

Caracterización geotécnica y geomecánica de la roca de falla de la falla activa de Alhama de Murcia

Geotechnical and geomechanical characterization of the fault gouge of the active Alhama de Murcia fault

Pablo Rodríguez-Soto¹, Meaza Tsigie¹, Juan M. Insua-Arevalo¹, Jose J. Martínez-Díaz^{1,2}, Emilio Rodríguez-Escudero³ y David Jiménez Molina¹

¹ Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid.

pablo04@ucm.es, insuaev@ucm.es, meaza@ucm.es, davidj03@ucm.es

² Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM). 28040 Madrid. jmdiaz@ucm.es

³ Dept. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, U. Autónoma de Madrid. c/ Francisco Tomás y Valiente, 7. emilio.rodriguez@uam.es

ABSTRACT

We present the results of the mechanical parameters of natural clay rich fault-rock (fault gouge) from one of the most active faults in the Iberian Peninsula, Alhama de Murcia Fault (FAM). FAM shows segments partially formed by exhumed fine grained fault gouge (FG) with a 50-80 m thickness developed mainly in a brittle regime. It is composed mainly by mica (moscovite and paragonite) and quartz, the clay minerals are mainly illite with some kaolinite. The FG shows a notable tectonic fabric characterized by the preferred orientation of plate-like minerals arranged in an anastomosing texture which controls the mechanical behavior of the fault. Undisturbed samples, taken from two fault observatory boreholes, have been used for laboratory tests. The result of the study shows that there is important variability in strength properties depending on the stress orientation in relation to fabric. The friction angle (φ) varies between very low values (16° - 26°) for planes oriented favorably to the tectonic fabric to very high values ($>50^{\circ}$) for planes unfavorably oriented. This high value of friction angle was also obtained in reconstructed and not oriented FG samples.

Key-words: Fault gouge, Alhama de Murcia fault, mechanical properties, tectonic fabric.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio de los parámetros mecánicos de la roca de falla (fault gouge) de la falla de Alhama de Murcia (FAM) próxima al bloque levantado. Esta falla es una de las más activas de la Península Ibérica y destaca por tener segmentos con un espesor de roca de falla (FG) exhumada de 50-80 m de espesor en régimen frágil. Su composición mineralógica se compone mayoritariamente por minerales del grupo de la mica (moscovita y paragonita) y cuarzo; en la fracción arcillosa predomina la illita acompañada por caolinita. Muestra una marcada fábrica tectónica caracterizada por la orientación preferente de los minerales laminares según una textura anastomosada que controla la resistencia mecánica de la falla. Para este estudio se han tomado muestras inalteradas procedentes de dos sondeos sobre los que se han realizado distintos ensayos de esfuerzo-deformación considerando diferentes orientaciones de los esfuerzos respecto a la fábrica. El ángulo de fricción (φ) varía desde valores mínimos (16° - 26°) para los planos de rotura orientados favorablemente a la fábrica tectónica hasta valores máximos ($>50^{\circ}$) para los planos orientados desfavorablemente. Estos elevados valores fueron obtenidos también en muestras remodeladas de FG sin orientaciones preferentes.

Palabras clave: Roca de falla, falla de Alhama de Murcia, propiedades mecánicas, fábrica tectónica.

Geogaceta, 62 (2017), 7-10
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 1 de febrero de 2017
Revisión: 5 de abril de 2017
Aceptación: 26 de abril 2017

Introducción

Las rocas de falla en régimen frágil abarcan una amplia variedad de comportamientos en función de su distribución granulométrica, composición mineralógica y química. Todos estos aspectos controlan de forma general el comportamiento geomecánico e hidrogeológico del macizo rocoso en su conjunto, y del plano de falla en particular (Ishikawa *et al.*, 2014). La roca de falla (FG, fault gouge) de la falla de Alhama de Murcia (FAM) tiene un

espesor de más de 80 metros, de los cuales 50 están formados por la roca de falla, de tono más oscuro, próxima al bloque levantado y que ha sido exhumada desde varios kilómetros de profundidad (Rodríguez-Escudero, 2014). La FG acomoda una deformación importante desarrollando una macroestructura tectónica paralela o semiparalela a la estructura principal, junto a otras microestructuras mucho más complejas desarrolladas durante las sucesivas etapas de deformación. La complejidad de este tipo de materiales con

una historia de deformación superpuesta, génesis variada (roca madre) y procesos syn y post-deformacionales, dificulta el estudio de los factores que controlan su formación, así como el grado de influencia de cada uno de ellos. No obstante, numerosos autores (*e.g.*, Solum *et al.*, 2003) han señalado que la microestructura tectónica y la composición mineralógica de las arcillas son los elementos que más contribuyen a la forma y comportamiento geomecánico del macizo en su conjunto, y de los planos de la FG en particu-

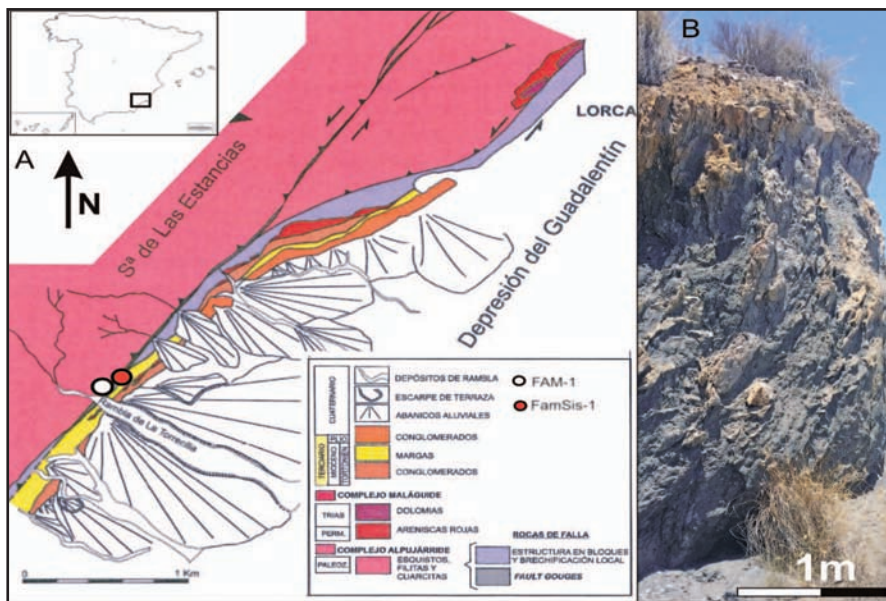


Fig. 1.- A) Ubicación de los sondeos FAM-1 y FamSis-1 (modificado de Martínez-Díaz, 1998) B) Aspecto de la roca de falla en afloramiento. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- A) Location of the boreholes FAM-1 and FamSis-1 (modified from Martínez-Díaz, 1998) B) Fault gouge in outcrop. See color figure in the web.

lar. Esta influencia se ve fundamentalmente reflejada en los valores del coeficiente de fricción, incremento de presión de poros y el debilitamiento de la zona de falla y, por tanto, en el grado de deformación de estos materiales. Por otra parte, parece evidente la variación de estas propiedades en función de la orientación con respecto a la fábrica tectónica o a la microfábrica de minerales laminares, aun siendo estos una fracción muy reducida (Rutter *et al.*, 2013). En este trabajo se presenta el estudio del comportamiento mecánico sobre muestras obtenidas en dos sondeos.

Contexto Geológico

En 2011, la rotura de una pequeña sección situada entre el segmento Lorca-Totana y el segmento Goñar-Lorca (Vissers y Meijninger, 2011; Martínez-Díaz *et al.*, 2012) fue la responsable del terremoto de Lorca de Mw 5,2, que causó 9 víctimas mortales, 300 heridos, daños severos en 1.200 edificios y pérdidas estimadas de 2.000 millones de euros.

Las muestras estudiadas se han tomado en dos sondeos realizados sobre la FAM, en el segmento Goñar-Lorca, a 3 km al SO de Lorca, cerca de la rambla de La Torrecilla (Fig. 1A). Esta falla, con más de 100 km de longitud, es una de las más activas de la Península Ibérica formando parte de la zona de cizalla de las Béticas Orientales.

En la zona de estudio la deformación se concentra en una única zona de falla, reconociéndose los siguientes materiales (Espinosa Godoy *et al.*, 1974):

- El bloque levantado aflorante situado al NO y perteneciente al Complejo Alpujárride, presenta una esquistosidad muy replegada cortada por venas de cuarzo centimétricas.
- En el bloque hundido, situado al SE, afloran los materiales terciarios y cuaternarios que rellenan la fosa tectónica del Guadalentín, los cuales aparecen basculados y deformados por la falla.
- La FG estudiada, es de un color gris oscuro y presenta una marcada fábrica tectónica además de incluir también venas y nódulos de cuarzo (Fig. 1B).

Materiales

Los materiales empleados para el estudio de este trabajo pertenecen a testigos obtenidos en dos sondeos de investigación: el sondeo FAM-1, de 174 m, que atraviesa el bloque levantado y la FG, y el sondeo FamSis-1 que comienza en la FG aflorante y llega a 40 m de profundidad.

Muestras

En la Tabla I se recogen las muestras y ensayos realizados para la elaboración de este estudio (Fig. 2, Tabla I).

Nombre de la muestra	Sondeo	Profundidad (m)	Ensayo realizado
RCS-1	FAM-1	173,20-174,00	Resistencia a Simple
RCS-2	FAM-1	174,75	
CD T-1	FAM-1	145,83-145,15	Corte Directo
CD T-2	FAM-1	145,83-145,15	
CD T-3	FAM-1	145,83-145,15	
CD R-1	FAM-1	173,20-174,00	Corte Directo
CD R-2	FAM-1	173,20-174,00	
CD Q-1	FAM-1	0,00-174,00**	Corte Doirecto
CD Q-2	FAM-1	0,00-174,00**	
CD Q-3	FAM-1	0,00-174,00**	
TT-1	FAM-1	152,20-153,10	Triaxial
TT-2	FAM-1	152,20-153,10	
TT-3	FAM-1	152,20-153,10	
TO-1	FamSis-1	12,95-13,25	Triaxial
TO-2	FamSis-1	12,95-13,25	
TO-3	FamSis-1	12,95-13,25	
MEB-1	FamSis-1	135	MEB

Tabla I.- Resumen de las muestras estudiadas. Table I.- Summary of the studied samples.

Metodología

Se determinó la humedad y densidad así como los límites de Atterberg en el laboratorio siguiendo la normativa UNE.

Para la obtención de los parámetros resistentes se han realizado tres tipos de ensayos: resistencia a compresión simple, resistencia triaxial variando la dirección de aplicación del esfuerzo máximo con respecto a la fábrica tectónica a macroescala y corte directo. Por otro lado, se analizó su composición y microfábrica mediante difracción de rayos X y microscopio electrónico de barrido (MEB).

Para los ensayos de resistencia, se han preparado las siguientes probetas:

- Probetas de compresión uniaxial "RCS" talladas siguiendo la dirección del eje del sondeo con la fábrica tectónica que forma un ángulo de 70° respecto al plano sobre el que se aplica σ_1 .
- Probetas de compresión triaxial orientadas "TT" talladas de manera análoga a las probetas RCS (Fig. 3A).
- Probetas de compresión triaxial orientadas "TO" talladas para hacer coincidir los esfuerzos aplicados (máximo y mínimo) con la dirección de los esfuerzos del régimen tectónico actual. De esta manera la fábrica forma un ángulo de 20° con el plano sobre el que se aplica σ_1 durante el ensayo (Fig. 3B).
- Probetas de corte directo inalteradas "CDT" donde la fábrica quedaría orientada cuasi-perpendicularmente al plano de corte o plano de rotura (Fig. 3C).

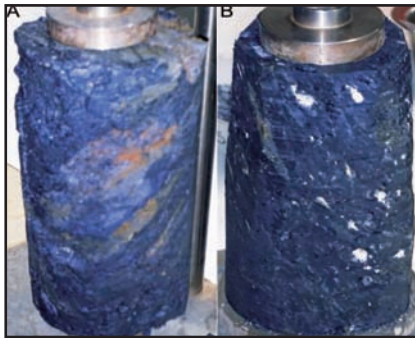


Fig. 2.- Testigo procedente del sondeo FAM-1 con fragmentos de protolito Alpujarride (A) y otro en el que se puede apreciar los nódulos de cuarzo pulverizado (B). Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- FAM-1 core samples. We can notice some inclusions of the "Alpujarride" protolith (A) and pulverized quartz nodules in a black fine grained matrix (B). See color figure in the web.

Por otro lado se han preparado muestras tamizadas (<0,65mm) y remodeladas "CD R" (sin orientación preferente) con el objetivo de estimar la variación del coeficiente de fricción en los materiales que forman la mayor parte de la matriz (fundamentalmente minerales laminares) y de los materiales granulares en su mayor parte formados por cuarzo triturado y pulverizado "CD Q".

Resultados

En afloramiento (Fig. 1), se puede apreciar el elevado grado de fracturación del bloque levantado Alpujarride. En toda la FG, y de forma sistemática, se destaca una fábrica tectónica planar, con una orientación y buzamiento coherente con la FAM (Martínez Díaz, 1998). En la FG aparecen incluidos fragmentos del protolito, venas y nódulos de cuarzo. Este cuarzo se encuentra en su mayoría triturado o pulverizado. Las muestras analizadas de los testigos de sondeo obtenidos en profundidad muestran la misma fábrica y disposición observadas en superficie. (Fig. 2A y B).

La composición mineralógica de la FG está representada fundamentalmente por micas (potásica y sódica), cuarzo y, en menor proporción, carbonatos (dolomita, calcita y ankerita). En algunas muestras aparece clorita. Los minerales de la arcilla están mayoritariamente representados por illita de dos tipos y por una cantidad muy baja de caolinita. Esto indica que la FG cercana al bloque levantado está probablemente formada por un proceso de trituración y conminución de la roca original sin presentar aparentes procesos químicos importantes.

La FG presenta una microfábrica turbostrática de matriz muy fina y de aspecto cataclástico donde aparece una mezcla de agregados de minerales laminares con una orientación preferente englobando y tapizando a los porfiroclastos triturados y fracturados (Fig. 4).

La humedad natural de la FG es muy baja, con valores entre 9,52% y 10%. Su densidad varía muy poco, entre 2,35 y 2,37 g/cm³. Presenta un índice de plasticidad (IP) de 4,64% y un límite plástico de 21,20%. La FG se podría clasificar según la USCS como un suelo de grano fino (ML) de baja plasticidad entre los que se incluye el "polvo de roca".

Parámetros de resistencia

La FG presenta unos valores de resistencia a compresión simple muy bajos ($\sigma_c=1,5$ y $0,7$ MPa) siendo propios de suelo duro-roca blanda. Los valores estimados de manera indirecta basados en los ensayos triaxiales muestran una marcada variación en función de la orientación de la fábrica con respecto a la aplicación del esfuerzo axial, siendo máximos cuando esta no es favorable ($\sigma_c=0,1$ MPa).

Los parámetros resistentes, cohesión (c) y ángulo de rozamiento interno (φ), dependen de la orientación de la fábrica respecto a los esfuerzos aplicados en los ensayos realizados (Fig. 5).

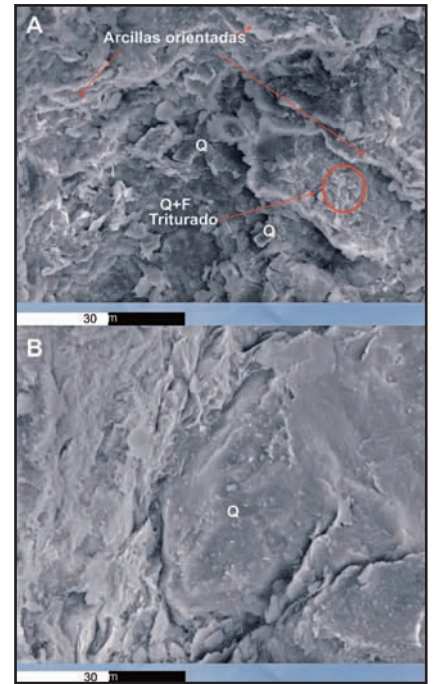


Fig. 4.- Microfotografías de MEB donde se ven las reorientaciones de las láminas de arcilla rodeando (A) y tapizando a los porfiroclastos de cuarzo (B). Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- SEM microphotography. Reorientation of clays in turbostratic microfabric (A) and clay coating on quartz crystals. (B). See color figure in the web.

Estos ángulos varían desde valores mínimos de 16°, cuando la fábrica está favorablemente orientada para la rotura (Fig. 3A), hasta los 51° cuando ésta se dispone de manera desfavorable. Estos mínimos han sido obtenidos cuando la fábrica formaba un ángulo de 70° respecto al plano de aplicación del esfuerzo máximo. Para los ensayos en los que el valor de este ángulo de orientación de la fábrica era menor (20°), los parámetros resistentes han aumentado llegando a valores de φ de 26°. En este caso se produce una rotura combinada a favor de los planos de discontinuidad y de la matriz (Fig. 3B).

Cuando la aplicación de esfuerzos tangenciales se produce a favor de un plano prefijado (como ocurre en el ensayo de corte directo), y estos son cuasi-perpendiculares a los planos de debilidad (Fig. 3C), el material presenta valores de fricción muy altos llegando hasta los 50°. Estos valores son muy similares a los obtenidos en muestras remodeladas, siendo incluso más altos que los obtenidos en las muestras con más de 80% de cuarzo, lo que da una idea de su carácter marcadamente friccional.

Además, en los ensayos de resistencia se ha podido observar como las muestras sufren un proceso de endurecimiento por deformación a altas deformaciones (>10%) (Fig. 6A). El fenómeno de endurecimiento manifiesta un

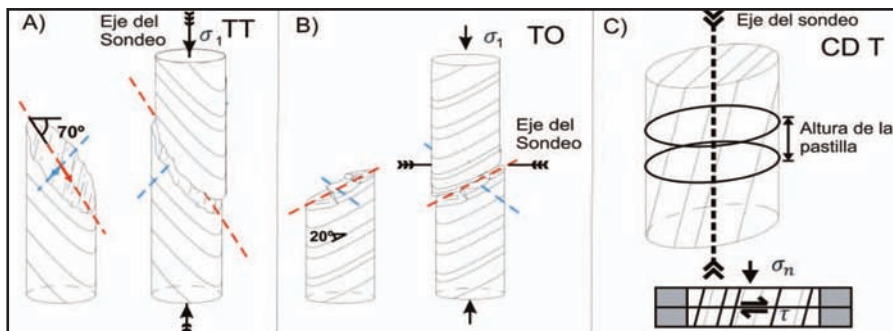


Fig. 3.- A y B) Probetas del ensayo triaxial orientadas y esquemas de su rotura. C) Esquema de la disposición de la fábrica de la "FG" respecto al plano de rotura en la caja de Corte Directo. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- A) Schematic representation of tectonic fabric orientation in the core, A and B) in triaxial compression test, C) Related to a slip surface in direct shear test.

leve aumento de la cohesión, como reflejan las envolventes de rotura obtenidas a bajas y altas deformaciones (Fig. 6B). También se ha observado que los ángulos de rozamiento interno tienden a homogeneizarse a altas deformaciones con valores en torno a los 22°, independientemente del tipo de muestra ensayada.

Discusión y conclusiones

Con base en los ensayos realizados se puede concluir que la FG de la FAM es un material que tiene unas características geomecánicas y geotécnicas intermedias entre suelo duro y roca blanda aunque presenta una alta densidad. Se presenta como una matriz que incluye trozos de protolito, venas y nódulos de cuarzo que se encuentra en su mayoría triturada. Los minerales que la componen, caracterizados por una superficie específica muy alta y bajo coeficiente de fricción, se disponen como agregados laminares con una orientación preferente (microfábrica turbostrática) que engloban y tapizan los porfiroclastos triturados.

Los parámetros resistentes obtenidos mediante los ensayos de laboratorio muestran valores propios de filosilicatos reorientados que presentan una baja resistencia friccional ($\varphi=16^\circ$) cuando los planos están orientados favorablemente para la rotura. Cuando estos planos se orientan desfavorablemente se llegan a obtener valores de φ de 51°. Estos valores friccionales máximos también han sido obtenidos en ensayos sobre muestras remoldeadas, lo que puede estar relacionado con la modificación de la fábrica original, en la que se han perdido los planos de debilidad, aumentando el ángulo de rozamiento entre partículas planares desordenadas (filosilicatos).

Estos resultados muestran que, cuando la orientación es favorable, la FG se sitúa en el tramo bajo de los valores propios de rocas de falla (Byerlee, 1978).

A medida que aumenta la deformación, la roca sufre un endurecimiento por deformación. Este fenómeno produce un aumento de la rigidez del material del núcleo de la falla por compactación (e.g. Gudmundsson, 2011). Además se ha observado que los ángulos de rozamiento interno tienden a homogeneizarse a altas deformaciones con valores entorno a los 22° (independientemente del tipo de muestra ensayada), pudiendo estar relacionado con la reorientación de los filosilicatos.

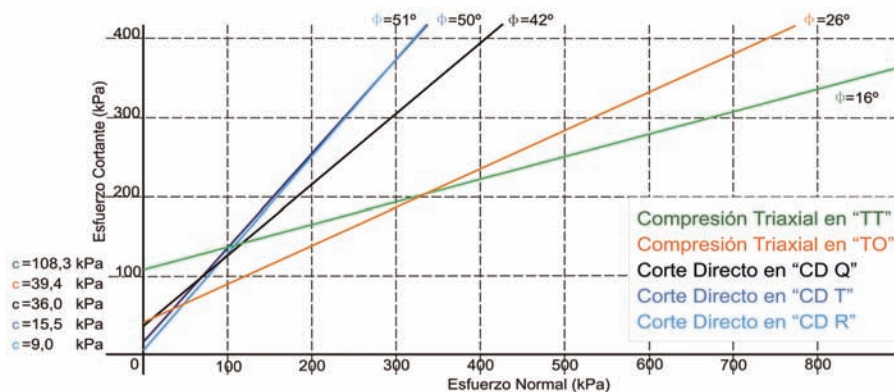


Fig. 5.- Envolventes de rotura de las muestras obtenidas durante los ensayos de laboratorio
Fig. 5.- Shear stress-normal stress curves and c and φ values for studied samples.

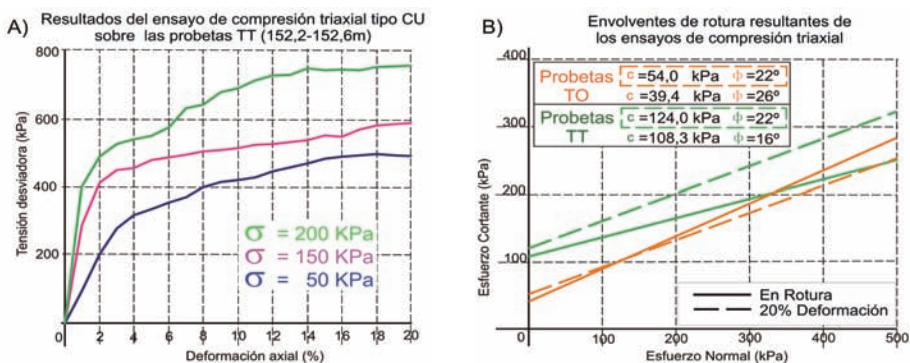


Fig. 6.- A) Gráfico Tensión-Deformación obtenido en el ensayo Triaxial sobre las probetas TT B) Envolventes de rotura de la "FG" obtenidas a partir de los ensayos de Compresión Triaxial en rotura y con 20% de deformación. Ver figura en color en la web.
Fig. 6.- A) Core samples TT triaxial stress strain curves B) Shear strength and normal stress curves in failure and at 20% deformation. See color figure in the web.

En general, los resultados de bajos coeficientes de fricción en determinados planos caracterizados por la presencia de minerales laminares de baja fricción, podrían controlar el mecanismo y estilo de deformación de la falla en su conjunto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto INTERGEO (CGL2013-47412-C2-1-P). Agradecemos a Iván Martín Rojas y a un revisor anónimo sus aportaciones.

Referencias

Byerlee, J. (1978). *Pure and applied geophysics* 116(4), 615-626.
 Espinosa Godoy, J.S., Martín Vivaldi, J.M., Martín Alafont, J.M. y Pereda, M. (1974). *Mapa geológico y Memoria de la Hoja nº 975 (Puerto Lumbreras). Mapa Geológico de España E. 1:50.000* IGME, 14 pp.
 Gudmundsson, A. (2011). *Rock Fractures in Geological Processes*. Cambridge University Press, 578 p.

Ishikawa, T., Hirono, T., Matsuta, N., Kawamoto, K., Fujimoto, K., Kameda, J. y Honda, G. (2014). *Earth, Planets and Space* 66(1), 36.
 Martínez Díaz, J.J. (1998). *Neotectónica y Tectónica Activa del Sector Centro-Occidental de la Región de Murcia y Sur de Almería (Cordillera Bética - España)*. Tesis doctoral, Universidad Complutense, de Madrid, 466 p.
 Martínez Díaz, J. J., Álvarez Gómez, J. A., García Mayordomo, J., Insúa Arevalo, J. M., Martín-González, F. y Rodríguez Peces, M. J. (2012). *Boletín Geológico y Minero* 123(46), 441-458.
 Rodríguez-Escudero, E., Martínez-Díaz, J. J., Tsige, M., Giner-Robles, J. L. y Cuevas-Rodríguez, J. (2014). *2ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología*, 171-174.
 Rutter, E. H., Hackston, A. J., Yeatman, E., Brodie, K. H., Mecklenburgh, J. y May, S. E. (2013). *Journal of Structural Geology* 51, 52-60.
 Solum, J. G., Van Der Pluijm, B. A., Peacor, D. R. y Warr, L. N. (2003). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108(B5).
 Vissers, R. L. M. y Meijninger, B. M. L. (2011). *Solid Earth* 2(2), 199.