

Microfábrica de las arcillas azules del Guadalquivir y su relación con los procesos de meteorización

Microfabric of Guadalquivir blue clays and its relation with weathering process

M.Tsige y L. González de Vallejo (*)

(*) Dept. de Geodinámica, Area de Ingeniería Geológica Universidad Complutense de Madrid, 28040

ABSTRACT

Guadalquivir blue clays are strongly affected by physical weathering which is responsible of considerable geotechnical problems in engineering works associated with landslides. Microfabric and mineralogy properties have been studied using the XRD and SEM, to asses possible changes in their internal properties with the weathering process. Different weathering profiles of this clays have been described using field criteria, on which mineralogical composition and microfabric aspects were assesed. The results have indicated that, the geotechnical problems are not caused by a change in mineralogical and chemical aspects, but rather a combination of slaking, brittleness and disaggregation, resulting from stress release. It has been shown also that these processes are stimulated by the presence of expansive type clay minerals in the sediment. However the interlaminar cation is Ca, where by the osmotic expansion is not determinative but rather the interlaminar one developed mostly between the aggregates. The most important element affected by this process is the microfabric feature represented by discontinuous clay matrix microfabric type, and existence of flocculated aggregates in FE arrangement of clay plates. These arrangements favours fragmentation of the sediment into small aggregates with dessication and humectation cycle accelerated with the clay nature.

Key Words: *Microfabric, Guadalquivir Blue Clays, Weathering.*

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1324-1327

ISSN:0213683X

Introducción

Las arcillas azules se encuentran aflorando en toda la rivera del río Guadalquivir ocupando una amplia extensión en la depresión de dicho nombre. Estos materiales comúnmente conocidos como margas azules del Guadalquivir, abarcan parte de las provincias de Córdoba, Jaén, Sevilla, Huelva, ocasionando problemas de inestabilidad de taludes, MOPU (1973), (ITGE, 1987), sobre todo cuando actúa la meteorización (Oteo *et al.*, 1993).

Se han detectado problemas de hundimiento, colapso y deslizamientos profundos, (Oteo *et al.*, 1976, Uriel *et al.*, 1993, Fornes *et al.*, 1993). Estos últimos se producen frecuentemente cuando la formación está cubierta por materiales recientes y permeables que permiten la fácil percolación del agua hasta la formación de las arcillas azules produciéndose una rápida alteración. Esta formación de edad miocena Superior es de origen marino y está sobreconsolidada, siendo su humedad natural algo inferior a su límite plástico, con un índice de fluidez negativo. Litológicamente está representada por arcillas margosas más o menos carbonatadas de color verde azulado y a veces

gris verdoso. En ocasiones presentan alguna intercalación de capas muy finas de limo y arena. Pese a estas intercalaciones la estratificación en estos sedimentos es muy difusa, casi nula, tratándose de una serie continua con materiales prácticamente homogéneos con aspecto más bien masivo, en la que colabora su plasticidad. En estado sano son de consistencia dura y muy resistentes pudiéndose considerar como materiales rígidos y semi-rígidos. En superficie se encuentran alteradas mostrando un color marrón u ocre amarillento de aspecto terroso, desarrollándose auténticos materiales blandos con apariencia frágil, dando a la formación bajas propiedades geotécnicas. En un intento de diferenciar problemas específicos inherentes a los cambios de las propiedades del material tanto en superficie como en profundidad, se ha realizado una división de la formación de arcillas azules en tres zonas de meteorización. Para ello se ha considerado la presencia de litorelictos (material de la roca madre), coloración, textura, fisuras y microfisuras, estado de las discontinuidades, grietas, espaciado y apertura, tipo de fractura, presencia de manchas de oxidación, etc. Chandler, 1991, Hawkins *et al.*, 1992. La profundidad de cada

zona de alteración varía dependiendo de la topografía, recubrimiento y contenido de limo, entre otros factores, oscilando entre 0.5 m y más de 15 m (zona de Córdoba). En la tabla 1 se describen esquemáticamente estas zonas.

En ellas se han realizado estudios detallados de la mineralogía y microfábrica (ordenamiento de las partículas y sus poros asociados), así como el estudio de la modificación de la microfábrica y composición mineralógica en muestras tratadas con ciclos de humedad-sequedad en laboratorio.

Mineralogía

Los materiales de las tres zonas de alteración en general se pueden considerar como suelos arcillosos con un contenido de filosilicatos que superan en todos los casos el 65%. El resto de los componentes está formado por carbonatos y algo de cuarzo. Los minerales de la arcilla están representados mayoritariamente por esmectita e ilita en proporciones similares. El estudio detallado de la composición y morfología de estos suelos, mediante las técnicas de rayos-X, microscopía electrónica de barrido y microscopía electrónica de transmisión,

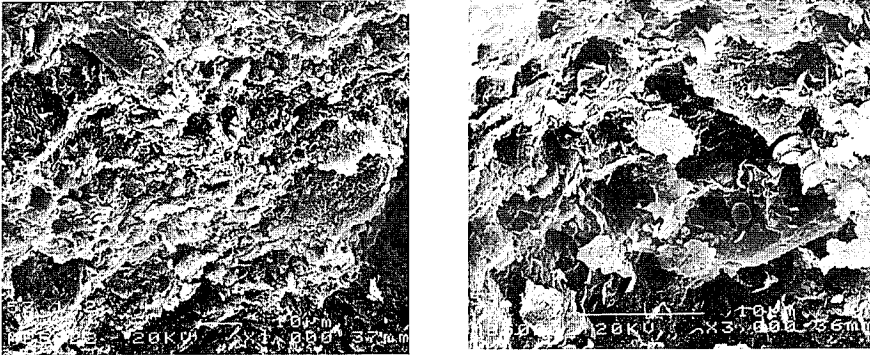


Fig. 1.- Microfábrica de las arcillas azules sanas a) matriz arcillosa y densa y b) detalle de la matriz densa

Fig. 1.- Microfabric of the un weathered blue clays a) dense clay matrix b) detail of dense matrix

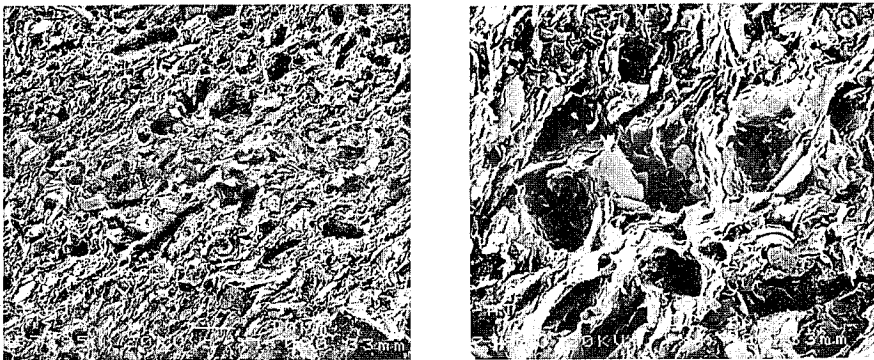


Fig. 2.- Microfábrica de las arcillas azules alteradas a) matriz arcillosa abierta b) detalle de matriz, panel de abeja abierta.

Fig. 2.- Microfabric of weathered blue clays a) open clay matrix b) detail of open honeycomb matrix

no parece indicar la presencia de una transformación mineralógica en las muestras de las tres zonas. Excepto en algunos casos, pertenecientes a las capas más meteorizadas, donde se aprecia un aumento de los interstratificados de illita y esmectita (I-Sm) y deformación de la forma de los cristales de la esmectita (por ejemplo punta doblada), indicando la estabilidad química de los materiales arcillosos. Tampoco se observa una clara diferencia sistemática de los otros componentes mineralógicos en los perfiles de meteorización.

Microfábrica.

La microfábrica general de las tres zonas de alteración observada a pequeña escala (X200) en la microscopía electrónica de barrido, se presenta con aspecto homogéneo de un plasma continuo en el que se observan abundantes microporos de forma circular. Este plasma es principalmente de composición arcilloso, englobando fragmentos de limo y arena de origen químico y detrítico y restos orgánicos en su seno. La microfábrica es principalmente densa y algo compacta dando una sensación de un material cementado y consolidado aunque algo abierto en las muestras de la parte superficial de la formación. No se ha observado

ningún signo de diferencia de la microfábrica general en las muestras pertenecientes a las tres zonas, salvo la aparición de algunas fisuras sin importancia en dirección semi-horizontal y zonas de disolución de fragmentos grandes. A esta escala es muy difícil juzgar la organización de los elementos que constituyen la muestra, sólo se puede sugerir que la formación, pese a su sobreconsolidación, no presenta una laminación u orientación preferente en sus elementos hacia una dirección determinada. Este aspecto se mantiene de manera constante en todas las muestras estudiadas. Se destacan áreas con abundantes limos englobados en la masa del suelo cristales de calcita, cuarzo e inclusiones orgánicas.

A mayor escala (X 1000), se aprecia una diferencia de organización de las tres zonas de meteorización en las que se observa una microfábrica determinante en cada una de ellas distinguiéndose diferentes organizaciones de los elementos, agregados y elementos individuales.

Como se muestra en la Fig. 1, la microfábrica de la muestra sana, está representada por una matriz arcillosa con una homogeneidad aparente muy generalizada. Los minerales de arcilla dentro de esta matriz se reordenan principalmente en forma de dominios regulares constituidos por láminas

de arcilla en interacción de cara-cara de ángulo muy bajo. Dentro de la matriz también aparecen organizaciones de floculación de láminas de arcilla en interacción cara-borde aunque con un contacto de ángulo bajo. Tanto las láminas de arcilla como los agregados presentan una tendencia de orientación paralela hacia la dirección de la sedimentación. Esta microfábrica posiblemente es el resultado de la transición entre la microfábrica de tipo panel de abeja característica de sedimentos marinos y turbostrática Fig. 1b, organización de sedimentos consolidados. Esta estructura y el aspecto denso de la microfábrica dan una alta resistencia a laformación, donde el sedimento se comporta como un material rígido. A lo largo de la observación con el SEM se resaltan algunas microdiscontinuidades (microfisuras, orientación paralela de minerales de arcilla) que pueden afectar en gran medida el comportamiento mecánico del material así como acelerar el proceso de meteorización.

En la microfotografía de la Fig. 2a perteneciente a la muestra alterada, se evidencia el cambio de la organización de los elementos, adquiriendo una microfábrica más abierta donde los contactos entre los flóculos y agregados son más amplios. Se desarrolla una microfábrica de tipo matriz arcillosa de forma de panel de abeja abierta, en la que intervienen minerales de arcilla en interacción de cara-cara y cara-borde de ángulo alto Fig. 2b. También se observan poros tanto inter-elementales como inter-agregados de tamaño relativamente grande. Este hecho parece ser producido esencialmente por la relajación de la tensión de consolidación, aunque la apertura de los poros inter-elementos indica también una expansión de los minerales.

Los cambios observados en la microfábrica son mucho más acentuados en las muestras de la parte superficial de la formación (zona de arcillas azules muy alteradas) Fig. 3a. En este estado, la microfábrica está representada por una matriz mucho más heterogénea y muy abierta en la cual abundan organizaciones de tipo colapsable. En ella abundan conectores de larga distancia que unen a agregados irregulares y cristales de limo revestidos y abundantes macroporos de forma irregular, que posiblemente contribuyen al aumento de la porosidad efectiva del sedimento. Esta microfábrica puede ser definida como de matriz granular o esquelética, Collins *et al.*, 1974, Huppert, 1988.

Hay que destacar la abundancia de zonas con organizaciones de tipo Discernible parallel clay orientación de cara-cara y borde-borde de láminas de arcilla en forma de sábana arrugada, Fig.3b, característico de suelos sometidos a ciclos prolongados de humedad-sequedad, Collins *et al.*, 1974, que pueden comportarse como zonas de cizalla slikensides. Junto con la modificación

de la microfábrica se produce un aumento de las microdiscontinuidades tanto sedimentarias como geodinámicas que afectan de manera directa la resistencia del suelo.

A diferencia de la fábrica de las muestras sanas, las asociaciones no tienen una continuidad clara a lo largo del campo de observación del microscopio, (los elementos no adquieren una organización definida y los contornos son muy irregulares), un hecho que pudo deberse a la expansión diferencial durante la alteración posterior a la pérdida o disminución de la sobreconsolidación.

La apertura de los poros entre las laminas de arcilla y entre los agregados, y el desarrollo de los canales y microfisura entre los conectores débiles de larga distancia, se produce principalmente por la acción conjunta de la relajación de las tensiones y las presiones de expansión, Moon 1995. Estas estructuras son muy inestables y propensas a modificaciones y colapsos con una fuerza mínima externa dando a la formación un carácter colapsable y deslizante, (Huppert, 1988; Tovey, 1992) donde los problemas de estabilidad están asociados en la mayoría de los casos con estas zonas de alteración y presencia de agua.

Esta situación se da en la zona en parte por el carácter arcilloso de los materiales en cuyo composición mineralógica dominan minerales expansivos (esmedtita), y por otra parte, por el clima favorable con largos períodos secos con temperaturas altas, hasta 45°, y fuertes lluvias y torrenciales.

Microfábrica posterior a tratamiento de humedad-sequedad (h-s) en el laboratorio.

Para estudiar los fenómenos anteriormente dichos, fue preciso determinar la microfábrica de muestras tratadas en el laboratorio. Para lo cual se sometieron muestras sanas a ciclos sucesivos de h-s. Se prepararon muestras con 2, 5, 10 y 25 ciclos de h-s con el fin de observar la evolución de la modificación de la microfábrica. Un ciclo de humectación y desecación dura 24 horas, (18 horas sumergidas en el agua y 6 en la estufa a 45 °C).

En la primera etapa del tratamiento, 2 ciclos de h-s no se producen cambios relevantes en la textura del material, salvo la aparición de algunas microfisuras semi horizontales de origen sedimentario sin importancia. Estas fisuras no presentan signos de relleno ni haber sido cizalladas por lo que probablemente se deben a relajación de las tensiones de consolidación. Según avanza el tratamiento, parece reforzarse la aparición de fisuras horizontales que adoptan una forma continua con otras en distintas direcciones.

Con este tratamiento y bajo el microscopio electrónico se evidencia un cambio

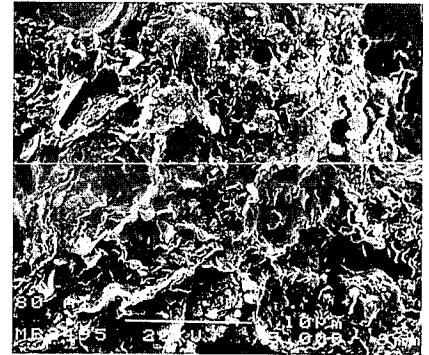
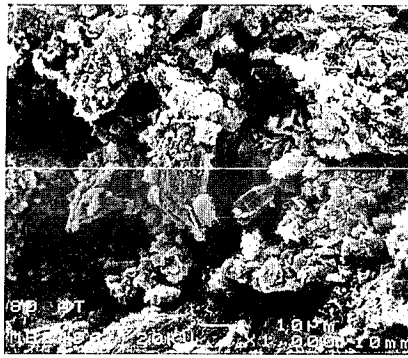


Fig.3.- Microfábrica de las arcillas azules muy alteradas a) matriz granular o esquelética, note los conectores frágiles entre los agregados y los elementos revestidos de arcilla b) microfábrica "discernible parallel clay".

Fig. 3.- Microfabric of the highly weathered blue clays a) skeletal or granular matrix, note, fragile connectors between aggregates and clay-coated elements b) discernible parallel clay microfabric.

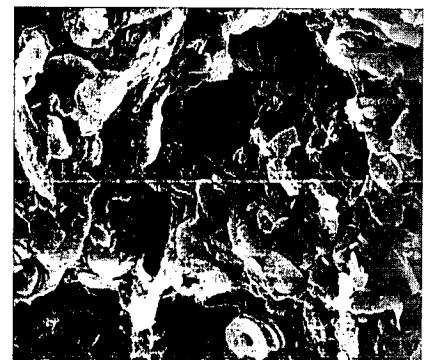
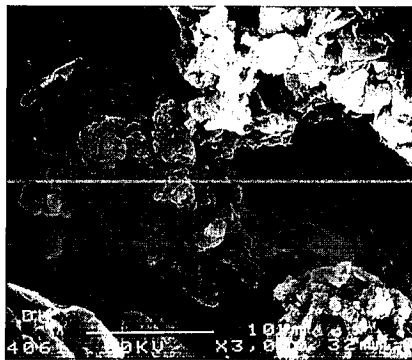


Fig. 4.- Ejemplo de la microfábrica posterior al tratamiento con ciclos de h-s en el laboratorio a) matriz abierta, note el desarrollo de los agregados grandes b) dispersión de las laminas de arcilla (escala 1cm = 10µ).

Fig.4.- Examples of microfabric after h-s treatment in the laboratory. a) open matrix, note the development of big aggregates b) abundance of dispersed clay (scale 1cm=10µ).

brusco de la homogeneidad de la matriz y la forma de la organización de los elementos destacándose dos aspectos importantes: por un lado se observa la separación y fragmentación de los agregados de forma irregular a través de las discontinuidades, posiblemente ya existentes, Fig. 4a, y por otro, una dispersión acusada de las laminas de arcilla, Fig.4c. Esta última se produce por el cambio de la concentración de iones y disminución de la capa doble, entre las laminas de arcilla provocando el aumento de la fuerza de repulsión. Como se observa en la microfotografía, se desarrolla una microfábrica con una cierta similitud con la microfábrica observada en las muestras muy alteradas Fig. 3a. La microfábrica total resultante es de tipo matriz granular o esquelética (formados por agregados de arcilla o fragmentos de limo tapizados unidos por puentes de arcillas muy débiles). También se desarrollan microfisuras y canales grandes que separan los agregados y los fragmentos de limo, dando un aspecto colapsable a la muestra. Generalmente abundan los granos de limo tapizados o revestidos por laminas de arcilla. No se ha observado una diferen-

cia clara en la composición mineralógica de las muestras posterior al tratamiento de h-s.

Discusión de resultados y conclusiones.

Del análisis de la microfábrica se puede deducir que las estructuras observadas en las arcillas azules del Guadalquivir corresponden, aunque algo modificadas, a sedimentos marinos en medios de alta energía, donde las laminas de arcilla se depositan en el fondo del mar posterior a su floculación en grandes agregados en suspensión. El conjunto de estos agregados floculados, los limos y las laminas de arcilla, dan como resultado un tipo de organización en forma de panel de abeja, estructura abierta con grandes poros tanto inter-elementales como inter-agregados. Posteriormente estos sedimentos han sido afectados por varios procesos tanto de origen formacional como geodinámico, dentro de las cuales se destaca la consolidación gravitacional. La microfábrica abierta, y los grandes poros inter-elementales y inter-agregados han sido deformados por las fuerzas inducidas durante este proceso (sin descar-

Tabla 1.- Zonificación de las arcillas azules .

Zona/prof.	Descripción visual	Mineralogía	Microfábrica
Arcillas azules muy alteradas 0.5 a 7.0 m	-Color ocre o rojo amarillento con manchas verdes -aspecto térreo y frágil. -Litorelictos de la roca madre <20%. -fisuración general y grietas de desecación -predominio de fisuras horizontales de, muy densas (1mm). -rellenos de yeso	- esmectita e illita en igual proporción -posible aumento de interstratificados I-Sm -esmectitas con bordes agudos y a veces fibrosas -illitas con contornos deformados. -disolución de calcita de origen químico y rotura de los de origen biológico. -procesos de gelificación.	-organización abierta y algo caótica -microfábrica "esqueletal" y granular -presencia de agregados irregulares compuestos por laminas de arcilla y fragmentos de limo. -zonas con microfábrica de tipo "discernible parallel clay" -abundancia de laminas de arcilla individuales sin organización alguna. -macroporos, fisuras y canales. -abundantes microdiscontinuidades.
Arcillas azules alteradas 0.5 a 16.0 m	-arcillas verdes grisáceas, coloración roja alrededor de las fisuras -concreciones de piritita oxidadas -se mantiene el aspecto margoso litorelictos >60% -algo consistentes y relativamente duras -pocas fisuras horizontales con rellenos de óxido y yeso.	-esmectita e illita de igual proporción -esmectitas arrugadas y a veces doblada. -micas abiertas en el proceso de alteración -disolución de calcita de origen químico	-microfábrica algo abierta tipo panel de abeja. -agregados irregulares y regulares - arcillas en FF, FE de ángulo alto. -algunas láminas de arcillas sin organización alguna -microporos regulares y de forma circular. -presencia de macroporos de forma irregular y canales de disolución -microdiscontinuidades en la dirección horizontal a veces rellenos.
Arcillas azules sanas > 16.0 m	-arcillas gris azuladas muy duras y muy rígidas -fractura concoidea con superficie radial y a veces con brillo -textura masiva y tacto limoso -a simple vista no se observan fisuras	-esmectita e illita en proporciones similares -esmectita con contornos bien definidos y en forma de dominio grande de tamaño limo -micas grandes y morfología mas o menos regular	-organización compacta y muy densa -microfábrica similar a turbostrática algo abierta. -arcillas en FF y EF ángulo bajo. -agregados de arcilla regulares. -ausencia o pocas láminas de arcilla individuales. -microporos y ausencia de macroporos. -muy pocas microdiscontinuidades

tar la intervención de otros procesos sin y post sedimentarios), Tsige *et al.* 1994, dando como resultado la microfábrica actual, de matriz densa y compacta con escasos macroporos, observada en muestras sanas. Este ordenamiento corresponde a la transición entre la microfábrica original panel de abeja y la resultante turbostrática. La existencia de estos tipos de organizaciones han dado a la formación de las arcillas azules una resistencia elevada y consistencia rígida en su estado sano.

Estos materiales una vez expuestos a la intemperie han sido afectados por la erosión, un hecho que conlleva la meteorización, proceso que va unido a la modificación de los parámetros geotécnicos del material. El proceso de meteorización, predominantemente físico, ha sido estimulado tanto por la organización de los elementos matriz arcillosa con discontinuidades y flóculos de arcilla como por la composición mineralógica de las arcillas (arcillas expansivas). Este proceso ha sido favorecido en gran medida también por el clima de la región con prolongados períodos secos y lluvias torrenciales.

El problema de la meteorización de los suelos arcillosos especialmente meteorización física, que lleva con sí el cambio de las propiedades geotécnicas del material y la reducción de su resistencia, se desarrolla

primordialmente por la modificación de la estructura interna de sus componentes, sin el cambio químico de los mismos. Este hecho se refleja esencialmente en la modificación de la organización interna de los materiales (minerales de arcilla, agregados y poros), explicándose mediante el cambio de las condiciones en las tensiones internas del material, provocadas tanto por la disminución de la consolidación, como por la presión de expansión que ejerce el material. El lavado de los sales y el cambio de la concentración del agua (condicionantes de las fuerzas eléctricas de atracción y repulsión entre las láminas de arcilla), provocan un cambio en los contactos geométricos entre las laminas de arcilla.

El estado de floculación de las arcillas, en interacción de FE (aun siendo de bajo ángulo), y la matriz discontinua, favorecen la percolación del agua dentro de la masa del suelo en tiempos muy cortos, produciéndose la fluctuación de las tensiones efectivas, y la modificación de los contactos geométricos entre los elementos constituyentes del material, con la cual se puede producir la desintegración de los agregados. La presencia de minerales de tipo esmectítico en proporciones considerables, juega un papel importante, desarrollándose una expansión diferencial de las láminas y agregados que conduce a una separación de

los planos basales en los minerales de arcilla y entre los agregados. Durante este proceso la estructura interna (organización y fuerzas de enlace) ha sufrido un cambio drástico, desintegración y destrucción de los agregados estables (tanto electro-químicos como de cementación), apertura de las microdiscontinuidades, con la pérdida de la presión de sobreconsolidación y aceleración de las disoluciones de los sales cementantes y el desarrollo de canales y macroporos en toda la muestra. Estas modificaciones han afectado las propiedades geotécnicas, especialmente la resistencia, sin que por ello exista un cambio mineralógico importante, explicando el comportamiento de estos sedimentos frente a los problemas de inestabilidad de taludes sobre todo en la parte mas superficial o en profundidad en presencia de agua.

Las arcillas azules deben considerarse como una formación cuyos materiales geotécnicamente se agrupan en tres zonas con propiedades distintas y comportamiento diferente, que a veces son difíciles de establecer con los ensayos rutinarios de laboratorio. En la tabla 1 se indican las tres zonas de alteración de las arcillas azules diferenciadas y sus características mas destacables.

Referencias

- Barden & Sides. (1972). Quarterly Journal of Engineering Geology. V. 3, 259-260
- Chandler, F.J. & Apted, J. P. (1988). Quarterly Journal of Engineering Geology, 21, 59-68.
- Collins K. & Mc Gown, (1974), Geotechnique 24,223-254.
- Fornes, J. y Uriel, S. (1992). III Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables, Vol II, 449-460
- Galán, E. & González I. (1993). Estudios Geológicos. N° 49, 261-275.
- Hawkins & Pinches (1992). Quarterly Journal of Engineering Geology. Vol. 3, 259-260
- Huppert, F. (1988). Bulletin Int. Asso. of Eng. Geo. 38, 83-94.
- Moon, V. & Beattie, C. (1995). Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 303-312.
- Oteo C. y Sola P. (1993). Int. Symposium on Soft Rocks & Stiff Soils.
- Tovey, (1992). Microstructure of Fine-Grained Sediments. eds. Bennett, H, Bryant R. & Hulbert, M. 519-529.
- Tsige, M., González de Vallejo L. Doval, M. Oteo C. & Barba C. Proc. 7th Int. Cong. Int. Ass. Eng. Geo. Vol. 2 659-665.
- Uriel, A. & Pérez, J. M. (1992). III Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables, Vol II, 437-448