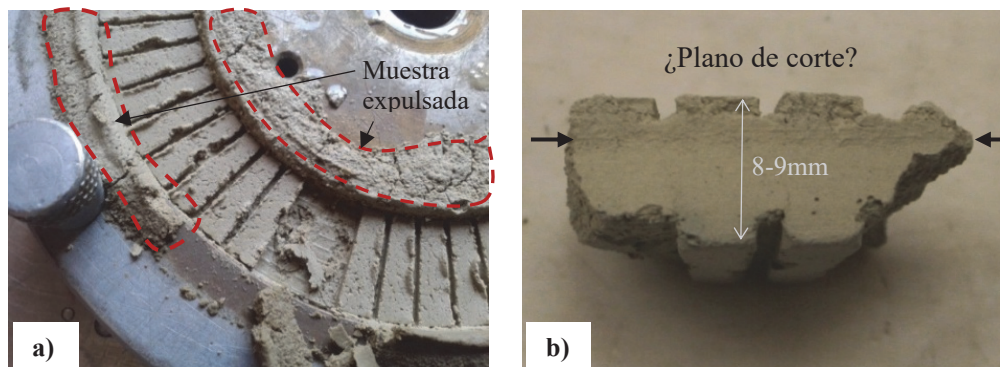


Fig. 14 – a) Placa inferior del equipo con acumulación de muestra expulsada entre las paredes de ambas placas. b) Posible plano de corte en muestra secada a temperatura ambiente tras su ensayo.

Merced a las observaciones anteriores se planteó un procedimiento de ensayo específico, cuyas particularidades y etapas se definen en el siguiente apartado.

3.4.2 – Procedimiento de ensayo

Los ensayos se realizaron siguiendo un procedimiento determinado a partir de las normas ASTM D6467, BS 1377: Part 7 y EN ISO 17892-10, con objeto de minimizar la expulsión de muestra entre las paredes y la placa superior del portamuestras (Figura 14a). Este nuevo

procedimiento de ensayo de corte anular, propuesto en este trabajo, se puede resumir en los siguientes pasos:

a) Preparación de la muestra: el material se desmenuza y se seca al aire, para posteriormente pasarlo por el tamiz de 0,4 mm y añadir agua hasta alcanzar una humedad cercana al límite líquido.

La norma ASTM D 6467 sugiere emplear una humedad próxima al límite líquido para el remoldeo de la muestras dado que el empleo de este contenido de agua minimiza la cantidad de aire atrapado durante la colocación de la muestra dentro de la cavidad anular, incrementando el grado de saturación. Sin embargo, tanta cantidad de agua, facilita la expulsión de muestra durante el ensayo. También señala que se puede emplear una humedad entre el límite líquido y el límite plástico, si se asegura que no quedan burbujas de aire atrapado en la cavidad anular.

b) Colocación de la muestra en el portamuestras: el material se introduce en el portamuestras con una pala de laboratorio y se enrasa. Posteriormente, se golpea lateralmente el portamuestras hasta que dejan de salir burbujas de aire. Se vuelve a enrasar y se añade material si es necesario.

Se emplea una muestra para cada una de las tensiones verticales que se vayan a utilizar en el ensayo. De manera general y para evitar la salida del material, es preferible usar tensiones verticales bajas como, por ejemplo, la secuencia 25, 50 y 75 kPa.

c) Inundación y consolidación de la muestra: la muestra se inunda y posteriormente se procede a su consolidación, bajo la tensión vertical que se aplicará en la rotura. Los pesos se añaden en varias etapas hasta llegar al total deseado, para evitar la salida del material.

d) Generación del plano de corte: Se genera un plano de corte, retirando peso hasta alcanzar la carga vertical menor que se aplicará en el ensayo y girando la placa inferior con una velocidad de giro de 28°/min durante unos 10 minutos. La recolocación de la carga vertical retirada se lleva a cabo inmediatamente después de generado el plano de corte, con intervalos de tiempo de 10 minutos entre cada carga.

e) Proceso de corte y rotura del material: Antes de comenzar el proceso de corte, se debe dejar pasar el tiempo necesario para que se consiga el equilibrio de presiones, momento que se consigue cuando se estabilizan los asientos verticales. Posteriormente se selecciona una velocidad de desplazamiento de 0,003 mm/min ó 0,024 °/min (nótese que la norma ASTM D 6467, recomienda una velocidad de desplazamiento mucho más alta, de 0,02 mm/min para suelos tipo CH). El ensayo se termina cuando se estabiliza la tensión tangencial resistida por el material ensayado.

3.4.3 – Resultados

El aspecto representativo de las curvas de rotura obtenidas en el ensayo de corte anular se puede apreciar en la Figura 15. En los ensayos realizados se alcanzó una resistencia al corte de valor prácticamente constante a partir del primer milímetro de desplazamiento, aproximadamente.

Los resultados obtenidos, con las muestras de los Grupos I y II (ver Tabla 3), se muestran en la Figura 16a. Los ángulos de rozamiento derivados de este ensayo han resultado entre 6 y 20°, con

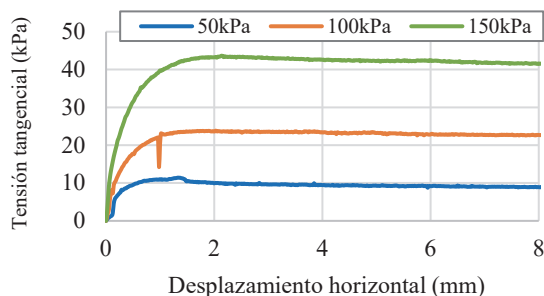


Fig. 15 – Aspecto de las curvas de rotura en los ensayos de corte anular.

un valor medio de 10° , con cohesiones nulas. En la Figura 16a se puede apreciar que el valor medio del ángulo de rozamiento es similar al obtenido a partir de un análisis global de todas las probetas (11°). También se recoge de forma particular, el resultado de la muestra procedente de la superficie de rotura detectada por los inclinómetros (Grupo II) con un ángulo de rozamiento de 15° y cohesión nula, dado que se detectó que tenía una mayor proporción de arena que las demás.

Adicionalmente, se ensayaron un total de 18 probetas con las muestras del Grupo IV (Tabla 3), que presentaban inicialmente una mayor cementación, con tensiones verticales que han oscilado entre 12,5 y 300 kPa. Los resultados derivados de estos ensayos revelan unos parámetros residuales iguales a una cohesión nula y ángulos de rozamiento variables entre 17° y 24° , con un valor medio de 20° (Figura 16b). Si se toma el valor del análisis global de todas las probetas se tendría que este grupo de tres muestras tienen un ángulo residual de 19° , que difiere también en gran medida del valor de 11° obtenido con las muestras del Grupo I y II (Figura 16a). Cabe destacar, que no se cuenta con ensayos adicionales que permitan diferenciar geotécnicamente el material de las muestras del Grupo IV y del Grupo I, mediante otros parámetros. Sin embargo, se piensa que su mayor resistencia residual pueda estar asociada a niveles con mayor contenido en carbonatos a mayores profundidades, lo que en términos de resistencia al corte de las muestras remoldeadas pudiera afectar al ángulo de rozamiento interno.

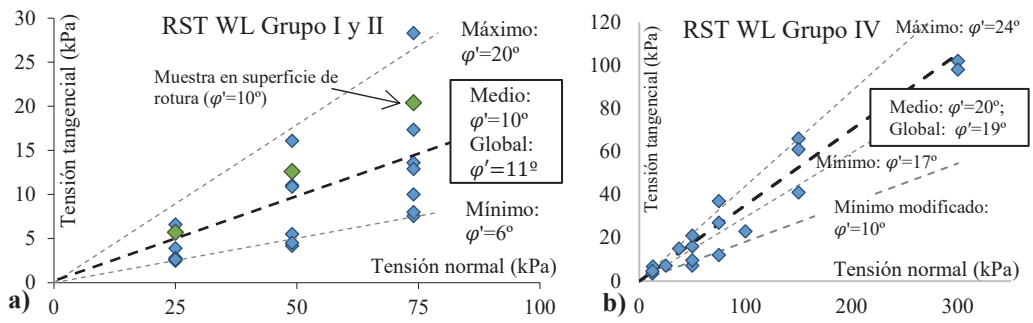


Fig. 16 – Análisis global de los ensayos de corte anular: a) con Grupo I y II, b) con Grupo IV.

Finalmente, con el objetivo de tener una imagen global del problema, se prepararon cinco probetas (con el mismo material anteriormente empleado del Grupo I) con la humedad del límite

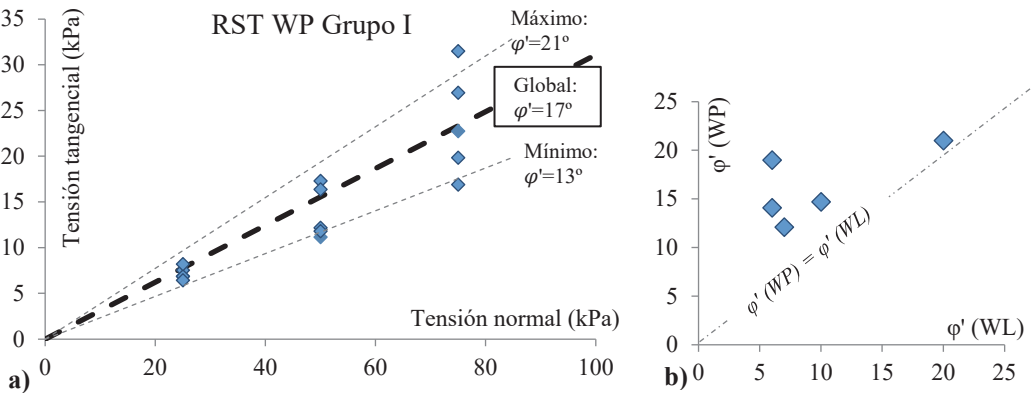


Fig. 17 – a) Análisis global de los ensayos de corte anular con muestras preparadas a la humedad del límite plástico, b) Efecto de la humedad de preparación de las muestras en el ángulo de rozamiento interno obtenido en los ensayos de corte anular.

plástico y siguiendo el proceso anteriormente descrito. En la Figura 17a se incluyen los resultados de todas las probetas de cuyo análisis global resulta un ángulo de rozamiento interno de 17° , bastante superior al obtenido en el caso del límite líquido (11°). Este resultado era esperable dado que existe un aumento de la resistencia del suelo con la reducción de la humedad de remoldeo. Los resultados puntuales de ángulo de rozamiento obtenidos con las probetas en las distintas condiciones de humedad se comparan en la Figura 17b, siendo siempre superiores los obtenidos con muestras preparadas al límite plástico.

3.5 – Ensayos de corte directo con muestras remoldeadas

Adicionalmente se ha evaluado en laboratorio la resistencia residual de estos materiales mediante su ensayo en el equipo de corte directo con muestras, del Grupo IV (Tabla 3), remoldeadas a la humedad del límite líquido.

En la Figura 18a se aprecian las curvas de rotura resultantes del ensayo de corte directo con una de las muestras remoldeadas a la humedad del límite líquido. En estos ensayos se alcanzó una resistencia constante a partir de un desplazamiento de aproximadamente 3 mm. Esta resistencia se puede considerar también como residual del material al comparar las curvas de la Figura 15 y de la Figura 18a correspondientes a la misma muestra ensayada en el equipo de corte anular y en el de corte directo, respectivamente. Se observa que en ninguna se aprecia un pico inicial, llegándose a una resistencia al corte constante para desplazamientos de unos pocos milímetros. Los ángulos de rozamiento deducidos a partir de este ensayo de corte directo han resultado variables entre 23° y 44° , con un valor medio de 31° y un valor derivado del análisis global de todas las probetas de 32° (ver Figura 18b). Estos resultados indican valores del ángulo de rozamiento superiores a los obtenidos con el equipo de corte anular, con una diferencia de unos 12° para los materiales del Grupo IV.

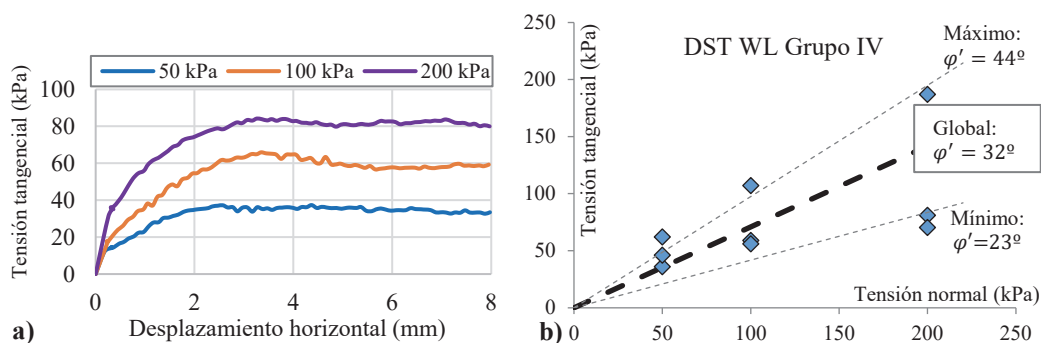


Fig. 18 – Ensayos de corte directo ambos con muestra remoldeada a la humedad del límite líquido.
a) Curvas de rotura b) Resultados de todas las probetas.

4 – ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1 – Comparación de resistencias residuales

En apartados anteriores se han ido presentando distintos métodos o ensayos para evaluar la resistencia al corte en laboratorio. Dependiendo del estado de la muestra (inalterado, alterado o remoldeado a una humedad u otra), que el ensayo evalúe la resistencia de la matriz del suelo, de una fisura preexistente, o del rozamiento entre los minerales arcillosos, se obtienen valores de resistencia al corte muy diferentes. Merced al presente estudio, se ha podido observar que las

diferencias entre los distintos ensayos que proporcionan resistencias en condiciones residuales también son muy elevadas.

Así, se han obtenido ángulos de rozamiento notablemente diferentes en función de que se empleen los ensayos de corte en laboratorio anteriormente descritos con muestras en diferentes condiciones:

- a) ensayo de corte directo en condiciones de resistencia de pico (DST pico),
- b) ensayo de corte directo en condiciones de resistencia residual después del primer ciclo (DST residual),
- c) ensayo de corte directo en condiciones de resistencia residual después de 5 ciclos (DST 5 ciclos),
- d) ensayo de corte directo en condiciones de resistencia residual con muestras remoldeadas preparadas a la humedad del límite líquido (DST WL),
- e) ensayo de corte anular con muestras remoldeadas preparadas al límite plástico (RST WP),
- f) ensayo de corte anular con muestras remoldeadas preparadas al límite líquido (RST WL),
- g) ensayo triaxial en condiciones de resistencia de pico (TX pico), y
- h) ensayo triaxial en condiciones de resistencia residual después del primer ciclo (TX residual).

Estos resultados y los valores derivados del análisis retrospectivo del deslizamiento (BA) se comparan en la Figura 19, para todas las muestras ensayadas de los cuatro grupos en los que se han

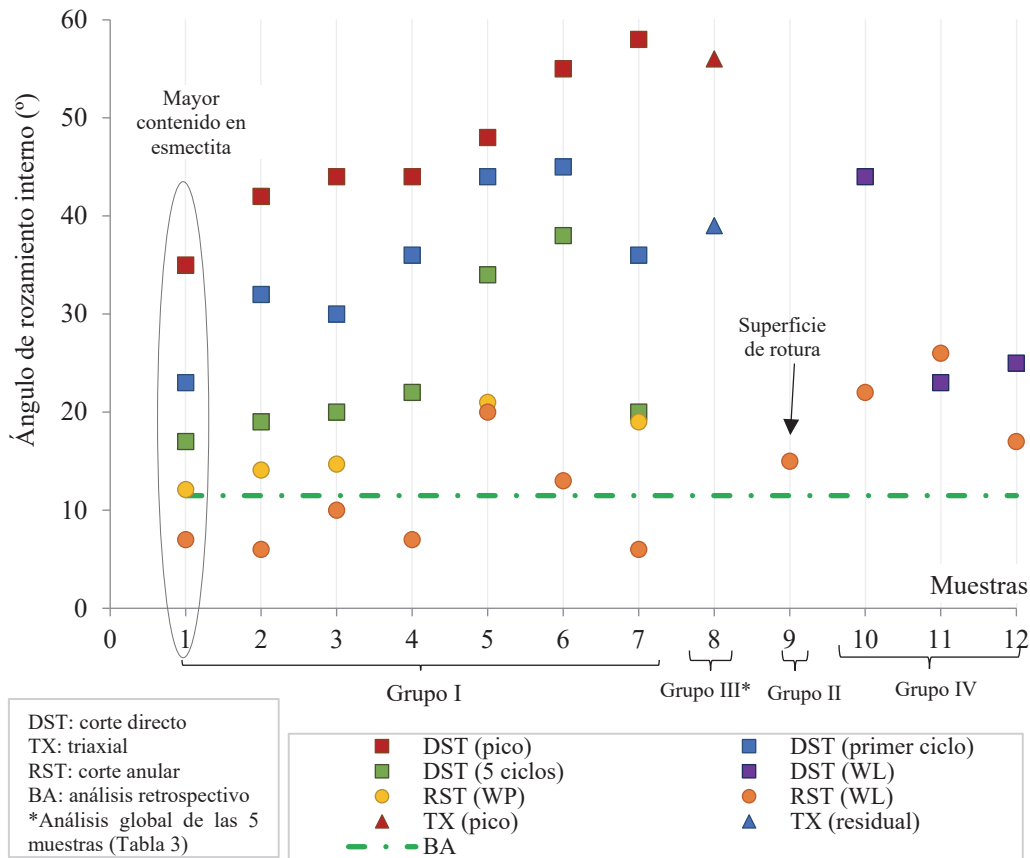


Fig. 19 – Valores de ángulos de rozamiento en función del ensayo y de la muestra.

dividido (ver Tabla 3). El hecho de que se ensayen las mismas muestras mediante los distintos métodos a comparar, como por ejemplo, las muestras 1 a 7 mediante cinco métodos distintos (DST pico, DST primer ciclo, DST 5 ciclos, RST WP y RST WL), proporciona mayor fiabilidad a los resultados.

Como puede verse en la Figura 19, las resistencias residuales alcanzadas en el ensayo de corte anular con muestras remoldeadas, tanto al límite líquido como al límite plástico, parecen ser las más próximas a los valores proporcionados por el análisis retrospectivo (10-11°) considerados como los más cercanos a la realidad de la rotura en campo. Sin embargo, los valores de pico y residuales (en el primer ciclo) obtenidos mediante el ensayo de corte directo difieren en gran medida de los indicados por el análisis retrospectivo (BA). Además, acorde a lo esperado, la muestra que presenta los menores valores de resistencia es la que contiene un mayor porcentaje de esmectita (Muestra 1 en la Figura 19 y en la Figura 8), según indican los resultados de los ensayos de DRX.

Asimismo, se incluye en la Figura 20 una representación adicional de los resultados obtenidos con las muestras del Grupo I, donde se aprecian claramente los rangos de ángulo de rozamiento obtenidos para cada tipo de ensayo y cómo los valores alcanzados mediante el ensayo de corte anular, tanto con muestras remoldeadas a la humedad del límite líquido, como con muestras remoldeadas a la humedad del límite plástico, son muy similares a los obtenidos en las roturas en campo para estos materiales (10-15°). Adicionalmente, se debe destacar que con algunas de las muestras remoldeadas a la humedad del límite líquido, el valor mínimo de ángulo de rozamiento obtenido mediante el ensayo de corte anular resultó ser de entre 6 y 7°. A este respecto, Cripps y Taylor (1981) y Moore (1991) asocian valores de entre 4 y 6° al rozamiento interno entre partículas de esmectita, en Arcillas Azules de Londres, por lo que parece razonable suponer que en estas condiciones de remoldeo y ensayo de las muestras se puede obtener el ángulo de rozamiento interno entre partículas arcillosas.

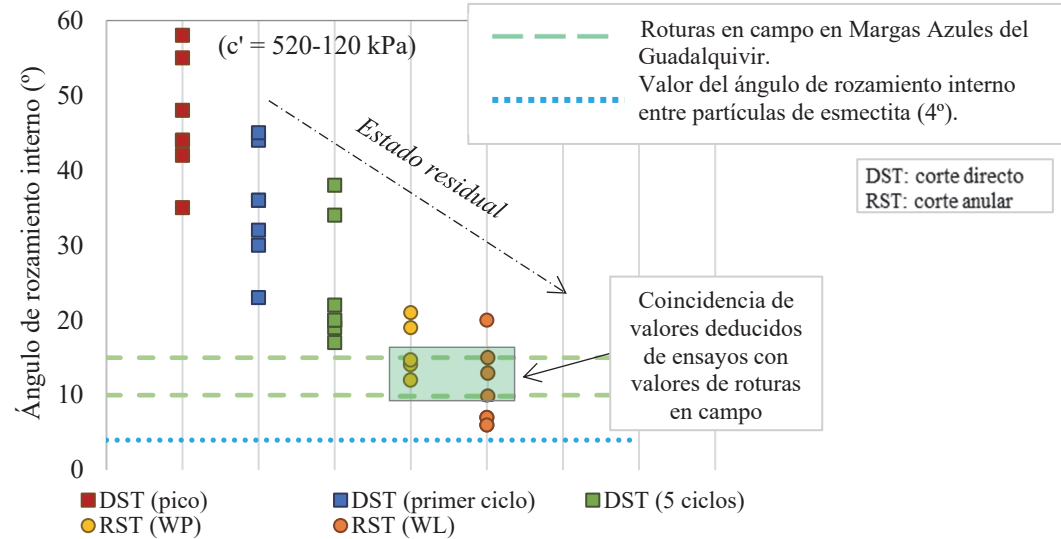


Fig. 20 – Resultados de los distintos métodos para hallar la resistencia al corte de las margas de estudio.

Como se venía comentando en los respectivos capítulos de cada ensayo y se ilustra en la Figura 20, existe una notable diferencia entre los valores obtenidos con los distintos ensayos de laboratorio o método dentro del mismo ensayo. Cabe pensar que, de manera general, el material

El análisis de la figura anterior permite realizar los siguientes comentarios:

- los valores de pico obtenidos en los ensayos de corte siempre sobreestiman los valores proporcionados por el análisis retrospectivo de deslizamientos en este tipo de materiales, calificados como suelo duro-roca blanda;
- en deslizamientos a través de planos de estratificación y de la matriz del suelo, los ensayos de corte directo en estado residual y con muestras inalteradas, permiten obtener ángulos de rozamiento similares a los derivados de los análisis retrospectivos;
- sin embargo, en deslizamientos a favor de planos de estratificación, los ensayos de corte directo sobre la superficie de rotura con muestras inalteradas y los ensayos de corte anular con muestras remoldeadas a la humedad del límite líquido, permiten obtener ángulos de rozamiento similares a los derivados de los análisis retrospectivos;
- como se podría esperar para la misma formación, se observa una buena correlación entre el estudio de Aznalcóllar y el actual, en cuanto a la disposición de los resultados de resistencia obtenidos mediante los diferentes métodos de ensayo empleados; en ambos casos el ángulo de rozamiento deducido en el análisis retrospectivo (BA) quedó ligeramente subestimado por los valores obtenidos en los ensayos de corte anular con muestras remoldeadas a la humedad del límite líquido;
- en el estudio presentado por Tsige (1998) se emplea un método de ensayo alternativo para averiguar la menor resistencia residual de las Margas Azules del Guadalquivir: ensayos de corte directo, con muestras sometidas previamente a 25 ciclos de humedad-sequedad en la misma caja de corte y, realizando 7 pasadas de corte. En la Figura 21 se puede apreciar que el ángulo de rozamiento obtenido con esta metodología es igual a 5°, y que es el menor de todos los presentados en el gráfico. Del mismo modo que ocurría con algunos de los valores derivados de los ensayos de corte anular con muestras remoldeadas a la humedad del límite líquido (Figura 20) este valor es equiparable a ángulos de rozamiento puro entre partículas arcillosas (Cripps y Taylor, 1981 y Moore, 1991).

Comparando únicamente los trabajos relativos a las Margas Azules del Guadalquivir, en la Figura 21, se puede observar que las muestras ensayadas por Tsige (1998) y por Alonso y Gens (2006), presentan menores resistencias de pico, debido probablemente a un mayor grado de alteración de las margas y un menor contenido en carbonatos.

Sin embargo, las margas empleadas en los tres estudios poseen principalmente los mismos minerales arcillosos predominantes, que juegan un papel fundamental en la resistencia residual de estos materiales. Por esta razón, los ensayos que no se realizan partiendo de una muestra intacta, es decir, los llevados a cabo en fisuras naturales, o con muestras disgregadas y remoldeadas a la humedad del límite líquido, o sometidas a 25 ciclos de humedad-sequedad, procurando un estado de alteración muy notable, ofrecen valores más próximos, considerados como los equivalentes al rozamiento entre los minerales arcillosos. Asimismo, Alonso y Gens (2006) realizaron ensayos de corte anular con muestras de margas marrones más alteradas que las presentadas en la Figura 21, obteniendo los mismos valores de resistencia al corte que con los ensayos en las muestras más competentes. Hecho que concuerda con que los resultados de ensayos de corte anular con muestras remoldeadas a la humedad del límite líquido, de los estudios considerados, sean muy similares, aunque la resistencia de la roca intacta de partida fuera muy dispar.

4.2 – Comparación del Índice de Fragilidad

Skempton (1964), Bjerrum (1967) y Bishop (1971) analizaron diferentes casos de deslizamientos ocurridos en arcillas sobreconsolidadas, observando que un factor importante en el desencadenamiento de estos mecanismos de rotura era la fragilidad de estos materiales, entendida como la diferencia existente entre la resistencia de pico y la residual.

A este respecto, con los resultados de los ensayos de corte directo, se ha calculado el índice de fragilidad (I_B), tal como lo propuso Bishop (1967). En la Figura 22 se ha comparado el índice de fragilidad del material de este estudio, con el de otras formaciones arcillosas inglesas, estudiadas por Bishop et al. (1971), y las propias Margas Azules del Guadalquivir, estudiadas por Alonso y Gens (2006) en el caso de la rotura de la presa de Aznalcóllar.

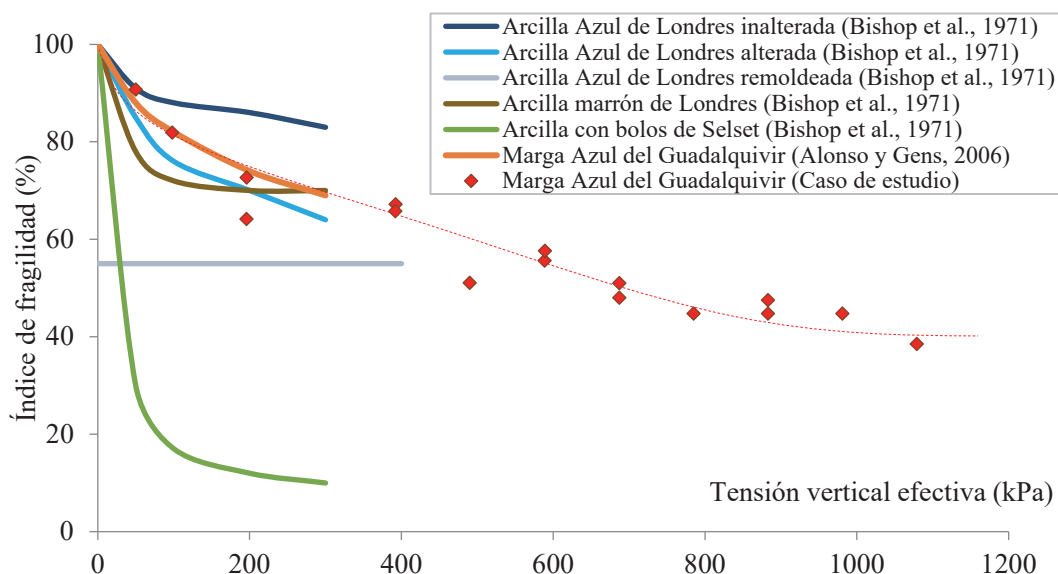


Fig. 22 – Comparación del índice de fragilidad de la formación de estudio con otros valores propuestos en la literatura.

La Figura 22 revela: a) una reducción del índice de fragilidad con el aumento de la tensión vertical aplicada; b) los valores obtenidos en este estudio concuerdan con los publicados para las Margas Azules del Guadalquivir en el caso de la rotura de Aznalcóllar y son similares a los valores deducidos para las Arcillas Azules de Londres alteradas; y c) debido a las elevadas tensiones aplicadas, se dispone de una información adicional de la variación del índice de fragilidad con la tensión vertical, deduciéndose una cierta asíntota alrededor del 40% para los materiales estudiados.

5 – CONCLUSIONES

Los deslizamientos en los que el mecanismo de rotura es el reblandecimiento de una capa de margas por humectación y la consiguiente generación de un plano de debilidad favorable, están claramente regidos por la resistencia residual del material.

Se ha visto que existen distintos métodos o ensayos para evaluar la resistencia al corte en laboratorio y que se obtienen valores de resistencia al corte muy diferentes, dependiendo del estado de la muestra (inalterado o remoldeado a una humedad u otra) y del hecho de que el ensayo evalúe la resistencia de la matriz del suelo, de una fisura preexistente, o del rozamiento entre los minerales arcillosos.

Con los resultados obtenidos en este estudio se ha concluido que el ensayo de corte anular con muestras remoldeadas a la humedad tanto del límite líquido como del límite plástico es el método más aproximado para averiguar la resistencia en rotura, entendida como la deducida de los ensayos retrospectivos de estabilidad. El ensayo de corte directo realizado con muestra inalterada tras varias pasadas o con muestra remoldeada a la humedad del límite líquido, también parece ofrecer

un resultado aceptable. Gracias a la comparación con otro estudio sobre el mismo material se ha podido corroborar que se puede alcanzar un estado de alteración muy notable de las margas sobreconsolidadas, mediante dos técnicas: a) sometiendo a las probetas a ciclos de humedad sequedad, y b) disgregando las muestras con mazo de goma y remoldeándolas al límite líquido. Se obtienen así ángulos de rozamiento muy bajos (5-6°), equivalentes al rozamiento puro entre minerales arcillosos, con predominancia de esmectita en los casos estudiados.

Como resultado del trabajo, se ha propuesto un nuevo procedimiento para el ensayo de corte anular para conseguir una menor expulsión de muestra durante el ensayo y una mejora en los resultados, basándose en las experiencias propias y en las normas ya existentes (EN ISO 17892-10:2018, ASTM D6467-06a y BS 1377: Part 7).

Por último, mediante los resultados de ensayos de corte directo se ha determinado el índice de fragilidad de la formación estudiada para las distintas tensiones normales aplicadas, destacando el hecho de que, gracias a las tensiones verticales efectivas muy elevadas utilizadas (casi 1000 kPa), se pudo constatar la existencia de un valor asintótico cercano al 40-50%.

6 – AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer especialmente a las siguientes personas del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX: a Mauro Muñoz, José L. Toledo y José. A. Casado por su colaboración y dedicación en la elaboración de los ensayos de corte, a María Santana por la realización de las fotografías y descripciones de las muestras, y a Rafael Rodríguez por la interpretación de los ensayos de fluorescencia y difracción de Rayos X.

7 – REFERENCIAS

- Alonso, E. (2005). *Parámetros de resistencia en cálculos de estabilidad*. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Valencia, pp. 1-65.
- Alonso, E. E.; Gens, A. (2006). *Aznalcóllar dam failure. Part 1: Field observations and material properties*. *Geotechnique*, 56 (3): 165-183.
- ASTM D6467-06a (2006). *Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA
- Bishop, A.W. (1967). *Progressive failure: with special reference to the mechanism causing it*. Panel discussion. *Proceeding Geotechnical Conference*. Oslo. Vol. 2. p. 152
- Bishop, A.W. (1971). *The influence of progressive failure on the choice of the method of stability analysis*. *Geotechnique* (Technical Notes), 21 (2): 168-172.
- Bishop, A. W.; Green, G. E.; Garga, V. K., Andresen, A.; Brown J. D. (1971). *A new ring shear test apparatus and its application to the measurement of residual strength*. *Geotechnique*, 21 (4): 273-328.
- Bjerrum, L. (1967). *Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales*. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div., ASCE*, 93: 3-49
- BS 1377-7:1990. *Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (total stress): 6. Determination of residual strength using the small ring shear apparatus*.
- Cripps, J. C.; Taylor, R. K. (1981). *The Engineering properties of mudrocks*. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, London, 14, pp.325-346.

- EN ISO 17892-10 (2018). *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 10: Direct shear tests*.
- Feda, J. (1992). *Creep of soils and related phenomena*. Elsevier, New York, 423 pp.
- Fernández Blanco, S. (1979). *Estudio de las propiedades geotécnicas de las Arcillas Azules del Guadalquivir con especial aplicación a la estabilidad de los taludes a largo plazo*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Galera, J. M.; Checa, M.; Pérez, C.; Williams, B.; y Pozo, V. (2009). *Caracterización de detalle de las margas azules del Guadalquivir mediante ensayos in situ y de laboratorio*. Ingeopres, 186: 16-22.
- González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación, 744 pp.
- ISRM (1981). *Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*. ISRM. Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.
- Kenney, T. C. (1977). *Residual strength of mineral mixtures*. Proceedings of 10th International Conference Soil Mechanics Fndn. Engineering, 1, pp 155-160.
- Moore, R. (1991). *The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays*. Geotechnique, 41 (1): 35-47.
- Olalla, C., Cuéllar, V. (2001). *Failure mechanism of the Aznalcóllar Dam, Seville, Spain*. Géotechnique, 51 (5): 399-406.
- Olson, R. E. (1974). *Shearing strengths of kaolinite, illite and montmorillonite*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 102: 2215-2229.
- Oteo, C. S.; García de la Oliva, J. L. (1995). *Contribución a la caracterización geotécnica de las margas españolas (versión española)*. Simposio “Craies et Schistes”, Bruselas.
- Oteo, C. S. (1997). *La inestabilidad de taludes y desmontes en el entorno de las obras lineales andaluzas*. IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Granada
- Oteo, C. S. (1998). *Las Margas Azules del Guadalquivir y la inestabilidad de taludes*. I Congreso Andaluz Carreteras, Granada.
- Skempton, A.W. (1964). *Long-term stability of clay slopes*. Géotechnique, 14: 77-101.
- Stark, T. D.; Vettel, J. J. (1992). *Bromhead Ring Shear Test Procedure*. Geotechnical Testing Journal, 15: 24-32
- Tsige, M. (1998). *Microfábrica y mineralogía de las Arcillas Azules del Guadalquivir: Influencia en su comportamiento geotécnico*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Tsige, M; González de Vallejo, L.; Oteo, C. (2001). *Mecanismo de alteración de arcillas margosas sobreconsolidadas y su relación con las propiedades ingenieriles*. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Pp. 163-175, Vol. 1. 27-30 de Noviembre de 2001, Madrid.
- Zhang, M.; Yueping, Y.; Ruilin, H.; Shuren, M.; Yongshuang, Z. (2011). *Ring shear test for transform mechanism of slide-debris flow*. Engineering Geology, 118: 55-62.