

Medida de la fábrica magnética a partir de fragmentos irregulares orientados en un soporte cúbico mediante el puente de susceptibilidad Kappabridge

Measurement of magnetic fabrics from irregular oriented fragments in a cubic box by means of the Kappabridge

Gustavo Higuero^{1*}, Ana Simón-Muzás² y Antonio Casas²

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza.

ghiguero@unizar.es

² Departamento de Ciencias de la Tierra, Grupo de investigación Geotransfer (IUCA), Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza.

anasimon@unizar.es, acasas@unizar.es

*Corresponding author

ABSTRACT

Recent development of the KL5 Kappabridge (Agico) allows the measurement of the Anisotropy of Magnetic Susceptibility of standard specimens in one position, avoiding the more time-consuming techniques of three or 15 positions in older systems. The need for regular, standard specimens (cylindrical or cubic with precise dimensions) is often a drawback for using the automated systems. This factor, in addition to the growing need of sampling fine-grained lithologies (in the case of detrital rocks) or the impossibility of sampling compact rocks by means of conventional methods (i.e. the case of fault rocks or rocks with strong fissility) led us to produce low-cost, cubic holders by means of a 3D printer. In this paper we analyze the magnetic properties of the different plastic qualities used and provide a comparison between the results obtained from standard specimens and the proposed oriented fragments technique.

Keywords: magnetic fabrics, fragments, holder, orientation, Kappabridge.

RESUMEN

Las innovaciones recientes del puente de susceptibilidad Kappabridge KL5 (Agico) permiten la medida de la anisotropía de la susceptibilidad magnética de especímenes estándar en una sola posición, ahorrando así tiempo sobre las medidas más lentas de tres posiciones, o 15 posiciones de los susceptómetros más antiguos. La necesidad de que sean especímenes estándar regulares (cúbicos o cilíndricos con medidas exactas) suele ser un inconveniente para el uso de los sistemas automatizados. Este factor, sumado a la necesidad creciente de muestreo de litologías finas (en el caso de rocas detríticas) o a la imposibilidad de muestrear rocas compactas mediante perforadoras portátiles (por ejemplo, rocas con fuerte fisibilidad) constituyen la motivación para fabricar soportes cúbicos de bajo coste mediante una impresora 3D. En este trabajo analizamos las propiedades magnéticas de los diferentes tipos (colores) de plástico utilizadas y ofrecemos una comparación entre los resultados obtenidos a partir de especímenes estándar y la técnica de fragmentos orientados propuesta.

Palabras clave: fábricas magnéticas, fragmentos, soporte, orientación, Kappabridge.

Geogaceta, 77 (2025), 19-22

<https://doi.org/10.55407/geogaceta108703>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 15/07/2024

Fecha de revisión: 30/10/2024

Fecha de aceptación: 29/11/2024

Introducción

Los avances en la medida de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) han permitido la automatización progresiva del proceso, de modo que mediante el puente de susceptibilidad magnética o Kappabridge es posible pasar de realizar la medida en 15 posiciones (por ejemplo con el Kappabridge KLY-2 y KLY-3, de Agico, República Checa) a tres (mediante los modelos KLY-3S y KLY-4 desarrollados por la misma compañía) y recientemente a una única posición para cada espécimen (modelo KLY-5, también de Agico, ver, por ejemplo, Chadima y Studynka, 2013).

El equipo Kappabridge KLY-5 de Agico para la medición de la susceptibilidad magnética exige la preparación de las muestras con una forma geométrica definida, cúbica o cilíndrica con el objetivo de ser colocada y fijada en el brazo móvil rotativo encargado de girar la muestra durante la aplicación del campo magnético inducido y el registro de la medida. Cuando las muestras están fracturadas, sin posibilidad de reconstrucción, o bien solo son fragmentos demasiado pequeños para su fijación, surgió la necesidad de disponer de un soporte realizado a medida donde situar y fijar la muestra en el brazo móvil de tal forma que permitiera su rotación sin perder su posición.

Los continuos avances en el conocimiento de la ASM de diferentes materiales geológicos han demostrado que las litologías más finas registran la deformación de manera más fiable (ver, por ejemplo, Soto *et al.*, 2009, 2022; Pueyo Anchuela *et al.*, 2010; García-Lasanta *et al.*, 2016; Simón-Muzás *et al.*, 2024). Ello comporta dificultades en las técnicas de muestreo que lleva en algunos casos a extraer directamente fragmentos de dimensiones menores de 1 cm, que pueden orientarse en el campo (aunque con cierta dificultad, dado el pequeño tamaño de muchos planos de orientación) y analizarse posteriormente en el laboratorio (Simón-Muzás *et al.*, 2024). Hasta

ahora, la medida de fragmentos irregulares se ha aplicado sobre todo a especímenes no orientados (Gracia-Puzo *et al.*, 2022; Gracia-Puzo, 2024). En estos trabajos se demuestra que la medida de la ASM es independiente de la forma de la muestra, debido precisamente al sistema de medida de las últimas generaciones de los puentes de susceptibilidad. Gracia-Puzo *et al.* (2022) proponen la colocación de la muestra en un portamuestras cilíndrico. En la propuesta que presentamos, el portamuestras es cúbico, ya que permite orientar (siempre que una de las facetas de la muestra sea plana) y aprovechar (ya que en general las muestras fragmentadas presentan caras planas) la muestra de forma más eficaz, aunque podrían diseñarse de igual manera portamuestras de tipo cilíndrico con un mismo objetivo.

Metodología

Para el diseño del soporte se ha empleado el software de diseño y modelado en 3D, de distribución libre, Blender, en su versión 3.6. Los aparatos utilizados para las medidas de la ASM fueron: i) el Kappabridge KLY-5, realizando medidas en una posición con una frecuencia de 400 Hz y campo de 1220 A/m; y ii) el Kappabridge KLY-3, realizando medidas manuales en 15 posiciones con una frecuencia de 875 Hz y campo de 596 A/m.

Para poder testear el prototipo de soporte se ha analizado la ASM en dos conjuntos de muestras. El primero correspondiente a una metapelita del Cambro-Ordovícico de la Zona Axial Pirenaica (Formación Jújols, Pirineos Catalanes) y el segundo correspondiente a una limolita roja del Pérmico (Unidad Roja Superior de la Cuenca del Cadí, Pirineos Catalanes). Estas dos litologías se han escogido porque frecuentemente presentan dificultades para su extracción mediante bloques o perforación de testigos orientados dada su fragilidad y fisibilidad. Las muestras de metapelita se han analizado en dos modalidades,

i) cubos estándares orientados y ii) fragmentos irregulares orientados dentro del soporte plástico propuesto. Ambos tipos de medidas se han realizado mediante el modelo KLY-5 del susceptómetro Kappabridge. Las muestras de limolita roja Pérmica se han medido como i) fragmentos irregulares orienta-

dos dentro de un soporte convencional de metacrilato comercial (dimensiones de 23x23x23 mm y grosor de pared 2 mm, adquiridos en ASC Scientific, proveedores de material para paleomagnetismo) y ii) como fragmentos irregulares orientados dentro del soporte propuesto. En el caso de los cubos de metacrilato las medidas se realizaron mediante el Kappabridge KLY-3 (ya que por sus dimensiones no encajan en los otros portamuestras), y las segundas mediante el Kappabridge KLY-5. Con el análisis de las metapelitas Cambro-Ordovícicas de la Fm. Jújols se pretende comparar las medidas de los cubos orientados estándares con los fragmentos (más pequeños) orientados en el soporte propuesto y en las limolitas Pérmicas comparar el soporte convencional de metacrilato con el soporte fabricado.

El diseño 3D para el soporte

Para elaborar el soporte se planteó la realización de un portamuestras cúbico de 20x20x20 mm, con un grosor de pared de 0.55 mm (el mínimo posible con la impresora utilizada, el modelo Ultimaker S5 3D Pro Bundle). El peso aproximado del cubo resultante está entre 1 g y 1,25 g, y el volumen de material destinado a fabricarlo entre 1 y 1,25 cm³, dependiendo de los parámetros de ejecución de la impresión.

Se definieron las medidas necesarias para crear un cubo hueco, abierto en la parte superior, donde una de las caras albergara una flecha que ayudara a indicar la orientación de la muestra una vez colocada en su interior (Figura 1.A,B). Se imprimió en plástico ABS a través de un archivo STL generado por Blender y denominado Prototipo 1 (Figura 1).

Curiosamente, el hueco con la silueta en forma de flecha lleva a varios problemas de impresión (especialmente en la flecha dirigida hacia abajo, Fig. 1,B). Ante este problema, y teniendo en cuenta que las muestras usadas llevan la orientación marcada en alguna de sus caras, se decidió eliminar el corte geométrico en forma de flecha en el cubo y sustituirlo por un corte rectangular que permitiera poder ver la sigla orientada de la muestra, (Fig. 1,C). La convención utilizada es que la flecha de referencia de la muestra correspondiente a la orientación (dip direction y dip) tomada en el campo quede apuntando hacia abajo (tapa inferior Fig.

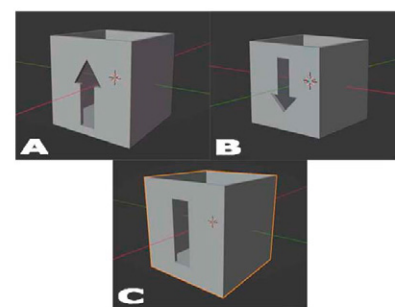


Fig.1. Los tres prototipos realizados. A. Prototipo 1. B. Prototipo 2. C. Prototipo 3. Ver figura en color en la versión web.

Fig.1. The three prototypes performed. A. Prototype 1. B. Prototype 2. C. Prototype 3. See color figure on web.

2). En la impresión los problemas de interpretación de ejes y caras que genera la flecha no se reproducen con el rectángulo y el cubo se imprime sin errores (Fig.3). Tras las comprobaciones finales relacionadas con medidas y anclaje en el equipo de medición se autorizó la impresión (Fig. 4) de las primeras doscientas unidades, con un coste neto de 0.50 €.

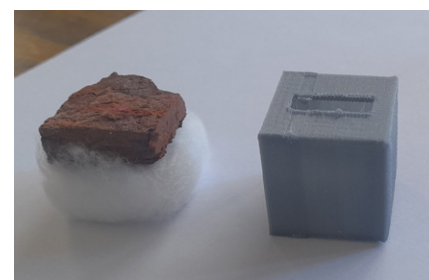


Fig. 2. Ejemplo de preparación de un fragmento irregular orientado en el soporte gris, limolita del Pérmico, con relleno de algodón evitando que se mueva en el soporte. Ver figura en color en la versión web.

Fig. 2. Example of preparation of an irregular fragment on the grey cube, Permian siltstone, with cotton filling preventing it from moving within the cube. See color figure on web.

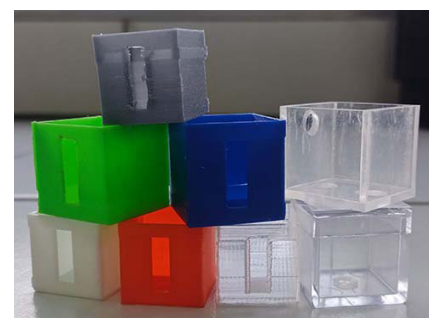


Fig.3. Cubos ABS impresos y los de polimetilmetacrilato. Ver figura en color en la versión web.

Fig. 3. The printed ABS cubes and those made of polymethyl methacrylate. See color figure on web.



Fig. 4. Código QR para descarga del archivo STL.
Fig. 4. QR code to download the STL file.

Propiedades magnéticas de los soportes propuestos. Comparación con otros materiales

Las susceptibilidades magnéticas obtenidas en los soportes propuestos (3 medidas por soporte) muestran un comportamiento diamagnético con susceptibilidades negativas bajas (en valor absoluto) a muy bajas, en general con valores absolutos menores de 1×10^{-6} S.I. Los grados de anisotropía P_j se sitúan alrededor de 1.04 y los factores de forma del elipsoide magnético en el campo

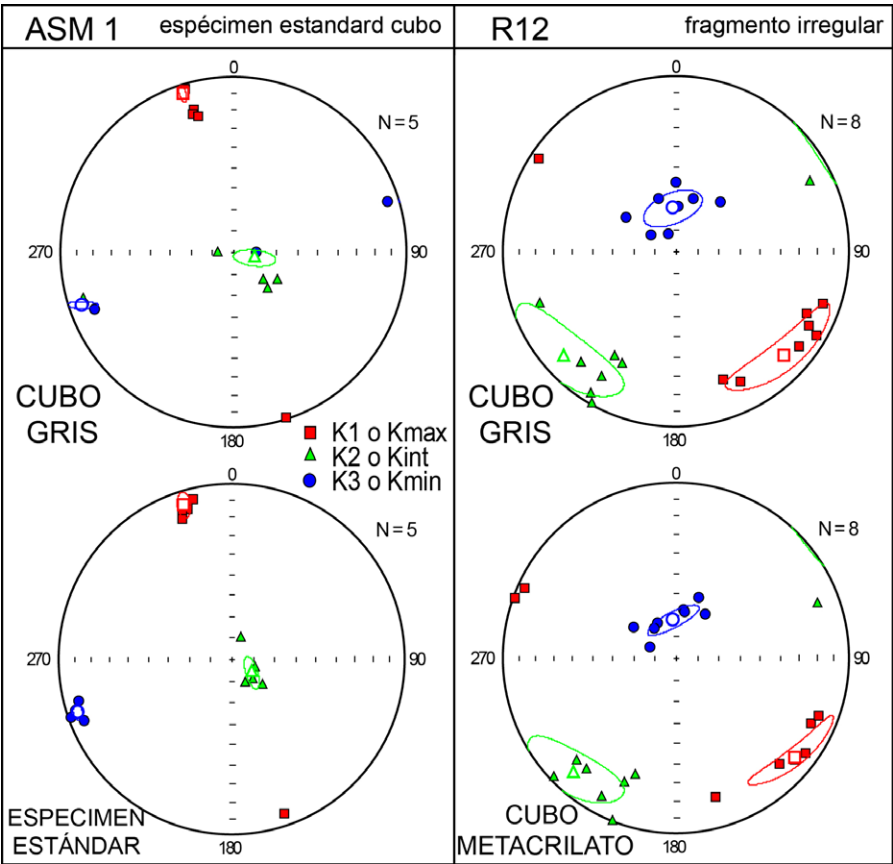


Figura 5. Fabricas magnéticas (análisis de la ASM) en coordenadas geográficas. Ejes: mayor (K1), intermedio (K2) y menor (K3) del elipsoide magnético de susceptibilidad con su eje medio y la elipse de confianza del 95%. Ver figura en color en la versión web.
Figure 5. Magnetic fabrics (ASM analysis) in geographic coordinates. Axes: maximum (K1), intermediate (K2) and minimum (K3) of the magnetic susceptibility ellipsoid with its mean axis and the 95% confidence ellipse. See color figure on web.

COLOR CUBO	Km	Km std.dev	K1	K2	K3	Pj	T
Azul	-0,692x10 ⁻⁶	0,309x10 ⁻⁶	099/03	009/09	205/81	1,15	-0,63
Blanco	-0,650x10 ⁻⁶	0,344x10 ⁻⁶	359/05	241/79	090/10	1,39	1,338
Gris	-0,260x10 ⁻⁶	0,317x10 ⁻⁶	177/04	059/82	268/07	1,307	-0,843
Naranja	-0,586x10 ⁻⁶	0,192x10 ⁻⁶	086/53	178/01	269/37	1,253	-1,995
Naranja grueso	-2,11x10 ⁻⁶	0,0000226x10 ⁻⁶	035/10	304/01	206/79	1,06	-0,443
Transparente	-0,290x10 ⁻⁶	0,0670x10 ⁻⁶	175/07	038/80	266/07	1,307	-0,483
Metacrilato sin tapa AGICO	-3,42x10 ⁻⁶	2,49x10 ⁻⁶	072/36	170/10	277/53	1,044	0,798
Metacrilato con tapa ASC	-2,90x10 ⁻⁶	0,270x10 ⁻⁶	161/63	040/14	304/22	1,022	0,198
Metacrilato octogonal AGICO	-2,43x10 ⁻⁶	0,0600x10 ⁻⁶	144/01	054/34	235/56	1,036	-0,916

Tabla 1: Propiedades de cada soporte fabricado mediante impresora 3D y pigmentos (azul, blanco, naranja, blanco, gris y comerciales de metacrilato) y con doble espesor (naranja grueso). Valor de susceptibilidad media (Km) con sus K1, K2 y K3: orientación de los ejes máximo, intermedio y mínimo del elipsoide de susceptibilidad magnética Pj: grado de anisotropía corregida. T: parámetro de forma. Ver figura en color en la versión web.
Table 1: Properties of each support manufactured using a 3D printer and pigments (blue, white, orange, white, gray and commercial methacrylate) and with double thickness (thick orange). Average susceptibility value (Km) with its K1, K2 and K3: orientation of the maximum, intermediate and minimum axes of the magnetic susceptibility ellipsoid. Pj: degree of corrected anisotropy. T: shape parameter. See color figure on web.

Estación	Tipo de soporte	Media Km estación	Pj	D. Stand.	T	Dv. Stand.	Kmax_Dec	α95	Kint_Dec
ASM1	Cubo gris	185,64x10 ⁻⁶	1,086	0,022	0,523	0,417	342/0,5	5,5/1,2	105/80
	E. estándar	156,66x10 ⁻⁶	1,08	0,004	0,686	0,06	342/0,9	8/2,4	123/79
R12	Cubo gris	244,32x10 ⁻⁶	1,064	0,008	0,651	0,116	134/15	25,3/8,5	228/13
	Cubo metacrilato	334,27x10 ⁻⁶	1,072	0,009	0,596	0,089	130/13	20,8/5,0	222/12

Tabla 2: Comparación de los parámetros Pj: grado de anisotropía corregido; T: parámetro de forma y la orientación de los ejes K1, K2 y K3: valor máximo, intermedio y mínimo del valor de susceptibilidad y su desviación estándar para cada caso. Ver figura en color en la versión web.
Table 2.: Comparison between the different parameters. Pj: corrected degree of anisotropy. T: shape parameter. K1, K2, K3, orientation of the maximum, intermediate and minimum susceptibility axes and their standard deviation in each case. See color figure on web.

triaxial (próximos a $T=0$). Una característica que se observa es que el grado de anisotropía aumenta de forma exponencial al reducirse el valor absoluto de la susceptibilidad total, de acuerdo con lo señalado por Hrouda (2004) en materiales diamagnéticos. No obstante, dado que su susceptibilidad es uno, dos o tres órdenes de magnitud menor que la de los materiales naturales su influencia en la medida final puede considerarse despreciable.

La comparación con el soporte de metacrilato (cajas cúbicas comercializadas por ASC) comerciales muestra que tanto la susceptibilidad magnética (en valor absoluto) como la anisotropía del soporte de metacrilato (cajas) comercial son más altas que las obtenidas con los soportes fabricados mediante la impresora 3D (Tabla 1).

Comparación con medidas de muestras de tamaño estándar.

La comparación de los resultados obtenidos a partir de las muestras analizadas mediante la técnica de los fragmentos orientados y de las muestras cortadas a tamaño estándar muestra unos resultados muy similares para ambas técnicas (Fig. 5 y Tabla 2), tanto en las orientaciones de los ejes del elipsoide de susceptibilidad magnética (K_1 , K_2 y K_3) como en los parámetros magnéticos T y P_j . El valor de la susceptibilidad media (K_m) experimenta mayores variaciones, que interpretamos como resultado de la no corrección del volumen en los especímenes "estándar". Efectivamente hemos comprobado que dichos volúmenes pueden desviarse hasta más de un 10% del valor asumido por el Kappabridge.

Los valores de desviación angular entre las orientaciones del elipsoide de susceptibilidad magnética para el espécimen medido con el soporte y el espécimen estándar son de menos de 2° para los tres ejes. La desviación mayor en declinación para el eje próximo a la vertical es aparente debido a la alta inclinación, pero el valor angular se mantiene dentro del margen citado. En el caso del cubo de metacrilato las desviaciones son algo mayores (hasta 5°), pero el resto de parámetros se mantiene constante.

Conclusiones

El modelo de soporte de plástico gris realizado mediante la impresora 3D es el ideal desde el punto de vista de sus propiedades magnéticas, y mejora considerablemente (tanto en facilidad de manejo como en el precio) las opciones existentes hasta el momento para la medida de la ASM en fragmentos irregulares de litologías frágiles y fisibles. Además, su bajo precio (50 céntimos por cubo) permite el análisis de numerosos especímenes en una misma estación, y su conservación para medidas futuras. El acabado final depende del tiempo de ejecución, y los resultados de las medidas realizadas son muy similares a las obtenidas con especímenes estándar o cubos de metacrilato utilizados habitualmente.

Contribución de los autores

Gustavo Higuero: idea, programación, medidas, redacción, discusión.

Ana Simón-Muzás: idea, medidas, discusión.

Antonio Casas: idea, redacción, planificación, discusión.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Servicio General de Apoyo a la Investigación- SAI, Universidad de Zaragoza por facilitar el uso de sus instalaciones y la impresora 3D. Este trabajo es parte del proyecto PID2019-108753 GB-C22 financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades MCIN/AEI/10.13039/501100011033, "ERDF A way of making Europe" y "ESF Investing in your future". El grupo de investigación Geotransfer, perteneciente al IUCA ha cofinanciado también este trabajo a través de la subvención concedida por el Gobierno de Aragón.

Referencias

- García-Lasanta, C., Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., Casas, A. M., Gil Peña, I., Speranza, F. y Mochales, T. (2016). *Journal of the Geological Society*, 173(1), 127-141.
- Gracia-Puzo, F., Aubourg, C. y Casas Sainz, A. (2021). *Journal of Structural Geology*, 152, 104443.
- Gracia Puzo, F. (2024) *Fábricas magnéticas y deformación asociada a cabalgamientos en la cuenca de antepaís de Jaca, Pirineos, España*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza-UPPA.
- Chadima, M. y Studynka, J. (2013). *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU2013-1449).
- Hrouda, F. (2004). *Geological Society, London, Special Publications*, 238(1), 49-59.
- Pueyo Anchuela, Ó., Pocoví Juan, A. y Gil Imaz, A. (2010). *Tectonophysics*, 492 (1-4), 150-163.
- Simón-Muzás, A., Soto, R., Pueyo, E. L., Beaumud, E., Oliva-Urcia, B. y Casas-Sainz, A. M. (2024). *Journal of Iberian Geology*, 1-20.