



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES (ICN-CU)

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL ROL DE LAS HISTORIAS
TÉRMICAS ASOCIADAS AL MODELO DE ONDA DE CHOQUE
PARA LA FORMACIÓN DE CONDROS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:
ALEJANDRA LÓPEZ HOLGUIN

TUTORA:
DRA. ANTÍGONA SEGURA PERALTA
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. DE MÉXICO, MAYO DEL 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL ROL DE LAS
HISTORIAS TÉRMICAS ASOCIADAS AL MODELO DE
ONDA DE CHOQUE PARA LA FORMACIÓN DE
CONDROS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRÍA EN ASTROFÍSICA

P R E S E N T A :

ALEJANDRA LÓPEZ HOLGUIN

TUTORA

DRA. ANTÍGONA SEGURA PERALTA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. DE MÉXICO, MAYO DEL 2022

Porque aquella persona que persigue sus sueños, los alcanza...

Es importante reconocer que las personas llegamos cada vez más lejos no sólo por nuestro propio mérito, sino también porque nos apoyamos sobre hombros de gigantes. Para mí, gigantes son aquellas personas que me acompañaron en el camino y me brindaron amor, felicidad, conocimiento, motivación, que me enseñaron a levantarme cada vez que me cayera y seguir adelante, esos gigantes me dieron las bases para formar la persona que soy ahora. Estoy más que agradecida con mis gigantes y a ellos les dedico esta tesis: a mis padres, hermanos, toda mi familia, mis profesores, mi asesora, al equipo de trabajo, a la institución en la cual me permitieron realizar el estudio, a mis amigos y compañeros de estudio, a mis rommies. A todos ustedes, gracias de todo corazón.

Agradecimientos

La investigación fue financiada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN117619.

Agradezco al CONACyT por la beca otorgada para desarrollar este trabajo de maestría.

Agradecimientos al proyecto Ciencia de Frontera de CONACyT C-15303 titulado “Estudio experimental del rol de la materia orgánica durante el calentamiento de micrometeoroides” por el financiamiento otorgado para la realización de los análisis en el MEB.

Al Instituto de Ciencias Nucleares por todas las facilidades y apoyo otorgado, en especial al área de Docencia.

Al Taller de Mineralogía y Petrología ubicado en el área de Laboratorios de Física General de la Facultad de Ciencias, UNAM, en donde se llevó a cabo parte de la descripción del material.

A la Dra. Antígona Segura Peralta por su apoyo incondicional como asesora y profesora durante toda mi estancia de maestría, gracias por los conocimientos compartidos conmigo, por abrirme las puertas en el proyecto de investigación y guiarme en el proceso de formación como científica.

A la Dra. Karina Cervantes por su apoyo incondicional en la asesoría del área de meteorítica, por compartir sus conocimientos conmigo y apoyarme en todo lo que involucra la parte experimental del proyecto; desde la preparación de las muestras, la irradiación de material, los análisis morfológicos, texturales y mineralógicos, y la interpretación de resultados.

Al Dr. Héctor Cruz Ramírez por su asesoría para utilizar el dispositivo Citlalmitl

con el que se fundió el material. El dispositivo se encuentra en el Laboratorio de Óptica Cuántica del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, a cargo del Dr. Alfred U'Ren a quien se agradece la confianza por permitir el trabajo en su laboratorio.

A la Dra. Patricia Hernández Reséndiz por compartir sus conocimientos y experiencia tanto en la parte teórica como experimental de proyecto.

A la química Claudia Camargo Raya, Laboratorio de Evolución Química del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM por su apoyo en la preparación de las soluciones, análisis de la muestras y asesoría química en el laboratorio.

A la Dra. Alicia Negrón Mendoza, jefa del Departamento de Química de Radiaciones, por la oportunidad para trabajar en el Laboratorio de Evolución Química del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.

A la M. C. Jaqueline Cañetas, Instituto de Física, UNAM por su apoyo para analizar las muestras en el MEB del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC).

A la Ing. María Cristina Zorrilla Cangas y al Dr. Raúl Herrera Becerra del Laboratorio de Materiales Avanzados, Instituto de Física, UNAM por su apoyo con los espectros micro-Raman.

Al Laboratorio de Análisis de Muestras Planetarias del Instituto de Ciencias Nucleares a cargo de los investigadores Alejandro Heredia Barbero y Antígona Segura Peralta, en donde se llevó a cabo parte de la descripción del material.

A los integrantes de la Casa del Estudiante Duranguense por darme la oportunidad de pertenecer a su comunidad, me otorgaron un techo donde vivir cuando más lo necesitaba, agradezco su gran amistad y compañía.

Resumen

Los condros son pequeñas esferas ígneas (diámetros de micras a cm) que representan alrededor del 80% en volumen de las meteoritas condriticas. Estas meteoritas tienen una composición química total que coincide con la de la fotosfera solar, por lo que se sugiere que sus ingredientes condriticos primordiales, como los condros, provinieron de las etapas tempranas del disco de acreción de la nebulosa solar. Por ello, el objetivo de estudio de los condros es comprender su importancia, su posible relación con los procesos que formaron el sistema solar y resolver la incógnita del por qué de su existencia, ya que su formación no ha sido bien entendida. Existen varios modelos propuestos en la literatura que intentan explicar el origen de los condros, los más aceptados son los modelos de onda de choque, debido a que las historias térmicas que proponen cumplen con la mayoría de las restricciones impuestas por estudios de los condros.

Dicho lo anterior, el objetivo de esta tesis es comprobar si las historias térmicas que predicen los modelos de onda de choque de formación de condros reproducen análogos de condros con las características morfológicas y texturales observadas en los condros naturales.

Para crear los análogos de condros se utilizó el dispositivo experimental Citlalmitl. Este dispositivo es capaz de reproducir los modelos de formación de condros mediante la irradiación controlada de cierto material precursor, con un láser de CO_2 de 50 W.

Los análogos de condros fueron observados con un microscopio estereoscópico para tener un primer acercamiento del tipo textural. Posteriormente los análogos representativos fueron sometidos a análisis morfológicos y texturales con un microscopio electrónico de barrido y con un microscopio petrográfico, y a análisis mineralógicos

con un espectrómetro micro-Raman. Una vez analizadas las muestras, se confirmó que se reprodujeron análogos de condros con algunas de las características texturales y mineralógicas observadas en los condros naturales.

Las conclusiones más importantes son que Citalmitl es un dispositivo experimental que puede reproducir las historias térmicas que predicen los modelos de onda de choque reproduciendo las texturas observadas en los condros naturales. Además, el tipo de textura que se reproduzca dependen principalmente de la tasa de enfriamiento, a tasas de enfriamiento mayores ($\approx 10^4$ °C/h) tienden a reproducirse texturas barradas, radiales, o criptocristalinas, y a tasas de enfriamiento menores ($\approx 10^3$ °C/h) tienden a reproducirse texturas tanto barradas como porfídicas.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	IV
1. Introducción	1
1.1. Meteoritas	1
1.1.1. Clasificación general de meteoritas	2
1.1.2. Meteoritas condriticas	3
1.2. Condros	7
1.2.1. Clasificación de los condros	8
1.2.2. Formación de condros	13
1.2.3. Experimentos para la formación de condros	34
1.3. Las meteoritas y la formación del sistema solar	37
1.3.1. El disco protoplanetario	37
1.3.2. Evolución del disco protoplanetario	39
1.3.3. Procesos de mezcla en el disco protoplanetario	39
1.3.4. Diferenciación de planetésimos	42
1.3.5. Cronología del sistema solar	44
1.4. Objetivo y contenido de la tesis	48
2. Metodología	50
2.1. Metodología general	50
2.2. Descripción y funcionamiento de Citlalmitl	51

2.2.1. Confinamiento y vacío	53
2.2.2. Posicionamiento del láser	54
2.2.3. Control de energía	55
2.2.4. Medición de parámetros	55
2.2.5. Control y automatización de Citlalmitl	57
2.3. Selección y programación de las historias térmicas	59
2.3.1. Perfil I	60
2.3.2. Perfil II	61
2.4. Selección y análisis de precursores	62
2.5. Técnicas de análisis de las muestras obtenidas	65
2.5.1. Microscopio estereoscópico	65
2.5.2. Microscopio electrónico de barrido	67
2.5.3. Microscopio petrográfico	68
2.5.4. Norma CIPW	68
2.5.5. Espectroscopia micro-Raman	69
2.6. Morfologías de cristales de olivino	70
3. Condiciones experimentales	76
3.1. Parámetros físicos experimentales	76
3.2. Propiedades físicas de los fundidos tipo condro	78
3.3. Experimentos realizados	82
3.3.1. Corrida experimental 1	82
3.3.2. Corrida experimental 2	83
3.3.3. Corrida experimental 3	83
3.3.4. Corrida experimental 4	83
3.3.5. Corrida experimental 5	83
4. Resultados experimentales	84
4.1. Clasificación preliminar de texturas con microscopio óptico	84
4.2. Clasificación de texturas con microscopio electrónico de barrido y con microscopio petrográfico	106

4.3. Cálculo de la mineralogía normativa con la Norma CIPW	112
4.4. Descripción de análisis Raman	114
4.5. Análisis del efecto del material precursor en las texturas resultantes .	119
4.5.1. Combinaciones con espinela	120
4.5.2. Combinaciones con piroxenos	125
4.5.3. Combinaciones con feldespatos	126
4.6. Análisis del efecto de los perfiles de irradiación en las texturas resultantes	131
4.7. Relación entre la tasa de enfriamiento y las texturas de los condros .	133
5. Discusión y Conclusiones	138
5.1. Discusión	138
5.1.1. Acerca de los parámetros experimentales	138
5.1.2. Acerca de las propiedades de los análogos	141
5.1.3. Acerca de Citlalmitl	147
5.2. Conclusiones	148
A. Corridas experimentales	151
A.1. Corrida experimental 1	151
A.2. Corrida experimental 2	154
A.3. Corrida experimental 4	157
A.4. Corrida experimental 5	163

Capítulo 1

Introducción

1.1. Meteoritas

Las meteoritas son rocas macroscópicas (>1 mm) compuestas por material extraterrestre que penetran en la atmósfera y llegan a la superficie de la Tierra. En los años 60s, gracias a redes de cámaras fotográficas usadas para determinar las trayectorias de algunos asteroides y meteoroides, se descubrió que los cuerpos precursores de meteoritas provienen del cinturón de asteroides (entre Marte y Júpiter, [Nittler y Ciesla, 2016](#)).

Se denominan meteoritas “caídas” a las que pueden relacionarse con material extraterrestre que se ha visto caer, el estudio de las meteoritas caídas es de gran importancia, debido a que las muestras son colectadas con un impacto mínimo sobre ellas de los procesos de meteorización que afectan a las rocas de la superficie de la Tierra ([Nittler y Ciesla, 2016](#)). Las meteoritas “encontradas” son aquellas en las que no se observa el momento de su caída y se encuentran tiempo después, comúnmente, en los desiertos fríos de la Antártica y los desiertos calientes del norte de África. Por convención, a las meteoritas se les asigna el nombre de la población más importante, cercana al lugar donde fueron recuperadas (por ejemplo, la meteorita de Allende cayó en Allende, Chihuahua, México).

1.1.1. Clasificación general de meteoritas

Los sistemas de clasificación de meteoritas sencillos dividen a las meteoritas según su contenido de metales en tres grupos: pétreas, mixtas (metálico-pétreas) y metálicas. Las meteoritas metálicas están hechas de aleaciones de hierro (Fe) y níquel (Ni) y constituyen el 6% de las meteoritas caídas. Las meteoritas pétreas constituyen el 93% de las meteoritas caídas y están compuestas de material rocoso (silicatos). Las meteoritas mixtas o metálico-pétreas, son las menos comunes ($\sim 1\%$) y contienen cantidades similares de material rocoso y metales (Fe y Ni). En la Figura 1.1 se muestran ejemplos de estas meteoritas.

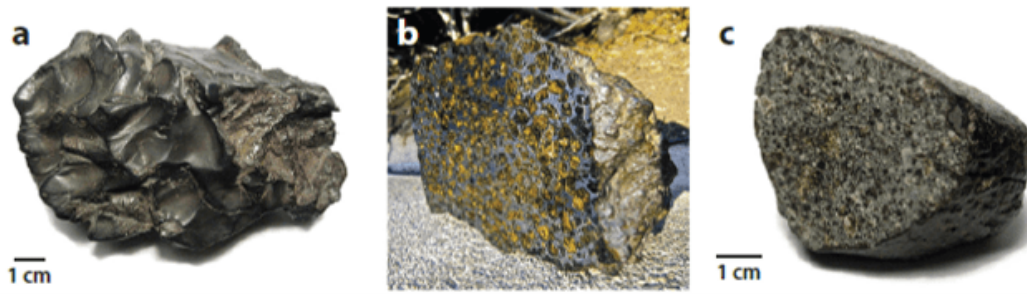


Figura 1.1: Clasificación de meteoritas según su contenido de metales. (a) Meteorita metálica (Sikhote-Alin). (b) Meteorita mixta (palasita de Brahin). (c) Meteorita pétreas (condrita ordinaria del Noreste de África) (modificada de [Nittler y Ciesla, 2016](#)).

De acuerdo a su origen, las meteoritas pueden ser subdivididas en dos grupos: meteoritas diferenciadas y no diferenciadas (Figura 1.2). Un planetésimo sufre diferenciación cuando se calienta provocando que los elementos más ligeros floten sobre los más pesados, generando capas radiales con distinta química, formando así un cuerpo diferenciado con un núcleo de metales, una parte de transición y una corteza de silicatos. Se piensa que los fragmentos del núcleo dieron lugar a meteoritas metálicas; la parte de transición a las meteoritas mixtas y las partes silicatadas fundidas a las acondritas, por lo que todas las anteriores pertenecen a la clasificación de meteoritas diferenciadas (en la sección 1.3.4 se habla a detalle sobre los procesos de diferenciación). Por otro lado, las condritas son meteoritas no diferenciadas, su composición similar a la del Sol, su petrología y su evidencia isotópica indican que vienen de la zona del cuerpo parental que no fue afectada por procesos de diferenciación ni fusión.

Por ello, las meteoritas diferenciadas contienen material primigenio que nos brinda información de los primeros sólidos formados en el sistema solar temprano. Las meteoritas diferenciadas y no diferenciadas se distinguen de acuerdo a la proporción de metales y/o silicatos, texturas y composiciones químicas. Las meteoritas no diferenciadas incluyen a las condritas (pétreas), mientras que las meteoritas diferenciadas incluyen a las acondritas (pétreas), las mixtas y las metálicas (Cervantes, 2009). Para fines de esta tesis sólo se habla de la clasificación de las meteoritas condriticas o no diferenciadas; en la sección 1.3.4 se habla de los procesos de diferenciación en las meteoritas.

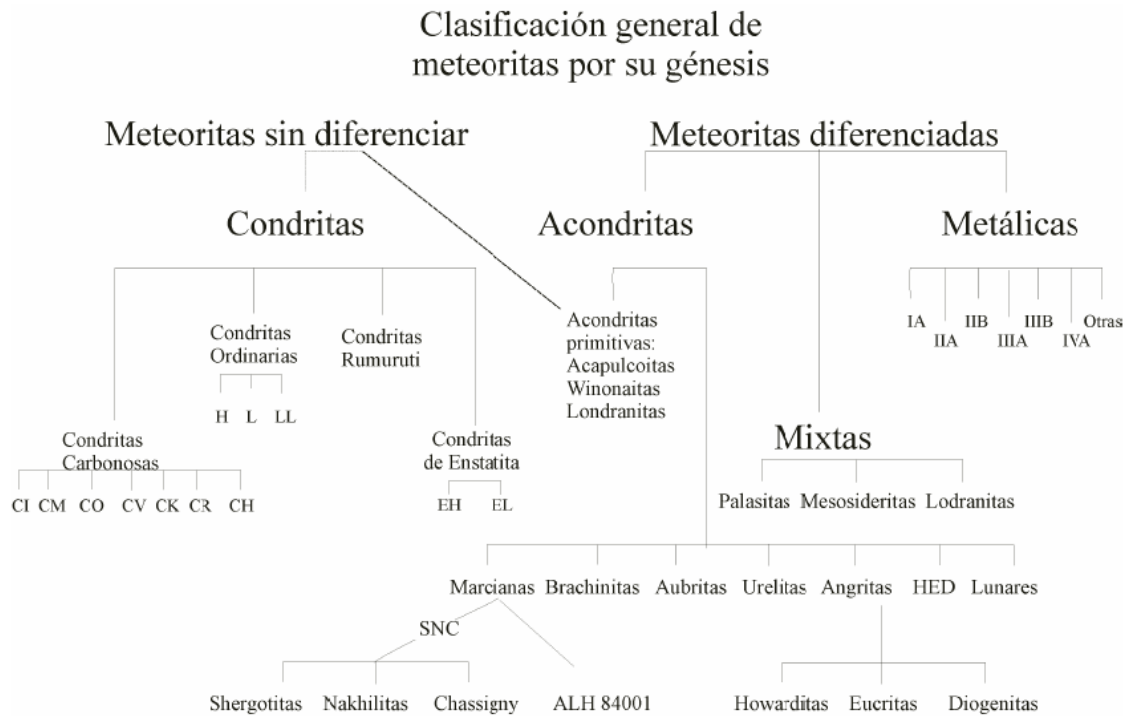


Figura 1.2: Clasificación de meteoritas (datos de Bischoff (2001), diseño de Cervantes (2009)).

1.1.2. Meteoritas condriticas

Alrededor del 85 % de las meteoritas caídas en la Tierra son condritas. Las condritas pueden verse como un tipo de roca sedimentaria (rocas formadas por acumulación de partículas de distintos tamaños) o de acreción en la que sus componentes estructurales probablemente se formaron en diferentes tiempos y lugares del disco protoplanetario.

tario (Connolly y Jones, 2016). Están compuestas principalmente por condros (véase sección 1.2), la matriz de grano fino, las inclusiones refractarias y otros ingredientes condríticos. La matriz de la condrita es el material de silicato de grano fino que llena los espacios entre los condros y los ingredientes condríticos, también contiene pequeñas cantidades de granos interestelares y circunestelares. Las inclusiones refractarias se dividen en dos tipos básicos: (a) Las CAIs; que se componen de minerales refractarios de Ca-Al-Ti, como corindón, hibonita, grossita, perovskita, espinela, melilita, diópsida de aluminio y anortita, que son estables por encima de 1,400 K y (b) los agregados ameboides de olivino (AOAs) que están compuestos de varias proporciones de forsterita y Fe, Ni metálico (estables por debajo de $\sim 1,450$ K), trocitos de espinela, anortita y piroxeno rico en aluminio y titanio (MacPherson, 2003; MacPherson et al., 2005). Los principales componentes de una meteorita condrita se muestran en la Figura 1.3. La importancia de las meteoritas condriticas según Connolly y Jones (2016) se basa en lo que sabemos de ellas con seguridad:

- Las condritas proveen información tanto de los procesos que ocurrieron como de los materiales que se formaron antes de la acreción en sus cuerpos parentales (Brearley y J., 1998) y justo después de su acreción (alrededor de 10 millones de años, Sears et al., 1988; Brearley y J., 1998; Scott y Krot, 2005; Weisberg et al., 2006).
- Las condritas, en especial las condritas carbonáceas de tipo CI, tienen una composición total similar a la de la fotosfera del Sol a excepción de hidrógeno (H), carbono (C), nitrógeno (N) y gases nobles (Sears et al., 1988; Brearley y J., 1998; Scott y Krot, 2005; Weisberg et al., 2006).
- Las condritas proveen información cronológica de la evolución del material rocoso del sistema solar temprano formado hace 4,567 Ma (como los CAIs y los condros, Amelin et al., 2002; Russell et al., 2006; Bouvier et al., 2010; Kita et al., 2012; Connelly et al., 2012; MacPherson et al., 2012; Bollard et al., 2015).
- Las condritas proporcionan un registro de los procesos de nucleosíntesis debido a que contienen granos presolares provenientes de otras estrellas (Huss y Lewis,

1995; Brearley y J., 1998; Zinner et al., 2003; Weisberg et al., 2006; Nguyen et al., 2007).

- Las condritas están compuestas tanto de minerales como de material orgánico (Sephton y A., 2005; Pizzarello et al., 2006; Burton et al., 2013).

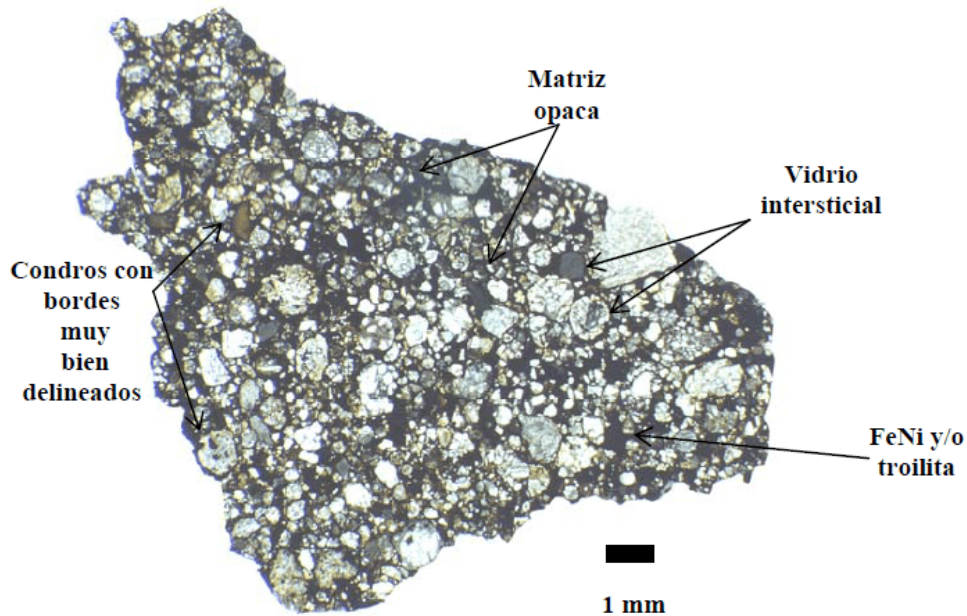


Figura 1.3: Componentes de una condrita (foto de [Cervantes, 2009](#)).

Las condritas presentan una amplia variación química en sus composiciones minerales, esto significa que, durante su formación, los diferentes componentes no estuvieron en contacto el tiempo suficiente como para homogeneizarse químicamente ([Lauretta et al., 2006](#)). Como la composición química total de las meteoritas condriticas coincide con la de la fotosfera solar (sin tener en cuenta los elementos volátiles), se sugiere que los ingredientes condriticos primordiales provinieron del disco protoplanetario. La mineralogía, química y composición isotópica de las condritas, dan indicios de las diversas temperaturas y procesos térmicos que se dieron en el disco protoplanetario ([Scott, 2007](#)).

Clasificación de meteoritas condriticas

Las condritas se clasifican en 12 grupos definidos por su composición química total, composiciones isotópicas, estados de oxidación y proporciones de componentes individuales (Tabla 1.1). La primera clasificación de las condritas se divide en condritas carbonáceas, de enstatita y ordinarias. Sin embargo, existen otros grupos de condritas que no se identifican dentro de los grupos mencionados y forman un grupo propio, estos son el tipo Rumuruti y el tipo Kakangari.

- *Condritas carbonáceas*: Son meteoritas ricas en silicatos máficos (como el olivino y piroxeno) y que contienen sulfuro, carbono, compuestos orgánicos y agua contenida en la estructura de los minerales hidratados (Wasson, 1974). Tienen una razón matriz/condros >1 , por lo que algunas condritas carbonáceas son casi 100% matriz (condritas CI). Las condritas carbonáceas se subdividen en: CI, CM, CR, CV, CO, CK y CH. La primera letra, que para todas es la C, es por carbonáceas y la segunda letra se refiere al lugar de la recuperación de la meteorita que motivo la subdivisión, por ejemplo, para las condritas CI el lugar en el que se recuperó la meteorita prototipo de esta subdivisión fue Ivuna, para CM, Mighei; para CR, Renazzo; para CV, Vigarano; para CO, Ornans; y para CK, Karoonda. La única excepción son las condritas con alto contenido de hierro que se clasifican como CH (Cervantes, 2009).
- *Condritas ordinarias*: Su nombre se debe a que son las meteoritas más abundantes que se han recuperado (Wasson, 1974). Se dividen en las de alto contenido de hierro total (H), las de bajo contenido de hierro total (L) y las de bajo contenido en hierro metálico en relación con el hierro total (LL) (Grady, 1995). El hierro metálico es aquel cuyo estado de oxidación es cero.
- *Condritas de enstatita*: Se llaman así debido a su alta cantidad de enstatita (piroxeno rico en Mg). Contienen minerales formados en ambientes pobres en O. El grupo de las condritas de enstatita se divide en las de alto contenido de Fe, Ni y sulfuros (EH) y las de bajo contenido de estos elementos (EL) (Wasson, 1974).

Tabla 1.1: Grupos de condritas (tomada de [Sears \(1997\)](#); [Wasson \(1985\)](#); [Bischoff \(2001\)](#); [Brearley y J. \(1998\)](#); [Scott \(2007\)](#), traducida por [Cervantes \(2009\)](#)).

Clase	Grupos de Condritas	FeO	Fayalita	Fosterita	Co en	Condros	
		(FeO+MgO)	(mol%)	(mol%)	Kamacita	Tamaño (mm)	Frecuencia (%vol condros)
Condritas carbonáceas	CV 2-3	35	0-35			1.0	30-45
	CO 3	35		0-35		0.15-0.2	40-70
	CM 1-2	43				0.2-0.3	20
	CI 1	45				-	<5
	CR 1-2		1-4	0-5		>1	40-40
	CK 3-6		28-33			1	15
	CH 3			1-36		0.05-0.12	~70
Ordinarias	H 3-6	17	16-20	4-18	~6.5	0.3-0.47	>40
	L 3-6	22	22-26	19-22	~10	0.46	20-30
	LL 3-6	27	27-32	22-26	20-100	0.33-0.6	60-80
Enstatita	EL 3-6	0.05	0.4			0.5-0.6	60-80
	EH 3-6	0.05	0.4			0.2-0.5	60-80
Otras	R 3-5		38-41			0.4	60-80
	K 3		2.2	3-4		0.6	60-80

1.2. Condros

El nombre de condrita proviene del griego “ $\chi\omicron\upsilon\delta\rho\zeta$ ” (chodros) que significa esfera. Tiempo después de la aparición de esta palabra (chodros), la palabra condro (chondrule) apareció en la literatura ([Tschermak, 1964](#); [Connolly y Desch, 2004](#); [Cervantes, 2009](#)). [Rose \(1864\)](#) se refirió a los condros como “kleine kugeln”, que posteriormente fue modificada por [Tschermak \(1964\)](#) a “Kulgenchen” y “chondren” y fue adoptado al inglés “chondrules”. En español se traduce como condros. ([Connolly y Jones, 2016](#)). Los condros son pequeñas esferas ígneas cuyos diámetros pueden medir decenas de micras ([Scott et al., 1988](#)) hasta centímetros ([Prinz et al., 1988](#)). Los condros representan el 80% en volumen de las condritas ordinarias y de enstatita y un 40% en volumen de las condritas carbonáceas ([Weisberg et al., 2006](#)). Los tipos de condros

más comunes están compuestos principalmente de los minerales ferromagnesianos olivino $[(Mg_xFe_{1-x})_2 SiO_4]$ y piroxeno bajo en Ca $(Mg_xFe_{1-x} SiO_3)$ donde x es la razón $Mg/(Mg+Fe)$ (Scott, 2007). También contienen en menor cantidad una mesostasis de vidrio de sílice rica en Na, Al, Si, Ca y K. Las aleaciones a base de Fe, los sulfuros y los óxidos están presentes en diversas abundancias (Lauretta et al., 2006). El hecho de que los condros sean esferas “ígneas” significa que los precursores de los condros fueron calentados a temperaturas capaces de fundir el material (parcial o completamente) y posteriormente enfriados hasta cristalizar el material (vease sección 1.2.2) y ser depositados, junto con otros sólidos, en el plano medio del disco protoplanetario. Esto da testimonio de que en el disco protoplanetario se debieron llevar a cabo procesos lo suficientemente energéticos como para formar estas pequeñas esferas con texturas ígneas denominadas condros. Por ello, se piensa que los condros son el resultado de los primeros eventos ocurridos en el sistema solar durante la época del crecimiento planetario (Desch et al., 2012).

Dicho lo anterior, el objetivo de estudio de los condros es comprender su posible relación con los procesos que formaron el sistema solar y resolver la incógnita del por qué de su existencia (Connolly y Jones, 2016). En la sección 1.2.2 trata con más detalle lo referente a la formación de condros; cuáles son las restricciones (térmicas y no térmicas) que los modelos de formación de condros deben de satisfacer para hacer predicciones cuantitativas; y los modelos de formación de condros que se han propuesto desde su descubrimiento.

1.2.1. Clasificación de los condros

Los condros se clasifican principalmente por su composición química, mineralogía y tipo textural (Connolly y Desch, 2004). Gooding y Keil (1981) realizaron un estudio petrográfico completo de condros en condritas ordinarias no equilibradas y clasificaron los condros según sus texturas (Figura 1.5). Sin embargo, ni el tamaño ni la forma del condro están fuertemente correlacionados con el tipo de textura. Esto dio paso al desarrollo de otros dos esquemas de clasificación de condros según el contenido general de FeO (Tabla 1.3).

Tabla 1.2: Composición total representativa (wt %) de los tipos de condros (tomada de [Lauretta et al., 2006](#)).

	IA	IAB	IB	IIA	IIAB	IIB
SiO ₂	44.8	56.4	57.9	45.1	53.8	58.7
TiO ₂	0.19	0.11	0.11	0.1	0.16	0.18
Al ₂ O ₃	3.9	2.4	2.4	2.68	4.8	4.6
Cr ₂ O ₃	0.44	0.58	0.59	0.51	0.5	0.59
FeO	1.18	3.4	2.8	14.9	8.8	7.8
MnO	0.12	0.36	0.28	0.39	0.6	0.54
MgO	40.7	33.9	33.4	31.3	25.1	21.4
CaO	3.5	1.7	1.7	1.89	2.7	3.3
Na ₂ O	0.52	0.56	0.46	1.65	2.1	1.9
K ₂ O	0.07	0.06	0.05	0.17	0.28	0.29
P ₂ O ₅	–	–	–	0.34	–	–
FeS	0.2	0.3	0.09	0.94	0.28	0.13
FeNi	3.76	0.32	0.28	0.51	–	0.08

En la clasificación de [Gooding y Keil \(1981\)](#), las texturas de los condros se pueden dividir en dos tipos: texturas porfídicas y no porfídicas. Los condros porfídicos conforman aproximadamente el 85 % de los condros en las meteoritas ordinarias ([Connolly y Desch, 2004](#)). Las texturas porfídicas muestran un gran intervalo de tamaños de grano, desde granos largos de tamaño uniforme dispuestos en una mesostasis vítrea, granos finos conocidos como granulares o microporfídicos, hasta granos más finos conocidos como aglomeráticos o de zona oscura ([Connolly y Desch, 2004](#)). Los condros porfídicos se dividen en condros de olivino porfídico (PO), dominados por olivino (>90 % de olivino), y condros de piroxeno porfídicos (PP), dominados por piroxeno (>90 % de piroxeno). Los condros olivino-piroxeno porfídicos (POP) continene aproximadamente la misma abundancia de olivinos y piroxenos. Los condros granulares (G) son aquellos que contienen granos pequeños (<10 μm) de tamaño uniforme con contornos de cristales poco definidos (Figura 1.4, [Lauretta et al., 2006](#)) Al igual que los condros porfídicos, los condros granulares se subdividen en grupos GO, GP y GOP respectivamente. Los condros no porfídicos conforman aproximadamente el 15 % de las meteoritas ordinarias ([Connolly y Desch, 2004](#)). Dentro de las texturas no porfídicas, se tienen las texturas dentríticas (barradas y radiales) y criptocristalinas. Los condros de olivino barrado (BO) contienen cristales de olivino con una forma barrada (generada porque todo los granos de olivino tiene la misma orientación cristalográfica, [Lauretta et al., 2006](#)). Los condros de piroxeno radial (RP) consisten en matrices en forma de abanico de piroxeno bajo en Ca (como enstatita), que irradian cerca de su superficie. Los condros criptocristalinos (CC) son aquellos que no muestran estructuras cristalinas bajo un microscopio óptico, son abundantes en material vítreo. Los condros metálicos están compuestos de Fe y Ni, algo de troilita (FeS) y cantidades menores de schreibersita y Cu metálico ([Lauretta et al., 2006](#)).

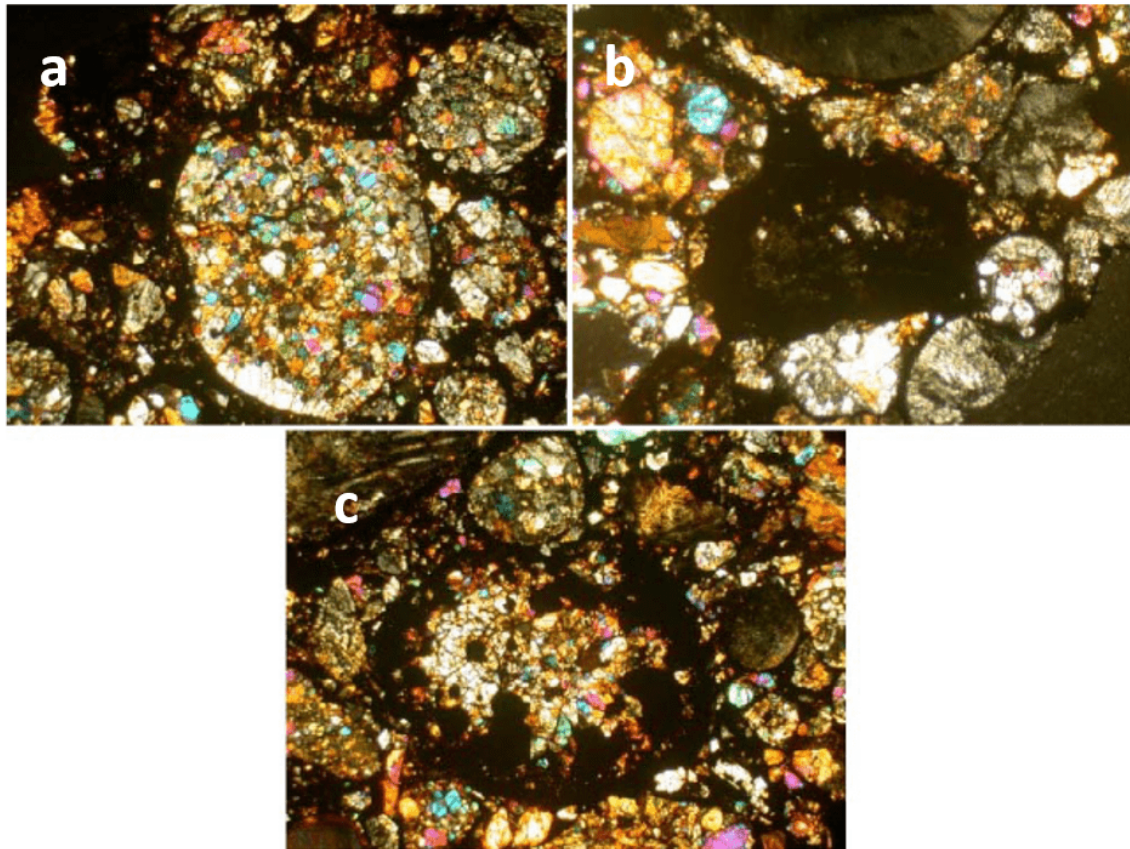
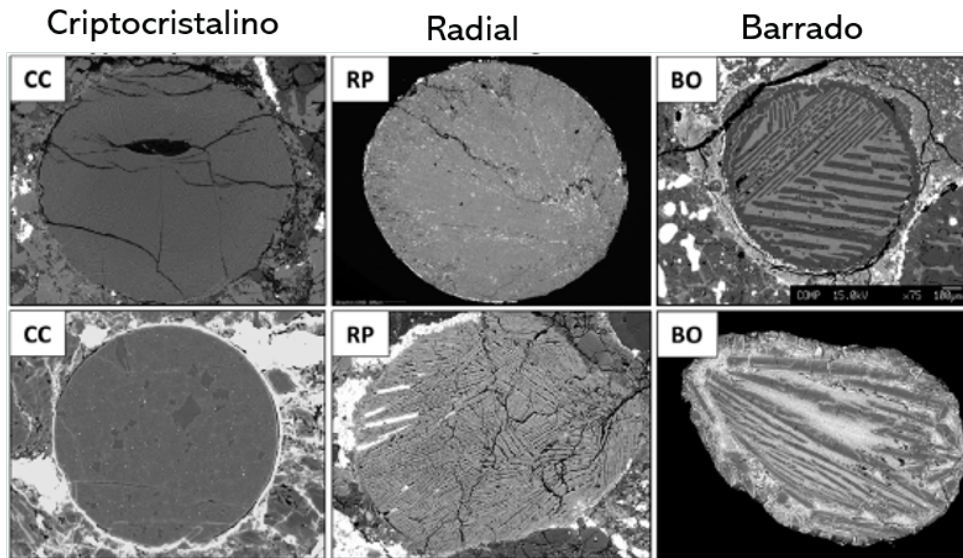


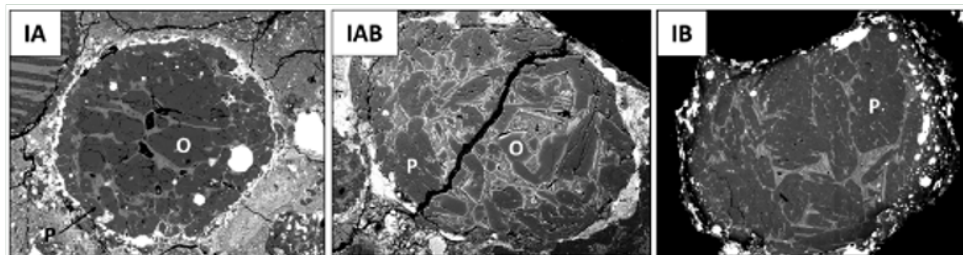
Figura 1.4: Microfotografías de sección delgada en luz transmitida y polares cruzados de condros porfídicos de condritas ordinarias de bajo grado metamórfico. El tamaño aparente es de 1 mm para la imagen a y b y 0.5 mm para la c. Las imágenes a y b representan condros de olivino granulares o microporfídicos. La imagen c representa un condro de olivino aglomerático, las partes oscuras se deben a las aleaciones de Fe y Ni (tomada de [Connolly y Desch, 2004](#)).

Texturas no-porfídicas



Texturas porfídicas

PO (olivino) POP (olivino y piroxeno) PP (piroxeno)
 Tipo I: Rico en MgO



Tipo II: Rico en FeO

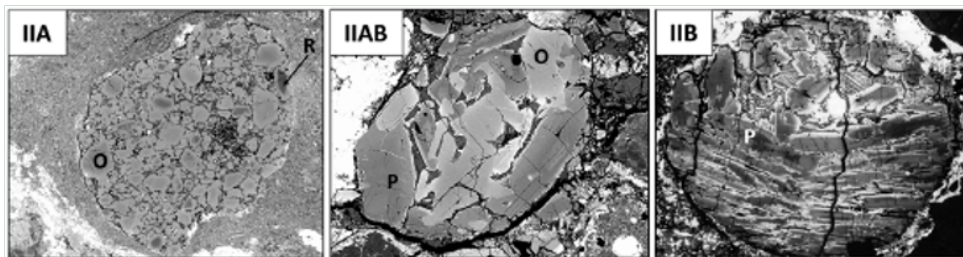


Figura 1.5: Texturas típicas de los condros naturales de diferentes condritas (Imágen de retrodispersión electrónica). La imagen se divide en texturas no-porfídicas y porfídicas. Dentro de las texturas no-porfídicas se observan, de izquierda a derecha, las criptocristalinas (CC), radiales de piroxeno (RP) y barradas de olivino (BO). Dentro de las texturas porfídicas se observan de izquierda a derecha las porfídicas de olivino (PO), porfídicas de olivino y piroxeno (POP y porfídicas de piroxeno (POP) tanto de condros de tipo I como de condros de tipo II (traducida de [Jones et al., 2018](#)).

El esquema más utilizado es el que clasifica los condros según el contenido general de FeO. Los condros con texturas porfídicas pueden ser clasificados como tipo I (pobres en FeO) y tipo II (ricos en FeO). Los condros de tipo I se caracterizan por la presencia de olivino y piroxeno pobres en FeO; con cantidades de Fo y En mayores a 90 % ó cantidades de FeO menores a 10 % en composición total, además contienen alrededor de 30 % en volumen de Fe y Ni. Los condros de tipo II contienen olivino y piroxeno ricos en FeO; >10 % de FeO en composición total y contienen muy poco o nada de metales (a excepción del Fe que se encuentra como óxido), ambos tipos con texturas granulares. Estas dos categorías se subdividen en subtipos A y B según su abundancia de olivino y piroxeno. Los condros que contienen mayor abundancia de olivino se denominan con la letra A, los de tipo IA y IIA respectivamente. Estos tiene una textura pokilítica, en la que pequeños granos de olivino están encerrados por cristales de piroxeno de mayor tamaño. Los tipo IIA tienden a contener cristales de olivino más grandes que los tipo IA (Hewins et al., 1997). Los condros que contienen mayor abundancia de piroxeno se denominan con la letra B, y de igual forma se clasifican como tipo IB y IIB. Por último, los condros con abundancias intermedias de olivino y piroxeno se clasifican como tipo IAB o IIAB. También existen los condros tipo III con texturas RP que pueden ser de tipo I (ricos en SiO) o de tipo II (pobres en FeO o ricos en FeO) . Sin embargo la clasificación tipo III no es muy utilizada. El esquema de calificación por contenido de FeO es más utilizado que el de Gooding y Keil (1981), aunque a menudo se utilizan conjuntamente (Lauretta et al., 2006). Las composiciones totales representativas de condros naturales se muestran en la Tabla 1.2.

1.2.2. Formación de condros

Tanto en ambientes terrestres como extraterrestres las rocas ígneas dan pistas sobre sus orígenes. Una roca ígnea es el resultado del enfriamiento de material fundido. Su textura y química mineral restringe la historia térmica de la roca, evolución del fundido y el material precursor (Connolly y Desch, 2004). El hecho de que los condros sean rocas ígneas abre paso a numerosas cuestiones: ¿Cómo se formaron los condros?

Tabla 1.3: Sistemas de clasificación de condros (traducida de [Lauretta et al., 2006](#)).

Clasificación textural			
Abreviación	Abundancia en OCs (%)	Textura	
POP	47-52	Porfírica, ambos: olivino y piroxeno	
PO	15-27	Porfírica, dominada por olivino (>10/1 por volumen)	
PP	9-11	Porfírica, dominada por piroxeno (>10/1 por volumen)	
RP	7-9	Piroxeno radial	
BO	3-4	Olivino barrado	
CC	3-5	Criptocristalino	
GOP	2-5	Olivino-piroxeno granular	
M	<1	Metálico	
Clasificación por composición			
Tipo	Composición del silicato	Subtipo	Abundancias silicato
I	Pobres FeO (Fo, En >90%)	A	Abundancia olivino (>80% vol)
		AB	Abundancias intermedias de olivino y piroxeno
II	Ricos FeO (Fo, En <90%)	B	Abundancia piroxeno (>80% vol)

¿Por qué se formaron los condros?, o una pregunta muy interesante planteada por [Connolly y Jones \(2016\)](#): ¿Los condros se formaron por procesos no triviales y forman parte de los bloques de construcción de la formación planetaria o simplemente son el subproducto de la formación planetaria lo que hace que sea totalmente entendible el hecho de que se hayan producido? El objetivo del estudio de los condros es entender su significado en el registro de la roca parental, la posible relación de los condros con otros procesos que ayudaron a formar el sistema solar temprano y saber ¿por qué y cómo se formaron? ([Connolly y Jones, 2016](#)).

El estudio analítico de la petrología, composición, mineralogía, magnetización e isotopía de los condros, al igual que la experimentación (como fundir análogos de condros en ambientes controlados), imponen una serie de restricciones que ayudan a evaluar si los modelos de formación de condros pueden hacer predicciones cuantitativas ([Desch et al., 2012](#)). Esta serie de restricciones es dividida por [Desch et al. \(2012\)](#) en dos principales grupos: Las restricciones en las *historias térmicas* (Tabla 1.4) y las restricciones *no térmicas* (Tabla 1.5). Por su parte, [Connolly y Jones \(2016\)](#) clasifican las restricciones en tres tipos: la restricción de orden cero establece que los condros son rocas ígneas, la restricción de primer orden es la que tiene que ver con las historias térmicas, y las restricciones de segundo y tercer orden involucran variables que afectan la dinámica del fundido. La variable fundamental para entender los procesos de formación de condros, es la historia térmica ([Connolly y Jones, 2016](#)), por ello en esta tesis se da enfoque a las restricciones en las historias térmicas, pero de igual forma se dan a conocer las restricciones no térmicas (o de segundo y tercer orden), en la subsección 1.2.2.

Restricciones en las historias térmicas

Experimentos de cristalización dinámica de los condros indican que los precursores de condros debieron ser calentados rápidamente a temperaturas ($\approx T_{liq}$) capaces de fundir el material ([Lofgren et al., 1990](#); [Radomsky et al., 1990](#); [Lofgren et al., 1986](#); [Hewins et al., 1997](#); [Connolly y Love, 1998](#); [Jones et al., 2000](#); [Connolly y Desch, 2004](#); [Ciesla et al., 2005](#); [Hewins et al., 2005](#); [Connolly et al., 2006](#); [Lauretta et al.,](#)

2006) y posteriormente debieron enfriarse (Connolly et al., 2006; Lauretta et al., 2006; Miyamoto et al., 2009) a una tasa tal que desarrollaron un crecimiento de cristales con características en desequilibrio (p.e, morfologías dendríticas, elongadas, Jones et al., 2018). Qué tan rápido debió calentarse o enfriarse el material precursor de los condros se ha cuantificado mediante experimentos de los cuales se obtienen las restricciones de toda la historia térmica. Entender la historia térmica implica definir la temperatura ambiente a la que se encontraba el material precursor de los condros, la tasa de calentamiento del material precursor de los condros, la temperatura máxima a la que se llegó durante el fundido de los condros y su tasa de enfriamiento (Connolly y Jones, 2016).

Se sabe que los precursores de los condros debieron encontrarse en regiones con $T < 650$ K debido a que los condros contienen sulfuros primarios que se encuentran encerrados en fenocristales. Para ello se requiere que exista azufre (S) en el fundido y el S sólo condensa a $T < 650$ K (Rubin et al., 1999).

Varios experimentos han demostrado que la fusión de los condros depende de la cantidad de calor que se aplica a los precursores, por cuanto tiempo se funden, cuanto tiempo se mantiene el fundido a temperatura constante, la naturaleza física de los precursores y el diámetro del objeto (Lofgren et al., 1986; Hewins, 1988; Lofgren et al., 1990; Radomsky et al., 1990; Hewins et al., 1997; Connolly y Hewins, 1991, 1996; Hewins et al., 1996; Connolly y Love, 1998). Estos experimentos que consisten en fundir material precursor para reproducir texturas análogas de condros se han realizado por dos métodos distintos: fundidos con duración de minutos a horas a temperaturas alrededor de la temperatura de liquidus, que es la temperatura que alcanza el material cuando funde completamente (T_{liq}), o fundidos con duración de segundos a minutos a temperaturas por encima de T_{liq} . Los experimentos que pudieron explicar la retención de volátiles en los condros fueron los de calentamiento rápido (de segundos a minutos) (Connolly y Desch, 2004). Los elementos que ayudaron a restringir las tasas de calentamiento de los condros fueron el sodio (Na) y el potasio (K). Una vez que los condros superan la temperatura de solidus, que es la temperatura a cual cristaliza el último sólido ($\approx 1,400$ K) y se encuentran parcialmente fundidos,

se sabe que la tasa de enfriamiento tuvo que ser rápida para evitar la evaporación total de los elementos volátiles como el Na y el K que forman parte de la composición de los condros (Hewins y Radomsky, 1990; Hewins et al., 1996). De igual forma el fraccionamiento isotópico del K, S y Fe refleja que estos elementos no tuvieron tiempo suficiente para evaporarse completamente, lo que implica que los condros debieron de ser calentados a temperaturas arriba de la temperatura de sólidos en minutos (Yu et al., 1998; Tachibana y Huss, 2002, 2005).

Los efectos de nucleación y la tasa de crecimiento de cristales son factores fundamentales para saber qué tipos de texturas se pueden obtener en un condro, ya que el crecimiento de los cristales está relacionado con la temperatura de nucleación y la cinética de átomos y moléculas. La tasa de enfriamiento es la tasa a la que los condros fundidos pierden más calor del que pueden ganar de su ambiente. Las tasas de enfriamiento son restringidas por la textura, abundancia de elementos mayores y menores en cristales y la composición química total del condro (Connolly y Desch, 2004). La temperatura máxima a la que llegan los condros se obtiene por medio de experimentos determinando el número de núcleos que prevalenecen al calentar prolongadamente (Lofgren, 1996; Hewins et al., 1996, 1997; Connolly y Love, 1998; Desch et al., 2002).

De manera general, considerando que la temperatura de liquidus (T_{liq}) está entre 1,400 y 1,700 °C (Hewins y Radomsky, 1990), en la Figura 1.6 se observa que las texturas porfídicas se producen cuando la temperatura máxima del fundido se encuentra ligeramente por debajo de T_{liq} (80 - 120 K debajo de T_{liq}), con el fin de mantener algunos sitios de nucleación (Hewins et al., 1996). Las texturas barradas se producen cuando la temperatura del fundido es ligeramente mayor a la T_{liq} , donde la mayoría de los sitios de nucleación son destruidos. Las texturas radiales se producen cuando la temperatura del fundido es considerablemente mayor a la T_{liq} (150 - 300 °C mayor a T_{liq}) (Hewins y Radomsky, 1990), debido a que a altas temperaturas todos los sitios de nucleación son destruidos.

El grado de fusión de los precursores de los condros depende de la duración de la fusión, de la temperatura máxima y de la temperatura de liquidus, temperatura que

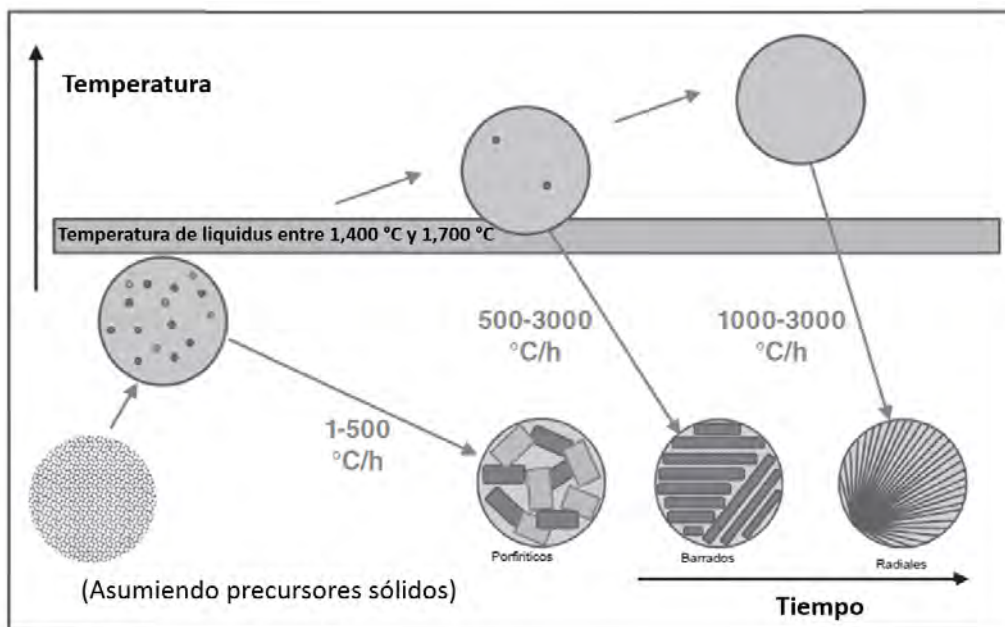


Figura 1.6: Temperatura máxima relativa a la T_{liq} para formar texturas porfídicas, barradas y radiales. La ilustración asume precursores sólidos y tiempos de calentamiento cortos (máximo 2 horas) en alcanzar la temperatura máxima. Se aprecia que las texturas porfídicas tienden a formarse a una $T < T_{liq}$, las texturas barradas a una T ligeramente mayor a T_{liq} y las radiales a $T > T_{liq}$. las tasas de enfriamiento son menores para las texturas porfídicas que para las barradas y radiales (traducida de Jones et al., 2018).

depende de la composición del condro (Hewins et al., 2005). Lofgren (1996); Desch et al. (2002); Hewins et al. (2005); Desch et al. (2012) han logrado reproducir las texturas básicas de los condros, lo que ha permitido establecer restricciones cuantitativas en las tasas de enfriamiento de los fundidos de los condros. Como se puede apreciar en la Figura 1.7, los resultados de los experimentos son separados de izquierda a derecha por los distintos tipos texturales de los condros: porfídicos de tipo I, porfídicos de tipo II, barrados y radiales. Los experimentos que han logrado reproducir las texturas porfídicas de los condros de tipo I y tipo II tiene tasas de enfriamiento entre 2 - 1,000 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a temperaturas debajo de T_{liq} . Los experimentos que reprodujeron texturas barradas coinciden en que las tasas de enfriamiento se encuentran bien delimitadas entre 500 - 3,000 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$. En cambio, debido a que la temperatura de nucleación no puede ser definida, las tasas de enfriamiento de las texturas radiales pueden encontrarse donde sea (entre 5 - 3,000 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$). Vale la pena recalcar que los diferentes tipos de texturas se obtienen con las tasas de enfriamiento anteriores, aunque es posible obtener las

mismas texturas mediante calentamiento más intenso y tiempos más cortos (Jones et al., 2018). Las historias térmicas son las restricciones más importantes para la formación de condros, ya que nos dan un panorama completo de cómo los condros fueron fundidos.

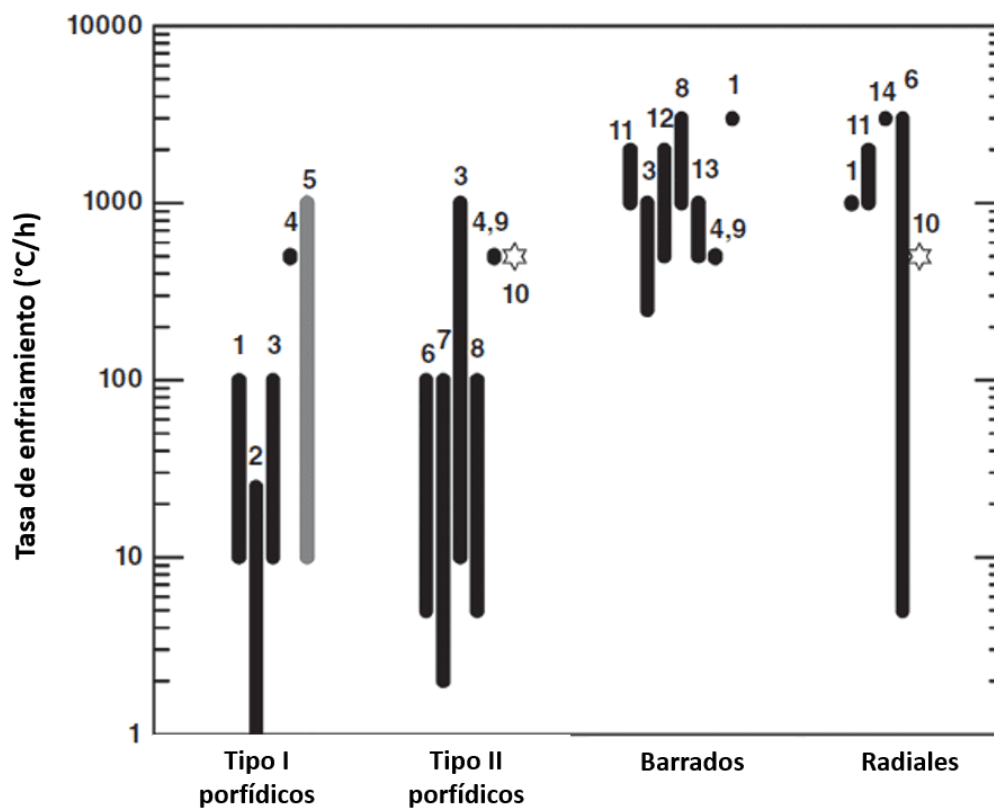


Figura 1.7: Tasas de enfriamiento obtenidas de experimentos que han reproducido las texturas de los condros (traducida de Jones et al., 2018). Los números y las barras indican estudios individuales. En todos los experimentos se implementaron tasas de enfriamiento lineales a excepción del (2), en el que se usó una tasa de enfriamiento decreciente. La barra gris (5) es para condros ricos en aluminio, todos los demás son condros ferromagnesianos. Las estrellas (10) indican experimentos llevados a cabo a tasas de enfriamiento de 500 °C/h y además se sopló polvo sobre la gota fundida mientras se enfriaba. En la mayoría de los experimentos se alcanza la temperatura máxima en menos de 2 horas, a excepción del experimento (6) en el que el tiempo es de 17 horas. Los experimentos se numeran de la siguiente manera: 1) Dehart et al. (1996); (2) Wick et al. (2012); (3) Radomsky et al. (1990); (4) Connolly y Hewins (1991); (5) Tronche et al. (2007); (6) Lofgren et al. (1986); Jones et al. (1993); (8) Lofgren (1989); (9) Connolly y Love (1998); (10) Connolly y Hewins (1995); (11) Kennedy et al. (1993); (12) Lofgren et al. (1990); (13) Tsuchiyama et al. (2004); (14) Hewins et al. (1981).

Restricciones no térmicas

Como se mencionó anteriormente, para que un modelo de formación de condros pueda considerarse viable necesita cumplir con ciertas restricciones. El primer filtro para un modelo es que pueda reproducir las historias térmicas y una vez que el modelo las reproduce, se evalúan las restricciones no térmicas (o de 2o y 3er orden según [Connolly y Jones \(2016\)](#)). Estas restricciones plantean las siguientes cuestiones: ¿Los condros pasaron por una o por múltiples historias térmicas?, ¿qué nos dice la frecuencia de los condros?, ¿cuál era el tamaño de la región de formación de los condros?, ¿a qué presión de gas se formaron los condros?, ¿cuál es el intervalo de tamaños de los condros?, ¿cuál es la edad de formación de los condros? y ¿los condros y la matriz son cogenéticos?. En esta sección se analizan los estudios que se han hecho sobre las restricciones anteriores.

1. *Reciclaje de los condros*: Existe evidencia de que los condros son reciclados, es decir, no sufrieron sólo por una, sino por múltiples historias térmicas diferentes entre sí. La evidencia del reciclaje de los condros de basa principalmente en:
 - Granos relictos de olivino y piroxeno que no fueron cristalizados del fundido. La opinion se divide sobre qué fracción de estos granos fue derivada de los condros ([Hewins et al., 1997](#)). [Jones \(1996\)](#) encontro que 15 % contienen material relicto que experimentó dos eventos de formación de condros.
 - Se han reportado CAIs dentro de condros ([Misawa y Nakamura, 1996](#)) al igual que condros relictos dentro de otros condros ([Jones et al., 2000](#); [Ruzicka et al., 2008](#)) y condros envueltos por bordes (o anillos) ígneos ([Gooding y Keil, 1981](#); [Wasson et al., 1995](#); [Rubin y Krot, 1996](#))

El reciclaje de los condros es un hecho, pero aún existen preguntas sin resolver como cuántas veces se puede reciclar un condro y si se pueden restringir las condiciones térmicas de un proceso repetido.

2. *Frecuencia de los condros*: La densidad de los condros está restringida por la frecuencia de los condros compuestos (algunos condros son agregados de la fusión

de dos condros, a estos se les denomina condros compuestos). En las condritas ordinarias una fracción de condros de aproximadamente el 5 % son condros compuestos. Esto implica que los condros se formaron en regiones más densas de lo que se pensaba (Ciesla et al., 2004). Un límite superior de la velocidad relativa de los condros después de su formación es de $V_{rel} < 10^4 \text{ cm s}^{-1}$, ya que velocidades más altas rompería a los condros (Ciesla et al., 2004). Suponiendo una radio de $300 \mu\text{m}$ la densidad numérica sería de $n_c = 2 \text{ m}^{-3}$ y la densidad de masa $m_c = 3.7 \times 10^{-4} \text{ g}$ (Desch et al., 2012) lo que daría una densidad de condros dentro del disco protoplanetario de $\rho_c = 3 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-3}$.

3. *Tamaño de la región de formación de los condros:* Los condros compuestos también restringen el tamaño de la región donde se formaron, ya que para cumplir con la frecuencia necesaria, la región necesitaría ser de un tamaño al menos de 10^3 km para aumentar las probabilidades de colisión (Desch et al., 2012). Cuzzi y Alexander (2006) conociendo la pérdida de volátiles experimentada por los condros obtuvieron que el tamaño de la región de formación de los condros se encuentra entre $150 - 6,000 \text{ km}$.
4. *Restricción en la presión del gas:* Los condros experimentan evaporación de elementos como K, Fe, Mg durante sus periodos de calentamiento (Alexander, 2004; Davis et al., 2005). Se piensa que el vapor perdido de los condros debió permanecer en la vecindad de estos, incrementando las presiones parciales de los volátiles en el gas, para posteriormente recondensarse y formar parte de los condros o de la matriz (Desch et al., 2012). Se necesitan presiones del gas mayores a 10^{-3} atm para evitar la condensación de volátiles como Na, K y S (Ebel y Grossman, 2000; Miura et al., 2002; Alexander, 2004).
5. *Tamaño de los condros:* El tamaño de los condros es de milímetros a centímetros y varía entre diferentes tipos de condritas (Jones, 2012). Para condritas carbónáceas, ordinarias y de enstatita, el rango de tamaño promedio se encuentra entre 0.2 mm y 1 mm (Connolly y Jones, 2016). El hecho de que los condros tengan tamaños restringidos desata una serie de cuestiones: si los intervalos de

tamaño pueden dar información sobre la región donde se formaron los condros; cómo se produjeron; la disponibilidad de material que fue procesado en condros; ¿por qué no hay abundancia de condros más grandes?; y si existió un mecanismo que operara antes durante o después de la formación de los condros (Connolly y Jones, 2016).

6. *Edad de formación de los condros:* La duración total de la formación de condros y CAIs puede proveer restricciones sobre su origen (Amelin et al., 2002) Para restringir el tiempo de formación de los primeros sólidos en el sistema solar se utilizan análisis isotópicos de ^{26}Mg y ^{26}Al . Utilizando el sistema $^{26}\text{Al}/^{26}\text{Mg}$ y las diferencias del cociente inicial de $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ en condritas carbonáceas y ordinarias se encontró que muchos de los condros en estas condritas se formaron 1.5 Ma después de los CAIs, terminaron su formación entre 3 y 4 Ma después de los CAIs (Villeneuve et al., 2009; Kurahashi et al., 2008). Bizzarro et al. (2004) encontraron, a partir del cociente $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ que la formación de condros en la meteorita Allende ocurrió de manera contemporánea con la formación de CAIs, lo que corrobora que la formación de los condros se dio por procesos repetitivos en los que hubo mezcla de material de diversas fuentes (para mayor detalle sobre como se determina la edad de formación de condros vease sección 1.3.5).
7. *Complementariedad entre condros y granos de la matriz:* Esta restricción se refiere a si los condros y la matriz se formaron en el mismo ambiente (son cogenéticos) o si se formaron en regiones distintas. Estudios demuestran que los condros y los granos de la matriz pueden desviarse en sus abundancias químicas respecto a un patrón de abundancia condrítica estándar, pero su suma se encuentra mucho más cerca de la solar (CI), lo que significa que los condros y los granos de la matriz son cogenéticos (Desch et al., 2012). Se han observado pruebas de la complementariedad condro-matriz en varias clases de condritas, como la CO (Wood, 1985), CV (Palme et al., 1993; Murakami et al., 1994; Hezel et al., 2008), CR (Klerner et al., 1999) y otras condritas carbonáceas (Bland et al., 2005).

Se puede aprender mucho sobre los procesos de formación de condros estudiando los bordes ígneos, granos relictos, condros compuestos, que fueron formados por colisiones con los condros total o parcialmente fundidos (Figura 1.8). Alrededor del 15 % de los condros tienen granos relictos que no cristalizaron, granos de otros condros o material refractario (Jones et al., 2005). Como los condros de tipo I y II provienen de distintas regiones de la nebulosa solar, entonces los condros se formaron por procesos repetitivos en los que hubo mezcla de material de diversas fuentes (Scott, 2007): De igual forma, muchos condros contiene bordes ígneos de grano fino que se formaron por colisiones entre polvo y condros parcialmente fundidos (Krot y Wasson, 1995). Antes se consideraba que los condros se formaban en un proceso de dos etapas, en el que dos partículas de polvo ya formadas se fundían por calentamiento rápido. Sin embargo, con las evidencias anteriores, se comprueba que los condros crecen mediante colisiones y son fundidos múltiples veces (Scott, 2007).

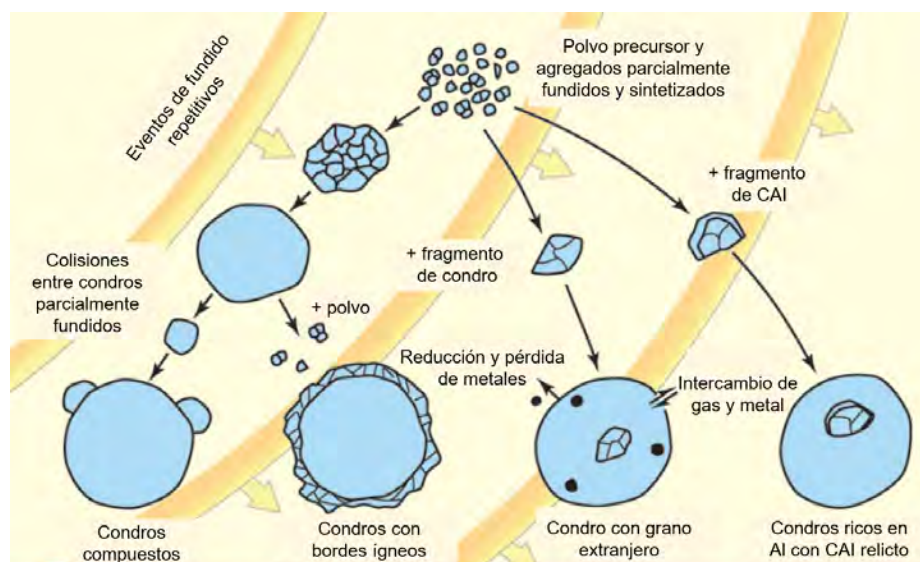


Figura 1.8: Ilustración de los procesos involucrados en la formación de condros: calentamiento y fusión de polvo, crecimiento por colisiones entre partículas sólidas y objetos total o parcialmente fundidos, e intercambio entre el gas y el material fundido. Estos procesos justifican la existencia de los condros compuestos y CAIs dentro de condros, bordes ígneos y condros adheridos en el exterior (traducida de Scott, 2007).

Modelos de formación de condros

Los modelos se pueden clasificar de acuerdo con las fuentes de energía de los procesos de fusión de los condros. Se estudian principalmente tres paradigmas: Impactos y colisiones entre cuerpos en las etapas tempranas de la formación planetaria, eventos energéticos cerca del proto-Sol y ondas de choque en el disco protoplanetario (Connolly y Desch, 2004). Algunos de los modelos invocan el derretimiento de condros por la cercanía al Sol debido a la luz solar y las erupciones solares, también por ablación en el flujo bipolar que acompaña al proto-Sol. Otros modelos identifican a los condros como gotas fundidas producidas por colisiones entre cuerpos planetarios. También existen modelos en los que los condros se forman en la nebulosa solar mediante fenómenos electromagnéticos. Mientras que otros invocan que los condros se forman en frentes de choque a través del gas o choques provocados por inestabilidades gravitacionales en el disco de acreción, etc. Se puede presentar gran cantidad de modelos de formación de condros, sin embargo sólo son de utilidad aquellos modelos que predicen las propiedades observadas de los condros (Desch et al., 2012).

1. *Flujo bipolar de jets* (Skinner, 1990; Liffman et al., 1996) / *Viento-X* (Shu et al., 1996):

Ambos modelos se basan en las observaciones de los objetos jóvenes estelares (YSO's) y en las teorías de acreción y flujos bipolares de YSO's. Los flujos bipolares y jets colimados a alta velocidad de YSO's se forman donde la magnetosfera del Sol trunca el disco protoplanetario. Los sólidos del disco son levantados por el arrastre aerodinámico del viento impulsado magnetocentrífugamente debido a la interacción entre el disco y los campos magnéticos del proto-Sol, esta interacción forma una geometría de X a menos de 0.1 ua del Sol (de ahí el nombre del modelo de viento-X). Según el modelo de flujo bipolar de jets, los condros son gotas de ablación que se producen por la interacción del viento del jet con los cuerpos macroscópicos que se desvían hacia la región de formación del jet, en ambos modelos los condros se calientan conforme son arrastrados por los jets. El modelo de flujo bipolar de jets también explica la formación de condros com-

puestos, estos se forman a una escala de altura por arriba del plano medio del disco interno de acreción, donde tiene lugar la fragmentación colisional de los condros. En el modelo del viento-X, la temperatura a la que inician los sólidos es de 1,160 K, una vez que los condros se exponen directamente a la luz solar alcanzan una temperatura máxima de 1,700 K a 0.1 ua. El tiempo estimado que tardan los condros en alcanzar la escala de altura es de horas a días. Una vez alcanzada la temperatura máxima, los condros se reincorporan al disco y se enfrían aproximadamente a la misma tasa a la que el gas del jet se expande. [Desch et al. \(2010\)](#) criticó la capacidad que tiene el modelo de viento-X para explicar la formación de condros y CAIs y la producción de radionúclidos.

2. *Rayos nebulares* ([Desch et al., 2000](#)):

Los rayos nebulares se podrían producir por la separación y acumulación de cargas positivas y negativas en la nube de gas, ocasionadas por colisiones entre moléculas. El aumento de la densidad electrónica en la nube también aumenta la corriente eléctrica, permitiendo que grandes cantidades de carga se muevan a través de un canal ionizado, produciendo una descarga eléctrica (como los rayos en la Tierra). Este canal puede calentarse a temperaturas de 10^3 K. Si un rayo terrestre produce fulguritas (roca fundida) cuando entra en contacto con el suelo arenoso, entonces es razonable pensar que los rayos nebulares pueden producir condros. Algunos ejemplos de modelos de rayos nebulares se basan en separación de cargas a lo largo de la escala de altura de la nebulosa ([Gibbard et al., 1997](#); [Pilipp et al., 1998](#)), otros se basan en la separación de cargas por remolinos turbulentos ([Desch et al., 2000](#)). Sin embargo, la mayoría de los modelos de rayos nebulares se enfocan en la separación de cargas y en cómo se inicia la descarga eléctrica, y no en cómo se funden los condros ([Desch et al., 2012](#)).

3. *Fulguraciones magnéticas* ([Levy et al., 1989](#)):

Los remanentes de magnetización encontrados en las meteoritas son evidencia de que existió un fuerte campo magnético en la nebulosa planetaria con una intensidad entre 0.1 y 10 G. El modelo de fulguraciones magnéticas propone que

tales campos magnéticos escapan de la parte externa del disco generando fulguraciones con energía suficiente para fundir sólidos acumulados y convertirlos en condros. Haciendo un análisis de la energía liberada en los eventos de reconexión magnética de las fulguraciones, para fundir condros se necesitan $T > 1,700$ K (campo magnético de 5 G) en regiones de baja densidad en la corona del disco, por lo que tanto las fulguraciones como la formación de condros debieron ocurrir a altas altitudes de la corona del disco.

4. *Hojas de corriente* ([Joung et al., 2004](#); [McNally et al., 2013](#)):

Modelos numéricos han demostrado la formación de capas laminares de corriente (hojas de corriente) generadas por regiones magnéticamente activas en el disco protoplanetario (DP) con una fracción de ionización suficiente para formar inestabilidades magnetorotacionales (MRI). A densidades de gas bajas y en regiones donde el cociente polvo/gas está por encima del valor estandar, estas hojas de corriente pueden alcanzar temperaturas suficientes ($T > 1,600$ K) para fundir granos de polvo. En este modelo se propone que las hojas de corriente se forman en el plano medio del disco y en etapas tardías de la evolución del disco protoplanetario, cuando su densidad decrece. Bajo estas condiciones los granos de polvo pueden ser calentados y fundidos en las hojas de corriente y así formar condros.

5. *Impactos y colisiones entre cuerpos planetarios* ([Urey et al., 1953, 1967](#); [Sanders et al., 1996](#); [Sanders y Taylor, 2005](#); [Asphaug et al., 2011](#)):

Se sabe sin lugar a dudas que las colisiones ocurrieron en la etapas tempranas del sistema solar, ya que los cuerpos planetarios se formaron por acreción de material. La pregunta es si los condros también se formaron por colisiones de cuerpos de mayor tamaño. El punto de vista canónico según [Connolly y Jones \(2016\)](#) es que los condros se formaron antes que los planetésimos por una serie de procesos térmicos, por lo que el rol de los condros podría ser de importancia para explicar la formación planetaria. El punto de vista no canónico es que los condros son el subproducto de colisiones entre cuerpos de mayor tamaño, lo que nos dice

que ya existían cuerpos de mayor tamaño antes de la formación de los condros y por ende, los condros no tendrían impacto para explicar las teorías de formación planetaria. El modelo de colisión fue propuesto por primera vez por [Merrill \(1920\)](#), pero este no hacía predicciones cuantitativas. Posteriormente, [Asphaug et al. \(2011\)](#) propusieron un modelo de colisión que plantea que la mayoría de los condros se formaron por colisiones de acreción, donde las colisiones están dominadas por la gravitación, el impulso, y por la creación de energía superficial y la liberación de volátiles a pequeña escala. Sin embargo este modelo no brinda detalles de cómo los condros fueron calentados, ni de su temperatura máxima, además de que las tasas de enfriamiento que reproducen son muy rápidas y los tiempos de formación no coinciden. ([Desch et al., 2012](#)). Por ello no puede reproducir las historias térmicas con precisión ([Connolly y Jones, 2016](#)).

6. *Ondas de choque:*

Los modelos de onda de choque han hecho predicciones cuantitativas tanto de las historias térmicas como de algunas de las restricciones no térmicas. Sin embargo, a diferencia de los impactos y colisiones de planetésimos y de los eventos energéticos en el proto-Sol, las ondas de choque no han sido observadas aún ([Desch et al., 2002](#)). A pesar de que no se han observado, simulaciones numéricas muestran que las ondas de choque sí pueden formarse en el disco protoplanetario principalmente por fuentes como inestabilidades gravitacionales, choques de proa por planetésimos, choques de acreción en la superficie del DP y acreción de gas por el DP, siendo los primeros dos los más aceptados ([Connolly y Desch, 2004](#)). Los modelos de onda de choque consisten en una onda de choque que se propaga supersónicamente (mayor a la velocidad del sonido) en zonas ricas en polvo y pequeños sólidos en el disco protoplanetario. Antes del paso de una onda de choque, el gas y los sólidos se encuentran a la misma temperatura. Las ondas de choque provocan que en el frente de choque el gas se comprima y se caliente. Los sólidos experimentan un arrastre supersónico que los calienta, estos también puede calentarse por el contacto con el gas caliente e irradian en

el infrarrojo provocando que los sólidos cercanos a ellos que no fueron afectados por la onda de choque también se calienten a temperaturas suficientes para fundirlos y formar condros (Desch et al., 2012). Una vez que la onda de choque pasa, los sólidos se mantienen calientes por horas. Las tasas de enfriamiento depende del tiempo que le tome al frente de choque alejarse del gas (aproximadamente 5 profundidades ópticas). A mayor densidad de condros, más rápido se alejan del frente de choque y más rápido se enfrían. Una predicción importante de las ondas de choque es que aumentan la presión del gas hasta 2 órdenes de magnitud evitando la evaporación de los condros (Connolly y Desch, 2004). En la Figura 1.9 se muestra una ilustración de la historia térmica predicha por el modelo de onda de choque.

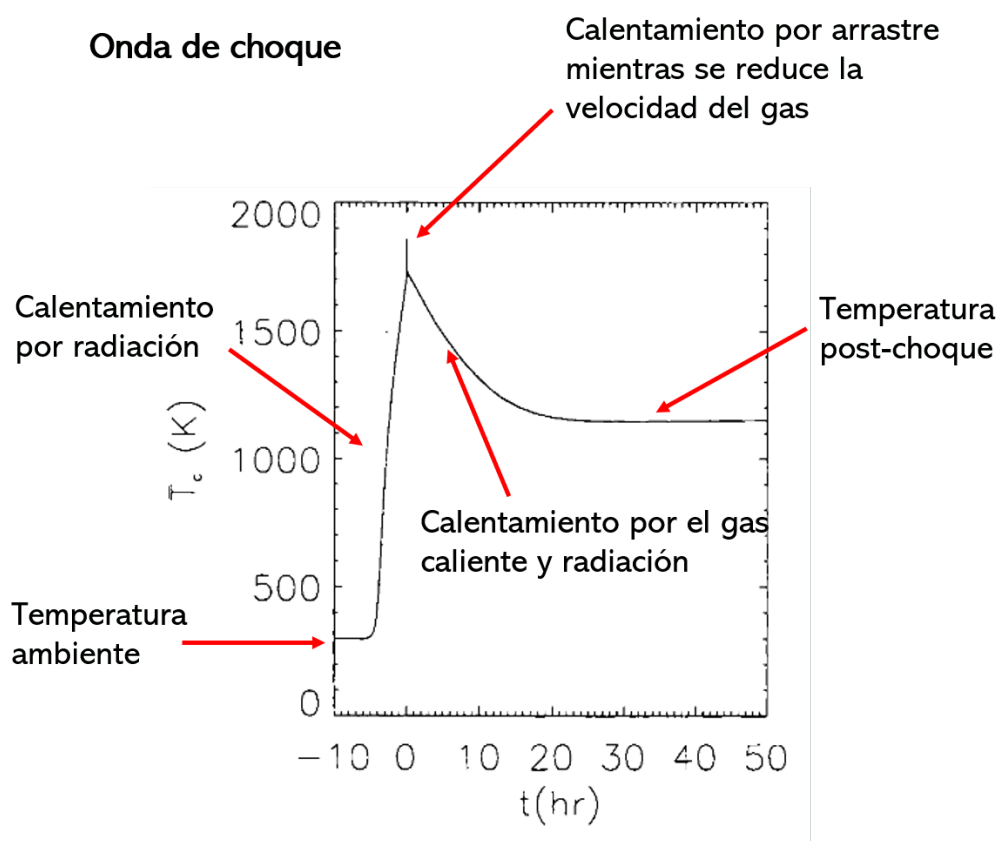


Figura 1.9: Historia térmica de los condros predicha por el modelo de onda de choque (tomada de Connolly y Desch, 2004).

- *Choques conducidos por inestabilidades gravitacionales (GI's)* Este modelo

sugiere que los precursores de los condros fueron procesados térmicamente en ondas espirales que fueron conducidas por inestabilidades gravitacionales en la nebulosa solar (Boss y Durisen, 2005). Para formar un planeta como Júpiter ya sea por acreción de núcleo o por inestabilidades en el disco, fue necesario que la nebulosa solar fuera gravitacionalmente inestable. Para ello, la nebulosa solar debió haber tenido brazos espirales y anillos que produjeran trampas de presión en el plano medio del disco en donde quedarán atrapados los sólidos evitando que fueran arrastrados hacia el proto-Sol. Estos sólidos estarían ligados al gas y serían sometidos a procesamiento térmico guiado por la dinámica del gas (onda de choque) para así formar condros. Simulaciones hidrodinámicas de la evolución del disco por GI's muestran que los choques son una salida natural de este proceso (Boss, 2002). Además, con las observaciones de ALMA (Atacama Large Millimeter Array) se confirma que los discos protoplanetarios sí forman brazos espirales, anillos y otras estructuras.

- *Choques de proa de planetésimos:* Este modelo predice que los condros se forman al pasar a través de un choque de proa generado por un planetésimo en una órbita excéntrica. Cualquier cuerpo con una órbita excéntrica va a formar un choque de proa en frente de él debido a la diferencias de velocidad orbital entre el cuerpo y el gas (el gas se mueve a una velocidad cercana a la kepleriana v_k). En el perihelio y afelio, la velocidad de un cuerpo con excentricidad e es: $e v_k/2$ (Morris et al., 2012). El procesamiento térmico del choque de proa de planetésimos es similar al de GI a diferencia de que la escala del choque es comparable con el tamaño del planetésimo (alrededor de 100 km) (Ciesla et al., 2004). Por ello, el principal problema de este modelo es que el área que abarca el planetésimo es demasiado pequeña para satisfacer las restricciones de la formación de condros. Desch et al. (2012) sugieren para este modelo tasas de enfriamiento de 100 °C/h que coinciden con texturas porfídicas. A pesar de ese inconveniente, la formación de condros por choques de proa de planetésimos o embriones

planetarios cumple con la mayoría de las restricciones de formación de condros (Desch et al., 2012). Boss y Durisen (2005) critican este modelo diciendo que para que un planetesimo tuviera altas excentricidades en la región de asteroides (como se sugiere el modelo de choques de proa) tendría que haber estado en resonancia con un planeta como júpiter. Sin embargo, según el modelo de acreción de núcleo, un planeta como júpiter tarda varios millones de años en formarse, lo cual no coincide con la edad de formación de los condros.

A pesar de la gran cantidad de modelos de formación de condros existentes en la literatura, los más válidos son aquellos que pueden hacer predicciones cuantitativas sobre las historias térmicas. En el artículo de Desch et al. (2012) revisan un número de restricciones tanto térmicas como no térmicas que han sido establecidas para la formación de condros. Se examinan cuatro modelos en específico que se consideran mejor desarrollados: El modelo del viento-X, rayos nebulares, choques de proa por planetesimos y choques conducidos por inestabilidades gravitacionales. En las Tablas 1.4 y 1.5 se muestran las restricciones tanto térmicas como no térmicas, respectivamente, que cumple cada uno de los modelos evaluados. Las Tablas fueron traducidas de Desch et al. (2012).

En la Figura 1.10 se ilustran las diferencias entre las historias térmicas de cada uno de los modelos evaluados. Después del análisis hecho, Desch et al. (2012) llegaron a las siguientes conclusiones:

- El modelo de rayos nebulares no fue desarrollado completamente.
- El modelo de choques de proa por planetesimos no es tan robusto debido a las pequeñas escalas de tamaños de la región en la que puede ocurrir la formación de condros.
- El modelo de viento-X falló en explicar la complementariedad de condros y matriz, además de que viola la restricción del tiempo de formación de los condros. También en el modelo de viento-X los condros comienzan a formarse en un ambiente muy caliente, no alcanzan la T_{max} .

Tabla 1.4: Restricciones térmicas (traducida de [Desch et al., 2012](#)).

Restricción	Viento-X	Rayos nebulares	Choques de proa	Choques por GIs
Temperatura ambiente <650 K	✗	✓	✓	✓
Calentamiento <10 min	✗	✓	✓	?
$T_{max} \geq 2,000$ K	✗	?	✓	✓
Tasa de enfriamiento desde $T_{max} \sim 10^3 - 10^4$ K/h	✗	?	✓	✓
Tasa de enfriamiento de cristalización $\sim 10 - 10^3$ K/h (porfídicos)	✓	✗	?	✓
Tasa de enfriamiento de cristalización $\sim 10^2 - 10^3$ K/h (barrados)	✗	✗	?	✓
Tasa de enfriamiento relacionada con la densidad de condros	✗	✗	?	✓

Tabla 1.5: Restricciones no térmicas (traducida de [Desch et al., 2012](#)).

Restricción	Viento-X	Rayos nebulares	Choques de proa	Choques por GIs
Longitud de la región de formación $L \gg 10^3$ km	✓	✗	?	✓
Densidad numérica de condros $n_c \sim 10$ m ⁻³	✓	?	?	?
Presión $P > 10^{-3}$ atm	✓	✗	✓	✓
Condros y matriz cogenéticos	✗	✓	✓	✓
Tiempo de formación $\sim 1.3 - 3$ Ma después de los CAIs	✗	✓	✓	✓

- Los modelos de viento-X y de rayos nebulares se rechazan debido a que no cumplen con la mayoría de las restricciones térmicas.
- Los choques impulsados por GIs son favorecidos sobre los choques de proa por planetésimos.

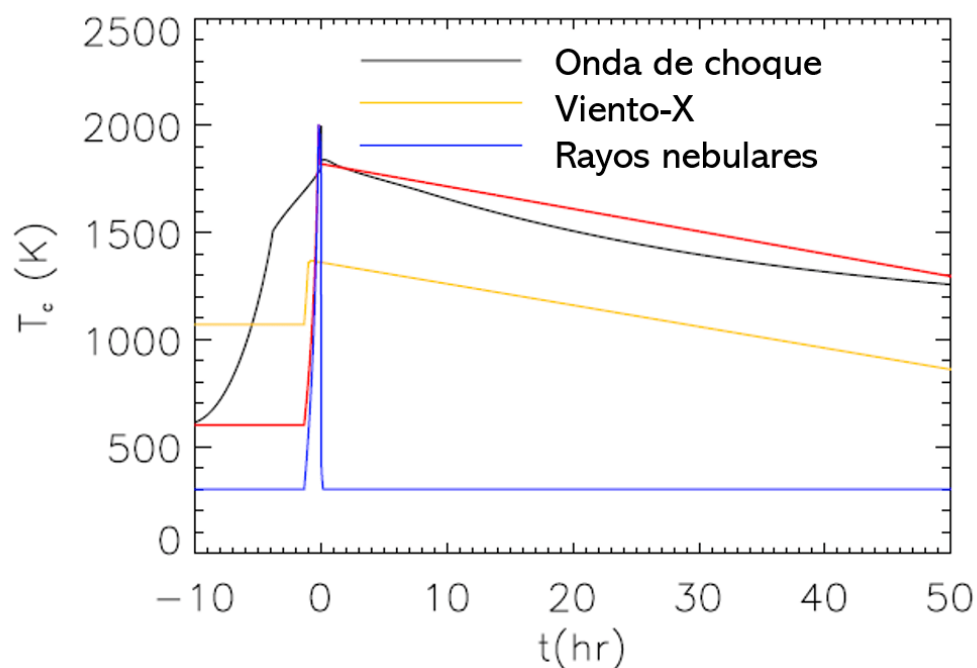


Figura 1.10: Historias térmicas de los condros inferidas por las restricciones experimentales (curva roja), predicha por el modelo de onda de choque (historia térmica tomada de Desch et al. (2010))(curva negra); predicha por el modelo de viento-X (adaptada de Shu et al. (1996))(curva amarilla); y la predicha por el modelo de rayos nebulares (p.e, Desch et al., 2000)(curva azul) (traducida de Desch et al., 2012).

Algunas cuestiones no resueltas sobre la formación de condros

1. ¿Los condros se forman en sistemas abiertos?

Se creía que los condros se forman en sistemas cerrados, es decir que no intercambiaban materia con los alrededores. Sin embargo, estudios químicos y mineralógicos han demostrado que los condros no obedecen la cristalización de un sistema cerrado. Por ello, se ha sugerido que el material precursor de los condros interactúa con el gas durante su formación, es decir, que actúan como

sistemas abiertos y que esto se refleja en la mineralogía, composición química e isotopía de los condros (Libourel et al., 2006). Estudios de Di Rocco y Pack (2015) han demostrado que es posible que la composición isotópica del oxígeno esté dada por la interacción de los condros con el gas nebular y no necesariamente que haya sido heredada del material precursor (Di Rocco y Pack, 2015). De igual forma, experimentos con el modelos de “flash heating” indican que los condros fueron formados en ambientes nebulares enriquecidos en polvo y agua (Yu et al., 1998). Anomalías isotópicas indican que en las regiones de formación de condros el material precursor sufrió procesos de condensación y evaporación (Alexander et al., 2008). Alexander et al. (2008) encontraron que la abundancia de sodio (Na) permanece constante durante la formación de los condros. Para prevenir la evaporación del Na se requiere que los condros se hayan formado en regiones donde la densidad de los sólidos sea mayor a la predicha por los modelos del DP.

2. *¿A qué se debe la diversidad química de los condros?*

Se han estudiado con detalle las abundancias de los diferentes tipos texturales de condros en distintas clases de condritas (Brearley y J., 1998; Jones, 2012) y se sabe que los condros tienen diversas composiciones químicas. Por ende, se piensa que no todos los condros se formaron de precursores homogéneos, es decir, que el material precursor no necesariamente debió tener las mismas condiciones térmicas y redox, porque si fuera así, los condros tendrían texturas similares, y no es el caso (Connolly y Jones, 2016).

3. *¿Las partículas pudieron crecer hasta un tamaño de metros sin ayuda de los condros?*

Existe una limitante para explicar el crecimiento de partículas y polvo de tamaños mayores a un metro (conocido como la barrera del metro). Por una parte, las partículas y granos de polvo de tamaño de micrómetros pueden coagular por fuerzas de van der Waals y crecer a un tamaño de centímetros. Por otro lado, cuando los objetos son suficientemente grandes (tamaño de kilómetros),

estos crecen gracias a la fuerza de gravedad que los ayuda a acretar cuerpos más pequeños. Sin embargo, un cuerpo del tamaño de metros que no es tan pequeño como para que las fuerzas de van der Waals tengan efecto, y que no es tan grande como para acretar material por enfoque gravitacional, tendería a caer hacia la proto-estrella. Se piensa que los procesos que llevaron al fundido y solidificación de los condros pudieron haber ayudado a los agregados de polvo para permitir su posterior crecimiento (Connolly y Desch, 2004). Además, los condros se concentran en ciertas regiones del DP debido a la turbulencia (Weidenschilling y Ruzmaikina, 1993), el cual puede ser un mecanismo crítico para la formación de condros y el crecimiento de cuerpos de tamaño de metros.

1.2.3. Experimentos para la formación de condros

Muchos grupos de investigación han logrado reproducir análogos de condros de manera controlada utilizando diferentes técnicas de experimentación. La mayoría de los experimentos utilizan un horno para fundir análogos de condros (p. ej. Tsuchiyama et al., 1980; Tsuchiyama y Nagahara, 1981; Hewins et al., 1989; Lofgren, 1989; Lofgren et al., 1990). Sin embargo, fundir granos de silicato mediante la irradiación de un láser resulta ser un proceso mucho más eficiente para producir esferas fundidas del tamaño de los condros, ya que puede simular el calentamiento radiativo causado por diversos fenómenos (p. ej. los relámpagos y las ondas de choque Poppe et al., 2010). Además, la irradiación con láser permite el control de las velocidades de calentamiento y enfriamiento, lo cuál reproduce historias térmicas de la formación de condros más realistas (Desch et al., 2012). A continuación se habla de los experimentos previos que se han realizado a lo largo de los años para reproducir análogos de condros.

En los años 70's, Nelson et al. (1972) y Blander et al. (1976) comenzaron a realizar estudios experimentales de cristalización rápida con un láser de CO₂ fundiendo material precursor de silicatos ricos en Mg formando pequeñas esferas. Ambos obtuvieron texturas similares a las de los condros.

En los años 80's Tsuchiyama et al. (1980) reprodujeron texturas BO y PO cristalizando fundidos a 1 atm con tasas de enfriamiento entre 400 y 20 °C/min. Para

ello, el material precursor pulverizado fue prensado en gránulos y unido a bucles de alambre de platino, estas cargas se funden usando un horno vertical de gas. [Tsuchiyama y Nagahara \(1981\)](#) lograron reproducir texturas radiales y PO utilizando como materiales precursores una mezcla de olivino, piroxeno y albita, ellos concluyen que la composición de los precursores es el factor principal que controla la textura final de los análogos de condros.

A finales de los 80s y principios de los 90s [Lofgren \(1989\)](#) y [Lofgren et al. \(1990\)](#) lograron reproducir fundidos de condros mediante experimentos de cristalización dinámica que cristalizaron a condiciones de enfriamiento controladas. Para llevar a cabo los experimentos se utilizó un horno a 1 atm de presión en un ambiente reducido a temperaturas alrededor de 1,600 °C. La duración de calentamiento fue entre decenas de segundos y no más de dos horas. Ellos encontraron que el tipo de textura que se forma depende del número de sitios de nucleación; a mayor densidad de nucleación y tasas de enfriamiento lentas ($\tau_c \approx 100$ °C/h) se forman texturas porfídicas y conforme la densidad de nucleación decrece y la tasa de enfriamiento incrementa ($\tau_c \approx 1,000$ °C/h) tienden a formarse texturas esqueletales.

Por otro lado, [Hewins et al. \(1989\)](#) fundieron esferas pequeñas de silicatos a tasas de enfriamiento entre 100 y 1,000 °C/h con tiempos de fundido de alrededor de 30 min. Ellos encontraron que el tamaño de los granos precursores influye en el resultado final, ya que si utilizaban granos muy finos resultaban esferas vítreas.

[Connolly y Hewins \(1991\)](#) reprodujeron texturas de condros. Variando la razón $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{Mg})$ encontraron que el grado de fusión afecta directamente el crecimiento de los sitios de nucleación que permanecen después del primer evento de formación. El grado de fusión puede ser controlado ya sea cambiando la temperatura de liquidus o la temperatura inicial. Además encontraron que para distintos de tiempos de calentamiento y de masas de precursores varía el grado de fusión, lo cual produce una variación en las texturas.

[Wasson \(1996\)](#) criticó los experimentos que hasta entonces se habían hecho con hornos ya que los tiempos de calentamiento y enfriamiento eran muy lentos y no simulaban las condiciones reales en las que se formaron los condros en el disco de

acreción del proto-Sol. Además, fue el primero en proponer que los condros sufrieron más de un proceso de calentamiento.

[Tsukamoto et al. \(1999\)](#), mediante experimentos de superenfriamiento por levitación aeroacústica, lograron reproducir bordes de olivino en fundidos tipo condro.

[Faure et al. \(2003\)](#) mediante experimentos dinámicos de cristalización de fosterita, encontraron que ésta cristaliza con cinco tipos de morfologías: euhedral y tabular (a tasas de enfriamiento entre 2 y 100 °C/h), hopper (a tasas de enfriamiento entre 47 y 225 °C/h), dendrítica (a una tasa de enfriamiento de 1,890 °C/h) y plumosa (a tasas de enfriamiento de 87 °C/h). Para mayor detalle sobre estas morfología véase la sección 2.6.

[Tsuchiyama et al. \(2004\)](#) lograron reproducir texturas BO con bordes de olivino mediante experimentos en un horno al vacío con una composición rica en FeO, a temperaturas debajo de liquidus (1,215 °C). La formación de los bordes sugiere que los condros se formaron como sistemas abiertos. Si ocurrió evaporación durante la formación de condros, la evaporación del Na y SiO₂ debió mejorar la nucleación selectiva y facilitar el crecimiento de los anillos de olivino. Las texturas BO se crearon usando muestras pequeñas (<10 mg y <1 mm de diámetro), ya que para tener un número limitado de eventos de nucleación se necesita un área superficial pequeña. Las texturas BO más similares a las de los condros naturales se obtuvieron a temperaturas alrededor de 200 °C por encima de la temperatura de liquidus y una tasa de enfriamiento $\sim 1,000$ °C/h.

[Hewins y Fox \(2004\)](#) encontraron que la naturaleza física de los precursores, especialmente el tamaño de grano, afecta las texturas de los condros durante el fundido. En la experimentación fundieron precursores de distintos tamaños de grano con un minuto de calentamiento y tasas de enfriamiento moderadas. También encontraron que los condros de grano grueso pueden formarse a partir de precursores de grano fino mediante calentamiento prolongado con evaporación que conduce al engrosamiento, o mediante múltiples eventos de recalentamiento.

[Cervantes \(2009\)](#) realizó experimentos de fusión de olivinos utilizando un láser de ablación de CO₂. Mediante análisis texturales de los fundidos, observó que los

experimentos reprodujeron las barras de olivino, los huecos y los bordes al igual que los condros naturales. También observó que el ancho de las barras depende del grado de fusión de la muestra al momento de su formación.

Beitz et al. (2013) desarrollaron un dispositivo experimental para probar la hipótesis de que los bordes que rodean a los condros se formaron en el DP por acreción de polvo en la superficie de los condros calientes. Su método experimental permitió formar bordes de polvo alrededor de los análogos de condros mientras se levitaban en un flujo de gas inerte dentro de un embudo que posteriormente es irradiado con un láser. Como material precursor se usó olivino en polvo del tamaño de un micrómetro, el cual se calentó hasta alcanzar una temperatura de 1,100 °C. Aún así, no lograron reproducir la porosidad de los bordes de polvo de condros naturales.

Un trabajo más reciente es el de Hernández-Reséndiz (2020) quien reprodujo análogos de condros fundiendo material precursor (olivino y feldespatos) mediante un dispositivo experimental que consta de un láser de CO₂. Este dispositivo experimental, a diferencia de otros experimentos llevados a cabo con láser, tiene un control automatizado de los tiempos de calentamiento y enfriamiento así como de la potencia del láser. La temperatura fue medida con un pirómetro, así que, teniendo control del tiempo de irradiación y de la temperatura de los fundidos se pudo crear una historia térmica para cada análogo. Sin embargo, la historia térmica utilizada en este trabajo no tuvo aportaciones con respecto al origen de los condros.

1.3. Las meteoritas y la formación del sistema solar

1.3.1. El disco protoplanetario

El DP es un disco de gas y polvo que rodea a las estrellas en sus primeras etapas de evolución en el cual se da la formación de planetas. Las estrellas nacen en nubes moleculares que colapsan sobre el peso de su propia gravedad a densidades estelares ($\sim 10^{24} \text{ cm}^{-3}$). Una vez que el gas se asienta para formar un disco alrededor de la protoestrella, su momento angular específico incrementa con el radio permitiendo que

el disco este en quasi-equilibrio por millones de años. La viscosidad dentro del disco provoca acreción a la protoestrella, para conservar el momento angular el material tiene que ser eyectado a través de jets. Los DPs heredan la masa inicial, tamaño, flujo magnético y composición química de la nube molecular de la que se formaron (Armitage, 2010).

En los DPs, la temperatura disminuye con la distancia a la estrella. Estos irradian a longitudes de onda de micras a milímetros, pueden ser observados con telescopios IR o radiotelescopios y el mapeo de la longitud de onda de radio permite determinar modelos de su estructura (Williams y Cieza, 2011).

El DP está compuesto de gas y polvo. El gas conforma el 99% de la masa del disco y la especie gaseosa más abundante es el H_2 . El polvo domina la opacidad del disco y es el material precursor de los planetésimos. El material del medio interestelar (ISM) difuso está compuesto de silicatos de tamaños $\lesssim 1 \mu m$, un poco de grafito e hidrocarburos policíclicos aromáticos (PHAs, Draine, 2003). Los silicatos cristalinos (principalmente los grupos olivino y piroxeno) abundan en el DP y son los principales precursores para la formación de planetas rocosos (Tielens, 2010). En la transición de la nube molecular fría al DP, las moléculas en fase gaseosa se congelan sobre la superficie de los granos de polvo generando mantos helados, lo que hace que los granos colisionen y se peguen fácilmente.

El tiempo de vida del DP depende de la masa de la estrella (para estrellas con mayor masa el disco se disipa más rápido), se estima que el tiempo de vida promedio es de ~ 10 Ma (Cieza et al., 2007). También se estima que la masa del DP (M_d) escala con la masa de la estrella (M_s) con una razón de $(M_d)/(M_s) \sim 1\%$ (Williams y Cieza, 2011).

La evolución de los DPs no es un proceso trivial, se tienen que tomar en cuenta una serie de procesos como la radiación estelar, los movimientos orbitales del material, la viscosidad, la turbulencia, el mezclado de material, el campo magnético de la estrella, la evaporación, sedimentación, la fragmentación, la coagulación, la migración planetaria y el tiempo en el que se lleva a cabo la evolución (Hernández-Reséndiz, 2020).

1.3.2. Evolución del disco protoplanetario

Los modelos y las observaciones de los DPs sugieren que la mayoría de ellos sigue una secuencia de eventos común. [Williams y Cieza \(2011\)](#) proponen la evolución del disco en 4 etapas (ver Figura 1.11). En la primer etapa (etapa a) el disco pierde masa porque está siendo acretado hacia la estrella y por la fotoevaporación en el lejano ultravioleta (FUV) del disco externo. Al mismo tiempo los granos de polvo crecen y se asientan en el plano medio del disco donde pueden unirse para formar rocas, éstas a su vez se acretan para formar planetésimos cuyas colisiones forman embriones planetarios y éstos, planetas (etapa b). Conforme la masa del disco y la tasa de acreción disminuyen, los fotones energéticos de la cromósfera de la protoestrella penetran las regiones internas del disco y la fotoevaporación incrementa. Se llega a un punto en el que el disco externo no puede darle más material al disco interno, éste se drena a una escala viscosa ($<10^5$ años) y se forma un hueco entre la protoestrella y lo que resta del DP (etapa c). Este hueco marca el final de la etapa de agotamiento lento de masa y comienza la etapa de disipación rápida del disco, en esta etapa el disco presenta morfologías variadas (conocidos como discos de transición, [Padgett et al., 2006](#); [Cieza et al., 2007](#); [Wahhaj et al., 2010](#)). Una vez que el gas del disco se evapora casi por completo, queda un disco con muy poco gas, granos de polvo, planetésimos y planetas, conocido como disco de escombros (etapa d).

1.3.3. Procesos de mezcla en el disco protoplanetario

Observaciones de los DP brindan información de cómo se distribuyen los granos de silicato cristalinos en el disco. Antes de que se dé el colapso de la nube molecular, los granos del ISM son amorfos (no tienen una estructura definida) y su fracción de cristalinidad está entre 3 % y 5 % ([Alan P., 2012](#)). Una vez que se forma el disco, los granos de silicato cristalinos se localizan en el plano medio y en las capas superficiales del disco a distancias <3 ua y >5 ua con fracciones de cristalinidad del 15 % al 33 % ([Speck et al., 2008](#)). El hecho de que la fracción de cristalinidad aumente significativamente se atribuye al recalentamiento térmico de los granos amorfos del ISM en

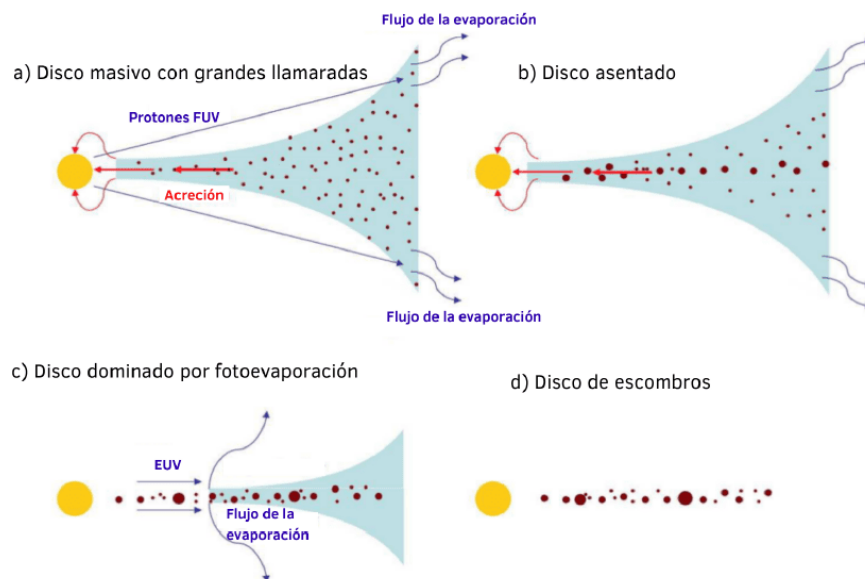


Figura 1.11: Evolución típica de un disco. Distribución de gas (azul) y polvo (rojo). (a) Evolución temprana, el disco pierde masa por acreción y fotoevaporación. (b) Granos de polvo crecen y se asientan en el plano medio del disco formando objetos de mayor tamaño. (c) La fotoevaporación incrementa y se produce un hueco entre el disco y la protoestrella. (d) El gas se fotoevapora casi por completo dejando un disco de escombros (traducida de Williams y Cieza, 2011).

las partes más calientes del disco (<1 ua Sargent et al., 2009). Además, se piensa que los granos de silicato amorfos debieron experimentar ya sea transporte a gran escala (desde 1 ua hasta varias ua) o procesos de calentamiento local que describan las diferentes abundancias y especies cristalinas de los granos de silicatos desde las regiones más calientes del disco (<1 UA) hasta las más frías (>5 ua, Bouwman et al., 2008).

Se cree que los condros son fundidos por ondas de choque a distancias asteroidales, mientras que las CAIs se formaron en regiones más cercanas al proto-Sol, debido a su alta composición refractaria (Wood, 2004). Sin embargo, tuvo que existir un mecanismo que transportara las CAIs hasta la región del cinturón de asteroides (donde se encuentran sus cuerpos parentales). Alexander (2004), por medio de modelos de evaporación-condensación, sugiere que los condros ricos en olivino, CAIs ricas en melilita y CAIs ricas en piroxeno, debieron formarse a distancias asteroidales, mientras que los condros ricos en piroxeno y en Al, y CAIs ricas en anortita debieron

formarse cerca del proto-Sol. De cualquier forma, se necesita un mecanismo que haya transportado sólidos desde las partes internas del disco a la región de asteroides para explicar el ensamblaje de los cuerpos parentales condriticos (Boss y Durisen, 2005). Entre los mecanismos sugeridos se encuentran viscosidad turbulenta en el disco, disco conducido por inestabilidades magnetorrotacionales (MRI) y un disco inestable marginalmente gravitacional (MGU).

El modelo de acreción del disco conducido por viscosidad turbulenta ha sido propuesto para explicar el transporte de sólidos en el DP (Gail, 2001). Este modelo simula un disco de acreción infinitamente delgado unidimensional (1D). Una limitante para este modelo es la disipación viscosa, se sabe que la nebulosa solar es inestable a la convección en la dirección vertical al plano medio del disco (Alan P., 2012). Estudios hidrodinámicos de la convección en las regiones verticales, demuestran que la turbulencia asociada con la convección genera la disipación de la viscosidad del disco, impidiendo movimientos que conduzcan a la evolución global del disco (Stone y Balbus, 1996). Por ello, la viscosidad turbulenta no se considera como un fenómeno de larga duración viable para el transporte de sólidos (Hawley et al., 1999).

Otra alternativa para explicar el transporte de sólidos en el DP son los campos magnéticos, generados por inestabilidades magnetorrotacionales (MRI) en las líneas de campo, en un disco con rotación diferencial (Hawley et al., 1999). A diferencia del modelo de viscosidad turbulenta, en este modelo se considera el transporte en dos dimensiones (2D) con una altura vertical finita (Keller y Gail, 2004). Los campos magnéticos se vuelven importantes en las regiones superficiales y las partes externas del disco, que es donde el material puede ser ionizado térmicamente. Sin embargo, en el plano medio del disco (disco ópticamente grueso) los fotones difícilmente pueden penetrar el gas y los niveles de ionización disminuyen significativamente, suprimiendo MRI y generando la conocida *zona muerta*, que es justo en la región donde se acumula el polvo y se dan las primeras fases de la formación planetaria (Matsumura y Pudritz, 2006). Para este modelo se asume que el transporte de momento angular se describe con el modelo de la viscosidad α lo cual ha provocado objeciones en la comunidad científica (Pessah et al., 2008). Aún así, se espera que la turbulencia MRI homogenice

el gas y el polvo en regiones ionizadas de la nebulosa. A pesar de los pros y contras de este modelo, se estima que los modelos de acreción viscosa del disco implican que el transporte de grandes cantidades de material del disco interno hacia las regiones de formación de cometas es un resultado probable de la evolución viscosa del disco.

En el modelo de un disco inestable marginalmente gravitacional (MGU) se considera que el transporte y el mezclado ocurren en un disco tridimensional (3D) que evoluciona a través de torques autogravitantes con o sin efectos de la difusividad α , por lo que no se forman zonas muertas. [Boss \(2007\)](#) mostró que los disco MGU pueden transportar rápidamente ($\sim 1,000$ años) sólidos de las regiones internas a las regiones externas del disco. Las simulaciones de este modelo muestran que movimientos dinámicos y convectivos transportan el material hacia adentro y hacia afuera como resultado de la evolución caótica impulsada por los brazos espirales y los cúmulos que se forman en un disco MGU. [Boss y Durisen \(2005\)](#) demostraron que los discos MRU pueden generar choques a más de 3 ua capaces de producir el calentamiento rápido para procesar térmicamente condros y CAIs a $T > 1,000$ K.

En conclusión, es más probable que el transporte de sólidos de las regiones internas a las regiones externas del disco haya sido provocado por un disco MGU con brazos espirales conducidos por choques (modelo 3D) que en los discos que acreción viscosos (modelos 1D y 2D, [Alan P., 2012](#)).

1.3.4. Diferenciación de planetésimos

La diferenciación es el proceso en el cual se produce la separación de líquidos inmiscibles por diferencia de densidades. Se sabe que durante la formación de un planeta hubo impactos con planetésimos, los cuales proveen no sólo de masa al planeta, sino también de energía. Por ello, la principal fuente de calor durante la formación de un planeta (o planetésimo) durante la acreción, es la gravitacional, aunque también puede ser calentado por los elementos radioactivos y reacciones químicas. Tales fuentes pueden calentar al planeta al grado de fundir su interior. Durante la fusión del planeta los elementos más ligeros flotan sobre los más pesados, generando capas radiales con distinta química y formando así un cuerpo diferenciado; un núcleo de

metales, una parte de transición y una corteza de silicatos. De manera gradual se da el enfriamiento y cristalización, y en algunos casos, seguido por colisiones que fragmentaron el cuerpo primordial. Se piensa que los fragmentos del núcleo (elementos metálicos como Fe y Ni) dieron lugar a meteoritas metálicas; la parte de transición a las meteoritas mixtas y las partes silicatadas fundidas a las acondritas. Por otro lado, las condritas son meteoritas no diferenciadas, su composición similar a la del Sol, petrología y evidencia isotópica indican que vienen de la corteza del cuerpo parental que no fue afectada por procesos de diferenciación ni fusión (después de haber sido acretadas). Sin embargo, diferencias texturales entre condritas y acondritas, apoyadas por observaciones orbitales, dinámicas y geológicas, demuestran que la mayoría de las meteoritas son muestras de asteroides que viene de distintos cuerpos parentales y no necesariamente de un sólo cuerpo de gran tamaño (tamaño de la Luna, [Wood, 1958](#); [Anders, 1964](#); [Weisberg et al., 2006](#)). En la Figura 1.12 se ilustran algunos modelos de cuerpos parentales de meteoritas. En la Figura 1.12 a, se considera que todas las meteoritas condriticas y acondritas se originaron de uno o un pequeño número de cuerpos de tamaño similar de la Luna que presentan una estructura con capas diferenciadas, con interiores fundidos de donde provienen las meteoritas metálicas, acondritas basálticas y una corteza de acreción de donde provienen las condritas ([Anders y Goles, 1961](#); [Lovering y Parry, 1962](#); [Ringwood, 1961](#); [Wood, 1963](#)). En la Figura 1.12 b, se asume que las condritas y acondritas se originaron de distintos cuerpos parentales, no diferenciados en el caso de las condritas y diferenciados en el caso de las acondritas ([Mason, 1967](#)). Sin embargo este modelo fue puesto en duda debido al descubrimiento de un nuevo tipo de meteoritas que fundieron a temperatura de sublíquido, conocidas como acondritas primitivas, que proporcionan evidencia de que existen planetésimos en los que la diferenciación ígnea no se completó. Por ello, [Weiss y Elkins-Tanton \(2013\)](#) propusieron el modelo de la Figura 1.12 c, en donde se examina la posibilidad en la que los planetésimos formaron regiones internas con silicatos fundidos totalmente, cubiertas por una corteza condritica parcialmente fundida. En este modelo es posible que las condritas y acondritas conocidas y por conocer provienen de un sólo cuerpo parental parcialmente diferenciado de tamaño similar al de un asteroide

(Weiss y Elkins-Tanton, 2013).

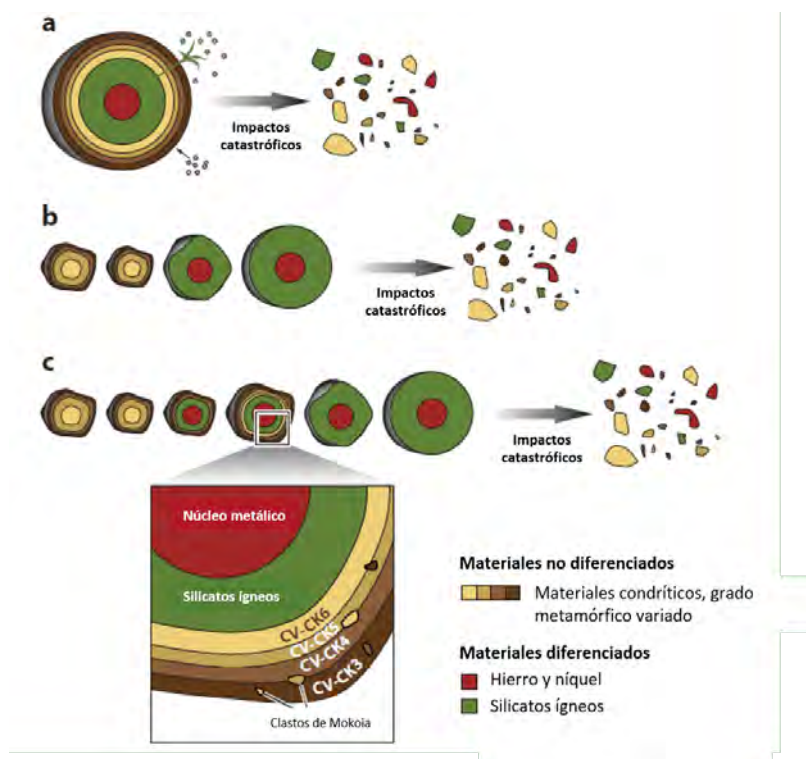


Figura 1.12: Modelos de cuerpos parentales de meteoritas. (a) Meteoritas originadas de un sólo cuerpo parental de tamaño similar al de la Luna, parcialmente diferenciado. (b) Meteoritas originadas de múltiples cuerpos del tamaño de asteroides que fueron o totalmente diferenciados o no diferenciados. Meteoritas originadas por múltiples cuerpos del tamaño de asteroides que fueron totalmente diferenciados, parcialmente diferenciados o no diferenciados (traducida de Weiss y Elkins-Tanton, 2013).

1.3.5. Cronología del sistema solar

Existen dos tipos de cronómetros que permiten determinar la cronología del sistema solar. (1) El método de $^{207}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}$, que considera los decaimientos de ^{235}U y ^{238}U , que tienen tiempos de vida media de 4.5 y 4.7 Ma respectivamente. La ventaja de usar $^{207}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}$, en vez de otros núclidos de vida larga como ^{87}Rb y ^{147}Sm (tiempos de vida media de 1 a 100 Ga), es que el tiempo de resolución es mucho más pequeño (0.1 - 0.5 Ma, Baker et al., 2005; Amelin, 2006). (2) El segundo método se basa en núclidos de vida media corta (<100 Ma) que pueden proporcionar edades relativas de los objetos del sistema solar. La presencia del núclido de vida media corta está bien

establecida por una correlación entre el exceso del núclido hija y la concentración de un núclido estable del elemento padre (Scott, 2007). Ambos métodos, tanto el $^{207}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}$ como el de núclidos de vida media corta brindan información cronológica de los componentes condriticos en el sistema solar temprano. Las muestras que se pueden datar con cualquiera de estos métodos deben de cumplir con ciertos requisitos: que se hayan formado en ambientes a altas temperaturas, que hayan escapado al metamorfismo y alteración, que se hayan formado de meteoritas que se enfriaron rápidamente ($>10^6$ años) y que no hayan sufrido impactos (para evitar que haya existido intercambio isotópico entre minerales). Las muestras que cumplen con los requisitos anteriores son unas cuantas condritas ordinarias (OC) y carbonáceas (CC), pocas granos finos, meteoritas basálticas (angritas y eucritas) y acondritas enfriadas rápidamente (ureilitas Scott, 2007). En la Figura 1.13 se muestran las edades inferidas para las muestras seleccionadas basadas en $^{207}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}$, $^{53}\text{Mn} - ^{53}\text{Cr}$, $^{26}\text{Al} - ^{26}\text{Mg}$ y $^{129}\text{I} - ^{129}\text{Xe}$.

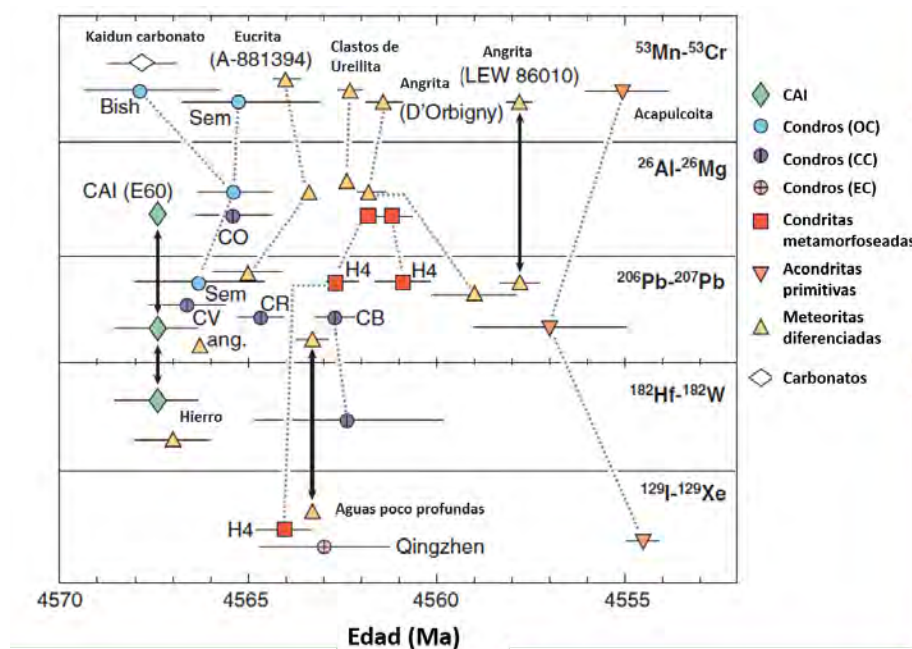


Figura 1.13: Cronología del sistema solar temprano inferida de edades radiométricas de CAIs, condros en condritas OC y CC, condritas metamórficas (H4), acondritas primitivas (acapulcoita), meteoritas diferenciadas (eucritas, ureilitas y angritas), y minerales de alteración. Las flechas verticales conectan las muestras para anclar los cronómetros de vida media corta (Mn-Cr, Al-Mg, Hf-W y I-Xe) con las edades absolutas derivadas del fechamiento Pb-Pb. Las líneas discontinuas conectan datos de la misma meteorita (traducida de Scott, 2007).

La cronología del sistema solar se enfoca en analizar componentes condriticos (Kita et al., 2005), minerales de alteración en condritas (Krot et al., 2006), meteoritas diferenciadas (Wadhwa et al., 2006), planetas (Halliday y Kleine, 2006), tiempos de escala nebulares (Russell et al., 2006) e implicaciones de la formación de los asteroides y de Júpiter (Scott, 2006). La precisión de estos cronómetros confirma que los objetos más viejos son las CAIs, seguido de los condros y pocos millones de años después se forman las meteoritas diferenciadas (Scott, 2007).

Edades de formación de condros y CAIs

Varios estudios han demostrado que los reservorios que formaron la Tierra, las inclusiones refractarias, los condros y las meteoritas primitivas, tenían una distribución homogénea de ^{26}Al y ^{26}Mg . El corto tiempo de vida del ^{26}Al (0.73 Ma) lo hace el cronómetro más preciso para los primeros años de la historia del sistema solar (Villeneuve et al., 2009). Con el sistema $^{26}\text{Al}/^{26}\text{Mg}$ se pueden obtener edades relativas, en cambio, con el sistema $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ se obtienen edades absolutas de la formación de condros y de CAIs (Amelin et al., 2002).

Los primeros fechamientos de condros mediante el método Pb - Pb involucraron el análisis de piezas individuales de diferentes condros obtenidos de la condrita CR Acfer 059 (Amelin et al., 2002) o la combinación de condros de la condrita CV Allende (Amelin y Krot, 2007; Connelly y Bizzarro, 2009). Amelin et al. (2002) determinaron por Pb - Pb una edad de 4,563.66 Ma, Amelin y Krot (2007) reportaron una edad de $4,565.6 \pm 1.0$ Ma y Connelly y Bizzarro (2009) reportaron una edad de $4,564.32 \pm 0.81$ Ma. Para el año 2018 se tenían 22 condros nebulares fechados con el método de Pb - Pb y con medidas del cociente $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ para 6 de estos objetos (Connelly et al., 2012; Bollard et al., 2017) como se muestra en la Figura 1.14. Dichos fechamientos se realizaron en condros tanto tipo I y II así como tipos texturales porfídicos y no porfídicos, provenientes de condritas CV (Allende), ordinarias (NWA 5967) y CR (NWA 6043 y 7655, Bollard et al., 2017). Los 6 condros que fueron medidos con el cociente $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ reportan edades entre $4,567.61 \pm 0.54$ Ma y $4,564.65 \pm 0.46$ Ma. Este rango de edad es comparable al de $4,567.57 \pm 0.56$ Ma a $4,563.24 \pm 0.62$

Ma definido por todos los condros restantes para los que se utiliza el valor solar de $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ para calcular las edades Pb-Pb. Como se ve, el fechamiento de los condros mediante $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ arroja edades que están dentro de los primeros 100,000 años, por lo que se demuestra que la producción y el fundido de condros ocurrió de manera contemporánea con la formación de las CAIs y continuaron por 4 Ma más. Por último, los condros más jóvenes se encuentran en las condritas CB, las cuales contienen condros no comunes y granos de metal que pudieron formarse por impacto de planetésimos (Rubin et al., 2003; Krot, 2005; Bollard et al., 2015).

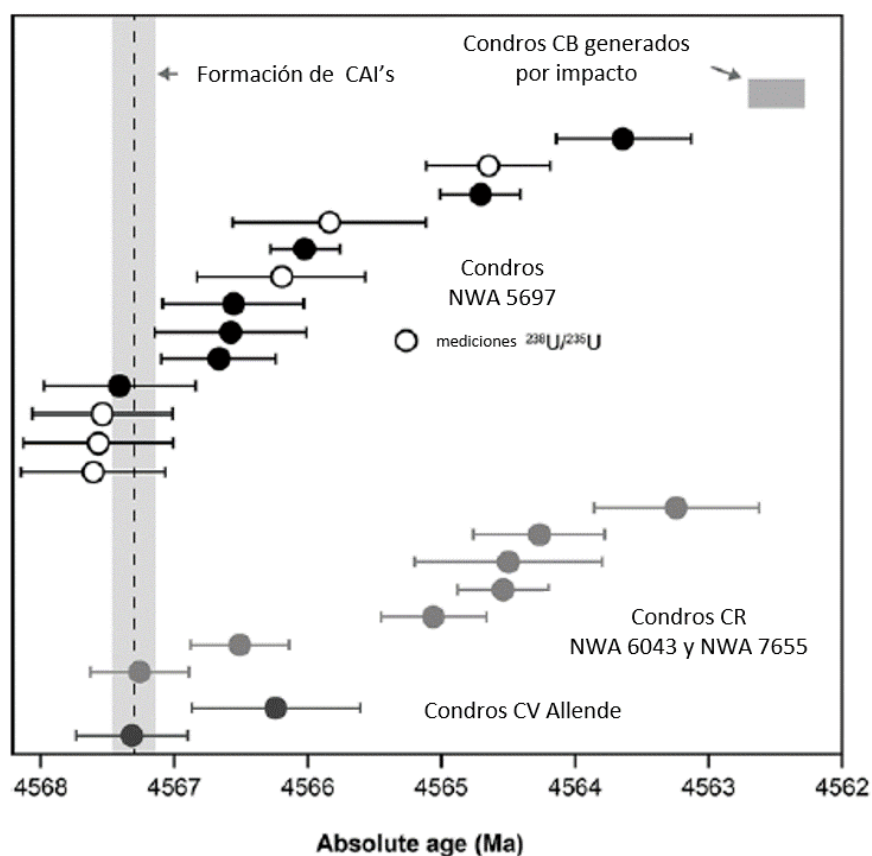


Figura 1.14: Las edades absolutas de condros obtenidas por el método Pb - Pb. Para condros individuales de NWA 5697 (L3.10), NWA 6043 (CR2), NWA 7655 (CR2) y Allende (CV3 Bollard et al., 2017). Las CAIs se formaron hace $4,567.30 \pm 0.16$ Ma (Connelly et al., 2012). Se interpreta que los condros CB son los más jóvenes y se formaron a partir de la colisión de planetésimos hace $4,562.49 \pm 0.21$ Ma (Bollard et al., 2015).

1.4. Objetivo y contenido de la tesis

El objetivo de esta tesis es comprobar si las historias térmicas que predicen los modelos de onda de choque de formación de condros, que tienen tasas de enfriamiento con decaimiento lineal y no lineal, reproducen análogos de condros con las características morfológicas y texturales observadas en los condros naturales.

Como se vio anteriormente, el capítulo 1 presenta la introducción, que trata de las meteoritas y su clasificación, los condros y su clasificación, todo lo referente a la formación de condros, así como también lo referente a las meteoritas y la formación del sistema solar.

En el capítulo 2 se explica el proceso experimental que hay que seguir para la producción de análogos de condros, comenzando a describir el dispositivo experimental Citlalmitl. Este dispositivo es capaz de reproducir historias térmicas para evaluar los resultados que predicen los modelos de formación de condros. En la sección 2.2 se explica el funcionamiento de Citlalmitl que se encuentra instalado en el Laboratorio de Óptica cuántica del Instituto de Ciencias Nucleares, en Ciudad Universitaria, UNAM, en la Ciudad de México. Posteriormente en este mismo capítulo se habla de la selección y programación de las historias térmicas, de la selección y el análisis del material precursor y se describen los equipos utilizados para hacer los análisis morfológicos y texturales.

El capítulo 3 describe las condiciones experimentales para reproducir los análogos de condros, los parámetros físicos generales de cada experimento y las combinaciones de material precursor.

El capítulo 4 muestra los resultados preliminares obtenidos mediante el microscopio estereoscópico y posteriormente los análisis obtenidos mediante el microscopio electrónico de barrido, el microscopio petrográfico y el espectrómetro micro-Raman. Dichos análisis sirven para caracterizar la morfología, textura y química de los análogos de condros para así compararlos con las características de los condros naturales. También se muestra el análisis del efecto del material precursor en las texturas resultantes, el análisis del efecto de los perfiles de irradiación en las texturas resultantes

y el cálculo de la norma CIPW para saber qué minerales pudieron formarse en los análogos de condros después de ser irradiados.

Finalmente, en el capítulo 5 se muestran la discusión, (donde se trata acerca de los parámetros experimentales, los análogos conseguidos y el dispositivo experimental), y las conclusiones de la tesis.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Metodología general

La metodología general de esta tesis consiste en fundir el material precursor de los análogos de condros utilizando el dispositivo experimental Citlalmitl, el cual tiene la capacidad de fundir el material utilizando un láser de CO₂ cuyo perfil de irradiación es programado. Durante el proceso de irradiación se mide y se registra la temperatura de las muestras contra el tiempo, lo que permite crear una historia térmica para cada una de ellas. Una vez que se crearon los análogos de condros se realizan análisis morfológicos y texturales para comparar las características obtenidas con las de los condros naturales. Las condiciones que controlan la formación de análogos de condros son la composición química del material precursor, la masa y el tamaño de los precursores, las condiciones de presión, el perfil de irradiación y las tasas de calentamiento y enfriamiento.

La metodología se divide en 4 etapas principales:

1. *Selección y análisis de precursores*: Una de las principales condiciones que controlan la reproducción artificial de los condros es la composición química del material precursor. Los materiales precursores seleccionados, según la literatura son olivino rico en Mg (fosterita), piroxeno pobre en Ca (estatita), piroxeno rico en Ca (diópsida), algunos miembros de los feldespatos y feldespatoides (anorti-

ta, labradorita, sodalita y oligoclasa), y pequeñas cantidades de espinela. En la sección 2.4 se describe con mayor detalle la selección de estos materiales y su preparación.

2. *Selección y programación de las historias térmicas:* Como se vio en la sección 1.2.2, las ondas de choque son el mecanismo más aceptado para la formación de condros dentro de los candidatos existentes. Por ello, se ponen a prueba dos perfiles de irradiación que simulan las historias térmicas predichas por el mecanismo de onda de choque, la diferencia radica en que para el perfil I las tasas de calentamiento y de enfriamiento son no lineales y para el perfil II ambas son lineales. En la sección 2.3 se explica con detalle la programación de las historias térmicas utilizadas.
3. *Irradiación de las muestras:* Una vez que se tiene seleccionado el material precursor y que se han programado los perfiles de irradiación deseados, se utiliza el dispositivo experimental Citlalmitl (véase sección 2.2) para irradiar los precursores y crear los análogos de condros.
4. *Análisis de las muestras:* Los análogos de condros creados son sometidos a análisis morfológicos, texturales y mineralógicos mediante un microscopio estereoscópico, un microscopio electrónico de barrido, un microscopio petrográfico y un espectrómetro micro-Raman, con el fin de reconocer las características de los análogos que también se encuentran en los condros naturales (véase sección 2.5).

2.2. Descripción y funcionamiento de Citlalmitl

Para la irradiación y creación de los análogos de condros en esta tesis se utilizó el dispositivo experimental Citlalmitl (vocablo náhuatl para “meteorita”). Citlalmitl es un dispositivo experimental que con ayuda de la tecnología láser, es capaz de reproducir las condiciones térmicas de formación de condros y la entrada atmosférica de micrometeoritas (Figura 2.2, Hernández-Reséndiz, 2020). Las principales ventajas de Citlalmitl son:

- Tiene la capacidad de probar varios perfiles de irradiación obtenidos de los modelos teóricos.
- Puede registrar en tiempo real la historia térmica de cada muestra.
- Puede reproducir algunas de las texturas mineralógicas observadas en los condros.

Citlalmitl se encuentra instalado en el laboratorio de Óptica Cuántica del Instituto de Ciencias Nucleares (ICN) de la UNAM, en Ciudad Universitaria de la Ciudad de México. El dispositivo experimental fue diseñada y construida por el equipo de investigación que trabaja en este proyecto liderado por las doctoras Antígona Segura y Karina Cervantes, la Dra. Patricia Hernández Reséndiz, quien enfocó su tesis doctoral en la construcción de Citlalmitl, el Dr. Héctor Cruz, técnico académico del laboratorio de Óptica Cuántica y el Dr. Alfred U'ren, jefe de dicho laboratorio.

En la Figura 2.1 se ilustra un diagrama de los componentes de Citlalmitl. Dicho dispositivo experimental consiste en un láser (S) de CO₂ y 50 W de potencia (SYNRAD 48-5) que emite a 10.6 μm . El haz del láser pasa por un beam-splitter (BS) 95/5, donde el 5% de la potencia del haz es redirigida a un potenciómetro (D) que monitorea en tiempo real la potencia de irradiación del láser. Después, el haz del láser pasa a través de un telescopio que consta de una lente (L1) de 50 mm de foco y otra (L2) de 200 mm (o también puede pasar directamente sin usar los lentes), para posteriormente ser desviado hacia una cámara de vacío (VC) mediante un espejo sujetado por dos picomotores (M). La cámara de vacío es de acero y está equipada con una base para colocar un portamuestras (A) en su interior. El objetivo del arreglo es que el haz del láser irradie sobre el portamuestras, para ello, la cara superior de la cámara de vacío cuenta con una ventana hecha de seleniuro de zinc (ZnSe), la cual permite el paso del haz del láser hacia el interior de la cámara. Para conocer la temperatura a la que están siendo irradiadas las muestras, se coloca un pirómetro en una de las ventanas de la cámara de vacío; y para observar como se funden las muestras se tiene una cámara CCD en otra de las ventanas. A continuación se describen los aspectos que controlan Citlalmitl.

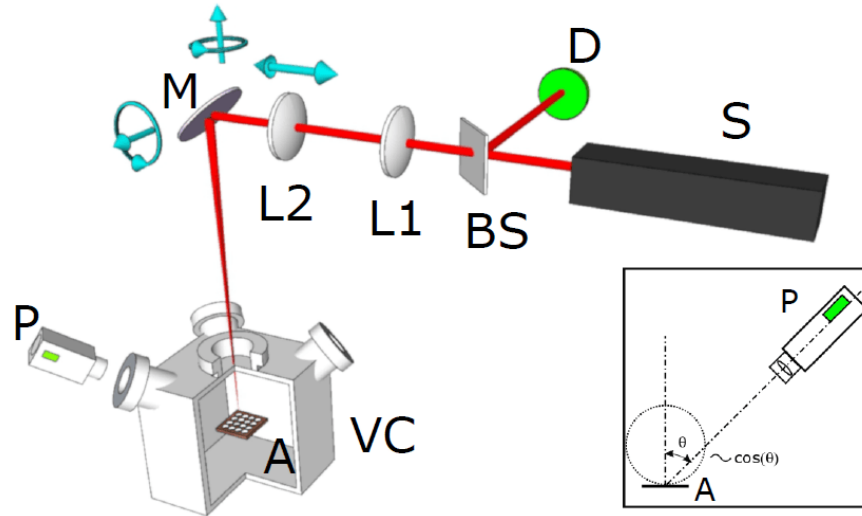


Figura 2.1: Diagrama de Citlalmatl. S= láser de CO₂, VC= cámara de vacío, A= portamuestras, P= pirómetro, M= espejo, L1= lente estático ($f= 50$ mm), L2= lente con movimiento motorizado ($f= 200$ mm), BS= beam splitter 95:5 y D= potenciómetro. En el recuadro inferior derecho se muestra la corrección en las mediciones de temperatura debida al ángulo ($\theta= 45^\circ$) del potenciómetro (tomada de [Hernández-Reséndiz \(2020\)](#))

2.2.1. Confinamiento y vacío

La cámara de vacío (Figura 2.2 a) es un cubo de acero 304 que tiene como objetivo mantener las muestras libres de contaminación y proteger al personal que opera el equipo contra la potencia del láser. En la cara superior de la cámara se tiene una ventana de ZnSe que es transparente a longitudes de onda de 600 nm a 16 μm , lo cual permite el paso del haz del láser. La cámara contiene 8 compuertas (3 de ellas están cerradas) que cumplen distintas funciones. La primer compuerta de la cámara está conectada a una turbo bomba de vacío Pfeiffer Vacuum Hi Cube 80 Eco que logra presiones tan bajas como 10^{-7} mbar y también incluye una bomba mecánica. La segunda compuerta permite la medición de la presión de la cámara mediante un manómetro de vacío Pfeiffer. La tercer compuerta tiene una ventana de vidrio de borosilicato (opaco al infrarrojo medio y lejano) en la cual se puede posicionar una cámara CCD para observar lo que sucede dentro de la cámara de vacío. La cuarta compuerta también tiene una ventana de vidrio de borosilicato en la que se apunta un pirómetro (Lumasese impac 140P), de forma manual para medir la temperatura de las muestras que están dentro del portamuestras en el centro de la cámara (Figura 2.2

c). El portamuestras tiene un arreglo de 6×6 casillas en las que se coloca el material precursor, las casillas tienen dos tamaños distintos: 18 casillas de 3 mm y 18 casillas de 4 mm. El portamuestras está hecho de acero, material elegido por [Hernández-Reséndiz \(2020\)](#), debido a que permite la disipación de la energía térmica generada por la irradiación del láser y además el acero no reacciona químicamente con los gases que se puedan producir en la cámara. El camino óptico del láser (Figura 2.2 b) está confinado dentro de una caja de metal en la parte superior del dispositivo (Figura 2.2 d). Para que el haz del láser llegue confinado hasta la cámara de vacío, en la ventana superior de ésta se tiene una caja de aluminio desmontable (Figura 2.2 e).

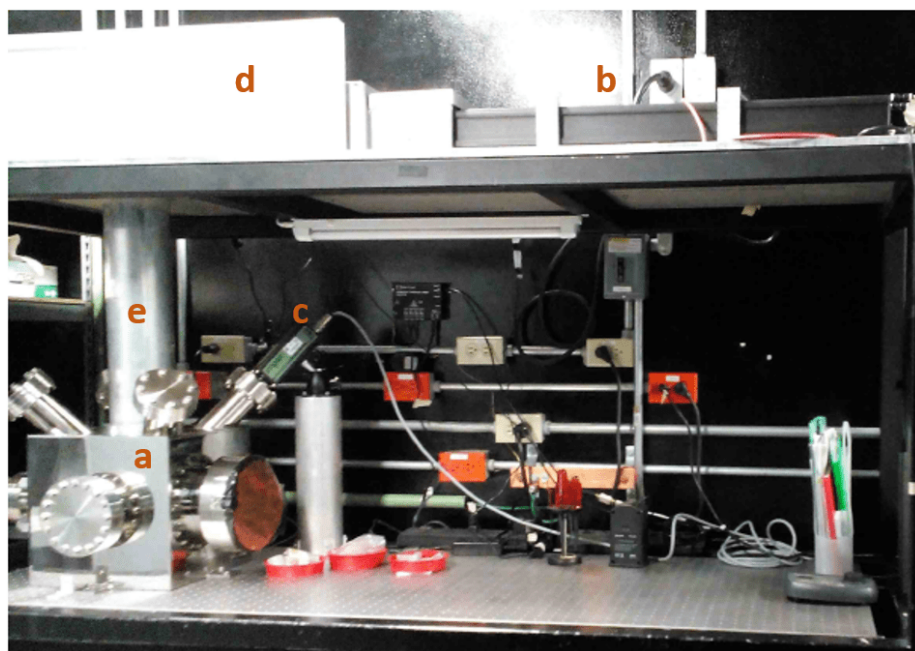


Figura 2.2: Citlalmitl. Laboratorio de Óptica Cuántica, ICN, UNAM. (a) Cámara de vacío con sus respectivas compuertas. (b) Láser CO_2 . (c) Pirómetro apuntando dentro de la cámara. (d) Caja de metal que confina el camino óptico del láser. (e) Caja de aluminio desarmable (fotografía tomada por [Hernández-Reséndiz, 2020](#)).

2.2.2. Posicionamiento del láser

Como se mencionó anteriormente, el haz del láser es redireccionado a la cámara de vacío mediante un espejo que se encuentra arriba de la cámara (Figura 2.1 M). Para poder apuntar a cualquiera de las 36 casillas del portamuestras, el espejo se

instaló en una montura motorizada New Focus 8821, que es controlada mediante un sistema de lazo cerrado conectado a un par de *encoders* montados a dos actuadores piezoeléctricos que controlan la inclinación del espejo desde la computadora. Como el láser no es visible a la vista humana se tiene un láser guía que por medio del programa Labview (véase sección 2.2.5) es apuntado a la casilla deseada antes de comenzar la irradiación. Este proceso permite calibrar la posición de la casilla y almacenarla en la memoria del programa.

2.2.3. Control de energía

Estudios experimentales han demostrado que los silicatos pueden calentarse y fundirse utilizando un láser de CO₂ (Nordine y Atkins, 1982; Solé, 2009). Citlalmitl está conformado por un láser SYNRAD de CO₂ de 50 W que emite a $\lambda = 10 \mu\text{m}$. El láser se controla con Synrad UC-2000 Laser Controller y usa una fuente de poder SYNRAD PS-6 DC Power Supply. La potencia e intensidad con la que irradia el láser se controla mediante dos parámetros: el área del haz del láser y el *duty cycle* (ciclo de trabajo). El *duty cycle* es el porcentaje del periodo de modulación durante el cual el láser está activo (Figura 2.3) y es proporcional a la potencia de salida del láser. Dicha potencia es controlada por la modulación periódica de la intensidad con tasas de repetición de 5, 10 o 20 kHz. Por otro lado, el diámetro del haz del láser puede ser modificado desplazando el lente con foco de 200 mm (Figura 2.1 L2). Por medio varias calibraciones, Hernández-Reséndiz (2020) hizo posible el control de la potencia del láser mediante la variación del *duty cycle* entre 0 y 95 %, y el diámetro del haz del láser, lo cual permite variar la intensidad de energía entre 2 W cm^{-2} y $7 \times 10^3 \text{ W cm}^{-2}$. Con el control de energía anterior, el láser es capaz de alcanzar temperaturas suficientes para fundir silicatos.

2.2.4. Medición de parámetros

Es de suma importancia mantener el nivel de la humedad y temperatura ambiente del laboratorio de Óptica Cuántica, que es donde se encuentra operando Citlalmitl.

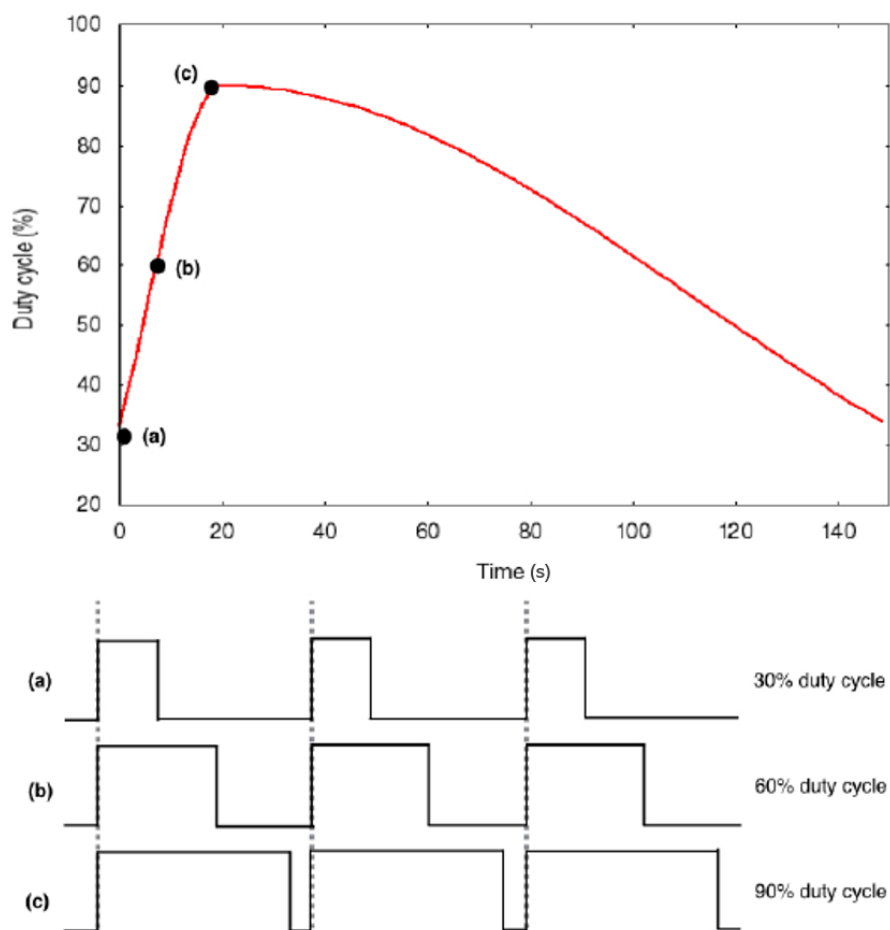


Figura 2.3: *Duty cycle*: es el porcentaje del periodo de modulación durante el cual el láser está activo (tomada de [Hernández-Reséndiz, 2020](#)).

La humedad debe mantenerse a un nivel de $30 \pm 1\%$ y una temperatura de $19 \pm 1^\circ\text{C}$.

La presión dentro de la cámara de vacío es monitoreada mediante un manómetro que está conectado a una turbo-bomba de vacío. La presión puede reducirse a niveles debajo de 10^{-5} atm o mantenerse a presión atmosférica (0.76 atm en la Ciudad de México).

Como se mencionó anteriormente, la temperatura de las muestras dentro de la cámara de vacío se toma con un pirómetro Lumasese Impact 140P de orientación variable (Figura 2.1 P), el cual está colocado en una de las compuertas con ventana de borosilicato que evita que la radiación del láser lo alcance, permitiendo así medir la temperatura en tiempo real y registrar la historia térmica de cada muestra. La ven-

tana de borosilicato tiene una inclinación de 45° con respecto al haz del láser. Esta inclinación presenta un error en la medición de la temperatura, ya que los pirómetros están diseñados para tomar mediciones con un incidencia normal. Para solucionar el problema de la inclinación, fue necesario hacer una corrección de la temperatura, para ello se asumió que las muestras emiten como una Ley Lambertiana (dependencia angular proporcional a $\cos\theta$ durante la irradiación) y de forma experimental, [Hernández-Reséndiz \(2020\)](#) realizó una confirmación de la dependencia angular $\cos\theta$ obteniendo una corrección de 0.83 de la temperatura medida a incidencia normal, es decir, la temperatura medida por el pirómetro a 45° disminuye un 17% de la temperatura que registraría un pirómetro a incidencia normal. Por lo que la corrección se expresa en la siguiente ecuación:

$$T_{real} = \frac{T_{medida}}{0.83}$$

2.2.5. Control y automatización de Citlalmitl

Citlalmitl se controla mediante una interfaz programada con el software Labview. Labview es un entorno de programación gráfica que se utiliza para desarrollar sistemas y pruebas automatizadas. El programa creado en Labview exclusivamente para controlar Citlalmitl se llama *CONDROS* y se encarga de dirigir todo el proceso de irradiación. En la Figura 2.4 se muestra un diagrama de flujo del programa *CONDROS* y en la Figura 2.5 se muestra la interfaz del mismo. Una de las ventajas de *CONDROS* es que se pueden agregar los procedimientos adicionales que sean requeridos para mejorar el programa. *CONDROS* puede controlar la posición angular del espejo (Figura 2.1 M) para apuntar a cualquiera de las 36 casillas del portamuestras; el desplazamiento del lente L2 para variar el diámetro del haz del láser y la potencia del láser, que se controla programando perfiles de irradiación para el *duty cycle* (la forma de la historia térmica se determina variando el *duty cycle* durante una corrida experimental). Para cada corrida experimental se registra la potencia del láser contra tiempo y la temperatura de la muestra (depende de la potencia) contra tiempo.

CONDROS cuenta con 4 modos con diferentes funciones, dependiendo de si se

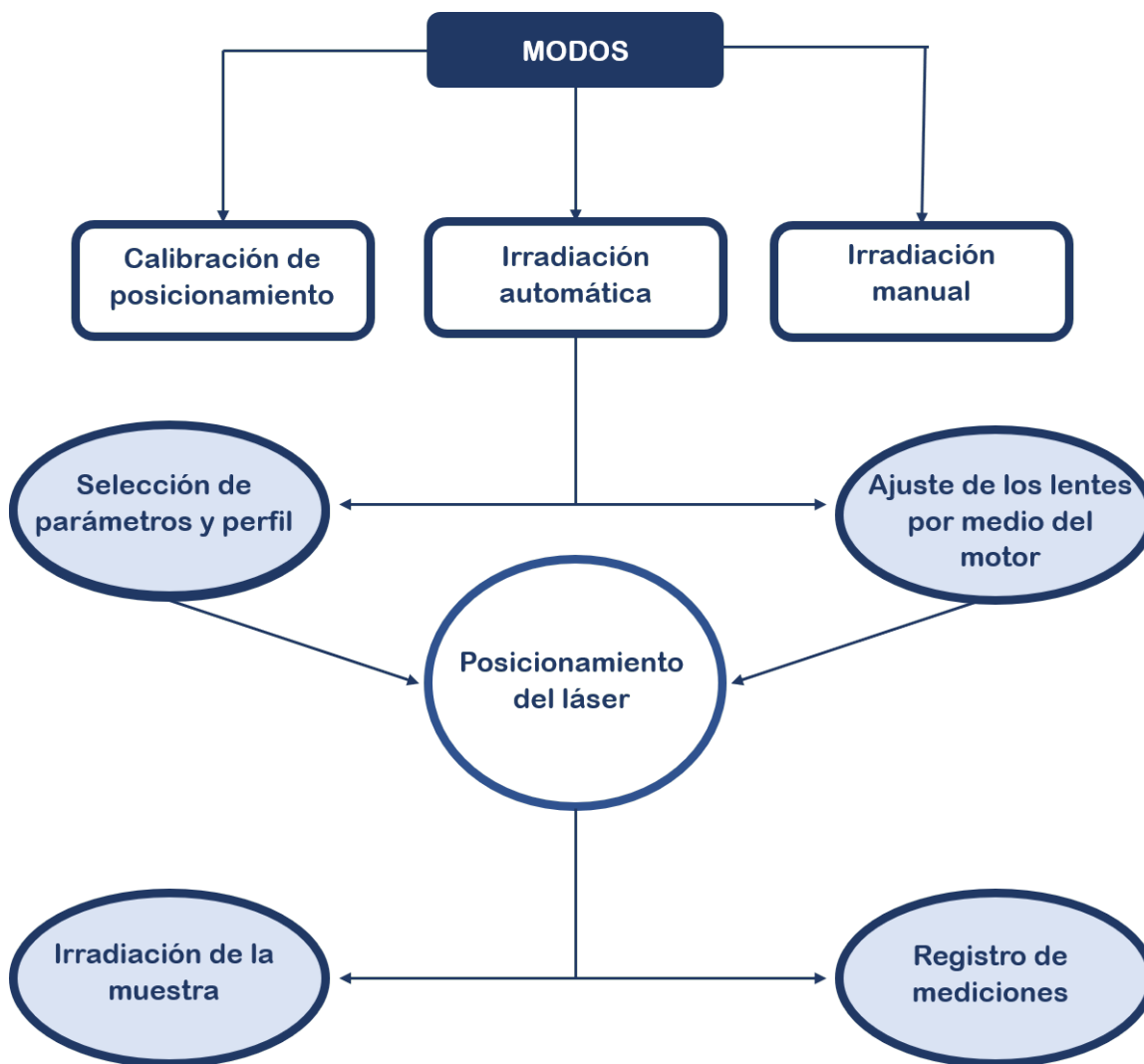


Figura 2.4: Diagrama de flujo del programa *CONDROS*, que controla Citlalmitl, programado con Labview.

quiere realizar una corrida experimental o si se quieren hacer ajustes o calibraciones a Citlalmitl (Figura 2.5):

- *MOV PICO SELECT*: Con este módulo se prueba que por medio de los arduinos y *encoders*, los actuadores piezoeléctricos estén funcionando correctamente.
- *LINEAR*: En este módulo Citlalmitl comienza a irradiar las muestras obedeciendo los parámetros dados al programa, creando así los análogos de condros.
- *CAMBIOS*: En este módulo se pueden realizar cambios de manera manual a Citlalmitl con fines de calibración.

- *STAND BY*: Modo de reposo del programa.

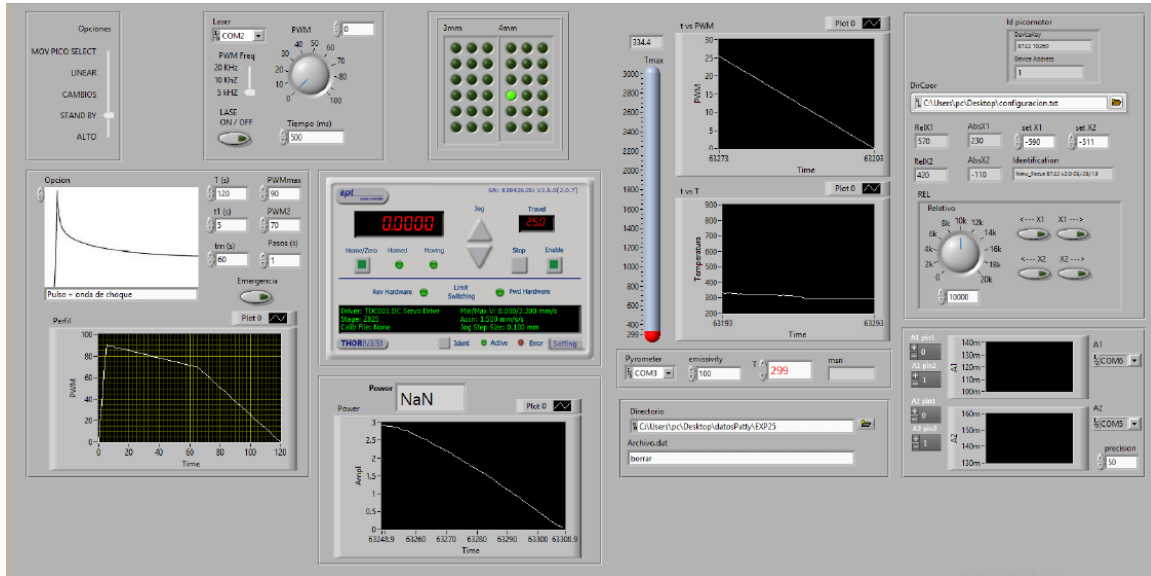


Figura 2.5: Interfaz del programa *CONDROS*.

2.3. Selección y programación de las historias térmicas

El dispositivo experimental Citlalmítl fue diseñado especialmente con el propósito de reproducir las historias térmicas predichas por los modelos de formación de condros. Como vimos en la sección 1.2.2, varios perfiles de temperatura han sido propuestos en la literatura siendo los perfiles de onda de choque los más aceptados. Por ello en esta tesis se probaron dos perfiles de irradiación que simulan las historias térmicas de los condros predichas por el mecanismo de ondas de choque. Los perfiles de irradiación de esta tesis se basaron en las historias térmicas obtenidas por Desch et al. (2002) y Morris y Desch (2010). El perfil I tiene una tasa de enfriamiento no lineal que decae constantemente, justo como indican los modelos de onda de choque de Desch et al. (2002). El perfil II tiene una tasa de enfriamiento con caída lineal. Según Jones et al. (2018), una tasa de enfriamiento lineal es válida siempre y cuando sea rápida ($\tau_c \sim 10^3 - 10^4$). La diferencia entre el decaimiento de las tasas de enfriamiento (de manera

lineal y no lineal) se hizo con el fin de estudiar las diferencias texturales que tendrían los análogos de condros si fueran irradiados durante el mismo intervalo de tiempo pero con diferentes decaimientos en la temperatura, y si ambos perfiles pueden reproducir texturas similares a las de los condros naturales. A continuación se habla con mayor detalle de cada uno de estos perfiles y de su programación.

2.3.1. Perfil I

La historia térmica de los condros predicha por el modelo de onda choque se muestra en la Figura 1.9. Para reproducir dicha historia térmica se utilizó una función gaussiana representada por las ecuaciones 2.1 y 2.2 que controlan la tasa de calentamiento y la tasa de enfriamiento, respectivamente. La ilustración del perfil I se muestra en la Figura 2.6 en la que t_1 representa el tiempo en el que el perfil de irradiación alcanza una potencia máxima (P_{max}), y T^* representa el tiempo total de la irradiación.

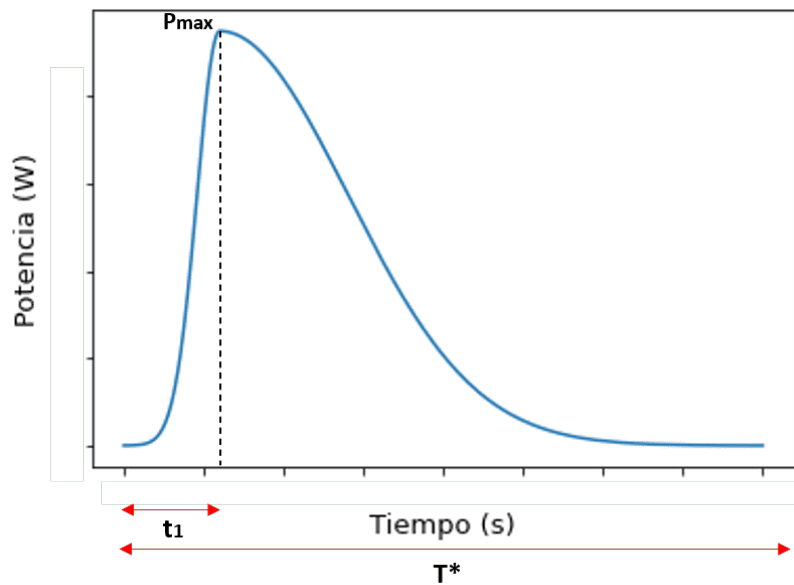


Figura 2.6: Perfil I. Representa la historia térmica de los condros predicha por el mecanismo de onda de choque con una tasa de enfriamiento no lineal que decae constantemente. t_1 = tiempo en el que se llega a una potencia máxima (P_{max}). T^* = tiempo total de la irradiación.

$$f_I(t) = P_{max} e^{-\frac{(t-t_1)^2}{t_1^2}} \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (2.1)$$

$$f_I(t) = P_{max} e^{-\frac{(t-t_1)^2}{(T-t_1)^2}} \quad t_1 \leq t \leq T^* \quad (2.2)$$

Como se mencionó anteriormente, Citlalmitl está monitoreando constantemente la temperatura de las muestras, por lo que existe una dependencia entre la potencia y la temperatura, implicando que $P_{max} \Leftrightarrow T_{max}$. Para calcular la tasa de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) es necesario derivar la ec. 2.2. Una vez que se toman las mediciones de temperatura, se evalúa en t_1 y T , que es el periodo en el que se da el enfriamiento de cada muestra, la derivada se expresa en la ec. 2.3.

$$\frac{d}{dt} f_I(t) = -\frac{2T_{max}(t-t_1)}{(T-t_1)^2} e^{-\frac{(t-t_1)^2}{(T-t_1)^2}} \quad (2.3)$$

2.3.2. Perfil II

El perfil II (Figura 2.7) trata de representar el modelo de [Morris y Desch \(2010\)](#), quienes hicieron mejoras al modelo de onda de choque (Figura 1.9). Tales mejoras consideraron que, debido a la opacidad del polvo, la profundidad óptica se reduce en la región pre-choque (para más detalles véase [Morris y Desch \(2010\)](#)), lo que produce un ligero cambio en la pendiente de P_1 a P_2 . Además para este perfil se estudia una tasa de enfriamiento que decae de manera lineal. Por lo tanto, la función ($f_{II}(t)$) que gobierna el perfil II está dada por la ecuación de la recta. Las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6 representan el calentamiento de este perfil y las ecuaciones 2.7 y 2.8 representan la tasa de enfriamiento. Al igual que para el perfil I se considera que $P_3 \Leftrightarrow T_{max}$, como para este perfil la función es lineal, las tasas de calentamiento y enfriamiento se calculan fácilmente obteniendo las pendientes (m_i).

$$P_1 = m_1 t_1 \quad ; \quad m_1 = \frac{P_1}{t_1} \quad ; \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (2.4)$$

$$P_2 = m_2 t_2 + b_2 \quad ; \quad m_2 = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad ; \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (2.5)$$

$$P_3 = m_3 t_3 + b_3 \quad ; \quad m_3 = \frac{P_3 - P_2}{t_3 - t_2} \quad ; \quad t_2 \leq t \leq t_3 \quad (2.6)$$

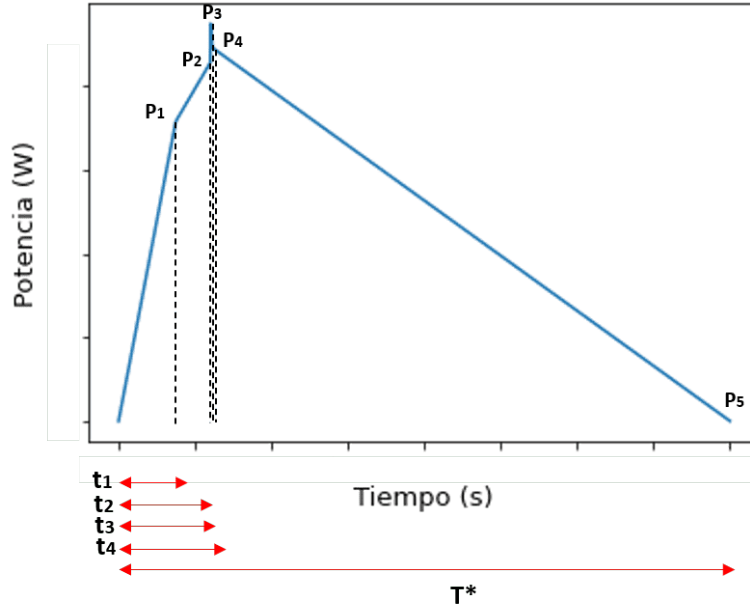


Figura 2.7: Perfil II. Representa la historia térmica de los condros predicha por el mecanismo de onda de choque con una tasa de enfriamiento lineal. t_1 y t_2 son los tiempos en los que se llega a una P_1 y P_2 respectivamente. t_3 = tiempo en el que se llega a una potencia máxima (P_3). t_4 = tiempo al que la potencia se reduce hasta P_4 . T^* = tiempo total de la irradiación.

$$P_4 = m_4 t_4 + b_4 ; m_4 = \frac{P_4 - P_3}{t_4 - t_3} ; t_3 \leq t \leq t_4 \quad (2.7)$$

$$P_5 = m_5 t_5 + b_5 ; m_5 = \frac{P_5 - P_4}{T^* - t_4} ; t_4 \leq t \leq T^* \quad (2.8)$$

El perfil I y el perfil II son los que se reprodujeron en esta tesis. Sin embargo, Citlalmitl es capaz de reproducir cualquier historia térmica que se desee a partir de una o varias funciones, esto representa una gran ventaja sobre otros dispositivos experimentales que se han reportado en la literatura.

2.4. Selección y análisis de precursores

La composición química del material precursor es parte fundamental de las condiciones de formación de condros. Se sabe de que están hechos los condros, sin embargo la literatura es algo vaga a la hora de definir el material precursor. Por ejemplo, según [Hewins y Zanda \(2012\)](#), uno de los posibles precursores para condros de tipo I incluyen polvo de grano fino, pero no menciona ni la mineralogía ni el porcentaje de

cada mineral que debería de tener este polvo.

Una investigación prometedora sobre los posibles precursores de los condros se describe en el trabajo de [Marrocchi et al. \(2019\)](#), quienes realizaron observaciones en condros porfídicos ricos en olivino en la condrita carbonácea Kaba (CV3) y encontraron que los cristales de olivino internos se pueden interpretar como granos relictos, ya que sólo muy pocos se pueden derivar de las generaciones anteriores de condros, y que dichos granos son heredados de condensados nebulares similares a los AOAs, ya que comparten características isotópicas y químicas similares entre sí. En su trabajo, concluyen que existe un vínculo entre condensados tipo AOAs y condros tipo I, lo que implica que el reciclaje de polvo fue un proceso importante en el sistema solar temprano. La investigación anterior motivó que en este trabajo se utilizara material precursor de condros basado en la mineralogía y petrología de los AOAs existentes en las condritas carbonáceas ([Krot et al., 2004](#)). Los materiales precursores son:

- Granos de olivino fosterítico, siendo el mineral que se encuentra en mayor abundancia en cada muestra y que representan entre el 55 % y el 83 % de cada muestra. Los análisis puntuales de los olivinos se obtuvieron por rayos X WDS ([Levresse et al., 2015](#); [Dávalos-Elizondo et al., 2016](#)). El contenido promedio de fosterita [Fo=Mg/(Mg+Fe)] es 92 % mol, por lo que su composición química es $Mg_{1.8}Fe_{0.2}SiO_4$ (Tabla 2.1).
- Cantidades menores de granos de piroxeno; enstatita ($MgSiO_3$) y diópsida ($CaMgSi_2O_6$) que representan entre el 0 % y el 29 % de cada muestra. Los análisis puntuales de piroxenos se obtuvieron por rayos X WDS ([Levresse et al., 2015](#); [Dávalos-Elizondo et al., 2016](#)) (Tabla 2.2).
- Cantidades menores feldespatos y feldespatoides; anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) labradorita [$(Ca,Na)(SiAl)_4O_8$], oligoclasa [$(Ca,Na)(SiAl)_4O_8$] y sodalita [$Na_4(Si_3Al_3O_6)_2Cl$], que representan entre el 0 % y el 28 % de cada muestra. La composición de los feldespatos no pudo ser obtenida mediante fluorescencia de rayos X como la del olivino y los piroxenos, sin embargo se presenta su composición ideal obtenida de la base de datos de mineralogía www.webmineral.com (Tabla 2.3).

- Muy pequeñas cantidades de espinela (MgAl_2O_4) entre 0-9 %wt. La composición de la espinela también fue obtenida de la de la base de datos de mineralogía www.webmineral.com (Tabla 2.3).

Todos los granos fueron molidos y tamizados en fracciones de $250\mu\text{m} < d < 500\mu\text{m}$. Se realizaron las combinaciones de material precursor deseadas (muestras) y se pesaron en una balanza analítica Ohaus Analytical Plus (error de $\pm 0,005\text{ mg}$). Cabe mencionar que las muestras no requieren de ningún tipo de preparación adicional. Por último, cada una de las muestras se coloca en una casilla del portamuestras para posteriormente ser colocadas dentro de la cámara de vacío y comenzar su irradiación. En la Figura 2.8 se aprecian algunos de los minerales precursores vistos desde el microscopio estereoscópico y su diferencia notoria de colores.

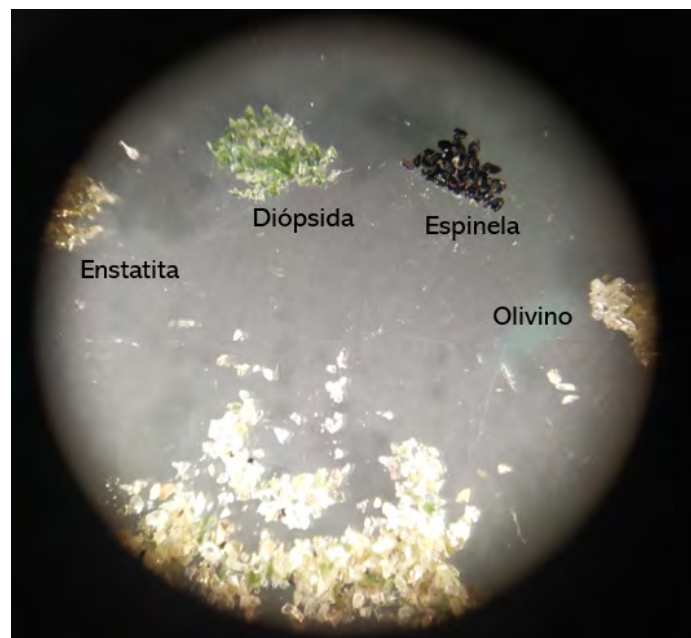


Figura 2.8: Algunos de los minerales precursores.

Tabla 2.1: Composición química del olivino utilizado como material precursor. Obtenida mediante fluorescencia de rayos X (tomada de [Cervantes \(2009\)](#)) (cálculo basado en 4 oxígenos)

Óxidos	Olivino %wt	Cationes	Oxígeno 4
SiO ₂	40.432	Si	0.988
Al ₂ O ₃	0.234	Al	0.007
MnO	0.120	Mn	0.002
MgO	49.744	Mg	1.812
Fe ₂ O ₃	1.010	Fe ⁺³	0.019
FeO	8.130	Fe	0.166
NaO	<0.01	Cr	0.001
Cr ₂ O ₃	0.027	Ca	0.002
CaO	0.094	Ti	0.000
TiO ₂	0.010		
K ₂ O	0.012		
P ₂ O ₅	0.012		
NiO	0.153		
Total	99.988	Total	2.996
		Fo (Mg#)	92
		Fa	8

2.5. Técnicas de análisis de las muestras obtenidas

2.5.1. Microscopio estereoscópico

Una vez que las muestras han sido irradiadas se realiza un análisis preliminar de la morfología y textura de los análogos de condros con un microscopio estereoscópico. El microscopio estereoscópico es un tipo de microscopio óptico que permite observar una muestra generando una imagen en tres dimensiones, ésta es la característica principal que lo distingue del resto de los microscopios. Se utilizó en microscopio estereoscópico triocular Mod.SMZ168 TLED Motic, que cuenta con un sistema de iluminación independiente de luz fría con guía doble bifurcada modelo MLC 150

Tabla 2.2: Composición química de los piroxenos utilizados como material precursor. Obtenida mediante fluorescencia de rayos X por [Cervantes \(2009\)](#).

Óxidos	Diópsida %wt	Enstatita %wt
SiO ₂	50.23	57.09
Al ₂ O ₃	6.29	4.18
MnO	0.13	0.15
MgO	14.55	32.93
Fe ₂ O ₃	0	0
FeO	4.97	5.13
NaO	1.21	0.09
CaO	20.8	0.78
TiO ₂	0.99	0.11

Tabla 2.3: Composición química de los feldespatos y la espinela obtenida de la base de datos www.webmineral.com (Oc= Oligoclasa, An= Anortita, La= Labradorita, So= Sodalita, Sp= Espinela).

Óxidos	Oc %wt	An %wt	La %wt	So %wt	Sp %wt
SiO ₂	63.38	44.4	53.05	37.2	0
Al ₂ O ₃	23.05	35.84	30.01	31.56	71.67
MnO	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	28.33
FeO	0	0	0	0	0
NaO	9.34	0.56	4.56	25.58	0
CaO	4.23	19.2	12.38	0	0
TiO ₂	0	0	0	0	0

Motic y una cámara digital Motic de 10 megapíxeles. El microscopio estereoscópico nos da imágenes de alta resolución que permiten identificar los tipos de texturas que se formaron en los análogos de condros.

2.5.2. Microscopio electrónico de barrido

Después de observar los análogos de condros con el microscopio estereoscópico y seleccionar las muestras representativas, se procede a hacer el análisis de dichas muestras mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB) TM3030 Plus con un voltaje de 1,500 V con una distancia de trabajo de 10.2 mm. El MEB se encuentra en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC) en el Instituto de Física de la UNAM. Para llevar a cabo los análisis con el MEB no se necesita una preparación previa de las muestras, sólo asegurarse de que se encuentran libres de humedad. El MEB utiliza un haz de electrones en vez de un haz de luz para formar una imagen, esto permite estudiar muestras sólidas pequeñas con mayor detalle que el que brinda un microscopio estereoscópico, ya que tiene una profundidad de campo que permite tomar fotografías desde distintos ángulos. El funcionamiento básico del MEB consiste en una columna óptica que se encuentra al vacío para que un cañón de electrones viaje sin interrupciones, estos electrones viajan a través de un ánodo que atrae a los electrones para que estos viajen como un haz que posteriormente pasa por un lente magnético que hace que el haz de electrones se vuelva más preciso. Posteriormente el haz de electrones fino llega a la bobinas de barrido, las cuales comienzan a sembrar el área de la muestra con el haz de electrones. El MEB tiene dos detectores, el de electrones secundarios y el de electrones retrodispersados. Estos detectores registran la radiación producida por los electrones secundarios y retrodispersados, para posteriormente formar la imagen de la muestra a partir de la variación de intensidad de la señal que forma un mapa de intensidades. Como no existe el color con la longitud de onda electrónica, las imágenes aparecen en blanco y negro. El área donde los electrones pasan a través de la muestra aparece blanca y el área donde los electrones no pasan aparece negra. Por ello, en las imágenes con MEB se muestra a los elementos pesados en tonalidades de grises más claras y a los elementos más ligeros en tonalidades de grises más oscuras.

2.5.3. Microscopio petrográfico

Después de analizar los análogos representativos con el MEB, se realiza una sección delgada de las muestras para poder analizarlas mediante un microscopio petrográfico IOPBA310 Pol Motic de luz transmitida y reflejada ubicado en el Taller de Petrología de la Facultad de Ciencias, UNAM.

Un microscopio petrográfico es un tipo de microscopio óptico que sirve para la determinación de las propiedades ópticas, identificación de los minerales, estudio de texturas y relaciones entre los minerales y clasificación de rocas. Para observar la muestra, este microscopio utiliza el método de microscopía de luz polarizada que permite estudiar los distintos planos cristalográficos de las muestras. Además, está dotado de dos filtros polarizadores (o nícoles). El primero (polarizador) está colocado por debajo de la muestra, en el sistema de iluminación, y el segundo (analizador) entre la muestra y el ocular.

2.5.4. Norma CIPW

En este trabajo de tesis se utilizó la norma CIPW para obtener una primera aproximación de la mineralogía hipotética que se pudo formar en los fundidos tipo condro dada la composición química total del material precursor. Las clasificaciones puramente químicas han sido ideadas para poder clasificar las rocas volcánicas de grano fino y vítreas, ya que en ellas las clasificaciones modales (abundancia en volumen de un mineral en una roca) no son prácticas. Un método de clasificación normativa involucra el recálculo de los análisis químicos de las rocas ígneas a un juego de fórmulas de minerales ideales, tal es el caso de la norma CIPW. La norma CIPW es un medio de convertir la composición química de una roca ígnea en una composición mineral ideal. En los cálculos, los óxidos de los análisis químicos son combinados en una secuencia de pasos para formar los “minerales componentes normativos”, esta norma calcula la composición mineral como si el magma fuera anhídrido y a baja presión. El procedimiento simplificado de cálculo de la norma se describe a continuación.

1. Localiza los minerales más predecibles

- Asigna la sustitución común de elementos: Ni y Mg se combinan con FeO, Sr y Ba con Ca.
- Asigna elementos menores en minerales accesorios: P (apatito), S (pirita), Cr (cromita), F (fluorita), CO₂ (calcita) y Zr (zircon).
- Asigna al Ti para formar ilmelita o esfeno y posteriormente puede ser necesitado para formar perovskita o rutilo.
- Asigna Ca y Al para formar anortita.

2. Provisionalmente forma silicatos saturados en sílice.

- Provisionalmente asigna álcalis y Al.
- Asigna Fe y Mg
- Crea piroxenos provisionales
- El exceso de sílice forma cuarzo
- El cálculo se completa si no hay falta de sílice

3. Convierte minerales provisionales para remover el déficit de sílice.

- Convierte hiperstena a olivino.
- Convierte esfeno a perovskita.
- Convierte albita a nefelina.
- Convierte ortoclasa a leucita.
- Convierte wollastonita y diópsida a ortosilicato de calcio (raro)

2.5.5. Espectroscopia micro-Raman

Por último, las muestras preparadas en sección delgada son llevadas al espectrómetro de micro-Raman ubicado en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM. El equipo es un DXR MicroRaman Confocal Thermoscientific y se empleó objetivos de 10X y 50x. La rejilla utilizada fue de 900 líneas/mm para resolver la radiación dispersada y la apertura se fijó en 50 μm . El espectro Raman se acumuló en

periodos de 10 y 14 segundos en el rango de 50 cm^{-1} a $3,400\text{ cm}^{-1}$ con una resolución de 1.9 cm^{-1} . La fuente de excitación fue una radiación de 532 nm con una potencia de 10 nW .

La espectroscopia Raman es el estudio de la interacción entre la luz y la materia donde la luz es inelásticamente dispersada. La técnica de espectroscopia Raman funciona cuando una luz de una sola longitud de onda es apuntada hacia la muestra. Lo más común es que se utilice un láser ya que es una potente fuente monocromática. Los fotones del láser interactúan con las moléculas de la muestra y estos son dispersados inelásticamente. Los fotones dispersados se colectan y estos forman el espectro. El análisis por espectroscopia micro-Raman permite estudiar la composición y microestructura de cristales en las muestras, detectando cristales de diferentes minerales partiendo de los modos vibracionales de cada grupo de silicatos y otros minerales. Con esta técnica se confirma la presencia de ciertos minerales en las muestras.

2.6. Morfologías de cristales de olivino

Los condros son rocas que contienen cristales con rápido crecimiento textural. El olivino es uno de los principales componentes de los condros y ha sido el mineral de rápido crecimiento más estudiado, por lo tanto es importante conocer las morfologías que puede formar el olivino según su tasa de enfriamiento. A continuación se describen las morfologías del olivino tomadas de [Faure et al. \(2003\)](#), obtenidas mediante experimentos de cristalización dinámica alrededor de 1400°C y tasas de enfriamiento entre 1 y $1,890^\circ\text{C/h}$.

1. *Cristales poliédricos*: Estos cristales muestran caras bien definidas y contienen inclusiones de vidrio esféricas o elongadas (Figura 2.9 A).
2. *Cristales tabulares*: Es como una tabla, tiene forma rectangular si el cristal está orientado en la dirección $[010]$, para secciones normales a $[010]$, el cristal tiene forma de aguja (Figura 2.9 B).
3. *Morfología hopper*: También denominados como cristales de olivino porfídico por

Donaldson (1976), los cristales de esta morfología pueden parecer hexagonales o con forma de reloj de arena (Figura 2.10). Dependiendo del ángulo en el que se observen, muestran una combinación de caras planas, lóbulos curvilíneos lisos y reentrantes (*hopper*), y pueden acercarse a la integridad externa o ser muy esqueléticos externamente.

4. *Morfología dendrítica*: En el artículo de Donaldson (1976) se habla de morfologías barradas, de olivino reticulado, olivino en cadena y olivino ramificado, sin embargo estas representan diferentes secciones transversales de un mismo tipo de cristales: las dendritas.

- *Morfología cola de golondrina*: Corresponde a una sección paralela al plano [010] de la fosterita dendrítica, por lo que representa una vista plana de la dendrita. En esta morfología las dendritas están compuestas por varios conjuntos de fibras correspondientes a varias generaciones de cristales. El arreglo de las fibras muestra un mismo patrón. Primero, las cuatro fibras principales y primarias forman el marco del dominio dendrítico. La segunda generación de fibras (2 en la Figura 2.11) se desarrolla sobre las primarias. El crecimiento de las fibras secundarias no es uniforme. Por ejemplo, si consideramos la Figura 2.11 A, el conjunto de fibras secundarias está más desarrollado en las fibras primarias etiquetadas con 1 y 4 que en las etiquetadas con 2 y 3.
- *Morfología barrada*: Corresponde a una sección transversal de la dendrita (Figura 2.12).

5. *Morfología plumosa*: Esta morfología muestran fibras muy finas que se desarrollan en la periferia de los cristales de cola de golondrina, así como en las barras (Figura 2.13).

En la Figura 2.14 se muestran las variaciones morfológicas del olivino en función de la tasa de enfriamiento.

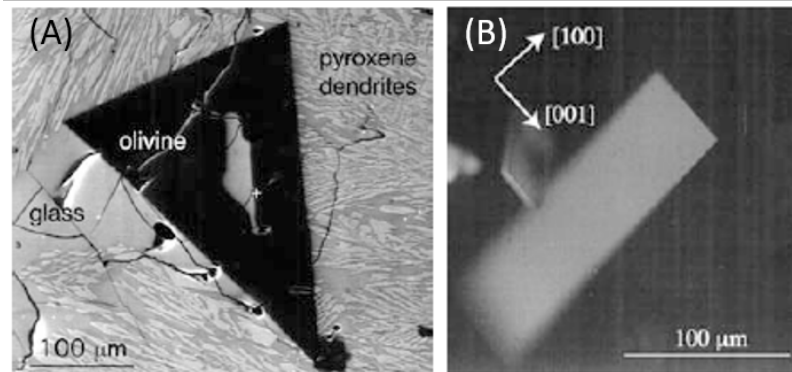


Figura 2.9: (A) Imagen con el MEB de una forsterita poliédrica (tasa de enfriamiento= 2 °C/h). (B) Fotomicrografía del cristal tabular observado a lo largo del eje de la zona [010] (tasa de enfriamiento= 97.5 °C/h) (tomada de [Faure et al., 2003](#)).

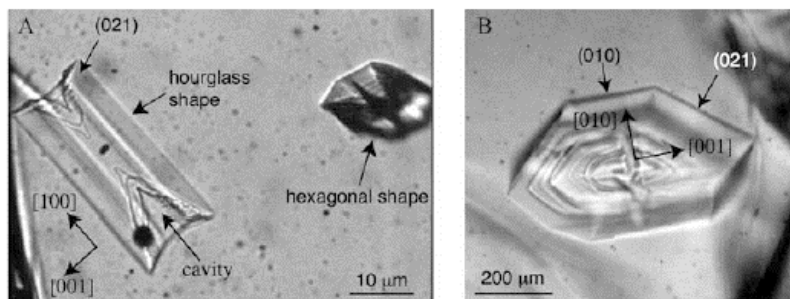


Figura 2.10: Fotomicrografías de la morfología hopper.(A) Formas de reloj de arena y hexagonal (tasa de enfriamiento= 225 °C/h). (B) Forma hexagonal observada en la sección paralela al plano [100] (tasa de enfriamiento= 47 °C/h) (tomada de [Faure et al., 2003](#)).

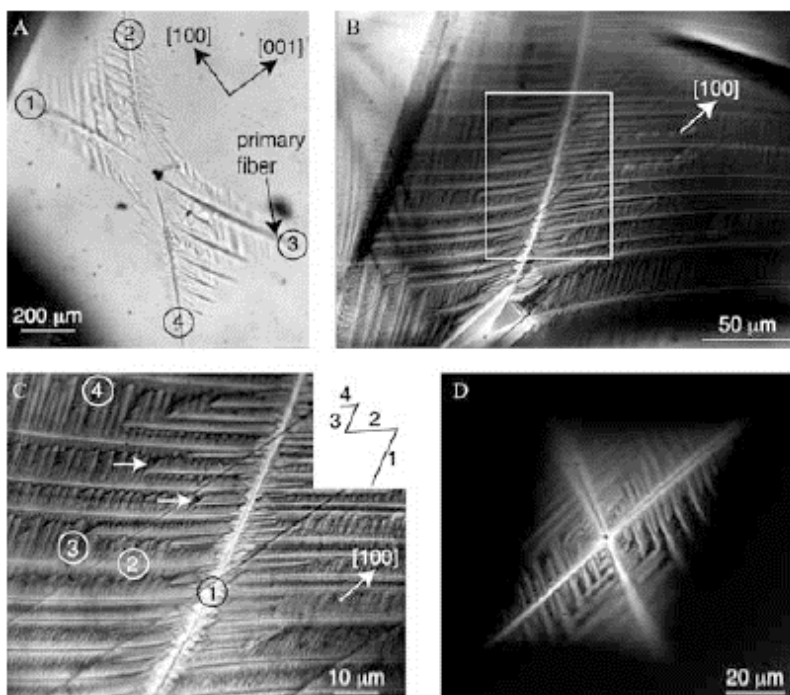


Figura 2.11: Fotomicrografías de olivinos con morfología cola de golondrina en sección paralela [010]. (A) Cristales de cola de golondrina que muestran fibras dendríticas que se desarrollan en las orillas de un cristal hopper (tasa de enfriamiento= 1,890 °C/h). (B) Cuando la tasa de enfriamiento aumenta, los cristales de la cola de golondrina se desarrollan sobre las direcciones [100] (tasa de enfriamiento= 1,890°C/h). (C) Acercamiento de la imagen B mostrando las 4 generaciones de fibras dendríticas. (D) Pequeño olivino cola de golondrina que tiene forma de reloj de arena en el centro (tasa de enfriamiento= 1,890°C/h) (tomada de [Faure et al., 2003](#)).

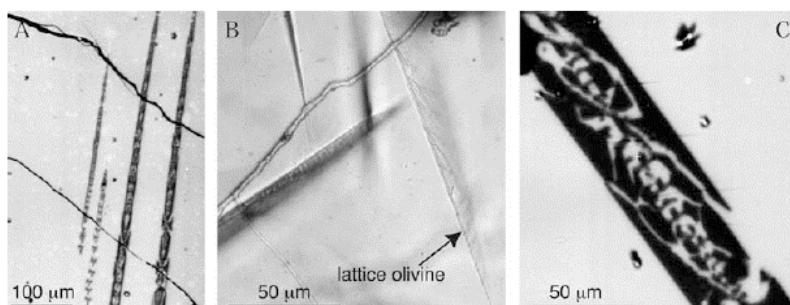


Figura 2.12: imágenes del MEB y ópticas de las barras. (A) Imagen del MEB de 4 barras paralelas denominadas olivinos en cadena por [Donaldson \(1976\)](#) (tasa de enfriamiento= 225 °C/h). (B) Fotomicrografía del olivino reticulado (tasa de enfriamiento= 1,890 °C/h). (C) Imagen del MEB del olivino ramificado con microfracturas que corresponden a la dirección [100] (tasa de enfriamiento= 225 °C/h) (tomada de [Faure et al., 2003](#)).

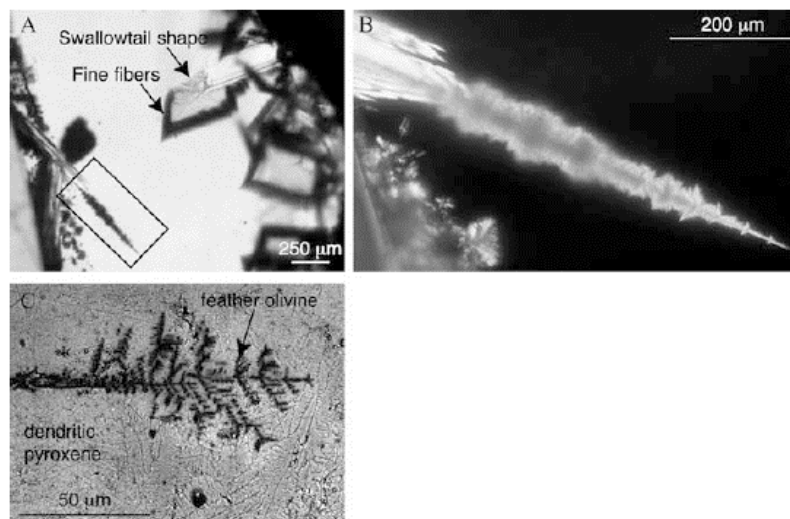


Figura 2.13: Imágenes del MEB y ópticas del olivino plumoso con una tasa de enfriamiento de 89 °C/h. (A) Fotomicrografía mostrando las fibras finas que se desarrollan en la cola de golondrina y en las barras de olivino. (B) Acercamiento de la imagen A. (C) Imagen del EMB mostrando piroxeno dendrítico asociado con el olivino plumoso (tomada de [Faure et al., 2003](#)) .

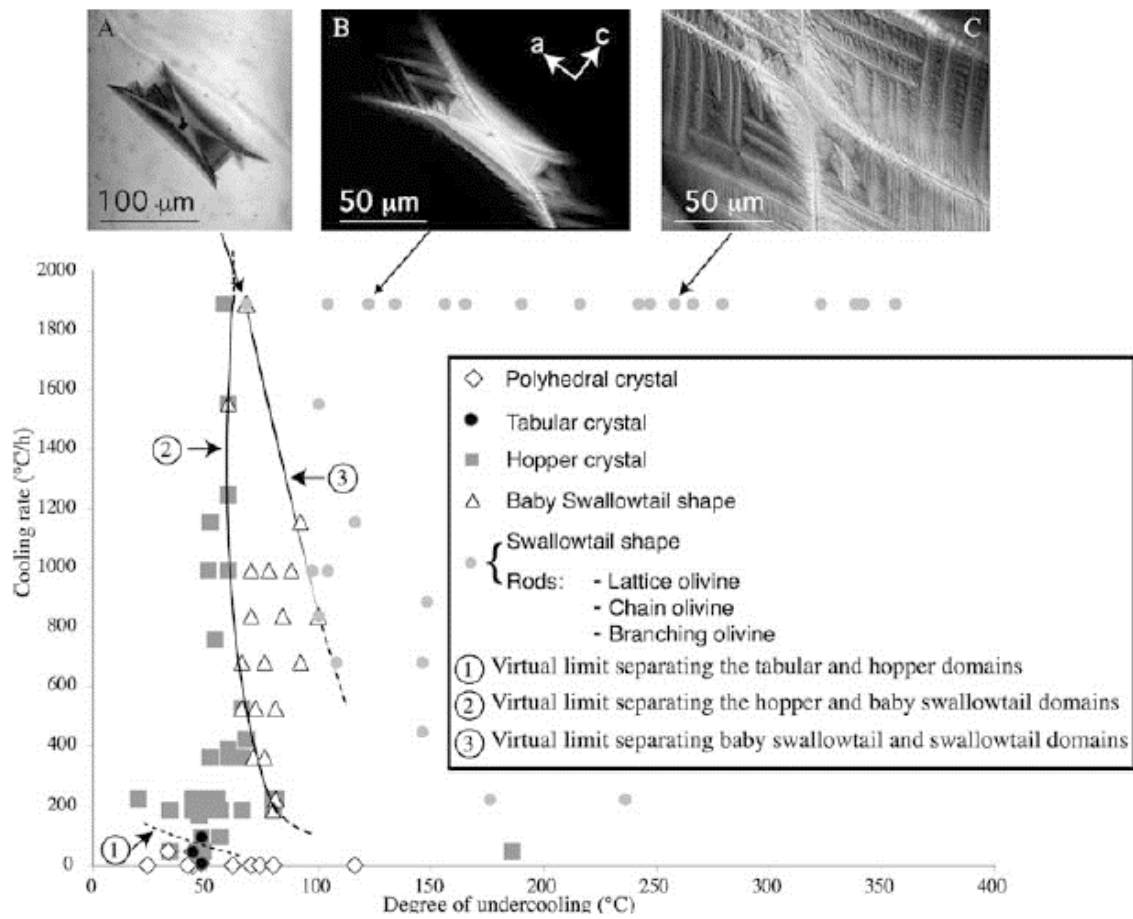


Figura 2.14: Variaciones morfológicas del olivino en función de la tasa de enfriamiento. (A, B y C) Evolución morfológica en la sección paralela [010] para una tasa de enfriamiento de 1,890 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$. (A) Cola de golondrina bebé ($-\delta T = 68^{\circ}\text{C}$). (B) Cola de golondrina ($-\delta T = 122^{\circ}\text{C}$). (C) La longitud de las fibras dendríticas incrementa a valores mayores de subenfriamiento ($-\delta T = 258^{\circ}\text{C}$) (tomada de Faure et al., 2003).

Capítulo 3

Condiciones experimentales

Recapitulando, el objetivo de esta tesis es comprobar las historias térmicas predichas por los modelos de onda de choque, entonces lo que se hizo fue utilizar dos perfiles de irradiación que responden a los modelos de onda de choque y ver si dichos perfiles pueden reproducir las características morfológicas y texturales de los condros naturales. Sin embargo, dos factores importantes que se deben de tomar en cuenta para reproducir estas características son tanto la tasa de enfriamiento como el material precursor. Como se vio en la sección 1.2.2, hay una relación entre la textura que se forma en un fundido y su tasa de enfriamiento, por ello, se hicieron experimentos con distintas tasas de enfriamiento como se ve en la Tabla 3.1. Además, el material precursor es de suma importancia para lograr reproducir la morfología y texturas deseadas, razón por la cual en la sección 2.4 se investigó el posible material precursor de los condros y su posible proporción.

3.1. Parámetros físicos experimentales

Todos los experimentos se hicieron a presión atmosférica (0.76 atm), a una temperatura inicial de 19 ± 1 °C, con una emisividad de 80 %, a una frecuencia de 20 kHz y una potencia máxima (P_{max}) de 51.74 W. Tomando en cuenta que la potencia máxima P_{max} y el radio del haz del láser ($R= 0.175$ cm) fueron los mismos en todos

los experimentos, la intensidad de energía está dada por la ecuación 3.1:

$$I = \frac{P_{max}}{A} = \frac{51.74W}{\pi(0.175cm)^2} = 537.77 W/cm^2 \quad (3.1)$$

donde I es la intensidad, P_{max} es la potencia máxima, y A es el área de irradiación. Teniendo la intensidad se puede obtener la densidad de energía recibida por los análogos de cada corrida experimental mediante la ecuación 3.2:

$$\sigma_e = I \times t_f \quad (3.2)$$

donde σ_e es la densidad de energía recibida por los análogos de cada corrida y t_f es el tiempo total de irradiación.

Los parámetros experimentales para cada corrida se muestran en la Tabla 3.1. Se experimentó en distintas combinaciones del material precursor como se ve en la siguiente sección, se utilizaron dos perfiles de irradiación (véase sección 2.3) predichos por los modelos de onda de choque y se variaron las tasas de enfriamiento para cada perfil de irradiación. Las tasas de enfriamiento (τ_e) fueron calculadas como se mostró en la sección 2.3 según el perfil utilizado, estas varían debido a que la temperatura máxima (T_{max}) no es la misma para cada muestra. La T_{max} depende tanto del tipo de combinación del material precursor como de su masa. La longitud de onda en la que el análogo emite la mayor parte de la energía al momento de alcanzar una T_{max} fue calculada a partir de la ley de desplazamiento de Wien suponiendo que emiten como cuerpo negro. La nomenclatura con la que se nombró a los análogos de condros tiene que ver con el numero de experimento y la posición de la casilla en donde se colocó el material precursor para dicho análogo. Por ejemplo, el análogo EXP1 2-2 pertenece al experimento 1 y se colocó en la posición 2,2 del portamuestras (en donde las posiciones del portamuestras de 36 depresiones se nombran como si fuera una matriz de 6x6).

Tabla 3.1: Parámetros de las corridas experimentales

#	Corrida	Perfil	τ_c °(C/h)	t_c (s)	t_f (s)	P_{avg} (W)	I_{avg} W/cm ²	σ_e J/cm ²
1		I	$\approx 10^3$	600	4,000	51.74	537.77	2.15×10^6
2		II	$\approx 10^3$	600	4,000	51.74	537.77	2.15×10^6
3		I	$\approx 10^4$	600	972	51.74	537.77	5.23×10^5
4		II	$\approx 10^4$	600	972	51.74	537.77	5.23×10^5
5		II	$\approx 5 \times 10^3$	600	1,296	51.74	537.77	6.97×10^5

3.2. Propiedades físicas de los fundidos tipo condro

Las propiedades físicas de los análogos de condros se muestran en la Tabla 3.3. Las masas iniciales (m_i) de cada muestra se encuentran entre 1.2mg y 6.2 mg, se seleccionó este intervalo de masas por que es en el cual el material precursor funde casi en su totalidad, ya que para masas mayores a 6.2 mg se tiene un exceso de granos relictos sin fundir. Los análogos se pesaron después de haber sido irradiados (m_f) por lo que se pudo calcular su pérdida de masa (m_{lost}), la cual se encuentra entre 0 y 45.95 %. Además, en la Tabla 3.3 se muestra el número de corrida experimental (#), la composición del material precursor de cada análogo (composición %wt), la temperatura máxima a la que llegó cada análogo (T_{max}), su tasa de enfriamiento (τ_c) y la longitud de onda en la que emite el análogo (λ).

Como se vio en la sección 2.4, el olivino es el mineral precursor que domina en todas las muestras (55 - 83 %wt), seguido de los piroxenos (0 - 29 %wt) y los feldespatos (0 - 28 %wt), mientras que la espinela se encuentra en muy pequeñas cantidades (0 - 9 %wt). Las distintas combinaciones del material precursor y el número de cada combinación se muestran en la tabla 3.2, donde Ol= olivino, Px= piroxeno; enstatita (En) o diópsida (Di), Fto= Feldespato; anortita (An), labradorita (La), oligoclasa (Oc) y sodalita (So) y Sp= espinela.

Tabla 3.2: Combinaciones del material precursor

# Combinación	1	2	3	4	5
	Ol + Px + plagio + Sp	Ol + Px + plagio	Ol + plagio + Sp	Ol + plagio	Ol + Px
A	Ol + Di + La + Sp	Ol + Di + La	Ol + La + Sp	Ol + La	Ol + Di
B	Ol + Di + An + Sp	Ol + Di + An	Ol + An + Sp	Ol + An	Ol + En
C	Ol + Di + Oc + Sp	Ol + Di + Oc	Ol + Oc + Sp	Ol + Oc	
D	Ol + Di + So + Sp	Ol + Di + So	Ol + So + Sp	Ol + So	
E	Ol + En + La + Sp	Ol + En + La			
F	Ol + En + An + Sp	Ol + En + An			
G	Ol + En + Oc + Sp	Ol + En + Oc			
H	Ol + En + So + Sp	Ol + En + So			

Tabla 3.3: Condiciones de fusión de los análogos

# Muestra	m_i	m_f	m_{lost}	Composición (%wt)				T_{max}	τ_c	λ
	(mg)	(mg)	%	Ol	Px	Fto	Sp	(°C)	(°C/h)	(μm)
EXP7 1-4	2.7	2.4	11.11	66.7	18.5 Di	11.1 La	3.7	1,339.04	8.05×10^2	1.80
EXP7 2-4	3.2	2.4	25	68.8	18.8 En	9.4 La	3.1	1,905.54	1.15×10^3	1.33
EXP7 1-2	3.7	2.0	45.95	59.5	24.3 Di	13.5 An	2.7	1,182.53	7.11×10^2	1.99
EXP7 2-2	3.1	3.1	0	58.1	29 En	9.7 An	3.2	1,383.86	8.32×10^2	1.75
1 EXP7 3-1	3.8	3.8	0	57.9	18.4 En	23.7 Oc	0	1,736.99	1.4×10^3	1.44
EXP7 2-1	2.5	2.3	8	80	0	16 Oc	4	1,299.52	7.81×10^2	1.84
EXP7 3-2	2.4	-	-	75	12.5 Di	9.4 So	0	2,105.90	1.27×10^3	1.22
EXP7 3-3	3.5	3.5	0	71.4	14.3 En	11.4 So	2.9	1,894.22	1.14×10^3	1.34
EXP7 1-3	2.3	2.3	0	82.6	17.4 En	0	0	1,550.72	9.32×10^2	1.59

	EXP8 1-1	2.7	2.7	0	74.1	14.8	Di	7.4	La	3.7	889.88	6.25×10^2	2.49
	EXP8 2-1	2.3	1.9	17.39	73.9	13	En	8.7	La	4.3	1,426.99	1.19×10^3	1.70
	EXP8 2-2	2.6	2.3	11.54	57.7	19.2	Di	19.2	An	3.8	1,515.54	1.29×10^3	1.62
2	EXP8 3-2	2.6	2.6	0	65.4	23.1	En	7.7	An	3.8	1,405.3	1.17×10^3	1.73
	EXP8 1-2	2.7	2.5	7.41	66.7	22.2	En	7.4	Oc	3.7	1,747.95	1.53×10^3	1.43
	EXP8 1-3	2.3	1.9	17.39	73.9	17.4	Di	4.3	So	4.3	1,629.76	1.41×10^3	1.52
	EXP8 2-3	2.6	2.6	0	76.9	11.5	En	7.7	So	3.8	1,878.07	1.67×10^3	1.35
	EXP8 1-4	2	2	0	80	20	Di	0	0	0	1,729.76	1.51×10^3	1.45
<hr/>													
	EXP9 1-2	3.7	3	18.92	59.5	24.3	Di	13.5	An	2.7	2,242.41	2.5×10^4	1.15
	EXP9 2-2	3.1	-	-	58.1	29	En	9.7	An	3.2	2,036.75	1.83×10^4	1.25
3	EXP9 3-1	3.8	2.5	34.21	56.4	17.9	En	23.1	Oc	2.6	1,631.57	1.4×10^4	1.52
	EXP9 2-1	2.5	1.7	32	80	0	0	16	Oc	4	1,260.84	1.01×10^4	1.89
	EXP9 1-1	3.2	3.2	0	71.4	18.6	Di	7	Oc	0	1,106.51	8.49×10^4	2.10
<hr/>													
	EXP1 1-1	6.2	6.2	0	57.1	28.6	Di	11.4	La	2.9	1,302.41	1.06×10^4	1.84
	EXP1 2-1	4	4	0	59.1	27.3	Di	13.6	La	2.9	1,667.95	1.45×10^4	1.49
	EXP1 6-1	1.2	-	-	63.6	18.2	En	9.1	La	9.1	1,421.20	1.18×10^4	1.71
	EXP1 3-1	2	1.6	20	70	0	0	25	La	5	1,566.65	1.33×10^4	1.57
	EXP1 4-1	4	-	-	75	0	0	25	La	0	1,238.07	9.88×10^3	1.92
	EXP1 1-3	2.7	2.7	0	63.6	18.2	Di	18.2	An	0	1,216.87	9.65×10^3	1.94

4	EXP1 2-3	3	2.9	3.33	64	16 Di	16 An	4	1,294.46	1.05×10^4	1.85
	EXP1 5-3	4.3	3.6	16.28	70	15 En	15 An	0	1,038.43	7.78×10^3	2.21
	EXP1 6-3	3	2.7	10	70	15 En	10 An	5	1,029.64	7.68×10^3	2.22
	EXP1 3-3	2.5	2.5	0	80	0	20 An	0	1,471.20	1.23×10^4	1.66
	EXP1 4-3	2.5	2.4	4	76.2	0	19 An	4.8	1,193.49	9.41×10^3	1.98
	EXP1 2-2	5	-	-	71.9	12.5 Di	12.5 Oc	3.1	2,179.16	1.98×10^4	1.18
	EXP1 5-2	3.1	3.1	0	70	15 En	15 Oc	0	1,581.93	1.35×10^4	1.56
	EXP1 6-2	3.5	-	-	70	15 En	10 Oc	5	1,226.87	9.76×10^3	1.93
	EXP1 3-2	2.4	2.4	0	80	0	20 Oc	0	2,197.23	2.00×10^4	1.17
	EXP1 4-2	2.1	1.4	33.3	76.2	0	19 Oc	4.8	974.70	7.10×10^3	2.32
4	EXP3 1-1	2.7	2.3	14.81	77.8	14.8 Di	3.7 So	3.7	1,629.88	1.40×10^4	1.52
	EXP3 2-1	3.6	-	-	72.2	19.4 Di	8.3 So	0	1,668.92	1.44×10^4	1.49
	EXP3 2-2	3.5	3.5	0	69.3	19.2 En	7.7 So	3.8	1,498.31	1.26×10^4	1.64
	EXP3 1-2	2.7	2.7	0	86.4	0	13.6 So	0	1,421.20	1.18×10^4	1.71
	EXP4 1-3	3.9	3.8	2.56	67.5	17.5 Di	12.5 La	2.5	1,822.05	7.87×10^3	1.38
	EXP4 2-3	3.8	3.8	0	73.7	15.8	10.5 La	0	1,271.81	5.03×10^3	1.88
	EXP4 3-3	2.5	2.5	0	75	0	20.8 La	4.2	1,648.19	6.97×10^3	1.51
	EXP4 1-5	4.5	3.8	15.56	66.7	13.3 Di	17.8 An	2.2	1,299.88	5.17×10^3	1.84
	EXP4 2-5	3.9	3.3	15.38	74.4	12.8 Di	12.8 An	0	1,879.64	8.17×10^3	1.35

5	EXP5 1-2	3.3	-	-	81.8	0	18.2	An	0	1,821.84	8.46×10^3	1.38	
	EXP4 3-5	4.5	4.5	0	75.7	0	21.6	An	2.7	1,597.59	6.71×10^3	1.55	
	EXP5 3-1	3.5	3.3	5.71	57.1	14.3	En	28.6	An	0	1,648.19	7.49×10^3	1.58
	EXP5 2-1	3.5	2.9	17.41	60	20	En	17.1	An	2.9	1,560.24	6.52×10^3	1.58
	EXP4 1-4	4.1	3.2	21.95	63.4	24.4	Di	9.8	Oc	2.4	1,271.81	5.03×10^3	1.88
	EXP4 2-4	4	3.7	7.5	60	22.5	Di	17.5	Oc	0	1,391.40	7.12×10^3	1.49
	EXP4 3-4	3	1.8	40	66.7	0	30	Oc	3.3	1,421.81	5.80×10^3	1.71	
	EXP5 1-1	2.8	1.9	32.14	78.6	0	21.4	So	0	1,366.02	5.95×10^3	1.77	
5	EXP5 2-2	4.2	3	28.57	73.8	11.9	En	11.9	So	2.4	1,301.33	5.18×10^3	1.84
	EXP5 3-2	3.9	3.2	17.95	56.4	23.1	En	20.5	So	0	1,230.72	5.17×10^3	1.93

3.3. Experimentos realizados

Las corridas experimentales que muestra la Tabla 3.1 se describen con mayor detalle a continuación.

3.3.1. Corrida experimental 1

Los análogos de la corrida experimental 1 fueron fundidos con el perfil I a una tasa de enfriamiento que se encuentra alrededor de 10^3 °C/h, la tasa de enfriamiento cambia para cada muestra debido a que la temperatura es diferente según la composición de la muestra. El tiempo total de la duración de irradiación para estas muestras fue de 4,000 segundos, los primeros 600 s (10 min) son de calentamiento y el resto de enfriamiento.

3.3.2. Corrida experimental 2

Los análogos de la corrida experimental 2 fueron fundidos con el perfil II a una tasa de enfriamiento que se encuentra alrededor de 10^3 °C/h, la tasa de enfriamiento cambia para cada muestra debido a que la temperatura es diferente según la composición de la muestra. El tiempo total de la duración de irradiación para estas muestras fue de 4,000 segundos, los primeros 600 s (10 min) son de calentamiento y el resto de enfriamiento.

3.3.3. Corrida experimental 3

Los análogos de la corrida experimental 3 fueron fundidos con el perfil I a una tasa de enfriamiento que se encuentra alrededor de 10^4 °C/h, la tasa de enfriamiento cambia para cada muestra debido a que la temperatura es diferente según su composición. El tiempo total de la duración de irradiación para estas muestras fue de 972 segundos, los primeros 600 s (10 min) son de calentamiento y el resto de enfriamiento.

3.3.4. Corrida experimental 4

Los análogos de la corrida experimental 4 fueron fundidos con el perfil II a una tasa de enfriamiento que se encuentra alrededor de 10^4 °C/h, la tasa de enfriamiento cambia para cada muestra debido a que la temperatura es diferente según la composición de la muestra. El tiempo total de la duración de irradiación para estas muestras fue de 972 segundos, los primeros 600 s (10 min) son de calentamiento y el resto de enfriamiento.

3.3.5. Corrida experimental 5

Los análogos de la corrida experimental 5 fueron fundidos con el perfil II a una tasa de enfriamiento que se encuentra alrededor de 5×10^3 °C/h, la tasa de enfriamiento cambia para cada muestra debido a que la temperatura es diferente según la composición de la muestra. El tiempo total de la duración de irradiación para estas muestras fue de 1,248 s, los primeros 600 s (10 min) son de calentamiento y el resto de enfriamiento.

Capítulo 4

Resultados experimentales

4.1. Clasificación preliminar de texturas con microscopio óptico

En total se fundieron 57 muestras, todas ellas fueron analizadas con el microscopio estereoscópico. Los análogos representativos de cada corrida experimental (capítulo 3) se encuentran en este capítulo mientras que el resto de los análogos se encuentran en el apéndice A.

Corrida experimental 1

A continuación se describe la morfología y textura de los análogos de la corrida experimental 1. En las figuras 4.1 - 4.3 se muestra del lado izquierdo el análogo observado mediante un microscopio estereoscópico y del lado derecho la historia térmica correspondiente.

El análogo EXP7 3-1 (Figura 4.1) tiene una forma esférica que implica que el material precursor se fundió por completo, sin embargo quedaron algunos granos relictos sin fundir en la casilla. Presenta una textura barrada en el centro las cuales están agrupadas en 3 o 4 barras que se cruzan entre sí con otro conjunto de barras formando ángulos agudos ($<90^\circ$). Conforme nos alejamos del centro las barras desaparecen y la textura tiende a ser porfídica. La zona donde se encuentran las barras es de color

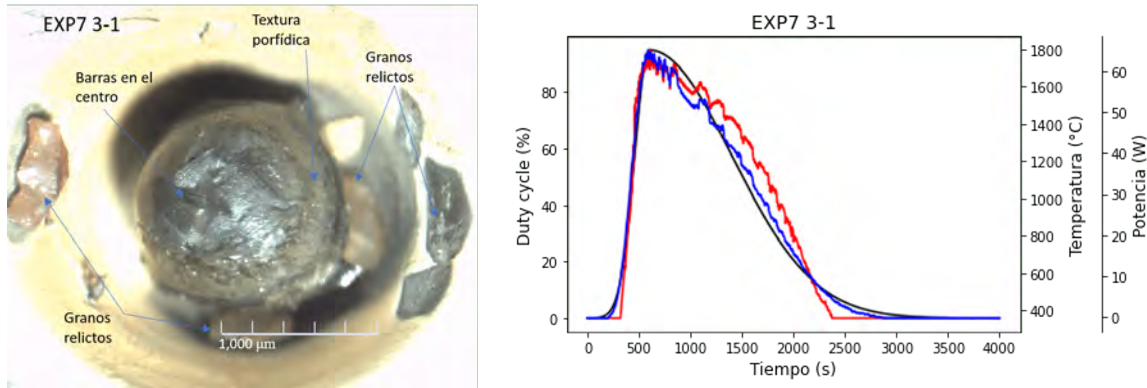


Figura 4.1: Análogo EXP7 3-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

oscuro, en donde terminan las barras parece haber un anillo color marrón oscuro con un ancho aproximado de $500 \mu\text{m}$ y después de ese anillo se aprecia un color marrón claro. La superficie se encuentra cubierta por una matriz opaca (entre vítrea con óxidos). Se observa que para el análogo EXP7 3-1 el perfil de temperatura y el perfil del duty cycle siguen la misma tendencia al comienzo de la irradiación, al llegar al pico la temperatura se encuentra ligeramente por debajo del duty cycle, después, entre 1,300 s y 2,100 s, el perfil de temperatura aumenta ligeramente. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

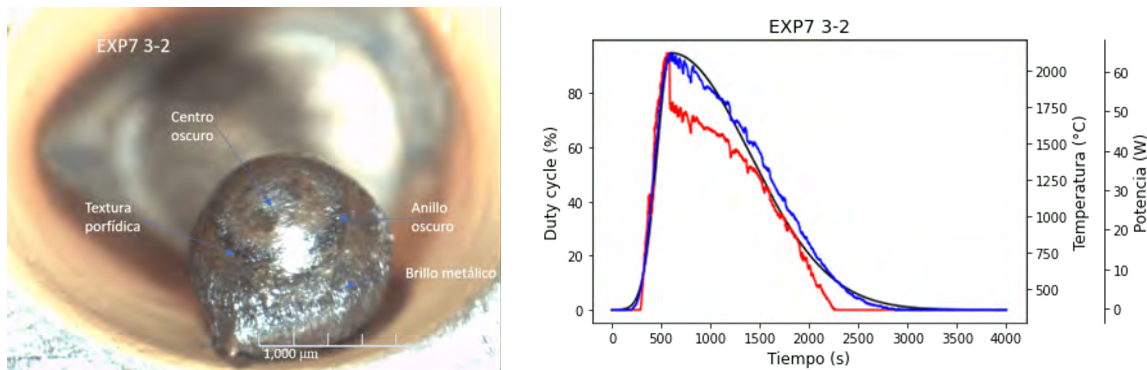


Figura 4.2: Análogo EXP7 3-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP7 3-2 (Figura 4.2) tiene una forma semi-esférica (parecido a una

gota). El material precursor fundió en su totalidad debido a que no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una textura porfídica en algunas zonas de su superficie, sin embargo, su coloración oscura no permite que con el microscopio estereoscópico se pueda hacer una clasificación textural acertada, por ello en la sección 4.2 se muestran los resultados con MEB . Al igual que el análogo EXP7 3-1, este análogo tiene cambios de color: en el centro se observa un círculo de color oscuro de aproximadamente 1 mm de radio, también se observa un anillo de tonalidad más oscura de $\approx 400 \mu\text{m}$, el resto del análogo es color marrón con una cobertura con brillo metálico y depósitos de óxidos. La superficie se encuentra cubierta por una matriz opaca. Se observa que para el análogo EXP7 3-2 el perfil de temperatura y el perfil del duty cycle siguen la misma tendencia al comienzo de la irradiación, sin embargo en cuanto se llega al pico la temperatura disminuye de $2,000 \text{ }^\circ\text{C}$ a $1,750 \text{ }^\circ\text{C}$ en un tiempo de aproximadamente 100 segundos. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

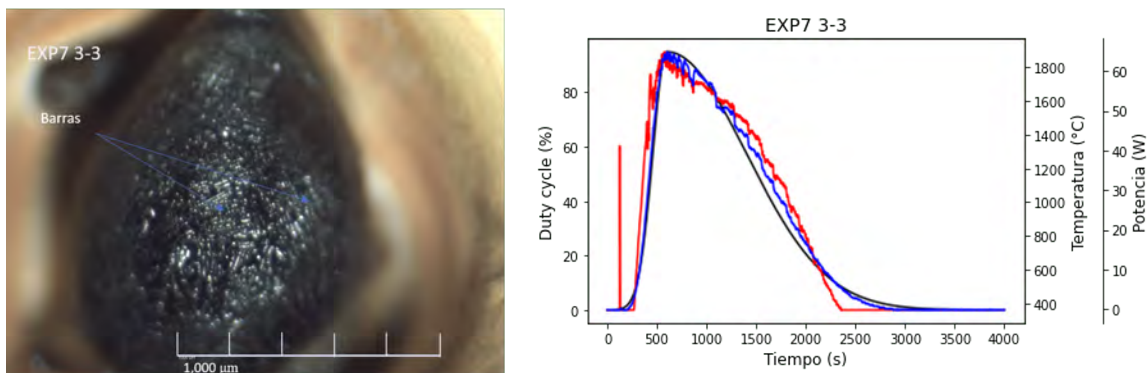


Figura 4.3: Análogo EXP7 3-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP7 3-3 (Figura 4.3) tiene una forma ovalada, el material precursor fundió en su totalidad debido a que no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con textura barrada en la parte central de su superficie. El análogo es color negro y la superficie se encuentra cubierta por una matriz opaca. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP7 3-3 siguen

la misma tendencia, con la diferencia de que el perfil de temperatura presenta un pico a los 100 segundos que llega hasta 1,400 °C y decae inmediatamente, tiene una ligera caída después del pico y un ligero aumento entre 1,200 y 2,000 °C. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

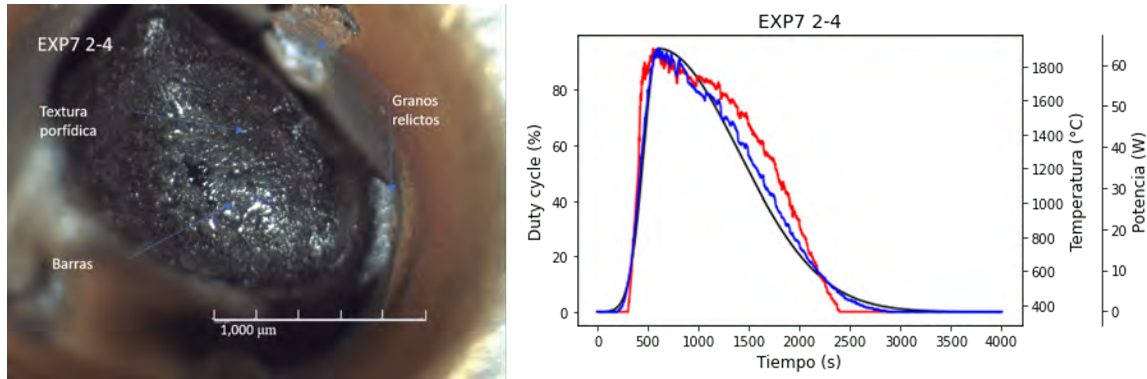


Figura 4.4: Análogo EXP7 2-4. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP7 2-4 (Figura 4.4) tiene una forma ovalada (similar al análogo EXP7 3-3), quedaron algunos granos relictos en la casilla. Presenta una textura en su mayoría porfídica, sin embargo, hay alguna zonas en las que parece tener barras. El análogo es color negro y la superficie se encuentra cubierta por una matriz opaca. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP7 2-4 siguen la misma tendencia, aunque el perfil de temperatura tiene una ligera caída después del pico y un ligero aumento entre 1,200 y 2,000 °C. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

Corrida experimental 2

A continuación se describe la morfología y textura de los análogos de la corrida experimental 2. En las figuras se muestra del lado izquierdo el análogo observado mediante un microscopio estereoscópico y del lado derecho la historia térmica correspondiente.

El análogo EXP8 2-2 (Figura 4.5) tiene una forma esférica lo que indica un fun-

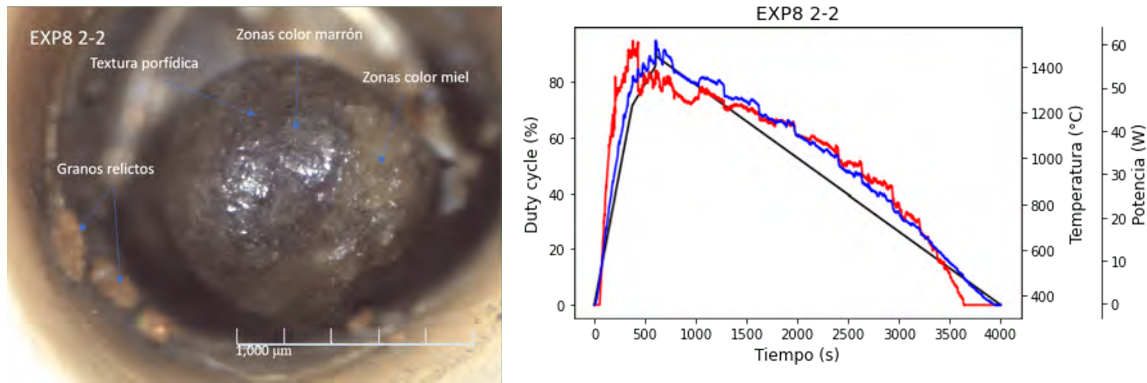


Figura 4.5: Análogo EXP8 2-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones del duty cycle (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

dido total, aún así quedaron algunos granos relictos pequeños pegados en la casilla. Presenta una textura porfídica en toda su superficie. El análogo tiene cambios de color, hay zonas más claras color miel (posiblemente se trata de olivino) y otras zonas más oscuras color marrón (posible se trata de piroxeno), por lo que su textura posiblemente se clasifica como POP. En la sección 4.2 se comentan los análisis realizados a esta muestra por medio de MEB. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP8 2-2 siguen la misma tendencia, con la diferencia de que el pico del perfil de temperatura se da antes de los 500 s, y el del duty cycle a los 600 s, además el perfil de temperatura tiene una ligera caída después del pico y un ligero aumento entre 1,500 y 3,000 °C. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

El análogo EXP8 2-3 (Figura 4.6) tiene una forma ovalada, lo que indica un fundido total ya que sólo tiene un grano relictos en la casilla. Presenta una textura barrada en el centro y conforme nos alejamos hacia las orillas parece ser que la textura es porfídica. En la transición de texturas de barrada a porfídica se aprecia un anillo más oscuro de un ancho aproximado de 500 μm . El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP8 2-3 siguen la misma tendencia, con la diferencia de que el pico del perfil de temperatura se da antes de los 500 s, y el del duty cycle a los 600 s, además el perfil de temperatura decae de 1,800 °C a 1,500 °C alrededor de

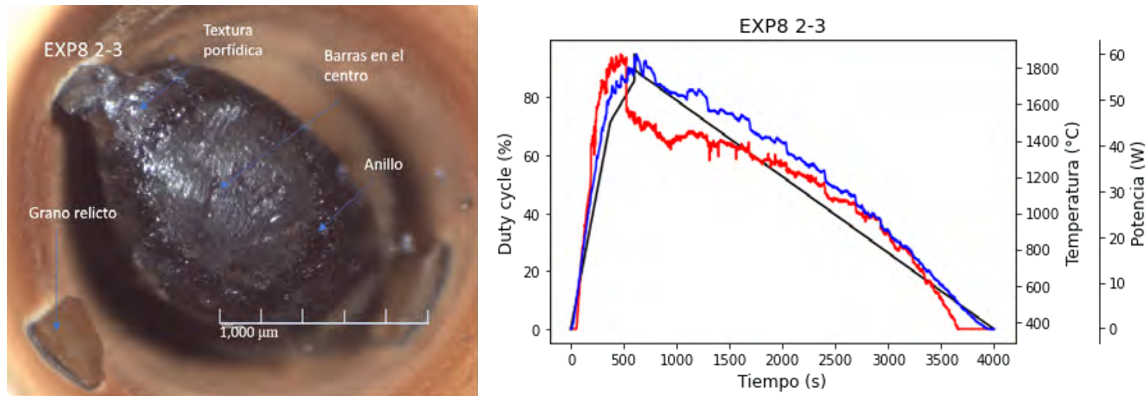


Figura 4.6: Análogo EXP8 2-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones del duty cycle (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

los 500 s, luego tiene un ligero aumento entre 2,000 y 3,300 °C. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

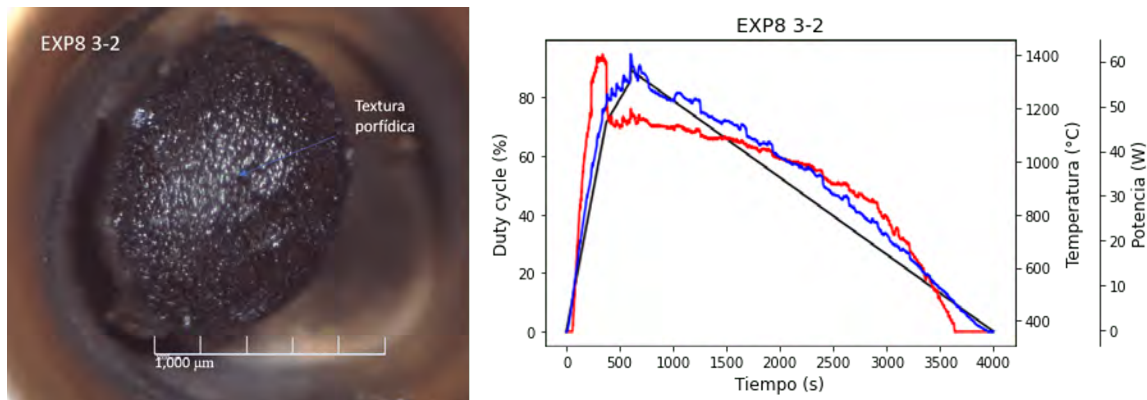


Figura 4.7: Análogo EXP8 3-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones del duty cycle (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP8 3-2 (Figura 4.7) tiene una forma ovalada, el material precursor fundió en su totalidad ya que no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una textura porfídica en toda la superficie y un color negro uniforme. La superficie se encuentra cubierta por una matriz opaca. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP8 3-2 siguen la misma tendencia, con la diferencia de que el pico del perfil de temperatura se da antes de los 500 s, y el del duty cycle a los 600

s, además el perfil de temperatura decae de 1,400 °C a 1,200 °C alrededor de los 500 s, luego el perfil de temperatura sufre un ligero aumento entre 1,400 s y 3,400 s. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

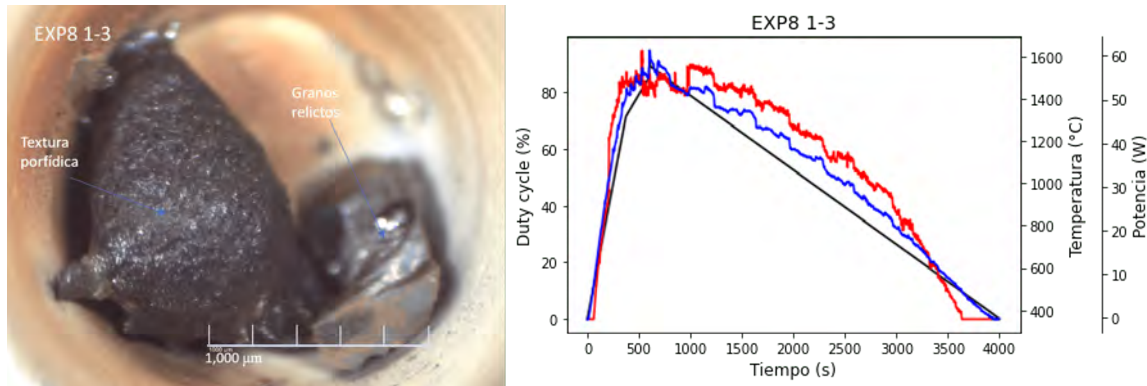


Figura 4.8: Análogo EXP8 1-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones del duty cycle (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP8 1-3 (Figura 4.8) no tiene una forma esférica, quedaron granos relictos en la casilla debido a que el material precursor no fundió en su totalidad. Presenta una textura porfídica en toda la superficie y un color negro uniforme. La superficie se encuentra cubierta por una matriz opaca. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP8 3-2 siguen la misma tendencia a excepción de la región de enfriamiento, ya que el perfil de temperatura se encuentra por encima del perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

Corrida experimental 3

A continuación se describe la morfología y textura de los análogos de la corrida experimental 3. En las figuras 4.9-4.13 se muestra del lado izquierdo el análogo observado mediante un microscopio estereoscópico y del lado derecho la historia térmica correspondiente.

El análogo EXP9 1-1 (Figura 4.9) tiene una forma esférica, la mayor parte del análogo se encuentra parcialmente fundido, quedaron dos granos relictos en la casilla.

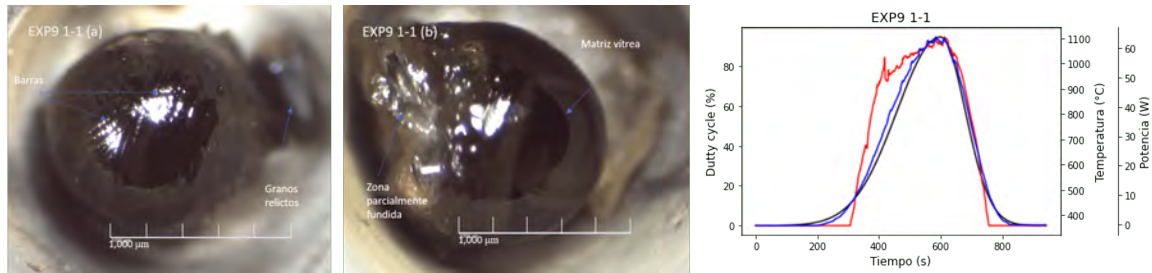


Figura 4.9: Análogo EXP9 1-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

En la zona fundida presenta una morfología dendrítica con barras embebidas en una mesostasis vítrea mientras que otra zona del análogo es completamente vítrea. El hecho de que este análogo se encuentre parcialmente fundido puede deberse a que la T_{max} fue de 1,106 °C. Tanto el perfil de temperatura como el perfil de potencia del análogo EXP9 1-1 siguen la misma tendencia que el perfil del duty cycle con la diferencia de que el perfil de temperatura se encuentra ligeramente por encima en la etapa de calentamiento.

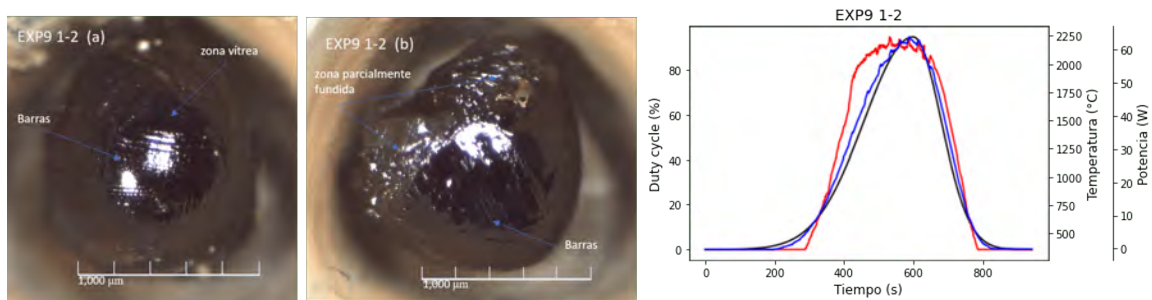


Figura 4.10: Análogo EXP9 1-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP9 1-2 (Figura 4.10) tiene una forma semi-esférica y no quedaron granos relictos en la casilla. Parte de su superficie muestra una morfología dendrítica con textura barrada, mientras que la otra parte se encuentra parcialmente fundida, la superficie se encuentra cubierta por una matriz de vidrio. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP9 1-2 siguen la misma tendencia, el perfil

de temperatura se encuentra ligeramente por encima del perfil del duty cycle entre 400 s y 550 s.

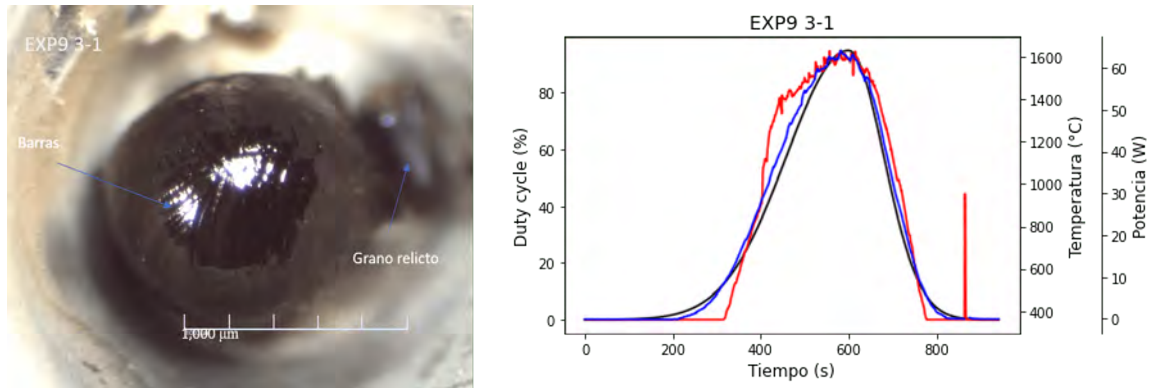


Figura 4.11: Análogo EXP9 3-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP9 3-1 (Figura 4.11) tiene una forma esférica, el material precursor fundió casi en su totalidad ya que sólo hay un grano relicto en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con grupos de barras que se cruzan entre sí. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP9 3-1 siguen la misma tendencia, con la diferencia de que a los 300 s el perfil de temperatura está por debajo del perfil del duty cycle y entre 400 s y 500 s está ligeramente por encima. También presenta un pico antes de finalizar la irradiación debido probablemente a un error de medición (pico erróneo).

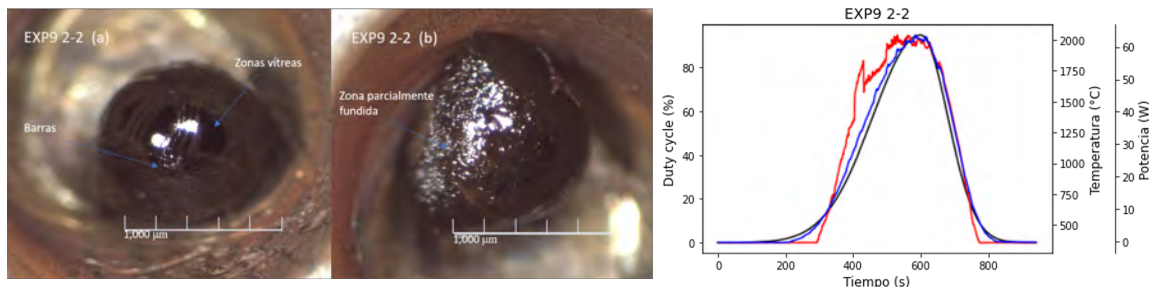


Figura 4.12: Análogo EXP9 2-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP9 2-2 (Figura 4.12) no tiene una forma esférica debido a que el material está parcialmente fundido, no quedaron granos relictos en la casilla. Se tomaron dos imágenes de este análogo, la imagen (a) representa la zona del análogo que estaba siendo irradiada directamente por el láser, ésta presenta una textura barrada embebida en una mesostasis vítrea. La imagen (b) es la zona del análogo a la que no le pegaba el láser directamente, esta zona se encuentra parcialmente fundida. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP9 2-2 siguen la misma tendencia, con la diferencia de que entre 400 y 500 el perfil de temperatura está por ligeramente por encima del perfil del duty cycle, y un poco después de los 400s se observa un pico que va de los 1,600 °C a más de 1,750 °C en cuestión de segundos.

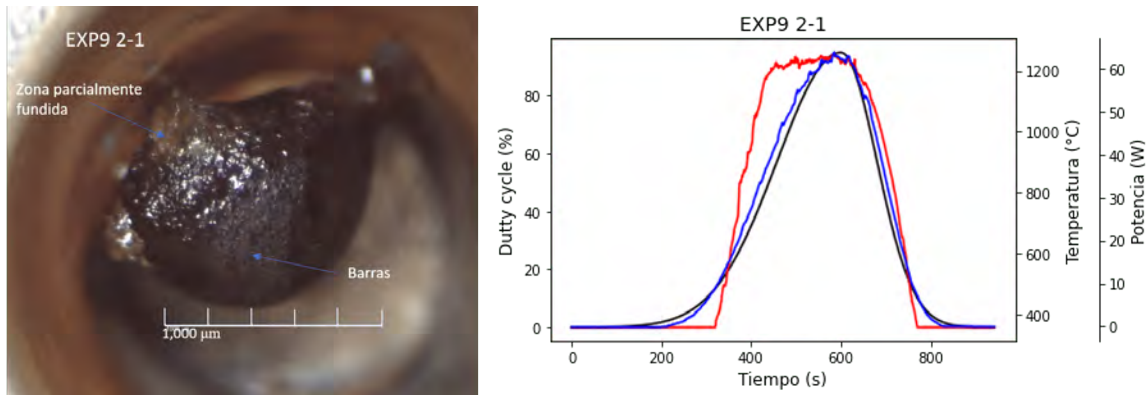


Figura 4.13: Análogo EXP9 2-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP9 2-1 (Figura 4.13) no tiene forma esférica, se encuentra parcialmente fundido y no quedaron granos relictos en la casilla. La zona fundida presenta una textura barrada. Por el color del análogo y de la casilla parece ser que parte del material se oxidó y se depositó sobre la superficie del análogo y en la casilla. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP9 2-1 siguen la misma tendencia, con la diferencia de que entre 400 y 500 el perfil de temperatura está por ligeramente por encima del perfil del duty cycle, la temperatura máxima que alcanzó el análogo durante la irradiación fue de 1,200 °C, la cual está por debajo de T_{liq} .

Corrida experimental 4

A continuación se describe la morfología y textura de los análogos de la corrida experimental 4. En las figuras 4.14 - 4.23, se muestra del lado izquierdo el análogo observado mediante un microscopio estereoscópico y del lado derecho la historia térmica correspondiente.

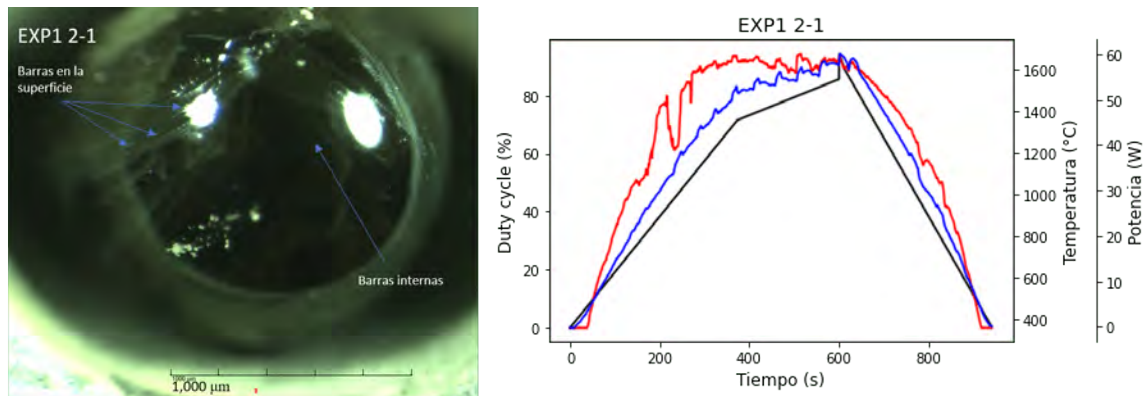


Figura 4.14: Análogo EXP1 2-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 2-1 (Figura 4.14) tiene una forma esférica, el material precursor fundió en su totalidad debido a que no quedaron granos relictos en la casilla. Una parte del análogo muestra una morfología dendrítica, por la forma elongada de las barras este análogo se puede clasificar como RP, ya que éstas tienen forma de abanico. Más de la mitad del análogo no presenta textura y es vítrea, por lo que esa zona podría clasificarse como criptocristalina (CC). El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 2-1 difieren considerablemente ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura, además la temperatura decae de 1,400 °C a 1,250 °C a un tiempo aproximado de 250 segundos. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

El análogo EXP1 2-2 (Figura 4.15) tiene una forma esférica, el material precursor fundió en su totalidad debido a que no quedaron granos relictos en la casilla. Tiene una morfología dendrítica con una textura barrada sobre toda la superficie, sin embargo,

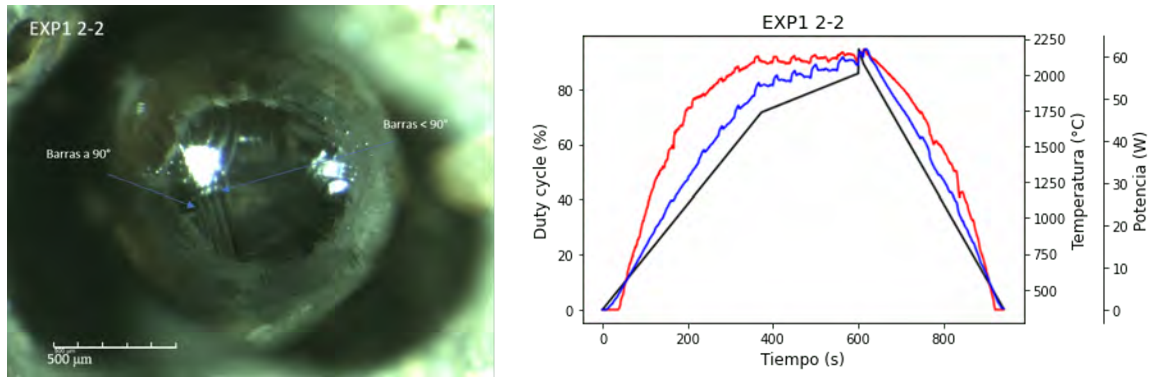


Figura 4.15: Análogo EXP1 2-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

la textura no representa barras largas que se extienden sobre toda la superficie, sino que estas barras tienden a formar grupos de 3 o 4 barras que se cruzan entre sí con otro conjunto de barras formando ángulos rectos (90°) o agudos ($<90^\circ$). Por la forma de sus barras este análogo se clasifica como BO. La superficie se encuentra cubierta por una mesostasis vítrea. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 2-2 difieren considerablemente ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura, al igual que en el análogo EXP1 2-1. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

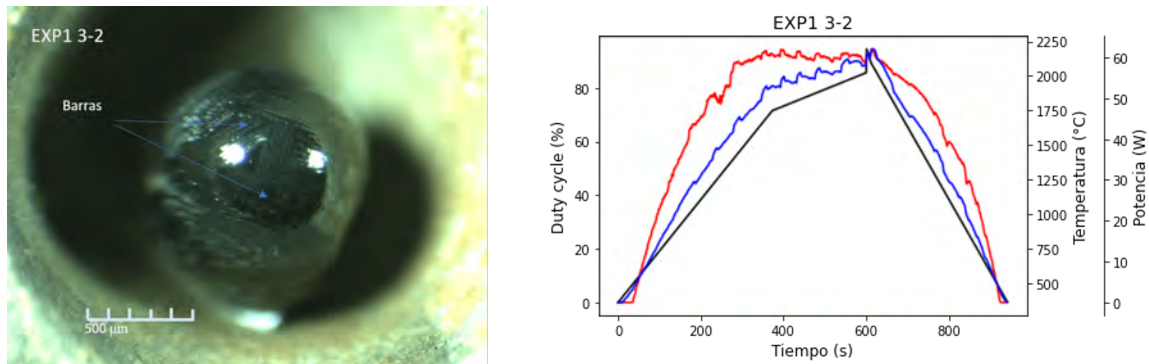


Figura 4.16: Análogo EXP1 3-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 3-2 (Figura 4.16) tiene una forma esférica, el material precursor fundió en su totalidad debido a que no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con grupos de barras que se cruzan entre sí formando ángulos agudos. Este análogo es muy similar al análogo EXP1 2-2, por lo que también se clasifica como BO. El perfil de temperatura para el análogo EXP1 2-3 se encuentra por encima del perfil de potencia y del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura.

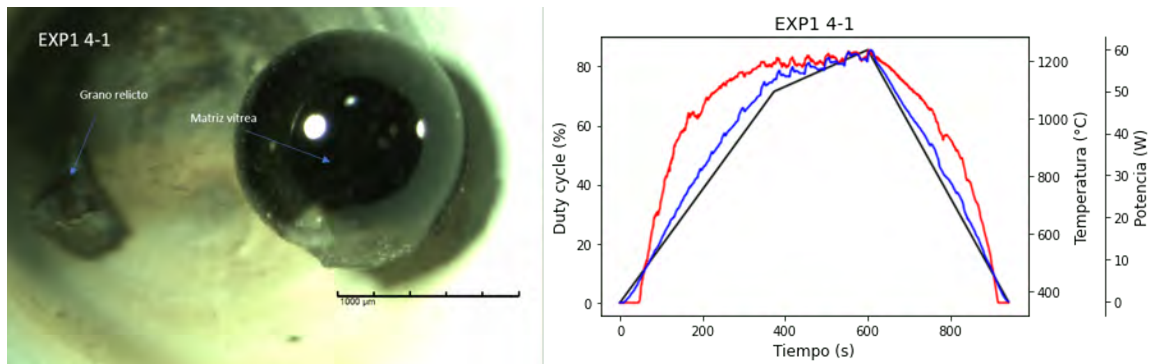


Figura 4.17: Análogo EXP1 4-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 4-1 (Figura 4.17) tiene una forma esférica lo que implica que el material precursor se fundió por completo, sin embargo quedó un grano relicto sin fundir en la casilla. Este análogo presenta una superficie con una mesostasis vítrea, por lo que se puede clasificar como CC, ya que todo el análogo es vítreo. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

El análogo EXP1 6-1 (Figura 4.18) tiene una forma esférica lo que implica que el material precursor se fundió por completo, no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una superficie con cristales pequeños en una mesostasis vítrea, por lo que se puede clasificar como CC, además parece tener pequeñas burbujas. Este análogo se analizó con el MEB para conocer con mayor detalle su morfología. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 6-1 difieren considerablemente ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura, al

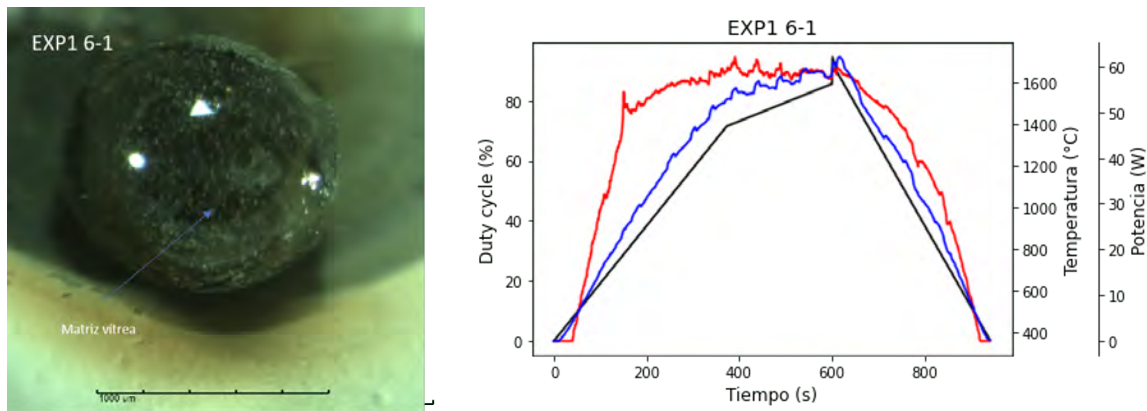


Figura 4.18: Análogo EXP1 6-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

igual que los dos análogos anteriores. Sin embargo, este perfil tiene picos pronunciados alrededor de 170 s, 290 s y otros dos picos entre 400 s y 500 s. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

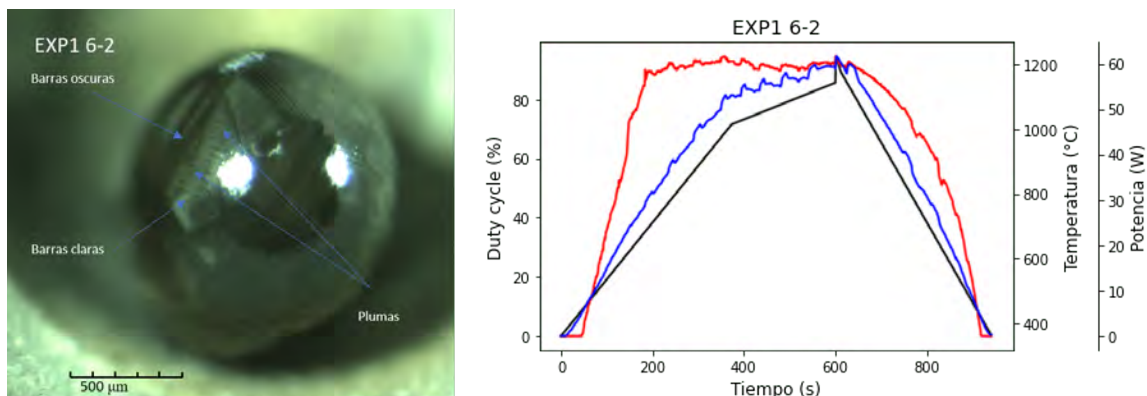


Figura 4.19: Análogo EXP1 6-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 6-2 (Figura 4.19) tiene una forma esférica que implica que el material precursor se fundió por completo. Se aprecian barras oscuras (posiblemente de olivino) y otras barras más claras y delgadas (podrían ser de piroxeno). Por la forma en la que están organizadas las barras se podría decir que este análogo tiene una morfología plumosa, es decir, que a partir de las fibras dendríticas elongadas

crecen fibras muy finas, además se encuentra dentro de una matriz de vidrio. analizó con el MEB y se discutirá en la sección 4.2. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 6-2 difieren considerablemente ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura (al igual que los anteriores). El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

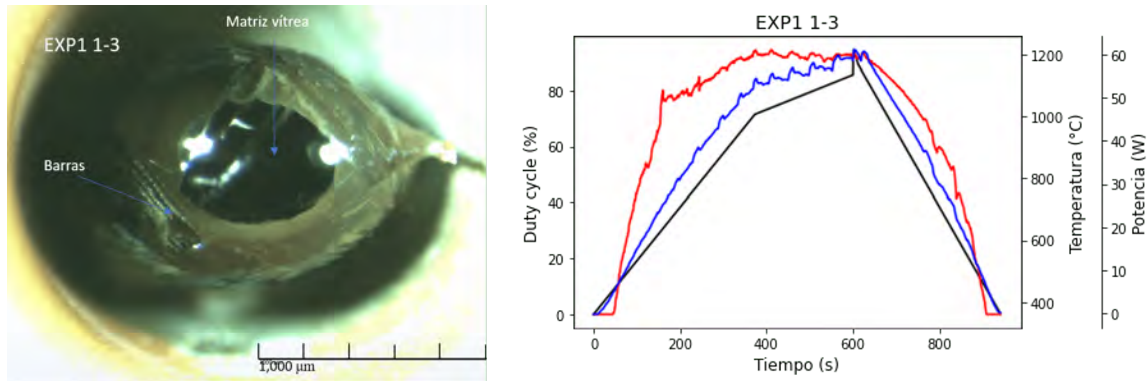


Figura 4.20: Análogo EXP1 1-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 1-3 (Figura 4.20) tiene una forma semi-esférica, el material se fundió completamente debido a que no quedaron granos relictos en la casilla. La mayor parte del análogo presenta una textura CC, sin embargo se formaron barras en las orillas. Por la distribución de colores se podría decir que este análogo presenta forma de ojo (color negro en la zona central y color miel en las orillas). El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 3-1 difieren considerablemente ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

El análogo EXP3 1-1 (Figura 4.21) tiene una forma semi-esférica, el material precursor fundió en su totalidad debido a que no quedaron granos relictos en la casilla. Se presenta una morfología dendrítica con grupos de barras embebidas en una mesostasis vítrea. El centro del análogo tiene un color oscuro que va cambiando a

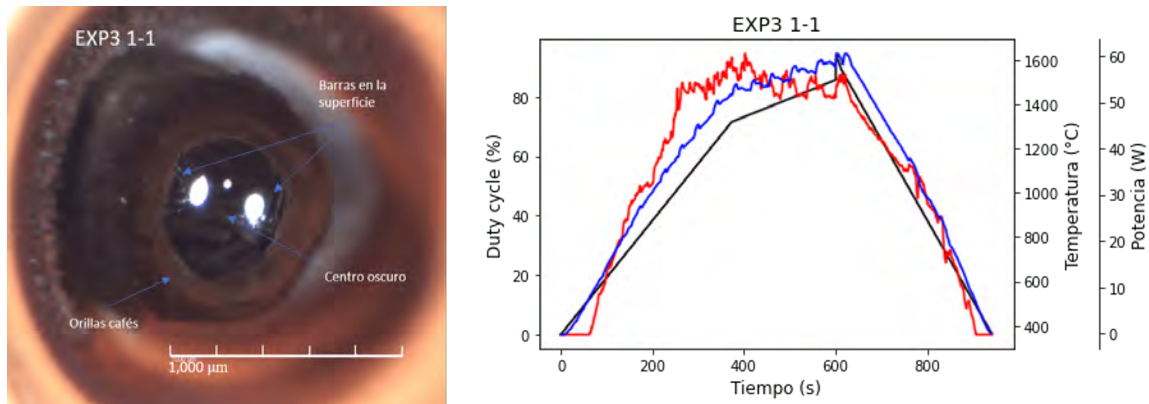


Figura 4.21: Análogo EXP3 1-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

color marrón conforme alcanza las orillas (forma de ojo). El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP3 1-1 difieren considerablemente antes del pico en 600 s, con subidas y bajadas entre 400 s y 600 s. Durante la etapa de enfriamiento ambos perfiles siguen la misma tendencia. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

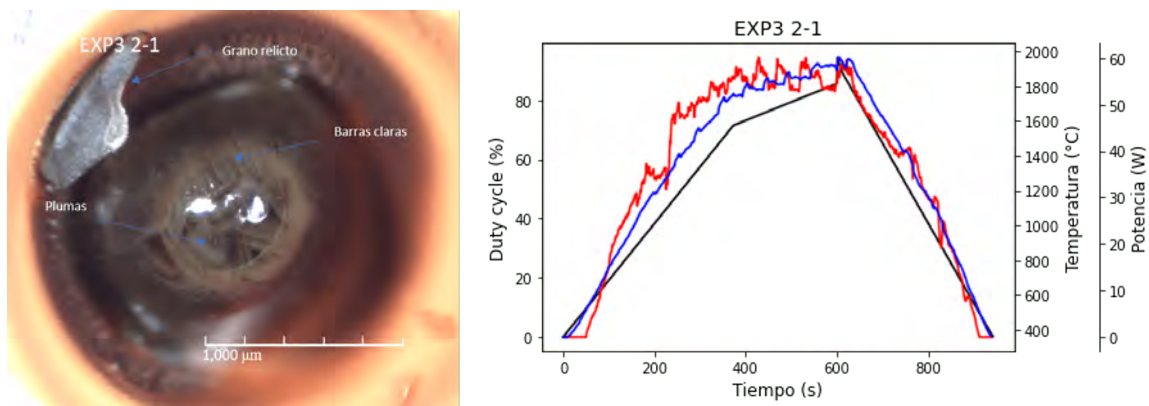


Figura 4.22: Análogo EXP3 2-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP3 2-1 (Figura 4.22) tiene una forma semi-esférica, el material precursor fundió casi su totalidad debido a que sólo quedó un grano relicto en la casilla. Presenta una morfología plumosa (similar al análogo EXP1 6-2), sólo que el orde-

namiento de las barras no está bien definido. El color tanto de las barras como del análogo es claro. Se encuentra dentro de una matriz de vidrio. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 2-1 difieren considerablemente antes del pico 600 s, alrededor de los 230 s hay un aumento drástico en el perfil de temperatura, de 1,200 °C a 1600 °C, después el perfil presenta subidas y bajadas ligeramente pronunciadas entre los 400 s y 600 s, después de los 600 s. Durante la etapa de enfriamiento ambos perfiles siguen la misma tendencia. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

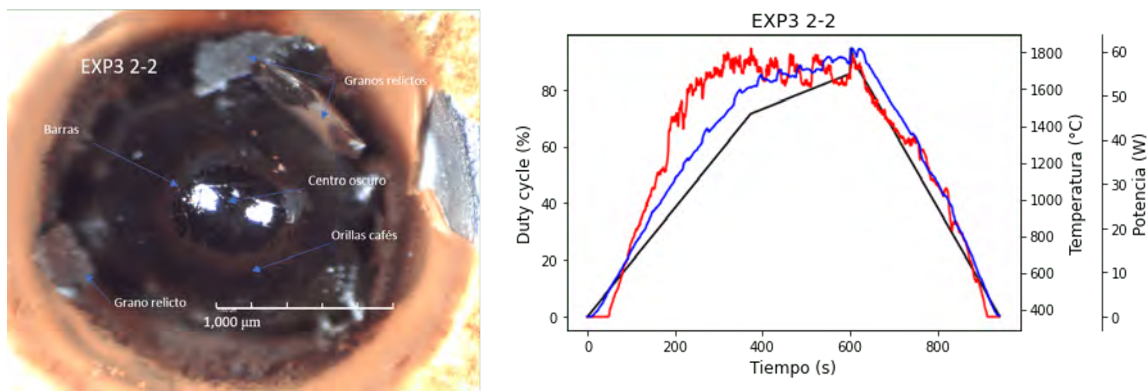


Figura 4.23: Análogo EXP3 2-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP3 2-2 (Figura 4.23) tiene una forma semi-esférica lo que implica que el material precursor se fundió por completo, sin embargo quedaron dos granos relictos sin fundir en la parte superior de la casilla. Se pueden apreciar barras elongadas en forma de abanico características de una textura RP, ya que las barras no se ven de manera organizada y algunas de ellas parecen converger en ciertos puntos. El análogo parece estar pegado a la casilla, ya que, a diferencia de los experimentos anteriores no se distingue la curvatura de la muestra con respecto a donde comienza la casilla. Se encuentra dentro de una matriz de vidrio. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 2-2 difieren considerablemente antes del pico de temperatura del perfil del duty cycle (600 s), alrededor de los 200 s hay un aumento drástico en el perfil de temperatura, de 1,200 °C a 1600 °C, después el perfil presenta

subidas y bajadas ligeramente pronunciadas entre los 400 s y 600 s, después de los 600 s. Durante la etapa de enfriamiento ambos perfiles siguen la misma tendencia. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

Corrida experimental 5

A continuación se describe la morfología y textura de los análogos de la corrida experimental 5. En las figuras 4.24 - 4.30, se muestra del lado izquierdo el análogo observado mediante un microscopio estereoscópico y del lado derecho la historia térmica correspondiente.

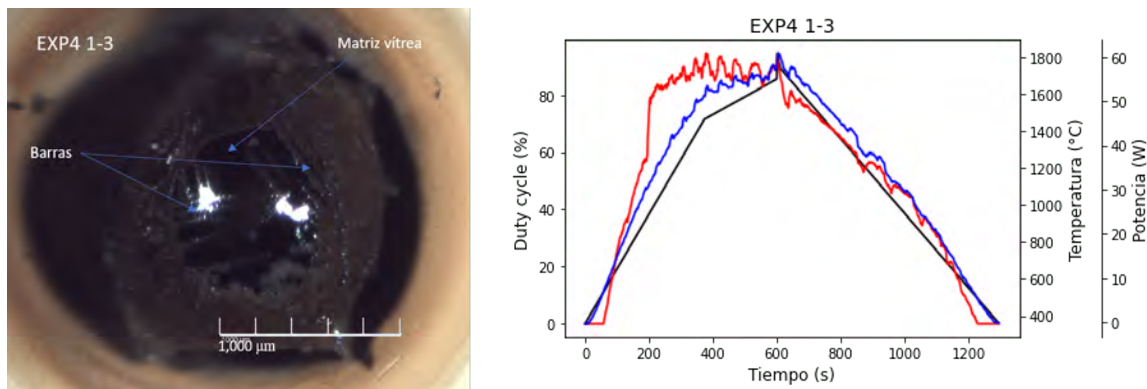


Figura 4.24: Análogo EXP4 1-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP4 1-3 tiene una forma esférica, se encuentra completamente fundido y no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con barras embebidas en una mesostasis vítrea y algunas zonas vítreas. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP4 1-3 difieren considerablemente antes del pico de temperatura del perfil del duty cycle (600 s), alrededor de los 200 s hay un aumento drástico en el perfil de temperatura, de 1,200 °C a 1,600 °C, después el perfil presenta subidas y bajadas ligeramente pronunciadas entre los 400 s y 600 s. Durante la etapa de enfriamiento ambos perfiles siguen la misma tendencia. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

El análogo EXP4 1-4 tiene una forma semi-esférica, está completamente fundido

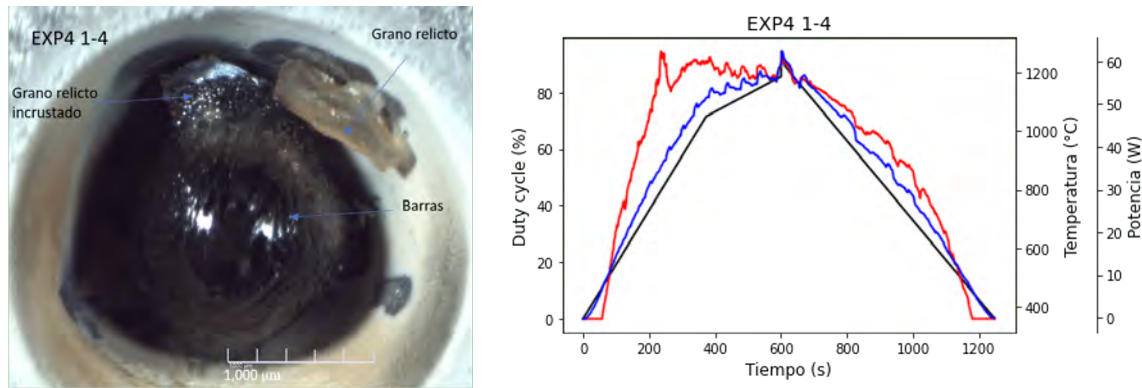


Figura 4.25: Análogo EXP4 1-4. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

sin embargo hay una zona parcialmente fundida que tiene un grano relicto incrustado y además quedó otro grano relicto en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con barras elongadas embebidas en una mesostasis vítrea. Por la forma de sus barras, este análogo se puede clasificar como RP. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP4 1-4 difieren considerablemente en la etapa de calentamiento ya que el perfil de temperatura se encuentra por encima del perfil de duty cycle y presenta un pico a los 200 s. Durante el enfriamiento ambos perfiles siguen la misma tendencia. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

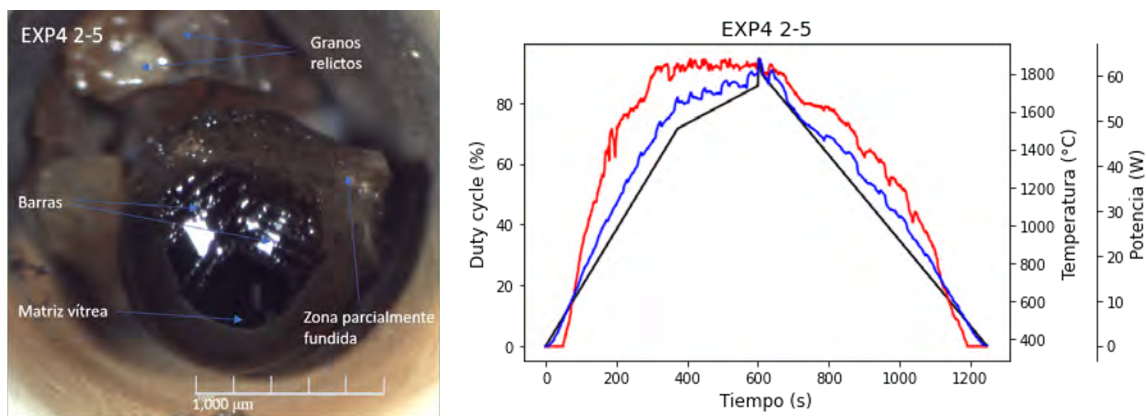


Figura 4.26: Análogo EXP4 2-5. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP4 2-5 tiene una forma semi-esférica debido a que se encuentra parcialmente fundido, además quedaron varios granos relictos en la casilla. La zona fundida es en su mayoría vítrea, sin embargo, también se formaron algunas barras sobre la superficie. En la zona parcialmente fundida se aprecian granos relictos embebidos en la superficie del análogo. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP4 2-5 difieren tanto en la etapa de calentamiento como en la de enfriamiento ya que el perfil de temperatura se encuentra por encima del perfil de duty cycle. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

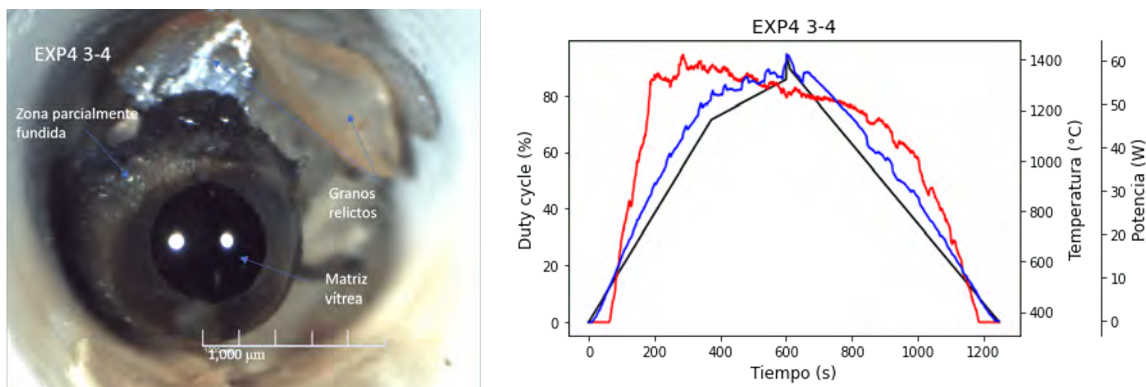


Figura 4.27: Análogo EXP4 3-4. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP4 3-4 tiene una forma semi-esférica, la mayor parte del análogo se encuentra completamente fundida mientras que una pequeña zona se encuentra parcialmente fundida, además quedaron algunos granos relictos en la casilla. La superficie de este análogo presenta una mesostasis vítrea, por lo que puede clasificarse como CC. Por la distribución de colores parece tener forma de ojo. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP4 3-4 difieren tanto en la etapa de calentamiento como en la enfriamiento ya que el perfil de temperatura se encuentra por encima del perfil de duty cycle presentado el pico de temperatura alrededor de los 300 s. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

El análogo EXP5 1-2 (Figura 4.28) tiene una forma esférica, se fundió completamente y quedó un grano relicto en la casilla. Se formaron algunas barras en la

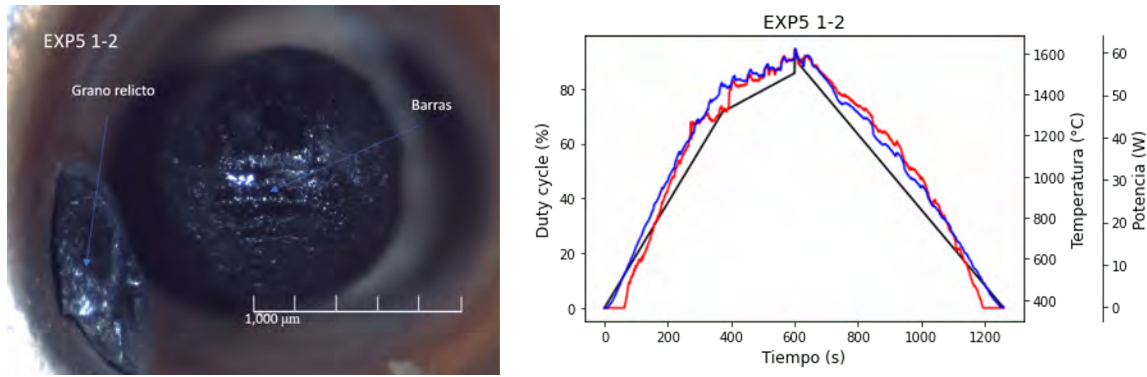


Figura 4.28: Análogo EXP5 1-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

superficie, sin embargo la mayoría de la superficie tiene una textura que no se logra apreciar con detalle por el color negro de la muestra. Por lo tanto, en la sección 4.2 se describe en detalle su morfología y textura. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP5 1-2 siguen la misma tendencia, el perfil de temperatura se encuentra ligeramente por encima del perfil del duty cycle durante toda la irradiación. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

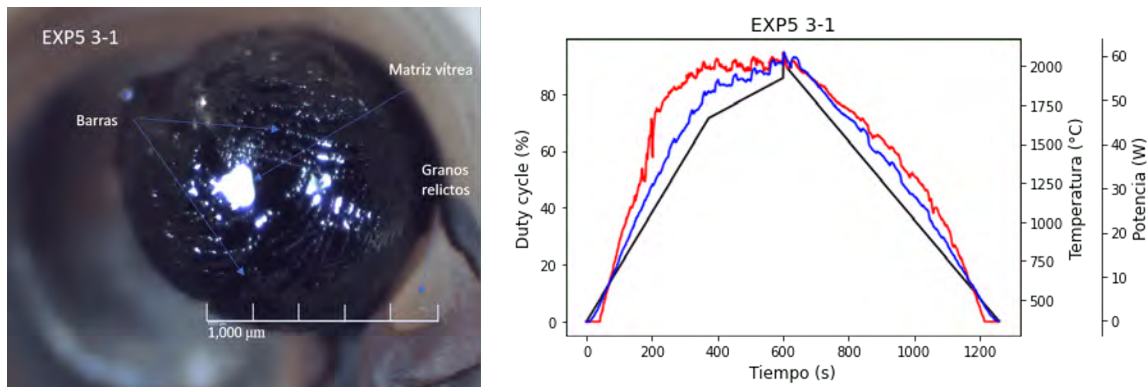


Figura 4.29: Análogo EXP5 3-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP5 3-1 (Figura 4.29) tiene un forma esférica, el material precursor se fundió completamente ya que no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una morfología dendrítica categorizada como de cola de golondrina (swallowtail) por

la forma de las barras. Las barras se encuentran embebidas en una mesostasis vítrea. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP5 3-1 difieren ya que el perfil de temperatura se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se logran marcar los cambios de pendiente. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

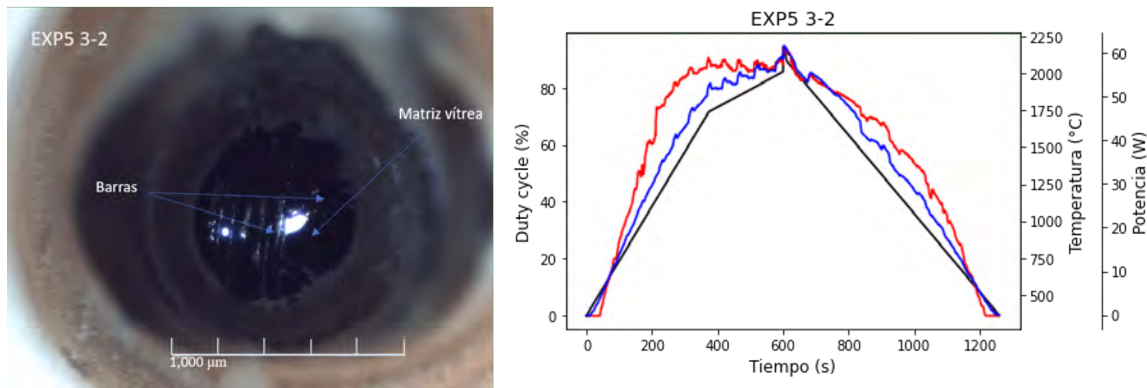


Figura 4.30: Análogo EXP5 3-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP5 3-2 (Figura 4.30) tiene una forma esférica, el material precursor fundió casi en su totalidad ya que se distingue una pequeña zona con fundido parcial, no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta unas cuantas barras, sin embargo, la mayor parte de su superficie es vítrea, por lo que se puede clasificar como CC. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP5 3-2 difieren ya que el perfil de temperatura se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se logran marcar los cambios de pendiente. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

4.2. Clasificación de texturas con microscopio electrónico de barrido y con microscopio petrográfico

Para analizar con mayor detalle la morfología y la textura de los análogos con el microscopio electrónico de barrido (MEB) y con el microscopio petrográfico, se seleccionaron 9 análogos representativos de los 57 que se presentaron en la sección anterior.

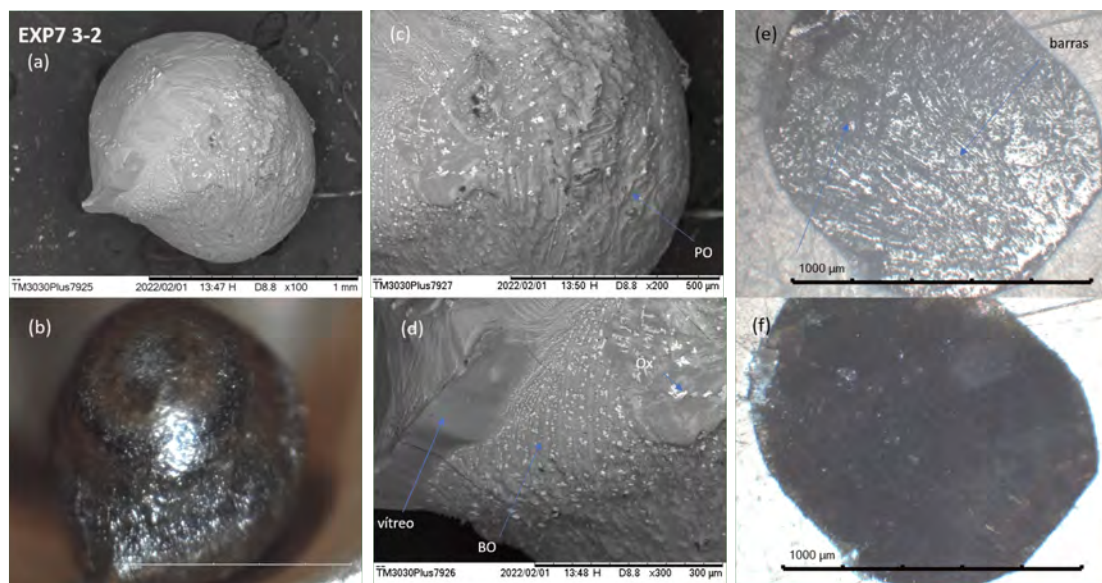


Figura 4.31: (a, c, y d) Imágenes del MEB que muestran distintas zonas del análogo EXP7 3-2 en escala de grises: olivino, piroxeno y/o feldespato y en blanco los óxidos (ox). (b) Imagen del análogo EXP7 3-2 con microscopio estereoscópico. (e y f) Imágenes del análogo EXP7 3-2 tomadas con microscopio petrográfico con luz reflejada y transmitida, respectivamente.

El análogo EXP7 3-2 (Figura 4.31) tiene una forma semi-esférica, en algunas zonas presenta barras de olivino embebidas en una mesostasis vítrea cubiertas por cristales minúsculos de óxidos (posiblemente FeO) (a), al igual que sólo la mesostasis vítrea cubierta por óxidos (sin barras)(b). En la imagen (c) se aprecia una textura porfídica de olivino (PO) (f).

El análogo EXP8 2-2 (Figura 4.32) tiene una forma semi-esférica, ya que hay una zona con fundido parcial en la se presenta una textura PO embebida en una

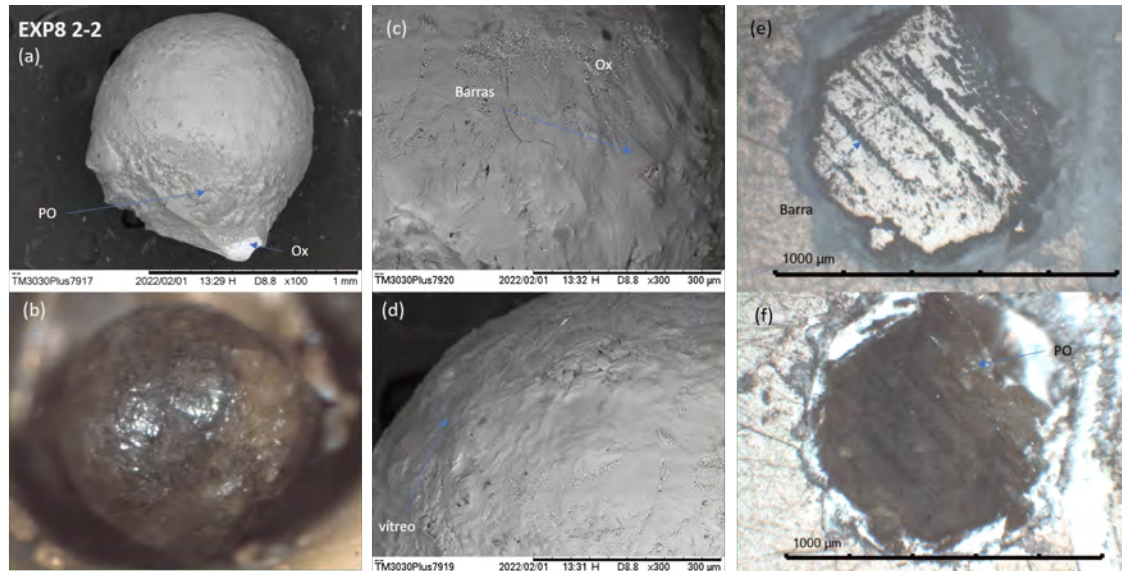


Figura 4.32: (a, c, y d) Imágenes del MEB que muestran distintas zonas del análogo EXP8 2-2 en escala de grises: olivino, piroxeno y/o feldespato y en blanco los óxidos (ox). (b) Imagen del análogo EXP8 2-2 con microscopio estereoscópico. (e y f) Imágenes del análogo EXP8 2-2 tomadas con microscopio petrográfico con luz reflejada y transmitida, respectivamente.

mesostasis vítrea (a y f). En las imágenes (c) y (e) se aprecian zonas en las que se formaron barras. Además, se formaron zonas con pequeños cristales de FeO casi imperceptibles (b) y (c). Tanto las barras como los pequeños cristales no pudieron observarse utilizando solamente el microscopio estereoscópico.

El análogo EXP9 3-1 (Figura 4.33) tiene forma semi-esférica, ya que hay una zona con fundido parcial (a). Presenta una morfología dendrítica con barras elongadas en cadena, por lo que se caracteriza como textura radial (por el tamaño y forma de las barras). Estas barras están embebidas en una mesostasis vítrea y cubren casi toda la superficie del análogo (b, c, e y f). Se aprecian muy poco contenido de óxidos.

El análogo EXP1 2-2 (Figura 4.34) tiene forma semi-esférica ya que una zona del análogo no está completamente fundida. Al igual que en el análogo EXP7 3-2, se aprecian cristales con forma de picos diminutos en la zona parcialmente fundidas. Presenta una morfología dendrítica con barras de olivino embebidas en una mesostasis vítrea.

El análogo EXP1 4-1 (Figura 4.35) tiene una forma esférica y está completamente fundido. En este análogo toda la superficie es vítrea, por lo que puede ser clasificado

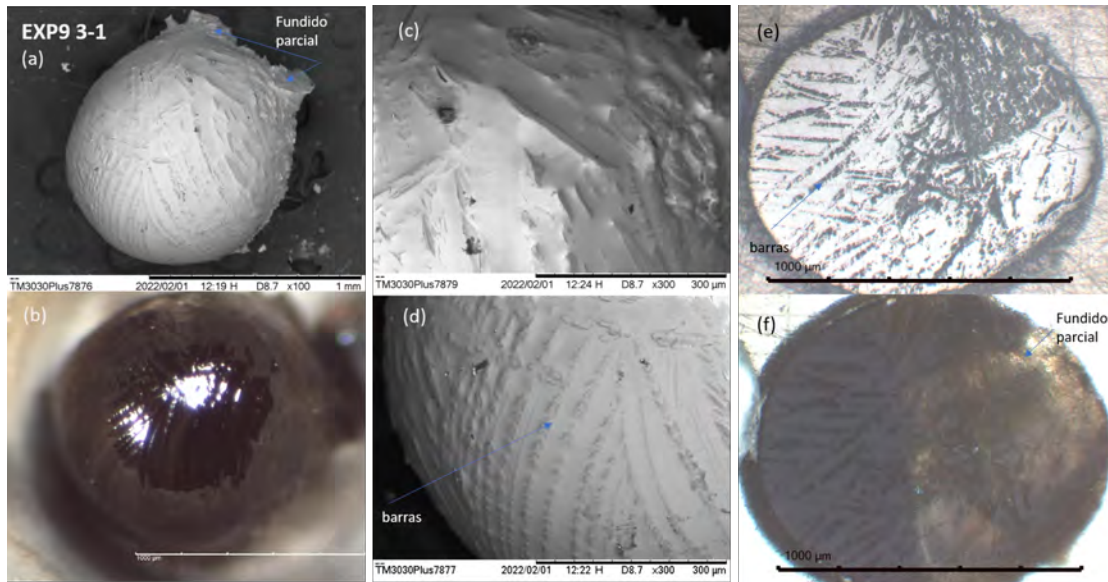


Figura 4.33: (a, c, y d) Imágenes del MEB que muestran distintas zonas del análogo EXP9 3-1 en escala de grises: olivino, piroxeno y/o feldespato y en blanco los óxidos (ox). (b) Imagen del análogo EXP9 3-1 con microscopio estereoscópico. (e y f) Imágenes del análogo EXP9 3-1 tomadas con microscopio petrográfico con luz reflejada y transmitida, respectivamente.

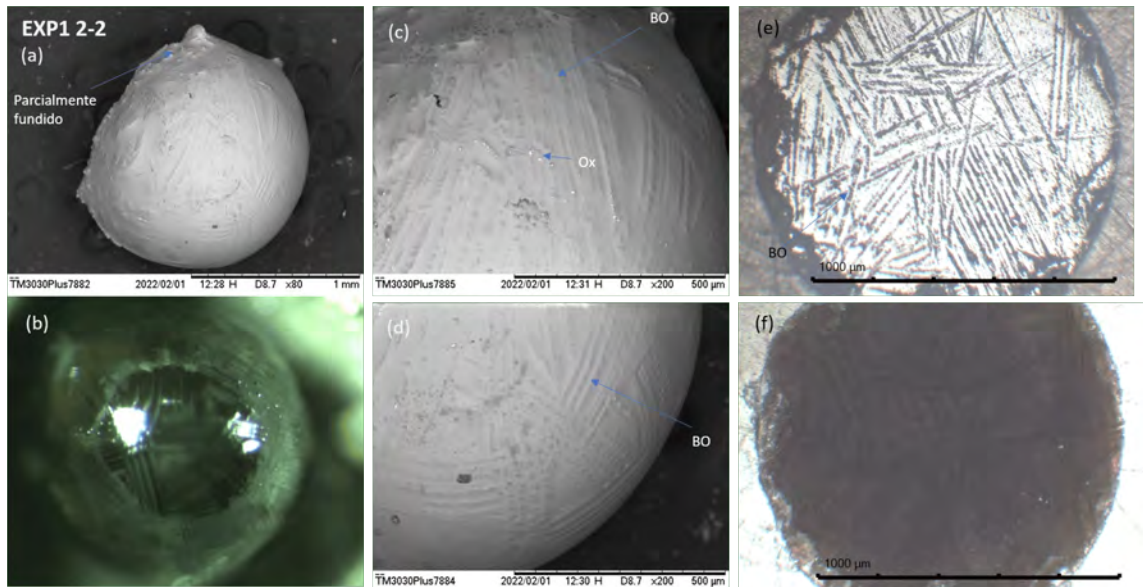


Figura 4.34: (a, c, y d) Imágenes del MEB que muestran distintas zonas del análogo EXP1 2-2 en escala de grises: olivino, piroxeno y/o feldespato y en blanco los óxidos (ox). (b) Imagen del análogo EXP1 2-2 con microscopio estereoscópico. (e y f) Imágenes del análogo EXP1 2-2 tomadas con microscopio petrográfico con luz reflejada y transmitida, respectivamente.

como CC (a, b y c) Sin embargo, cuándo el análogo se observe con el microscopio petrográfico con luz transmitida (d) se pudo apreciar una fase distinta dentro de él.

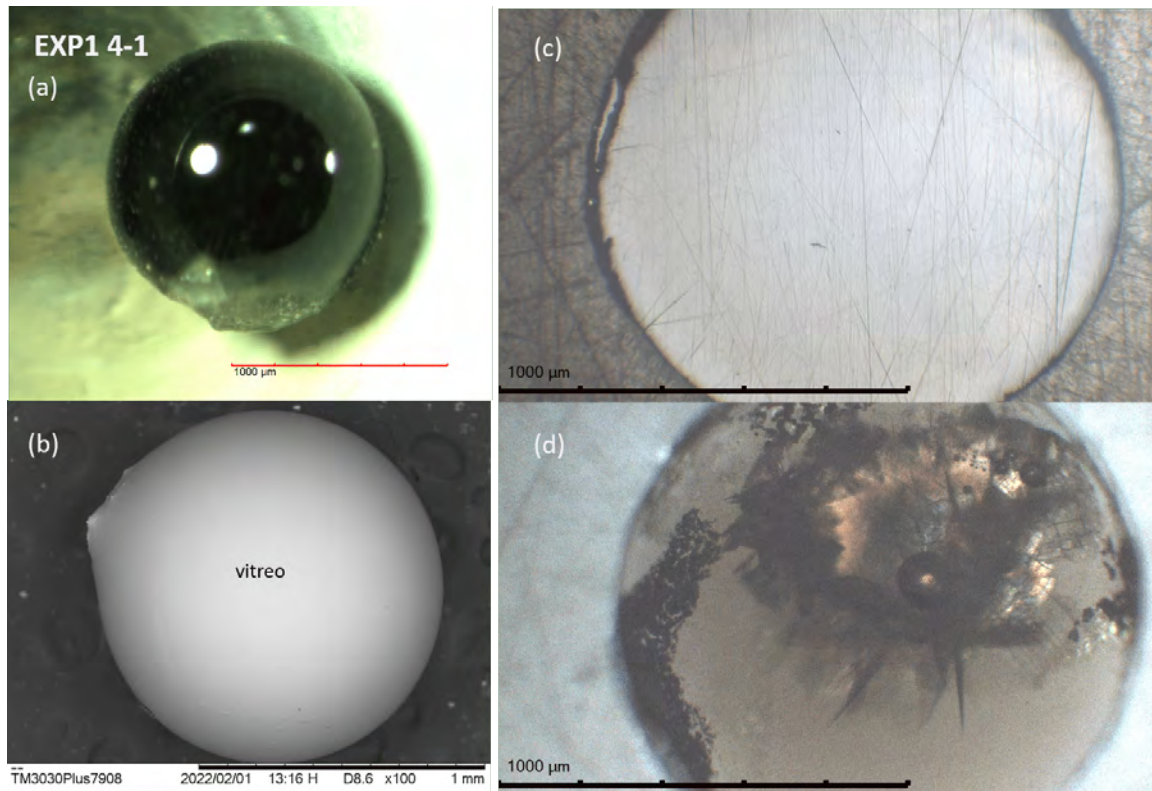


Figura 4.35: (a) Imagen del análogo EXP1 4-1 con microscopio estereoscópico. (b) Imagen del MEB del análogo EXP1 4-1 en escala de grises. (c) Imagen del análogo EXP1 4-1 tomada con microscopio petrográfico con luz reflejada y transmitida, respectivamente.

El análogo EXP1 6-2 (Figura 4.36) presenta una morfología dendrítica con barras de olivino elongadas (c), la mayoría paralelas entre sí y que se cruzan en cierto punto (c, e y f). Las barras están embebidas en una mesostasis vítrea (d). En la imagen (c) se toma un acercamiento de las barras y se aprecia una textura plumosa.

El análogo EXP3 2-1 (Figura 4.37) tiene forma semiesférica y zonas parcialmente fundidas (a). Presenta una morfología dendrítica con barras elongadas (c, e y f) que cuando se aprecian con mayor detalle se logra identificar una textura plumosa (d). Dichas barras están embebidas en una mesostasis vítrea (a).

El análogo EXP5 1-2 (Figura 4.38) tiene una forma esférica. Presenta una morfología compleja, en algunas zonas se observa una morfología dendrítica con barras muy diminutas clasificadas como cola de golondrina (d), mientras que en gran parte de la superficie se observan cristales en forma de pico con óxidos en las puntas (c). Además, otras zonas del análogo no presentan textura alguna (mesostasis vítrea) (c

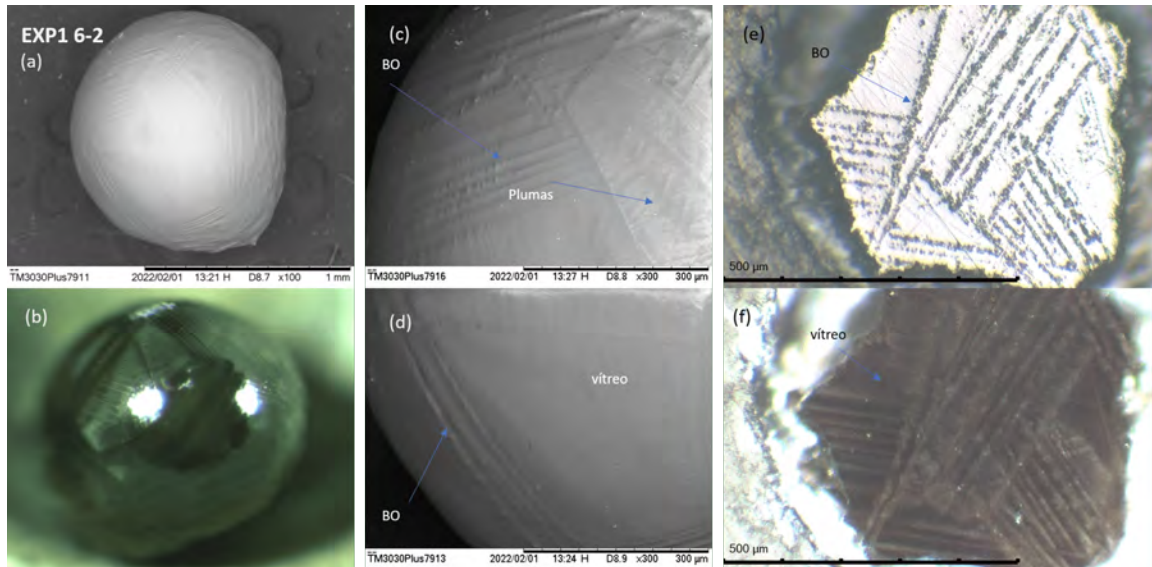


Figura 4.36: (a, c, y d) Imágenes del MEB que muestran distintas zonas del análogo EXP1 6-2 en escala de grises: olivino, piroxeno y/o feldespato y en blanco los óxidos (ox). (b) Imagen del análogo EXP1 6-2 con microscopio estereoscópico. (e y f) Imágenes del análogo EXP1 6-2 tomadas con microscopio petrográfico con luz reflejada y transmitida, respectivamente.

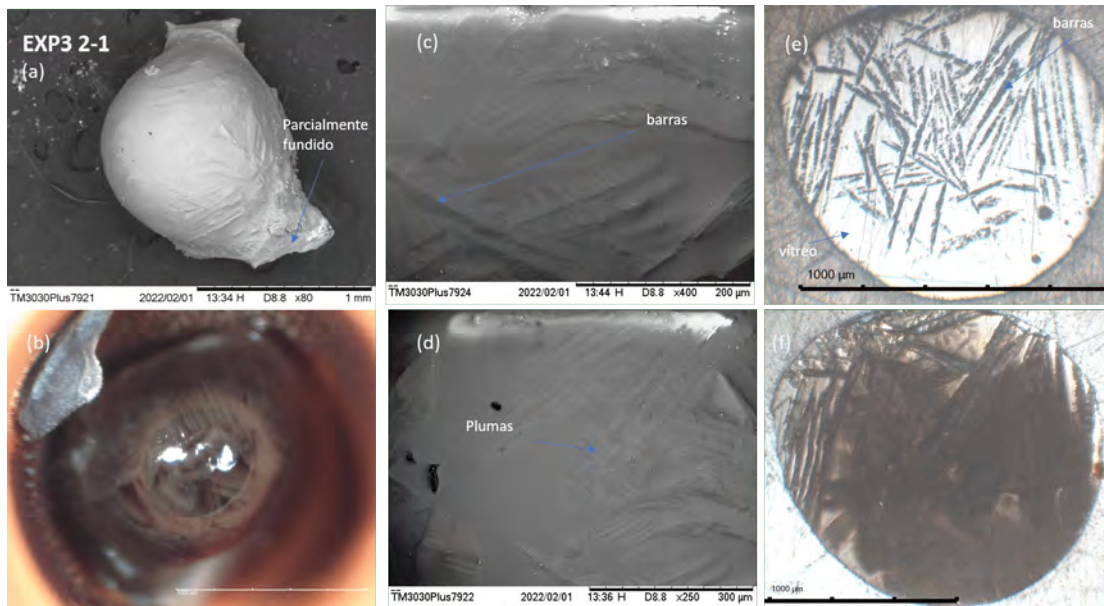


Figura 4.37: (a, c, y d) Imágenes del MEB que muestran distintas zonas del análogo EXP3 2-1 en escala de grises: olivino, piroxeno y/o feldespato y en blanco los óxidos (ox). (b) Imagen del análogo EXP3 2-1 con microscopio estereoscópico. (e y f) Imágenes del análogo EXP3 2-1 tomadas con microscopio petrográfico con luz reflejada y transmitida, respectivamente.

y e).

El análogo EXP1 6-1 (Figura 4.39) tiene una forma esférica. La mayor parte

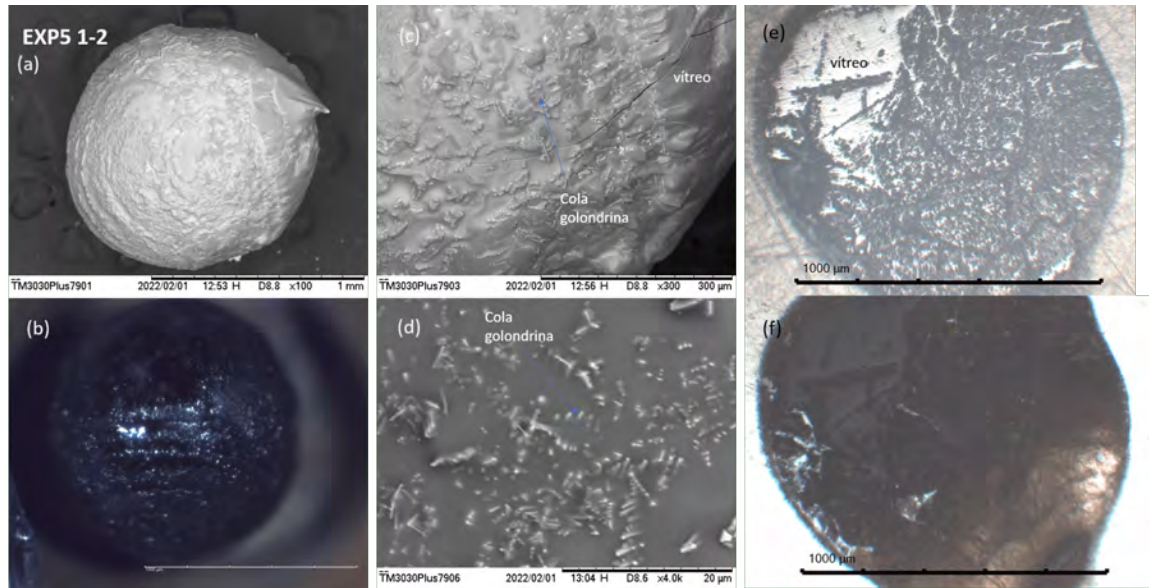


Figura 4.38: (a, c, y d) Imágenes del MEB que muestran distintas zonas del análogo EXP5 1-2 en escala de grises: olivino, piroxeno y/o feldespato y en blanco los óxidos (ox). (b) Imagen del análogo EXP5 1-2 con microscopio estereoscópico. (e y f) Imágenes del análogo EXP5 1-2 tomadas con microscopio petrográfico con luz reflejada y transmitida, respectivamente.

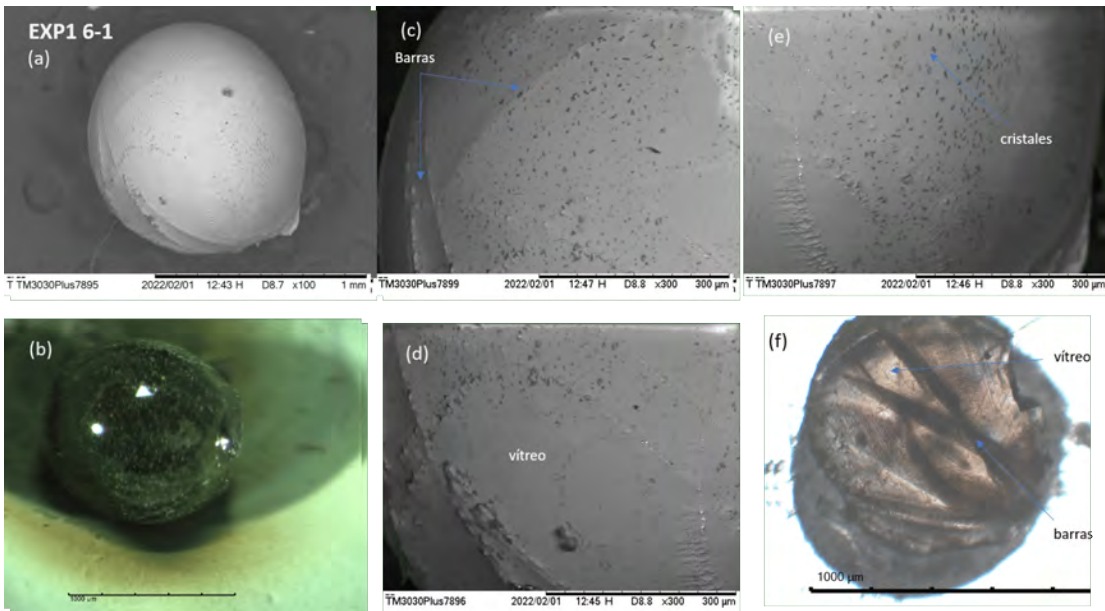


Figura 4.39: (a, c, d y e) Imágenes del MEB que muestran distintas zonas del análogo EXP5 1-2 en escala de grises: olivino, piroxeno y/o feldespato y en blanco los óxidos (ox). (b) Imagen del análogo EXP5 1-2 con microscopio estereoscópico. (f) Imagen del análogo EXP5 1-2 tomada con microscopio petrográfico con luz transmitida.

del análogo es vítrea, por lo que se clasifica como CC. Sin embargo, hay algunas zonas en donde se formaron barras las cuales están embebidas en una mesostasis

vítrea (c, d y f). También en la mayor parte de la superficie del análogo se aprecian pequeños cristales de color oscuro embebidos en esta matriz (e), podrían tratarse de la oligoclasa.

4.3. Cálculo de la mineralogía normativa con la Norma CIPW

Para tener un cálculo aproximado de la mineralogía normativa que pudo formarse en los fundidos tipo condro se utilizó la norma CIPW (sección 2.5.4). Primeramente, se calculó la composición química total de cada fundido como se muestra en la Tabla 4.1, esto fue posible utilizando la densidad y el porcentaje en peso (%wt) (Tabla 3.2) de cada mineral precursor e introducirlos en un programa en excel creado por Cervantes (2009).

Tabla 4.1: Composición química total del material precursor de los análogos de condros representativos.

%wt Óxidos	EXP9 3-1	EXP1 2-2	EXP1 6-2	EXP1 4-1	EXP5 1-2	EXP8 2-2	EXP3 2-1	EXP7 3-2	EXP1 6-1
SiO ₂	47.1	43.1	42.9	43.6	40.4	41.7	42.7	40.5	43.0
TiO ₂	0	0.1	0	0	0	0.2	0.2	0.1	0.1
Al ₂ O ₃	7.0	5.2	5.8	6.5	5.1	9.7	3.2	5.0	6.1
FeO	7.5	8.8	8.9	8.3	8.9	7.7	8.8	9.1	8.5
MnO	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MgO	35.1	37.9	40.4	37.8	40.5	32.3	38.4	39.5	37.8
CaO	1	3.2	0.5	2.7	0	7.4	4.3	2.8	3.3
Na ₂ O	1.8	1.1	0.8	1.0	4.1	0.3	1.8	1.9	0.5

Una vez que se tiene la composición química total se introducen los datos para cada análogo en otro programa de excel creado específicamente para calcular la norma CIPW. Dicho programa fue escrito por Kurt Hollocher, Geology Department, Union College, Schenectady, NY. En el programa se pueden calcular alrededor 30 minerales normativos, sin embargo, luego de hacer los cálculos para los análogos representativos usando los resultados de la tabla 4.1, la norma CIPW indica que de los 30 se pueden estar formando sólo 8 minerales normativos: olivino, diópsida, enstatita, feldespato,

nefelina, corindón, ilmenita y Na_2SiO_3 . Los resultados del cálculo de la norma CIPW se muestran en la tabla 4.2. Se sabe que los minerales precursores de los análogos son olivino, diópsida, enstatita y feldespato, por lo tanto, es lógico que en el cálculo de la norma aparezcan también estos minerales. Sin embargo, según la norma CIPW también se pudo dar la formación de otros minerales como: corindón, ilmenita, nefelina y Na_2SiO_3 . Sin embargo, estos últimos minerales no suelen encontrarse en los condros naturales. Por ello, se hizo un análisis de la razón por la cual el cálculo de la norma arrojó estos resultados y se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los únicos dos experimentos EXP9 3-1 y EXP1 6-2 que posiblemente formaron corindón tienen en común que entre sus precursores se encuentran enstatita y oligoclasa.
- Los análogos que posiblemente formaron nefelina (véase Tabla 4.2) tienen en común dos cosas, ya sea que entre sus precursores se tenga sólo olivino y feldespato o que tengan cualquier combinación que incluya sodalita. Esto puede deberse principalmente a que tanto la sodalita como la nefelina tienen alto contenido de Na.
- El Na_2SiO_3 sólo aparece en el análogo EXP5 1-2, que tiene como precursores olivino y sodalita (sin piroxeno ni espinela), al igual que en el caso de la nefelina, esto se debe al alto contenido de Na de la sodalita.
- La posible formación de la ilmelita se da cuando los análogos tienen cierta cantidad de TiO_2 , por muy pequeña que sea. Esto tiene sentido ya que la fórmula de la ilmelita es $\text{Fe}_2\text{Ti}_4\text{O}_3$.

Según la información que nos brinda esta norma, la mineralogía normativa de los análogos EXP9 3-1, EXP1 6-2, EXP5 1-2, EXP3 2-1 y EXP7 3-2, los cuales tienen las combinaciones de material precursor 1G, 4B, 4C, 2D y 2D, respectivamente, no se asemeja a la mineralogía de los condros naturales, debido a que forman minerales como nefelina, corindón, ilmelita y Na_2SiO_3 (los cuales no se encuentran en los condros naturales). Mientras que la mineralogía normativa de los análogos EXP1 2-2, EXP8

Tabla 4.2: Cálculo de la norma CIPW para los análogos representativos

% wt Minerales	EXP9 3-1	EXP1 2-2	EXP1 6-2	EXP1 4-1	EXP5 1-2	EXP8 2-2	EXP3 2-1	EXP7 3-2	EXP1 6-1
Olivino	50.21	69.47	64.89	43.6	80.14	59.39	69.82	75.92	63.49
Diopsida	0	5.56	0	0	0	9.66	17.36	7.46	1.67
Enstatita	26.05	4.83	21.29	6.5	0	1.14	0	0	14.65
feldespato	21.41	19.94	9.96	23.07	5.2	29.4	6.96	8.67	19.99
Nefelina	0	0	0	0.1	12.54	0	5.47	7.75	0
Corindón	2.34	0	3.86	0	0	0	0	0	0
Ilmenita	0	0.21	0	0	0	0.4	0.4	0.21	0.21
Na ₂ SiO ₃	0	0	0	0	2.13	0	0	0	0

2-2, EXP1 4-1 y EXP1 6-1, los cuales tienen las combinaciones de material precursor 1C, 1B, 4A y 1E, respectivamente, son los que tienen una mineralogía normativa que más se asemejan a la mineralogía de los condros naturales.

4.4. Descripción de análisis Raman

Ocho muestras fueron llevadas a análisis de espectroscopia Raman, estas muestras dieron indicios, confirmaciones y negaciones de los minerales que, según los cálculos de la mineralogía normativa con la norma CIPW, se estaban formando en las muestras.

Para el análogo EXP1 4-1, el cual tiene una combinación de precursores 4A (Ol + La), a pesar de ser vítreo, cuando es observado con el microscopio petrográfico con luz transmitida se aprecian zonas en el análogo con distinta composición, como se muestra en la Figura 4.40 a. La zona vítrea ((b) y (d) en la Figura 4.40 a) presenta espectros con un pico alrededor de $1,000 \text{ cm}^{-1}$ que corresponde a los modos de vibración de estiramiento del Si-O de piroxeno y otra banda alrededor de los 500 cm^{-1} que corresponde a los modos de vibración del tetraedro de sílice de los tectosilicatos, en este caso la labradorita (Figura 4.40 b y d; e.g. Frezzotti et al. (2012)). Sin embargo, ambos espectros tienen líneas gruesas, lo que indica su estructura vítrea. En la zona (c) de la Figura 4.40 a, se analiza otra zona del análogo que se observa con un color más claro, esta presenta modos de vibración que parecen coincidir con las bandas fuertes de minerales como el piroxeno y la anortita, y con las bandas fuertes de H₂O

que se encuentran entre $2,800\text{ cm}^{-1}$ y $3,100\text{ cm}^{-1}$.

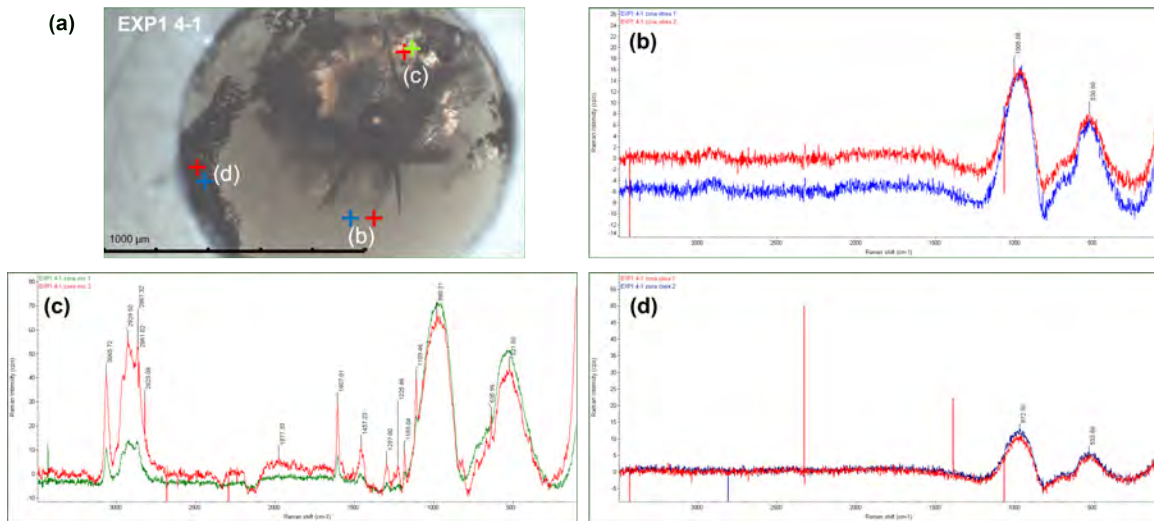


Figura 4.40: Análisis Raman del análogo EXP1 4-1. En la imagen (a), que fue obtenida con el microscopio petrográfico, se señalan las zonas de la muestra analizadas mediante Raman. Las imágenes (b), (c) y (d) son los espectros obtenidos por Raman de los distintos puntos señalados en la imagen (a).

El análogo EXP1 2-2 (Figura 4.41 a), el cual tiene una combinación de precursores 1C (Ol + Di + Oc + Sp), de acuerdo con el espectro Raman las barras están formadas de olivino (Figura 4.41 b), mientras que en la mesostasis presenta espectros que son consistentes con la formación tanto de olivino como de oligoclasa (modos de estiramiento anchos alrededor de 500 cm^{-1} consistentes con un vidrio de composición feldespática). En la Figura 4.41 c, se muestra un acercamiento de las barras de este análogo.

El análogo EXP1 6-2 (Figura 4.42 a), el cual tiene una combinación de precursores 1G (Ol + En + Oc + Sp), de acuerdo con el espectro Raman las barras están formadas de olivino (Figura 4.42 b), mientras que en la mesostasis presenta bandas gruesas consistentes con espectros de piroxeno en estado vítreo y bandas bien definidas de olivino (modos de estiramiento fuerte de los tetraedros de sílice del olivino; Figura 4.42 d). En la Figura 4.42 c se muestra un acercamiento de las barras de este análogo.

El análogo EXP3 2-1 (Figura 4.43 a), el cual tiene una combinación de precursores 2D (Ol + Di + So), de acuerdo con el espectro Raman las barras están formadas de olivino (Figura 4.43 b), mientras que en la mesostasis vítrea presenta una combinación

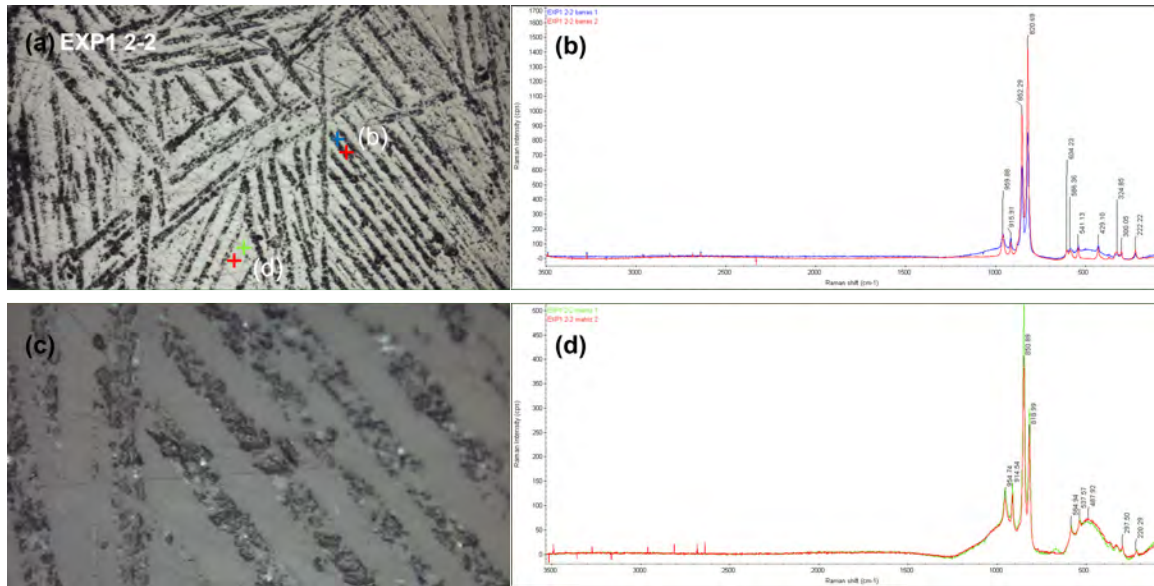


Figura 4.41: Análisis Raman del análogo EXP1 2-2. En la imagen (a), que fue obtenida con el microscopio petrográfico, se señalan las zonas de la muestra analizadas mediante Raman. Las imágenes (b) y (d) son los espectros obtenidos por Raman de los distintos puntos señalados en la imagen (a). La imagen (c) muestra un acercamiento de las barras de este análogo.

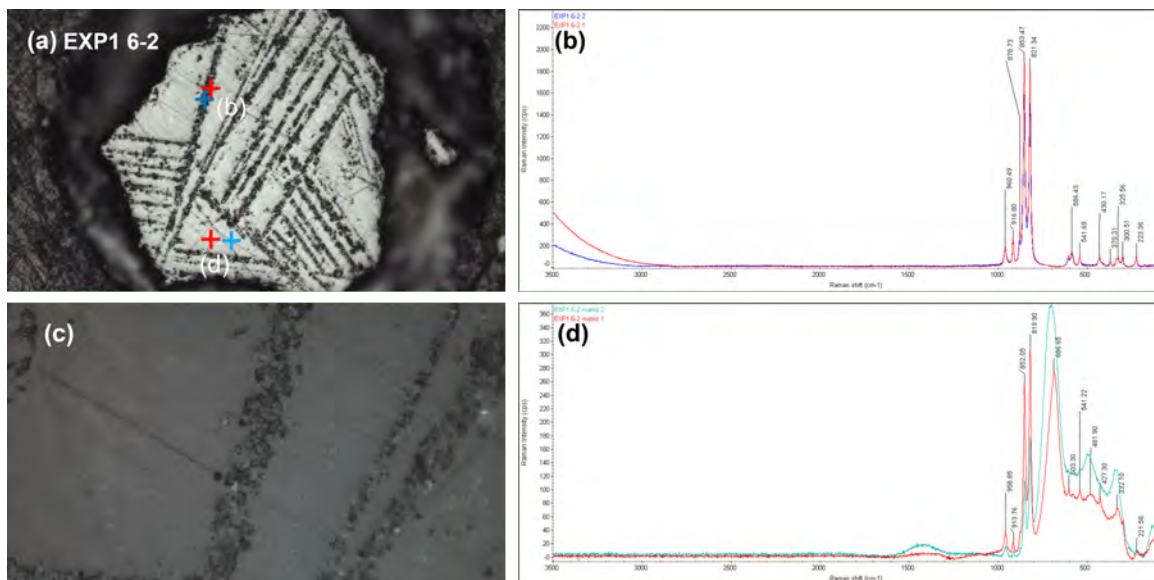
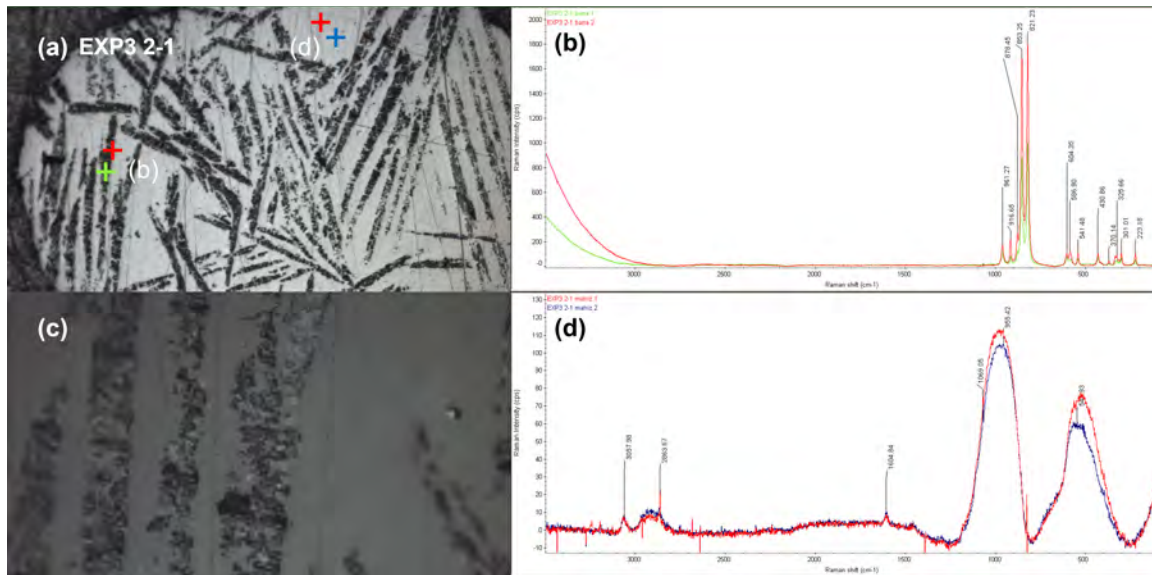


Figura 4.42: Análisis Raman del análogo EXP1 2-2. En la imagen (a), que fue obtenida con el microscopio petrográfico, se señalan las zonas de la muestra analizadas mediante Raman. Las imágenes (b) y (d) son los espectros obtenidos por Raman de los distintos puntos señalados en la imagen (a). La imagen (c) muestra un acercamiento de las barras de este análogo.

de bandas, posiblemente relacionada con sodalita en estado vítreo y una combinación de piroxeno (Figura 4.43 d; Chukanov et al. (2020)), ambos con bandas gruesas, lo

que indica su estructura vítrea. También se observan pequeñas bandas de H₂O de menor intensidad a 2,800 cm⁻¹ y 3,058 cm⁻¹. En la Figura 4.43 c se muestra un acercamiento de las barras de este análogo.



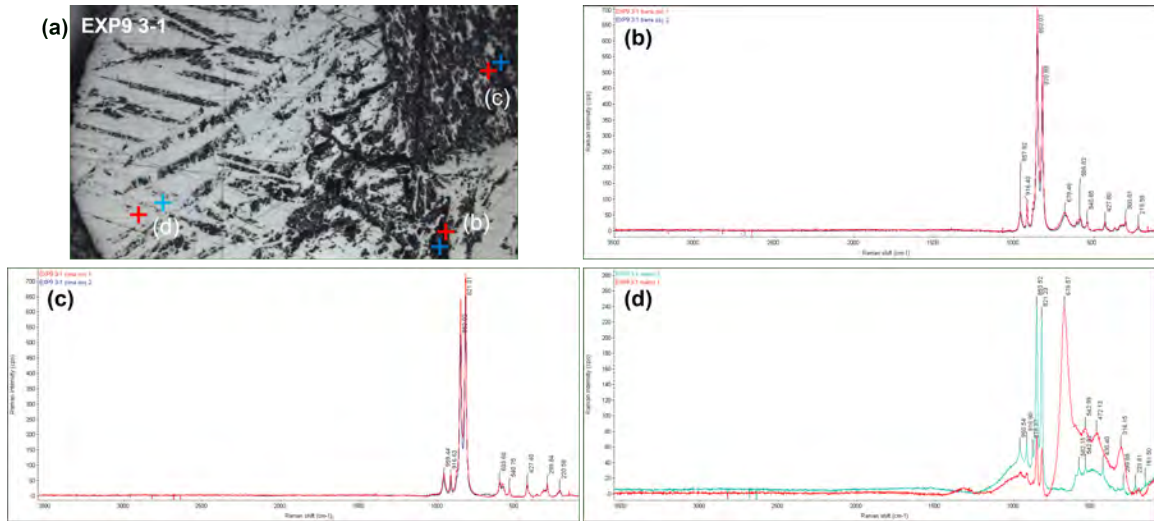


Figura 4.44: Análisis Raman del análogo EXP9 3-1. En la imagen (a), que fue obtenida con el microscopio petrográfico, se señalan las zonas de la muestra analizadas mediante Raman. Las imágenes (b), (c) y (d) son los espectros obtenidos por Raman de los distintos puntos señalados en la imagen (a).

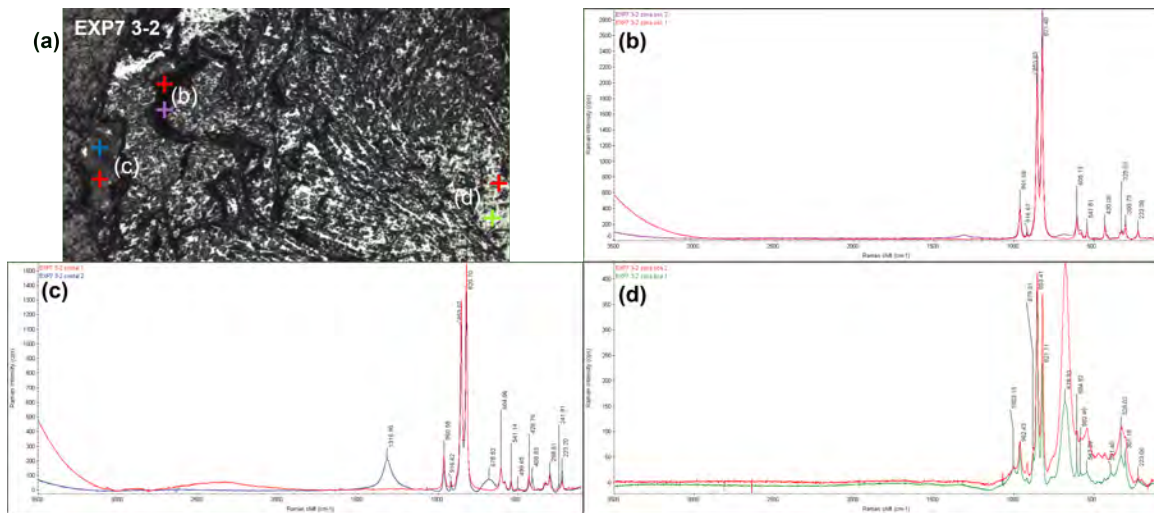


Figura 4.45: Análisis Raman del análogo EXP7 3-2. En la imagen (a), que fue obtenida con el microscopio petrográfico, se señalan las zonas de la muestra analizadas mediante Raman. Las imágenes (b), (c) y (d) son los espectros obtenidos por Raman de los distintos puntos señalados en la imagen (a).

1B (Ol + Di + An + Sp), de acuerdo con el espectro Raman las barras están formadas de olivino (Figura 4.46 b). Por otro lado, la mesostasis tiene un espectro similar al de un vidrio feldespático (Freeman et al., 2008) con bandas gruesas, lo que indica su estructura vítrea (Figura 4.46 c).

EXP5 1-2 (Figura 4.47 a), el cual tiene una combinación de precursores 4B (Ol

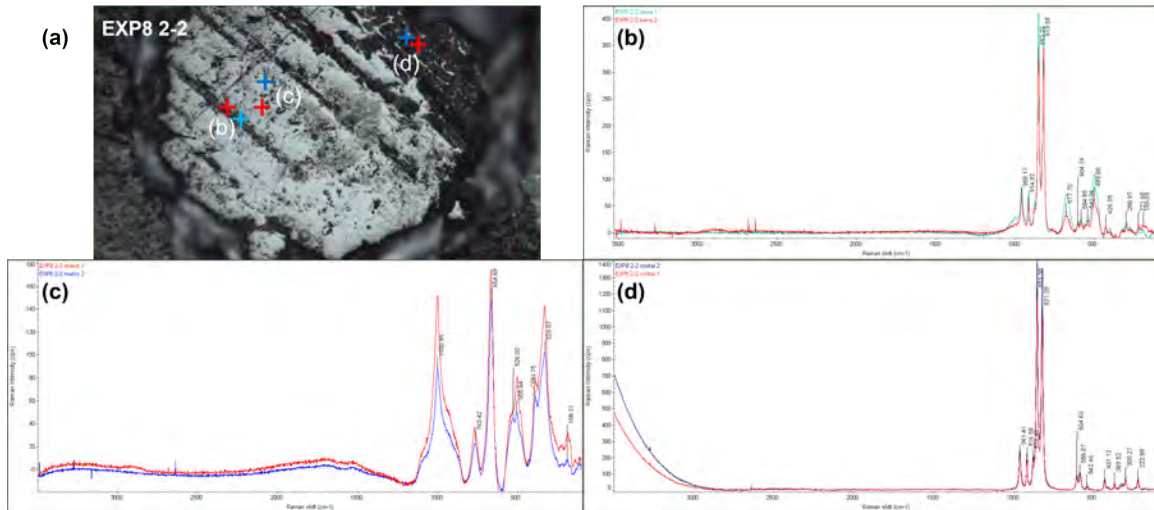


Figura 4.46: Análisis Raman del análogo EXP8 2-2. En la imagen (a), que fue obtenida con el microscopio petrográfico, se señalan las zonas de la muestra analizadas mediante Raman. Las imágenes (b), (c) y (d) son los espectros obtenidos por Raman de los distintos puntos señalados en la imagen (a).

+ An), de acuerdo con el espectro Raman en la zona más oscura (Figura 4.47 b) está formada tanto de olivino como de vidrio feldespático, mientras que en la zona gris presenta un espectro de vidrio feldespático (Figura 4.47 c). Este análogo también contiene pequeños cristales color negro brillante ((d) en Figura 4.47 a) que presentan un espectro con bandas consistentes con H_2O que se encuentran entre $2,800\text{ cm}^{-1}$ y $3,000\text{ cm}^{-1}$.

4.5. Análisis del efecto del material precursor en las texturas resultantes

Como se vio en el capítulo 3, se realizaron varias combinaciones de material precursor (Tabla 3.2) para conocer con cuáles de ellas se obtienen análogos de condros con morfologías y texturas similares a las de los condros naturales. A continuación se muestra un análisis del comportamiento de cada material precursor en distintas combinaciones y en distintas corridas experimentales.

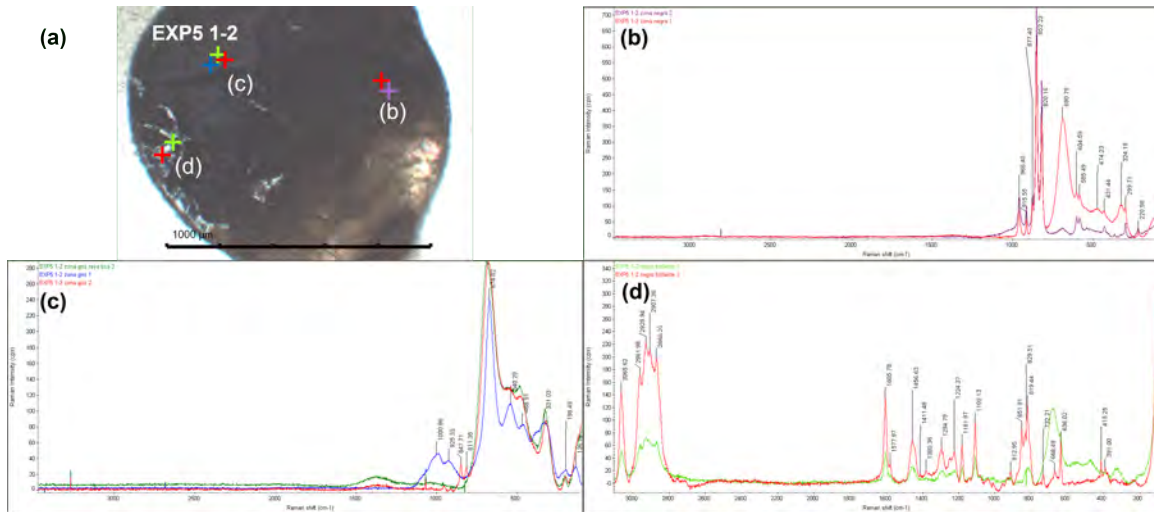


Figura 4.47: Análisis Raman del análogo EXP5 1-2. En la imagen (a), que fue obtenida con el microscopio petrográfico, se señalan las zonas de la muestra analizadas mediante Raman. Las imágenes (b), (c) y (d) son los espectros obtenidos por Raman de los distintos puntos señalados en la imagen (a).

4.5.1. Combinaciones con espinela

Para analizar el comportamiento de la espinela se comparan los análogos de la corrida experimental 4, ya que son los que tienen todas las combinaciones con y sin espinela. Las observaciones del comportamiento de la espinela en los análogos de la corrida experimental 4 se muestran en la Tabla 4.3. Las diferencias más notorias del efecto de la espinela en estos análogos fueron en la coloración, el grado de fusión y la textura.

En la Figura 4.48 se compara el efecto que genera la espinela en la coloración y textura de 4 análogos. El análogo EXP1 2-2 (Figura 4.48 a) tiene la misma combinación de precursores que el análogo EXP1 1-2 (Figura 4.48 b) con la diferencia de que el análogo EXP1 2-2 contiene espinela. Ambos análogos tienen una morfología dendrítica, sin embargo la organización de las barras es distinta ya que el EXP1 2-2 muestra un patrón de barras cortas que se cruzan entre sí en toda su superficie, mientras que en el análogo EXP1 1-2 las barras son más elongadas y la superficie del análogo tiene zonas totalmente vítreas. Por otro lado se comparan los análogos EXP3 1-1 (Figura 4.48 c) y EXP3 2-1 (Figura 4.48 d) que de igual forma tienen la misma combinación de material precursor pero con y sin espinela respectivamente. El cambio

Tabla 4.3: Comparación de análogos de la corrida 4 con y sin espinela

Análogo	Combinación	Observaciones
EXP1 1-1	1A	
EXP1 2-1	2A	No hay cambios notorios
EXP1 2-2	1C	
EXP1 1-2	2C	Diferencias en la coloración y en la textura
EXP3 1-1	1D	
EXP3 2-1	2D	Diferencias en la coloración y en la textura
EXP1 6-3	1F	
EXP1 5-3	2F	Diferencias en la coloración y en el grado de fusión
EXP1 6-2	1G	
EXP1 5-2	2G	Diferencias en la coloración y en el grado de fundido
EXP1 3-1	3A	
EXP1 4-1	4A	Diferencias en el grado de fundido
EXP1 4-3	3B	
EXP1 3-3	4B	Diferencias en la coloración y en el grado de fusión
EXP1 4-2	3C	
EXP1 3-2	4C	Diferencias en el grado de fundido

más notorio de estos dos análogos es la coloración, ya que el análogo EXP3 1-1 (con espinela) tiene un color más oscuro que el del análogo EXP3 2-1 (sin espinela) esto tiene sentido ya que la espinela antes de fundir es color negro (ver Figura 2.8). Otra

diferencia importante es el tipo de textura obtenido, el análogo EXP3 1-1 tiene una textura barrada embebida en una mesostasis vítrea mientras que el análogo EXP3 2-1 presenta una textura plumosa e igual embebida en una mesostasis vítrea.

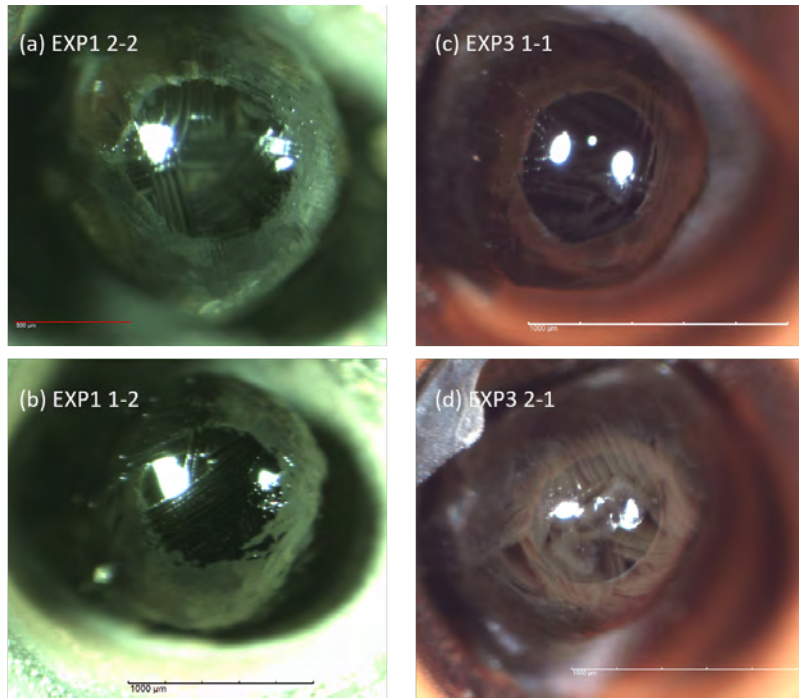


Figura 4.48: Comparación del efecto de la espinela en los análogos de la corrida experimental 4. El análogo EXP1 2-2 (a) y el análogo EXP1 1-2 (b) tienen composición similar (combinación 1C y 2C) pero con y sin espinela respectivamente. Los análogos EXP3 1-1 (c) y EXP3 2-1 (d) tienen composición similar (combinación 1D y 2D) pero con y sin espinela respectivamente.

En la Figura 4.49 se compara el efecto que genera la espinela en la coloración, grado de fusión y textura de 4 análogos. El análogo EXP1 6-3 (Figura 4.49 a) tiene la misma combinación de precursores que el análogo EXP1 5-3 (Figura 4.49 b) con la diferencia de que el análogo EXP1 6-3 contiene espinela. La diferencia principal entre estos análogos se encuentra en la textura y en el grado de fusión. El experimento EXP1 6-3 (con espinela) está fundido completamente y tiene una textura plumosa mientras que el análogo EXP1 5-3 (sin espinela) está parcialmente fundido y tiene unas cuantas barras y el resto de la mesostasis vítrea. El análogo 6-2 (Figura 4.49 c) tiene la misma combinación de precursores que el análogo EXP1 5-2 (Figura 4.49 d) con la diferencia de que el análogo EXP1 6-2 contiene espinela. El experimento

EXP1 6-2 (con espinela) está fundido completamente y tiene una textura de cola de golondrina, mientras que el análogo EXP1 5-3 (sin espinela) está parcialmente fundido y tiene una textura barrada con una cobertura de brillo metálico.

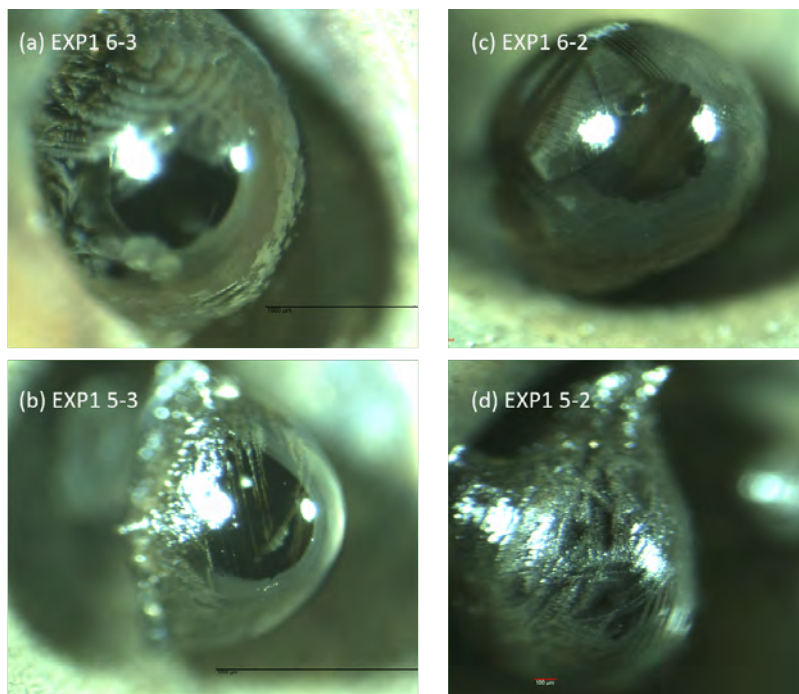


Figura 4.49: Comparación del efecto de la espinela en los análogos de la corrida experimental 4. El análogo EXP1 6-3 (a) y EXP1 5-3 (b) tienen composición similar (combinaciones 1F y 2F) pero con y sin espinela respectivamente. Los análogos EXP1 6-2 (c) y EXP1 5-2 (d) tienen composición similar (combinaciones 1G y 2G) pero con y sin espinela respectivamente.

En la figura 4.50 se muestra el efecto que tiene la espinela en los análogos con combinaciones 3 (Ol+ plagio + Sp) y 4 (Ol+ plagio), que son combinaciones que no contienen piroxenos. El análogo EXP1 3-1 (Figura 4.50 a) tiene la misma combinación de precursores (Ol + La) que el análogo EXP1 4-1 (Figura 4.50 b) con la diferencia de que el análogo EXP1 3-1 contiene espinela. La diferencia entre estos análogos es muy notoria ya que el análogo EXP1 3-1 (con espinela) presenta un fundido parcial y no tiene forma esférica, mientras que el análogo EXP1 4-1 fundió completamente en forma de esfera. Por otro lado el análogo EXP1 4-3 (Figura 4.50 c) tiene la misma combinación de precursores (Ol + An) que el análogo EXP1 3-3 (Figura 4.50 d) con la diferencia de que el análogo EXP1 4-3 contiene espinela. En este caso ambos análogos se encuentran parcialmente fundidos pero presentan texturas diferentes, el análogo

EXP1 3-3 (sin espinela) presenta una textura plumosa mientras que el análogo EXP1 4-3 (con espinela) presenta unas cuantas barras y el resto de la matriz es vítrea. En cuanto a la coloración, el análogo que contiene espinela tiene colores más oscuros que el que no contiene espinela. Por último, el análogo EXP1 4-2 (Figura 4.50 e) tiene la misma combinación de precursores (Ol + Oc) que el análogo EXP1 3-2 (Figura 4.50 f) con la diferencia de que el análogo EXP1 4-2 contiene espinela. Al igual que los análogos EXP1 3-1 y EXP1 4-1, el análogo EXP1 4-2 (con espinela) se encuentra parcialmente fundido mientras que el análogo EXP1 3-2 se encuentra completamente fundido. Ambos análogos presentan una textura barrada.

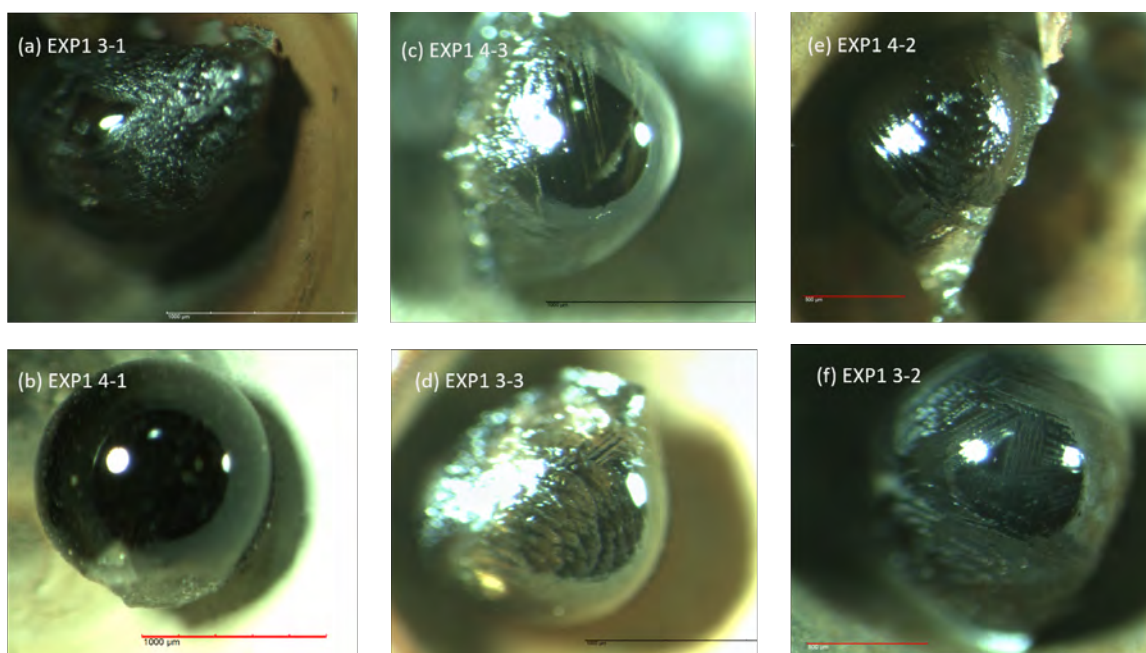


Figura 4.50: Comparación del efecto de la espinela en los análogos de la corrida experimental 4. El análogo EXP1 3-1 (a) y EXP1 4-1 (b) tienen composición similar (combinaciones 3A y 4A) pero con y sin espinela respectivamente. Los análogos EXP1 4-3 (c) y EXP1 3-3 (d) tienen composición similar (combinaciones 3B y 4B) pero con y sin espinela respectivamente. Los análogos EXP1 4-2 (e) y EXP1 3-2 (f) tienen composición similar (combinaciones 3C y 4C) pero con y sin espinela respectivamente.

Una vez hechos los análisis anteriores se llegó a la conclusión de que la espinela tiene un efecto en el tipo de textura que forman los análogos, en el grado de fusión según la combinación de material precursor y en su coloración. Por ejemplo, cuando se utilizan combinaciones con olivino, piroxenos, feldspatos y espinela (combinaciones 1 y 2), tienden a formarse texturas más organizadas y análogos completamente

fundidos. Sin embargo, cuando se utilizan combinaciones sin piroxenos y sólo con olivino, feldespatos y espinela (combinaciones 3 y 4), se tienden a formar análogos parcialmente fundidos. Es decir, las combinaciones con espinela funcionan como buen precursor cuando los análogos contienen olivino, piroxenos y feldespatos.

4.5.2. Combinaciones con piroxenos

Se realizaron análisis de comportamiento de los piroxenos en combinación sólo con olivino (combinación 5). Además, se analizaron las diferencias morfológicas entre usar enstatita o diópsida (combinaciones 1A y 1E) a distintas tasas de enfriamiento.

En la Figura 4.51 se muestra el efecto de la combinación 5 (Ol + Px) en análogos con olivino-enstatita y olivino-diópsida. Una observación importante fue que la combinación 5 (Ol + Px) no genera fundidos con texturas definidas. Por ejemplo, en la figura se observan dos análogos hechos solamente con olivino y piroxeno. El análogo EXP7 1-3 (Figura 4.51 a) en el que se usó la combinación 5B (Ol y En) fundió en forma semi-esférica, sin embargo la superficie está oxidada. Por otro lado, el análogo EXP8 1-4 (Figura 4.51 e) hecho con la combinación 5A (Ol y Di) no fundió en forma de esfera y su superficie también parece estar oxidada. Ninguno de los análogos presentan texturas definidas. Cabe mencionar que sólo se hicieron experimentos con la combinación 5 (Ol+Px) a tasas de enfriamiento alrededor de 10^3 °C/h, por lo que los resultados puede ser diferentes a tasas de enfriamiento mayores.

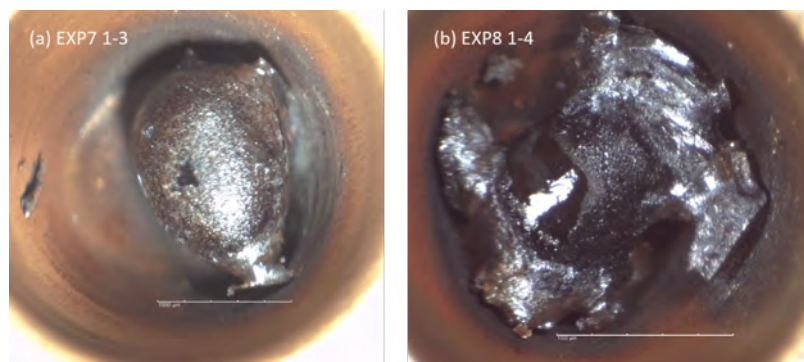


Figura 4.51: Efecto de la combinación 5 (Ol + Px) en análogos con olivino-enstatita y olivino-diópsida. El análogo EXP7 1-3 contiene olivino y enstatita mientras que el análogo EXP8 1-4 contiene olivino y diópsida. Ambos análogos presentan fundido parcial, una superficie oxidada y no formaron textura definida.

También se hizo una comparación entre análogos con diópsida y análogos con enstatita. En la Figura 4.52 se muestran 4 análogos con combinaciones de diópsida y enstatita a distintas tasas de enfriamiento. El análogo EXP1 1-1 pertenece a la corrida experimental 4 (combinación de precursores 1A) (Figura 4.52 a), éste se compara con el análogo EXP1 6-1 que pertenece a la corrida experimental 4 (combinación de precursores 1E) (Figura 4.52 b). Las diferencias entre estos análogos no son muchas ya que ambos fundieron completamente en forma de esfera y a grandes rasgos tienen una textura barrada embebida en una mesostasis vítrea, la coloración de ambos análogos es similar. Por otro lado, se compararon el análogo EXP7 1-4 perteneciente a la corrida experimental 1 y con material precursor de combinación 1A (Figura 4.52 c) y el análogo EXP7 2-4 perteneciente a la corrida experimental 1 y con material precursor de combinación 1E (Figura 4.52 d). En estos análogos sí hay una diferencia notoria ya que el análogo EXP7 2-4 (con En) tiene su superficie oxidada y color negro a diferencia del análogo EXP7 1-4 (con Di). El efecto de la superficie oxidada se observó en varios análogos que contenían enstatita, principalmente en las corridas experimentales 1 y 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h).

4.5.3. Combinaciones con feldespatos

Combinaciones con labradorita

De manera general, la labradorita actúa como buen precursor en la corrida experimental 4, ya que todos los análogos fundieron en forma de esfera y formaron texturas similares a las de los condros naturales (Figura 4.53 a y c). Sin embargo, cuando se comparan las combinaciones de labradorita de la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con las de la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) se observa que los análogos tienen un fundido parcial y no funden en forma de esfera (Figura 4.53 b y d). Dicho lo anterior, se puede concluir que las combinaciones con labradorita actúan como buen precursor a tasas de enfriamiento rápidas ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h).

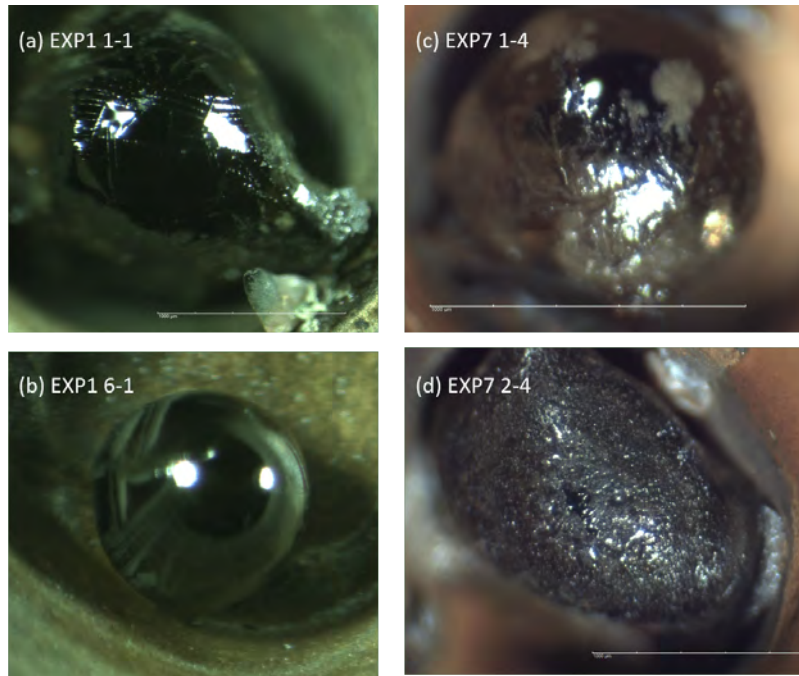


Figura 4.52: Comparación del comportamiento de las combinaciones que contienen diópsida y la enstatita a tasas de enfriamiento distintas. (a) El análogo EXP1 1-1 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1E. (b) El análogo EXP1 6-1 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1A. (c) El análogo EXP7 1-4 se reprodujo en la corrida experimental 1 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1A. (d) El análogo EXP7 2-4 se reprodujo en la corrida experimental 1 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1E.

Combinaciones con anortita

En la Figura 4.54 se muestra la comparación de análogos con combinaciones que contienen anortita a distintas tasas de enfriamiento. Se compara análogo EXP1 2-3 perteneciente a la corrida experimental 4 y con material precursor de combinación 1B (Figura 4.53 a) con el análogo EXP8 2-2 perteneciente a la corrida experimental 2 y con material precursor de combinación 1B (Figura 4.53 b). El análogo EXP1 2-3 presenta un fundido parcial y una textura barrada mientras que el análogo EXP8 2-2 presenta un fusión completa del material precursor y una textura porfídica. También se comparan el análogo EXP1 6-3 (Figura 4.53 c) perteneciente a la corrida experimental 4 y con material precursor de combinación 1F, con el análogo EXP8 3-2 perteneciente a la misma corrida experimental pero con material precursor de combinación 1F (Figura 4.53 d). El análogo EXP1 6-3 fundió en forma de esfera y

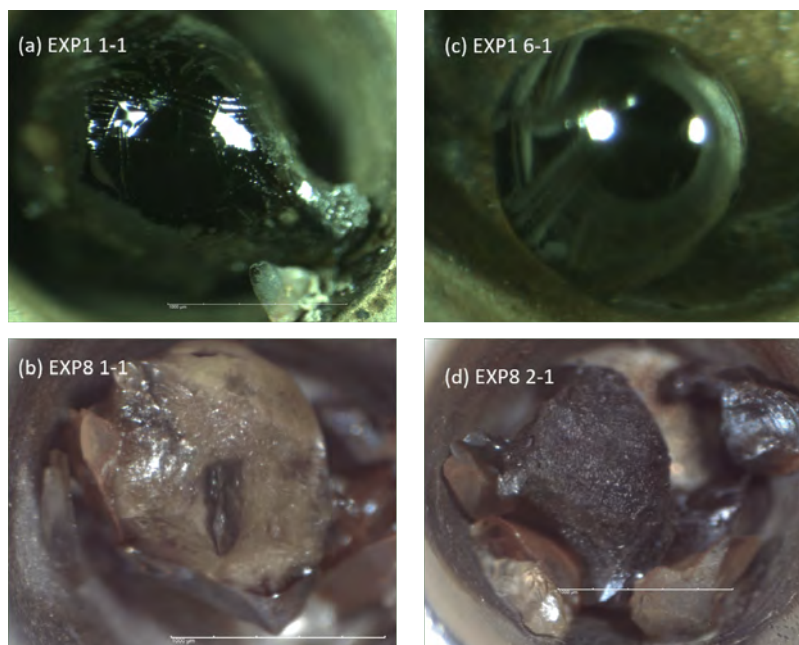


Figura 4.53: Comparación del comportamiento de las combinaciones que contienen labradorita a tasas de enfriamiento distintas. (a) El análogo EXP1 1-1 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1A. (b) El análogo EXP8 1-1 se reprodujo en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1A. (c) El análogo EXP1 6-1 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1E. (d) El análogo EXP8 2-1 se reprodujo en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1E.

presenta una textura plumosa embebida en una mesostasis vítrea mientras que el análogo EXP8 3-2 también fundió en forma de esfera, presenta una textura porfídica y tiene su superficie oxidada. En conclusión, las combinaciones con anortita actúan como buen precursor tanto en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) como en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h), ya que la mayoría de los análogos funden en forma de esfera y forman texturas similares a las de los condros naturales independientemente de la combinación de precursores que se haya usado (que incluyan anortita).

Combinaciones con oligoclasa

Se analizó el comportamiento de la oligoclasa en distintas combinaciones de precursores. En la Figura 4.55 se comparan 4 análogos cuyas combinaciones incluyen oligoclasa. El análogo EXP1 6-2 perteneciente a la corrida experimental 4 y con

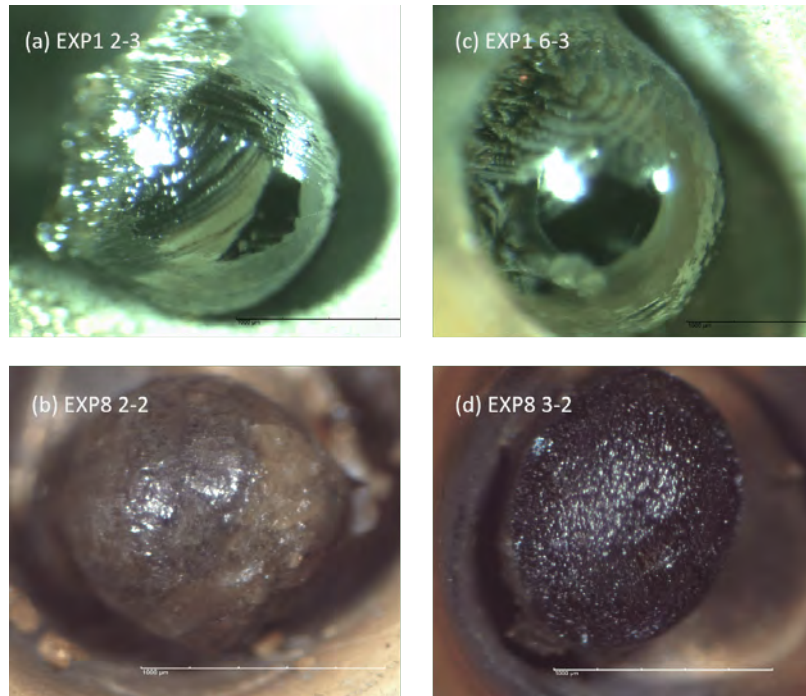


Figura 4.54: Comparación del comportamiento de las combinaciones que contienen anorita a tasas de enfriamiento distintas. (a) El análogo EXP1 2-3 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1B. (b) El análogo EXP8 2-2 se reprodujo en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1B. (c) El análogo EXP1 6-3 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1F. (d) El análogo EXP8 3-2 se reprodujo en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1F. (e) El análogo EXP1 3-3 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 4B. (d) El análogo EXP7 3-2 se reprodujo en la corrida experimental 1 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 4B.

material precursor de combinación 1G (Figura 4.55 a), éste se compara con el análogo EXP8 1-2 perteneciente a la corrida experimental 2 y con material precursor de combinación 1G (Figura 4.55 b). Por otro lado, se compara el análogo EXP1 4-2 perteneciente a la corrida experimental 4 y con material precursor de combinación 3C (Figura 4.55 c) con el análogo EXP7 2-1 perteneciente a la corrida experimental 1 y con material precursor de combinación 3C (Figura 4.55 d). La diferencia entre los análogos es muy notoria, los análogos EXP1 6-2 y EXP1 4-2, que se generaron a altas tasas de enfriamiento ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) fundieron en forma de esfera y formaron texturas barradas, mientras que los análogos EXP8 1-2 y EXP7 2-1 que se generaron a tasas de enfriamiento más lentas ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) no fundieron en forma de esfera

ni formaron textura alguna.

En conclusión, las combinaciones con oligoclasa actúan como buen precursor a tasas de enfriamiento rápidas ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h), ya que a tasas de enfriamiento lentas el material no funde en forma de esfera y quedan muchos granos relictos en la casilla. Además, se observó que los análogos que no contienen piroxeno (combinaciones 3C y 4C) alcanzan temperaturas máximas por debajo de la temperatura de liquidus. Por ejemplo, el análogo EXP1 4-2 alcanzó una $T_{max} = 974.70$ °C y el análogo EXP7 2-1 una $T_{max} = 1,299.52$ °C, esta podría ser la razón principal por la cual estos análogos no fundieron es su totalidad.

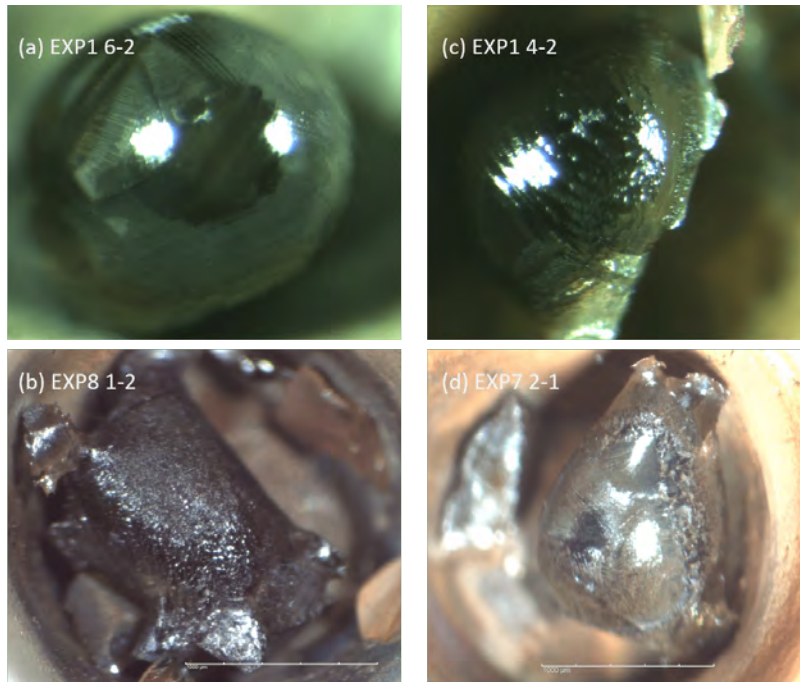


Figura 4.55: Comparación del comportamiento de las combinaciones que contienen oligoclasa a tasas de enfriamiento distintas. (a) El análogo EXP1 6-2 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1G. (b) El análogo EXP8 1-2 se reprodujo en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1G. (c) El análogo EXP1 4-2 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 3C. (d) El análogo EXP7 2-1 se reprodujo en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 3C.

Combinaciones con sodalita

Se analizó el comportamiento de la sodalita en distintas combinaciones de precursores. En la Figura 4.56 se comparan 4 análogos cuyas combinaciones incluyen sodalita. El análogo EXP3 1-1 perteneciente a la corrida experimental 4 y con material precursor de combinación 1D (Figura 4.56 a), éste se compara con el análogo EXP8 1-3 perteneciente a la corrida experimental 2 y con material precursor de combinación 1D (Figura 4.56 b). También se comparan el análogo EXP3 2-2 perteneciente a la corrida experimental 4 y con material precursor de combinación 1H (Figura 4.56 c) con el análogo EXP8 2-3 perteneciente a la corrida experimental 2 y con material precursor de combinación 1H (Figura 4.56 d). De manera general, los análogos EXP3 1-1 y EXP3 2-2, que se generaron a altas tasas de enfriamiento ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) fundieron en forma de esfera y formaron texturas barradas embebidas en una mesostasis vítrea, mientras que los análogos EXP8 1-3 y EXP8 2-3 que se generaron a tasas de enfriamiento más lentas ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) fundieron en forma semi-esférica y formaron texturas porfídicas.

Dicho lo anterior, las combinaciones con sodalita actúan como buen precursor a tasas de enfriamiento tanto lentas como rápidas. Otra característica de los experimentos hechos con sodalita es que tanto la superficie del análogo como la casilla se oxidan mostrando un color rojizo.

4.6. Análisis del efecto de los perfiles de irradiación en las texturas resultantes

Para analizar las diferencias que se tuvieron entre los dos perfiles de irradiación durante la experimentación se seleccionaron análogos con la misma combinación de precursores y tasas de enfriamiento similares, pero irradiados con distinto perfil de irradiación, para así, comparar las diferencias entre los análogos irradiados con el perfil I y los análogos irradiados con el perfil II. En la figura 4.57 se comparan algunos análogos de las corridas 1 y 2. Los análogos de la parte superior corresponden a la

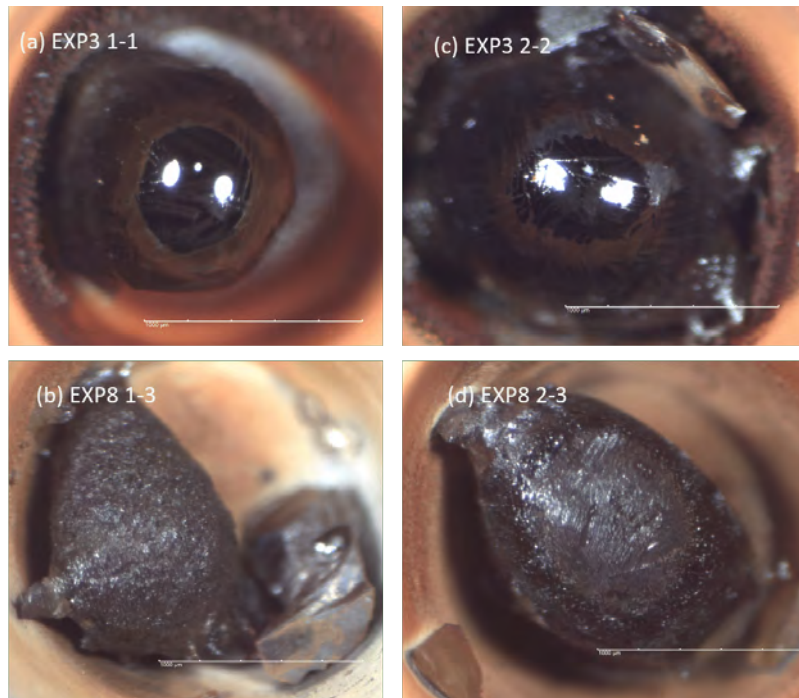


Figura 4.56: Comparación del comportamiento de las combinaciones que contienen sodalita a tasas de enfriamiento distintas. (a) El análogo EXP3 1-1 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1D. (b) El análogo EXP8 1-3 se reprodujo en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1D. (c) El análogo EXP3 2-2 se reprodujo en la corrida experimental 4 ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h) con la combinación de precursores 1H. (d) El análogo EXP8 2-3 se reprodujo en la corrida experimental 2 ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) con la combinación de precursores 1H.

corrida 1 ($\tau_c \approx 10^3$) y fueron irradiados con el perfil I y los análogos de la parte inferior corresponden a la corrida 2 ($\tau_c \approx 10^3$) y fueron irradiados con el perfil II. Se puede observar que existen ligeras diferencias entre los análogos comparados. Por ejemplo, los análogos EXP7 3-3 y EXP8 2-3 son muy similares entre sí. Sin embargo, los análogos EXP7 2-4 y EXP8 2-1 (c y d en figura 4.57) muestran una textura similar pero el grado de fusión difiere; el análogo EXP7 2-4 está completamente fundido mientras que el análogo EXP8 2-1 se encuentra parcialmente fundido. Otra diferencia notoria se ve en los análogos EXP7 2-2 y EXP8 3-2 (e y f en figura 4.57) y también en los análogos EXP7 3-2 y EXP8 1-3 (g y h en figura 4.57), ya que los análogos EXP8 3-2 y EXP8 1-3 tienen su superficie mucho más oxidada que la de los análogos EXP7 2-2 y EXP7 3-2.

En la figura 4.58 se comparan algunos análogos de las corridas 3 y 4. Los análogos

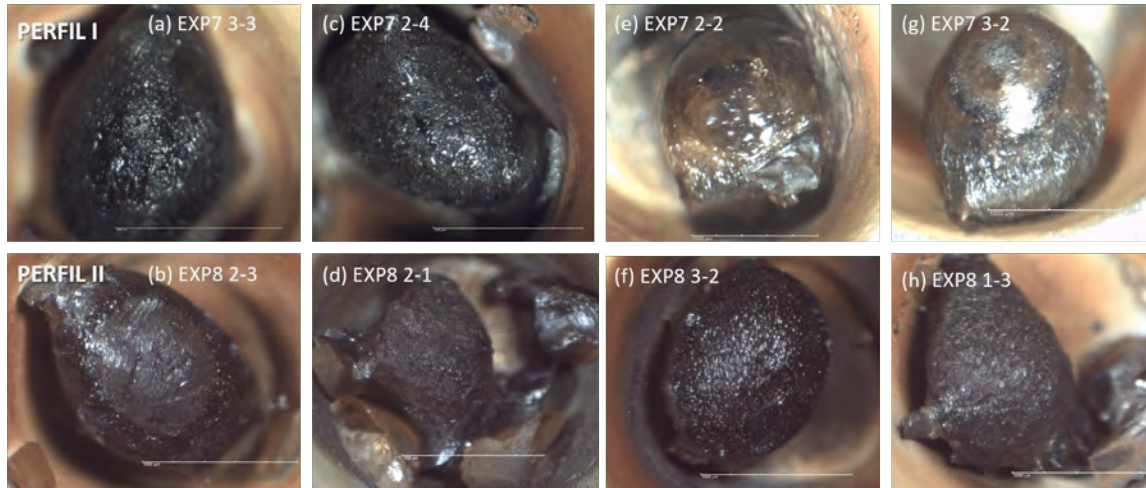


Figura 4.57: Comparación de algunos análogos de las corridas 1 y 2. Los análogos de la parte superior (corrida 1) fueron irradiados con el perfil de irradiación I a una $\tau_c \approx 10^3$. Los análogos de la parte inferior (corrida 2) fueron irradiados con el perfil de irradiación II a una $\tau_c \approx 10^3$. Los análogos a-b, c-d, e-f y g-h se realizaron con las mismas combinaciones de material precursor.

de la parte superior corresponden a la corrida 4 ($\tau_c \approx 10^4$) y fueron irradiados con el perfil II y los análogos de la parte inferior corresponden a la corrida 3 ($\tau_c \approx 10^4$) y fueron irradiados con el perfil I. Las diferencias entre los análogos son muy pocas. Los análogos EXP1 2-3 y EXP9 1-2 son muy similares entre sí. Sin embargo, los análogos EXP1 2-2 y EXP9 3-1 (c y d en figura 4.58) tienen una textura barrada pero organizada de distinta manera. Los análogos EXP1 6-3 y EXP9 2-2 (e y f en figura 4.58) tienen una textura distinta, el análogo EXP1 6-3 tiene una textura plumosa mientras que el análogo EXP9 2-2 tiene una textura barrada. Por último, los análogos EXP1 4-2 y EXP9 2-1 (g y h en figura 4.58) se encuentran parcialmente fundidos, pero el análogo EXP1 4-2 alcanzó a formar algunas barras mientras que el otro no.

4.7. Relación entre la tasa de enfriamiento y las texturas de los condros

Como se vio en la Figura 1.7 existe una dependencia entre la textura de los condros y la tasa de enfriamiento. Recapitulando lo dicho en la sección 1.2.2, los

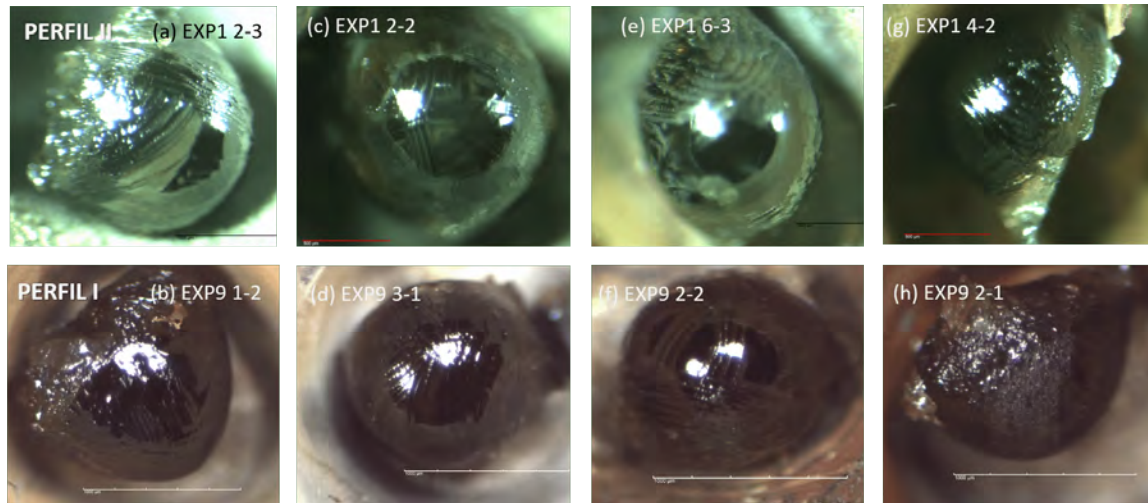


Figura 4.58: Comparación de algunos análogos de las corridas 3 y 4. Los análogos de la parte superior (corrida 4) fueron irradiados con el perfil de irradiación II a una $\tau_c \approx 10^4$. Los análogos de la parte inferior (corrida 3) fueron irradiados con el perfil de irradiación I a una $\tau_c \approx 10^4$. Los análogos a-b, c-d, e-f y g-h se realizaron con las mismas combinaciones de material precursor.

experimentos que han reproducido texturas porfídicas muestran que el intervalo en el que se forman está entre 1 - 1,000 °C/h, los experimentos que han reproducido texturas barradas coinciden en que las tasas de enfriamiento se encuentran delimitadas entre 500 - 3,000 °C/h. En cambio, las tasas de enfriamiento de las texturas radiales pueden encontrarse donde sea (según los resultados experimentales mostrados en la Figura 1.7 entre 5 - 3,000 °C/h). Sin embargo, también hay que tomar en cuenta lo que menciona Jones et al. (2018): “es posible obtener las mismas texturas mediante calentamiento más intenso y tiempos más cortos”. En esta tesis se estudiaron 3 tasas de enfriamiento (τ_c) representativas que son $\tau_c \approx 10^3$ °C/h (corridas 1 y 2), $\tau_c \approx 5 \times 10^3$ °C/h (corrida 5) y $\tau_c \approx 10^4$ °C/h (corridas 3 y 4). A continuación se representan gráficamente, mediante histogramas de distribución, las texturas formadas según la tasa de enfriamiento utilizada. Se analizan las texturas barradas de olivino (BO) (que también incluye las morfologías cola de golondrina y plumosas), porfídicas de olivino (PO), la combinación entre BO y PO, la combinación entre barradas y olivino y criptocristalinas (BO y CC), criptocristalinas (CC), texturas radiales de piroxeno (RP) y texturas no reconocidas (Otras). En la Figura 4.59 se muestra el histograma de la distribución de texturas para una $\tau_c \approx 10^3$ °C/h. En total se muestran 17

análogos (análogos de las corridas experimentales 1 y 2) , de los cuales 6 presentaron tanto textura PO como BO en su superficie, 6 de ellos presentaron sólo textura PO, 2 análogos presentaron textura BO y CC, sólo se formó un análogo BO, un análogo no presentó textura definida. Además, no se formaron texturas RP ni CC.

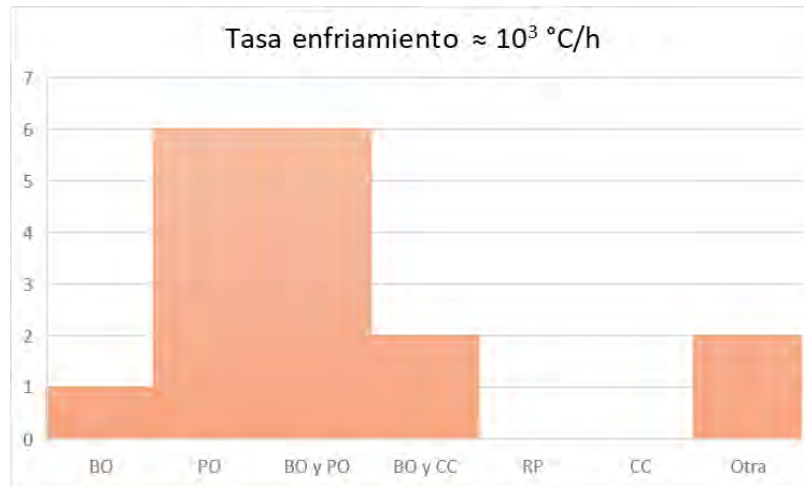


Figura 4.59: Histograma del tipo de texturas que se observaron en los análogos de condros reproducidos con una tasa de enfriamiento de $\tau_c \approx 10^3$ °C/h : BO= Análogos con textura barrada; PO= Análogos con textura porfídica; BO y PO= Análogos que presenta tanto textura barrada como porfídica; BO y CC= Análogos con textura barrada y criptocristalina; RP= Análogos con textura radial; V= Análogos criptocristalinos; Otra= Análogos con texturas no definidas.

En la Figura 4.60 se muestra el histograma de la distribución de texturas para una $\tau_c \approx 10^4$ °C/h. En total se muestran 25 análogos (análogos de las corridas experimentales 3 y 4), 7 de ellos presentaron sólo textura BO, 10 análogos presentaron textura BO y CC, se formaron 3 análogos con textura RP, otros 3 análogos con textura CC, sólo un análogo presentó una textura con combinación PO y BO, y un análogo presentó textura no definida. Además, no se formaron texturas PO.

En la Figura 4.61 se muestra el histograma de la distribución de texturas para una $\tau_c \approx 5 \times 10^3$ °C/h. En total se muestran 15 análogos (análogos de la corrida experimental 5), 6 de ellos presentaron sólo textura BO, 5 análogos presentaron textura BO y zonas vítreas, sólo un análogo presentó textura RP, otro análogo presentó una textura con combinación PO y BO, y un análogo presentó textura no definida. Además, no se formaron texturas PO.

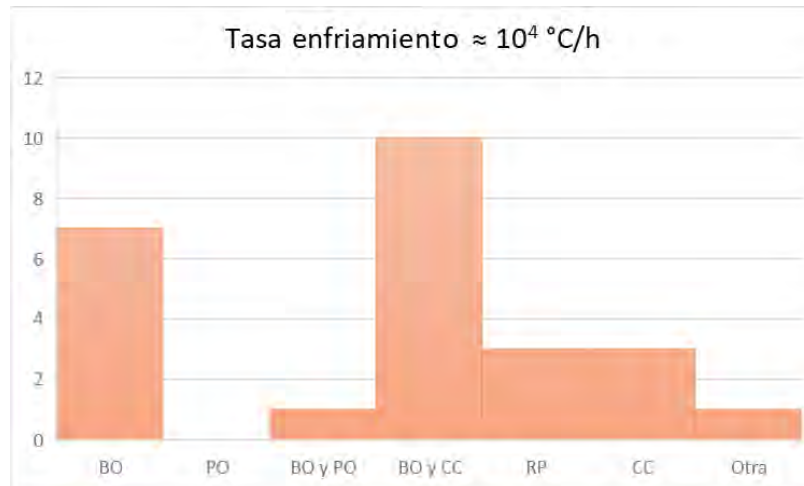


Figura 4.60: Histograma del tipo de texturas que se observaron en los análogos de condros reproducidos con una tasa de enfriamiento de $\tau_c \approx 10^4 \text{ }^\circ\text{C/h}$: BO= Análogos con textura barrada; PO= Análogos con textura porfídica; BO y PO= Análogos que presenta tanto textura barrada como porfídica; BO y CC= Análogos con textura barrada y criptocristalina; RP= Análogos con textura radial; V= Análogos criptocristalinos; Otra= Análogos con texturas no definidas.

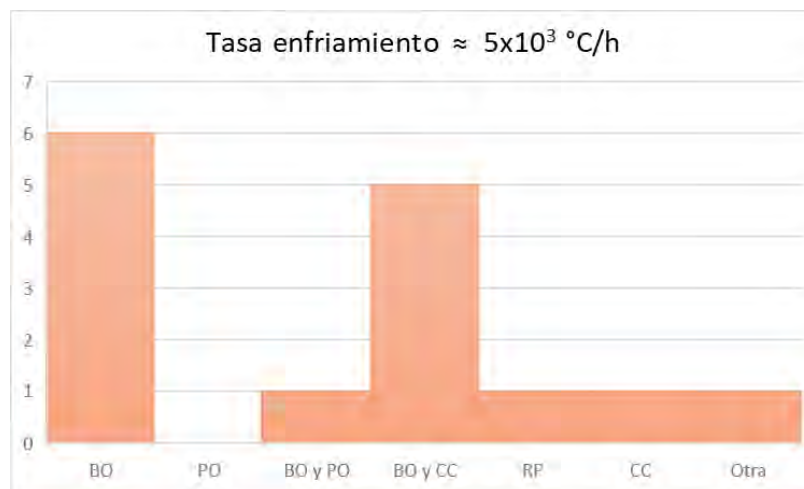


Figura 4.61: Histograma del tipo de texturas que se observaron en los análogos de condros reproducidos con una tasa de enfriamiento de $\tau_c \approx 5 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C/h}$: BO= Análogos con textura barrada; PO= Análogos con textura porfídica; BO y PO= Análogos que presenta tanto textura barrada como porfídica; BO y CC= Análogo con textura barrada y criptocristalina; RP= Análogos con textura radial; V= Análogos criptocristalinos; Otra= Análogos con texturas no definidas.

Dicho lo anterior, en el trabajo experimental realizado en esta tesis se obtuvieron nuevos rangos de las tasas de enfriamiento para reproducir las texturas de los condros. Como se mencionó al inicio de este capítulo, las texturas porfídicas reportadas en la

literatura se forman a tasas de enfriamiento entre 1 - 1,000 °C/h, por lo que las tasas de enfriamiento de esta tesis para texturas porfídicas están dentro de ese intervalo. Las tasas de enfriamiento de las texturas barradas reportadas en la literatura se encuentran entre 500 - 3,000 °C/h. Sin embargo, en este trabajo de tesis se lograron reproducir texturas barradas dentro de ese intervalo, pero también se lograron reproducir a tasas de enfriamiento de $\approx 10^4$ °C/h que claramente exceden ese intervalo. El intervalo de las tasas de enfriamiento de las texturas radiales en la literatura es muy amplio (entre 5 - 3,000 °C/h), las pocas texturas RP que se formaron en este trabajo de tesis fueron a tasas de enfriamiento de $\approx 10^4$ °C/h, por lo que también supera el rango que se tenía delimitado en la literatura. La razón por la cual se reprodujeron pocos análogos con textura RP, puede deberse a que en todas las muestras el contenido de olivino siempre fue mayor que el de piroxeno. De manera general, la tendencia indica que a tasas de enfriamiento mayores se obtiene texturas barradas, radiales o criptocristalinas, y a tasas menores se obtienen texturas porfídicas.

Capítulo 5

Discusión y Conclusiones

5.1. Discusión

5.1.1. Acerca de los parámetros experimentales

Estudios experimentales han demostrado que la temperatura máxima y la tasa de enfriamiento son los parámetros principales que controlan la fusión y las texturas resultantes de los condros ([Radomsky et al., 1990](#); [Connolly y Jones, 2016](#)). Las texturas de los condros están fuertemente relacionadas con las tasas de enfriamiento dentro del rango $10 - 10^4$ °C/h. Las texturas varían gradualmente conforme la tasa de enfriamiento aumenta. Para tasas de enfriamiento menores tienden a formarse condros con texturas porfídicas y conforme la tasa de enfriamiento aumenta resultan condros con texturas barradas o radiales. Para visualizar lo dicho anteriormente, en la Figura 5.1 se muestra un multihistograma del tipo de texturas que se formaron en los análogos de condros reproducidos en este trabajo de tesis (véase sección 4.7), con tasas de enfriamiento de $\tau_c \approx 10^3$ °C/h, $\tau_c \approx 5 \times 10^3$ °C/h y $\tau_c \approx 10^4$ °C/h.

Respecto al material precursor, en todas las corridas experimentales se usaron precursores de grano grueso (los granos gruesos son aquellos que tienen un diámetro $>100 \mu\text{m}$) entre $250 - 500 \mu\text{m}$, por lo tanto, no todos los granos pesan lo mismo. Por ende, fue difícil lograr que todas las muestras pesaran lo mismo y tuvieran la misma cantidad de precursores. El intervalo de masas ideal para formar análogos, en los que

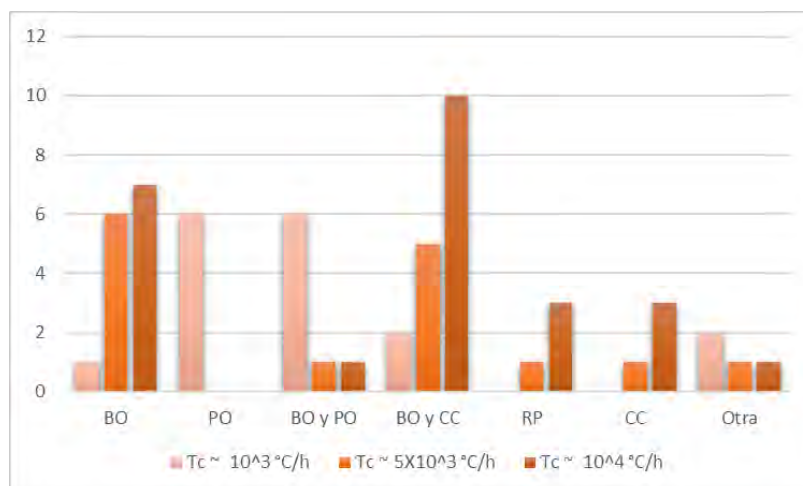


Figura 5.1: Multihistograma del tipo de texturas que se observaron en los análogos de condros reproducidos en este trabajo de tesis, con tasas de enfriamiento de $\tau_c \approx 10^3 \text{ }^\circ\text{C/h}$, $\tau_c \approx 5 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C/h}$ y $\tau_c \approx 10^4 \text{ }^\circ\text{C/h}$. BO= Análogos con textura barrada; PO= Análogos con textura porfídica; BO y PO= Análogos que presenta tanto textura barrada como porfídica; BO y CC= Análogo con textura barrada y criptocristalina; RP= Análogos con textura radial; V= Análogos criptocristalinos; Otra= Análogos con texturas no definidas.

se funda la mayor parte de su material y queden muy pocos o ningún grano relicto, está entre 1.2 mg y 6.2 mg, ya que para masas mayores (mayor número de granos precursores) muchos granos permanecen sin fundir.

Las tasas de enfriamiento de los análogos de condros sujetos a las condiciones experimentales de este trabajo de tesis, varían entre $9.81 \times 10^2 \text{ }^\circ\text{C/h}$ y $1.98 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C/h}$. Durante el enfriamiento, la muestra pierde la mayor parte de su energía en el rango del infrarrojo, es por eso que se calcula la longitud de onda a la que emite cada muestra. Como se menciona en la sección 5.1.3 se planifica adecuar un espectrómetro a Citlalmitl para evaluar la pérdida de energía por radiación y poder obtener el espectro del análogo en tiempo real. La eficiencia de absorción de los precursores no se ha podido controlar durante la experimentación, algunos factores que pueden influir en ésta son la orientación cristalográfica de los granos precursores, la posición exacta de los granos en la casilla del portamuestras y el gas retenido dentro de los granos precursores.

Recordando, el objetivo principal de este trabajo de tesis es comprobar si el modelo de onda de choque puede reproducir análogos con las texturas observadas en los

condros naturales. Para ello, se realizaron cinco corridas experimentales similares entre sí (ver sección 3) variando el perfil de irradiación utilizado, ya sea el perfil I o perfil II (2.3), variando la tasa de enfriamiento y variando la combinación de precursores utilizada en cada corrida experimental.

Respecto a los perfiles de irradiación utilizados, tanto el perfil I como el perfil II simulan las historias térmicas del modelo de onda de choque, con la diferencia de que la tasa de enfriamiento del perfil I decae de forma no lineal, mientras que la tasa de enfriamiento del perfil II decae de manera lineal. Cuando se comparan los análogos resultantes con una composición y una tasa de enfriamiento similares pero irradiadas con los distintos perfiles de irradiación, se observan ligeras diferencias ya sea en el grado de fusión o incluso en las texturas. El punto a recalcar es que a pesar de esas ligeras diferencias, ambos perfiles de irradiación son capaces de reproducir análogos de condros con texturas observadas en los condros naturales.

Además, se observó que, dado el mismo perfil de irradiación, los tiempos de irradiación más largos (corridas experimentales 1 y 2) implican un control más preciso de la temperatura, esto se muestra por la concordancia que existe entre las historias térmicas y los perfiles de irradiación que se muestran en el capítulo 4 y en el apéndice A. Por otro lado, las historias térmicas de los análogos que se formaron con tasas de enfriamiento rápidas (corridas 3, 4 y 5), se desvían de la tendencia que sigue el perfil del duty cycle y el perfil de potencia. Por ejemplo, algunos de estos perfiles presentan un pico de temperatura en determinado tiempo, otros presentan varios picos consecutivos, otros tienen forma de meseta, etc. La razón más probable que explique por qué los perfiles de temperatura no siguen la tendencia del perfil de duty cycle, es la combinación del material precursor utilizada.

Dicho lo anterior, se analizaron las historias térmicas de la corrida 4, ya que es la corrida que tiene mayor número de experimentos y con tasas de enfriamiento rápidas, las cuales provocan que las historias térmicas no sigan la misma tendencia que el perfil del duty cycle y el perfil de potencia. De este análisis se obtuvo que las historias térmicas de los análogos cuyas combinaciones de material precursor contienen soldalita, (a, b y c en Figura 5.2), presentan varios picos consecutivos entre 250 y 600 segundos.

También se observó que las historias térmicas de los análogos cuyas combinaciones de material precursor contienen oligoclasa, (d, e y f en Figura 5.2), presentan una forma de meseta entre los 200 y los 700 segundos. Otra de las observaciones fue que las historias térmicas de los análogos cuyas combinaciones de material precursor contienen anortita (g, h e i en Figura 5.2), muestran un pico que comienza desde los 900°C y alcanza una T_{max} entre 1,000 °C y 1,200 °C, antes de los 200 segundos. Una vez hecho el análisis anterior, se concluye que la combinación del material precursor afecta la forma de la historia térmica. Una posible explicación para esto, es que el material precursor esté sufriendo cambios de fase durante la irradiación y estos cambios de fase se reflejen en la forma de la historia térmica (picos, mesetas, etc). Sin embargo, para corroborar lo anterior, sería necesario la implementación de un sistema diseñado para medir la radiación infrarroja de las muestras, que es uno de los planes a futuro que se tienen contemplados para mejorar Citalmitl.

Por ultimo, es necesario recordar que todos los experimentos fueron hecho a una presión de 0.76 atm (presión ambiente de la Ciudad de México) y el material precursor utilizado en mayor cantidad fue olivino rico en Mg (pobre en Fe), por lo que todos los análogos de condros resultantes pueden clasificarse como tipo I (bajo contenido en FeO) (Lauretta et al., 2006). Anteriormente se había reportado en la literatura la reproducción experimental de análogos de condros de tipo II a presiones de 1 bar (p.ej. Tsuchiyama et al., 1980). Por lo tanto, se puede afirmar que es posible crear análogos de condros a presiones altas que tengan morfologías y texturas similares a las de los condros naturales.

5.1.2. Acerca de las propiedades de los análogos

De los 57 análogos de condros creados, se seleccionaron 9 análogos representativos de cada corrida experimental que formaron texturas similares a las de los condros naturales. Dichos análogos fueron sometidos a análisis con el MEB y con el microscopio petrográfico, por lo que se tiene información más detallada de la morfología y textura de estos análogos. Por ello, en esta sección se discuten y se comparan las propiedades de estos 9 análogos representativos con las propiedades de los análogos

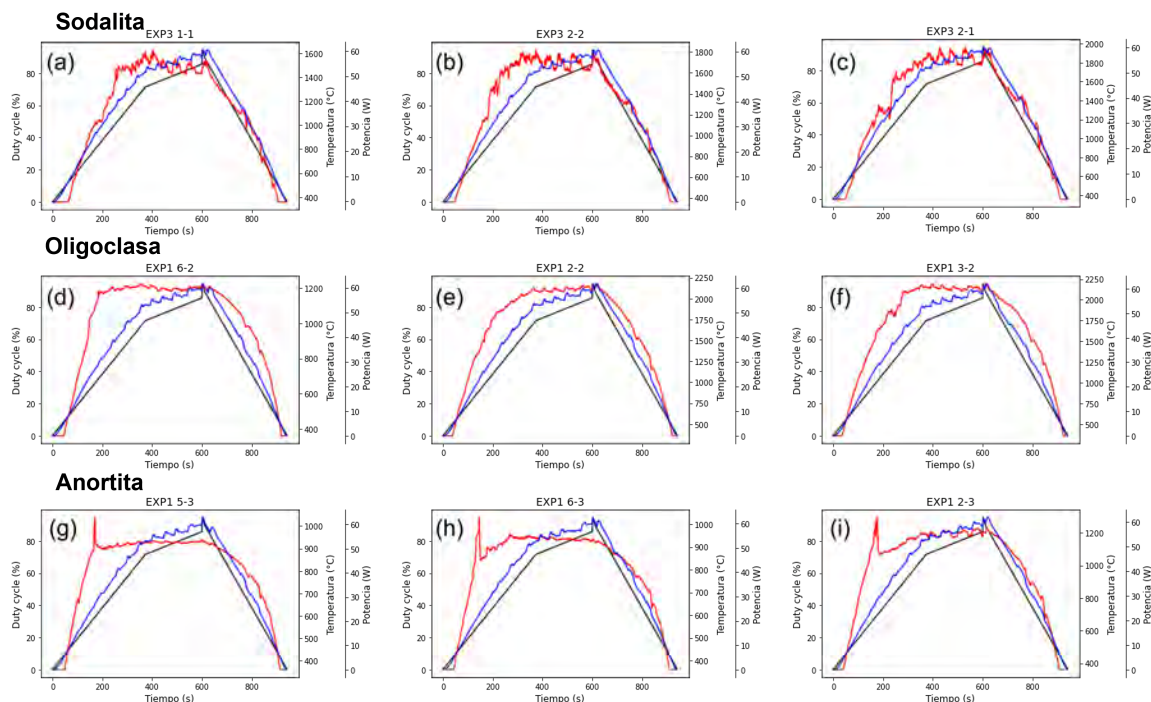


Figura 5.2: Dependencia del tipo de combinación de material precursor con la forma de la historia térmica. (a, b y c) Ejemplos de la similitud que existe entre las historias térmicas de los análogos cuya combinaciones de material precursor contiene sodalita. (d, e y f) Ejemplos de la similitud que existe entre las historias térmicas de los análogos cuyas combinaciones de material precursor contiene oligoclasa. (g, h e i) Ejemplos de la similitud que existe entre las historias térmicas de los análogos cuyas combinaciones de material precursor contienen anortita.

obtenidos experimentalmente en la literatura y de algunos condros naturales.

En la figura 5.3 se muestra una gráfica de la temperatura máxima que alcanzaron los análogos representativos contra la tasa de enfriamiento de cada análogo. También se muestra el desarrollo de las texturas obtenidas.

Dos de los análogos analizados con el MEB y con el microscopio petrográfico se consideran criptocristalinos, El análogo EXP1 6-1 tiene una $T_{max} = 1,421.20 \text{ }^\circ\text{C}$ y una $\tau_c = 1.18 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C/h}$ (combinación de precursores 1E), mientras que el análogo EXP1 4-1 tiene una $T_{max} = 1,238.07 \text{ }^\circ\text{C}$ y una $\tau_c = 9.88 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C/h}$ (combinación de precursores 4A). El hecho de que los análogos sean vítreos puede deberse a que las tasas de enfriamiento sean muy altas o incluso a las combinaciones de precursores utilizadas. Los análogos EXP1 6-1 y EXP1 4-1 se pueden comparar con los condros de olivino rico en vidrio, como los condros de la Figura 10 columna derecha de Radomsky

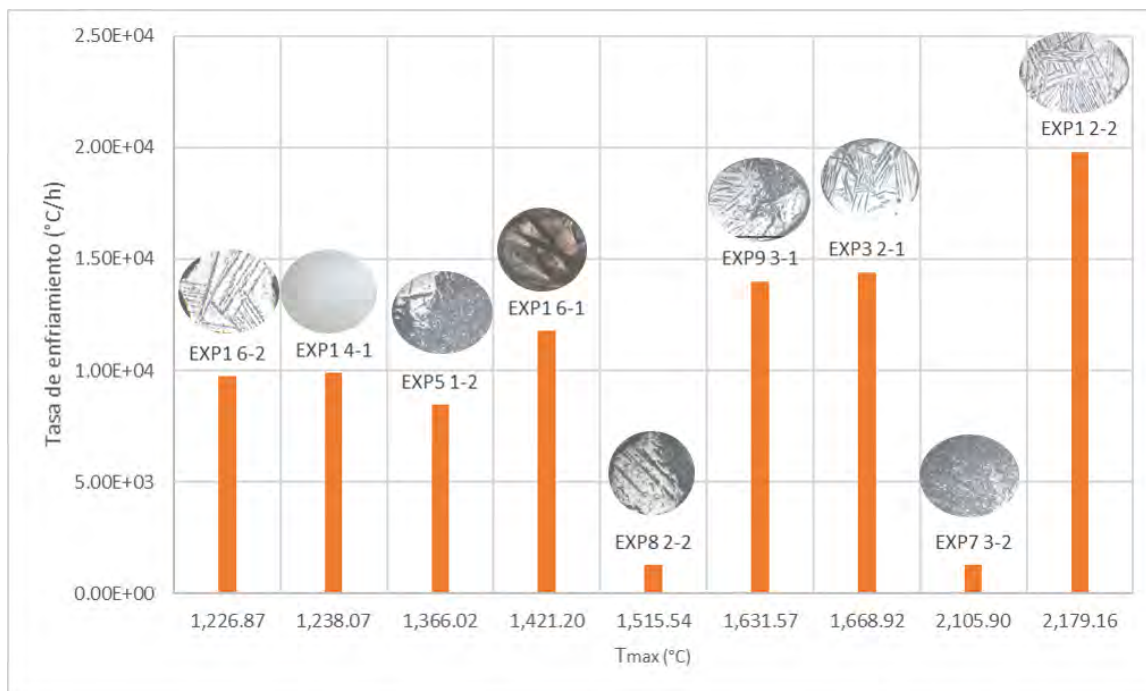


Figura 5.3: Gráfico de temperatura máxima contra tasa de enfriamiento para los análogos representativos.

et al. (1990), con el condro CC, proveniente de la condrita Hammadah al Hamra (a en Figura 2 de Hewins et al. (2005)). También se pueden comparar con los condros naturales CC de la Figura 1.3 de Jones et al. (2018), que es la Figura 1.5 de esta tesis. En la Figura 5.4 se compara la textura del análogo EXP1 4-1 (e), obtenida en este trabajo de tesis con la textura CC del condro proveniente de la condrita Hammadah al Hamra (f) (tomada de Hewins et al., 2005).

Cinco de los análogos analizados con el MEB y con el microscopio petrográfico muestran una textura barrada. El análogo EXP1 2-2 alcanzó una $T_{max} = 2,179.16$ °C y una $\tau_c = 1.98 \times 10^4$ °C/h (combinación de precursores 1C). El análogo EXP1 6-2 alcanzó una $T_{max} = 1,226.87$ °C y una $\tau_c = 9.76 \times 10^3$ °C/h (combinación de precursores 1G). El análogo EXP3 2-1 alcanzó una $T_{max} = 1,668.92$ °C y una $\tau_c = 1.44 \times 10^4$ °C/h (combinación de precursores 2D). El análogo EXP9 3-1 alcanzó una $T_{max} = 1,631.57$ °C y una $\tau_c = 1.4 \times 10^4$ °C/h (combinación de precursores 1G). El análogo EXP5 1-2 alcanzó una $T_{max} = 1,366.02$ °C y una $\tau_c = 5.95 \times 10^3$ °C/h (combinación de precursores 4D). Los análogos EXP1 2-2, EXP3 2-1 y EXP9 3-1 tienen una T_{max} mayor a T_{liq} y

tasas de enfriamiento muy altas, razones por las cuales se formaron texturas barradas. El análogo EXP1 6-2 alcanzó una T_{max} menor a T_{liq} , sin embargo, la textura que formó fue la de cola de golondrina. El análogo EXP5 1-2 alcanzó una T_{max} menor a T_{liq} , esto se debe a que se usó la combinación de precursores 4D (Ol + So), la cual no contiene piroxeno ni espinela. Las texturas barradas de estos análogos se puede comparar con las muestras b, c y d en la Figura 5 de [Tsuchiyama et al. \(1980\)](#), quien obtuvo texturas barradas a tasas de enfriamiento (τ_c) entre 2,700 °C/h y 7,200 °C/h y una duración de calentamiento menor a 10 minutos alcanzando una $T_{max} = 1,500$ °C. También se pueden comparar con las Figuras 2, 4 6 y 7 de [Tsuchiyama et al. \(2004\)](#) quien obtuvo texturas barradas a una $\tau_c = 1,000$ °C/h y un calentamiento de 10 minutos alcanzando una $T_{max} = 1,338$ °C/h. [Hewins et al. \(2005\)](#) también obtuvo experimentalmente texturas barradas a una $\tau_c = 1,000$ °C/h y un calentamiento de 10 minutos alcanzando una $T_{max} \approx 1,500$ °C. De igual forma, los cinco análogos se puede comparar con las muestras de la figura 3 obtenidas por [Lofgren et al. \(1990\)](#), que fueron credos a tasas de enfriamiento de 1,464 °C/h y 2,457 °C/h, con un tiempo de calentamiento de 15 a 30 minutos alcanzando una $T_{max} \approx 1,600$ °C. Por último, estos análogos se comparan con los condros naturales (h), (e), e (i) en la Figura 2 de [Lauretta et al. \(2006\)](#) o también con la Figura 1.3 (BO) de [Jones et al. \(2018\)](#), que es la figura 1.5 de esta tesis. En la figura 5.4 se compara la textura BO del análogo EXP1 2-2 (a), obtenida en este trabajo de tesis con la textura BO de un condro natural proveniente de la condrita ALHA 77249 (tomada de [Lofgren et al., 1990](#)).

Por último, dos de los análogos analizados con el MEB y con el microscopio petrográfico muestran una textura tanto PO como BO. El análogo EXP7 3-2 tiene una $T_{max} = 2,105.90$ °C y una $\tau_c = 1.27 \times 10^3$ °C/h (combinación de precursores 1D). El análogo EXP8 2-2 tiene una $T_{max} = 1,515.54$ °C y una $\tau_c = 1.29 \times 10^3$ °C/h (Figura 4.35) (combinación de precursores 1B). [Connolly y Hewins \(1991\)](#) denominan a este tipo texturas como *texturas de transición*, que son aquellas que contienen una sola fase sólida y tienen una textura intermedia entre dos tipos texturales. Por ello, los análogos EXP7 3-2 y EXP8 2-2 se pueden comparar con las texturas de las Figuras 5 de [Connolly y Hewins \(1991\)](#), cuyas texturas se obtuvieron a una $\tau_c = 500$ °C/h y un

tiempo de calentamiento de 12 minutos alcanzando una $T_{max} = 1,556$ °C. En la figura 8 de Connolly y Hewins (1991) se muestran dos condros naturales de ALH83007.5 y LEW86018.24, los cuales tienen texturas en transición de BO a PO. Los análogos EXP7 3-2 y EXP8 2-2 también se pueden comparar con las muestras d y f en la Figura 2 de Lauretta et al. (2006). En la figura 5.4 se compara la textura de transición del análogo EXP8 2-2 (c), obtenida en este trabajo de tesis con la textura de transición de un condro natural proveniente de la condrita LEW86018.24 (d) (tomada de Connolly y Hewins, 1991).

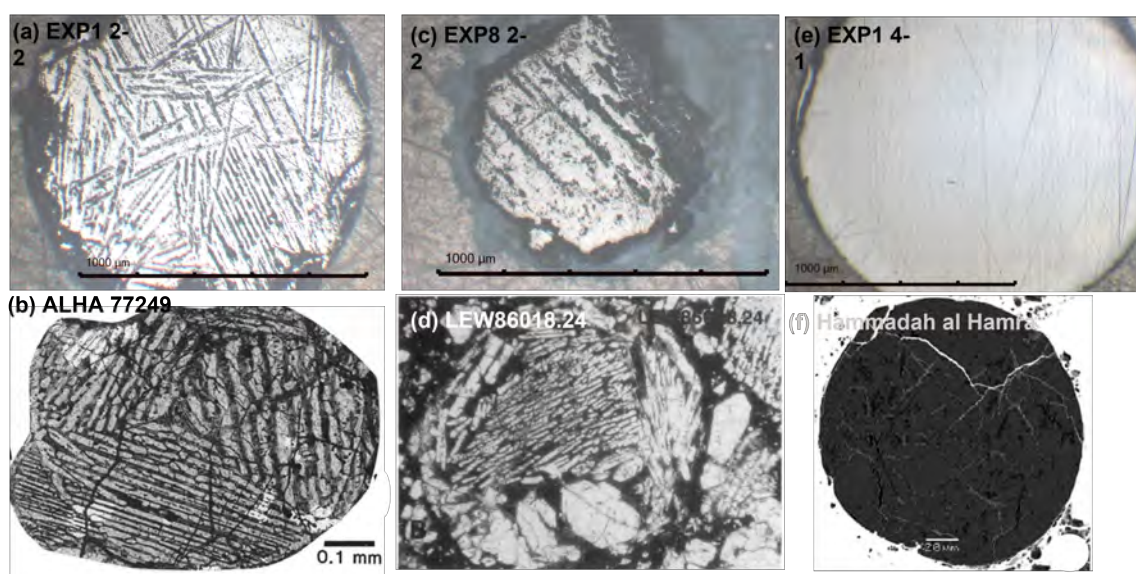


Figura 5.4: Comparación de las texturas obtenidas en este trabajo de tesis comparadas con las texturas de los condros naturales. (a y b) Comparación de la textura BO del análogo EXP1 2-2 y de un condro natural proveniente de la condrita ALHA 77249. (c y d) Comparación de la textura de transición (BO y PO) del análogo EXP8 2-2 y de un condro natural proveniente de la condrita LEW86018.24. (e y f) Comparación de la textura CC del análogo EXP1 4-1 y de un condro natural proveniente de la condrita Hammadah al Hamra.

Con respecto a la composición mineralógica de los análogos representativos, se realizó el cálculo de la norma CIPW para obtener la posible mineralogía normativa (Tabla 4.2) y poder de esta forma verificar la presencia de estos minerales por medio de la espectroscopia micro-Raman (sección 4.4). Para el análogo EXP1 4-1 se obtuvo una mineralogía normativa de olivino, enstatita, feldespato y nefelina. Mientras que los análisis de Raman del análogo EXP1 4-1 presentan espectros que son consistentes con la formación de piroxeno, labradorita y bandas fuertes de H_2O . Para el análogo

EXP1 2-2 se obtuvo una mineralogía normativa de olivino, piroxenos, feldespato y una pequeña cantidad de corindón. Por otro lado, los análisis Raman del análogo EXP1 2-2 presentan espectros que son consistentes con la formación de olivino en las barras y de olivino y oligoclasa en la mesostasis. Para el análogo EXP1 6-2 se obtuvo una mineralogía normativa de olivino, enstatita feldespato y corindón. Mientras que los análisis de Raman del análogo EXP1 6-2 presentan espectros consistentes con la formación de olivino en las barras, mientras que en la mesostasis presenta espectros consistentes con la formación tanto de olivino como de piroxeno . Para el análogo EXP3 2-1 se obtuvo una mineralogía normativa de olivino, diopsida, feldespato, nefelina y pequeñas cantidades de ilmelita. Por otro lado, los análisis Raman del mismo análogo presentan un espectro consistente con la formación de olivino en las barras, mientras que en la mesostasis presentan un espectro con bandas intensos consistentes con la formación de piroxeno y de sodalita y bandas de H₂O de menor intensidad. Para el análogo EXP9 3-1 se obtuvo una mineralogía normativa de olivino, enstatita, feldespato y pequeñas cantidades de corindón. Mientras que los análisis por espectroscopia Raman del análogo EXP9 3-1 solo presentan espectros consistentes con la formación de olivino en las barras y espectros consistentes con la formación de olivino y piroxeno en la mesostasis. Para el análogo EXP7 3-2 se obtuvo una mineralogía normativa de olivino, diópsida, feldespato, nefelina y una pequeña cantidad de ilmelita. Mientras que los análisis de Raman de este mismo análogo presentan espectros consistentes con la formación de olivino, feldespato y hematita. Para el análogo EXP8 2-2 se obtuvo una mineralogía normativa de olivino, piroxenos, feldespatos y una pequeña cantidad de ilmelita. Por otro lado, los análisis Raman del análogo EXP8 2-2 presentan un espectro consistente con la formación de olivino en las barras y una mesostasis con espectros que son consistentes con la formación de vidrio feldespático. Por último, para el análogo EXP5 1-2 se obtuvo una mineralogía normativa de olivino, feldespato, nefelina y un pequeña cantidad de Na₂SiO₃. Mientras que los análisis Raman de este análogo presentan espectros que son consistentes con la formación de olivino, piroxeno y bandas de H₂O entre 2,800 cm⁻¹ y 3,000 cm⁻¹.

Dicho lo anterior, es evidente que los resultados de la mineralogía normativa ob-

tenidos con la norma CIPW predicen la formación de los principales minerales que se observan en los análisis de Raman, los cuales son olivino, piroxenos y feldespatos. Sin embargo, los resultados de la norma difieren de los análisis Raman al predecir la existencia de minerales como corindón, nefelina, ilmelita y Na_2SiO_3 , ya que estos no fueron detectados mediante espectroscopia Raman.

5.1.3. Acerca de Citlalmitl

El dispositivo experimental Citlalmitl tiene como objetivo reproducir condros de la manera más realista posible. Por ello, desde que se construyó ha tenido mejoras en su automatización. La ventaja enorme que tiene Citlalmitl sobre otros dispositivos experimentales que incluyen tecnología láser es que Citlalmitl permite la programación de los perfiles de irradiación deseados. Estos perfiles de irradiación pueden ser basados en los modelos propuestos en la literatura para probar su efectividad en la formación de condros. Tales perfiles de irradiación pueden simular, como en el caso de este trabajo de tesis, el perfil de onda de choque, con tasas de enfriamiento tanto lineales como no lineales. Algunos planes futuros que se tienen en mente para mejorar Citlalmitl son los siguientes:

- El diseño de un arreglo óptico motorizado para el apuntado del pirómetro, logrando con esto que Citlalmitl se pueda operar de modo completamente automático y remotamente para obtener mediciones de la temperatura mucho más precisas.
- Que Citlalmitl sea capaz de simular las condiciones de la región de la nebulosa solar en la cual se dio la formación de los condros, por ejemplo la simulación de una atmósfera de H_2 dentro de la cámara de vacío.
- La implementación de un sistema diseñado para medir la radiación infrarroja de la muestra durante el proceso de irradiación, con el fin de obtener historias térmicas resueltas espectralmente.

- La instalación de una cámara infrarroja que pueda mostrar la formación de los análogos en tiempo real.

5.2. Conclusiones

En este trabajo de tesis se comprobó que las historias térmicas predichas por los modelos de onda de choque de formación de condros si pueden reproducir análogos de condros con características morfológicas y texturales similares a las de los condros naturales.

Se probaron dos perfiles de irradiación que simulan las historias térmicas predichas por los modelos de onda de choque, el perfil I y el perfil II, cuya diferencia está en que la tasa de enfriamiento decae de manera lineal y no lineal, respectivamente. Se demostró que la caída (ya sea lineal o no lineal) de la tasa de enfriamiento de los dos perfiles de irradiación, tiene un ligero impacto en las texturas resultantes de los análogos de condros, ya que las texturas de los análogos, en los cuales la única variable fue el perfil de irradiación, no son iguales. A pesar de eso, ambos perfiles de irradiación son capaces de reproducir análogos de condros con texturas similares a las de los condros naturales.

También se comprobó la eficacia de la irradiación por láser para crear análogos de condros, permitiendo obtener tasas de calentamiento y enfriamiento rápidas que son predichas por los modelos de formación de condros.

Se corroboró que el dispositivo experimental Citlalmitl es capaz de controlar la intensidad de radiación que le llega a la muestra a través de la programación de perfiles de irradiación para imitar las condiciones térmicas predichas por los modelos de formación de condros. Esto permite que Citlalmitl pueda reproducir no sólo el perfil de onda de choque, sino cualquier perfil que se desee. Además, Citlalmitl puede medir exitosamente la historia térmica de las muestras durante el proceso de irradiación, lo cual es algo nuevo en los experimentos reportados de este tipo.

Se reprodujeron texturas porfídicas a tasas de enfriamiento que se encuentran dentro del intervalo de tasas de enfriamiento reportadas en la literatura (1 - 1,000

°C/h). Además, se reprodujeron texturas barradas dentro del intervalo de tasas de enfriamiento reportadas en la literatura (500 - 3,000 °C/h) y también a tasas de enfriamiento mucho mayores ($\approx 10^4$ °C/h), lo cual amplía el intervalo de tasas de enfriamiento que se han reportado en la literatura hasta el momento.

Las historias térmicas con tasas de enfriamiento menores (corridas experimentales 1 y 2) reproducen el perfil del duty cycle de manera precisa, ya que siguen una tendencia cercana a éste, mientras que las historias térmicas creadas con tasas de enfriamiento más altas (corridas 3, 4 y 5) tienden a desviarse del perfil del duty cycle. Analizando la forma de las historias térmicas, se concluyó que la combinación del material precursor afecta la forma de la historia térmica. Una posible explicación para esto, es que el material precursor esté sufriendo cambios de fase durante la irradiación y estos cambios de fase se reflejen en la forma de la historia térmica. Esta posibilidad podrá estudiarse una vez que Ciltlamitl tuviera instalada una cámara infrarroja para observar en tiempo real la irradiación de las muestras.

Después de analizar los análogos hechos con distintas combinaciones de material precursor se llegaron a las siguientes conclusiones: las combinaciones con espinela funcionan como buen precursor cuando los análogos contienen olivino, piroxenos y feldespatos, pero no cuando sólo contiene olivino y feldespato; las combinaciones de material precursor que sólo contienen olivinos y piroxenos a tasas de enfriamiento lentas no funden en forma de esfera ni forman texturas definidas; las combinaciones que contienen labradorita u oligoclasa actúan como buen precursor a tasas de enfriamiento rápidas ($\tau_c \approx 10^4$ °C/h), sin embargo, a tasas de enfriamiento más lentas ($\tau_c \approx 10^3$ °C/h) los análogos no funden en forma de esfera; las combinaciones que contienen anortita o sodalita actúan como buen precursor a tasas en enfriamiento variadas ($\tau_c = 10^3 - 10^4$ °C/h) ya que la mayoría de los análogos funden en forma de esfera y forman texturas similares a las de los condros naturales.

Por lo tanto, de acuerdo los experimentos realizados en este trabajo de tesis, las mejores opciones como combinaciones precursoras de condros serían las que incluyen (además del olivino, los piroxenos y la espinela) los feldespatos anortita y sodalita (1A, 1B, 1F, 1H, 2A, 2B, 2F, 2H, 3B, 3D). Según los resultados obtenidos con espec-

troscopia micro-Raman, los análogos representativos cuya mineralogía es similar a la de los condros naturales incluyen olivino, piroxeno y feldespatos en la combinación de material precursor. Los espectros de los análogos en los que la combinación de material precursor utilizada solo incluyen olivino y feldespatos, presentan picos de H₂O entre 2,800 cm⁻¹ y 3,000 cm⁻¹, los cuales no se observan en la mineralogía de los condros naturales.

Apéndice A

Corridas experimentales

A.1. Corrida experimental 1

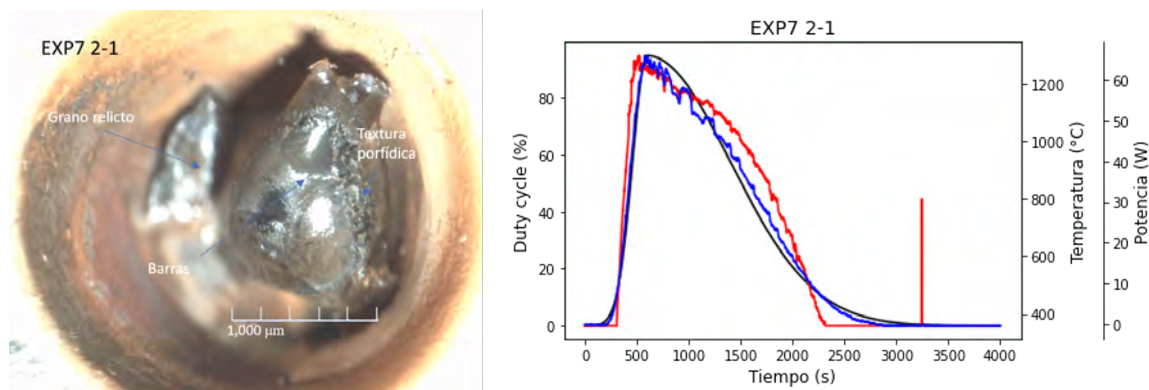


Figura A.1: Análogo EXP7 2-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP7 2-1 (Figura A.1) no tiene una forma esférica, además de que el material fundió parcialmente no alcanzó la temperatura necesaria para llegar a la temperatura de liquidus ($T_{max} = 1299.51^{\circ}\text{C}$). Se alcanzan a distinguir barras justo en la zona que irradió directamente en láser y también se aprecian otras zonas que parecen tener una textura porfídica. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP7 2-1 siguen la misma tendencia, aunque el perfil de temperatura tiene una ligera caída después del pico y un ligero aumento entre 1,200 y 2,000 °C, alrededor de los 3,700 s tiene un pico de erróneo.

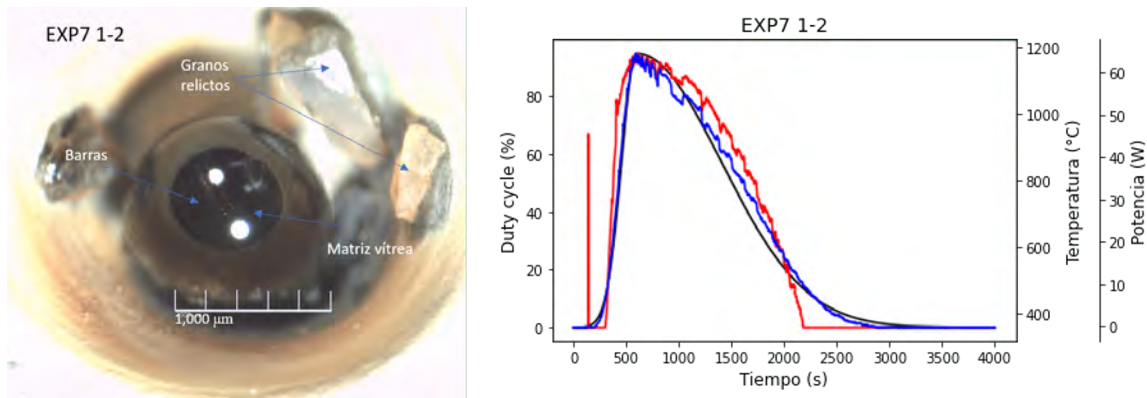


Figura A.2: Análogo EXP7 1-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP7 1-2 (Figura A.2) tiene una forma esférica y está completamente fundido, sin embargo quedaron algunos granos relictos en la casilla. Presenta unas cuantas barras embebidas en una mesostasis vítrea y zonas criptocristalinas. Por la distribución de colores presenta una forma de ojo. El perfil de temperatura y el perfil de potencia siguen la misma tendencia que el perfil del duty cycle, aunque el perfil de temperatura tiene un pico erróneo justo después de comenzar la irradiación. Nótese que su $T_{max} = 1,182 \text{ }^\circ\text{C}$ está por debajo de T_{liq} , lo que podría explicar que la mayor parte de su superficie sea vítrea.

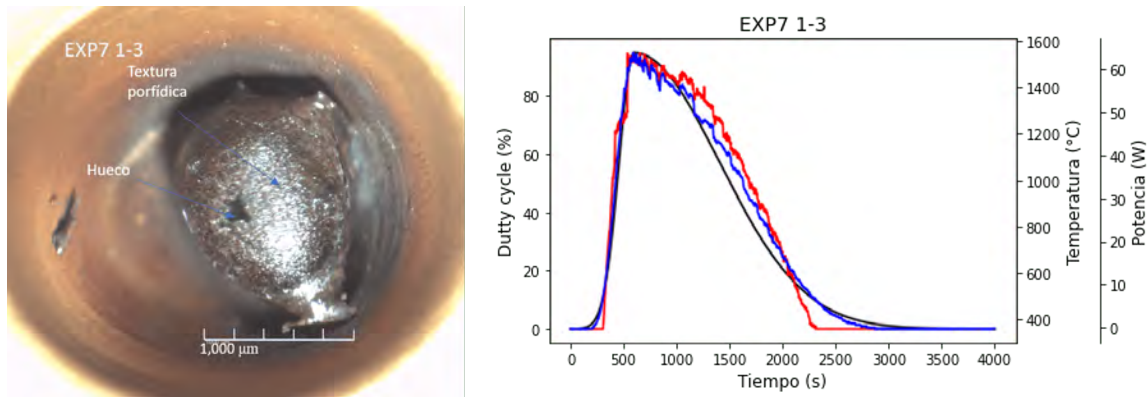


Figura A.3: Análogo EXP7 1-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP7 1-3 (Figura A.3) tiene una forma ovalada, el material precursor

fundió en su totalidad debido a que no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una textura porfídica y tiene un pequeño agujero en su superficie, el cual parece estar oxidado. El análogo presenta una misma tonalidad de color marrón oscuro y la superficie se encuentra cubierta por una matriz opaca. Se observa que para el análogo EXP7 1-3 el perfil de temperatura y el perfil del duty cycle siguen la misma tendencia, sólo difieren un poco entre 1,100 s y 2,000 s. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

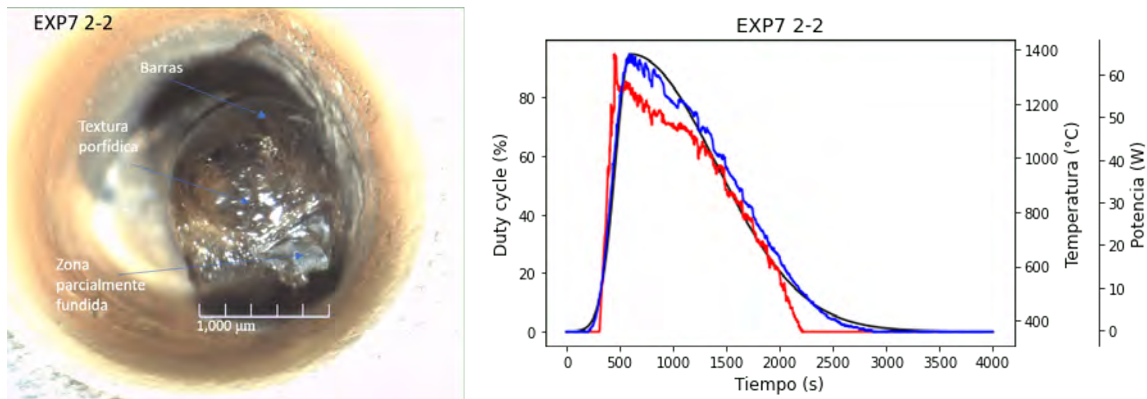


Figura A.4: Análogo EXP7 2-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP7 2-2 (Figura A.4) no tiene una forma esférica, tiene una zona en su superficie completamente fundida y otra zona parcialmente fundida, no quedaron granos relictos en la casilla. La mayor parte de su superficie presenta una textura porfídica mientras que una pequeña parte formó algunas barras embebidas en una mesostasis vítrea. Se observa que para el análogo EXP7 2-2 el perfil de temperatura y el perfil del duty cycle siguen la misma tendencia, sólo que el perfil de temperatura tiene una ligera caída entre 600 s y 1,300s. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

El análogo EXP7 1-4 (Figura A.5) tiene una forma esférica, una zona se encuentra completamente fundida mientras que la otra se encuentra parcialmente fundida, quedaron dos granos relictos en la casilla. Parte de la superficie de este análogo presenta una textura plumosa mientras que la otra parte es vítrea. En la zona parcialmente

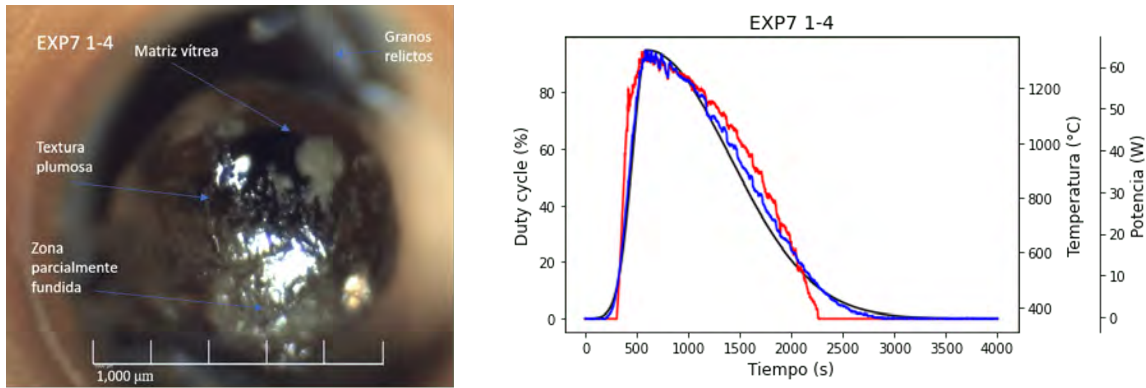


Figura A.5: Análogo EXP7 1-4. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

fundida se concentran los colores claros y en la zona completamente fundida la distribución de colores forman un ojo. Se observa que para el análogo EXP7 1-4 el perfil de temperatura, el perfil de potencia y el perfil del duty cycle siguen la misma tendencia.

A.2. Corrida experimental 2

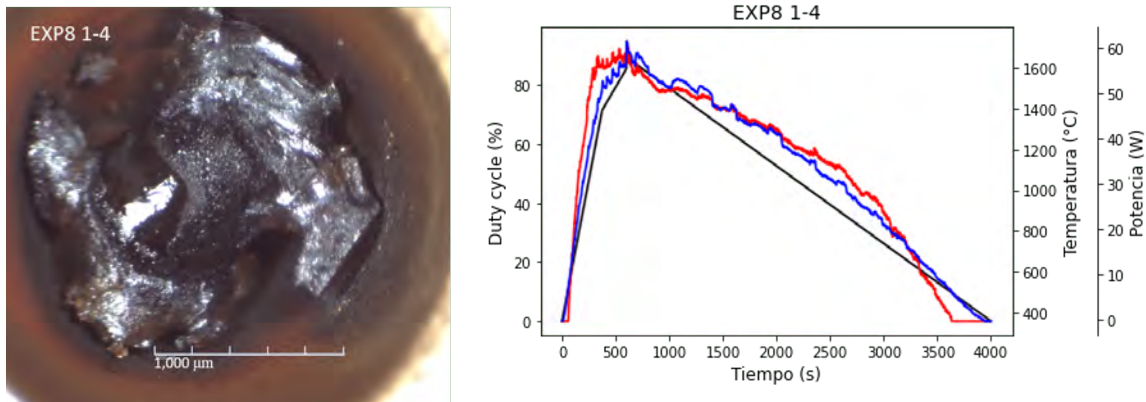


Figura A.6: Análogo EXP8 1-4. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones del duty cycle (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP8 1-4 (Figura A.6) no tiene una forma definida, al parecer el material precursor si se fundió, ya que el análogo se ve oxidado, sin embargo el material

fundido no se agrupó en una esfera. La superficie se encuentra cubierta por una matriz opaca. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP8 1-4 siguen la misma tendencia, aunque el perfil de temperatura se encuentra ligeramente por encima del duty cycle tanto en el calentamiento como en el enfriamiento.

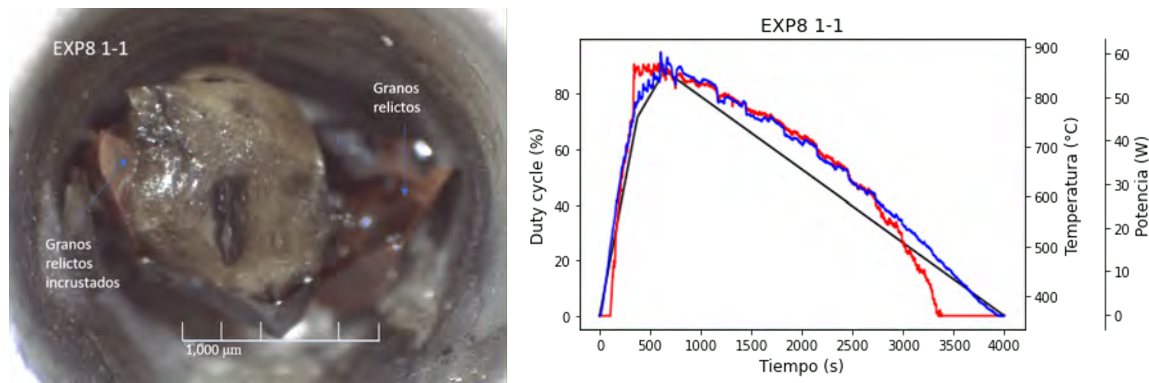


Figura A.7: Análogo EXP8 1-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones del duty cycle (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP8 1-1 (Figura A.7) no tiene una forma esférica y se encuentra parcialmente fundido ya que tiene granos relictos tanto en la casilla como embebidos en su superficie. El hecho de que este análogo no haya fundido en su totalidad puede deberse a que sólo alcanzó una $T_{max} = 889$ °C. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP8 1-1 siguen la misma tendencia, tanto el perfil de temperatura como el perfil de potencia se encuentra ligeramente por encima del duty cycle tanto en el enfriamiento y justo antes de terminar la irradiación la temperatura decae hasta 300 °C a los 3,400 s.

El análogo EXP8 1-2 (Figura A.8) no tiene una forma esférica, la zona central se encuentra completamente fundida mientras que las orillas están parcialmente fundidas, además quedaron muchos granos relictos en la casilla. En la zona fundida se presenta una textura porfídica. El color tanto del análogo como de la casilla indica que está oxidado. El perfil de temperatura y el perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle; sin embargo, en la zona de enfriamiento el perfil de temperatura se encuentran ligeramente por encima del perfil del duty cycle.

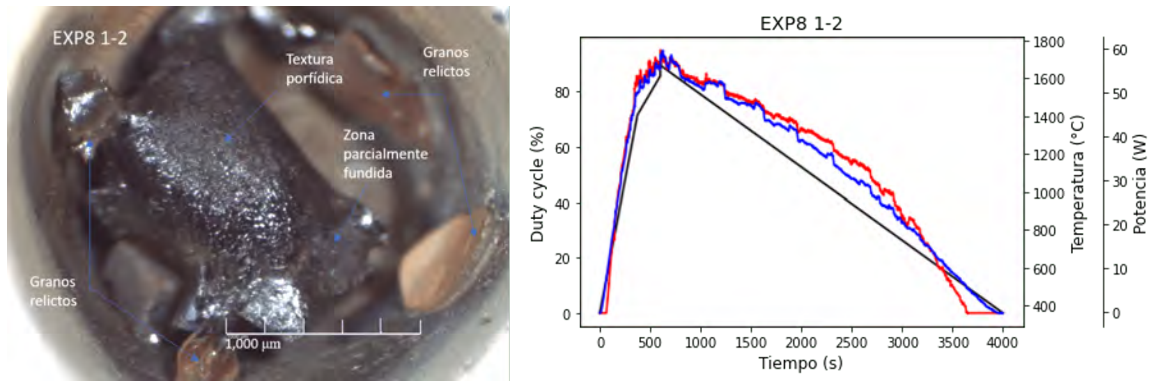


Figura A.8: Análogo EXP8 1-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones del duty cycle (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

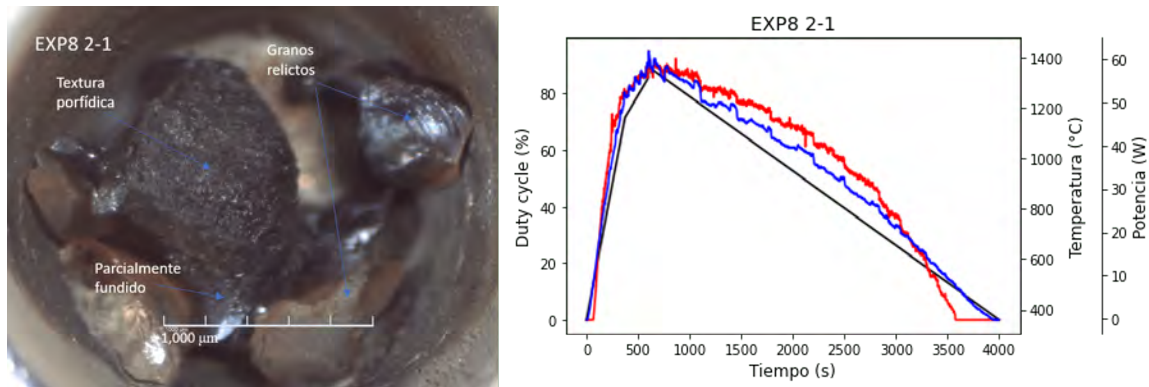


Figura A.9: Análogo EXP8 2-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones del duty cycle (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP8 2-1 (Figura A.9) no tiene forma esférica, el centro se encuentra fundido completamente pero las orillas están parcialmente fundidas, además quedaron muchos granos relictos en la casilla. La zona completamente fundida presenta una textura porfídica. El color oscuro tanto del análogo como de la casilla indica que está oxidado. El perfil de temperatura y el perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle; sin embargo, en la zona de enfriamiento el perfil de temperatura se encuentran ligeramente por encima del perfil del duty cycle.

A.3. Corrida experimental 4

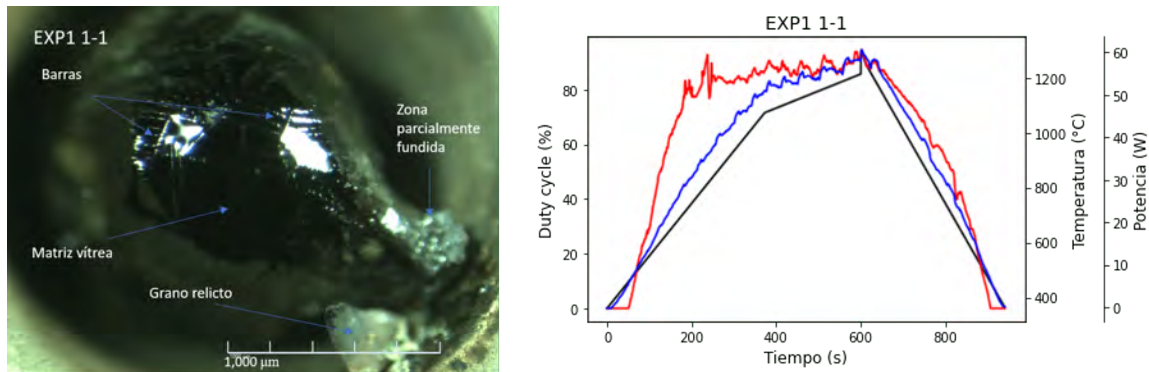


Figura A.10: Análogo EXP1 1-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 1-1 (Figura A.10) tiene una forma semi-esférica, la mayor parte del análogo se encuentra completamente fundido, sin embargo hay una pequeña zona que se encuentra parcialmente fundida, quedó un pequeño grano relicto en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con barras embebidas en una mesostasis vítrea, además presenta zonas criptocristalinas. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 1-1 difieren en la etapa de calentamiento. Durante el calentamiento, el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura; durante el enfriamiento sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

El análogo EXP1 2-3 (Figura A.11) no tiene forma esférica, tiene una zona completamente fundida y otra parcialmente fundida. Presenta una textura, presenta zonas con barras y también zonas vítreas. En la zona parcialmente fundida el material parece tener cierto brillo metálico. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 2-3 difieren considerablemente ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura, además la temperatura va en aumento desde que comienza la irradiación, hasta alcanzar un punto máximo (1,294 °C) antes de los

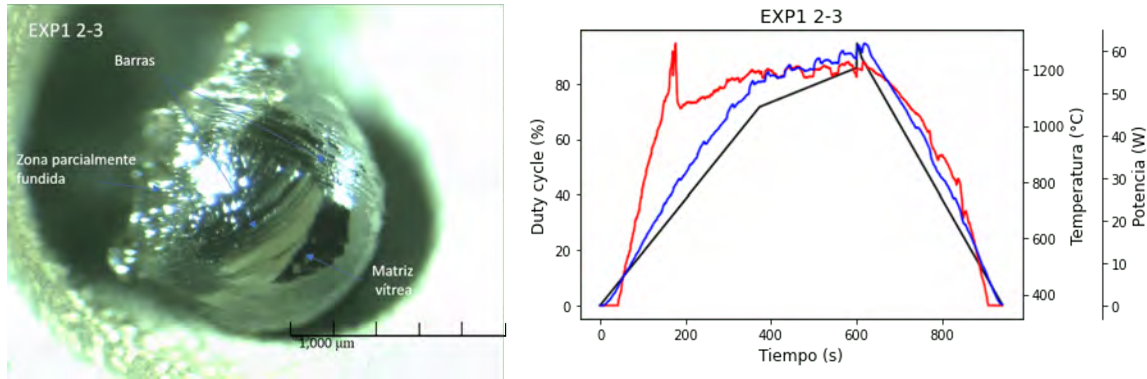


Figura A.11: Análogo EXP1 2-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

200 s que inmediatamente desciende hasta aproximadamente 1,100 °C. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

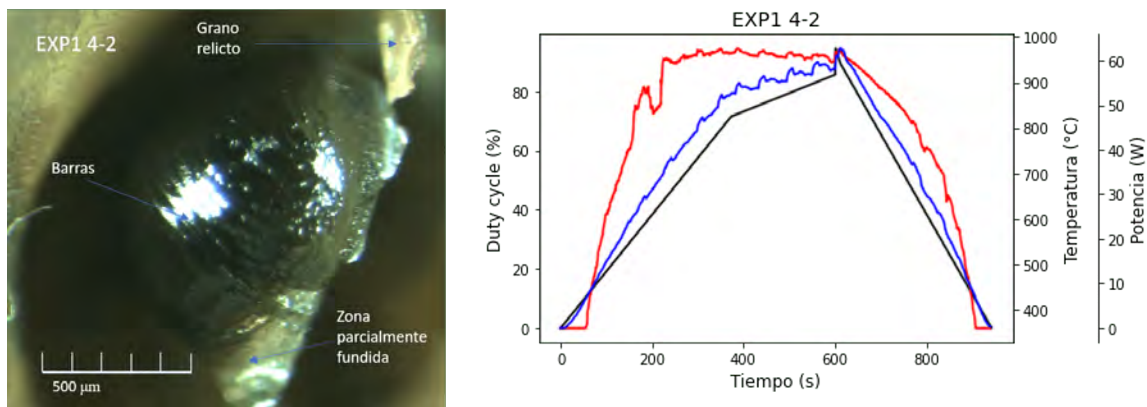


Figura A.12: Análogo EXP1 4-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 4-2 (Figura A.12) no tiene una forma esférica, la mayor parte del análogo está completamente fundida, sin embargo, hay una pequeña zona parcialmente fundida, quedó un grano relicto en la casilla. Este análogo presenta una textura dendrítica con barras embebidas en una mesostasis vítrea. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 4-2 difieren considerablemente ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no

se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

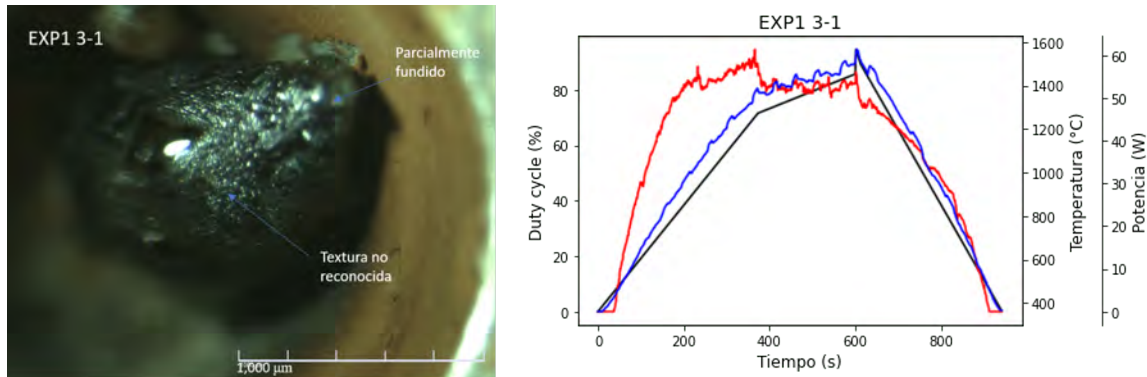


Figura A.13: Análogo EXP1 3-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 3-1 (Figura A.13) no es esférico, se encuentra parcialmente fundido y tiene una textura difícil de identificar, por su coloración se puede observar que tanto la superficie del análogo como la casilla se encuentran oxidadas. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 3-1 difieren en la etapa de calentamiento. Durante el calentamiento, el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura; durante el enfriamiento sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

El análogo EXP1 3-3 (Figura A.14) tiene una forma semi-esférica con una zona totalmente fundida y otra parcialmente fundida, no quedaron granos relictos en la casilla. La zona fundida presenta una textura plumosa con plumas color miel en una mesostasis vítrea. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 3-1 difieren considerablemente en la etapa de calentamiento, ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura; durante el enfriamiento sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue una

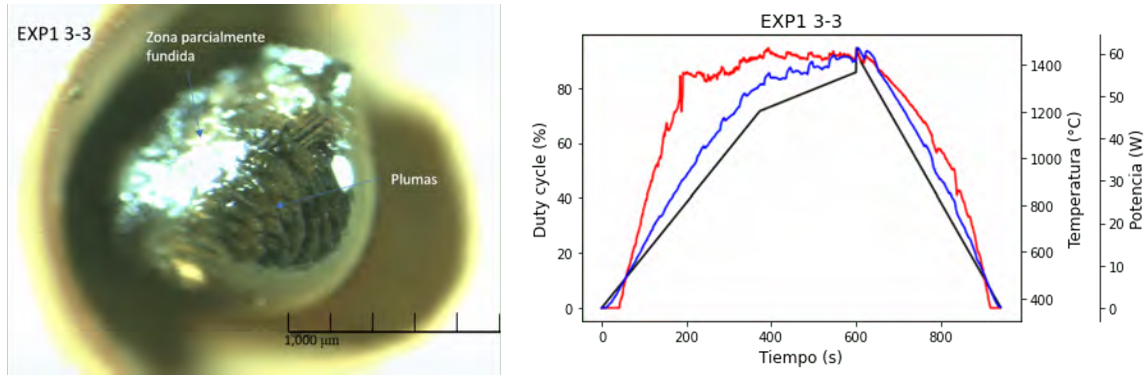


Figura A.14: Análogo EXP1 3-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

tendencia similar al perfil del duty cycle.

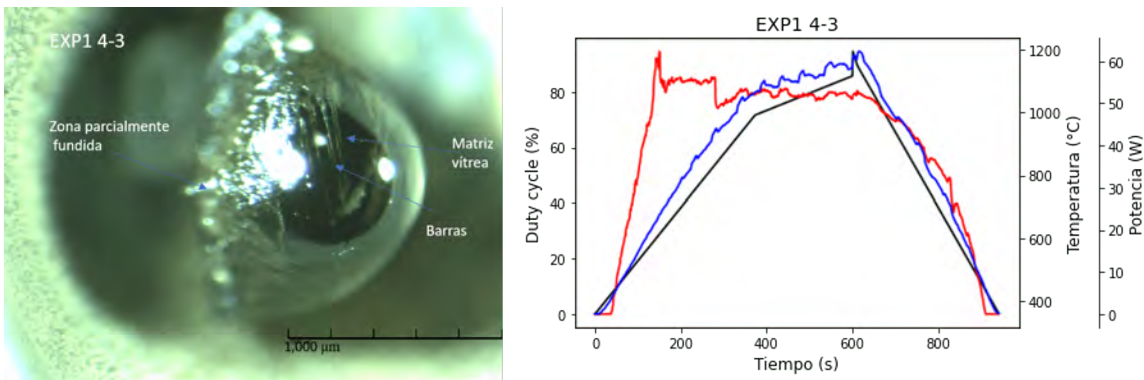


Figura A.15: Análogo EXP1 4-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 4-3 (Figura A.15) tiene una forma semi-esférica con una zona totalmente fundida y otra parcialmente fundida, no quedaron granos relictos en la caxilla. Presenta unas cuantas barras en superficie embebidas en una mesostasis vítrea y también zonas solamente vítreas que pueden clasificarse como CC. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 4-3 difieren considerablemente en la etapa de calentamiento, ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y no se aprecian los cambios de pendientes ni el pico de temperatura; durante el enfriamiento sigue la misma tendencia que el perfil

del duty cycle. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

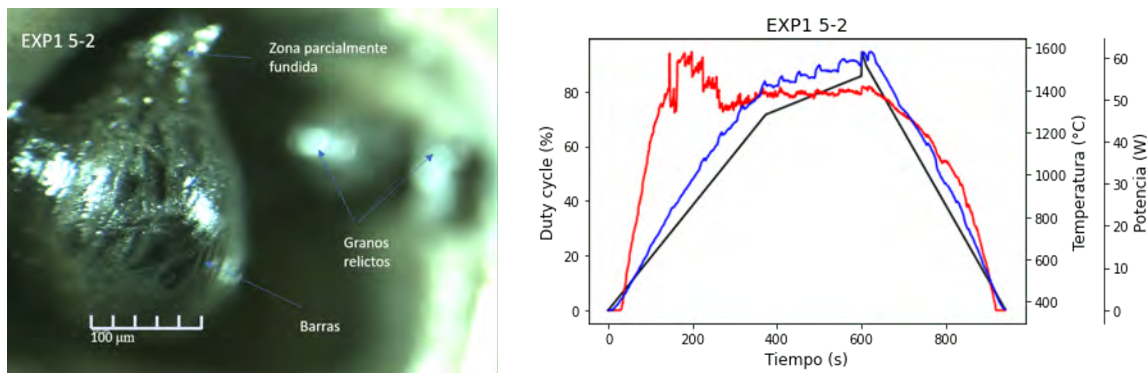


Figura A.16: Análogo EXP1 5-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 5-2 (Figura A.16) tiene una forma esférica, la mayor parte del análogo se encuentra completamente fundida mientras que una pequeña parte se encuentra parcialmente fundida, quedaron 2 granos relictos en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con barras elongadas en diferentes direcciones, por lo que se clasifica como RP, además tiene un brillo metálico en su superficie. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 5-2 difieren considerablemente en la etapa de calentamiento, ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle. Entre los 200 y 300 s la temperatura alcanza valores máximos. Durante el enfriamiento sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

El análogo EXP1 6-3 (Figura A.17) tiene una forma semi-esférica y está completamente fundido por lo que no quedaron granos relictos en la casilla. En una zona de su superficie presenta una textura plumosa mientras que en el resto de la superficie se tiene una mesostasis vítrea, por lo que esa zona se clasifica como CC. Muestra una forma de ojo debido a la distribución de colores. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 6-3 difieren considerablemente en la etapa de calentamiento, ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y además presenta un pico máximo antes de los 200 s. Durante

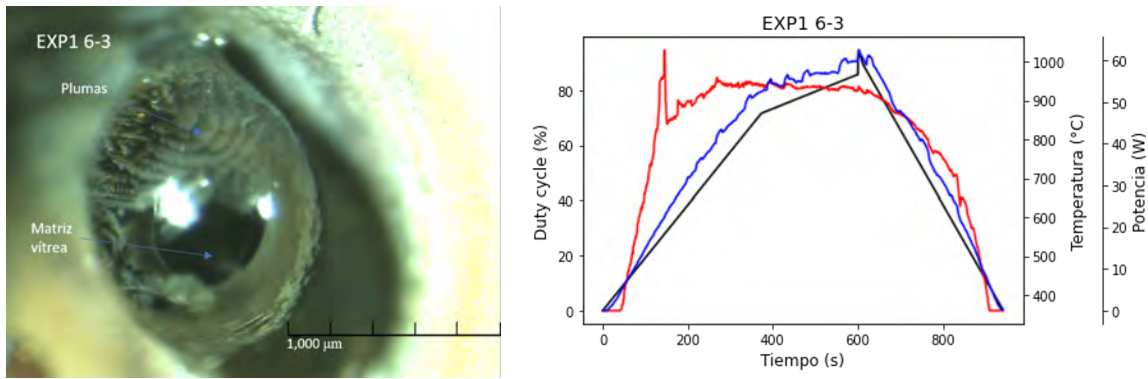


Figura A.17: Análogo EXP1 6-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

el enfriamiento sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

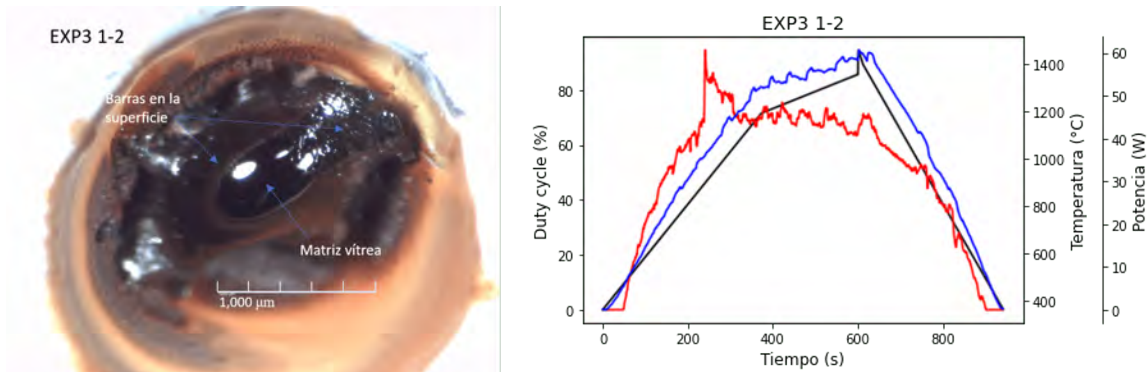


Figura A.18: Análogo EXP3 1-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP3 1-2 (Figura A.18) no tiene forma esférica debido a que sus orillas se encuentran pegadas a la casilla. Se presentan muy pocas barras embebidas en una mesostasis vítrea y zonas completamente vítreas que se clasifican como CC. El análogo tiene forma de ojo debido a la distribución de colores. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP3 1-2 difieren considerablemente ya que el perfil de temperatura presenta un pico máximo después de los 200 s que va desde 1,200 °C hasta 1,461 °C y después de ese pico comienza a descender. El perfil de

potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

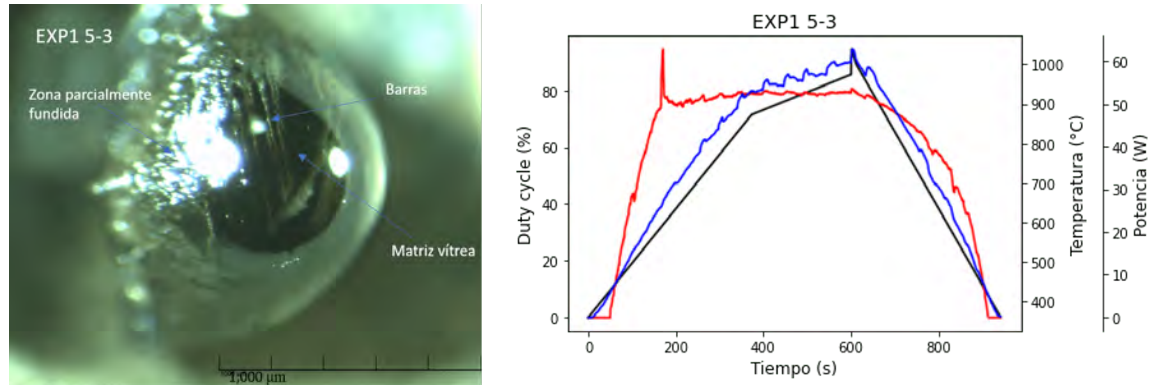


Figura A.19: Análogo EXP1 5-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP1 5-3 (Figura A.19) tiene una forma semi-esférica, una zona se encuentra completamente fundida mientras que la otra se encuentra parcialmente fundida. La zona fundida tiene una morfología dendrítica con barras embebidas en una mesostasis vítrea y también tiene zonas completamente vítreas que se clasifican como CC. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP1 5-3 difieren considerablemente en la etapa de calentamiento, ya que el perfil de temperatura siempre se encuentra por encima del perfil del duty cycle y además presenta un pico máximo antes de los 200 s. El perfil de potencia sigue una tendencia similar al perfil del duty cycle.

A.4. Corrida experimental 5

El análogo EXP5 1-1 (Figura A.20) tiene una forma semi-esférica parcialmente fundida, quedaron 2 granos relictos pequeños en la casilla. La zona que está fundida presenta una textura barrada mientras que la zona que está parcialmente fundida parece tener una textura porfídica. La muestra tiene un color oscuro uniforme sobre toda su superficie. El perfil de temperatura y el perfil del duty cycle para el análogo EXP5 1-1 siguen la misma tendencia a excepción de que en la zona de calentamiento

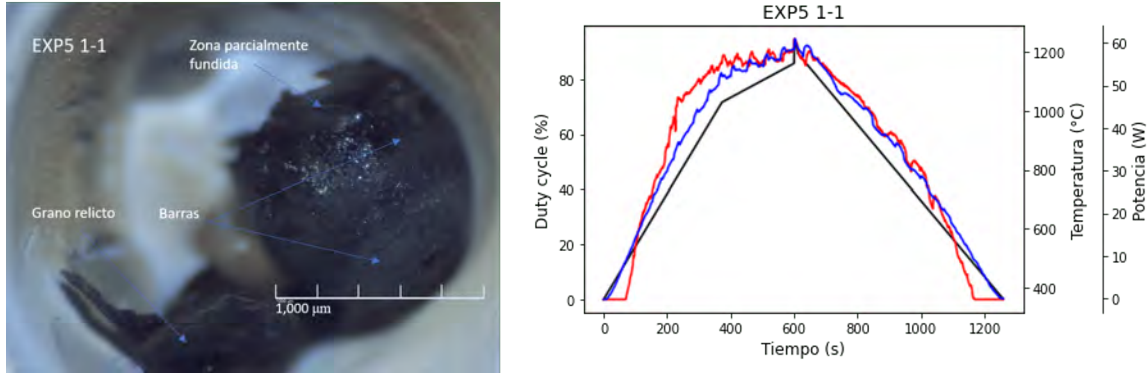


Figura A.20: Análogo EXP5 1-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

(entre 200 s y 600 s) el perfil de temperatura se encuentra ligeramente por encima del perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

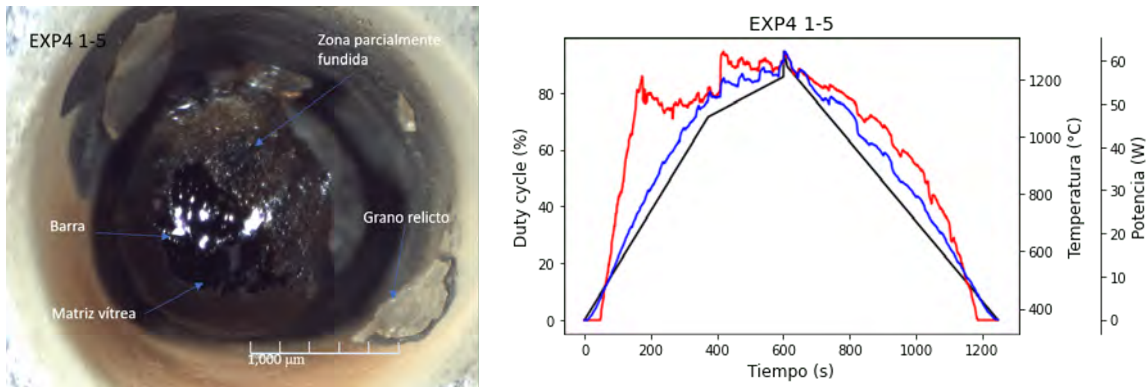


Figura A.21: Análogo EXP4 1-5. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP4 1-5 (Figura A.21) tiene una forma semi-esférica debido a que se encuentra parcialmente fundido, además quedaron granos relictos en la casilla. La zona fundida es en su mayoría vítrea, sin embargo se formaron unas cuantas barras individuales. Los colores claros se concentran en la zona parcialmente fundida mientras que los más oscuros en la zona fundida. Para el análogo EXP4 1-5 el perfil de temperatura difiere significativamente en comparación con el perfil del duty cycle

ya que se encuentra por encima de éste y además presenta 2 picos de temperatura (aproximadamente a los 200 s y 400 s) que no se identifican en el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

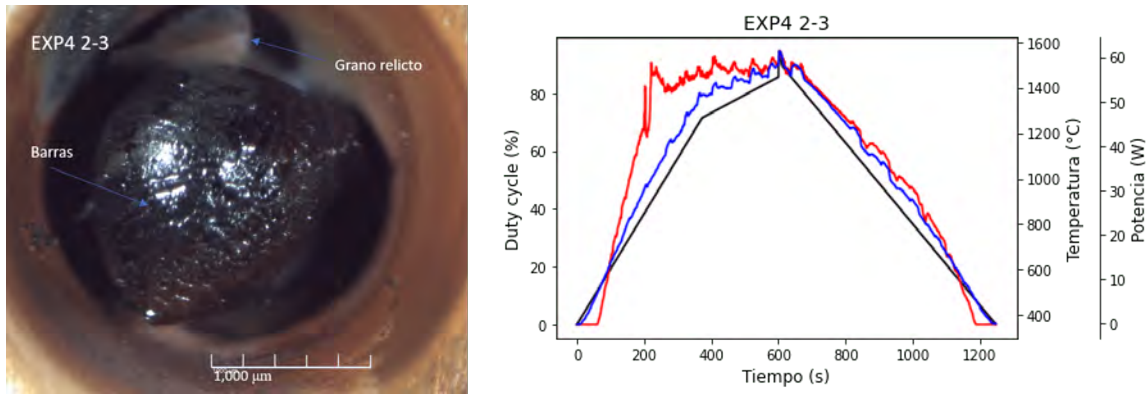


Figura A.22: Análogo EXP4 2-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP4 2-3 (Figura A.22) tiene una forma semi-esférica, se encuentra completamente fundido y sólo quedó un grano relicto en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con barras gruesas en donde las cadenas de olivinos son muy notorias, las barras están embebidas en una mesostasis vítrea. Para el análogo EXP4 2-3 el perfil de temperatura difiere significativamente en comparación con el perfil del duty cycle ya que se encuentra por encima de éste y además presenta un pico de temperatura alrededor de los 200 s que no se identifican en el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

El análogo EXP4 2-4 (Figura A.23) tiene una forma semi-esférica debido a que se encuentra parcialmente fundido, no quedaron granos relictos en la casilla. La zona fundida presenta una textura barrada mientras que la zona parcialmente fundida tiene granos relictos embebidos en la superficie del análogo. Para el análogo EXP4 2-4 el perfil de temperatura difiere significativamente en comparación con el perfil del duty cycle ya que se encuentra por encima de éste y además presenta 2 picos de temperatura (aproximadamente a los 200 s y 400 s) que no se identifican en el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty

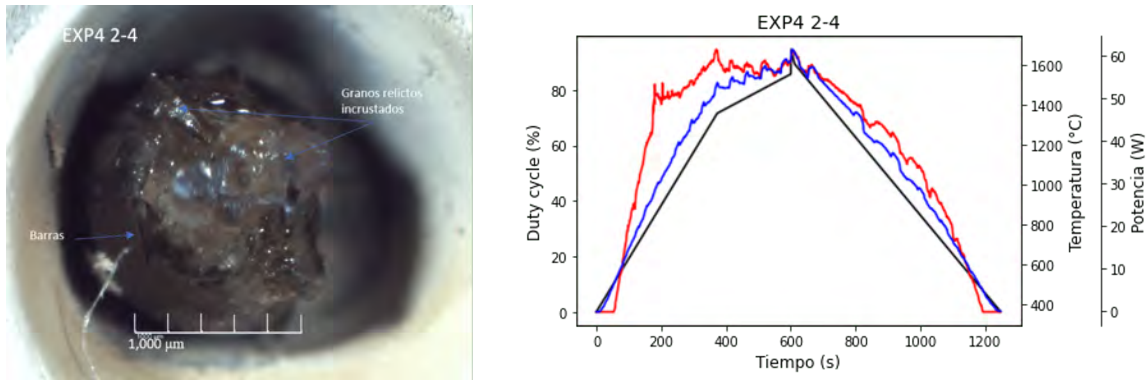


Figura A.23: Análogo EXP4 2-4. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

cycle.

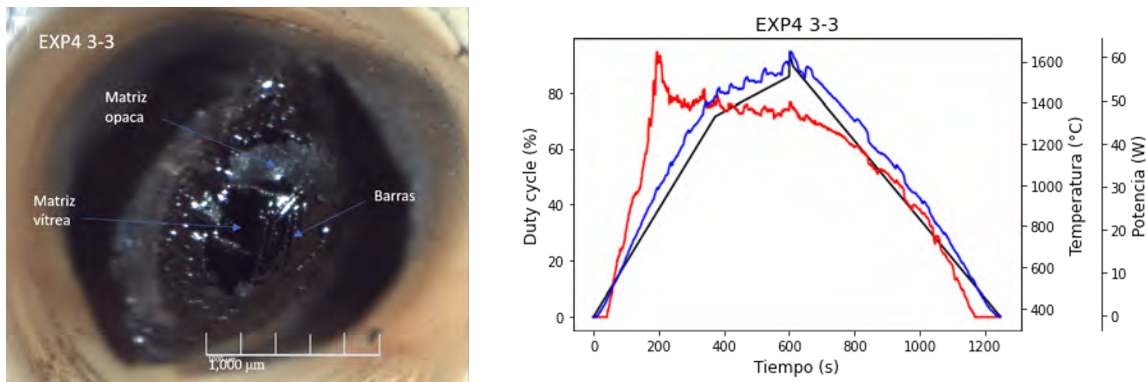


Figura A.24: Análogo EXP4 3-3. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP4 3-3 (Figura A.24) tiene una forma semi-esférica, el material fundió completamente y no quedaron granos relictos en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con barras embebidas en una mesostasis vítrea, sin embargo en algunas zonas del análogo la matriz parece opaca. Para el análogo EXP4 3-3 el perfil de temperatura difiere significativamente en comparación con el perfil del duty cycle ya que se encuentra por encima de éste y además presenta un pico de temperatura alrededor de los 200 s que no se identifica en el perfil del duty cycle. El perfil de potencia sigue la misma tendencia que el perfil del duty cycle.

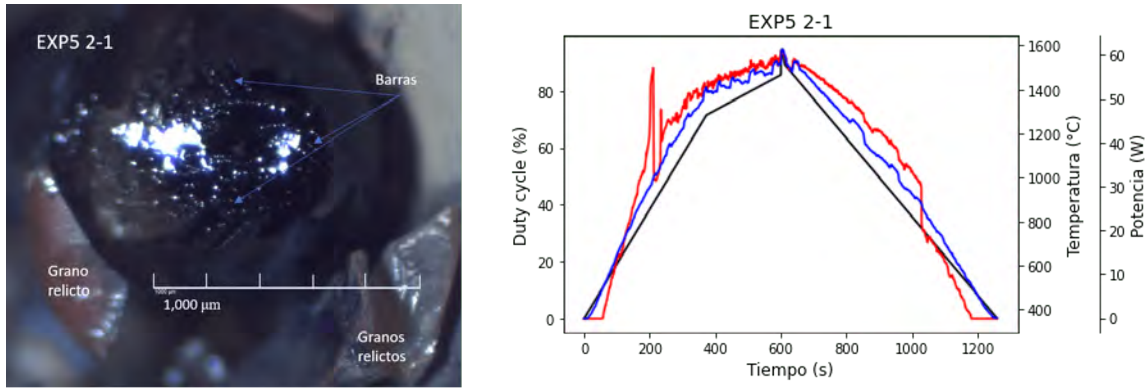


Figura A.25: Análogo EXP5 2-1. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP5 2-1 (Figura A.25) tiene una forma esférica, se encuentra completamente fundido, sin embargo quedaron varios granos relictos en la casilla. Presenta una morfología dendrítica con barras embebidas en una matriz vítrea. Para el análogo EXP5 2-1 el perfil de temperatura y el perfil de potencia siguen la misma tendencia que el perfil del duty cycle a diferencia de que el perfil de temperatura presenta un pico alrededor de los 200 s que no se aprecia en el perfil del duty cycle.

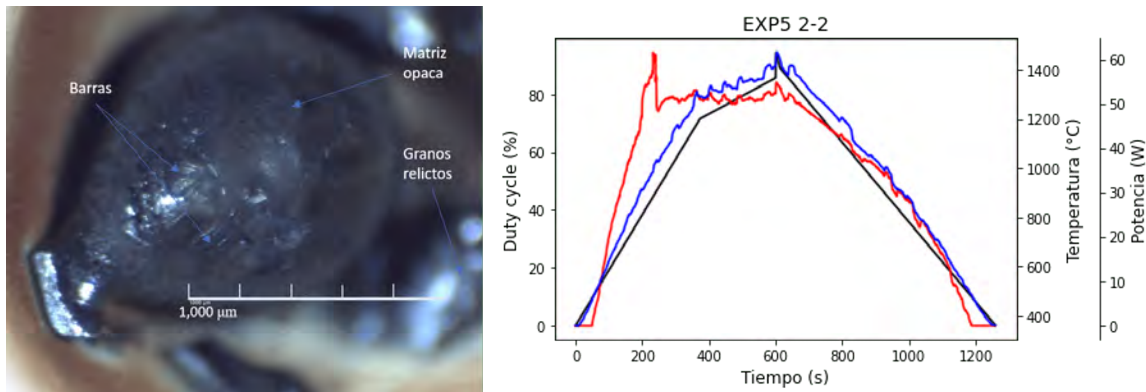


Figura A.26: Análogo EXP5 2-2. Del lado izquierdo se muestra una imagen de la superficie tomada con un microscopio estereoscópico. Del lado derecho se tiene un gráfico de las mediciones de temperatura (línea roja), las mediciones de potencia (línea azul) y el perfil programado del duty cycle (línea negra).

El análogo EXP5 2-2 (Figura A.26) tiene una forma semi-esférica, se encuentra completamente fundido y quedaron algunos granos relictos en la casilla. En algunas zonas presenta barras pequeñas (≈ 1 mm) embebidas en una matriz opaca. Para el

análogo EXP5 2-2 el perfil de temperatura y el perfil de potencia siguen la misma tendencia que el perfil del duty cycle a diferencia de que el perfil de temperatura presenta un pico alrededor de los 200 s que no se aprecia en el perfil del duty cycle.

Bibliografía

Alan P., B. (2012). Mixing and transport of isotopic heterogeneity in the early solar system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40:23–43.

Alexander, C. M., Grossman, J. N., Ebel, D. S., y Ciesla, F. J. (2008). The formation conditions of chondrules and chondrites. *Science*, Volume 320, Issue 5883, pp. 1617., 320:1617.

Alexander, C. M. O. D. (2004). Chemical equilibrium and kinetic constraints for chondrule and CAI formation conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(19):3943–3969.

Amelin, Y. (2006). The prospect of high-precision Pb isotopic dating of meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*, 41(1):7–17.

Amelin, Y. y Krot, A. (2007). Pb isotopic age of the Allende chondrules. *Meteoritics and Planetary Science*, 42(1321):1321–1335.

Amelin, Y., Krot, A. N., Hutcheon, I. D., Ulyanov, A. A., Amelin, Y., Krot, A. N., Hutcheon, I. D., y Ulyanov, A. A. (2002). Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions. *Science*, 297:1678–1683.

Anders, E. (1964). Origin, age, and composition of meteorites. *Space Science Reviews*, 3(5-6):583–714.

Anders, E. y Goles, G. C. (1961). Theories on the origin of meteorites. *Journal of Chemical Education*, 38(2):58.

- Armitage, P. J. (2010). *Astrophysics of Planet Formation*. Cambridge University Press, Massachusetts.
- Asphaug, E., Jutzi, M., y Movshovitz, N. (2011). Chondrule formation during planetesimal accretion. *Earth and Planetary Science Letters*, 308:369–379.
- Baker, J., Bizzarro, M., Wittig, N., Connelly, J., y Haack, H. (2005). Early planetesimal melting from an age of 4.5662 Gyr for differentiated meteorites. *Nature*, 436(7054):1127–1131.
- Beitz, E., Blum, J., Mathieu, R., Pack, A., y Hezel, D. C. (2013). Experimental investigation of the nebular formation of chondrule rims and the formation of chondrite parent bodies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 116:41–51.
- Bischoff, A. (2001). Meteorite classification and the definition of new chondrite classes as a result of successful meteorite search in hot and cold deserts. *Planetary and Space Science*, 49:769–776.
- Bizzarro, M., Baker, J. A., Haack, H., Bizzarro, M., Baker, J. A., y Haack, H. (2004). Mg isotope evidence for contemporaneous formation of chondrules and refractory inclusions. *Nature*, 431:275–278.
- Bland, P. A., Alard, O., Benedix, G. K., Kearsley, A. T., Menzies, O. N., Watt, L. E., Rogers, N. W., Bland, P. A., Alard, O., Benedix, G. K., Kearsley, A. T., Menzies, O. N., Watt, L. E., y Rogers, N. W. (2005). Volatile fractionation in the early solar system and chondrule/matrix complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102:13755–13760.
- Blander, M., Planner, H. N., Keil, K., Nelson, L. S., y Richardson, N. L. (1976). The origin of chondrules: experimental investigation of metastable liquids in the system $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-SiO}_2$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(8):889,IN1,893–892,IN2,896.

- Bollard, J., Connelly, J. N., y Bizzarro, M. (2015). Pb-pb dating of individual chondrules from the cb_a chondrite gujba: Assessment of the impact plume formation model. *Meteoritics and Planetary Science*, 50:1197–1216.
- Bollard, J., Connelly, J. N., Whitehouse, M. J., Pringle, E. A., Bonal, L., Jørgensen, J. K., Nordlund, Å., Moynier, F., y Bizzarro, M. (2017). Early formation of planetary building blocks inferred from Pb isotopic ages of chondrules. *Science Advances*, 3(8):e1700407.
- Boss, A. P. (2002). Evolution of the Solar Nebula. V. Disk Instabilities with Varied Thermodynamics. *The Astrophysical Journal*, 576(1):462–472.
- Boss, A. P. (2007). Evolution of the Solar Nebula. VIII. Spatial and Temporal Heterogeneity of Short-lived Radioisotopes and Stable Oxygen Isotopes. *The Astrophysical Journal*, 660(2):1707–1714.
- Boss, A. P. y Durisen, R. H. (2005). Chondrule-forming shock fronts in the solar nebula: A possible unified scenario for planet and chondrite formation. *The Astrophysical Journal*, 621:L137–L140.
- Bouvier, A., Wadhwa, M., Bouvier, A., y Wadhwa, M. (2010). The age of the solar system redefined by the oldest pb-pb age of a meteoritic inclusion. *Nature Geoscience*, 3:637–641.
- Bouwman, J., Henning, T., Hillenbrand, L. A., Meyer, M. R., Pascucci, I., Carpenter, J., Hines, D., Kim, J. S., Silverstone, M. D., Hollenbach, D., y Wolf, S. (2008). The Formation and Evolution of Planetary Systems: Grain Growth and Chemical Processing of Dust in T Tauri Systems. *The Astrophysical Journal*, 683(1):479–498.
- Brearley y J., A. (1998). Rare potassium-bearing mica in allan hills 84001: Additional constraints on carbonate formation. *mmws*, page 6.
- Burton, A. S., Elsila, J. E., Hein, J. E., Glavin, D. P., y Dworkin, J. P. (2013). Extraterrestrial amino acids identified in metal-rich ch and cb carbonaceous chondrites from antarctica. *Meteoritics and Planetary Science*, 48:390–402.

- Cervantes, K. E. (2009). *Estudio petrológico de los condros de las meteoritas condriticas mexicanas cuartaparte, cosina y nuevo mercurio, origen y evolución de dichas estructuras*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Chukanov, N., Viggasina, M., Zubkova, N., Pekov, I., Schäfer, C., Kasatkin, A., Yapas-kurt, V., y Dmitry, P. (2020). Extra-framework content in sodalite-group minerals: Complexity and new aspects of its study using infrared and raman spectroscopy. *Minerals*, 10:363.
- Ciesla, F. J., Ciesla, y J., F. (2005). Chondrule-forming processes—an overview. *Astronomical Society of the Pacific*, 341:811.
- Ciesla, F. J., Lauretta, D. S., Hood, L. L., Ciesla, F. J., Lauretta, D. S., y Hood, L. L. (2004). The frequency of compound chondrules and implications for chondrule formation. *Meteoritics and Planetary Science*, 39:531–544.
- Cieza, L., Padgett, D. L., Stapelfeldt, K. R., Augereau, J.-C., Harvey, P., Evans, Neal J., I., Merín, B., Koerner, D., Sargent, A., van Dishoeck, E. F., Allen, L., Blake, G., Brooke, T., Chapman, N., Huard, T., Lai, S.-P., Mundy, L., Myers, P. C., Spiesman, W., y Wahhaj, Z. (2007). The Spitzer c2d Survey of Weak-Line T Tauri Stars. II. New Constraints on the Timescale for Planet Building. *The Astrophysical Journal*, 667(1):308–328.
- Connelly, J. N. y Bizzarro, M. (2009). Pb-Pb dating of chondrules from CV chondrites by progressive dissolution. *Chemical Geology*, 259(3-4):143–151.
- Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Åke Nordlund, Wielandt, D., Ivanova, M. A., Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Åke Nordlund, Wielandt, D., y Ivanova, M. A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, 338:651.
- Connolly, H. C. y Hewins, R. H. (1995). Chondrules as products of dust collisions with totally molten droplets within a dust-rich nebular environment: An experimental investigation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59:3231–3246.

- Connolly, H. C. y Hewins, R. H. (1996). Constraints on chondrule precursors from experimental data. In *Chondrules and the Protoplanetary Disk*, pages 129–135.
- Connolly, H. C. y Jones, R. H. (2016). Chondrules: The canonical and noncanonical views. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121:1885–1899.
- Connolly, H. C. J. y Desch, S. J. (2004). On the origin of the "kleine kugelchen" called chondrules. *Geochemistry*, 64:95–125.
- Connolly, H. C. J., Desch, S. J., Ash, R. D., y Jones, R. H. (2006). Transient heating events in the protoplanetary nebula. *Meteorites and the Early Solar System*, page 383.
- Connolly, H. C. J. y Hewins, R. H. (1991). The influence of bulk composition and dynamic melting conditions on olivine chondrule textures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55:2943,2947,2949–2945,2947,2950.
- Connolly, H. C. J. y Love, S. G. (1998). The formation of chondrules: petrologic tests of the shock wave model. *Science*, 280:62–67.
- Cuzzi, J. N. y Alexander, C. M. O. (2006). Chondrule formation in particle-rich nebular regions at least hundreds of kilometres across. *Nature*, 441(7092):483–485.
- Davis, A. M., Alexander, D., Nagahara, H., y Richter, F. M. (2005). Evaporation and condensation during cai and chondrule formation.
- Dehart, J. M., Lofgren, G. E., Dehart, J. M., y Lofgren, G. E. (1996). Experimental studies of group a1 chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60:2233–2242.
- Desch, S. J., Cuzzi, J. N., Desch, S. J., y Cuzzi, J. N. (2000). The generation of lightning in the solar nebula. *Icarus*, 143:87–105.
- Desch, S. J., H. C., J. C., Desch, S. J., y H. C., J. C. (2002). A model of the thermal processing of particles in solar nebula shocks: Application to the cooling rates of chondrules. *Meteoritics and Planetary Science*, 37:183–207.

- Desch, S. J., Morris, M. A., Connolly, H. C., y Boss, A. P. (2012). The importance of experiments: Constraints on chondrule formation models. *Meteoritics and Planetary Science*, 47:1139–1156.
- Desch, S. J., Morris, M. A., Connolly, H. C., J., y Boss, A. P. (2010). A Critical Examination of the X-wind Model for Chondrule and Calcium-rich, Aluminum-rich Inclusion Formation and Radionuclide Production. *The Astrophysical Journal*, 725(1):692–711.
- Di Rocco, T. y Pack, A. (2015). Triple oxygen isotope exchange between chondrule melt and water vapor: An experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164:17–34.
- Donaldson, C. H. (1976). An experimental investigation of olivine morphology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 57(2):187–213.
- Draine, B. T. (2003). Scattering by Interstellar Dust Grains. II. X-Rays. *The Astrophysical Journal*, 598(2):1026–1037.
- Dávalos-Elizondo, M., Aranda-Gómez, J. J., Levresse, G., y Cervantes de la Cruz, K. (2016). Mineral chemistry and geochemistry of mantle xenoliths from the santo domingo volcanic field, san luis potosí: Evidences of mantle metasomatic processes beneath portions of the mesa central, mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33:81–104.
- Ebel, D. S. y Grossman, L. (2000). Condensation in dust-enriched systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(2):339–366.
- Faure, F., Troliard, G., Christian, N., y Montel, J.-M. (2003). A developmental model of olivine morphology as a function of the cooling rate and the degree of undercooling. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145:251–263.
- Freeman, J., Wang, A., Kuebler, K., Jolliff, B., y Haskin, L. (2008). Characterization of natural feldspars by raman spectroscopy for future planetary exploration. *The Canadian Mineralogist*, 46:1477–1500.

- Frezzotti, M. L., Tecce, F., y Casagli, A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112:1–20.
- Gail, H. P. (2001). Radial mixing in protoplanetary accretion disks. I. Stationary disc models with annealing and carbon combustion. *Astronomy and Astrophysics*, 378:192–213.
- Gibbard, S. G., Levy, E. H., y Morfill, G. E. (1997). On the possibility of lightning in the protosolar nebula. *Icarus*, 130:517–533.
- Gooding, J. L. y Keil, K. (1981). Relative abundances of chondrule primary textural types in ordinary chondrites and their bearing on conditions of chondrule formation. *Meteoritics*, 16:17.
- Grady, M. M. (1995). F. heide and f. wlotzka. meteorites. messengers from space. (springer-verlag), 1994. price paper-back dm 38.00. isbn 3 540 58105 7. 231 pp. *Mineralogical Magazine*, 59(397):775–776.
- Halliday, A. N. y Kleine, T. (2006). *Meteorites and the Timing, Mechanisms, and Conditions of Terrestrial Planet Accretion and Early Differentiation*, page 775.
- Hawley, J. F., Balbus, S. A., y Winters, W. F. (1999). Local Hydrodynamic Stability of Accretion Disks. *The Astrophysical Journal*, 518(1):394–404.
- Hernández-Reséndiz, P. (2020). *Estudios experimentales aplicados a la meteorítica: condros y micrometeoritos*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Hewins, R. H. (1988). Experimental studies of chondrules. *IN: Meteorites and the early solar system (A89-27476 10-91)*. Tucson, AZ, University of Arizona Press, 1988, p. 660-679., page 660.
- Hewins, R. H. y Fox, G. E. (2004). Chondrule textures and precursor grain size: an experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(4):917–926.

- Hewins, R. H., H. C., Lofgren, G. E. J. C., Libourel, G., Hewins, R. H., H. C., Lofgren, G. E. J. C., y Libourel, G. (2005). Experimental constraints on chondrule formation. *Astronomical Society of the Pacific*, 341:286.
- Hewins, R. H., H. C., J. C., Hewins, R. H., y H. C., J. C. (1996). Peak temperatures of flash-melted chondrules. *cpd*, pages 197–204.
- Hewins, R. H., Hewins, y H., R. (1997). Chondrules. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25:61.
- Hewins, R. H., Klein, L. C., Fasano, B. V., Hewins, R. H., Klein, L. C., y Fasano, B. V. (1981). Conditions of formation of pyroxene excentroradial chondrules. *Lunar and Planetary Science*, pages 448–450.
- Hewins, R. H. y Radomsky, P. M. (1990). Temperature Conditions for Chondrule Formation. *Meteoritics*, 25(4):309.
- Hewins, R. H., Radomsky, P. M., y Connolly, H. C., J. (1989). Influence of Melting Kinetics on the Formation of Barred Olivine Chondrules. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 20 of *Lunar and Planetary Science Conference*, page 412.
- Hewins, R. H. y Zanda, B. (2012). Chondrules: Precursors and interactions with the nebular gas. *Meteoritics and Planetary Science*, 47:1120–1138.
- Hezel, D. C., Palme, H., Hezel, D. C., y Palme, H. (2008). Constraints for chondrule formation from ca-al distribution in carbonaceous chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 265:716–725.
- Huss, G. R. y Lewis, R. S. (1995). Presolar diamond, sic, and graphite in primitive chondrites: Abundances as a function of meteorite class and petrologic type. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59:115–160.
- Jones, R. H. (1996). Relict grains in chondrules: evidence for chondrule recycling. In *Chondrules and the Protoplanetary Disk*, pages 163–172.

- Jones, R. H. (2012). Petrographic constraints on the diversity of chondrule reservoirs in the protoplanetary disk. *Meteoritics and Planetary Science*, 47(7):1176–1190.
- Jones, R. H., Grossman, J. N., y Rubin, A. E. (2005). *Chemical, Mineralogical and Isotopic Properties of Chondrules: Clues to Their Origin*, volume 341 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*.
- Jones, R. H., Lee, T., H. C., J. C., Love, S. G., Shang, H., Jones, R. H., Lee, T., H. C., J. C., Love, S. G., y Shang, H. (2000). Formation of chondrules and cais: Theory vs. observation. *prpl*, page 927.
- Jones, R. H., Lofgren, G. E., Jones, R. H., y Lofgren, G. E. (1993). A comparison of feo-rich, porphyritic olivine chondrules in unequilibrated chondrites and experimental analogues. *Meteoritics*, 28:213.
- Jones, R. H., Villeneuve, J., y Libourel, G. (2018). Thermal histories of chondrules. *Chondrules*, pages 57–90.
- Joung, M. K. R., Mac Low, M.-M., y Ebel, D. S. (2004). Chondrule Formation and Protoplanetary Disk Heating by Current Sheets in Nonideal Magnetohydrodynamic Turbulence. *The Astrophysical Journal*, 606(1):532–541.
- Keller, C. y Gail, H. P. (2004). Radial mixing in protoplanetary accretion disks. VI. Mixing by large-scale radial flows. *Astronomy and Astrophysics*, 415:1177–1185.
- Kennedy, A. K., Lofgren, G. E., Wasserburg, G. J., Kennedy, A. K., Lofgren, G. E., y Wasserburg, G. J. (1993). An experimental study of trace element partitioning between olivine, orthopyroxene and melt in chondrules: equilibrium values and kinetic effects. *Earth and Planetary Science Letters*, 115:177–195.
- Kita, N. T., Huss, G. R., Tachibana, S., Amelin, Y., Nyquist, L. E., y Hutcheon, I. D. (2005). Constraints on the Origin of Chondrules and CAIs from Short-lived and Long-Lived Radionuclides. In Krot, A. N., Scott, E. R. D., y Reipurth, B., editors, *Chondrites and the Protoplanetary Disk*, volume 341 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 558.

- Kita, N. T., Ushikubo, T., Knight, K. B., Mendybaev, R. A., Davis, A. M., Richter, F. M., y Fournelle, J. H. (2012). Internal ^{26}Al - ^{26}Mg isotope systematics of a type B chondrite: Remelting of refractory precursor solids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 86:37–51.
- Klerner, S., Palme, H., Klerner, S., y Palme, H. (1999). Origin of chondrules and matrix in the Renazzo meteorite. *Meteoritics and Planetary Science*, 34:A64.
- Krot, A. N. (2005). *Chondrites and the Protoplanetary Disk*, volume 341 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*.
- Krot, A. N., Libourel, G., y Chaussidon, M. (2006). Oxygen isotope compositions of chondrules in CR chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(3):767–779.
- Krot, A. N., Petaev, M. I., Russell, S. S., Itoh, S., Fagan, T. J., Yurimoto, H., Chizmadia, L., Weisberg, M. K., Komatsu, M., Ulyanov, A. A., y Keil, K. (2004). Amoeboid olivine aggregates and related objects in carbonaceous chondrites: Records of nebular and asteroid processes. *Chemie der Erde*, 64:185–239.
- Krot, A. N. y Wasson, J. T. (1995). Igneous rims on low-FeO and high-FeO chondrules in ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(23):4951–4966.
- Kurahashi, E., Kita, N. T., Nagahara, H., Morishita, Y., Ruzicka, A., Floss, C., y Hutson, M. (2008). Relict olivine grains, chondrule recycling, and implications for the chemical, thermal, and mechanical processing of nebular materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72:5530–5557.
- Lauretta, D., Nagahara, H., y Alexander, C. (2006). Petrology and origin of ferromagnesian silicate chondrules. *Meteorites and the Early Solar System II*.
- Levresse, G., Cervantes de la Cruz, K., Aranda-Gómez, J. J., Dávalos-Elizondo, M., Jiménez-Sandoval, S., Rodríguez-Melgarejo, F., y Aldave, L. (2015). CO_2 fluid inclusion barometry in mantle xenoliths from central Mexico: A detailed record of magma ascent. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310.

- Levy, E. H., Araki, S., Levy, E. H., y Araki, S. (1989). Magnetic reconnection flares in the protoplanetary nebula and the possible origin of meteorite chondrules. *Icarus*, 81:74–91.
- Libourel, G., Krot, A. N., Tissandier, L., Libourel, G., Krot, A. N., y Tissandier, L. (2006). Role of gas-melt interaction during chondrule formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 251:232–240.
- Liffman, K., Brown, M. J. I., Liffman, K., y Brown, M. J. I. (1996). The protostellar jet model of chondrule formation. *cpfd*, pages 285–302.
- Lofgren, G. (1989). Dynamic crystallization of chondrule melts of porphyritic olivine composition: Textures experimental and natural. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53:461–470.
- Lofgren, G. (1996). A dynamic crystallization model for chondrule melts. In *Chondrules and the Protoplanetary Disk*, pages 187–196.
- Lofgren, G., Lanier, A. B., Lofgren, G., y Lanier, A. B. (1990). Dynamic crystallization study of barred olivine chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54:3537–3551.
- Lofgren, G., Russell, W. J., Lofgren, G., y Russell, W. J. (1986). Dynamic crystallization of chondrule melts of porphyritic and radial pyroxene composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50:1715–1726.
- Lovering, J. F. y Parry, L. G. (1962). Thermomagnetic analysis of co-existing nickel-iron metal phases in iron meteorites and the thermal histories of the meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 26(3):361–382.
- MacPherson, G. J. (2003). Calcium-Aluminum-rich Inclusions in Chondritic Meteorites. *Treatise on Geochemistry*, 1:711.
- MacPherson, G. J., Kita, N. T., Ushikubo, T., Bullock, E. S., Davis, A. M., MacPherson, G. J., Kita, N. T., Ushikubo, T., Bullock, E. S., y Davis, A. M. (2012). Well-

- resolved variations in the formation ages for ca-al-rich inclusions in the early solar system. *Earth and Planetary Science Letters*, 331:43–54.
- MacPherson, G. J., Simon, S. B., Davis, A. M., Grossman, L., y Krot, A. N. (2005). Calcium-Aluminum-rich Inclusions: Major Unanswered Questions. In Krot, A. N., Scott, E. R. D., y Reipurth, B., editors, *Chondrites and the Protoplanetary Disk*, volume 341 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 225.
- Marrocchi, Y., Euverte, R., Villeneuve, J., Batanova, V., Welsch, B., Ferrière, L., y Jacquet, E. (2019). Formation of cv chondrules by recycling of amoeboid olivine aggregate-like precursors. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 247:121–141.
- Mason, B. (1967). The Bununu meteorite, and a discussion of the pyroxene-plagioclase achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(2):107–115.
- Matsumura, S. y Pudritz, R. E. (2006). Dead zones and extrasolar planetary properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 365(2):572–584.
- McNally, C. P., Hubbard, A., Mac Low, M.-M., Ebel, D. S., y D’Alessio, P. (2013). Mineral Processing by Short Circuits in Protoplanetary Disks. *The Astrophysical Journal*, 767(1):L2.
- Merrill, G. P. (1920). On Chondrules and Chondritic Structure in Meteorites. *Proceedings of the National Academy of Science*, 6(8):449–472.
- Misawa, K. y Nakamura, N. (1996). Origin of refractory precursor components of chondrules from carbonaceous chondrites. *cpd*, pages 99–105.
- Miura, H., Nakamoto, T., Susa, H., Miura, H., Nakamoto, T., y Susa, H. (2002). A shock-wave heating model for chondrule formation: Effects of evaporation and gas flows on silicate particles. *Icarus*, 160:258–270.
- Miyamoto, M., Mikouchi, T., Jones, R. H., Miyamoto, M., Mikouchi, T., y Jones, R. H. (2009). Cooling rates of porphyritic olivine chondrules in the semarkona

- (ll3.00) ordinary chondrite: A model for diffusional equilibration of olivine during fractional crystallization. *Meteoritics and Planetary Science*, 44:521–530.
- Morris, M. A., Boley, A. C., Desch, S. J., y Athanassiadou, T. (2012). Chondrule formation in bow shocks around eccentric planetary embryos. *Astrophysical Journal*, 752.
- Morris, M. A. y Desch, S. J. (2010). Thermal histories of chondrules in solar nebula shocks. *Astrophysical Journal*, 722:1474–1494.
- Murakami, T., Ikeda, Y., Murakami, T., y Ikeda, Y. (1994). Petrology and mineralogy of yamato-86751 cv chondrite. *Meteoritics*, 29:397.
- Nelson, L. S., Blander, M., Skaggs, S. R., y Keil, K. (1972). Use of a CO₂ laser to prepare chondrule-like spherules from supercooled molten oxide and silicate droplets. *Earth and Planetary Science Letters*, 14(3):338–344.
- Nguyen, A. N., Stadermann, F. J., Zinner, E., Stroud, R. M., Alexander, C. M. O., y Nittler, L. R. (2007). Characterization of presolar silicate and oxide grains in primitive carbonaceous chondrites. *The Astrophysical Journal*, 656:1223–1240.
- Nittler, L. R. y Ciesla, F. (2016). Astrophysics with Extraterrestrial Materials. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 54:53–93.
- Nordine, P. C. y Atkins, R. M. (1982). Aerodynamic levitation of laser-heated solids in gas jets. *Review of Scientific Instruments*, 53(9):1456–1464.
- Padgett, D. L., Cieza, L., Stapelfeldt, K. R., Evans, Neal J., I., Koerner, D., Sargent, A., Fukagawa, M., van Dishoeck, E. F., Augereau, J.-C., Allen, L., Blake, G., Brooke, T., Chapman, N., Harvey, P., Porras, A., Lai, S.-P., Mundy, L., Myers, P. C., Spiesman, W., y Wahhaj, Z. (2006). The SPITZER c2d Survey of Weak-Line T Tauri Stars. I. Initial Results. *The Astrophysical Journal*, 645(2):1283–1296.
- Palme, H., Spettel, B., Ikeda, Y., Palme, H., Spettel, B., y Ikeda, Y. (1993). Origin of chondrules and matrix in carbonaceous chondrites. *Meteoritics*, 28:417.

- Pessah, M. E., Chan, C.-K., y Psaltis, D. (2008). The fundamental difference between shear alpha viscosity and turbulent magnetorotational stresses. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 383(2):683–690.
- Pilipp, W., Hartquist, T. W., Morfill, G. E., y Levy, E. H. (1998). Chondrule formation by lightning in the protosolar nebula. *Astronomy and Astrophysics*, 331:121–146.
- Pizzarello, S., Cooper, G. W., Flynn, G. J., Pizzarello, S., Cooper, G. W., y Flynn, G. J. (2006). The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles. *Meteorites and the Early Solar System*, page 625.
- Poppe, T., Güttler, C., y Springborn, T. (2010). Thermal metamorphoses of cosmic dust aggregates: experiments by furnace, electrical gas discharge, and radiative heating. *Earth, Planets and Space*, 62(1):53–56.
- Prinz, M., Weisberg, M. K., Nehru, C. E., Prinz, M., Weisberg, M. K., y Nehru, C. E. (1988). Gunlock, a new type 3 ordinary chondrite with a golfball-sized chondrule. *Meteoritics*, 23:297.
- Radomsky, P. M., Hewins, R. H., Radomsky, P. M., y Hewins, R. H. (1990). Formation conditions of pyroxene-olivine and magnesian olivine chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54:3475–3490.
- Ringwood, A. E. (1961). Chemical and genetic relationships among meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 24(3):159–197.
- Rose, G. (1864). *Beschreibung und Eintheilung der Meteoriten auf Grund der Sammlung im mineralogischen Museum zu Berlin*. Berlin : Dümmler.
- Rubin, A. E., Kallemeyn, G. W., Wasson, J. T., Clayton, R. N., Mayeda, T. K., Grady, M., Verchovsky, A. B., Eugster, O., y Lorenzetti, S. (2003). Formation of metal and silicate globules in Gujba: a new Bencubbin-like meteorite fall. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(17):3283–3298.

- Rubin, A. E. y Krot, A. N. (1996). Multiple heating of chondrules. In *Chondrules and the Protoplanetary Disk*, pages 173–180.
- Rubin, A. E., Sailer, A. L., y Wasson, J. T. (1999). Troilite in the chondrules of type-3 ordinary chondrites: Implications for chondrule formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(15):2281–2298.
- Russell, S. S., Hartmann, L., Cuzzi, J., Krot, A. N., Gounelle, M., Weidenschilling, S., Russell, S. S., Hartmann, L., Cuzzi, J., Krot, A. N., Gounelle, M., y Weidenschilling, S. (2006). Timescales of the solar protoplanetary disk. *Meteorites and the Early Solar System*, page 233.
- Ruzicka, A., Floss, C., y Hutson, M. (2008). Relict olivine grains, chondrule recycling, and implications for the chemical, thermal, and mechanical processing of nebular materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(22):5530–5557.
- Sanders, I. S., Sanders, y S., I. (1996). A chondrule-forming scenario involving molten planetesimals. *cpd*, pages 327–334.
- Sanders, I. S. y Taylor, G. J. (2005). Implications of ^{26}Al in Nebular Dust: Formation of Chondrules by Disruption of Molten Planetesimals. In Krot, A. N., Scott, E. R. D., y Reipurth, B., editors, *Chondrites and the Protoplanetary Disk*, volume 341 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 915.
- Sargent, B. A., Forrest, W. J., Tayrien, C., McClure, M. K., Li, A., Basu, A. R., Manoj, P., Watson, D. M., Bohac, C. J., Furlan, E., Kim, K. H., Green, J. D., y Sloan, G. C. (2009). Silica in Protoplanetary Disks. *The Astrophysical Journal*, 690(2):1193–1207.
- Scott, E. R. (2007). Chondrites and the protoplanetary disk. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35:577–620.
- Scott, E. R. D. (2006). Meteoritical and dynamical constraints on the growth mechanisms and formation times of asteroids and Jupiter. *Icarus*, 185(1):72–82.

- Scott, E. R. D. y Krot, A. N. (2005). Chondritic meteorites and the high-temperature nebular origins of their components. *Astronomical Society of the Pacific*, 341:15.
- Scott, E. R. D., Scott, y D., E. R. (1988). A new kind of primitive chondrite, allan hills 85085. *Earth and Planetary Science Letters*, 91:1–18.
- Sears, D. W. G. (1997). The Case for Chondrules and CAI Being Rare in the Early Solar System: Some Implications for Astrophysical Models. In *Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, page 1273.
- Sears, D. W. G., Dodd, R. T., Sears, D. W. G., y Dodd, R. T. (1988). Overview and classification of meteorites. *Meteorites and the Early Solar System*, pages 3–31.
- Sephton y A., M. (2005). *Organic matter in carbonaceous meteorites: past, present and future research*, volume 363. Royal Society.
- Shu, F. H., Shang, H., Lee, T., Shu, F. H., Shang, H., y Lee, T. (1996). Toward an astrophysical theory of chondrites. *Science*, 271:1545–1552.
- Skinner, W. R. (1990). Bipolar outflows and a new model of the early solar system. part ii: The origins of chondrules, isotopic anomalies, and chemical fractionations. *Lunar and Planetary Science Conference*, 21:1168.
- Solé, J. (2009). Determination of K-Ar ages in milligram samples using an infrared laser for argon extraction. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 23(22):3579–3590.
- Speck, A. K., Whittington, A. G., y Tartar, J. B. (2008). The Cosmic Crystallinity Conundrum: Clues from IRAS 17495-2534. *The Astrophysical Journal*, 687(2):L91.
- Stone, J. M. y Balbus, S. A. (1996). Angular Momentum Transport in Accretion Disks via Convection. *The Astrophysical Journal*, 464:364.
- Tachibana, S. y Huss, G. R. (2002). Sulfur Isotope Composition of Putative Primary Troilite in Chondrules. In *Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, page 1685.

- Tachibana, S. y Huss, G. R. (2005). Sulfur isotope composition of putative primary troilite in chondrules from Bishunpur and Semarkona. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(12):3075–3097.
- Tielens, A. G. G. M. (2010). *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*. Cambridge University Press, Massachusetts.
- Tronche, E. J., Hewins, R. H., MacPherson, G. J., Tronche, E. J., Hewins, R. H., y MacPherson, G. J. (2007). Formation conditions of aluminum-rich chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71:3361–3381.
- Tschermak, G. V. (1964). The microscopic properties of meteorites. die mikroskopische beschaffenheit der meteoriten. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 4:138–239.
- Tsuchiyama, A. y Nagahara, H. (1981). Effects of precooling thermal history and cooling rate on the texture of chondrules: A preliminary report. *National Institute Polar Research Memoirs*, 20:175.
- Tsuchiyama, A., Nagahara, H., y Kushiro, I. (1980). Experimental reproduction of textures of chondrules. *Earth and Planetary Science Letters*, 48(1):155–165.
- Tsuchiyama, A., Osada, Y., Nakano, T., Uesugi, K., Tsuchiyama, A., Osada, Y., Nakano, T., y Uesugi, K. (2004). Experimental reproduction of classic barred olivine chondrules: open-system behavior of chondrule formation 1. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68:653–672.
- Tsukamoto, K., Satoh, H., Takamura, Y., y Kuribayashi, K. (1999). A new approach for the formation of olivine-chondrules by aero-acoustic levitation. In Pitt, D., editor, *Antarctic Meteorites XXIV*, volume 24, pages 179–181.
- Urey, H. C., Craig, H., Urey, H. C., y Craig, H. (1953). The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4:36–82.

- Urey, H. C., Urey, y C., H. (1967). Parent bodies of the meteorites and the origin of chondrules. *Icarus*, 7:350–359.
- Villeneuve, J., Chaussidon, M., Libourel, G., Villeneuve, J., Chaussidon, M., y Libourel, G. (2009). Homogeneous distribution of ^{26}Al in the solar system from the mg isotopic composition of chondrules. *Science*, 325:985.
- Wadhwa, M., Srinivasan, G., y Carlson, R. W. (2006). *Timescales of Planetesimal Differentiation in the Early Solar System*, page 715.
- Wahhaj, Z., Cieza, L., Koerner, D. W., Stapelfeldt, K. R., Padgett, D. L., Case, A., Keller, J. R., Merín, B., Evans, Neal J., I., Harvey, P., Sargent, A., van Dishoeck, E. F., Allen, L., Blake, G., Brooke, T., Chapman, N., Mundy, L., y Myers, P. C. (2010). The Spitzer c2d Survey of Weak-line T Tauri Stars. III. The Transition from Primordial Disks to Debris Disks. *The Astrophysical Journal*, 724(2):835–854.
- Wasson, J. T. (1974). *Meteorites : classification and properties*. Harvard, Massachusetts.
- Wasson, J. T. (1985). *Meteorites : their record of early solar-system history*. Harvard, Massachusetts.
- Wasson, J. T. (1996). Chondrule formation: energetics and length scales. In *Chondrules and the Protoplanetary Disk*, pages 45–54.
- Wasson, J. T., Krot, A. N., Lee, M. S., Rubin, A. E., Wasson, J. T., Krot, A. N., Lee, M. S., y Rubin, A. E. (1995). Compound chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59:1847–1869.
- Weidenschilling, S. J. y Ruzmaikina, T. V. (1993). Coagulation of grains in static and collapsing protostellar clouds. *Abstracts of the 24th Lunar and Planetary Science Conference, held in Houston, TX, 15-19 March 1993.*, p.1499, page 1499.
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J., Krot, A. N., Weisberg, M. K., McCoy, T. J., y Krot, A. N. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification. *Meteorites and the Early Solar System*, page 19.

- Weiss, B. P. y Elkins-Tanton, L. T. (2013). Differentiated planetesimals and the parent bodies of chondrites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41:529–560.
- Wick, M. J., Jones, R. H., Wick, M. J., y Jones, R. H. (2012). Formation conditions of plagioclase-bearing type I chondrules in CO chondrites: A study of natural samples and experimental analogs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 98:140–159.
- Williams, J. P. y Cieza, L. A. (2011). Protoplanetary disks and their evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49:67–117.
- Wood, J. A. (1958). *Silicate meteorite structures and the origin of the meteorites*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- Wood, J. A. (1963). *Physics and Chemistry of Meteorites*, page 337. Harvard, Massachusetts.
- Wood, J. A. (1985). Meteoritic constraints on processes in the solar nebula. In Black, D. C. y Matthews, M. S., editors, *Protostars and Planets II*, pages 687–702.
- Wood, J. A. (2004). Formation of chondritic refractory inclusions: The astrophysical setting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(19):4007–4021.
- Yu, Y., Hewins, R. H., Yu, Y., y Hewins, R. H. (1998). Transient heating and chondrule formation: Evidence from sodium loss in flash heating simulation experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62:159–172.
- Zinner, E. K., Zinner, y K., E. (2003). Presolar grains. *Treatise on Geochemistry*, 1:711.