

Las margas azules del Guadalquivir y la inestabilidad de taludes



Figura 1. Clasificación de materiales margosos españoles (Oteo y García de la Oliva, 1995).

POR CARLOS S. OTEO
DR. INGENIERO DE CAMINOS
CANALES Y PUERTOS

1.- Introducción

Una de las formaciones más características del sur de España es la constituida por las llamadas "Margas azules" del Guadalquivir, que vienen a ocupar todo el valle del río del mismo nombre y las zonas de influencia laterales, extendiéndose (con el mismo nombre u otro similar) por las provincias

de Córdoba, Sevilla y Huelva, por un lado, y, por otro, hacia Jaén (todas las llamadas Lomas de Úbeda hasta Villacarrillo) y Granada (donde formaciones similares aparecen en la carretera Jaén-Granada, como la formación Mitagalan). Con coloraciones ya más grisáceas y algo más carbonatadas, aparecen materiales relativamente similares en la zona entre Málaga y Marbella. También se conocen como la formación "Arcillas de Gibralfaró" (Huelva) y la "Formación Écija" (Sevilla), como indica Tsigé (1998).

Se trata de una formación

miocena, de aspecto margoso, cuya coloración varía. Las zonas más sanas son grises-verdosas y a veces grises-azuladas, que tienen un cierto brillo azulado a la luz del cálido sol andaluz, por lo que han venido a llamarse "margas azules". Pero muchas veces presentan coloraciones pardas (incluso en diversos tonos), debido a la oxidación que han experimentado, sobre todo en las zonas más superficiales (15 - 25 m de recubrimiento superior). Y, sobre todo, no son margas propiamente dichas, ya que su contenido en carbonatos es bajo: del orden del 8 al 15%.

expresado como contenido de CO_2 . Geológicamente las "margas azules", de origen marino, pertenecen al Tortonense y constituyen un conjunto de sedimentos postorogénicos que corresponden a la llamada Unidad Autóctona de la Depresión del Guadalquivir (una de las cinco grandes unidades geológicas en que se divide Andalucía). Forman el principal relleno de dicha depresión.

Las margas azules del Guadalquivir se depositaron como resultado de una transgresión relacionada con los últimos hundimientos de la cuenca. La época de su sedimentación culmina con una regresión hacia el Andalucense, en la que se depositó la llamada serie de transición.

En sentido geotécnico, dichas "margas" deben calificarse como de arcillas rígidas, algo margosas, fisuradas y que pueden alcanzar resistencias a compresión simple de 600 a 3 000 kPa, lo que —como mucho— podría hacer que se clasificaran como un suelo duro o una "roca" muy blanda.

Su masa está surcada por abundantes macrofisuras de dos tipos: a) Las más abundantes son, realmente, discontinuidades de sedimentación, rellenas a veces de una capa de limos de décimas de milímetro de espesor, que rompen su continuidad y la cohesión de su masa; b) "Slickensides" o superficies lustradas, transversales a las anteriores o fisuras, fruto de posibles movimientos tectónicos o deformaciones inferidas en la masa de las "margas" en el desplazamiento de los mantos de corrimiento, tan frecuentes en las zonas béticas.

En la zona Norte de la Depresión del Guadalquivir se disponen casi horizontalmente, con bastante continuidad lateral, ya que descansan sobre la unidad "Facies del Mioceno transgresivo", constituyendo con ella una serie monoclin

En sentido geotécnico, dichas "margas" deben calificarse como de arcillas rígidas, algo margosas, fisuradas y que pueden alcanzar resistencias a compresión simple de 600 a 3 000 kPa

normal. Pero al sur sus contactos con las formaciones están trastocados, ya que, al depositarse sobre los materiales más antiguos, se deslizan hacia el norte los mantos de corrimiento subbéticos, por lo que, allí, están más fisuradas y presentan más "Slickensides".

La pendiente natural de los afloramientos de margas azules varía entre el 10 y el 14%, superando rara vez el 20%, valores condicionados por la erosión del agua y por su acción inestabilizante en las fisuras (abiertas en las épocas de sequía), fenómeno al que ayuda el carácter expansivo de la formación, debido a la presencia de esmectita. Lo usual es que las pendientes naturales estables tengan una inclinación máxima de 8,6° y 9,5° (Fernández Blanco, 1979).

El conjunto de minerales que predominan en las margas azules son los filosilicatos (> 60%),

los carbonatos representados por la calcita (15-25%, expresado como CO_3Ca , como se deduce de lo que ya hemos indicado) y el cuarzo (<10%). Los feldespatos están presentes como indicios, aunque a veces llegan al 5%. También hay que señalar la presencia accesorial de dolomita, yeso y óxidos, en cantidades poco cuantificables. En cuanto a los minerales arcillosos están presentes la esmectita (> 50%), la illita (36-40%) y la caolina (4-12%) (Tsigé, 1998). Todo ello confirma el carácter arcilloso, y no margoso, en la formación.

2.- Propiedades generales de las "margas azules"

Dentro de la clasificación de materiales arcillo-margosos establecida en 1995 por Oteo y García de la Oliva, se consideran cuatro grupos (figura 1):

- Grupo A. Arcillas duras, algo arenosas, con bajo contenido de carbonatos: Se trata de materiales arcóscos pliocenos y miocenos, procedentes de la alteración de rocas graníticas y gnéissicas, con posterior preconsolidación y cementación. Se presentan en la meseta Central y constituyen el grupo menos margoso (p.e., los "toscos" de Madrid).

TABLA 1							
PROPIEDADES GENERALES DE LAS FORMACIONES MARGOSAS DE ESPAÑA (Oteo y García de la Oliva, 1995)							
Formación	Descripción	CO_2 (%)	SO_4 (%)	Pasa por N° 200	Límite líquido	Resistencia a compresión simple (kPa)	Riesgo de expansividad
A	Arcillas y arcillas arenosas (sedimentos arcóscos, "toscos")	0-7	<0,1	50-90	30-50	100-800	Bajo-Medio
B	Arcillas margosas ("margas azules, etc.")	= 12	<2,3	70-95	40-65	500-3 000	Bajo-Alto
C	Margas arcillosas y margas yesíferas ("Peñuelas", etc.)	<1	0,1-40	80-95	40-80	2 000-10 000	Medio-Alto
D	Margas cementadas y margas calcáreas	5-25	<1	80-99	50-80	> 10 000	Medio-Alto

• Grupo B. Arcillas muy rígidas, con contenido apreciable de carbonatos (20 - 30% de CO_2Ca), que permite calificarlas de arcillas margosas; con coloraciones azules, marrones y verdosas cuando están sanas, pasando a pardo y marrón al estar alteradas. Tienen estructura lamosa y se encuentran en el valle del Duero, valle del Guadalquivir, norte de Granada, etc.

• Grupo C. Materiales margo-arcillosos tableados y duros, situados en el centro, nordeste y sur de España, asociados con depósitos terciarios lacustres, con coloraciones grisáceas y verdosas (materiales miocenos), pero que pueden tener zonas blanquecinas (yeso) y coloraciones irisadas (Keuper).

• Grupo D. Formaciones cementadas y encostradas, margas calcáreas y margas areniscas, con mayor contenido de carbonatadas (10 - 50% de CO_2Ca), como los materiales pliocénicos de Huelva y Cádiz.

Las "margas azules" corresponden al Grupo B, y algunas de sus propiedades tipo pueden verse en la tabla nº 1 de la página anterior, junto con las de los otros grupos de materiales arcillo-margosos, a fin de establecer un panorama comparativo. Puede apreciarse que las "margas azules" tienen unos límites de Atterberg

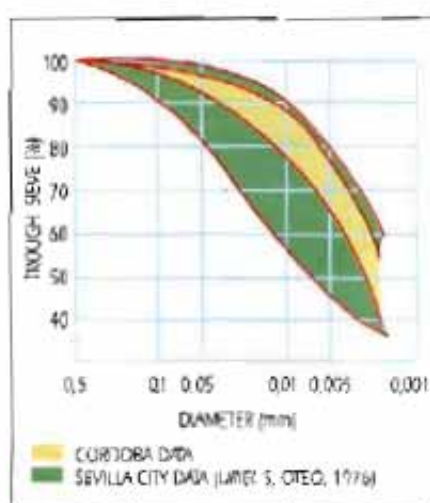


Figura 3. Granulometría de las arcillas azules. (Oteo y Sola, 1993).

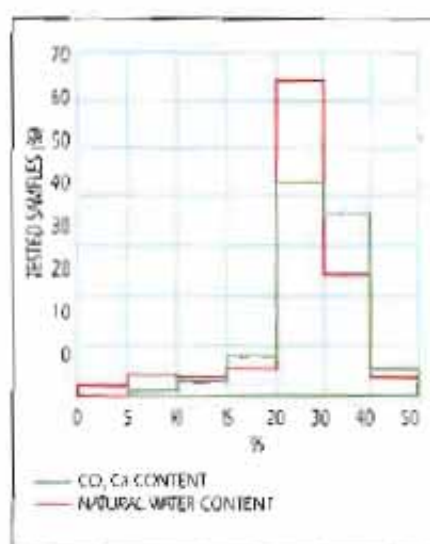


Figura 4. Contenido de humedad y de carbonatos en muestras de Sevilla y Córdoba (Oteo y Sola, 1993).

propios de arcillas de plasticidad media a alta (figura 2), con un contenido de finos dominante (70 - 95%). Como puede verse en la figura 3, esta granulometría tiene ciertas variaciones, según hemos comprobado con muestras procedentes de Sevilla y Córdoba, aunque no muy significativas. Las muestras de Córdoba tienen mayor contenido de finos (figura 3) y son algo más plásticas (figura 2), lo que les lleva a alcanzar límites líquidos de algo más de 70 y con límites de retracción del 14 al 18%.

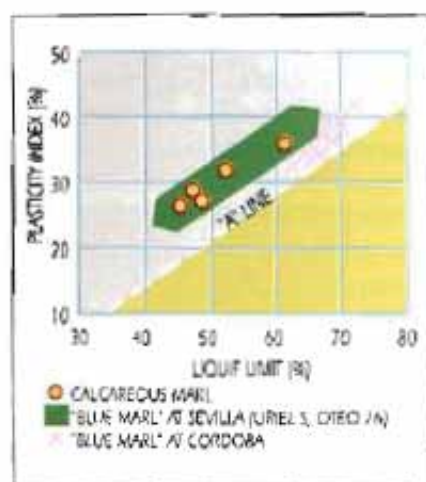


Figura 2. Plasticidad de las arcillas azules (Oteo y Sola, 1993).

En lo que se refiere al contenido de sulfatos, no suele ser muy elevado (alrededor de 0,15%) aunque en algunas muestras -del orden del 10%- este valor es muy inferior y apenas se manifiestan indicios. Sin embargo, el contenido de carbonatos, como ya se ha indicado, es más importante. Su distribución, expresada en tanto por ciento de carbonato cálcico, puede verse en la figura 4, en la que se aprecia que más del 80% de las muestras suelen contener entre el 20 y el 30% de CO_2Ca , lo cual muestra que el apelativo de "marga" no es precisamente el más adecuado. Cabe indicar que en el seno de la formación aparecen, a veces, capas (de 20 a 30 cm de espesor) más carbonatadas, con 80 - 85% de carbonato cálcico, seguramente procedentes de etapas en que, durante la sedimentación, se produjeron cambios climáticos, aumento de evaporación y, con ello, concentración de sales.

La humedad natural varía, generalmente, entre el 20 y el 40%, aunque se acumula principalmente entre el 20 y el 25% (en más del 60% de los casos). La densidad seca oscila entre el 1,56 y 1,73 t/m^3 , con valores medios representativos del orden de 1,65-1,68. El valor de la humedad es inferior o cercano al límite plástico.

Recientemente en su tesis doctoral -de la que el autor de estas páginas ha sido codirector- la Srta. Meaza Tsige (1998) ha estudiado detalladamente la fábrica y microfábrica de esta formación. Esta microfábrica es de tipo floculado y de organización más bien al azar, lo que corresponde a una matriz arcillosa y densa (originada por el estado de sobreconsolidación del sedimento). Se trata de una microfábrica de transición entre el panel de

abeja y la turbostrática, con agregados regulares y estables, conectores de corta distancia y microporos interdominios e integrados. Pero, dentro de esa masa relativamente continua, se han identificado una gran cantidad de microdiscontinuidades, de origen diverso:

- La reorientación local de las arcillas, tanto por origen formacional como geodinámico (consolidación, acción agua-arcilla y deformación mecánica).

- Las fisuras, que pueden ser de origen sedimentario o producto de la relajación de tensiones internas y grietas de retracción (y en menor grado, de la rotura por interacción química, por ejemplo, por oxidación de las piritas que pueden existir en la masa de la formación y crecimiento de cristales de yeso).

La modificación y alteración de la microfábrica da lugar a relajación de tensiones, desarrollo de fisuras, oxidaciones, destrucción de contactos geométricos y disgregación, etc. Todo ello puede dar lugar a un perfil de meteorización como el de la figura 5, con las características de microfábrica que aparecen en la figura 6.

Esta evolución de la formación (sedimentación → consolidación → deformación mecánica por expansión, tectónica y deslizamiento interno con formación de "Slickensides" → meteorización física) es lo que explica, en definitiva, la respuesta mecánica frente a la acción ambiental y humana, y condiciona las propiedades geotécnicas tenso-deformacionales.

Por ejemplo la expansión (presiones de hinchamiento medidas de hasta 400-500 kPa, pero que, excepcionalmente llegan a 900 kPa), está muchas veces limitada tanto por la presencia de carbonatos y su carácter cementante como

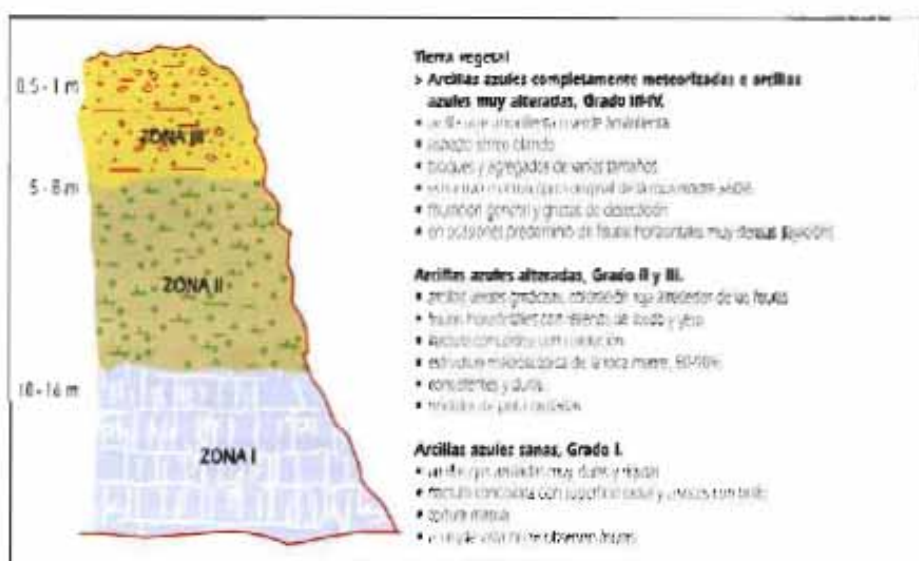


Figura 5. Perfil esquemático del grado de meteorización de las arcillas azules y rasgos distintivos a macroescala.

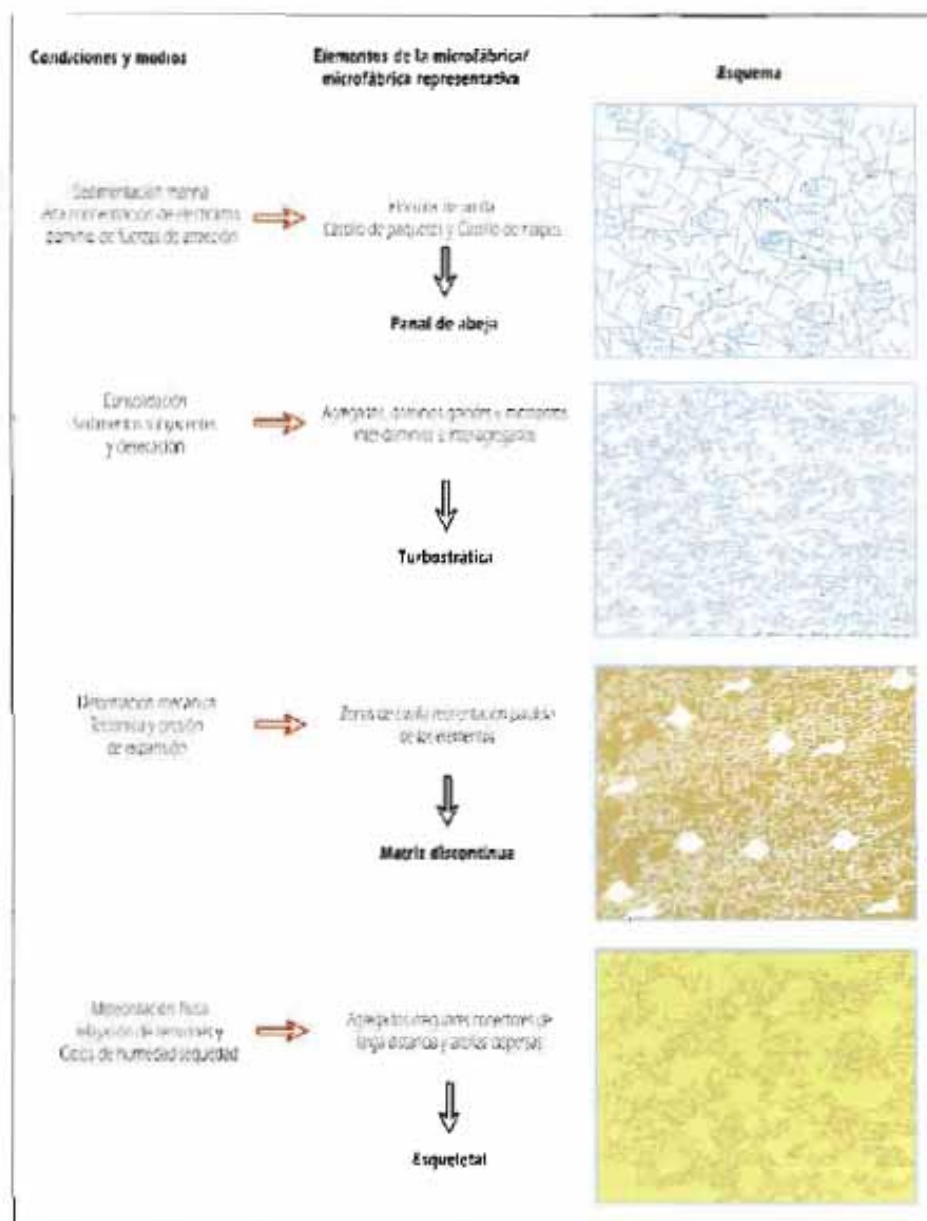


Figura 6. Esquema de evolución de la microfábrica de las arcillas azules relacionado con su historia geológica (Tsigé, 1998).

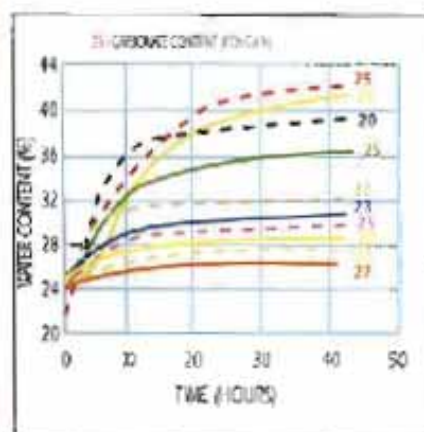


Figura 7. Absorción de agua de muestras cordobesas en cámara de saturación (Oteo y Solo, 1993).

por el estado floculado de las arcillas y la carga laminar relativamente alta entre cristales. Sin embargo, la abundancia de microdiscontinuidades en la masa arcillosa permite la expansión en los huecos interdominios e interagregados, por separación de bloques dentro de la masa.

La capacidad de absorción de agua es clara, como la muestran los ensayos reproducidos en la figura 7, desde humedades iniciales del 22-25%, hasta situaciones finales del 26 al 42%. Dado que el grado de saturación inicial suele ser del 60-65%, en muchos casos el mantener muestras en cámara saturada no permite la saturación total (debido a la presencia de esas masas continuas de arcilla, el agua penetra más fácilmente por fisuras y huecos interagregados, pero más difícilmente a través de las masas de bloques arcillosos o agregados). Cuando se dejan secar al aire inmediatamente se producen retracciones y fisuras verticales y horizontales, tanto en laboratorio como en la superficie de taludes naturales, lo que facilita la penetración de la desecación en el interior durante sequías y también de las posibles afluencias de agua durante épocas de lluvia. Estos fenómenos vienen facilitados

por el clima semiárido que predomina en la Depresión del Guadalquivir, con duraciones de sequías entre 4 y 6 años y con fuertes aportaciones de agua al final de estos periodos.

En lo que se refiere a la deformabilidad hay que indicar que la toma de muestras suele alterar la microfábrica, puesto que la liberación de tensiones implica rotura en los enlaces entre agregados y entre los bloques arcillosos, por lo que, normalmente, el material que se ensaya en laboratorio pierde parte de sus cualidades de material preconsolidado y cementado. Así, resulta que el índice de compresión, C_c , medido en laboratorio puede tomarse como:

$$C_c = 1,35 \cdot W^{2,09}$$

siendo W el contenido de humedad natural, mientras que el módulo edométrico medio en carga (intervalos de 400 a 600 kPa), resulta ser de unos 25 000 kPa (valor que sube a 45 000 kPa en descarga), como indican Uriel y Oteo (1976).

Estos valores resultan bajos para una formación como ésta, aunque son ligeramente inferiores a los obtenidos en ensayos triaxiales drenados (hasta 35 000 kPa para confinamientos laterales de 250 a 450 kPa). Y ello se debe a la alteración de muestras antes comentada, por lo que hay que acudir a ensayos *in situ* para evaluar mejor su deformabilidad. En ese sentido, con ensayos de placa de carga hemos medido módulos de deformación verticales entre 500 y 2 100 MPa y horizontales del orden de 70 MPa, lo que parece algo más real. En decompresión y extensión, como hemos podido comprobar midiendo asentamientos inducidos por túneles excavados en arcillas azules, el módulo de deformación puede ser del orden de 30-35 MPa.

En lo que respecta a la resistencia al corte (aspecto más im-

portante que estudiar, ya que la deformabilidad de la masa de arcillas azules es baja), cabe señalar que los resultados de ensayos de corte directo en laboratorio muestran curvas tensión tangencial-desplazamiento típicas de materiales frágiles, con una rigidez inicial alta (normal en suelos duros y de comportamiento casi elástico), debida a la estructura densa (microfábrica turbostrática), a la presencia de agregados grandes y a la de carbonatos que rigidizan el esqueleto sólido. Se alcanza, así, una clara resistencia de pico, a bajo desplazamiento (a 2-3% del lado de la caja de corte). Pero, a continuación, la resistencia baja claramente hasta alcanzar un valor residual bajo (del 25-30% del valor de pico).

Si se realizan ensayos de compresión uniaxial y triaxial, en primer lugar cabe indicar que la influencia de la fisuración a escala natural es muy pequeña (es difícil que una probeta se mantenga entera si se talla con una fisura en su zona central). Por ello y si, además, sólo se aplica el desviador en una primera fase de carga monótona creciente —como es habitual— el ensayo sólo afecta a la masa, más o menos continua, de arcilla y no influye apreciablemente en las microdiscontinuidades, sobre todo teniendo en cuenta la coacción lateral de la presión de célula en compresión triaxial.

Por eso, en los ensayos triaxiales no se aprecia una diferencia notable entre resistencia de pico y resistencia con gran deformación (apenas hay un 10-15% de disminución de resistencia). En estas condiciones se pueden obtener parámetros de resistencia al corte elevado:

- Ensayos de compresión simple: a) Sevilla 200 a 1 400 kPa (Uriel y Oteo, 1976). b) Cerca de Sevilla: 500 a 3 000 kPa (Uriel, 1976). c) Córdoba:

150 a 1900 kPa (Ayala, 1978), etc.

• Ensayos triaxiales sin drenaje: a) Cohesiones de 125 a 280 kPa. b) Rozamientos internos de 11 a 18°.

• Ensayos triaxiales drenados: a) cohesiones efectivas: 0-115 kPa. b) Rozamientos efectivos de 18 a 41° (valores más representativos: $C' = 20$ a 60 kPa, $\phi' = 25-30^\circ$).

Como se aprecia, los ensayos de compresión simple, además de una enorme dispersión (efecto de la toma de muestra, ensayo de materiales con diferente grado de alteración, muestras más carbonatadas, etc.), dan cohesiones sin drenajes de 3 a 5 veces más altas que los ensayos triaxiales sin drenaje, quizás debido al efecto de la fisuración y microfabricación, que se manifiesta más claramente en los ensayos de corte con gran desplazamiento, como hemos indicado antes.

Esta disminución de resistencia entre pico y residual en ensayos de corte directo se explica por el fenómeno de dilatación y reblandecimiento que se va produciendo al alcanzar la resistencia máxima y a la reorientación de los minerales arcillosos en dirección del esfuerzo tangencial aplicado con gran deformación.

Esta diferencia entre la resistencia residual y la de pico queda clara a través del índice de fragilidad de Bishop, I_f . En la figura 8 pueden verse algunos resultados de materiales ingleses (publicados por el propio Bishop) y otros de las arcillas azules publicados por Oteo y Sola (1993). En este último caso, el índice I_f , después de dos ciclos de esfuerzo tangencial en aparato de corte directo, varía entre 0,5-0,7; pero, si se realizan 10 ciclos (forma habitual de determinar prácticamente la resistencia residual), el índice baja a 0,2-0,4, lo que da idea de la fragilidad del material y de

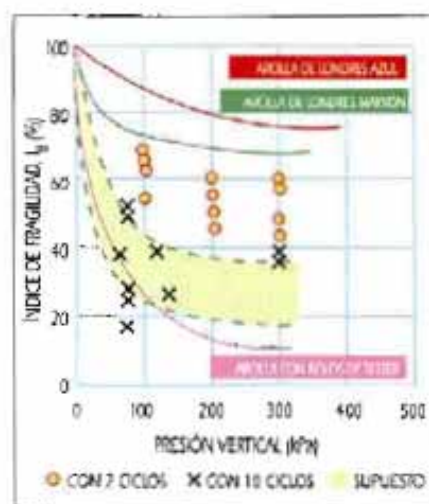


Figura 8. Índice de fragilidad deducido de ensayos de corte directo (Oteo y Sola, 1993).

En el caso de las arcillas azules, la resistencia residual es de vital importancia

la influencia de las microdiscontinuidades con las grandes deformaciones, puesto que, en estas circunstancias, se está midiendo la resistencia de esa discontinuidad.

En el caso de las arcillas azules, la resistencia residual es de vital importancia, ya que es la resistencia efectiva de estos materiales, puesto que es la de las discontinuidades, de las zonas de cizalla y de las zonas de reorientación de arcillas y fisuras. Precisamente la resistencia residual es la que se alcanza tras la reorientación completa de los minerales de arcilla y rotura de los fragmentos y agregados que afectan a la superficie de rotura.

De los ensayos de Uriel y Oteo (1976), Oteo y Sola (1993) y Tsigé (1998) pueden darse los siguientes resultados:

• Cohesión efectiva: a) De pico: 12-30 kPa; b) Residual: 2,5-15 kPa.

• Rozamiento interno: a) De pico: 23-30°; b) Residual: 12-15°.

Estos parámetros residuales son claramente inferiores a los de pico y, sin embargo, cada uno desempeña un papel diferente, según el problema del que se trate.

Si se trata de diseñar un pilote excavado *in situ*, en el seno de las arcillas azules, generalmente realizado con poca decompresión del medio y que trabajará en unas condiciones claras de constricción lateral, los parámetros que gobiernan el tema son más los efectivos de pico (o los de ensayos triaxiales, o sea $\phi' \approx 25-30^\circ$, $C' \approx 50-100$ kPa) o los obtenidos a corto plazo (cohesión sin drenaje, C_u , del orden de 500-100 kPa, con rozamiento nulo). Sin embargo, si se trata de problemas de estabilidad de taludes, en que la arcilla suele estar meteorizada o alterada en los primeros metros, en que las fisuras están más abiertas en sequía y dejan penetrar el agua, en que se han producido —a lo largo de los años— innumerables ciclos de cambio de volumen y acción erosiva, los parámetros serán los residuales ($C_r' = 5-10$ kPa y $\phi_r' = 12-15^\circ$).

3.- Problemas de inestabilidad de taludes

La acción continuada del tiempo (ciclos de sequía-lluvias cortas, pero intensas) ha ido conformando un paisaje suave en la superficie de las "margas azules" de la Depresión del Guadalquivir, de tipo alomado, con pendientes del orden de los 8-10°, como antes hemos indicado. En algunos taludes naturales entre 10 y 14° se ven signos de inestabilidad y en los de inclinación superior a 14° siempre se ven claros signos de

inestabilidad. Muchas veces estos signos se aprecian en los cultivos existentes (generalmente, olivos) o precisamente en la falta de éstos. Destacan, a veces, claros en el cultivo del olivo, correspondientes a zonas inestables, en que los movimientos superficiales del terreno acabar rompiendo las raíces de los árboles y secándolos. A veces, se aprecian agrietamientos superficiales que se desarrollan más de 200-300 m en la dirección de la pendiente de la ladera.

Si se hace un somero análisis considerando un talud indefinido y con resistencia residual, su saturación hace que sean inestables para inclinaciones del orden de 10-12°, lo que está de acuerdo con lo observado.

Se han registrado numerosos problemas en taludes con inclinaciones 1(V): 2,5 (H) hasta 1(V): 3(H) e incluso con 1(V): 4(H), en condiciones de sequía. Por ejemplo, al abrir las excavaciones para la Autovía de Andalucía, cerca de Villa del Río (Córdoba) se produjeron inestabilidades en taludes con alturas de 6 m a 15 m (e inclinaciones 1(V): 2,5 (H) y 1(V): 3 (H), respectivamente) unos tres meses después de ser abiertos los taludes de desmonte, dejando su superficie (arcilla alterada, grado III-IV de la figura 5) sin ninguna protección y expuesta a la acción ambiental veraniega (Oteo y Sola, 1993). En otros casos (por ejemplo, en Mengibar, Jaén) taludes muy inclinados (1(V): 4 (H)), en época seca, también han tenido problemas. En estos casos han jugado importancia tanto la presencia de "stickensides" en la parte alta del talud, como la macro y microfisuración de las arcillas, conduciendo a roturas entre planas y biplanas.

Del análisis retrospectivo de estos problemas se dedujo, en

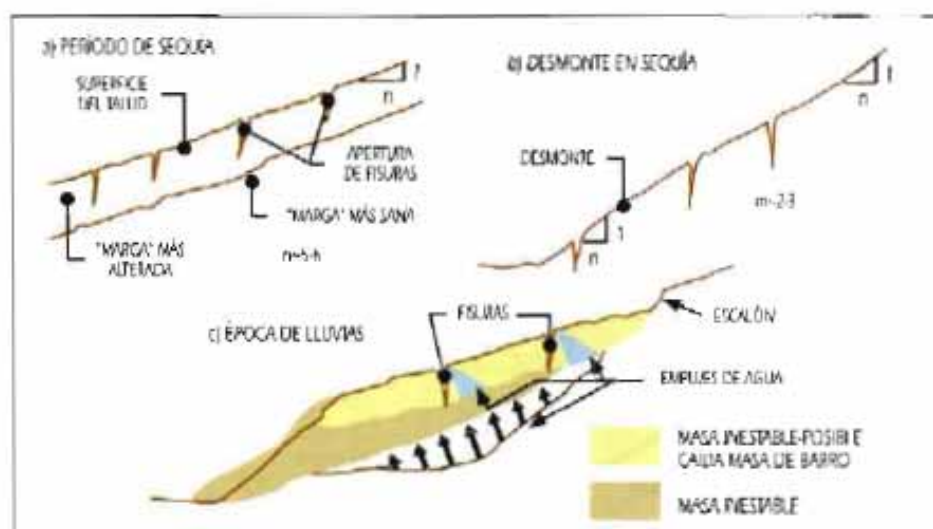


Figura 9. Esquema de posible efecto del agua sobre un desmonte en arcillas andaluzas. (Oteo, 1997).

su día, que los parámetros que habían regido la rotura eran los de tipo residual ($C_r = 2-15$ kPa y $\phi'_r = 12$ a 14°), tanto por las razones expuestas como por el hecho de que siempre la superficie de los desmontes (al estar tan inclinados y ser sólo un poco más verticales que los taludes naturales) está en zona inicialmente alterada.

Debido a la presencia de fisuras y de esmedititas, en época de sequía las arcillas azules abren claramente fisuras verticales y horizontales, con lo que la resistencia del conjunto, superficialmente, es muy baja. Por ello puede haber problemas en seco. Si, además, se producen fuertes lluvias (las últimas fueron las de finales de 1996 y de 1997), el agua puede penetrar por las fisuras en la masa, embarrar el conjunto arcilloso y presionar a través de las fisuras, produciendo deslizamientos casi paralelos a la superficie, pero que pueden ser muy largos y que suelen dar lugar a un movimiento en forma de masa o colada de barro (figura 9). Para eso no hacen falta grandes precipitaciones. No se trata de saturar toda la masa de arcilla desde el pie de talud hacia el interior del terreno y la cabeza del talud arriba, sino desde la

superficie del talud hacia el interior del terreno (unos pocos metros más abajo). Y, por eso mismo en estas formaciones (y otras como las lilitas y esquistos malagüides del sur de España) no se cumplen los criterios de Lumb (1975) o de Onodera y otros (1974), que relacionan la intensidad de lluvia mensual con la diaria o quincenal. En ese sentido hemos modificado estos criterios para adaptarlos a nuestro país. En la figura 10 de la página siguiente se muestra este criterio, y en él se han representado diversos datos (Urbano, 1998), correspondientes a varias zonas (Torre-Alhaquime, en Cádiz; Torres, en Jaén, y Priego de Córdoba) en que se produjeron problemas de inestabilidades en el invierno 1996-97, época en que las precipitaciones superaron la media anual de los últimos 20 años en un 55-140% (concretamente, en el mes de diciembre de 1996 las precipitaciones variaron entre 128 y 640 mm en Andalucía).

En la figura 11 pueden verse las fronteras entre taludes estables e inestables en las arcillas azules y materiales similares, así como una línea media recomendada para desmontes estables (Oteo, 1997), deduci-

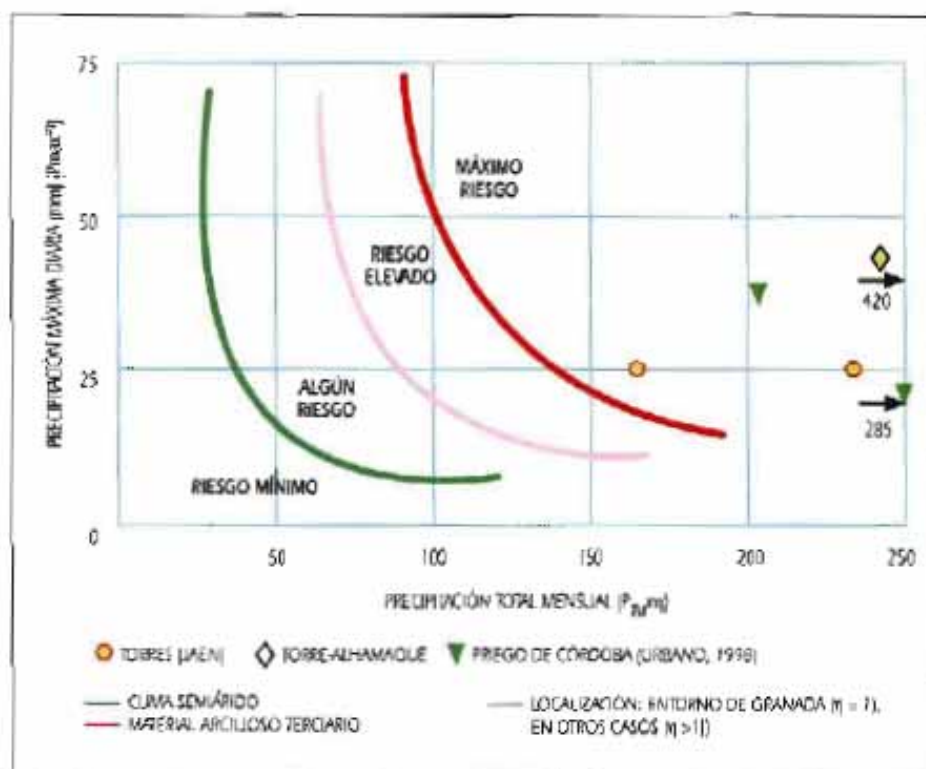


Figura 10. Esquema de un posible criterio de riesgo de inestabilidad de taludes para suelos arcillosos andaluces.

da a partir de diversas observaciones reales, que deben tomarse como indicación y que, siempre, deben completarse con labores de drenaje del talud.

En el capítulo siguiente, para completar esta visión de los problemas de taludes en arcillas azules, se describen dos

ejemplos concretos, correspondientes el primero a un desmonte en Jaén y los restantes a las Lomas de Úbeda, bien conocidas –entre otros motivos– por los problemas de inestabilidad.

5.- Tramo hacia el p.k. 23,400 de la autovía de Bailén-Jaén

El tramo en cuestión, entre los P.K. 23,200 y 23,600, discurre por el tramo medio-alto de la ladera Este del Cerro de las Fuentes, que está situado en la margen izquierda del río Guadalbullón. Entre este último y la nueva autovía, pasa la antigua carretera N-323 y la vía del ferrocarril.

El estudio geotécnico para el proyecto indica que el terreno afectado por las obras es de edad Mioceno Superior, y está compuesto por arcillas margosas con intercalaciones mino-

ritarias de areniscas, poco cementadas. Todo el conjunto está muy tectonizado. Las arcillas margosas, además de muy fisuradas, presentan plasticidad y potencial expansivo altos dentro de los valores que antes hemos citado. Más detalles pueden verse en Quesada y otros (1998).

En los taladros de los sondeos se comprobó la existencia de agua, con niveles piezométricos estabilizados a profundidades entre 2,5 y 7,5 m desde la superficie. Además, en consonancia con el nombre del cerro, se observaron manantiales en la ladera y filtraciones de agua en algunas calicatas de exploración. Todo ello confirma la existencia de un acuífero bien establecido, fluyendo hacia el río, comprendiendo quizás varios acuíferos colgados a favor de las intercalaciones arenosas, o zonas más fisuradas de las arcillas margosas.

El tramo en cuestión discurre íntegramente en desmonte, con varios taludes con pendientes desde 1 V : 2 H a 1 V : 3 H y altura media-alta (hasta unos 25 - 35 m).

En varios de los desmontes, cuando la excavación alcanzó unos dos tercios de su altura total prevista, aparecieron síntomas claros de inestabilidad consistentes en: a) Grietas longitudinales generalizadas a diversas alturas de la superficie del talud, y en el escarpe por detrás de la coronación. b) Deslizamientos locales afectando al pie excavado y hasta alturas intermedias en la superficie del talud. Además, pese a tratarse de una época sin lluvias (junio 1994), se observaron en las zonas inestables tanto rezumes de agua en las fisuras y grietas, como tramos de arcillas margosas muy húmedas en las masas deslizadas.

El análisis retrospectivo de las zonas inestables puso de manifiesto unas condiciones

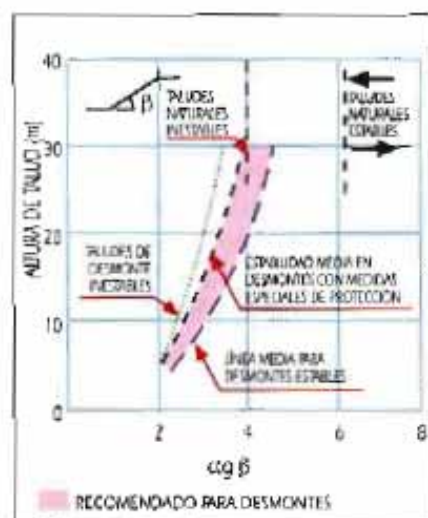


Figura 11. Estabilidad de taludes naturales y de desmonte en las "Margas azules" y materiales similares (Oteo, 1997).

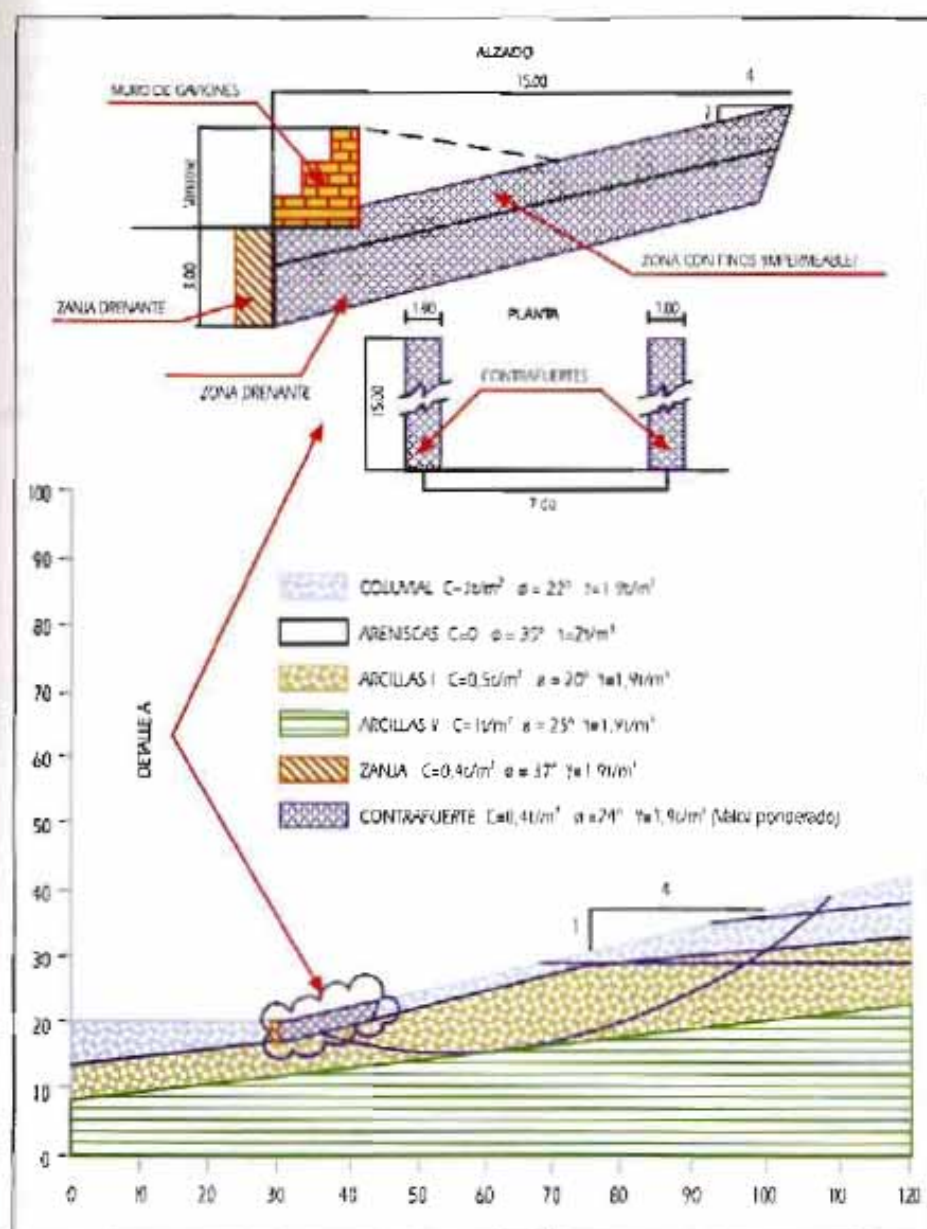


Figura 12. Perfil transversal en p.k. 23+440 (autovía Bailén-Jaén) con medidas estabilizadoras (Quesada y otros, 1998).

cercanas a la rotura no muy profunda, pero de importante desarrollo superficial. Debe resaltarse la existencia de:

- Una capa superficial, muy alterada, de arcillas margosas, de hasta 15 m de espesor, con resistencia a corte muy baja, próxima a su valor "crítico" ($c' = 0,5 \text{ t/m}^2$; $\Phi' < 20^\circ$).
- Un nivel freático muy alto, a menos de 2 - 3 m bajo la superficie del talud.

La medida de suavizar la pendiente, reduciéndola hasta 1 V: 3 H ó 1 V: 4 H, según la altura, resultó insuficiente, pues el factor de seguridad, si

bien se incrementaba, se mantenía por debajo de 1.20, incluso después de elevar la rasante inicial 5 a 10 m para disminuir la altura de los taludes.

Fueron necesarias, pues, medidas adicionales para conseguir tanto el descenso del nivel freático, como el refuerzo del pie del talud (aumento de peso estabilizador, y, sobre todo, de resistencia a corte), mediante contrafuertes de material granular. Con ellas, se elevó el factor de seguridad claramente por encima de 1.30. Las disposiciones final-

mente adoptadas (figura 12) fueron las siguientes:

a) Zanja drenante longitudinal en el pie de los taludes, con 3 m de profundidad.

b) Contrafuertes transversales, drenantes y de refuerzo, rellenos de bolos y gravas, dispuestos cada 7 m, con 1 m de anchura, 3 m de profundidad y 15 de longitud. Se dispusieron tanto en el pie de los taludes, como bajo el pequeño terraplén, después de retirar los 2 - 3 m de coluvial, que resultó al elevar la rasante hacia el pk. 23,180.

c) Peso estabilizador con un repiñe de escollera y muro de gaviones, variable según las condiciones locales.

d) Protección de la superficie del talud con plantaciones vegetales.

El comportamiento final ha sido satisfactorio hasta la actualidad, pues, a pesar de las fuertes lluvias de los últimos años, los desperfectos en estos desmontes han sido muy localizados y poco significativos, siendo reparados con las labores normales de mantenimiento.

6.- Problemas en las Lomas de Úbeda

En la carretera N-322, en que estas formaciones arcillo-margosas son muy abundantes (entre Villanueva del Arzobispo y Úbeda) se han producido -a raíz de las lluvias del invierno 96-97- diversas anomalías o emergencias, que se han derivado en problemas de inestabilidad, tanto en desmontes como en terraplenes apoyados en medias laderas de inclinación suave. En la figura 13 de la página siguiente, se presenta un esquema típico de inestabilidad registrada en estos últimos casos, en que la altura máxima del terraplén es de 8-10 m, mientras que el espesor de re-

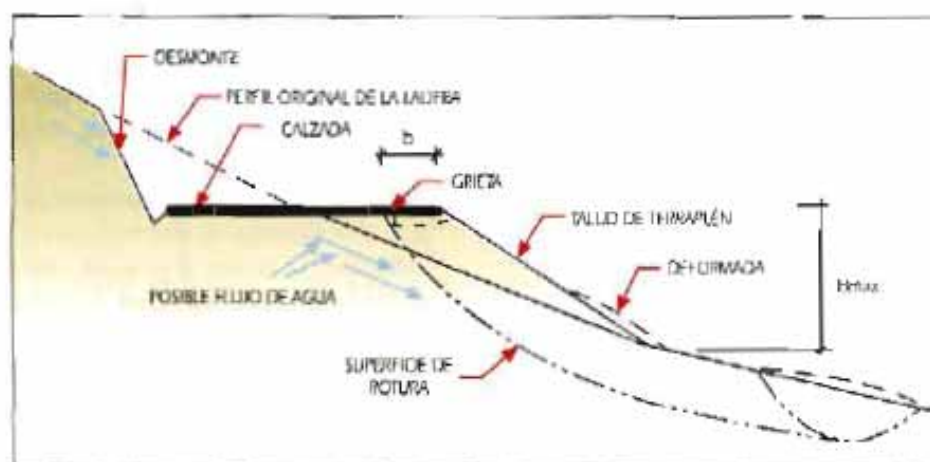


Figura 13. Esquema típico de inestabilidad de terraplén a media ladera.

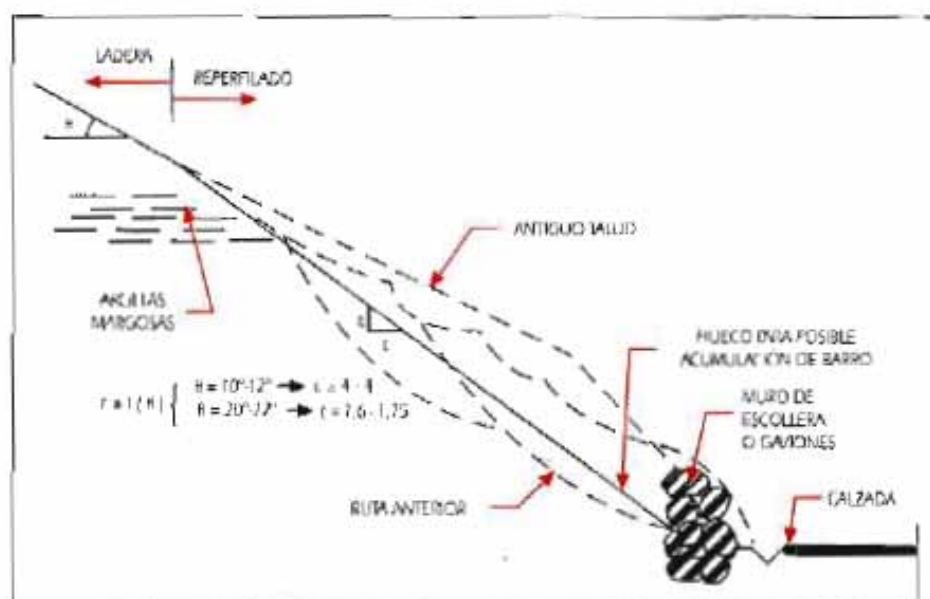


Figura 14. Soluciones en desmontes inestables en los cerros de Ubeda. (Jlménez y Otero, 1998)

En los desmontes, generalmente, las roturas son relativamente superficiales. Si se trata de formaciones de tipo "marga azul", la parte inestable se sobresatura

llo en el borde de la plataforma viaria sólo es de unos 3-5 m. En esos casos, como los desmontes suelen ser pequeños (3-4 m de altura, como mucho), aunque la pendiente sea relativamente vertical [desde 1:1 a 3(H): 2 (V)], no se han presentado problemas (salvo alguna inestabilidad absolutamente puntual). En cambio, en la zona de terraplén el deslizamiento ha

afectado al relleno y al terreno natural subyacente, habiendo llegado las grietas en el terreno natural —en algún caso excepcional— hasta a 70-180 m desde el pie del terraplén. Ello ha sucedido en alguna zona de vaguada en que, probablemente, ya había fenómenos de inestabilidad y de clara influencia del agua antes de construir el terraplén. En otras zonas, no de

vaguada, la rotura ha llegado a unos 15-25 m desde el pie del terraplén. Las grietas en la carretera aparecieron a una distancia (b, en la figura 13) variable entre 2 y 5 m, con salto en la grieta de la calzada que llegó a ser de más de 1 m en algunas ocasiones. Generalmente, el servicio viario pudo mantenerse, a base de recargar el firme, tan sólo como medida provisional.

En cuanto a los desmontes, generalmente las roturas son relativamente superficiales. Si se trata de formaciones de tipo "marga azul" (talud natural del orden de 9-12°), la parte inestable se sobresatura (con el esquema de la figura 5) y se mueve en forma de barro. Si se trata de arcillas algo más armadas (20-24°), los taludes de desmontes eran ya de tipo 1:1 ó 1 (V): 1,25 (H) y las roturas han sido escalonadas, con 2 ó 3 saltos —en la parte superior— del orden de 0,5 -1 m (figura 14). La solución empleada, generalmente, pasa por el retallado y la colocación de un muro de escollera o gaviones al pie del talud, que refuerce y recoja las posibles coladas de barro que se produzcan en el futuro.

En la figura 15 de la página siguiente, puede verse el esquema de una rotura real, correspondiente a un terraplén que se acababa de ejecutar al llegar las fuertes lluvias, como parte de una variante de trazado en la zona próxima a Villanueva del Arzobispo, en la que no se había construido el firme todavía. Se produjo un fallo por la parte superficial de las arcillas margosas (a 2-3 m de profundidad) que indujo una rotura del terraplén de tipo escalonado. También puede verse la solución adoptada, a base de cadenas drenantes en las arcillas de la base y tacón de escollera al pie del terraplén. En otros casos de terraplenes ya existen-

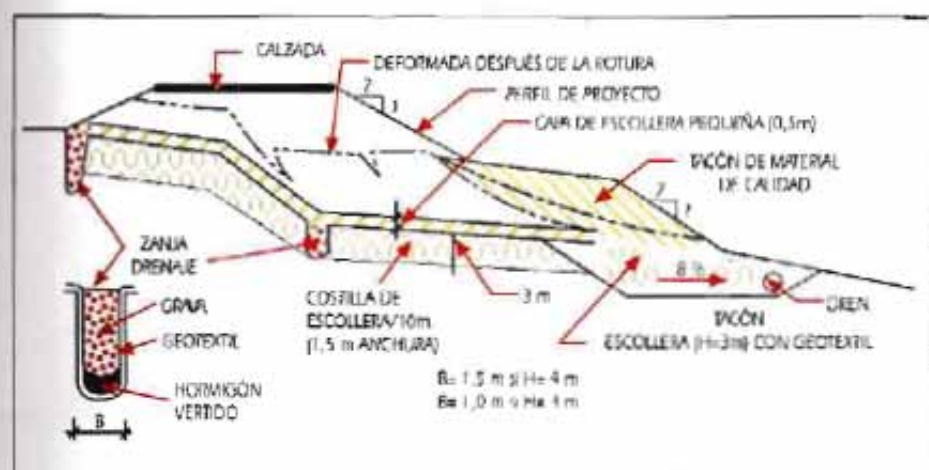


Figura 15. Solución para estabilizar el deslizamiento de un terraplén sobre media ladera (Jiménez y Otero, 1998).

tes, con firme en servicio, generalmente sólo se pudo construir el tacón de escollera (introducido en las arcillas de base) y un refuerzo en la zona de la calzada. En todos los casos, en la cuneta del lado del desmonte se ejecutó una zanja drenante de unos 3-4 m de profundidad.

7.- Agradecimientos

La redacción de este trabajo ha sido posible gracias a muchos años de dedicación al tema de las "margas azules" (que ni son margas ni son azules), y durante ese tiempo he recibido ayuda y colaboración de muchas personas. Entre ellas quiero agradecer su ayuda, especialmente, a Santiago Uriel, con el que empecé este caminar arcillo-azulado; a Pedro Sola, infatigable compañero de diferentes "aventuras" andaluzas; a Domingo Quesada y a Pablo Jiménez por la confianza brindada en la dura hora de las emergencias; a Meaza Tsigé que, a través de sus investigaciones (largas y pacientes), me ayudó a confirmar algunas ideas y conocer muchas otras perspectivas y, sobre todo, a aquellos antiguos compañeros del Laboratorio de Geotecnia con los que trabajé en estos temas (Luis Quero, Benigno Del-

gado, Rafael Moreda y Francisco García-Lara).

8.- Referencias

- AYALA, F. (1978). Engineering Properties of the Guadalquivir river Marly Clays in Córdoba, Spain. 3rd Int. Conf. Int. Assoc. of Eng. Geology. Madrid. Vol.1, pp. 117-122.
- BISHOP, A.W. et al. (1971). A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength. *Geotechnique*. Vol. 21, nº 4, pp. 273-328.
- FERNÁNDEZ BLANCO, S. (1979). Estudio de las Propiedades Geotécnicas de las Arcillas Azules del Guadalquivir con Especial Aplicación a la Estabilidad de los Taludes Naturales a Largo Plazo. Tesis Doctoral. U.P.M.
- JIMÉNEZ, P. Y OTEO. (1998). Problemas de inestabilidad en carreteras construidas sobre arcillas margosas en Jaén. 1^{er} Congreso Andaluz de Carreteras. Granada. Sesión III.
- LUMB, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Eng. Geology*. Nº8. Pp. 31-65.
- ONODERA, T; TOSHINAKA, R; KAZAMA, H. (1974). Slope failures by heavy rainfall in Japan. *Proc. 2nd Int. Con-*

gress on Eng. Geology, San Paulo.

OTEO, C. y SOLA, P. (1993). Stability Problems in Slopes constructed on Spanish "Blue Marls". *Int. Symp. on Indurated Soils and soft Rocks*. Atenas.

OTEO, C. y GARCÍA DE LA OLIVA, J. L. (1995). "Classification of Spanish marly soils". *Colloquium Mundanum. "Craies et Schistes"*. Bruselas.

OTEO, C. (1997). La estabilidad de taludes y desmontes en el entorno de las obras lineales andaluzas. *IV Simp. Nacional sobre taludes y laderas inestables*. Granada. Vol. III. Pp. 1073-1113.

QUESADA, D; JIMÉNEZ, P; OTEO, C.; y SOLA, P. (1998). La estabilidad de laderas como condicionante: Taludes en desmonte hacia el pk. 23+400 de la N-323 y Viaducto de San Telmo en la variante de Almería. 1^{er} Congreso Andaluz de Carreteras. Granada. Sesión III.

TSIGÉ, M. (1998). Microfábrica y mineralogía de las arcillas azules del Guadalquivir: Influencia en su comportamiento geotécnico. Tesis Doctoral. U.C.M. (Facultad de Ciencias Geológicas). Madrid.

URBANO, R. (1998). Análisis de factores y estudio de las incidencias producidas en la red de carreteras andaluzas en el invierno 1996-97. Tesis de Master de Ing. Geológica. U.C.M. Madrid.

URIEL, A. (1976). Discussions. *First Symposium on Soft Rocks*. Vol. 2. Pp. 42-44. Madrid.

URIEL, S. and OTEO, C. (1976). Propiedades Geotécnicas de las Margas Azules de Sevilla. *First Symp. on Soft Rocks*. Paper A-9. Vol. 1. Madrid. ■

Carlos S. Oteo. Dpto. Ingeniería del Terreno. E.T.S. Ing. de C. C. y P. Universidad Politécnica de Madrid.