

Atomización de polvo metálico y cerámico mediante plasma de microondas

Atomization of metal and ceramic powder by microwave plasma

Alberto Ruiz Rodríguez^a y Beatriz Rodríguez Díez^b

^aEurecat, Centre Tecnològic de Catalunya, Unitat de Sistemes avançats de fabricació, , alberto.ruiz@eurecat.org; ^bEurecat, Centre Tecnològic de Catalunya, Unitat de Sistemes avançats de fabricació, , beatriz.rodriguez@eurecat.org

How to cite: Alberto Ruiz-Rodríguez y Beatriz Rodríguez-Díez (2025). Atomization of metal and ceramic powder by microwave plasma. En libro de actas: *Libro de actas del IX Congreso Nacional de Pulvimetalurgia (IV Iberoamericano) CEIPM2025*. Valencia, 16-18 de Junio de 2025.
<https://doi.org/10.4995/CEIPM2025.2025.21111>

Abstract

Nowadays, the production of metallic and ceramic powders has reached a wide diversification in methods. Each method responds to a quality and a determined morphology of the material. Plasma atomization is an advanced technique used to produce high-quality, spherical and pure powder. The introduction of Microwave Induced Plasma (MIP), in this case as a torch, aims to make the process more sustainable and increase the product's quality. The high temperature makes the fusion of the particles, combined with the capacities of the ionized gas. A correct gas used in the process, this technology can be applied in several ways, such as modifying particle size or morphology, generating raw materials, processing recycled feedstock and enabling the synthesis of industrially relevant compounds. In this work, several laboratory tests have been carried out, including morphology changes, the use of recycled materials, and the development of optimized systems to extend component lifespan and provide key insights for future production optimization.

Keywords: *Spheroidization, morphology, processing, transformation, reuse.*

Resumen

Actualmente la producción de polvo metálico y cerámico ha alcanzado una gran diversificación de métodos. Cada método responde a una calidad y a una determinada morfología del material. La atomización por plasma es una técnica avanzada utilizada para producir un polvo de alta calidad, esfericidad y pureza. La introducción

del plasma generado mediante microondas, en este caso en forma de antorcha de plasma (MIP Torch en inglés), pretende hacer el proceso más sostenible y mejorar la calidad del producto. La alta temperatura alcanzada en la llama de plasma hace posible una fusión de las partículas que se combina con las capacidades del gas ionizado. Seleccionando el gas de proceso correcto, se abren diferentes campos de utilización de esta tecnología como el cambio de tamaño o morfología, la fabricación como material virgen o uso de reciclado y la posibilidad de crear compuestos interesantes para la industria. En este trabajo se han explorado de forma práctica varias alternativas como el cambio de morfología y el uso de material reciclado además de desarrollar los sistemas más adecuados para prolongar la vida de componentes y dar las claves de una futura optimización de la producción.

Palabras clave: Esferoidización, morfología, procesamiento, transformación, reutilización.

1. Introducción y objetivos

La industria pulvimetalúrgica se consolida y moderniza impulsada por la innovación y la automatización. Las industrias del automóvil y aeroespacial tiran del sector con la demanda de componentes fabricados a partir de materiales en polvo. Su crecimiento es sostenido y el mercado se estima en unos 20,76 mil millones de dólares en 2024. Se espera un crecimiento hasta 2029 de un 4,68%. Como en la mayoría de los sectores, el mercado Asia-Pacífico marca las tendencias y los tiempos (Mordor intelligence, 2025).

De forma rápida podemos hacer un resumen de los métodos habituales de fabricación; atomización por gas (50-60%), reducción química (15-20%), molienda mecánica (10-15%), electrólisis (5-10%), así como otros métodos más recientes (plasma, atomización por ultrasonidos...) con menos del 5% (Mordor intelligence, 2025).

La atomización por gas es una tecnología consolidada y extendida a nivel industrial por lo que se puede usar como marco de referencia o comparación. En un breve repaso vemos que su proceso de trabajo se define por las etapas de:

- Fusión del metal en un crisol
- Vertido del metal líquido en la cámara de atomización
- Impacto del gas inerte a chorro para fragmentar el líquido
- Solidificación rápida de las partículas
- Recogida del polvo

En este método la forma final de las partículas tiende a esférica, a veces con irregularidades o adhesiones entre partículas, el tamaño se puede controlar con la presión del

gas y un adecuado diseño de las boquillas. La pureza es buena, pero puede haber trazas de oxidación por diferentes motivos (Dunkley, 2019).

En la clasificación previa se han introducido como otros métodos sistemas más novedosos o todavía poco implantados en la industria. Entre ellos encontramos el sistema de atomización por plasma, que no se considera un tipo especial de atomización por gas al utilizar fundamentos técnicos y físicos diferentes. Incluso dentro de éstos podemos hacer otra clasificación según sea el método de generación del plasma, que puede ser mediante arco eléctrico, radiofrecuencia o microondas.

No obstante, todos tienen en común el uso de una barra o varilla metálica que se calienta por el chorro de plasma (compuesto de gases inertes a cierta velocidad) que hace desprenderse gotitas del material líquido que al enfriarse rápidamente generan el polvo.

Algunos sectores en los que la utilización de este último método es más común son el aeroespacial (álabes de turbinas...), Biomédico (implantes y prótesis), optimización o generación de materiales a la carta para manufactura aditiva, recubrimientos térmicos (materiales refractarios como el carburo de tungsteno...), etc... (Dunkley, 2019).

1.1. Tasas de enfriamiento

El proyecto que aquí se presenta se ha vertebrado con un planteamiento de adaptabilidad y polivalencia. Con este planteamiento se pretende reducir costes y complejidad para incorporarlo a las necesidades industriales actuales.

El objetivo principal es la demostración del funcionamiento y efectividad del plasma de microondas para la modificación geométrica de las partículas en varios materiales. Se trata pues de un estudio experimental comparativo y de validación de la tecnología.

Con los generadores de los que se dispone el laboratorio de microondas y plasma de Eurecat se decidió comenzar por la modificación geométrica de material ya reducido a partículas al requerir menor potencia y temperatura.

La elección de esta tecnología aúna:

1. La reducción del consumo energético en la generación y mantenimiento del plasma.
2. La gran temperatura que es posible conseguir en la antorcha.
3. El aprovechamiento de las capacidades del gas ionizado.
4. La inexistencia de contacto entre electrodos y material tratado.
5. El mecanismo de solidificación de las partículas y la calidad obtenida.
6. Las instalaciones comunes o similares a hornos de esta tecnología y maduros tecnológicamente.

Tabla 1. Comparativa entre atomizadores de plasma, las temperaturas son las típicas de los aparatos comerciales actuales

Fuente de energía	Temperatura típica (K)	Estabilidad de la llama	Contaminación por electrodos	Eficiencia energética
Microondas	10.000-15.000	Alta	No	Alta
Inducción (RF)	Hasta 10.000	Muy alta	No	Media
Arco eléctrico	Más de 15.000	Media	Posible	Baja

En la tabla 1 complementamos los motivos de la elección de esta tecnología con una comparación a otros sistemas de generación de la llama o antorcha.

1.2. Objetivos secundarios

El estudio de la influencia del gas de proceso utilizado para una correcta elección según el material a procesar. El gas de proceso puede afectar a la pureza, la morfología, el tamaño y la composición del polvo final. Este gas es el utilizado para la generación del plasma y debe ayudar a obtener una buena capacidad térmica, preservar el material sin oxidarlo y evitar otros efectos no deseados, dependiendo del resultado final que se pretenda obtener.

La reciclabilidad del material en desuso, o que se considera no adecuado, también entra dentro de las posibilidades de esta tecnología. El procesado de cada material residual en el lugar de generación favorece que no se pierda su trazabilidad, así se obtienen mejoras en la calidad, económicas y medioambientales.

Se busca controlar el tamaño de partícula, su esfericidad y la reducción de satélites, describiendo que parámetros se deben ajustar para conseguir una distribución lo más estrecha posible y la máxima reproducibilidad con el mínimo coste y la máxima eficiencia.

Muy relacionado con el gas de proceso se encuentra la posibilidad de la generación de nuevos compuestos o aleaciones con la visión de crear materiales a la carta.

También se pretende la mejora de eficiencia energética del sistema en sí y de todos los periféricos y ayudas necesarios. No todos los periféricos se comportan de forma óptima, por ejemplo, la movilidad del polvo plantea problemas por la geometría irregular de éste.

El proceso quedará validado para aplicaciones industriales si también se optimizan los componentes, se aumenta la producción, se reduce el mantenimiento y se incluyen capacidades de inteligencia artificial y “machine learning”.

2. Descripción del sistema experimental

2.1. Generador de microondas y de plasma

El conjunto de componentes de microondas empleado es un conjunto bastante estándar con la salvedad del sistema de generación de plasma. El generador de plasma (círculo rojo de la fig. 1) es de concepto, diseño y fabricación propia. En la figura 1 puede verse el diseño del conjunto.

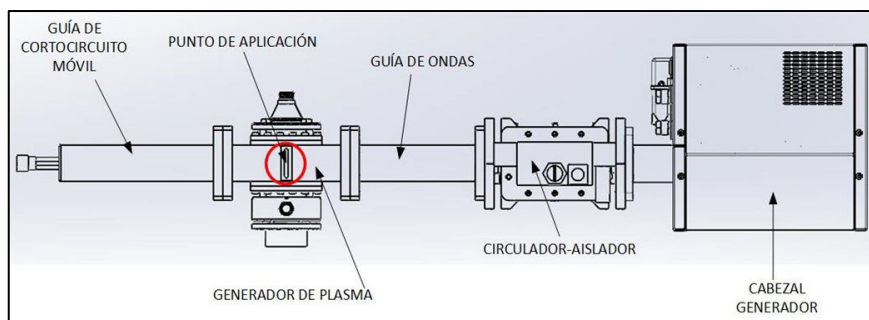


Fig 1. Componentes típicos de una antorcha MIP. (Ruiz, A. 2025)

Como se describe en la fig. 1, está formado por:

- El cabezal generador de microondas; Este equipo dispone de la tecnología típica de generación de microondas, el magnetrón, y necesita de una fuente de alimentación adecuada. En este caso se prefirió un magnetrón refrigerado por agua para evitar infiltraciones de material pulverulento por los ventiladores de enfriamiento. Este magnetrón pulsa a 2,45 GHz y genera una potencia de microondas de 2 kW.
- Aislador/circulador; Protege el magnetrón de energía reflejada, dispone de una carga de agua y en este caso protegía hasta 3 kW.
- Guías de ondas; Son los canales metálicos por los que se conduce la energía hasta el generador de plasma. El material constitutivo de las guías es aluminio de grado eléctrico (aleaciones 6061 o similares).
- Generador de plasma; Como se ha dicho de concepto propio y en continua evolución. Aquí se presenta la primera versión no optimizada aun para trabajo con material pulverulento. También constituida por aluminio de grado eléctrico de las mismas aleaciones que el resto de las guías. Componente no comercial. La máxima temperatura alcanzada y medida de forma indirecta es de 3.000 K aproximadamente.

- El punto de aplicación es propiamente el interior de la cápsula de plasma. Esta cápsula está formada por un tubo de material cerámico, sus soportes y sistemas anexos. Componente no comercial.
- Guía de cortocircuito móvil; Es la pared móvil que permite generar la onda estacionaria que favorece la creación y mantenimiento de la llama.

De este primer conjunto de equipos, con excepción del generador de plasma, el resto son equipos industrialmente maduros y de amplia utilización en varios sectores industriales. Su funcionamiento está contrastado y en TRL elevados.

2.2. Periféricos

En la fig. 2 podemos ver el esquema completo con el suministro y recogida del material pulverulento y en el que también se aprecia el equipo de microondas.

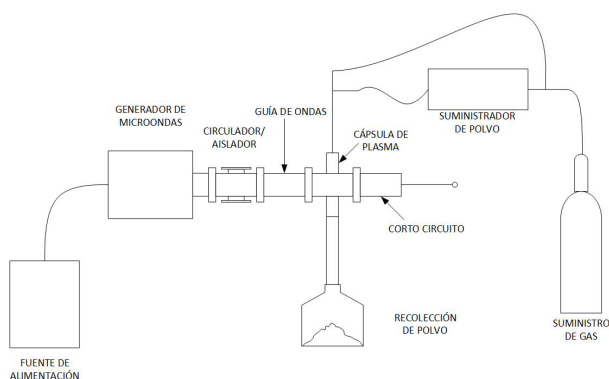


Fig 2. Montaje experimental (Ruiz, A. 2023)

Este esquema representa el equipo empleado en el tratamiento de material que ya está formado por partículas con granulometrías entre 300 μm y 1 μm . Por lo tanto, no se representa un sistema de generación de material virgen a partir de barra o filamento, que requiere potencias de microondas mayores. Pero el equipo es esencialmente el mismo.

2.3. Procedimiento experimental

El procedimiento de trabajo se describe a continuación:

- Suministro del gas de proceso al alimentador de polvo.
- Dosificación de las partículas por el alimentador mediante vibración mecánica y control de masa diferencial desde tolva de polvo. El gas arrastraba el polvo dosificado y se introducía en la cápsula de plasma. Existe un by-pass del gas para poder

iniciar la llama sin partículas. Posteriormente se simplificó el sistema por uno ubicado en la boca de la cápsula de plasma dado el problema en la movilización y arrastre del material procedente de reciclado.

- Fusión de las partículas en la antorcha.
- Enfriamiento y formación de esferas.
- Recogida manual del material a temperatura ambiente.
- Análisis óptico de las muestras, pesado y granulometría.
- Análisis mediante microscopio electrónico (SEM).

Como se ha comentado, la dosificación del polvo era uno de los periféricos que se han ido variando o modificando para acomodarlo al trabajo con diferentes tipos de material pulverulento. Se empezó utilizando un equipo procedente de láser cladding, por lo tanto, de funcionamiento contrastado y maduro, convenientemente revisado y puesto a punto. Muy adecuado para el uso con materiales cerámicos como el carburo de tungsteno. Al pasar a otros materiales, sobre todo los reciclados, de granulometrías y geometrías muy heterogéneas, se tuvo que abandonar este equipo de suministro. Tras varias pruebas se decidió utilizar un equipo diseñado y montado en las instalaciones de Eurecat. Se trata de un equipo muy sencillo ubicado en la boca de la cápsula de plasma y que utiliza la vibración y la gravedad para suministrar el material al generador de plasma. Dada su sencillez su funcionamiento es, dentro de lo que cabe, relativamente estable para casi cualquier material, dentro de un rango de tamaño de las partículas. En las fig. 3 y 4 se pueden comparar ambos sistemas de suministro.



Fig 3. Gestora de polvo comercial (Ruiz, A. 2021)



Fig 4. *Suministrador de polvo de fabricación propia (Ruiz, A. 2024)*

2.4. Metodología experimental

El método utilizado es experimental con la variación de varios parámetros hasta encontrar la configuración más efectiva. Esto es, la que mayor cantidad de esferas generaba en el material con la potencia máxima del generador. Se probaron varios materiales hasta conseguir una configuración estable y con buen rendimiento en la transformación.

Con la potencia marcada, normalmente al máximo del generador (2 kW), se realizaron una serie de experimentos con los que se encontró la envolvente de trabajo de ese generador concreto. Se utilizaron materiales con un amplio espectro en temperaturas de fusión. No se utilizaron materiales puros, pero sí aleaciones o compuestos que contuvieran metales con bajo punto de fusión como aluminio (933,47 K), intermedios como el cobre (1.357,77 K) o el titanio (1.941,15 K) y de alto punto de fusión como el wolframio (3.695,15 K).

Este trabajo se centrará, sobre todo, en dos de estos materiales ensayados al ser los que más datos aportaron, el Carburo de Wolframio y la aleación de titanio Ti 6Al 4V.

En futuros trabajos esta colección de datos nos permitirá extrapolar los resultados para escalar la potencia a niveles más cercanos a la industria.

2.5. Parámetros operativos

En cuanto a los parámetros modificados en la experimentación, además del material, se probaron diversas configuraciones de tipo de gas, flujo de gas y periféricos.

Los cambios buscados fueron las variaciones en la granulometría y geometría de las partículas, además de posibles compuestos formados.

2.5.1. Tipo de gas

El plasma es un estado de la materia en el que hay electrones e iones libres gracias a que hay suficiente energía para desprender uno o varios electrones de la molécula. En la generación de plasma, el argón es el gas noble que se usa habitualmente debido a su facilidad de ionización (1ª energía de ionización de 1.520,6 kJ/mol frente a los 2.372,3 kJ/mol del helio), su relativo buen comportamiento en lo referente al movimiento de electrones, su disponibilidad y su bajo coste. Es un parámetro que no suele cambiar en este tipo de procesos. En varias experiencias anteriores se demostró su viabilidad para inducir cambios geométricos en las partículas de polvo.

No obstante, también se observó que usando otros gases la cantidad de partículas con cambios geométricos podía mejorar. Varias experiencias con nitrógeno también nos demostraron sus mejoras en la capacidad calorífica sobre las partículas con respecto al argón (conductividad térmica de 0,02583 W/mK frente a 0,01772 W/mK del argón), sobre todo si el generador es de potencia relativamente baja, como en este caso. Esto también se observó en gases como el Helio (conductividad térmica de 0,1513 W/mK frente a 0,01772 W/mK del argón) y mezclas con hidrógeno, gases de mayor coste que los dos anteriores, pero con mejores conductividades térmicas. Las mezclas utilizadas en este proyecto fueron nitrógeno 95% con hidrógeno 5% (0,0264 W/mK), nitrógeno 90% con hidrógeno 5% (0,0270 W/mK) y argón 65% con hidrógeno 35% (0,0214 W/mK), muy similares a la del nitrógeno (0,02583 W/mK). Estas conductividades se calcularon de forma aproximada según el método de Wassiljewa (modificado por Mason y Saxena) a 293,15 K y 1,01 bar¹.

El nitrógeno también tiene una menor 1ª energía de ionización con respecto al argón (1.402,3 kJ/mol) con lo que es de fácil ionización, pero debido a ser un gas diatómico puede formar compuestos con los materiales tratados.

En la tabla 2 se presentan los gases utilizados para dos de los materiales testeados, carburo de Wolframio (WC) y aleación de titanio con presencia de oxígeno (Ti6Al4V).

Tabla 2. *Parámetros de proceso típicos para WC y Ti6Al4V*

Material	Gas 1	Gas 2	Gas 3
WC	Nitrógeno	N ₂ 95% H ₂ 5%	N ₂ 90% H ₂ 10%
Ti 6Al 4V	Helio	N ₂ 90% H ₂ 10%	Ar 65% H ₂ 35%

¹ Estos datos pueden variar según las condiciones consideradas y si se tienen en cuenta las interacciones moleculares, sobre todo en estado plasma. Se indican como referencia.

2.5.2. Flujo de gas

Otro de los parámetros que influyen en el proceso son el flujo de gas y la presión a la que éste se suministra. La presión utilizada en estas experiencias es la presión atmosférica dentro de la cápsula de plasma, con dos flujos a diferente velocidad en la entrada de la cápsula. Estos dos flujos se dividen en uno periférico soplado en las paredes del tubo y el portador del material por la parte central. Estos dos flujos pueden ser de gases diferentes o del mismo gas. Estas velocidades se igualan a la salida de la cápsula. A mayor presión de suministro la llama se alarga y su sección disminuye. Esta disminución de sección puede afectar a la cantidad de material tratado.

La referencia utilizada y medida en los aparatos es el flujo de argón. Al utilizar otro gas el flujo es convenientemente calculado según unos coeficientes de corrección debido a las diferentes densidades de los gases (Tabla 3).

La optimización buscada era reducir el consumo de gas con el máximo cambio geométrico posible.

Tabla 3. Coeficientes de corrección de la lectura de flujo

Gas	Coeficiente referencia argón	Coeficiente referencia nitrógeno
Argón	1,00	0,98
Helio	3,16	2,64
Nitrógeno	1,19	1,00
95% N ₂ + 5% H ₂	1,22	1,02
90% N ₂ + 10% H ₂	1,25	1,05
65% Ar + 35% H ₂	1,22	1,02

2.5.3. Periféricos

Ya se ha comentado el cambio de algunos periféricos para acomodarlos al tipo de polvo utilizado (apartado 3.2).

También se hicieron diversas modificaciones en cuanto al suministro del gas para separar el gas de arrastre del material y el de gas de proceso. Pese a poder utilizarse dos gases distintos en todas las experiencias se utilizó el mismo gas, con la salvedad de que arrastraba o no arrastraba el polvo. A este sistema de separación de los flujos se le puede dotar de funciones adicionales (refrigeración, cambios de velocidad, evitar adhesiones en las paredes interiores del tubo,...). Una versión de este sistema puede verse en la fig.5.

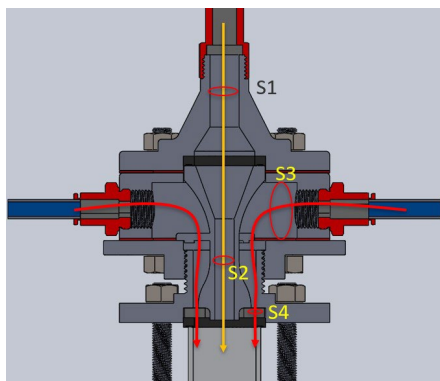


Fig 5. Separación de los flujos de gas siendo S1/S3 los flujos de entrada al separador y S2/S4 los flujos de entrada a la cápsula de plasma (Ruiz, A. 2024)

3. Resultados

3.1. Carburo de Wolframio

Se consigue el cambio de geometría del carburo de wolframio. El material utilizado es comercial y no procede de reciclado. Su estado es poligonal, no fibrilar, con forma irregular. La conductividad térmica del nitrógeno es ligeramente mayor que la del argón (ver apartado 3.5.1) por lo que su uso aporta algo más de energía al proceso. Se utilizaron tres tipos de gas de proceso que se detallan a continuación con los flujos típicos:

- Nitrógeno; 4-6 l/min
- N95H5 (N₂ 95% H₂ 5%); 9-13 l/min, rebajado posteriormente a 6 l/min.
- N90H10 (N₂ 90% H₂ 10%); 7-9 l/min

Los flujos se seleccionaron según la respuesta del proceso; estabilidad y duración de la llama, estabilidad al inyectar el material y economía en el consumo de gas.

Tabla 4. Granulometría inicial y final del WC comercial no reciclado.

Tamiz (μm)	Media sin tratar	Media tratado
150-106	36,44%	23,07%
106-75	41,22%	31,11%
75-45	22,31%	45,34%
<45	0,02%	0,36%

La cantidad de partículas de tamaños por encima de 75 micras se reducen entre un 10 y un 13%, mientras que aumentan un 23% las situadas entre 45 y 75 micras. El aumento de las partículas por debajo de 45 micras no es significativo. Este tamizado se realizó antes de disponer de tamices propios por eso difieren de los intervalos realizados para la aleación de titanio.

En la fig. 6 se presentan fotografías de microscopio del material virgen y del material tratado con nitrógeno.

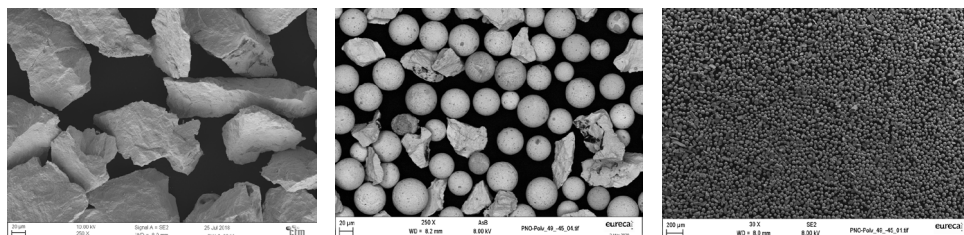


Fig 6. WC: *Izquierda: material original, Centro: Material tratado, Derecha: Vista lejana del material tratado (Pijuan, J. 2018, Cegarra, S. 2020).*

En resumen, el tratamiento con cada uno de los gases arroja unos porcentajes medios de cambios geométricos de:

- **Nitrógeno; 66,47%**
- N95H5; 34,56%
- N90H10; 46,83%

Se puede apreciar diferencia entre los tres tipos de gases, resultando el nitrógeno con mayor porcentaje de cambio.

3.2. Ti 6Al 4V

Se consigue el cambio de geometría de la aleación de titanio. El material utilizado es pre comercial y procede de mineral. Su estado es poligonal, con forma muy irregular y presencia de oxígeno. Se utilizaron tres tipos de gas de proceso que se detallan a continuación con los flujos típicos:

- Helio; 9-13 l/min, habitual de 9,5 l/min.
- N90H10 (N₂ 90% H₂ 10%); 3-5 l/min
- Ar65H35 (Ar 65% H₂ 35%); 3 l/min.

Dada la reactividad del titanio y su facilidad de oxidación a alta temperatura, se empleó helio como gas habitual del proceso. En un estado excitado y a alta temperatura el titanio tiende a formar compuestos con el nitrógeno y el hidrógeno. Con la mezcla de gases N90H10 se formó nitruro de titanio (TiN), de color amarillo-dorado e hidruro de titanio (TiH_x), de color gris oscuro-negro (fig. 7). En cambio, con la mezcla de gases Ar65% H35% solamente se genera TiH_x.



Fig 7. Partículas de nitruro e hidruro de titanio generadas con N90H10 (Rodríguez, B. 2023).

Para evitar la formación de estos compuestos y también para aprovechar la mayor conductividad térmica del helio (ver apartado 3.5.1), éste se utilizó en mayor medida.

La aleación de titanio tiene una temperatura de fusión de 1.933,15 K inferior a la del carburo de wolframio de 3.143,15 K. La respuesta a la esferoidización, o cambio de geometría de las partículas, es diferente, apareciendo granulometrías por encima de 200 micras. Este aumento también puede deberse a la geometría del tubo de salida de la cápsula de plasma, que no permitía una expansión del gas una vez realizado el tratamiento.

Tabla 5. Granulometría inicial y final de la aleación Ti6Al4V

Tamiz (μm)	Media sin tratar	Media tratado
>300	0,00%	7,20%
300-200	0,00%	3,90%
200-100	0,19%	26,72%
100-50	22,91%	26,35%
50-20	71,15%	30,57%
20-1	5,75%	5,26%

El aspecto de las partículas puede verse en la fig. 8, en su estado inicial y tras el tratamiento con Helio.

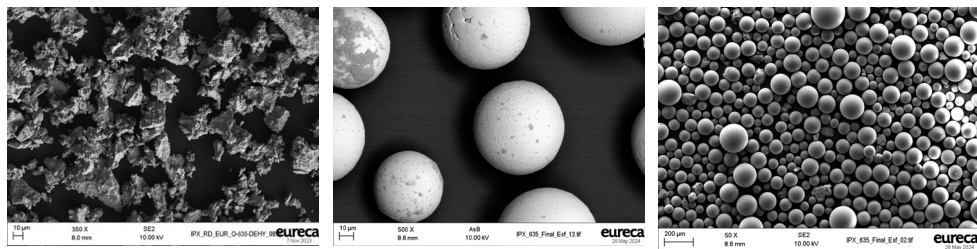


Fig 8. Ti6Al4V. Izquierda: material original, Centro: Material tratado, Derecha: Vista lejana del material tratado (Cegarra, S. 2023-2024).

En resumen, el tratamiento con cada uno de los gases arroja unos resultados muy diferentes debido a la composición del propio gas:

- Helio; Cambio geométrico adecuado con un porcentaje medio de 48,07%.
- N90H10 (N₂ 90% H₂ 10%); Genera compuestos TiN y TiH_x.
- Ar65H35 (Ar 65% H₂ 35%); Genera compuestos de TiH_x.

Al generarse compuestos diferentes de la aleación de titanio, no se pudo comparar la transformación geométrica entre diferentes gases como en el ejemplo anterior. No obstante, el resultado es interesante ya que permite abrir nuevas vías de producción de materiales industrialmente interesantes como el nitruro y el hidruro.

4. Conclusiones

Con el presente trabajo se ha demostrado la viabilidad técnica del uso de plasma inducido por microondas (MIP) como herramienta eficaz para la modificación geométrica de partículas metálicas y cerámicas.

En primer lugar, se demuestra la eficiencia y polivalencia del proceso incluso con generadores de baja potencia. En estos ensayos se ha utilizado un generador de tan solo 2 kW que permitió una transformación significativa en la morfología de las partículas. Con ello se consigue tener la posibilidad de una solución más sostenible y accesible para aplicaciones industriales de pequeña y mediana escala.

En segundo lugar, se tiene en cuenta la influencia del gas de proceso utilizado para generar el plasma como un elemento más en la ecuación. El impacto directo que tienen el gas en la eficiencia del proceso, en la composición final del material y obviamente, en el coste de proceso. Como ejemplo cabe citar el caso del WC en el que el nitrógeno resultó ser más eficaz que las mezclas con hidrógeno. Sin embargo, las mezclas con nitrógeno e hidrógeno generaban compuestos útiles en aplicaciones concretas mientras el helio generaba una transformación efectiva en las partículas. Contrariamente a lo que se pudiera pensar, el nitrógeno, con menor capacidad calorífica que el helio, fue capaz de modificar el material con mayor punto de fusión.

En tercer lugar, el potencial para el reciclaje o recuperación de materiales aporta ventajas en el campo económico y medioambiental, con una estrecha relación entre ambos.

Una cuarta conclusión es la mejora de las propiedades del material pulverulento en fluencia y capacidad de compactación, que se puede conseguir con una geometría regular de las partículas. Ello redundará en unas características mecánicas mejoradas de las piezas fabricadas con ese polvo, que queda pendiente demostrar en futuros trabajos.

En cuanto a limitaciones y oportunidades de mejora cabe citar la optimización de las características geométricas de la cápsula de plasma y de la futura campana de expansión de los gases y de optimización del flujo gas-plasma-partícula. Esta optimización permitirá hacer frente a las limitaciones de producción del prototipo demostrador multipropósito actual.

En futuros trabajos se avanzará hacia un modelo que permita predecir el comportamiento del conjunto, escalar la producción hacia TRL más altos e introducir elementos como la automatización del proceso continuo, así como técnicas digitales como aprendizaje autónomo.

Referencias

- Baskoro, A. S., Supriadi, S., & Dharmanto. (2019). Review on plasma atomizer technology for metal powder. MATEC Web of Conferences.
- Cardoso, R. P., Arnoult, G., Belmonte, T., Henrion, G., & Weber, S. (2009). Titanium nitriding by microwave atmospheric pressure plasma: Towards single crystal synthesis. Plasma Processes and Polymers.
- Dors, M., Nowakowska, H., Jasinski, M., & Mizeraczyk, J. (2013). Chemical kinetics of methane pyrolysis in microwave plasma at atmospheric pressure. Plasma Chemistry and Plasma Processing.
- Dunkley, J. J. (2019). Metal powder atomisation methods for modern manufacturing. Johnson Matthey Technology Review.
- European Commission. (2015). Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>
- European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. (2017). Study on the review of the list of critical raw materials: Critical raw materials factsheets. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/398823>
- Fullenwider, B., Kiani, P., Schoenung, J. M., & Ma, K. (2019). Two-stage ball milling of recycled machining chips to create an alternative feedstock powder for metal additive manufacturing. Powder Technology.
- Gordillo Vázquez, F. J. (2008). Plasmas fríos. Investigación y Ciencia.
- Jiménez, M., Rincón, R., Marinas, A., & Calzada, M. D. (2013). Hydrogen production from ethanol decomposition by a microwave plasma: Influence of the plasma gas flow. International Journal of Hydrogen Energy.
- Kassym, K., & Perveen, A. (2020). Atomization processes of metal powders for 3D printing. Materials Today: Proceedings.
- Mordor Intelligence. (2025). Powder metallurgy market - Growth, trends, and forecasts (2025–2030). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/powder-metallurgy-market>
- Sehat, M. H., Chandler, J., & Yates, Z. (2022). A review on ICP powder plasma spheroidization process parameters. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.

- Smirnov, B. M. (2011). *Fundamentals of ionized gases*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Van Laar, J. H. (2016). Spheroidisation of iron powder in a microwave plasma reactor. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Van Laar, J. H., Slabber, J. F. M., Meyer, J. P., Van der Walt, I. J., Puts, G. J., & Crouse, P. L. (2015). Microwave-plasma synthesis of nano-sized silicon carbide at atmospheric pressure. *Ceramics International*.
- Weigle, J. C., Luhrs, C. C., Chen, C. K., Perry, W. L., Mang, J. T., Nemer, M. B., Lopez, G. P., & Phillips, J. (2004). Generation of aluminum nanoparticles using an atmospheric pressure plasma torch. *The Journal of Physical Chemistry B*.
- Ye, D., Li, J., & Tang, J. (2020). Jet propulsion by microwave air plasma in the atmosphere. *AIP Advances*.
- Zeiler, B., Bartl, A., & Schubert, W. D. (2021). Recycling of tungsten: Current share, economic limitations, technologies and future potential. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*.

5. Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por la Unión Europea – NextGenerationUE en el marco de “Misiones2021”, patrocinado por el CDTI y de los fondos puestos a disposición por Acció, agencia para la competitividad de la empresa de la Generalitat de Catalunya.