

DESCIFRANDO LA SECUENCIA DE SERPENTINIZACIÓN EN PERIDOTITAS DE LA DORSAL DEL OCEANO ATLÁNTICO (ODP LEG 209, LAT. 150N)

C.J. GARRIDO ⁽¹⁾, W. BACH ⁽²⁾, F. GERVILLA ⁽¹⁾ Y J.M. GONZÁLEZ JIMÉNEZ ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias, 18002 Granada, España.

⁽²⁾ Geoscience Department, University of Bremen, Klagenfurter Str. 2, 28359 Bremen, Alemania.

INTRODUCCIÓN

La serpentización de peridotitas oceánicas que afloran en las dorsales medio-oceánicas influencia la reología, las propiedades magnéticas, la gravedad y la estructura sísmica de la litosfera oceánica (e.g., Mével, 2003). Asimismo, numerosas expediciones oceanográficas están descubriendo campos hidrotermales asociados a peridotitas en dorsales de expansión lenta a muy lenta (Bach et al., 2002; Baker et al., 2004). Durante los procesos de serpentización se libera hidrógeno y metano que sustentan a diversas comunidades microbianas que constituyen la base de la cadena de alimenticia de ecosistemas únicos asociados a estos campos hidrotermales (Kelley et al., 2001; Charlou et al., 2002). Diversos estudios han investigado las transformaciones químicas y mineralógicas durante la serpentización de muestras naturales y experimentales (Evans, 2004; Früh-Green et al., 2004; Mével, 2003). A pesar del creciente interés en investigar y comprender los procesos de serpentización, los estudios de la secuencia de serpentización en peridotitas oceánicas son escasos. En la mayoría de los casos se considera que la serpentización es una reacción global cuyos productos se generan por una única de reacción global de manera similar a los procesos de serpentización documentados en peridotitas de macizos orogénicos o complejos ofiolíticos. En esta comunicación presentamos un estudio textural y mineralógico de la serpentización de harzburgitas y dunitas perforadas durante el sondeo 1274A del «Ocean Drilling Project» (Leg 209) de la dorsal atlántica.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La falla transformante en la latitud 15°20'N de la dorsal atlántica es conocida por ser una región con extensos afloramientos de serpentinitas y por la presencia de numerosos campos hidrotermales submarinos [Rona, et al., 1987]. En las proximidades de esta falla transformante, las peridotitas aparecen serpentinizadas debido a la presencia de numerosas fallas en la proximidad de la dorsal. Los procesos de serpentización de las peridotitas se inician en profundidad durante el levantamiento progresivo y emplazamiento final del manto litosférico oceánico en el eje de la dorsal [Bach, et al., 2004].

El sondeo 1274 del «ODP Leg 209» se realizó a 31 km al norte de la falla transformante, en el flanco occidental del eje de la dorsal atlántica a una profundidad de 3490 m y a unos 700 m al oeste de la terminación de un despliegue extensional [Kelemen, et al., 2004]. El sondeo perforó 156

m de los que se recuperaron unos 34.7 m de harzburgitas y dunitas cortadas por una zona de falla. El porcentaje de serpentización es de 60-70% y aumenta con la profundidad hasta el 100% a unos 100 metros, donde aparece la zona de falla, y disminuye posteriormente hasta un 85-90% hacia el fondo del sondeo. La variación vertical de la serpentización se refleja en las variaciones de las propiedades físicas del sondeo. La susceptibilidad magnética es baja al principio del sondeo y aumenta gradualmente alcanzando valores de 0,1 Si a 110 metros, disminuyendo posteriormente hacia el fondo del sondeo. La densidad disminuye a un mínimo de 2500 kg/m³ cuando la serpentización es completa [Kelemen et al., 2004].

PETROGRAFÍA

El estudio petrográfico y de microscopía electrónica de transmisión ponen de manifiesto que las peridotitas del sondeo 1274A se han serpentizado durante una secuencia de reacciones relativamente simple. La serpentización del olivino genera texturas en malla con restos de olivino en el núcleo y lizardita ocupando el borde de las mallas (Fig. 1 A), seguida por el reemplazamiento de los núcleos de olivino por una segunda generación de lizardita y brucita (Fig. 1b). Los núcleos de olivino y la lizardita carecen de magnetita (Fig. 1a). Sin embargo, en las zonas de la roca que están completamente serpentinizadas aparece abundante magnetita en venas o parches (Fig. 1a, b). El ortopiroxeno está completamente reemplazado a bastita.

La Figura 2 muestra la composición del olivino y ortopiroxeno serpentizado en el diagrama ternario FeO-SiO₂-MgO. Los análisis mediante microsonda electrónica muestran que el ortopiroxeno y el olivino poseen números de Mg ($Mg\# = 100 \times Mg/(Mg+Fe)$) de 90. La composición de los relictos de olivino en los bordes de las mallas muestran que los estadios iniciales de serpentización generan olivino más magnésico con un Mg# de 95. Numerosos análisis definen un campo de variación lineal que conectan los miembros puros del olivino y lizardita, extendiéndose hacia la composición de la brucita férrica con un Mg# de 75 (Fig. 2). Junto a la carencia de magnetita, esta variación composicional en el ternario FMS muestra que los estadios iniciales de serpentización el hierro se concentra fundamentalmente en la brucita en un proceso que es cuasi-isoquímico. Por el contrario, los núcleos de olivino se reemplazan en un estadio más tardío por lizardita (Mg# 95) y brucita más magnésicas (Mg# 90). En la serpentización del ortopiroxeno, el un Mg# es constante y el ortopiroxeno con un Mg# 90 es pseudomorfizado por serpentina con un Mg# 90.

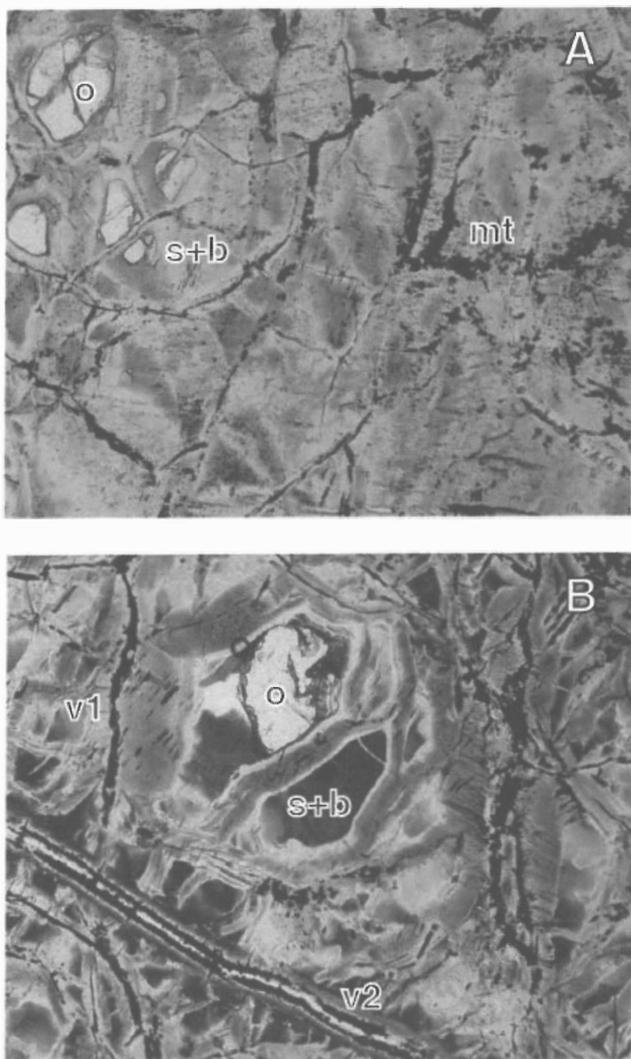
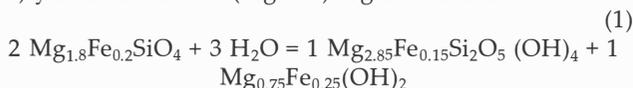


Figura 1: Fotos de lámina delgada (nicoles paralelos) de las serpentinitas del sondeo 1274A. El ancho de la foto corresponde a 1.7 mm. (A) Textura mallada de alteración con los núcleos de olivino (o), en la parte superior izquierda, y con brucita y serpentinita (s+b) ocupando los bordes de la malla. La magnetita (mt) aparece fundamentalmente en venas y en parches donde la serpentinitización es completa. (B) Texturas de reemplazamiento de los núcleos de olivino (o) por serpentinita y brucita (s+b). Una primera generación de venas de magnetita (V1) está cortada por venas más tardías (V2).

REACCIONES DE SERPENTINIZACIÓN

Las relaciones texturales y las variaciones composicionales descritas anteriormente son coherentes con la siguiente secuencia de reacciones de serpentinitización. En los primeros estadios de serpentinitización tiene lugar una reacción isoquímica en la que el olivino (Mg# 90) se transforma a lizardita (Mg# 95) y ferroan-brucita (Mg# 75) según la reacción:



Posteriormente la ferroan-brucita reacciona con sílice en solución acuosa SiO₂(aq) y, en sistema abierto, formaría lizardita y magnetita:

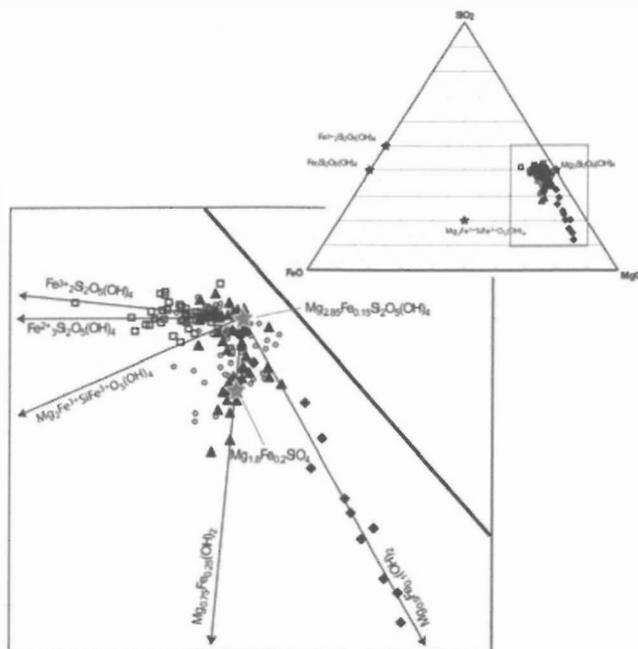
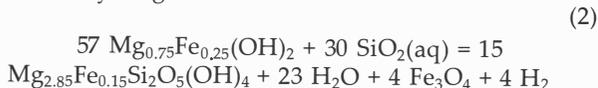
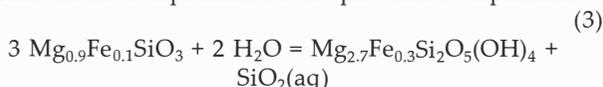


Figura 2: Diagrama triangular del sistema FeO-SiO₂-MgO (mol%) en la que se representan la composición de los análisis de serpentinita y brucita del sondeo 1274A. El cuadro superior derecha muestra el ternario con los miembros puros de los minerales del grupo de la serpentinita (estrellas). El recuadro en el ternario muestra la porción del ternario que se muestra aumentada en el diagrama inferior.

Símbolos: círculos = serpentinita no pseudomórfica generada por la alteración del olivino; cuadrados = serpentinita generada por alteración de ortopiroxeno; diamantes = núcleos de las texturas en malla; triángulos = bordes de las texturas en malla; Nótese como los análisis de la serpentinita de los bordes de la texturas en malla se representan a lo largo de una línea que conecta al olivino con un Mg# de 95 y la brucita con un Mg# de 75. La brucita analizada en los núcleos de las texturas malladas es más magnésica (Mg# 90) y aparece en una mayor proporción modal.

La fuente de SiO₂(aq) provendría fundamentalmente de la reacción de descomposición de ortopiroxeno a serpentinita:



Debido a la que la velocidad de la reacción (1) es más rápida que la de la reacción (3), la reacción (3) tendría un efecto preponderante en el control de la composición de los fluidos de serpentinitización en los estadios avanzados de serpentinitización, cuando el olivino estuviera casi consumido.

RELACIÓN CON LA VARIACIÓN DE LA SUCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA Y LA DENSIDAD

La susceptibilidad magnética de las muestras de peridotitas con proporciones variables de serpentinitización 70-100%) del sondeo 1274A aumenta exponencialmente a medida que disminuye la densidad de la roca (Fig. 3). La relación entre estas propiedades físicas con el grado de serpentinitización pueden calcularse utilizando el método propuesto por Toft *et al.* [1990] para diferentes secuencias de reacción. Nuestros cálculos confirman la conclusión de Toft *et al.* (1990) de que ninguna reacción global única de serpentinitización es capaz de reproducir la variación de estas propiedades físicas con el

grado de serpentización. Por ejemplo, la reacción global que se invoca usualmente para la serpentización de olivino y que genera lizardita, brucita y magnetita no explica la variación de susceptibilidad magnética ya que aumentaría exponencialmente desde los inicios de la serpentización (Fig. 3; línea discontinua).

Para comprobar si la secuencia de reacciones deducidas en nuestro estudio es coherente con las variaciones de estas propiedades físicas, hemos calculado la variación de estas propiedades a partir de las reacciones (1) y (2). Los resultados se muestran en la figura 3 (línea sólida). Este modelo se supone que la reacción (1) domina en los estadios iniciales de la serpentización, mientras que la reacción (2) es progresivamente más importante en los estadios finales de la serpentización. De acuerdo con las observaciones texturales, suponemos que en los estadios iniciales hasta un 40 mol% de serpentización tiene lugar exclusivamente la reacción (1) a un ritmo de 0.1 mol de serpentina por incremento de la reacción. La reacción (2) tiene lugar cuando se producen 0.5 moles de serpentina y su importancia relativa aumenta con el progreso de la reacción según una función exponencial empírica con un exponente arbitrario en la que se obtiene el mejor ajuste a la curva empírica de serpentización.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La formación de magnetita durante los procesos de serpentización tiene implicaciones fundamentales para las propiedades magnéticas de las serpentinitas oceánicas, que es fundamental para la interpretación de las anomalías magnéticas en los fondos oceánicos en los que dominan las peridotitas sobre las rocas volcánicas o plutónicas máficas que suele ser el caso de muchas dorsales oceánicas de expansión lenta a muy lenta. Toft *et al.* (1990) postularon que la única manera de explicar las propiedades magnéticas y la densidad de serpentinitas oceánicas era suponer que la serpentización tenía lugar durante reacciones elementales en las que se generarían ferroanbrucita y minerales del grupo de la serpentina. Posteriormente, Oufi *et al.* (2002) concluyeron que las peridotitas sólo alcanzaban una magnetización remanente similar a la observada en rocas basálticas cuando el grado de serpentización era superior al 75%. Los resultados de nuestro estudio coinciden con estos trabajos y muestran que la producción máxima de magnetita durante la serpentización se genera en un estadio tardío de la secuencia de reacción cuando la peridotita muestra un grado de serpentización entre 60-70%. Según nuestras observaciones, en contextos oceánicos la serpentización comenzaría con un bajo flujo de fluidos que transformaría el olivino a serpentina y ferroanbrucita. Los estadios posteriores de serpentización tendrían lugar en un sistema con un mayor flujo de fluidos en los que se generarían magnetita principalmente a partir de la descomposición de la ferroanbrucita. La formación de magnetita por este mecanismo de reacción requiere una alta actividad de la sílice y, por tanto, esta reacción estaría inhibida en los estadios iniciales de reacción donde la composición de los fluidos estaría controlada por la reacción de descomposición del olivino. Cuando el olivino se encuentra casi consumido, la composición de los fluidos estaría controlada por las reacciones de transformación del ortopiroxeno. Esta segunda reacción generaría un aumento relativo de la actividad de $\text{SiO}_2(\text{aq})$ que facilitaría la transformación de ferroanbrucita a serpentinita y magnetita.

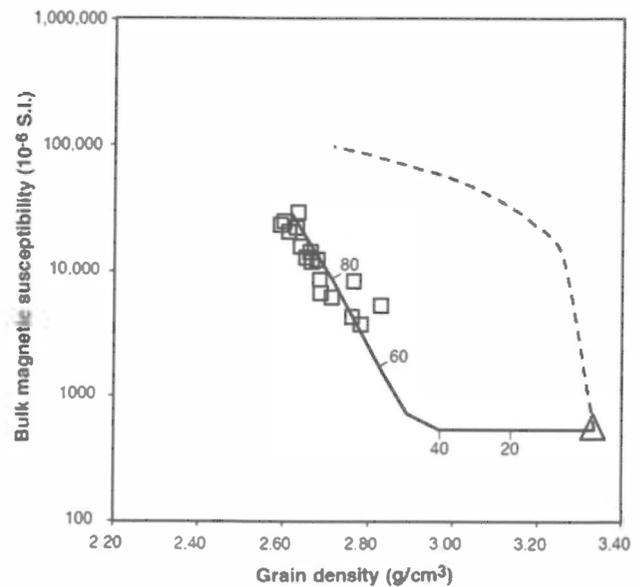


Figura 3: Relación entre la susceptibilidad magnética global y la densidad en serpentinitas del sondeo 1274A. El triángulo representa una peridotita fresca. Las líneas representan la evolución de estas propiedades físicas calculadas para diferentes secuencias de reacción utilizando el método propuesto por Toft *et al.* (1990). La línea discontinua representa una reacción global única de serpentización del olivino (Fo= 90) y agua a lizardita, brucita, magnetita e hidrógeno (reacción 15 de Toft *et al.*, 1990). La línea continua representa una reacción de serpentización en dos reacciones elementales. Más explicaciones en el texto.

Otro aspecto clave de la secuencia de reacción propuesta reside en la generación de H_2 que es de importancia trascendental para la evolución de la composición de los fluidos de serpentización y, por tanto, la generación de metano que alimenta los habitas microbianos asociados a los campos hidrotermales submarinos. La cantidad de H_2 generada durante las reacciones de serpentización sólo puede calcularse a partir de equilibrio de fase (Frost, 1985; Sleep *et al.*, 2004). Las principales incertidumbres en los cálculos de equilibrio de fase son los datos termodinámicos para la brucita y la partición de Fe entre los silicatos y la brucita. Sleep *et al.* (2004) sugirió que el equilibrio serpentina-brucita-magnetita alcanza la supersaturación en H_2 en el rango de temperatura de 160 a 350°C para presiones de 500 bars. La alta producción de H_2 deducida por estos autores supone, basándose en datos de serpentinitas no oceánicas, que la fracción molar de Fe^{2+} entre serpentina y brucita es cercana a 2. Nuestros datos muestran que durante los estadios tardíos de serpentización, cuando tiene lugar el paroxismo de la producción de magnetita y, por tanto, de hidrógeno, la partición entre serpentinita y brucita es efectivamente de 2, lo que implica que las conclusiones de Sleep *et al.* (2004) son pertinentes para ambientes de serpentización submarinos. Así, las reacciones (1) a (3) generan 28.5 moles de olivino (4.2 kg) para producir un mol de (H_2). Si consideramos un cociente de agua/roca de 1, estas reacciones generaría 250 mM de H_2 , que se sitúa por debajo de la solubilidad de $\text{H}_2(\text{aq})$ (que es de 1.4 M a 300 oC y 500 bar), pero que es inferior a las concentraciones de $\text{H}_2(\text{aq})$ medidas en fluidos hidrotermales de campos hidrotermales submarinos asociados a serpentinitas (12-16 mM; Charlou *et al.*, 2002).

Finalmente, querríamos recalcar en esta comunicación que la secuencia de serpentinización descrita en nuestras muestras no tienen por que ser representativas de todos los procesos de serpentinización. De hecho, la composición de los fluidos en sistemas hidrotermales submarinos (e.g., Kelley et al., 2001, Charlou et al., 2002) sugieren una gran variabilidad del pH, $a_{H_2}(aq)$ y de $a_{SiO_2}(aq)$ que implican diferentes condiciones de interacción entre peridotitas y el agua del mar. Nuestro entendimiento de las reacciones de serpentinización requiere estudios detallados de muestras serpentinizadas de los fondos oceánicos y de la modelización geoquímica y experimental de la cinética de las reacción de serpentinización en diferentes condiciones fisico-químicas.

REFERENCIAS

- Bach, W. et al. (2002), *Geochem. Geophys. Geosys.*, 3, 10.1029/2001GC000279.
- Bach, W. et al. (2004), *Geochem. Geophys. Geosys.* 5, Q09F26, doi: 10.1029/2004GC000744.
- Baker E. T., et al. (2004), *Geochem. Geophys. Geosys.*, 5, Q08002, doi: 08010.01029/02004GC000712.
- Charlou J.-L., et al. (2002), *Chem. Geol.*, 191.
- Evans B. W. (2004), *Int. Geol. Rev.*, 46, 479-506.
- Frost, B. R. (1985), *J. Petrol.*, 26, 31-63.
- Früh-Green G. L. et al. (2004), en: *The subsurface biosphere at mid-ocean ridges*, edited by W. S. D. Wilcock, et al., pp. 119-136, AGU, Washington, DC.
- Kelemen, P. et al. (2004), *JOIDES Journal*, 30, 14-20.
- Kelley, D. S. et al. (2001), *Nature*, 412, 127-128.
- Mével, C. (2003) *C. R. Geoscience*, 335, 825-852.
- Oufi, O., et al. (2002), *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JB000549.
- Sleep, N. H. et al. (2004), *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 12818-12823.
- Toft, P. B. et al. (1990) *Phys. Earth Planet. Int.*, 65, 137-157.