

ESTUDIO DE METALES Y SULFUROS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LA METEORITA PÁCULA .

Reyes, A. M.^{1*}, Ángeles, S.¹, Reyes, O.², Macías, C.¹, Ortega, F.¹, Linares, C.³

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-296, Cd. Universitaria 04510 México, D.F. México,

²Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-296, Cd. Universitaria 04510 México, D.F. México,

³Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-296, Cd. Universitaria 04510 México, D.F. México

*Autor de Correspondencia: adelars@servidor.unam.mx

Recibido: Octubre 2009. Aprobado: Diciembre 2009.

Publicado: Enero 2010.

RESUMEN

En base a estudios con microscopía electrónica de barrido utilizando imágenes de electrones retrodispersados y análisis químicos cuantitativos, se presenta la composición y microestructuras de las fases metálicas y sulfuros de Pácula, meteorita pétreo, caída en 1881, en el estado de Hidalgo, México. Es una condrita ordinaria clase L tipo 6 que contiene los metales (kamacita, taenita, tetrataenita, martensita), cobre nativo y sulfuros (troilita) los cuales presentan gran diversidad y complejidad en sus microestructuras tales como texturas eutécticas, plesíticas y granos individuales constituidos de mezclas complejas de minerales metálicos y sulfuros; esférulas, vetas y bolsas de fusión con metales y sulfuros. Se deduce una tasa de enfriamiento de al menos, 988°C dada en base a las texturas eutécticas observadas y un enfriamiento posterior lento en granos metálicos, de aproximadamente 300°C, indicado por los márgenes de tetrataenita alrededor de algunos granos de taenita. Se reportan nódulos de troilita de hasta 10 mm de diámetro y la ocurrencia de tetrataenita y troilita policristalina. Pácula presenta gran variabilidad en el contenido de cobalto en kamacita. Las observaciones sugieren que la meteorita Pácula experimentó fusión por choque y se asignan características de alto estado de choque S4-S5.

Palabras clave: meteorita, condrita L6, microsonda electrónica, metales, sulfuros.

STUDY OF METALS AND SULFIDE BY ELECTRON MICROSCOPY OF THE PACULA METEORITE

ABSTRACT

The composition and textures of sulfide and metal phases have been examined in Pácula meteorite, using backscattered electron imaging and quantitative electron microprobe analysis with scanning electron microscopy. Pácula fell in 1881, at Hidalgo State, Mexico. Pácula is an ordinary chondrite L6, with Fe-Ni metal phases (kamacite, taenite, martensite and tetrataenite), sulfide troilite, include the presence of metallic Cu, irregular troilite grains within metallic Fe-Ni, polycrystalline troilite and tetrataenite, plessite, metal and troilite veins, large troilite nodules (10 mm) and small blebs of metallic Fe-Ni and troilite. Its Co content in kamacite varies significantly from 0.5 to 1.0 wt%. Microstructural criteria that indicate high shock stage S4-S5 Based on the observed eutectic textures; it can deduce a cooling rate of at least of 988°C. By other hand, a slow cooling of 300°C is indicated by the tetrataenite margins around the taenite crystals.

Keywords: meteorite, chondrite L6, electron microprobe, metals, sulfide.

INTRODUCCIÓN

En los estudios de meteoritas, la composición y microestructura de las fases metálicas y sulfuros son de gran importancia puesto que pueden dilucidar la historia térmica de la meteorita en estudio, ayudando a entender los procesos en la formación y evolución de la materia en el Sistema Solar. Es ampliamente reconocido que las

microestructuras en los metales de Fe-Ni y en la troilita pueden ser usados para extraer información acerca de la historia térmica postchoque y como método cualitativo para clasificar el nivel de choque de las condritas ordinarias [1]. La investigación de las aleaciones extraterrestres Fe (Ni Co) es importante para el entendimiento de los mecanismos de formación de

diversas estructuras que muestran las meteoritas pétreas, en particular las condritas ordinarias. Hay muchos indicadores petrográficos de choque que pueden observarse en los metales y sulfuros de las condritas ordinarias que han experimentado procesos de impacto, entre estos se incluyen las vetas de metal y sulfuro, intercrecimientos de metal-troilita, nódulos de metales y sulfuros, troilita policristalina, martensita, texturas plesíticas, granos irregulares de troilita dentro de metales de hierro-níquel y la presencia de cobre metálico [1,2].

La meteorita Pácula, condrita ordinaria L6 [3], cayó en el poblado de Pácula, Hidalgo, México, en 1881, (21°03' N, 99°18' W). Pácula está constituida principalmente por silicatos y en menor cantidad sulfuros y fases metálicas. Es una roca muy fracturada, con gran cantidad de bolsas y vetas de material fundido que contienen mayoritariamente metales y sulfuros. Estas vetas cortan y rodean al material silicatado. Los metales y sulfuros también se observan dispersos en toda la roca y en ocasiones forman cúmulos o nódulos de tamaño milimétrico y presentan diversas características de choque.

En este trabajo se realizó el estudio químico analítico y microestructural de los granos metálicos y sulfuros por medio de la microsonda electrónica y en base a ello, damos una interpretación previa de su historia térmica y de choque.

MATERIALES Y MÉTODOS

Pequeños fragmentos y dos secciones delgadas pulidas de Pácula fueron estudiados con técnicas de microscopía electrónica utilizando una microsonda del Laboratorio Universitario de Petrología del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, marca JEOL JSA-8900R equipada con un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) marca NORAN, con un cristal detector de Si(Li) y con espectrómetros de longitud de onda (PET, LIF, TAP); los estándares empleados fueron minerales naturales y algunos metales puros. Los análisis químicos

cuantitativos se realizaron con un voltaje de 20 kV; 20 nA y método de corrección ZAF. Se obtuvieron imágenes de composición con electrones retrodispersados, para investigar las microestructuras y composición química de la meteorita.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sulfuro principal en la meteorita Pácula es la troilita (FeS); químicamente se distinguen cuatro fases metálicas que están constituidas esencialmente por hierro-níquel y cobalto, son fases subsólidas en el sistema binario Fe-Ni, mostrando diferentes estructuras cristalinas y composiciones; éstas difieren sustancialmente en sus relaciones porcentuales de sus componentes: kamacita α - (Fe,Ni) con alrededor de 6% de peso en níquel; taenita γ - (Fe,Ni) 20-40 % de peso en níquel; tetrataenita (FeNi) \pm 50% de peso en níquel y martensita o α_2 con 12-18% de peso en níquel. [4]. En Pácula, la fase de sulfuros y la fase metálica se localizan muy cercanas o se presentan asociadas; se les encuentra también como granos aislados, anhedrales a subhedrales de diversos tamaños desde esférulas de una a dos micras dentro de silicatos, condros y vetas hasta granos de hasta 900 μm que se localizan intersticiales a los silicatos, llenando fracturas, son abundantes en las bolsas y vetas de fusión y entre los clastos que forman la brecha. (Figuras 1-6).

Una característica peculiar en Pácula es la presencia de nódulos de sulfuros de tamaño variable, algunos de dos a tres milímetros, como los reportados en otras condritas, sin embargo, en Pácula algunos de estos nódulos alcanzan hasta 10 mm (Figura 7). Tales nódulos son característicos de estado de choque S4-S6 [5].

Una gran variedad de microestructuras están presentes en esta meteorita. Algunos de los granos estudiados aparentemente son homogéneos, sin embargo cuando se aumenta el contraste y la brillantez con los electrones retrodispersados, las fases metálicas y sulfuros pueden observarse entremezclados, desarrollando diversas texturas: plesíticas, (mezcla de

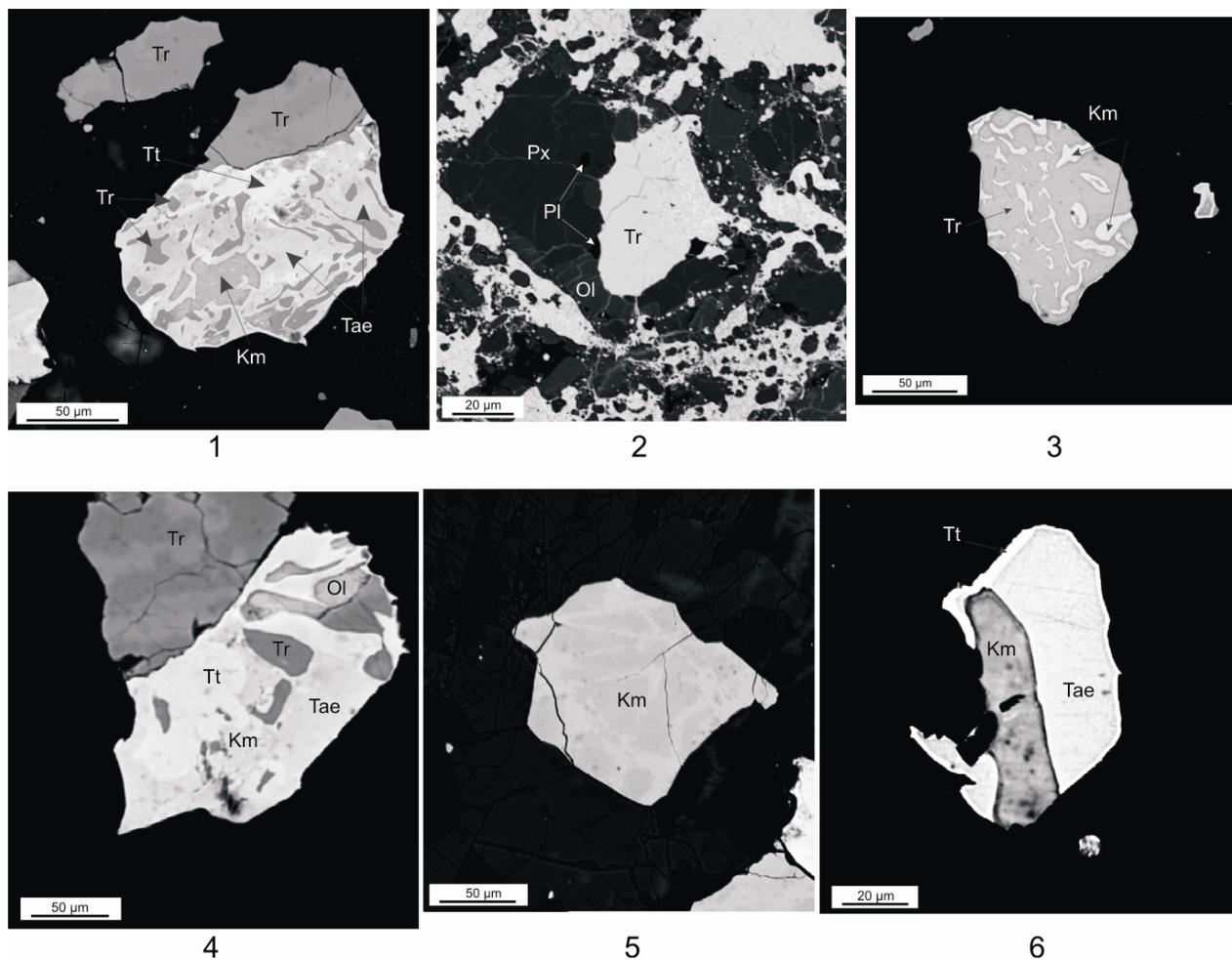


Fig. 1-6. Metales y sulfuros en la meteorita Pácula. Imágenes con microscopía electrónica de barrido y electrones retrodispersados. Figuras 1-4. Diversas texturas eutécticas mostrando los intercrecimientos de metales y troilita: 1, grano compuesto por troilita y textura eutéctica compleja; 2, toda la imagen es una vista general del contenido interior de una veta de fusión; 3, grano irregular eutéctico con extura congelada, dendritas de kamacita en una matriz de troilita; 4, textura eutéctica con inclusiones de olivino redondeado resultado de la fusión. Figura 5. grano de kamacita, las líneas más claras son exolución de hierro-níquel-cobalto. Figura 6. Taenita con márgenes nítidos de tetraenaite. Símbolos: Km= kamacita, Tae = taenita, Tr = troilita, Tt = tetraenaite Pl = plagioclasa, Ol = olivino, Px = piroxena.

Tabla 1. Análisis cuantitativos obtenidos por WDS de metales y sulfuros (% en peso) de la meteorita Pácula.

	Kamacita	Taenita	Tetraenaite	Martensita	Troilita
Num. de granos	12	10	4	14	8
Fe	94.09 ±1.41	74.36 ±2.34	50.62 ± 1.6	86.87 ± 3.1	65.02 ± 0.58
Ni	4.94 ±0.47	25.56 ±3.16	49.14 ± 1.74	13.41 ± 2.42	< 0.04 ± 0.06
Co	0.88 ±0.05	0.40 ±0.19	0.17 ± 0.030	0.80 ± 0.04	< 0.05± 0.005
S	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	35.45 ± 0.80
Total	100.64	100.23	100.04	100.04	100.42

n.d =no determinado

kamacita y taenita de grano fino) las cuales tienen composición martensítica (Figura 8, Tabla 1).

Las partículas metálicas de meteoritas que han sufrido impacto de gran magnitud muestran texturas eutécticas, que son intercrecimientos complejos de zonas con diferente concentración de níquel, hierro y/o sulfuro de hierro y son evidencia de que los granos fueron fundidos por impacto seguido de un enfriamiento rápido e indican que el sulfuro (troilita) fue fundido a una temperatura de al menos 988°C que es el punto de fusión del eutéctico troilita-kamacita [6]. Pácula presenta una gran abundancia de granos que muestran diversas texturas eutécticas (Figuras 2-6, 8, 9). En la Figura 3 se observa un grano eutéctico, el cual tiene una textura congelada que está compuesta de dendritas metálicas en una matriz de troilita; el ancho de las celdas que forman las dendritas, es muy variable (de 2 a 6 micras de ancho).

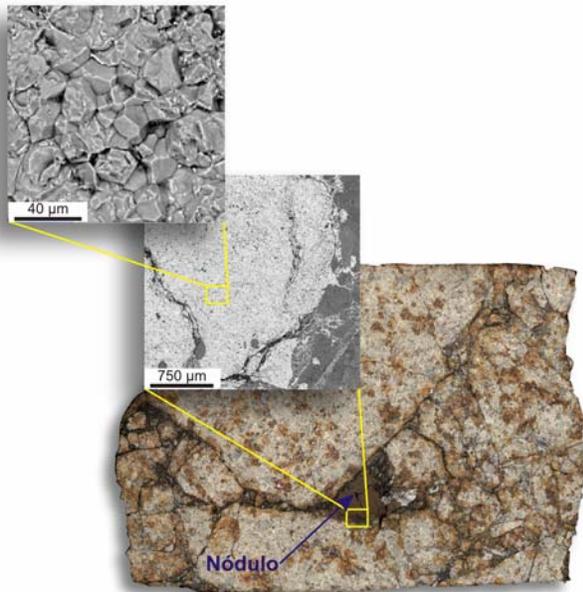


Fig. 7. En Pácula es peculiar la presencia de nódulos de sulfuros con troilita policristalina de tamaño variable, algunos como el que se muestra, de color café oscuro es de 10 mm de largo. La imagen más grande es el corte de la muestra de mano, de 73 mm de largo; las otras dos imágenes son acercamientos y se obtuvieron con electrones retrodispersados.

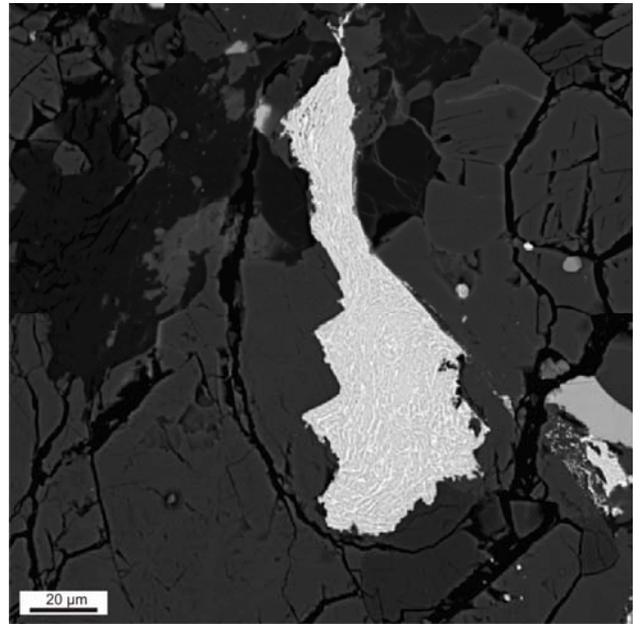


Fig. 8. Muestra al centro un grano de composición martensítica con típica textura eutéctica, donde las áreas más claras contienen mayor concentración de níquel que las áreas grises donde predomina el hierro.

Otros granos con textura eutéctica también se da entre metal/metal, kamacita con dendritas de taenita o tetrataenita (Figura 9). En algunos casos, ocurren granos formados por mezclas más complejas como los observados en las Figuras 1, 4, 9 y 10 donde están presentes todas las fases de metales y troilita e incluso pueden contener silicatos como inclusiones (Figura 4). Estas microestructuras son indicativas de cristalización a partir de un fundido, muy similares a las contenidas en la meteorita Dunbogan, también L6 y que experimentó un alto grado en la escala de choque [7].

En Pácula, el rango en el contenido de níquel en kamacita es de 3.75-5.92 % en peso; la taenita muestra un rango más disperso de concentración de níquel (23.27-36.18 % en peso), en la martensita el rango en contenido de níquel es de 10.64-8.85% en peso y en la tetrataenita es menos variable (49.33-51.41 % en peso). En la Tabla 1, se muestra la composición química en % en peso obtenida cuantitativamente con la microsonda electrónica de los metales y sulfuros de la meteorita en estudio.

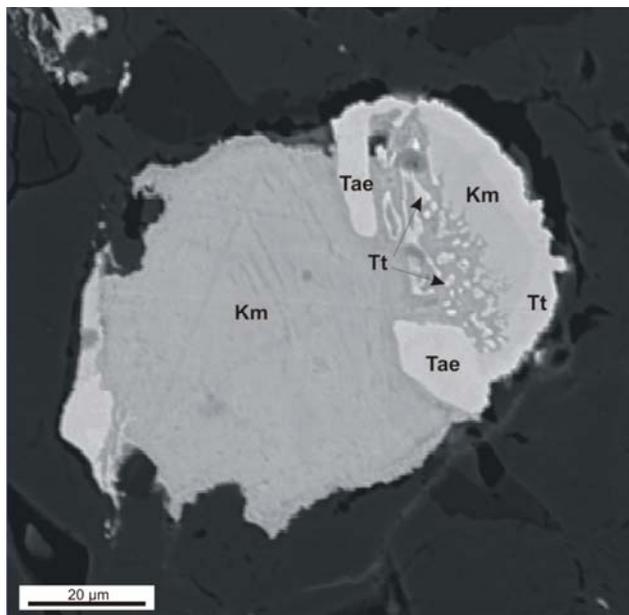


Fig. 9. Grano complejo donde predomina la kamacita, en el interior a la derecha, una textura eutéctica, las áreas claras al interior y en la base izquierda son taenita y el margen a la derecha con una orilla de tetraetaenita. Presencia de exsoluciones que se observan como manchas o líneas de color más claro, donde hay mayor concentración de níquel.

Afiattalab & Wasson [8], encuentran que los contenidos de cobalto en las aleaciones metálicas, para las condritas ordinarias del grupo L [3] L están en el rango de 0.67-0.82 %.

En Pácula, el contenido de cobalto en la kamacita es variable si bien algunos granos están en el rango, lo cual podría indicar que esta roca se consolidó con fragmentos de origen distinto; sin embargo, se clasificó como clase L dada la homogeneidad en la composición de sus olivinos y piroxenas [3], la variación en los contenidos de cobalto por un lado podría atribuirse a que algunos granos metálicos individuales no representan un solo mineral sino que son mezclas y cuando la textura es muy fina, puede haber errores en la medición; sin embargo, por ejemplo, las meteoritas Duwun y Bruderheim, ambas L6 también muestran heterogeneidad en la distribución de cobalto en kamacita [9, 10], en ambos trabajos se sugiere que la heterogeneidad composicional resulta de un equilibrio incompleto durante el metamorfismo. En la Figura 11, se muestra un diagrama de variación de Ni-Co de la

meteorita Pácula, puede observarse cuatro regiones diferentes que corresponden a kamacita (Km), martensita (Mart), taenita (Tae) y tetraetaenita (Tt) que es la fase rica en Ni. En general para cada grupo mineral se observa dispersión en los contenidos de Ni-Co lo que atribuimos a los efectos de choque sufridos por esta roca. En Pácula la variación de cobalto en la kamacita (Figura 11) parece formar dos generaciones de kamacita que posiblemente fueron formadas en tiempos y temperaturas diferentes en la historia térmica de esta condrita..

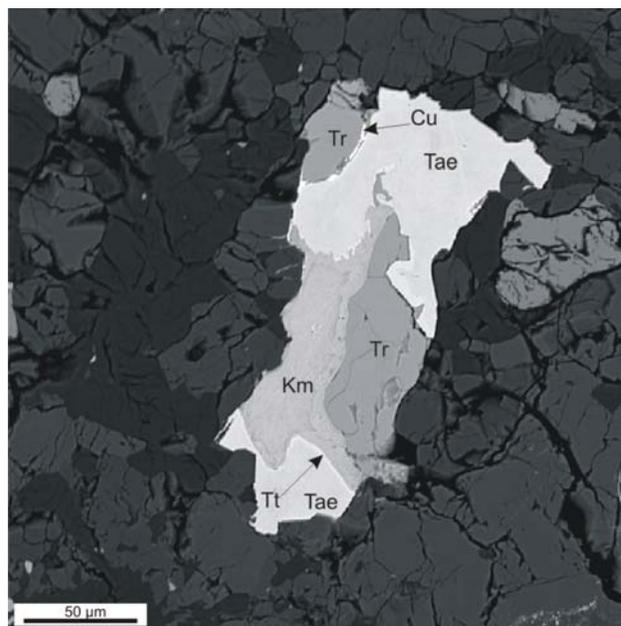


Fig. 10. Grano de forma irregular con mezcla de kamacita, taenita con borde de tetraetaenita, troilita y cobre.

La troilita esencialmente es monocristalina en las meteoritas que no han sufrido choque; pero aparece policristalina, con intersecciones entre los límites de grano de 120° en meteoritas que experimentaron impactos de alto grado entre 35GPa-60GPa correspondiendo a estados de choque S5-S6 [1], [11];. En Pácula, la presencia de troilita policristalina es común observarla en granos de alrededor de 50 µm en la matriz (Figura 12), también en esta figura se encuentran varios granos de troilita policristalina de alrededor de 50 µm, junto a un gran grano policristalino de tetraetaenita (200 µm). La troilita

que forma los grandes nódulos de sulfuro en Pácula, también es policristalina (Figura 7).

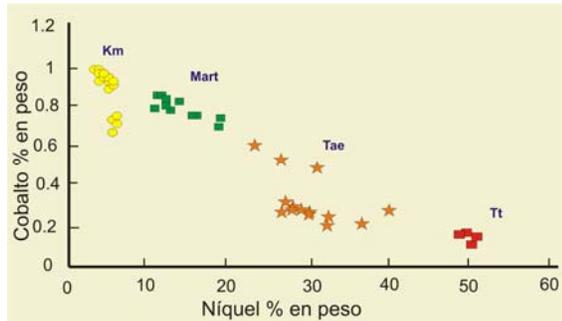


Fig. 11. Variación de cobalto con el contenido de níquel de las diferentes fases metálicas en la meteorita Pácula. Km (kamacita); Mart (martensita); Tae (taenita); Tt (tetrataenita o fase rica en Ni)

La tetrataenita, principalmente ocurre como anillos o márgenes de ancho aparente ~ de 10 μm , alrededor de la taenita o kamacita y como márgenes en granos con mezcla de diferentes metales y sulfuros (Figuras 6, 9 y 10), también se le observa formando parte de los granos mezclados (Figuras 1 y 4) y por último, como ya se mencionó anteriormente ocurre como tetrataenita policristalina, constituida por cristales euhedrales (Figura 12). Esta característica en Pácula, es peculiar, ya que por lo general la mayoría de los granos metálicos de Fe-Ni en las rocas del Sistema Solar, son anhedrales [12]; así, en las contritas ordinarias, los metálicos de Fe-Ni y troilita, típicamente forman granos anhedrales. La explicación posible para estos granos de tetrataenita policristalina, puesto que los granos euhedrales se forman en sistemas ígneos o bien bajo fase condensada en depósitos de vapor y puesto que Pácula es una meteorita que ha sido chocada, debió ser a un alto grado el que provocó la policristalinidad.

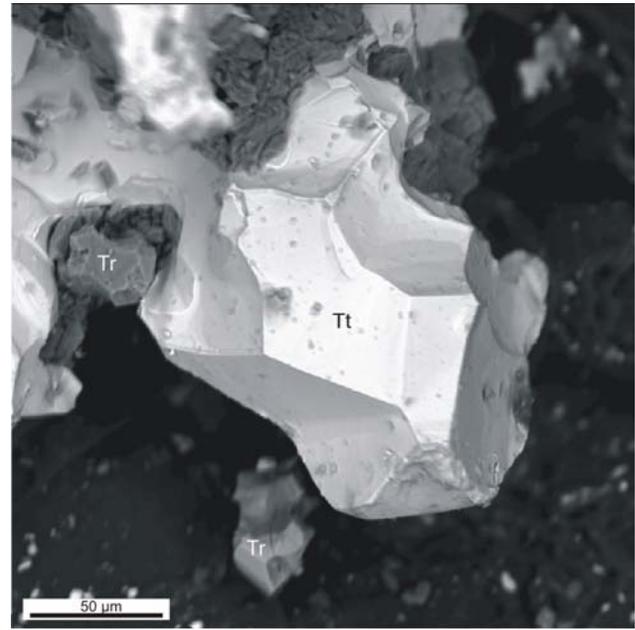


Fig. 12. Imagen con electrones secundarios. Tetrataenita policristalina (Tt) (200 μm) alrededor en gris mas oscuro se encuentran granos de troilita policristalina de 50 μm . Esta característica en Pácula, es peculiar, ya que por lo general la mayoría de los granos metálicos de Fe-Ni en las rocas del Sistema Solar, son anhedrales.

Las microestructuras policristalinas son explicadas por Reiserer et al., [13] como procesos de recrystalización de alta energía que involucran nucleación y crecimiento de nuevos granos libres de esfuerzo en una matriz, formados durante un rápido enfriamiento. Estos granos policristalinos son utilizados como indicadores de choque [14].

La gran variedad de texturas y composiciones de las fases metálicas en las meteoritas condriticas ha sido mostrada en el trabajo clásico y exhaustivo de Wood [5], donde se interpretan en términos de los diagramas de fase de hierro-níquel. Así, para esta meteorita en particular, las texturas y composiciones de sus fases metálicas y sulfuros nos indican relictos de una solidificación primaria durante un enfriamiento rápido, posiblemente por un evento de choque a temperaturas $> 980^{\circ}\text{C}$. Durante el evento de choque la condrita sufrió calentamiento que generó la fusión de metal y troilita entonces en contacto; cuando se dio el proceso de enfriamiento ocurrió la cristalización eutéctica dejando mezclas de metal-troilita (Figura 3);

algunos granos con texturas eutécticas presentan inclusiones de olivino redondeado resultado de la fusión (Figura 4). Granos de cobre nativo ocurren en granos con mezclas, entre los límites de metálicos y troilita como puede observarse en la Figura 10. El cobre metálico probablemente se forma cuando la roca es chocada a estados de S3-S4 de acuerdo a la escala de Stöffler [11]. Los márgenes de tetrataenita en algunos granos de taenita (Figuras 6, 9 y 10), nos indican un posterior equilibrio alcanzado a los 300-400°C, resultado del metamorfismo de baja temperatura producido a profundidad en el cuerpo parental. En la observación de un fragmento sin pulir de la meteorita Pácula, con electrones retrodispersados se encontraron granos de cristales policristalinos de tetrataenita, de gran tamaño ~200µm junto a pequeños granos ~ 50 µm de troilita también policristalina (Figura 12). La tetrataenita cristalina es muy rara de observar, su formación se atribuye a eventos de alto impacto, como es el caso de su ocurrencia en la meteorita I Jacala investigada por Robin [12].

La presencia de martensita en las condritas es indicativa de que estas meteoritas experimentaron temperaturas $\geq 800^{\circ}\text{C}$ [15].

La gran complejidad de los granos formados por mezclas de Fe-Ni y troilita podrían haberse producido por una rápida solidificación en desequilibrio del líquido de Fe-Ni-S, resultado de la fusión por choque [16, 17, 18].

En Pácula, es interesante la heterogeneidad en composición que presentan los metales, puesto que los olivinos y piroxenas muestran la homogeneidad característica de las condritas equilibradas tipo 6 [8]. Los metales y sulfuros que forman parte de las vetas de fusión, así como los que se encuentran en las cercanías de éstas, posiblemente sufrieron cambios posteriores al metamorfismo térmico que equilibró a los silicatos debidos a algún otro evento de choque, no se homogeneizaron ya que los metales y sulfuros presentan planos que son más susceptibles a transmitir efectos térmicos.

De acuerdo con Bennet y McSween [1], meteoritas con choque de $< S3$, contienen kamacita y taenita sin disturbio e indican presiones de 5-10 GPa, cuando hay presencia de martensita y plesita esto indica recalentamiento por choque a 29-50GPa, la plesita abundante puede indicar hasta un S5. Esto último también es característico en Pácula.

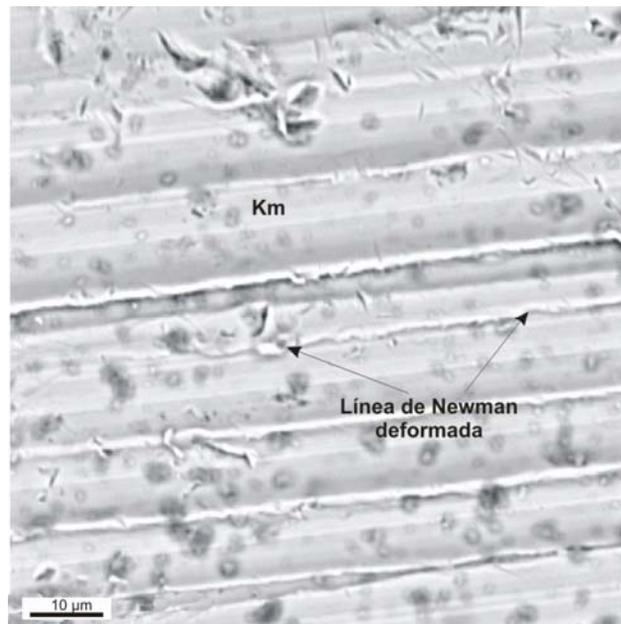


Fig. 13. Acercamiento en un grano de kamacita mostrando las líneas de Newman, las cuales se forman a intensidades medias de choque; sin embargo en Pácula, estas líneas, en algunos lugares están curvadas y deformadas, sugiriendo que la deformación plástica ocurrió después de un primer evento de choque.

Es notable en algunos granos metálicos de sólo kamacita, la presencia de exsoluciones exoluciones que se observan como manchas o líneas de color más claro (Figuras 5, 6, 9) donde hay mayor concentración de níquel. También resulta interesante en Pácula, la existencia de algunos granos de kamacita que contienen las llamadas líneas de Newman (Figura 13), las cuales de acuerdo a Reisener et al [13], estas se forman a intensidades medias de choque; sin embargo en Pácula, estas líneas, en algunos lugares están curvadas y deformadas, sugiriendo que la deformación plástica ocurrió después de un primer evento de choque (Figura 13).

Otras meteoritas con características en sus metales y opacos, similares a Pácula que también son del grupo químico L y tipo petrológico 6 (excepto Innisfree que es L5) y han experimentado metamorfismo por choque son Ramsdorf [16]; Duwun [9], Innisfree [18], Bruderheim [10]; Pampa del Infierno, en el Territorio Chaco Argentina [19].

CONCLUSIONES

Pácula presenta microestructuras en sus minerales metálicos y sulfuros que son indicadores de un alto grado de choque tales como: troilita y tetrataenita policristalina, cobre nativo, forma irregular de granos de troilita dentro de Fe-Ni, intercrecimientos que indican rápida

solidificación de metal-sulfuro, martensita y varios tipos de plesita, nódulos milimétricos de sulfuro, vetas y bolsas con alto contenido de metal sulfuro. Todas estas características indicadoras de fusión a una temperatura de al menos 988°C, temperaturas del eutéctico Fe-FeS. Las características antes mencionadas corresponden a un estado de choque de S4 a S5 lo que corresponde a 35 GPa 60 Gpa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los árbitros anónimos por sus valiosas aportaciones.

REFERENCIAS

- [1] Bennett M.E., McSween H. Y. (1996) “Shock features in iron-nickel and troilite of L-group ordinary chondrites” *Meteoritics & Planetary Science* 31:255-264.
- [2] Rubin A. (2004) “Postshock annealing and postannealing shock in equilibrated ordinary chondrites: Implications for the thermal and shock histories of chondritic asteroids” *Cosmochim. Geochim. Acta* 68:673-689.
- [3] Sánchez-Rubio G. (2001) “Las Meteoritas de México” *Catálogo UNAM* 1-85.
- [4] Yang, C.W., Williams, D.B., Goldstein, J.I. (1997) “Low-temperature phase decomposition in metal from iron, stony-iron, and stony meteorites” *Geochemica et Cosmochimica Acta* 61: 2943-2956.
- [5] Rubin, A. (1999) “Formation of large metal nodules in ordinary chondrites” *Journal of Geophysical Research-Planets* 104:30799-30804.
- [6] Wood, J. (1967) “Chondrites: their metallic minerals, thermal histories, and parent planets” *Icarus* 6: 1-49.
- [7] Flood P.G., Ashley P.M. y Pogson R.E. (2002) “The Dunbogan L6 chondrite: a new meteorite fall from New South Wales, Australia” *Records of the Australian Museum* 54: 249-254.
- [8] Afiattalab, F., Wasson, J. T. (1980) “Composition of the metal phases in ordinary chondrites; implications regarding classification and metamorphism” *Geochemical. et Cosmochimic. Acta* 44:431-446.
- [9] Choi B., Ahn I., Lee M., Shin H. (2002) “Thermal and shock metamorphic episodes of the Duwun L6 chondrite: petrological evidence” *Geosciences Journal* 6:161-167.
- [10] Sith D.G., Launspach, S. (1990) “The composition of metal phases in Bruderheim (L6) and implications for the thermal histories of ordinary chondrites” *Earth and Planetary Science Letters* 99:14-28.

- [11] Stöffler D., Keil K., Scott E. (1991) “Shock metamorphism of ordinary chondrites” *Geochemical et Cosmochimica Acta* 55: 3845-3867.
- [12] Rubin A. (1994) “Euhedral tetrataenite in Jelica meteorite” *Mineralogical Magazine* 58: 215-221.
- [13] Reisener R., Meibom A., Trot A.N. Goldstein J.I., Keil K. (2000) “Microstructure of condensate Fe-Ni metal particles in the CH chondrite PAT91546” *Lunar and Planetary Science XXXI*: 445 pdf.
- [14] Rubin A. (2003) “Northwest Africa 428: Impact-induced annealing of an L6 chondrite breccia” *Meteoritics & Planetary Science* 38: 1199-1506.
- [15] Smith, B.A. J.I. Goldstein J.I. (1977) “The metallic microstructures and thermal histories of severely reheated condrites” *Geochemical et Cosmochimica Acta* 41: 1061-1072.
- [16] Begeman F., Wlotzka, F. (1969) “Shock induced thermal metamorphism and mechanical deformations in the Ramsdorf chondrite” *Co Geochemical et Cosmochimica Acta* 33: 1351-1370.
- [17] Ming C., Xiande X., Goresy A. (1995) “Non equilibrium solidification and microstructures of metal phases in the shock-induced melt of the Yanzhuang (H6) chondrite” *Meteoritics* 30:28-32.
- [18] Smith, D.G.W. (1980) “The mineral chemistry of the Inisfree meteorite” *Canadian Mineralogist* 18: 433-442.