

Premio SOCIEMAT Mejor Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de Materiales 2022**UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA EN LA ELIMINACIÓN TÉRMICA Y SINTERIZACIÓN DE PIEZAS DE ACEROS DE HERRAMIENTAS IMPRESAS MEDIANTE 3D**

A. García de la Camacha¹, A. Romero², G.P. Rodríguez¹

¹E.T.S Ingeniería Industrial, Universidad de Castilla-La Mancha (ETSII-UCLM)

²E.T.S Ingeniería Industrial y Aeroespacial, Universidad de Castilla-La Mancha (EIIA-UCLM)

angela.garcia15@alu.uclm.es; ana.rgutierrez@uclm.es; gloria.rodriiguez@uclm.es

Resumen: Este trabajo estudia la viabilidad del uso de la Energía Solar Concentrada (ESC) como fuente de calentamiento para procesar piezas de acero de herramientas AISI A2, conformadas mediante la tecnología de Fabricación Aditiva por Filamento Fundido (FFF). Con el fin de disminuir el consumo energético, se utiliza una instalación solar de bajo coste, basada en una lente de Fresnel, en las etapas que requieren altas temperaturas, la eliminación térmica y la sinterización. Asimismo, el procedimiento se lleva a cabo de manera convencional utilizando hornos eléctricos para poder comparar los resultados obtenidos. Una vez completado el proceso solar, se obtienen piezas metálicas, perfectamente densificadas, sin defectos, de buen aspecto superficial y alto brillo. Destaca la disminución del tiempo requerido para llevar a cabo la eliminación térmica y la sinterización que pasa de 22 horas necesarias en la ruta convencional a 70 minutos en la instalación solar.

Palabras clave: Acero de herramientas, Energía Solar Concentrada, Fabricación Aditiva, Fabricación por Filamento Fundido, Sinterización, Eliminación térmica.

1. INTRODUCCIÓN.

En los últimos años, la crisis energética y medioambiental en la que está sumida el planeta ha supuesto el inicio de la búsqueda de nuevas fuentes de energía libres de emisiones contaminantes y de naturaleza renovable o inagotable. La Energía Solar Concentrada presenta numerosas ventajas ante el problema global actual. Además, permite procesar materiales en tiempos reducidos, de forma mucho más rápida que los hornos convencionales eléctricos [1]. Por ello, además de ser una energía respetuosa con el medio ambiente, también resulta económicamente competitiva.

La ESC ya ha sido empleada en el procesamiento de todo tipo de materiales metálicos, obteniendo resultados sobresalientes en un amplio número de campos de aplicación a través de numerosos estudios [2]. En la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Ciudad Real (UCLM) se utiliza como concentrador solar una instalación basada en una única lente de Fresnel. Este equipo presenta grandes ventajas: sencilla, alta capacidad de concentración y bajo coste [3]. Entre estos trabajos llevados a cabo con ESC, destacan las investigaciones de la sinterización de distintas aleaciones metálicas, procesos de soldadura, tratamientos de modificación superficial y distintos tipos de recubrimientos [4-5].

En ausencia de investigaciones previas, el presente trabajo estudia la viabilidad en el procesado de piezas de acero de herramientas A2 conformadas mediante la técnica de Fabricación Aditiva por Filamento Fundido, a partir de una metodología alternativa basada en el uso

de la Energía Solar Concentrada durante las etapas de eliminación térmica y sinterización.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

En primer lugar, la impresión de las piezas en la estación de trabajo Markforged Metal X, se realiza utilizando un filamento comercial de polvo de acero de herramientas A2 mezclado con un sistema ligante polimérico. Una vez obtenidas las “piezas en verde”, éstas son sometidas a una etapa de eliminación en disolvente y secado en el equipo Markforged Wash-1. A continuación, las etapas de eliminación térmica del ligante de mayor peso molecular y sinterización son realizadas siguiendo dos procedimientos de trabajo distintos (Figura 1). El primero, reproduce el proceso tradicional, diseñando ciclos adecuados que se desarrollan en dos hornos eléctricos, es decir, inicialmente se realizan ciclos de eliminación térmica del aglutinante de mayor peso molecular a 440 °C, adquiriendo así la denominada “pieza en marrón”; y a continuación se realiza su sinterización a una temperatura máxima de 1250 °C. Por otra parte, el segundo procedimiento se desarrolla haciendo uso de la Energía Solar Concentrada a través de la Lente de Fresnel situada en la azotea del edificio ETSII-UCLM (Ciudad Real, España). Este equipo está dotado de una lente circular de 900 mm de diámetro fabricada de un material acrílico [3]. La lente es capaz de concentrar 2644 veces la radiación solar directa que reciba sobre las probetas, lo que permite eliminar el ligante de mayor peso molecular y sinterizar las piezas hasta su estado final metálico. Las probetas se sitúan en el interior de

una cámara con una atmósfera protectora (Nitrógeno o N_2-H_2) y que consta de una ventana transparente a la radiación solar. La temperatura se registra con un termopar tipo K en contacto con la cara inferior de la probeta. Por otra parte, la velocidad de calentamiento se controla mediante la apertura de una persiana que regula la radiación que llega a la lente. Asimismo, para disminuir los gradientes térmicos y conseguir una temperatura homogénea en toda la probeta, se utilizan distintos ciclos de calentamiento.

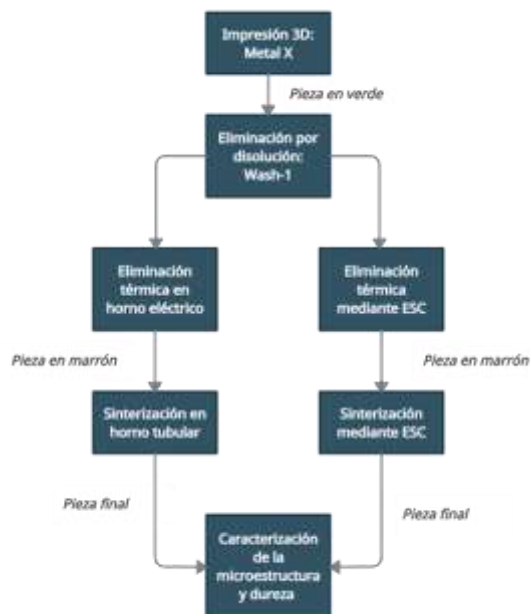


Figura 1. Metodología.

La caracterización de las piezas metálicas finales se llevó a cabo mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM), y medida de la densidad. Finalmente, se midió la dureza Vickers, debido a la importancia de esta propiedad en aquellas aplicaciones en las que el acero de herramienta AISI A2 es requerido.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este primer estudio se imprimieron piezas cilíndricas sencillas con las dimensiones adecuadas para que pudieran calentarse en el foco de la lente de Fresnel. Tras la impresión las probetas se encuentran sobredimensionadas (14 x 6 mm) para obtener finalmente, tras la contracción asociada a la sinterización, probetas de 12 x 5 mm. Estas piezas en verde presentan un color grisáceo, estrechamente relacionado con el color metálico característico del acero A2, pero sin brillo ni apariencia metálica, lo que se justifica por el importante contenido en ligante que contienen, como se puede observar en el análisis del filamento empleado para su fabricación (Figura 2). Seguidamente, tanto el aspecto macroscópico como las dimensiones se mantienen tras someter a las probetas a la etapa de eliminación química de disolución del ligante de menor peso molecular.

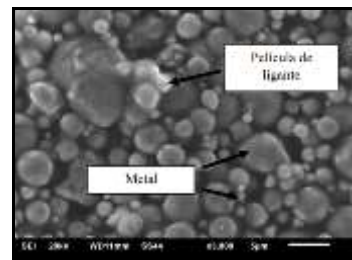


Figura 2. Micrografía del filamento comercial empleado.

A continuación, se programan diferentes ciclos de calentamiento en dos hornos eléctricos. Los primeros para llevar a cabo la etapa de eliminación térmica del sistema ligante y los últimos para completar la etapa de sinterización de las probetas.

Tras la etapa de eliminación térmica se obtienen probetas que logran eliminar el porcentaje óptimo de ligante (2.1% en masa), adquiriendo un estado de manipulación inestable, en el cual desprenden polvo con facilidad. Además, se caracterizan por la adquisición de un color amarronado, notablemente oscuro, debido a la oxidación superficial que sufren. Una vez sometidas a los diferentes ciclos de sinterización, las piezas adquieren apariencia metálica y su microestructura consta de ferrita y perlita muy fina (Figura 3). Además, existen carburos más claros precipitados en los límites de grano (Figura 3), que se identifican como carburos M_6C ricos en Mo.

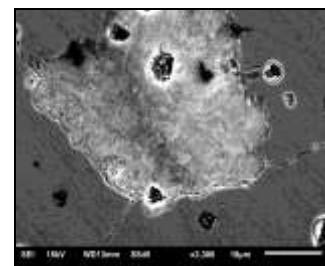


Figura 3. Micrografía SEM de las probetas sinterizadas en horno tubular.

De forma análoga a los ensayos realizados con energía eléctrica, se realiza el procesamiento de las probetas mediante la metodología solar. Para ello, es necesario realizar un estudio de viabilidad que respalde el uso de la ESC en la etapa de eliminación térmica del sistema ligante, debido a la ausencia de investigaciones previas.

El estudio de viabilidad se desarrolla mediante el diseño de diferentes ciclos llevados a cabo a diferentes temperaturas y realizando diversas mesetas. Estos ciclos permitieron observar distintas evidencias que verificaban la correcta eliminación del ligante, como la aparición y densificación de humo en la cámara de reacción (Figura 4 a) y la retención del polímero eliminado tanto en el interior de la cámara y de los conductos de entrada y salida de gas (Figura 4 b). Asimismo, tras el diseño de los últimos ciclos de eliminación, se establece la velocidad de calentamiento de las probetas como parámetro de control, fijando su valor óptimo en velocidades ≤ 24 °C/min.

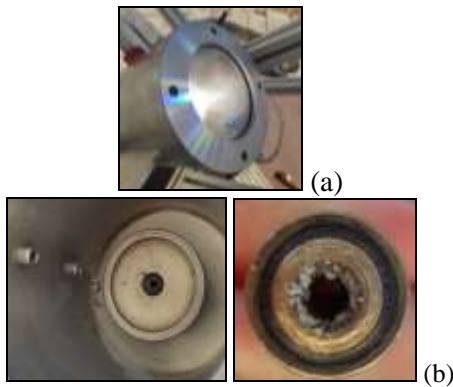


Figura 4. Evidencias visuales del proceso de eliminación térmica. (a) Aparición de humo en la cámara. (b) Restos de polímero tras los ensayos.

El diseño del ciclo solar óptimo se lleva a cabo variando la velocidad de calentamiento de las piezas hasta alcanzar la temperatura de sinterización, fijada en ~900°C. En un primer lugar los ciclos se llevan a cabo en atmósfera reductora de Nitrógeno, pero las probetas sufren una ligera oxidación superficial que impide la adquisición del aspecto y brillo metálico propio de este material. Por ello, se decide repetirlos en atmósfera de N₂-H₂ (Figura 5) llevando a cabo el proceso de eliminación térmica, mediante un ciclo de calentamiento a diferentes velocidades, seguido del ciclo de sinterización a temperatura máxima durante 15 min. Así, durante los ensayos, las probetas sufren un comportamiento similar al registrado en los ciclos anteriores: se observa la formación humo de la salida del ligante entre 260 y 300 °C. Asimismo, la fase de eliminación se completa a 350 °C cuando este humo cesa.

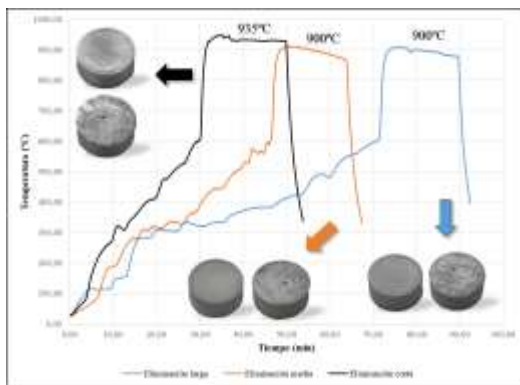


Figura 5. Ciclos de eliminación térmica y sinterización programados en atmósfera de N₂-H₂.

Las piezas finales presentan un muy buen aspecto metálico (Figura 6), carentes de cualquier tipo de defectología superficial.



Figura 6. Esquema del proceso de fabricación solar.

Por último, se realiza un estudio de la porosidad y microestructura obtenidas, las cuales presentan una importante cantidad de precipitados, destacando la aparición de una gran cantidad de carburos aciculares y racimos de carburos globulares en el interior de los granos, y el engrosamiento de los límites de grano por la precipitación de diferentes precipitados, en la muestra procesada mediante el ciclo de eliminación más rápido (Figura 7). Así la microestructura obtenida en este caso dota al material de una mayor dureza, y previsiblemente, de una elevada resistencia al desgaste, siendo ésta, una de las propiedades fundamentales requeridas en los aceros de herramientas. Por ello, este ciclo se toma como ciclo óptimo debido a la obtención de una microestructura rica en precipitados, durezas altas, precipitados y valores de dureza y densificación altos.

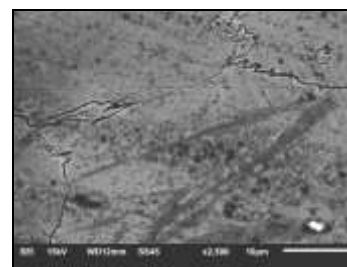


Figura 7. Micrografía SEM de probeta sometida a un ciclo solar de eliminación a velocidad de calentamiento rápida en atmósfera de N₂-H₂.

Por último, debido al éxito de los tratamientos solares anteriores, se plantea iniciar una nueva línea de investigación en la que se elimine la etapa de eliminación por disolución, para intentar llevarla a cabo también mediante ESC, diseñando así un proceso medioambientalmente limpio, que carezca del uso de disolventes habitualmente perjudiciales y contaminantes.

El ensayo (Figura 8) transcurre siguiendo las directrices anteriores. Sin embargo, entre 50-80 °C la probeta adquiere una apariencia gelatinosa y comienza a deformarse levemente debido a su estado de fluidez (Figura 9).

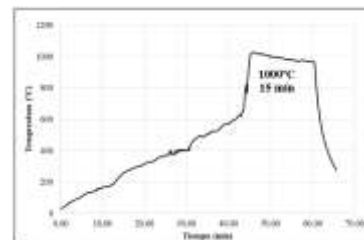


Figura 8. Ciclo de eliminación térmica completa y sinterización mediante ESC en atmósfera de nitrógeno.



Figura 9. Estado de fluidez y posterior deformación de la probeta.

Este hecho se toma como el resultado de la eliminación térmica del ligante de menor peso molecular. En consecuencia, el termopar quedó atrapado tras el ensayo, lo cual produjo la aparición de macroporosidad en la pieza final. Sin embargo, se logró obtener la microestructura característica del acero A2, basada en una matriz ferrítica y gran cantidad de carburos precipitados repartidos homogéneamente a lo largo de la misma (Figura 10).

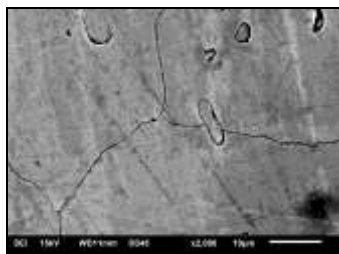


Figura 10. Micrografía SEM de probeta ensayada mediante un ciclo solar de eliminación completa y sinterización.

4.- COMPARATIVA.

En la Tabla 1 se presentan todos los parámetros y resultados de interés obtenidos, tales como densidad relativa, temperatura de sinterización, valores de dureza o velocidad de calentamiento de las probetas óptimas procesadas mediante las distintas metodologías de fabricación desarrolladas en este estudio, junto con la línea de trabajo comercial.

Tabla 1. Comparativa de los distintos procesos

	MÉTODO		
	MARKFORGED	CONVENCIONAL	SOLAR
<i>Tiempo total (h)</i>	24 + 22.1	24 + 22	24 + 1.2
<i>Experiencia del operario</i>	NO	NO	SÍ
<i>Independencia del proceso</i>	SÍ	SÍ	NO
<i>T° sinterización (°C)</i>	~1200*	1250	935
<i>Velocidad calentamiento (°C/min)</i>	Sinter-1*	5	18.5
<i>Atmósfera</i>	Ar / N ₂ -H ₂	N ₂ -H ₂	N ₂ -H ₂
<i>Densidad relativa (%)</i>	92	92	97
<i>Dureza (HV)</i>	435 ± 3	456 ± 46	328 ± 19

* Condiciones de trabajo desconocidas para personal ajeno a la empresa Markforged.

Finalmente, la ESC puede establecerse como técnica óptima de procesamiento de piezas de acero de herramientas AISI A2 debido a la obtención de una microestructura ferrítica rica en carburos precipitados que dota a la pieza de una dureza adecuada, y con ello previsiblemente de una correcta resistencia al desgaste, propiedad fundamental de este tipo de aceros. Además, los valores de densificación de la pieza obtenidos resultan ser muy superiores a los adquiridos mediante las otras

metodologías. Por otra parte, este método, resulta económicamente muy competitivo, debido a la reducción resultante en los tiempos de procesamiento, permitiendo aminorar su duración en más de 20 horas. Esta reducción en tiempo puede ser traducida en una disminución de los recursos empleados, eliminando la necesidad de utilización de los hornos eléctricos y su elevado consumo energético.

5.- CONCLUSIONES.

- Mediante el desarrollo de la fase de eliminación térmica en la lente de Fresnel se han obtenido resultados similares a los adquiridos mediante el procedimiento convencional, logrando el porcentaje óptimo de masa eliminada en probetas manipulables.
- Se ha cumplido el objetivo de diseñar en una sola etapa, un ciclo óptimo de eliminación térmica y sinterización empleando ESC.
- La metodología solar permite reducir considerablemente los tiempos de procesamiento frente a los obtenidos mediante el método convencional (1.2 horas vs 22 horas)
- La reducción del tiempo total empleado supone una disminución de los recursos materiales y energéticos necesarios, traducida en evidentes beneficios económicos.
- Se ha iniciado una investigación que respalda el uso de la ESC en la creación de un ciclo que comprenda las etapas de eliminación del sistema ligante polimérico en su totalidad y sinterización de las probetas.

6.- REFERENCIAS.

- [1] A. Romero, G.P. Rodríguez, A. Conde, J.J. de Damborenea, I. García, M.A. Arenas, "Sinterización de espumas de titanio en un horno solar parabólico". *Material-ES* 2 (2) (2018) 18- 21.
- [2] Fernández-González D., Ruiz-Bustinza I., González-Gasca C., Noval J. P., Mochón-Castaños J., Sancho-Gorostiaga J., Verdeja L. F., "Concentrated solar energy applications in materials science and metallurgy". *Solar Energy* 170 (2018) 520-540.
- [3] A. Ferriere, G. P. Rodriguez, and J. A. Sobrino, "Flux distribution delivered by a Fresnel lens used for concentrating solar energy," *Journal of Solar Energy Engineering* 126 (1) (2004) 654–660.
- [4] A. Romero, G. P. Rodríguez, E. Marjaliza, "Processing of intermetallic laminates by Self-Propagating High-Temperature Synthesis initiated with concentrated solar energy". *Journal of Alloys and Compounds* 891 (2022) 161876.
- [5] A. Cañadilla, A. Romero, G. P. Rodríguez, "Sustainable production of powder metallurgy aluminum foams sintered by concentrated solar energy". *Metals* 11 (10) (2021) 1544.