ÓXIDOS, SULFUROS Y ALEACIONES DE FE-NI EN LAS SERPENTINITAS DE LA DORSAL MEDIOATLÁNTICA (LEG 209, SONDEO 1274A)

J.M. González-Jiménez, F. Gervilla y C.J. Garrido

Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18002 Granada, España.

INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados por Eckstrand (1975) y Frost (1985) demostraron que las paragénesis de óxidos, sulfuros y aleaciones de Fe-Ni-Cu reflejan las condiciones de fugacidad de oxígeno y azufre durante la serpentinización. La formación de minerales del grupo de la serpentina implica la degradación del olivino a partir de la reacción de este con agua; tal argumento ha llevado a diversos autores (Alt, 1995; Alt y Shanks 1998, Sleep et al., 2004, Luguet et al., 2003; entre otros) al planteamiento del importante papel que debe jugar el agua de mar en los procesos de serpentinización de las peridotitas presentes en el suelo oceánico. Alt y Shanks (1998) y Luguet et al., (2003) establecieron las condiciones de serpentinización para peridotitas que afloran en el suelo oceánico, a partir de las asociaciones y paragénesis de los óxidos, sulfuros y aleaciones de Fe-Ni-Cu

presentes. En esta línea Bach et al., 2004 y Bach et al., (2006) han estudiado muestras de peridotitas alteradas hidrotermalmente que afloran en el área de la zona de fractura situada a 15 º20'N en la dorsal medio-atlántica. Estas muestras se obtuvieron en sondeos realizados durante el Ocean Drilling Program Leg 209. Los estudios realizados por estos autores sobre la petrografía de los silicatos presentes en estas muestras mostraron la existencia de dunitas y harzburgitas casi o totalmente serpentinizadas con cantidades menores de sulfuros de Fe-Ni-Cu. Bach et al., 2004 establecieron el patrón de evolución de la alteración de las peridotitas en uno de los emplazamientos estudiados durante el Ocean Drilling Program Leg 209 (emplazamiento 1268), en el cual, las condiciones de alteración determinadas por las asociaciones minerales presentes pertenecen a las etapas de serpentinizacion principal y tardía definidas por Alt y Shanks (1998, 2003). En este trabajo presen-



Figura 1: Localización geográfica (A) y perfil litológico (B) del sondeo 1274A. Tomado de Bach et al., (2004).

Muestra	Pn	Co-Pn	Hz	Ср	CoS	Aw	Cu	Localización	Pn	Co-Pn	Hz	Ср	CoS?	Aw	Cu
1274A-1R1- 40-46	••	• • •	•		•	• •		Olv	+		+			+	
1274A-2R1- 31-34	• • •	• • •	•	•	•	• • •		Орх		+	+			+	
1274A-07R1- 69-75	•	• • •				• • •	• •	Срх							
1274A-8R1- 72-82	•	• • •				• • •		Srp	+		+		+	+	
1274A-13R1- 17-24	• • •	• • •	•					Crs	+		+	+		+	+
1274A-15R1- 43-48		• • •	•		• •	• •		Mt/Sp	+		+			+	

Figura 2: Abundancia mineral de las fases reconocidas. Presente (%) < 10%, abundante(% %) 10-25 %, muy abundante (% % %) > 25 %. Localizado en la posición textural:(+). Pn: pentlandita, Co-pn: cobalto pentlandita, Hz: heazlewoodita, Cp: calcopirita. CoS: monosulfuro de cobalto, Aw: awaruita, Cu: cobre nativo.

tamos los resultados preliminares del estudio de los minerales metálicos presentes en muestras obtenidas en el sondeo 1274A estudiado por Bach et al (2004) y Bach et al., (2006) (Figura 1).

MINERALOGÍA DE LOS ÓXIDOS, SULFUROS Y ALEACIONES

Las asociaciones de minerales resultantes de la alteración de los silicatos primarios (olivino, clinopiroxeno y ortopiroxeno) reconocidas por Bach et al., (2004) está constituida por serpentina (lizardita), brucita y en menor medida talco y tremolita. Además de estas fases, en el presente trabajo se han reconocido venas de crisotilo que cortan a la matriz serpentinítica. Asociadas a estas fases silicatadas se han reconocido varios tipos de minerales metálicos, entre los que se incluyen óxidos, sulfuros y aleaciones de Fe-Ni, y elementos nativos. Estos minerales se encuentran frecuentemente formando agregados y más raramente granos aislados. El tamaño de los granos es muy variable: < 1 µ a >200 µ. Los óxidos reconocidos son cromita y magnetita; los sulfuros son pentlandita [(Fe,Ni)₈S₉], Co-pentlandita [(Co,Fe,Ni)₈S₉], heazlewoodita (Ni₃S₂), calcopirita [(Cu,Fe)S] y un monosulfuro de Co (posiblemente jaipurita). La única aleación reconocida es awaruita (FeNi₃), y el elemento nativo es Cu. La pentlandita, la Co-pentlandita, la heazlewoodita y la awaruita se presentan incluidas en silicatos magmáticos (olivino y ortopiroxeno) parcialemente alterados y en minerales del grupo de la serpentina (lizardita y crisotilo). La jaipurita se presenta en la matriz serpentinítica mientras que la calcopirita y el Cu nativo se presentan exclusivamente asociados a las venas de crisotilo (Figura 2).

Relaciones de reemplazamiento y química mineral

Se observa un reemplazamiento sistemático de pentlandita y Co-pentlandita por otros sulfuros (heazlewoodita, calcopirita y jaipurita), metales nativos (Cu y aleaciones Ni-Fe (awaruita)) y óxidos (magnetita). La heazlewoodita se presenta formando bordes de alteración de los cristales de pentlandita y Copentlandita, y en agregados junto con pentlandita, awaruita y magnetita . La calcopirita se presenta en granos con texturas complejas asociada a pentlandita, mientras que la jaipurita se presenta en bordes recrecidos sobre cristales previos de Co-pentlandita y awaruita, o en menor medida, en forma de granos aislados subhedrales (Figura 3).

Figura 3: Imágenes de electrones retrodispersados.

- A) Reemplazamiento de borde de pentandita por heazlewoodita.
- *B) Reemplazamiento de Co-pentlandita por heazlewoodita.*
- C) Reemplazamiento de borde de heazlewoodita por awaruita, y magnetita asociada.
- D) Reemplazamiento de pentlandita por awaruita y de awaruita por magnetita.
- E) Awaruita-magnetita.
- *F)* Cristal de Co-pentlandita con borde recrecido de monosulfuro de cobalto (jaipurita).



Los cristales de Cu nativo identificados tienen morfologías anhedrales y subhedrales, y se presentan aislados. La awaruita identificada se encuentra formando bordes de alteración de pentlandita y Co-pentlandita, en agregados compuestos por pentlandita y magnetita o heazlewoodita y magnetita, junto a magnetita en granos bifásicos y en granos aislados con secciones poligonales. Debido al tamaño reducido de los granos identificados solo unos pocos de estos han podido ser analizados cuantitativamente. En las muestras estudiadas del sondeo 1274A la composición (formula estructural) de la pentlandita es $(\rm Ni_{5.52}Fe_{3.43}Co_{0.30})_{-9.25}S_{7.72}$ (media de 9 granos) , la de la heazlewoodita es $(\rm Ni_{2.61}\ Fe_{0.37})_{-2.98}\ S_{1.92}$ (media de 3 granos) y, la de la awaruita es $Fe_{1.01}\rm Ni_{2.93}$ (media de 7 granos). (Figura 4).



Figura 4: Composición de las fases identificadas en el sistema S-Fe-Ni+Co. Pn: pentlandita, Hz: heazlewoodita, Aw: awaruita, Jd: jaipurita (monosulfuro de Co). Las líneas continuas unen minerales asociados paragnéticamente, lineas discontinuas unen minerales asociados.

DISCUSIÓN

En las muestras estudiadas en el sondeo 1274A se reconoce pentlandita y Co-pentlandita (ambos sulfuros ricos en S) en el centro de granos que presentan bordes de alteración, que en unos casos están formados por un sulfuro pobre en S (heazlewoodita) o por una aleación (awaruita). Las caracteristicas texturales expuestas anteriormente indican que los sulfuros ricos en S son reemplazados por sulfuros pobres en S y aleaciones. Este fenómeno de reemplazamiento de pentlandita por heazlewoodita y awaruita, que supone perdida de azufre, fue descrito por Eckstrand (1975) en las serpentinitas de Dumont, y por Alt y Shanks (1998) en peridotitas abisales pertenecientes al Hess Deep, y está de acuerdo con los resultados obtenidos por Frost 1985. La presencia según Alt y Shanks (1998) de los agregados de pentlandita-heazlewoodita-awaruita-magnetita es característica de harzburgitas y dunitas serpentinizadas y puede ser estable a temperaturas que varían desde cercanos a los 400 °C a menos de 100 °C. Esta paragénesis de minerales metálicos, y particularmente la presencia de awaruita, indica unas condiciones altamente reductoras así como bajas fugacidades de oxígeno y azufre en el medio.

Alt y Shanks 2003 y Bach et al., 2004 demostraron que durante el proceso de serpentinización se produce un aumento progresivo de la fugacidad de azufre y oxígeno en el medio, y que la etapa temprana o inical de la serpentinización está caracterizada por condiciones de baja fugacidad de azufre y oxígeno. Dichas condiciones reductoras, que indican el punto de partida del proceso de serpentinización, pueden alcanzarse mediante la reacción propuesta Eckstrand (1975), en la cual la interacción de olivino con agua da lugar a la formación de serpentina, brucita, magnetita e hidrógeno. La formación de magnetita mediante esta reacción supone la extracción del oxígeno de la fase acuosa lo que da como resultado un ambiente altamente reductor típico de las etapas iniciales de la serpentinización. De acuerdo con Bach et al 2006, en el sondeo 1274A, la reacción que se da es más compleja que la propuesta por Eckstrand (1975), e implica que la magnetita no se forma en los primeros estadios de la serpentinización. Según Bach et al 2006, el inicio de la reacción viene dado por la alteración del olivino a serpentina y Fe-brucita. La posterior interacción de la Fe-brucita con sílice acuosa (procedente de la alteración de de ortopiroxeno a serpentina) da lugar a la serpentina y la magnetita generando el ambiente reductor.

De acuerdo con los argumentos expuestos anteriormente, podemos interpretar que las reacciones de reemplazamiento reconocidas en el sondeo 1274A pertenecen a las estadios más tempranos de la etapa inicial de la serpentinización (Figura 5). Esta reacciones de serpentinización temprana descritas



Figura 5: Diagrama de fases para el sistema Fe-Ni-S-O a 300 ^eC y 2 kbar, modificado de Frost (1985). Hm: hematites, Py: pirita, Mt: magnetita, Po: pirrotina, Va: vaesita, Pd: polidimita, Mi: millerita, Ta: taenita, Km: kamacita.

Las diferentes líneas gruesas discontinuas marcan las etapas del proceso de serpentinización establecido por Alt y Shanks (1998, 2003). La línea punteada con punta de flecha indica la evolución definida por Batch et al., 2004.

Elipse gris oscura indica las condiciones de estabilidad definidas por la asociación mineral identificadas en el sondeo 1274A. aquí no fueron reconocidas por Batch et al., (2004) en las rocas del emplazamiento 1268 cercanas al emplazamiento 1274. El patrón de alteración de las peridotitas definido por Batch et al., (2004) para dicho emplazamiento (1268) se desarrolla a lo largo de las etapas principal y tardía de la serpentinización defididas por Alt y Shanks (2003) (Figura 5).

La presencia de jaipurita en la matriz serpentinítica y, especialmente de calcopirita y Cu nativo asociados a venas de crisotilo sí indica un claro origen secundario de estos minerales relacionado con los procesos de serpentinización. Por otro lado, la presencia del monosulfuro de Co, indicativo de altas fugacidades de azufre y de oxigeno, es el reflejo de la propia heterogenidad del proceso de serpentinización. En el cual las variaciones locales del flujo de los fluidos presentes pueden dar lugar a procesos de resulfurización, los cuales debieron darse muy localmente, incluso a nivel de la propia muestra.

REFERENCIAS

- Alt, J.C y Shanks, W.C., (1998). J. Geo Res 103: 9917-9929.
- Alt, J.C y Shanks, W.C., (2003). Geoch et Cosm Acta, 67: 641-653.
- Bach, B., Garrido, C.J., Paulick, H., Harvey, J., Rosner, M., (2004). Geoch Geoph Geosys 5, 9 : 1525-2027.
- Bach. W., Paulick. H., Garrido, C.J., Ildefonse, B., Meurer, W.P., Humphris, S.E., (2006): Geophysical Research Letters.
- Eckstrand, O.R., (1975). Econ Geol. 70: 183-201.
- Frost., B.R., (1985). J.Petrol 26: 31-63.
- Luguet. A., Lorand. JP., Seyler, M. (2003). Geoch et Cosm Acta, 76: 1553-1570.
- Sleep, N.H., Meibom, A., Fridriksson, Th., Coleman, R.G., & Bird. D.K. (2004). PNAS 101 (35): 1218-12823.