

Fabricación aditiva de regolitos lunares mediante energía solar concentrada

Juan Carlos Ginés Palomares,

Abraham Sánchez Romero, Leonardo Facchini, Antonio Cañadilla Sánchez,
Ana Romero Gutiérrez, Jens Günster, Gloria Rodríguez Donoso

Contenidos

- Introducción.
 - Tecnologías ISRU.
- Fabricación mediante láser.
- Fabricación mediante concentrador solar.
- Conclusiones y próximos pasos.

Equipo de la investigación



Advanced multi-material processing group



ETS de Ingeniería Industrial de Ciudad Real
Escuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial de Toledo



Institute for Frontier Materials on Earth and in Space

Introducción

El siglo XX supuso el gran salto de la humanidad hacia la exploración espacial.

1961: Primer ser humano en el espacio

1969: Alunizaje del Apolo 11

1972: Apollo 17 - último astronauta en la Luna

Recientemente:

Ha resurgido el interés por la exploración lunar, impulsado por programas como el Artemis de la NASA.

Entre los objetivos a largo plazo se incluyen:

- La construcción de una base lunar.
 - Se han propuesto diferentes tecnologías y técnicas de construcción.

Costes de transporte: 10,800 \$/kg [1]
(previsión optimista)

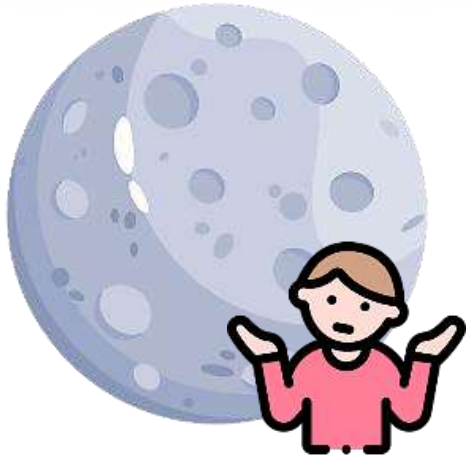
Costes actuales: >500,000 \$/kg



Representación artística de un proyecto de base lunar.
Créditos: ESA - P. Carril

Introducción

¿Qué es ISRU?



Utilización de Recursos In-Situ

Generación de productos y suministros (agua, oxígeno, cemento, energía) a partir de materiales y recursos lunares locales (regolito lunar, luz solar).

¿Por qué es importante?



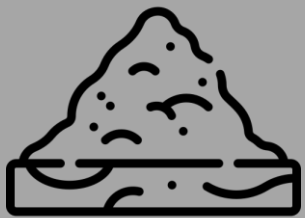
Sostenibilidad de la misión



Costes de la misión

Introducción

¿Qué es ISRU?



Regolito

Usos:

- Materiales de construcción para hábitats, plataformas de aterrizaje, carreteras y blindaje contra la radiación.
- Fuente de oxígeno mediante la extracción de óxidos metálicos.
- Fuente de elementos valiosos (aluminio, titanio, silicio) para herramientas y paneles solares.

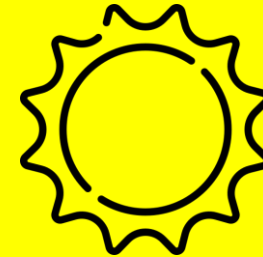


Agua

- Se encuentra en forma de hielo en cráteres cerca de los polos lunares.

Usos:

- Consumo humano, agricultura y sistemas de soporte vital para hábitats.
- Producción de propulsante para cohetes mediante electrólisis (hidrógeno y oxígeno).



Luz solar

- Iluminación solar casi continua en determinadas regiones polares.

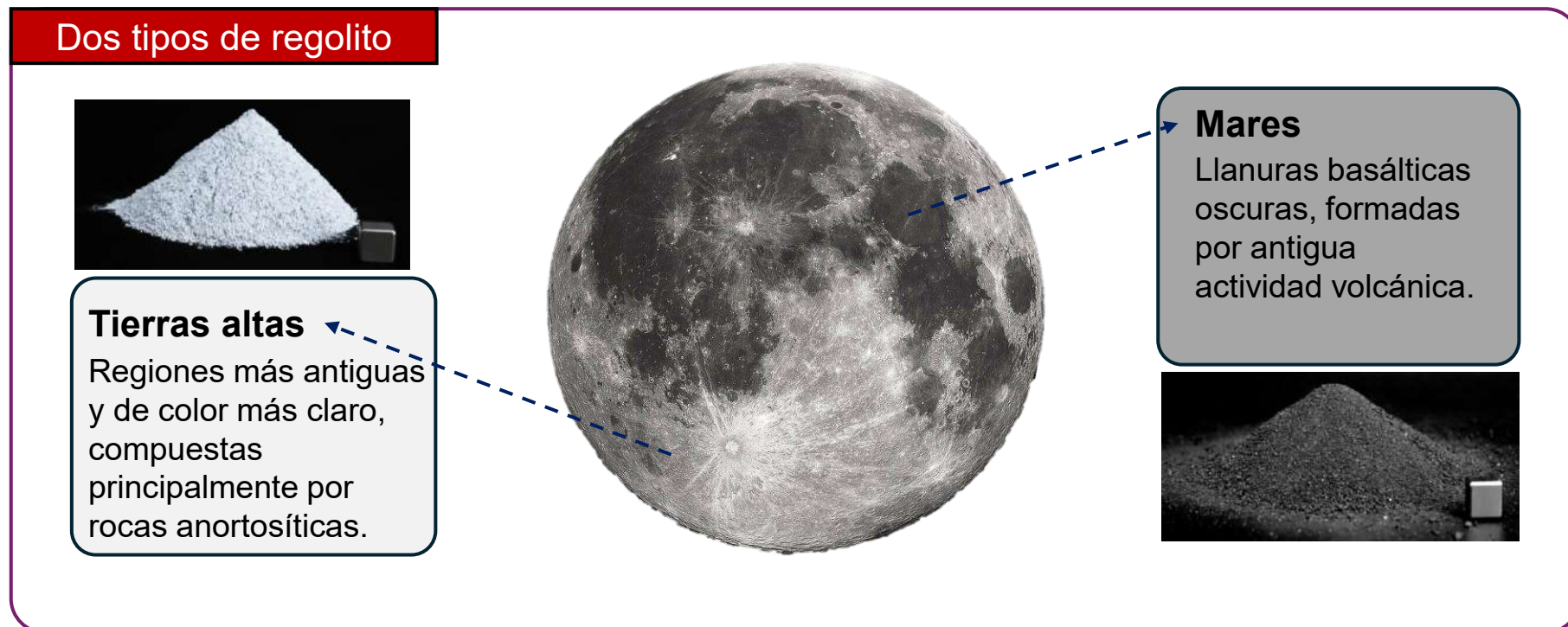
Usos:

- Energía solar para hábitats, rovers y procesos ISRU.
- Procesados térmicos del regolito para fabricación.

Introducción

Regolito lunar

- ➡ Capa de material suelto y fragmentado que cubre la roca sólida de la superficie de la Luna.
- ➡ Está compuesto por una mezcla de polvo fino, fragmentos de roca y partículas vítreas formadas por miles de millones de años de impactos de meteoritos.



Regolith simulants. Créditos: Space Resource Technologies.

Introducción

Regolito lunar

Debido a la falta de acceso al regolito lunar real, se utilizaron simulantes en las investigaciones.

Simulante utilizado: **EAC-1A**

- Simulante basáltico (representante de los mares lunares).
- Producido por el Centro Europeo de Astronautas (Colonia, Alemania).
- Suministrado por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR).



Créditos: ESA

Mares

Tierras altas

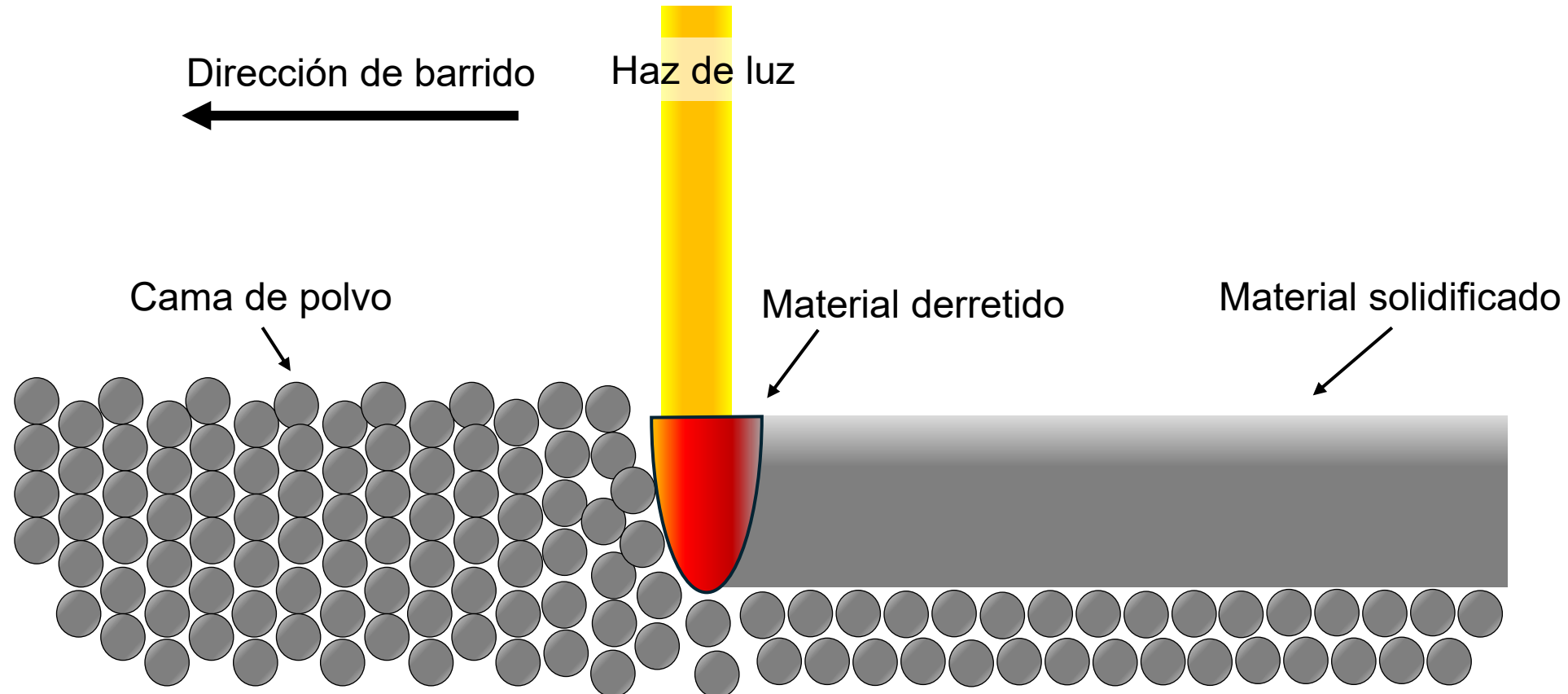
Óxidos	Basalto (wt.%)	Anortosita (wt.%)
SiO ₂	48.61	48.69
TiO ₂	2.29	0.55
Al ₂ O ₃	13.28	26.92
FeO (T)	10.14	2.87
MgO	8.73	2.20
CaO	8.31	13.32
Na ₂ O	3.67	3.17
K ₂ O	1.71	0.52
MnO	0.18	0.05
Sum	96.92	98.29

[2]

Introducción

Fabricación mediante haz energético

Utilizando fuentes de luz como la luz solar y los láseres, el regolito lunar puede sinterizarse o fundirse directamente para crear elementos de fabricación destinados a la construcción in situ.



Fabricación mediante láser

PAVER

Paving the road for large area sintering of regolith.

Duración: 06.2021 - 12.2022

Financiado mediante ESA OSIP

Objetivos:

- Análisis de las características de fusión de simulantes de regolito lunar.
- Desarrollo de un sistema para la sinterización y fusión a gran escala.
- Fabricación de elementos de pavimentación encajables.
- Análisis de las propiedades mecánicas.

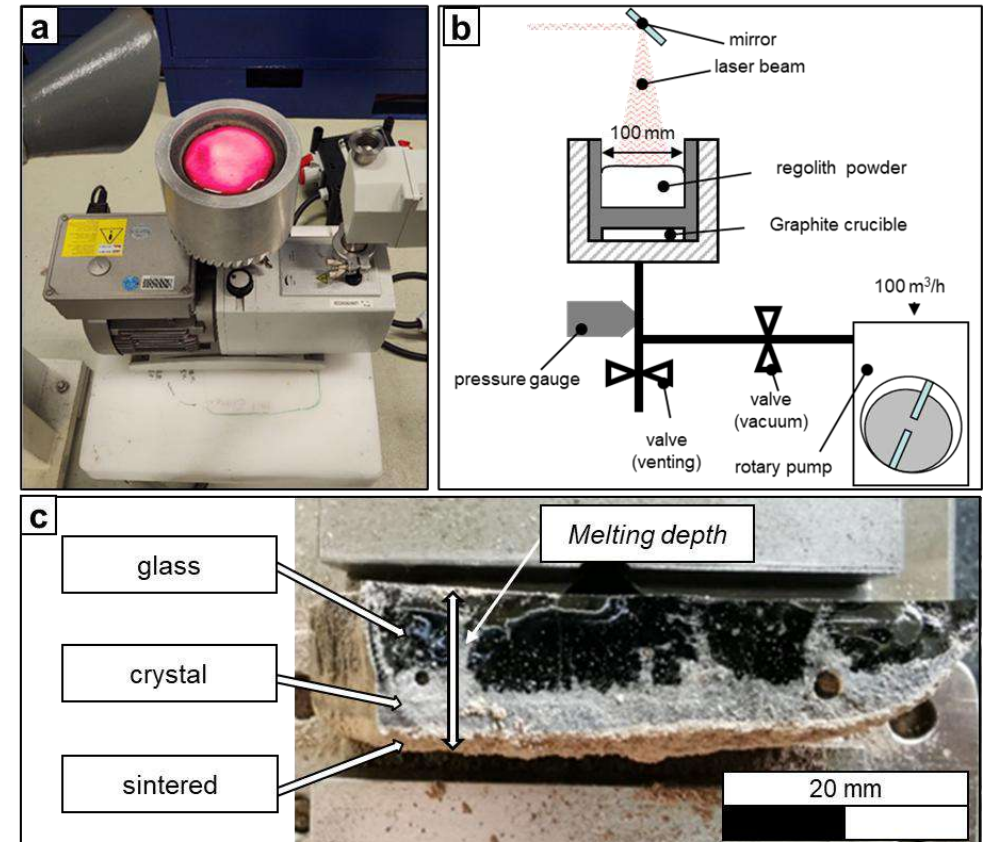


Fabricación mediante láser

Los experimentos llevados a cabo en este trabajo se realizaron a presión atmosférica, en aire y en condiciones de gravedad terrestre:

- Sistema láser: un láser de CO₂ de 12 kW (potencia máxima) con un diámetro máximo en el foco de 100 mm.
- ➡ Un láser de CO₂ emite radiación monocromática en el espectro infrarrojo, en torno a los 10,6 μm.
- ➡ Experimentos con regolito basáltico EAC-1.

- Experimentos a punto fijo y diferentes densidades de potencia.



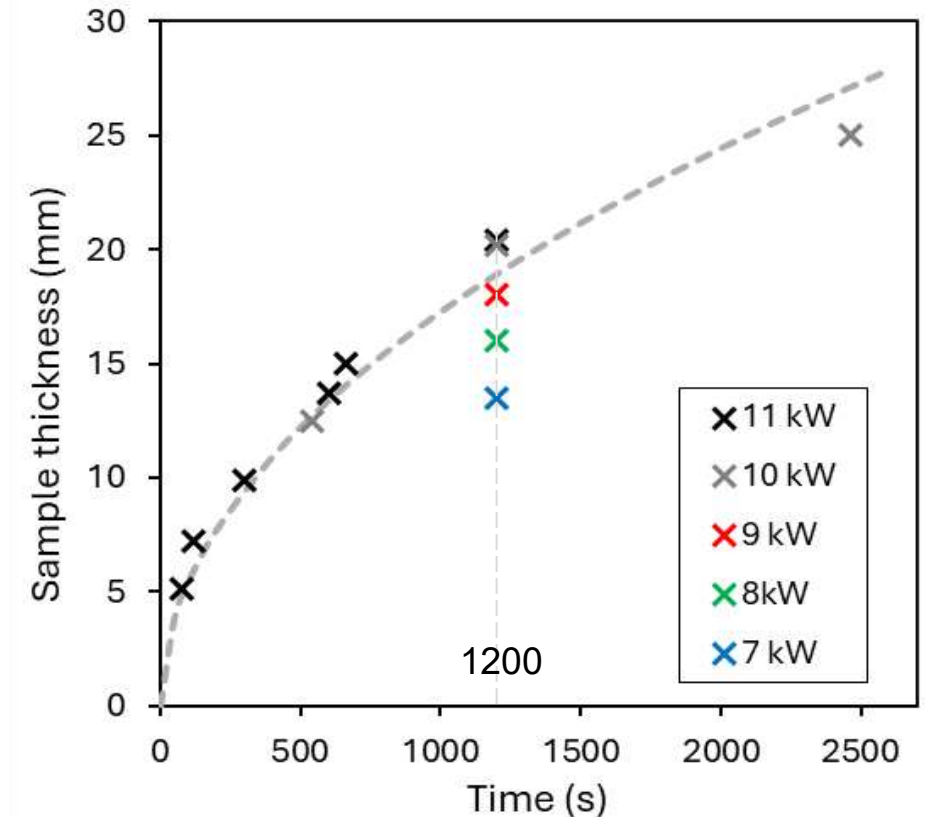
Fabricación mediante láser

Los experimentos llevados a cabo en este trabajo se realizaron a presión atmosférica, en aire y en condiciones de gravedad terrestre:

- Sistema láser: un láser de CO₂ de 12 kW (potencia máxima) con un diámetro máximo en el foco de 100 mm.

- ➔ Las muestras producidas alcanzan un grosor de hasta 25 mm.
- ➔ El grosor es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de irradiación láser.
- ➔ No se observó una diferencia significativa en el grosor entre 11 kW (140 W/cm²) y 10 kW (127 W/cm²).
- ➔ Se observó una disminución gradual para potencias del láser de 9, 8 y 7 kW.

- Experimentos a punto fijo y diferentes densidades de potencia.



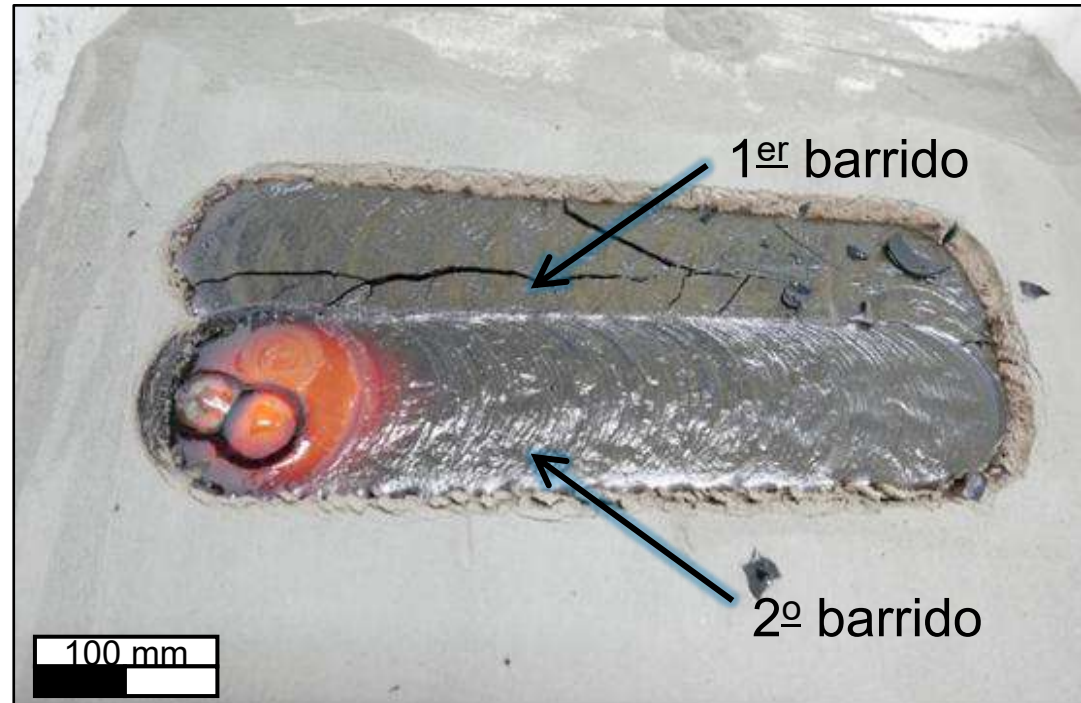
Fabricación mediante láser

Barridos individuales obtenidos moviendo el láser en una dirección.

➡ Ajustar la velocidad del láser para evitar rotura de la muestra por choque térmico.



➡ La superposición de dos barridos en paralelo causaba la aparición de grietas y rotura de las muestras.



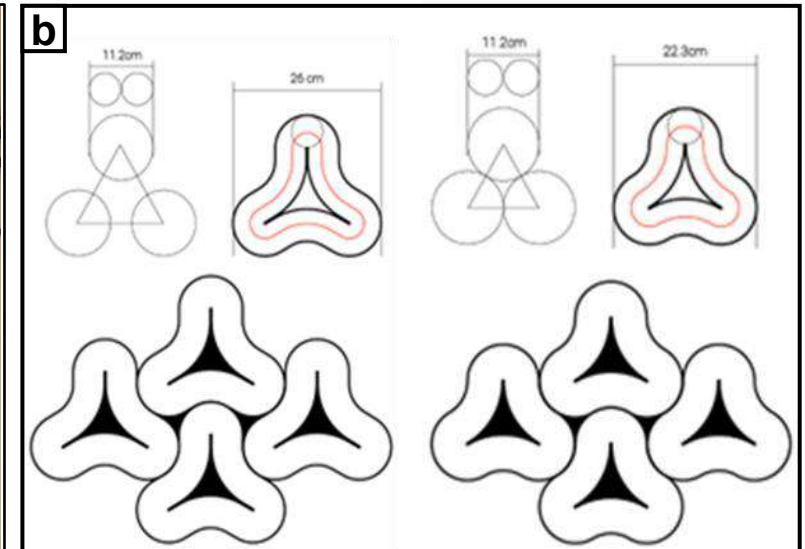
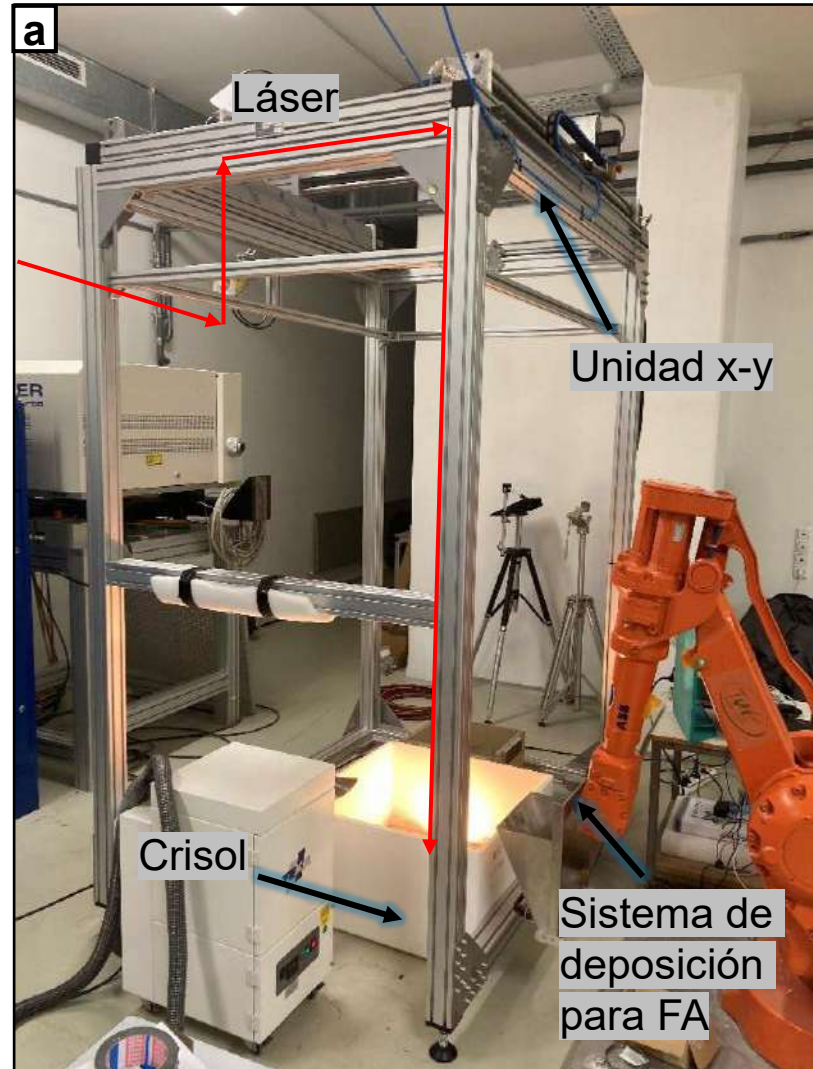
Fabricación mediante láser

Piezas obtenidas moviendo el láser en dos direcciones.

Geometrías encajables (de capa única y multicapa)

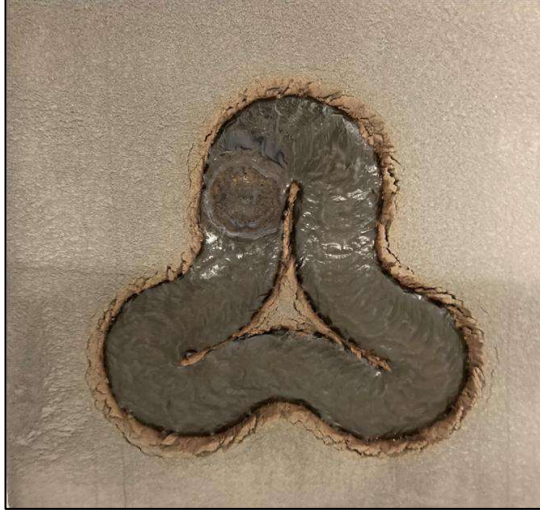


Sección transversal de una pieza fabricada mediante la deposición de tres capas (15 mm de espesor) sobre la cama de polvo.



Motivación

➡ Limitaciones de provisión energética en la luna.



Energía requerida para
fabricar **una baldosa** con
el láser:

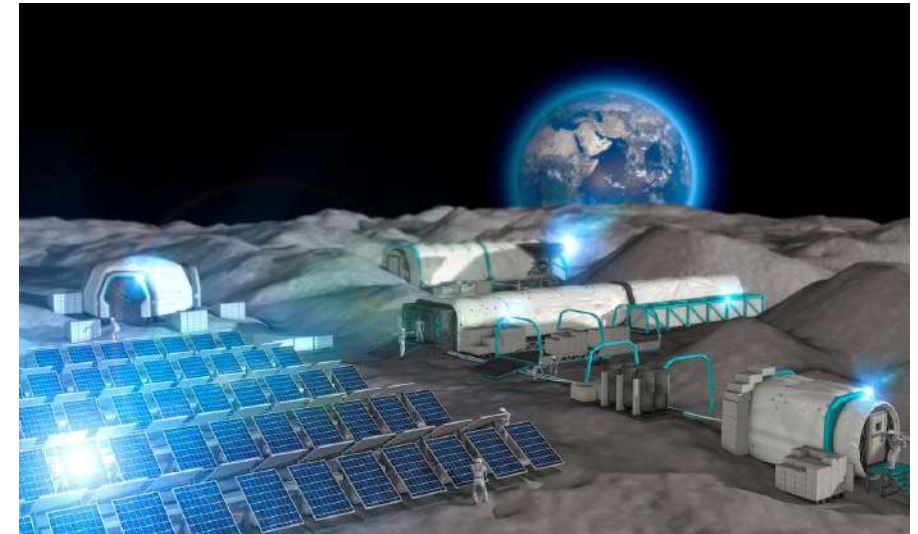
3.6 kWh



Láser de CO₂

Eficiencia ~10% ➡ **36 kWh**
Consumo eléctrico

¿Cuántos paneles solares se necesitan?



Créditos: taltech.ee

- 1 panel solar 400W: 0.4 kWh
- Total: aprox. **90 paneles**

Fabricación mediante concentrador solar

➡ Limitaciones de provisión energética en la luna.

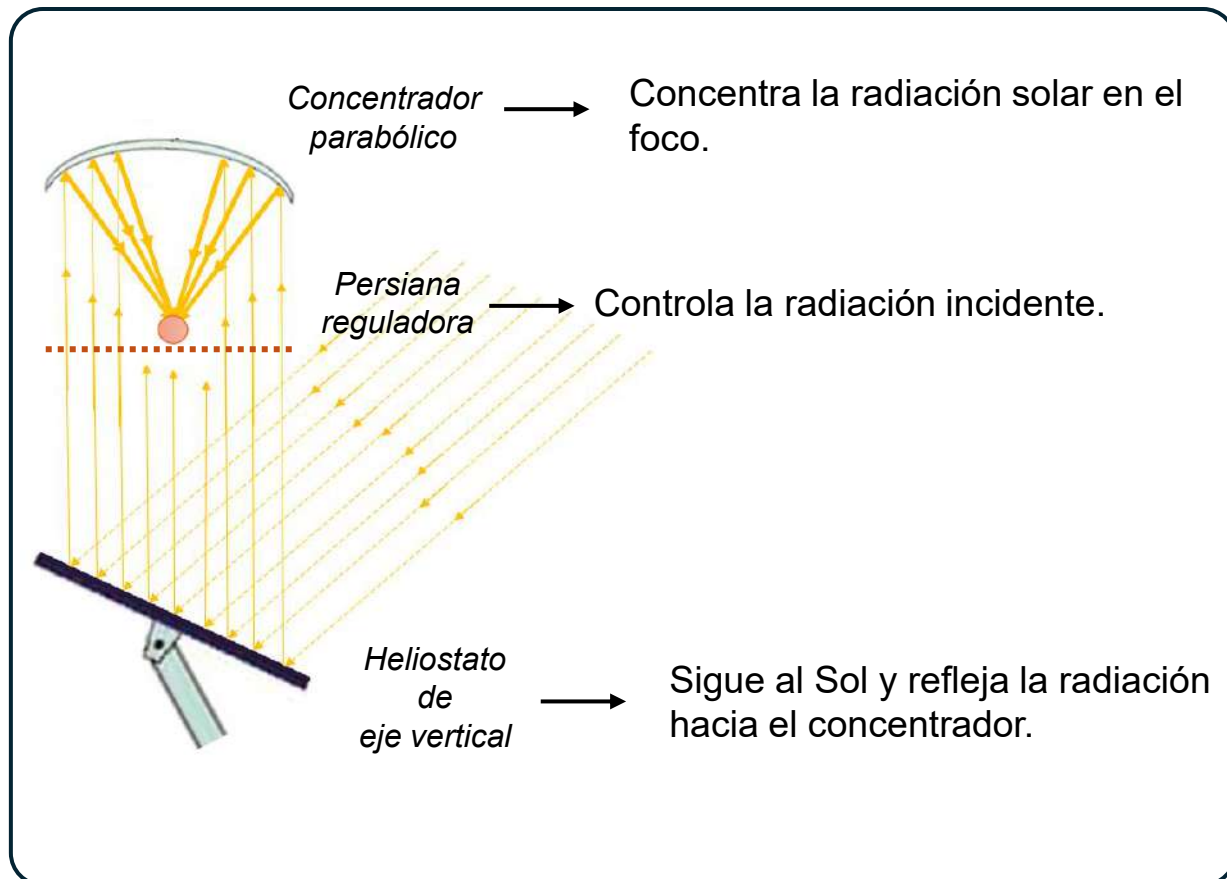
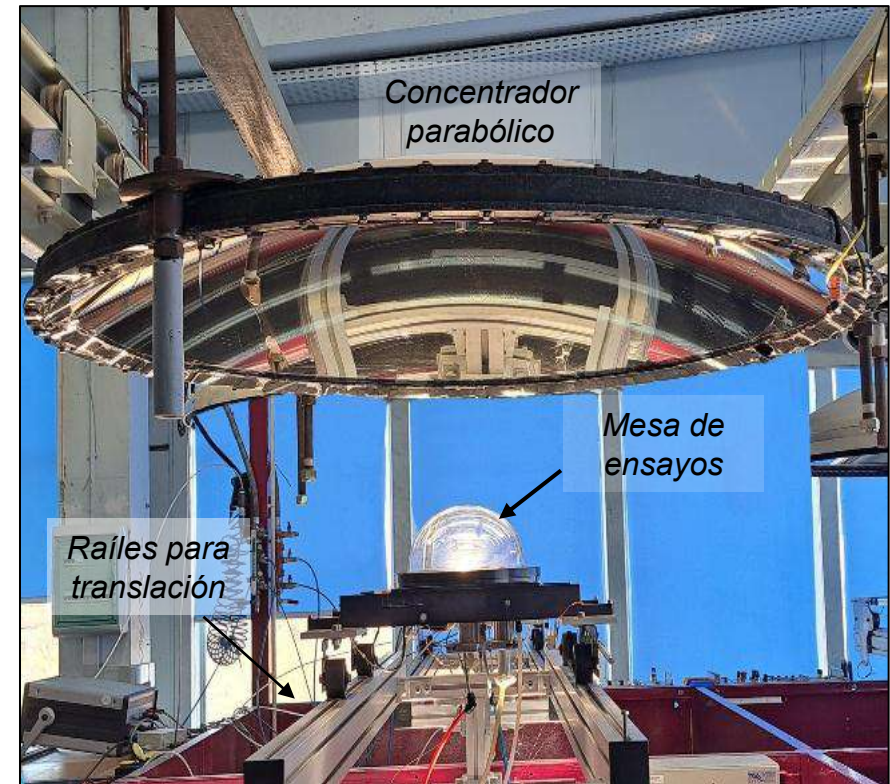
Solución: uso de concentradores solares.

Horno solar parabólico

Superficie Heliostato = 150 m²

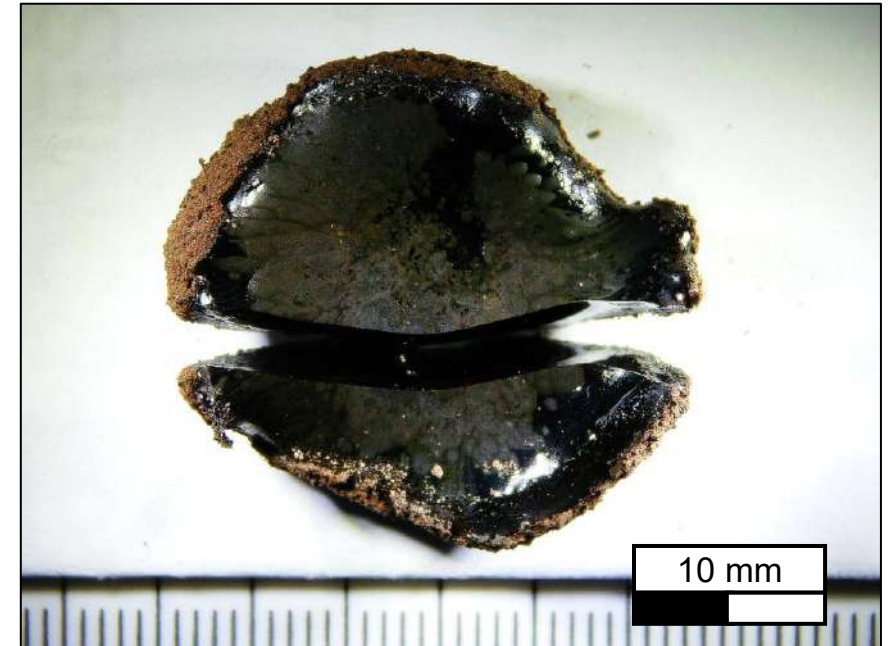
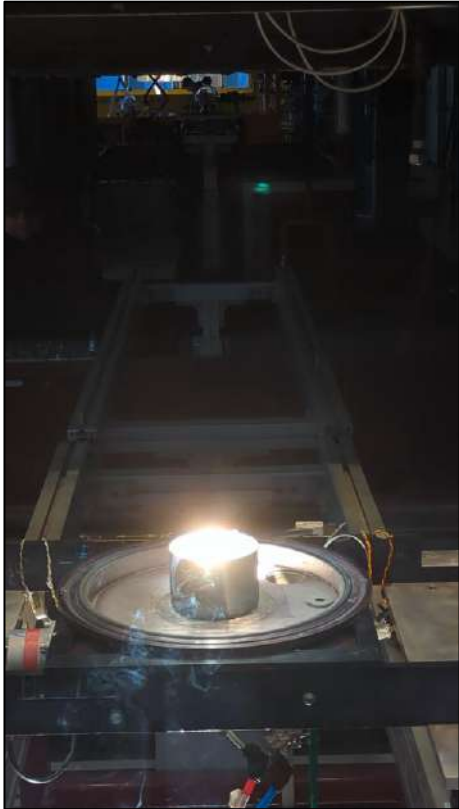
Ø espejo parabólico = 200 cm

16000 veces la radiación solar directa (1600 W/cm²)



Fabricación mediante concentrador solar

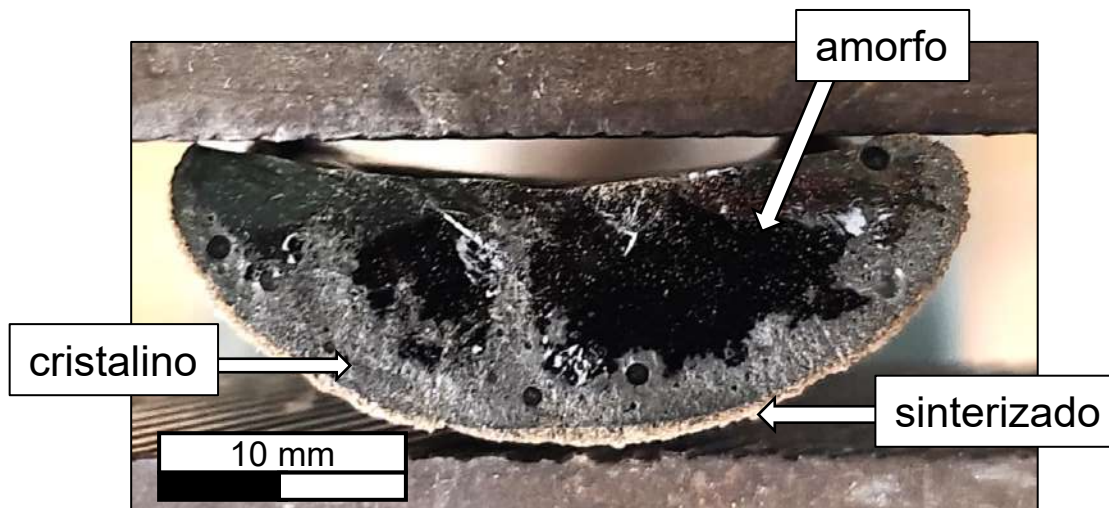
- Experimentos a punto fijo, diferentes aperturas de persiana y tiempos de irradiación.
- Simulante lunar EAC-1A (basalto).



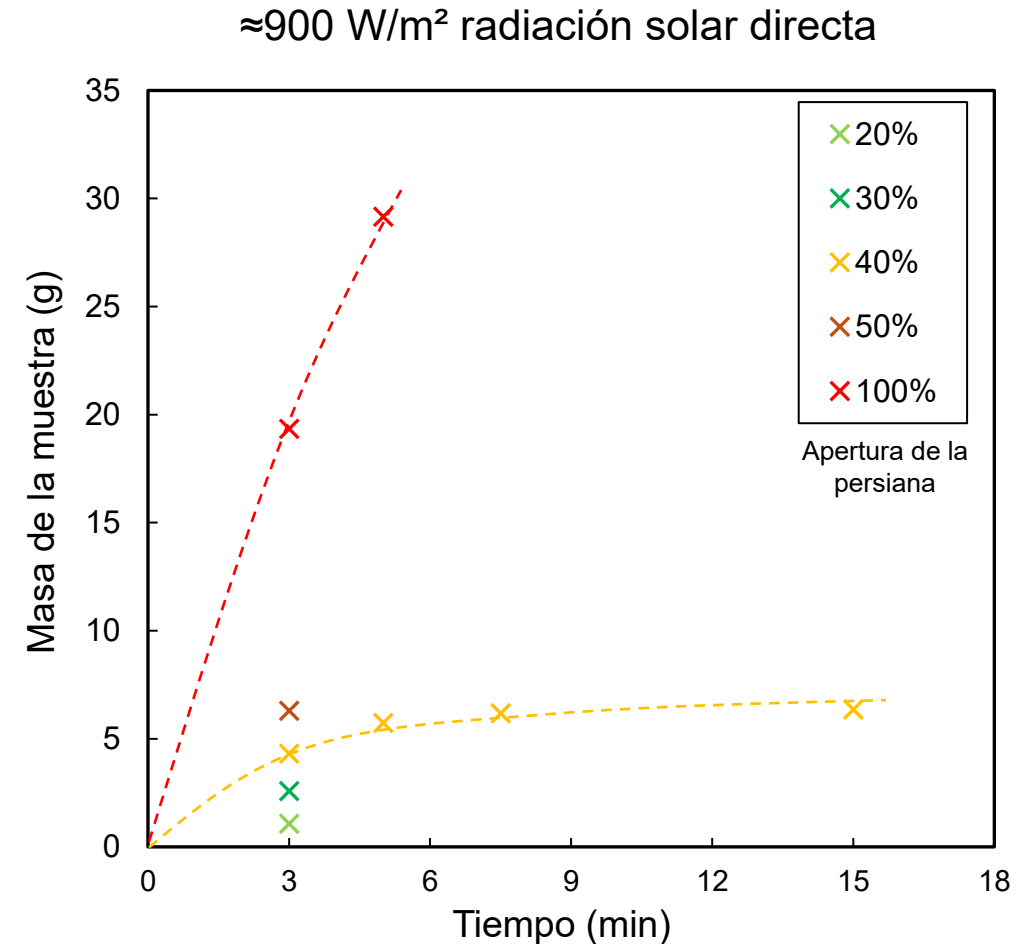
Experimento llevado a cabo con apertura de persiana del 100 %.

Fabricación mediante concentrador solar

- Experimentos a punto fijo, diferentes aperturas de persiana y tiempos de irradiación.
- Simulante lunar EAC-1A (basalto).



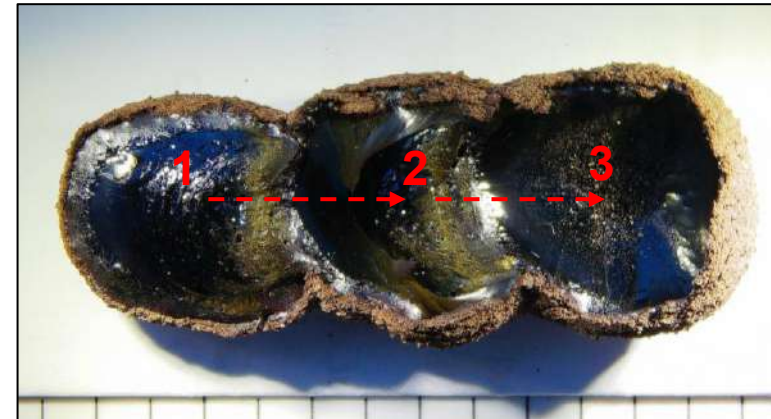
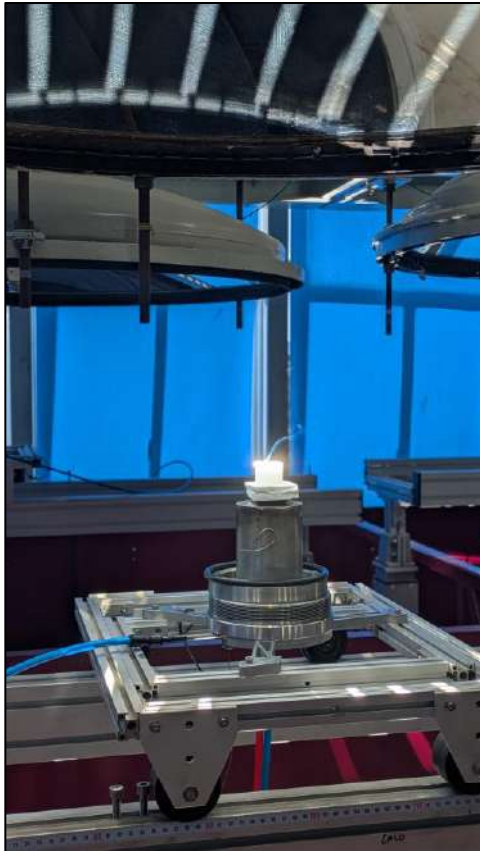
- ➔ Los resultados son similares a los obtenidos con el láser de CO₂.
- ➔ La cantidad de material procesado aumenta al abrir más la persiana y aumentar el tiempo de irradiación.



Fabricación mediante concentrador solar

- Experimentos con barridos.
- Tres puntos conectados formando un cordón (movimiento manual).
- Simulante lunar EAC-1A (basalto).

Apertura: 40%
Tiempo: 15 min/punto.

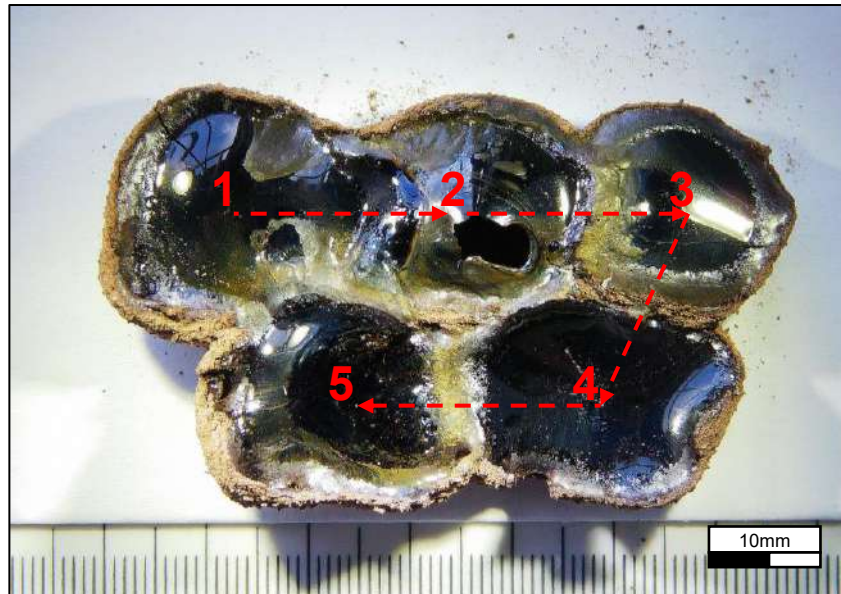


Fabricación mediante concentrador solar

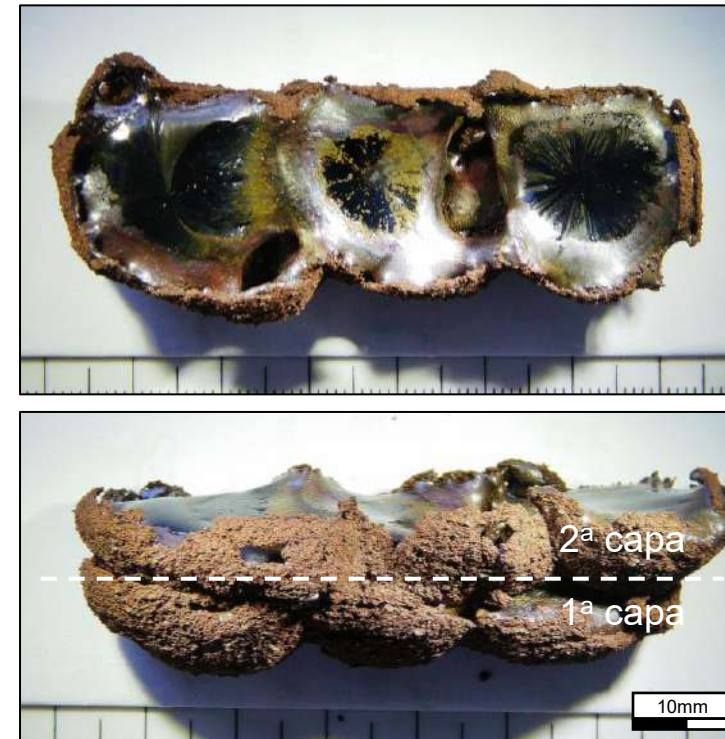
- Experimentos con barridos en dos dimensiones y multicapa.
- Cinco puntos conectados y dos capas en paralelo (movimiento manual).
- Simulante lunar EAC-1A (basalto).

Apertura: 40%
Tiempo: 15 min/punto.

Barridos paralelos



Fabricación aditiva



Fabricación mediante concentrador solar

Conclusiones

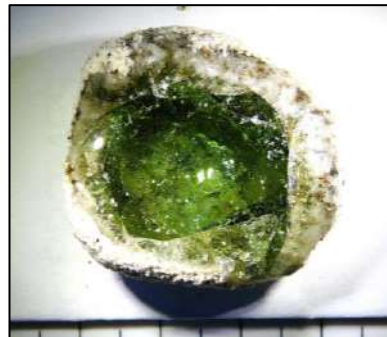
- Los concentradores solares permiten utilizar directamente la energía solar para la fabricación lunar.
- Se reduce la dependencia de sistemas eléctricos de alta potencia (láser).
- Los experimentos muestran resultados comparables a los obtenidos mediante procesamiento láser.
- La técnica permite la fabricación de estructuras mediante estrategias de multibarrido y multicapa.



Fabricación mediante concentrador solar

Próximos pasos

- Uso de un sistema basado en lente de Fresnel como set-up trasladable a la superficie lunar.
- Implementación de una mesa móvil para automatizar barridos y fabricación aditiva.
- Estudio de distintos simulantes lunares.

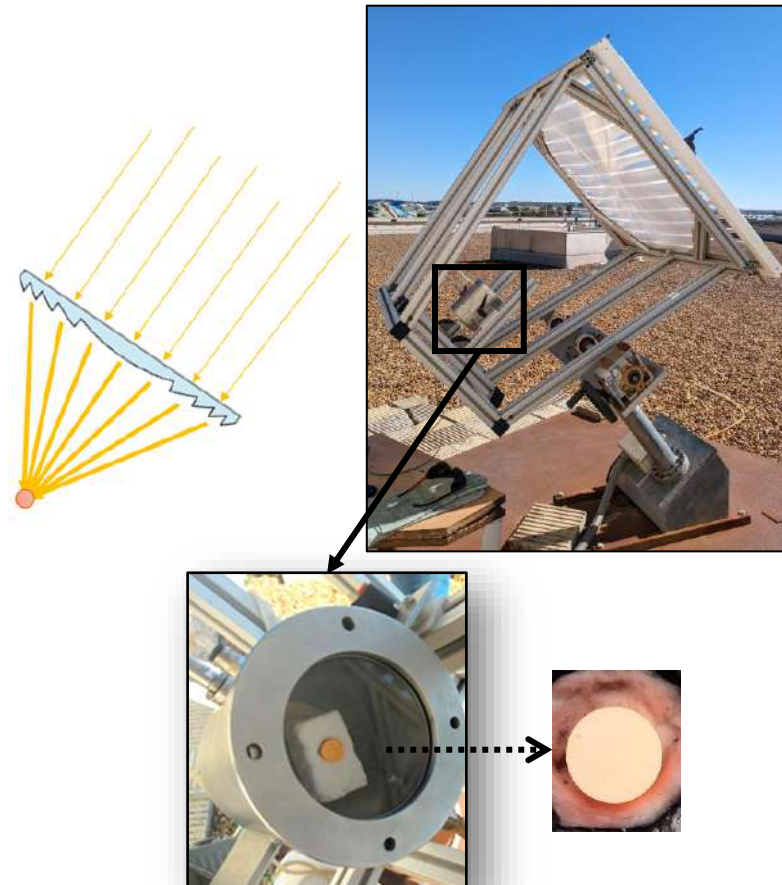


Resultados preliminares con anortosita.

Lente de Fresnel *ETSII, Ciudad Real, España*

Ø = 90 cm

2644 veces la radiación solar directa (265 W/cm²)



Fabricación mediante concentrador solar

Agradecimientos

- El Proyecto PAVER fue implementado como parte de OSIP OFF-EARTH MANUFACTURING AND CONSTRUCTION CAMPAIGN - Número de contrato: 4000134280/21/NL/GLC/mk.
- Agradecemos al Gobierno de Renania del Norte-Westfalia (Alemania) el suministro de simulantes de regolito lunar como parte del equipamiento de la instalación LUNA.



Gracias por su atención