

## **Estudio de producción de piezas de microfundición para joyería utilizando energía microondas**

**Production study of jewelry microcasting pieces using microwave energy**

**Francisco Moreno Candel<sup>1</sup> - Itahisa Pérez-Conesa<sup>2</sup> -  
Fátima Felisa Acosta Hernández<sup>3</sup> - José Antonio Aguilar Galea<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Doctorando del Departamento de Bellas Artes, Universidad de La laguna. (Autor de correspondencia)

pacomorenocandel@gmail.com

<sup>2</sup> Profesora responsable del Taller de Fundición Artística, Departamento de Bellas Artes, Universidad de La laguna.

iperecon@ull.edu.es

<sup>3</sup> Profesora Titular. Departamento de Bellas Artes, Universidad de La laguna.

ffacosta@ull.edu.es

<sup>4</sup> Profesor Titular del Departamento de Escultura e Historia de las Artes. Facultad de Bellas Artes, Universidad de Sevilla.

jantonio@us.es

## Resumen

En este trabajo se estudian procedimientos implicados en la fundición artística a través del uso de energía microondas. Concretamente, el ensayo aborda el proceso térmico de los moldes utilizados para la producción de joyería de metal fundido con la técnica a la cera perdida, analizando el comportamiento de estos compuestos a base de silicatos para la realización de moldes con encofrados cilíndricos a través de la radiación de microondas.

Esta investigación forma parte de la continuidad de estudios anteriores, donde se verifica que la pérdida de agua durante el proceso de evacuación de cera y deshidratación del molde interfiere en la capacidad de aumento de temperatura necesaria para esta transformación. Para ello, se diseña como solución, una mufla construida con materiales eléctricamente activos para aumentar la temperatura mediante un calentamiento híbrido de microondas.

El empleo de este calentamiento se estudió previamente en moldes de 80 gr con reproducción de formas simples. La necesidad de aplicar el procedimiento a casos reales de la fundición artística ha requerido un planteamiento a mayores tamaños y morfologías complejas, fundamentado en que la efectividad del calentamiento por microondas no sólo está ligado a las propiedades de los materiales, si no también, a las características del volumen a calentar. Por este motivo, el estudio recoge un sistema adaptado a las variantes escultóricas propias de las producciones de joyería o de pequeños formatos, incluyendo el proceso de descere y la colada del metal, donde la metodología viene dada por la variación de tiempo/potencia y peso/forma para obtener un procesado térmico efectivo, sin roturas, reacciones durante la colada y calidad en el registro del molde.

Con el análisis de los resultados de esta investigación, mediante la ejemplificación de caso, se pretende aportar a las investigaciones en torno a la inclusión de la energía microondas en los talleres del área, manifestando que esta alternativa de calentamiento es viable y eficaz para su aplicación en el sector.

**Palabras clave:** Fundición artística, Joyería, Tecnología microondas, Moldes cerámicos, Microfundición.

Moreno Candell, F. (2021). Estudio de producción de piezas de micro fundición para joyería utilizando energía microondas. *ArDIn. Arte, Diseño e Ingeniería*, 10, 217-237.

### **Abstract**

In this work, procedures involved in artistic casting through the use of microwave energy are studied. Specifically, the test addresses the thermal process of the molds used for the production of molten metal jewelry with the lost wax technique, analyzing the behavior of these silicate-based compounds for the realization of molds with cylindrical formwork through the microwave radiation. This research is part of the continuity of previous studies, where it is verified that the loss of water during the process of evacuation of wax and dehydration of the mold, interferes in the capacity to increase the temperature necessary for this transformation. For this, a muffle built with electrically active materials is designed as a solution to increase the temperature through hybrid microwave heating.

The use of this heating was previously studied in 80 gr molds with reproduction of simple shapes. The need to apply the procedure to real cases of artistic casting has required an approach to larger sizes and complex morphologies, based on the fact that the effectiveness of microwave heating is not only linked to the properties of the materials, but also to the characteristics of the volume to be heated. For this reason, the study includes a system adapted to the sculptural variants typical of jewelry or small-format productions, including the descretion process and metal casting, where the methodology is given by the variation of time / power and weight / shape to obtain an effective thermal processing, without breakage reactions during casting and quality in the mold register.

With the analysis of the results of this research, through the exemplification of the case, it is intended to contribute to the research on the inclusion of microwave energy in the workshops of the area, stating that this heating alternative is viable and effective for its application in the sector.

**Keywords:** Artistic smelting, Jewelry, Microwave technology, Ceramic molds, micro smelting

Moreno Candell, F. (2021). Estudio de producción de piezas de micro fundición para joyería utilizando energía microondas. *ArDIn. Arte, Diseño e Ingeniería*, 6, 217-237.

**Sumario / Summary:** 1. Introducción. 2. Materiales y Métodos. 3. Resultados. 4. Conclusiones. Referencias.

## 1.- Introducción

Desde los inicios del siglo XX, muchos artistas crean joyas, y no solo joyeros, este hecho reconfigura este territorio artístico. A medianos del mismo siglo se consolida la joyería de autor, donde a través de la joya se aprecia simbología crítica y relatos artísticos (Cabral Almeida, 2014). La joyería tiene potencial expresivo por su interacción con el cuerpo, hecho que despierta interés en los artistas plásticos. Deja de entenderse únicamente como lujosa artesanía canalizando también discursos artísticos. Se encuentra joyería de autor, por ejemplo, en la obra de un artista multidisciplinar como Pablo Picasso, autor de una vasta producción escultórica pero poco conocido en esta faceta de creador de joyas. Como vemos el interés por generar obra en metal no está solo ligado a fundidores o joyeros, sin embargo, una preparación técnica especializada además del consecuente equipamiento se hace imprescindible. El objetivo de este trabajo es incentivar la coyuntura entre nuevas tecnologías y técnicas tradicionales para contribuir a la producción de obra en metal fundido por parte de los artistas contemporáneos.

Dado que los procesos son lentos y de difícil acceso, en esta investigación se estudia un procedimiento para utilizar un horno microondas, de ahora en adelante (MW), en lugar de los hornos convencionales. De esta manera, se pretende contribuir a la inclusión de la tecnología MW en la producción de figuras artísticas de microfundición para así, facilitar su práctica entre los artistas plásticos.

La fundición a la cera perdida es una de las técnicas más habituales en la producción de piezas metálicas. Comúnmente, se trata de fabricar un modelo en cera de la pieza que queremos reproducir. Éste, se recubre con un material refractario vertido en un encofrado de forma cilíndrica que contiene a dicho modelo. Una vez ha fraguado la mezcla, de manera conjunta, se evacua la cera y se ceramiza la pasta refractaria (Benavente, 1992). Aspectos que se resuelven mediante el tratamiento térmico de los moldes (Corredor Martínez, 1997). Tras ello, el molde está preparado para recibir el metal fundido. El material refractario con el que está conformado el molde, en cualquiera de sus técnicas, debe sinterizarse durante el proceso térmico para conformar un compuesto molecularmente estable que soporte las altas temperaturas y la presión metalostática del metal vertido. Este fenómeno se conoce como sinterización y se produce cuando las partículas coalescen uniéndose para formar un solo cuerpo. El efecto macroscópico se traduce en una reducción del volumen que ocupa el cuerpo (Valdez Nava, 2005).

Este proceso en la microfundición de joyería tradicional necesita de una curva larga y paulatina debido al alto grado de humedad contenida en el molde, de tal manera que se descere, seque y sinterice, sin cambios térmicos bruscos que provoquen roturas en el mismo. Habitualmente, esto se

lleva a cabo en hornos eléctricos aparatosos y de alto consumo energético que requieren de intervalos entre 8 a 12 horas hasta alcanzar temperaturas entre 700°C-1000°C. Esta investigación, se centra en la realización de este proceso en hornos microondas convencionales. La aplicación de esta tecnología en procesos de secado y sinterizado es objeto de estudio en diferentes áreas, demostrando que poseen grandes ventajas de cara a la producción. Esto es debido a la optimización de energía del proceso que se focaliza en el objeto a calentar y no sólo en el acondicionamiento térmico de la cavidad (Buenavente Martínez, 2015).

El trabajo está basado en un estudio preliminar, donde se ha demostrado que el alto contenido en agua añadida para conformar las pastas refractarias supone un calentamiento eficaz para las microondas (Moreno Candel, Pérez Conesa, Galea, & Acosta Hernández, 2020). En primera instancia, se estudia el control de las altas propiedades dieléctricas del agua contenida en las pastas teniendo como objetivo, conseguir un desecado y secado sin deterioros. Se manifiesta que, con la evaporación del agua, las partículas quedan más separadas generando huecos de aire, aumentando así, la transparencia del material a las microondas y, por lo tanto, la disminución de su capacidad de absorción de energía. Por ello, se estudia una alternativa que aumente la temperatura requerida para generar un cuerpo refractario compacto y estructuralmente efectivo.

El aumento de temperatura gradual para un desecado y secado sin inconvenientes, depende del tiempo de exposición a la radiación y potencia de microondas emitida. En el calentamiento directo por MW, muchas cerámicas son difíciles de calentar debido a su pobre absorción de microondas (Menezes, Souto, & Kiminami, 2007), ya que, deshidratada la pasta que conforma el molde en la primera parte del proceso, las bajas propiedades dieléctricas disminuyen el calentamiento y esto imposibilita el aumento de temperatura necesario para el sinterizado (Menéndez & Moreno, 2017). En este estudio, se ha propuesto una solución mediante un método híbrido combinando el calentamiento directo por MW con el calentamiento por conducción de calor (Segura de Jesús & Carbajal Franco, Junio 2017). David Reid, realizó un sistema experimental para fundir piezas de plata en un microondas doméstico (Reid, December 15, 2018 at 12:27 am). Añadía magnetita como material suscepto a la composición de una mufla con la que conseguía aumentar la temperatura para fundir pequeñas piezas de metal (Albaladejo González, 2006). La energía es absorbida por un material suscepto con mayores pérdidas dieléctricas, mientras pasa por conducción a través del material con menores fugas, transmitiéndole energía para que éste se caliente (Buenavente Martínez, 2015). Algunos de los susceptores más utilizados en el calentamiento por MW son el carburo de silicio (SiC), carbono (C) y magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (Horikoshi, Osawa, Sakmoto, & Serpone, 2013). El calentamiento híbrido por microondas, por ejemplo, se ha

utilizado para sinterizar alúmina, material de baja absorción de ondas, usando una capa de SiC como susceptor de microondas (Peng, Hwang, & Andriese, 2013).

En este caso, utilizando los mismos principios, se ha diseñado una mufla para elevar la temperatura hasta los 750°C, combinando, materiales absorbentes y transparentes con bajas pérdidas térmicas para facilitar la conductividad térmica del molde. Se eligió un encofrado de alúmina, material transparente a las microondas (Buenavente Martínez, 2015), pero con propiedades refractarias y Carburo de Silicio (SiC-β) como catalizador, utilizado en otros estudios como un susceptor eficaz para microondas y por tanto con buenas propiedades dieléctricas (Fayos-Fernández, Pérez-Conesa, Monzó-Cabrera, & Albaladejo-González, September 2017). Para la realización del estudio, se han diseñado modelos de cera variados, dado que la efectividad del proceso de calentamiento por radiación de microondas depende de las propiedades del material y de las características de la pieza (Perez Conesa, 2017). En este sentido y teniendo en cuenta el campo al cual se pretende la adaptación de tratamiento alternativo, se hace necesaria para la aplicación de esta técnica, realizar el estudio con muestras acordes a una geometría compleja y formato requerido en microfundición artística.

Con los resultados de esta investigación, se pretende contribuir a la incorporación de la tecnología microondas en los talleres, tanto de carácter docente como profesional, propios del sector de la producción de piezas de metal fundido, buscando la reducción de tiempos en la producción y aportar al estudio de sostenibilidad de los procesos.

## **2. Materiales y métodos**

La metodología llevada a cabo plantea el procesado de piezas escultóricas de formas complejas, variando su tamaño y peso. El objetivo plantea sistematizar y viabilizar el procesado térmico a través de la energía microondas, por ello, este estudio se concentra en la verificación de un sistema diseñado para la búsqueda eficaz del aumento de la temperatura (750°C) del cuerpo estableciendo escalas de tiempo y potencia necesarias para la eliminación de agua combinada y restos de cera.

El objetivo es, procesar térmicamente los moldes preparándolos para recibir el metal fundido a través de una curva de temperatura controlada y progresiva, en el menor tiempo posible, atendiendo a las características de cada molde, su morfología y peso, para aplicar un sistema que produzca una transformación estructuralmente estable durante el descere y secado. Una vez el molde haya superado esta etapa, continuando con el proceso, se somete a la solución propuesta para paliar que la pérdida de agua durante el secado imposibilita el aumento de temperatura para el quemado. Para ello se construye una mufla que genera un calentamiento híbrido mediante el

flujo de energía eléctrica a térmica, y que, por conducción, se posibilita la elevación de temperatura del molde.

En primera instancia, se realizan pruebas de reconocimiento para valorar y determinar el funcionamiento de la mufla, posteriormente, se diseñan pruebas para el estudio completo del proceso previo a la colada de metal aplicado a piezas escultóricas concretas. En este sentido, aprovechando la elevada temperatura obtenida del quemado, se vierte metal fundido, con el fin de observar los efectos producidos en el mismo tras las curvas de temperatura aplicadas.

La mufla propuesta consiste en un contenedor elaborado con material transparente a las microondas y altamente refractario, en cuyo interior alberga un cilindro confeccionado con material susceptible absorbente de microondas que a su vez circunda al molde cerámico a calentar. De este modo, se busca que las microondas traspasen el primer material hasta encontrarse con el cilindro susceptible y que este absorba la energía eléctrica transformándola en térmica. El molde, en contacto con el susceptible recibirá, por conducción térmica, la energía necesaria para aumentar su temperatura. Será el factor tiempo y potencia el que resolverá la meseta adecuada para provocar el quemado.

La fabricación de la mufla, se ha realizado a partir de dos ladrillos refractarios de baja densidad (ladrillos ligeros clas. astm), cuyo compuesto químico es de  $AL_2O_3$  67% y  $SiO_2$  30,05% y formato original es de 23 x 11 x 6cm. A estas piezas se les practica una cavidad en la zona central, de tal modo que, al enfrentarlos, generan una cámara hueca cilíndrica en su interior de 18 cm de altura y 10 cm de diámetro para almacenar el resto de los componentes. Como susceptible, se fabrica una pieza cilíndrica hueca de 0,5cm de espesor, para envolver el molde. El compuesto se realiza con carburo de silicio verde (400mm) aglutinado con el mínimo porcentaje de sílice coloidal en estado acuoso necesario para generar una pasta moldeable para su elaboración. Para aumentar la plasticidad del carburo, se agrega un conglomerante, bentonita al 5%, que mejora su manipulación. El porcentaje de este aditivo se ajusta al mínimo, dado que existe el riesgo que pueda alterar el rendimiento dieléctrico del material.

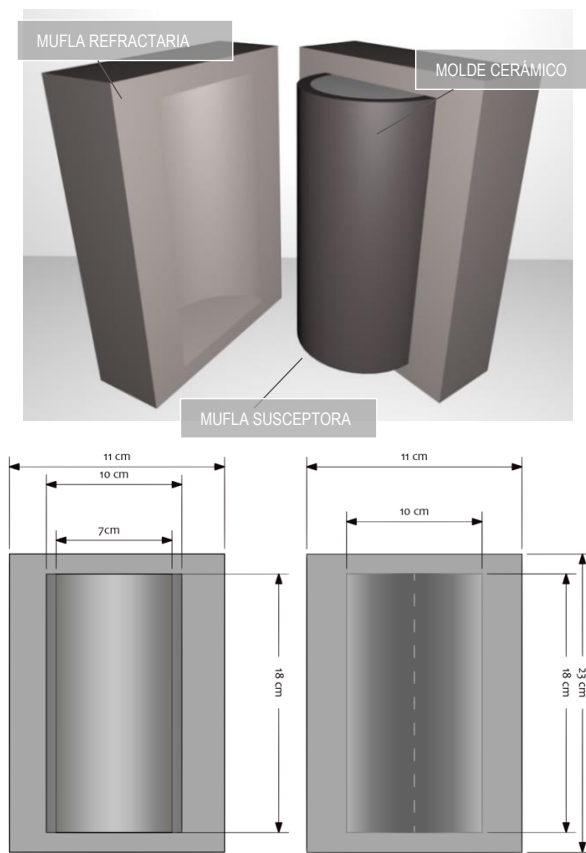


Fig1. Esquema del diseño de Mufla MW. Fig2. Plano dimensiones de Mufla MW. (Infografías de autor).

La primera parte del estudio se centra en la viabilidad y funcionamiento del calentamiento de la mufla, verificándose su rendimiento calorífico, teniendo en cuenta aspectos como la absorción y la retención de energía en función de los intervalos de tiempo que se van adaptando, así mismo como la potencia, a los formatos ensayados. Se parte de resultados contrastados en pruebas realizadas con anterioridad en piezas ya desecadas y secas por medio de la radiación de las microondas en dos formatos de cilindros cerámicos.

1. Molde refractario en forma de cilindro de 7cm diámetro y 10cm de altura, con el nombre dado C.M6 muestras de cera en forma de *cactus* de 4 ramificaciones, con un peso de entre 12,51-14,3gr de cera. Concretamente, se ha trabajado para este estudio de la prueba C.M5 a la C.M10.
2. Molde refractario en forma de cilindro de 7cm diámetro y 15cm de altura, con el nombre dado C.E3 muestras en forma de *cactus* de 6 ramificaciones distribuidos a 4 cm entre sí, con un peso



de entre 19,7-23,7gr de cera. Concretamente, se ha trabajado para este estudio de la prueba C.E1 a la C.E3.

La búsqueda radica en diseñar mesetas de calentamiento que no resulten agresivas para el molde y alcancen los 750°C eliminando así, el agua química y los restos de cera en el menor tiempo posible. De este modo, se concreta el funcionamiento de la mufla y se establece una rampa de aplicación.

En trabajos anteriores, se ha establecido que la forma del árbol de fundición es un factor que influye en la fragilidad del molde. Las tensiones térmicas que se producen durante el descere y deshidratado de las piezas, hacen de esta etapa una de las más delicadas. Para trabajar en base a ello, se realizan piezas de morfologías complejas, que en primera instancia se someten al descere y secado, aplicando las curvas de temperatura verificadas en estudios anteriores con el fin de analizar cambios producidos a partir de las geometrías de las ceras. Seguidamente, se procede al quemado haciendo uso de la mufla y aplicando las mesetas de quemado verificadas con las pruebas C.M y C.E, finalizando el proceso con la colada del metal.

Se preparan 18 piezas escultóricas, de formas complejas acordes a las usualmente empleadas en procesos artísticos, dividiéndolas en dos formatos de cilindros según su tamaño:

1. En los formatos cilíndricos C.M:

3 árboles de fundición para una pieza que tiene por título “Colmillos” 1-3

3 árboles de fundición para una pieza que tiene por título “Patas de elefante” 1-3

3 árboles de fundición para una pieza que tiene por título “Trompas pequeñas” 1-3

2. En los formatos cilíndricos C.E:

3 árboles de fundición para una pieza que tiene por título “Trompas grandes” 1-3

3 árboles de fundición para una pieza que tiene por título “Hipopótamos” 1-3

3 árboles de fundición para una pieza que tiene por título “Trompas con colmillos”1-3



Fig. 3. De izquierda a derecha; Colmillos, Patas de elefante, Trompas pequeñas, Trompas grandes, Hipopótamos y Trompas Colmillos. (Fotografías de autor).

Los modelos se han elaborado con cera sintética roja (Ref: 1950). La pasta refractaria empleada es, el “Revestimiento WHIP MIX PRIMA-CAST” combinada con el 40% de agua en la composición de

la mezcla. Para su fabricación, se ha utilizado encofrados en PVC con perforaciones alrededor de la superficie para la salida de gases. La curva de temperatura establecida para esta primera parte de procesamiento está condicionada a los objetivos concretos de eliminación de cera y secado sin deterioro del molde. Una vez descerados y secados, se retira el encofrado de PVC para evitar su degradación y se procede al quemado. Se introduce el molde en el cilindro susceptible y éste, a su vez, en la cavidad de la mufla. Para este caso, los resultados vienen dados por la observación de fisuras y desmoronamientos en el molde, la efectividad del descerado, el incremento de temperatura necesaria para el quemado, sin fisuras ni roturas en la masa, y la capacidad de registro en la pieza tras la fundición.

Para el análisis térmico de las muestras, se ha utilizado el microondas *Menumasterde1100W* de rendimiento con una cavidad de 38 x 38 x 24cm, en la que los ejemplares se colocan en el centro de la misma. Los datos térmicos se han recogido a través de infrarrojos, con un termómetro láser (F-62 Max-plus) y con una cámara de capturas de termografías (FlukeTis20).

El cumplimiento de estos objetivos secuenciados, permite analizar un procedimiento aplicable en la elaboración de moldes refractarios para piezas de varios formatos y formas.

### **3. Resultados**

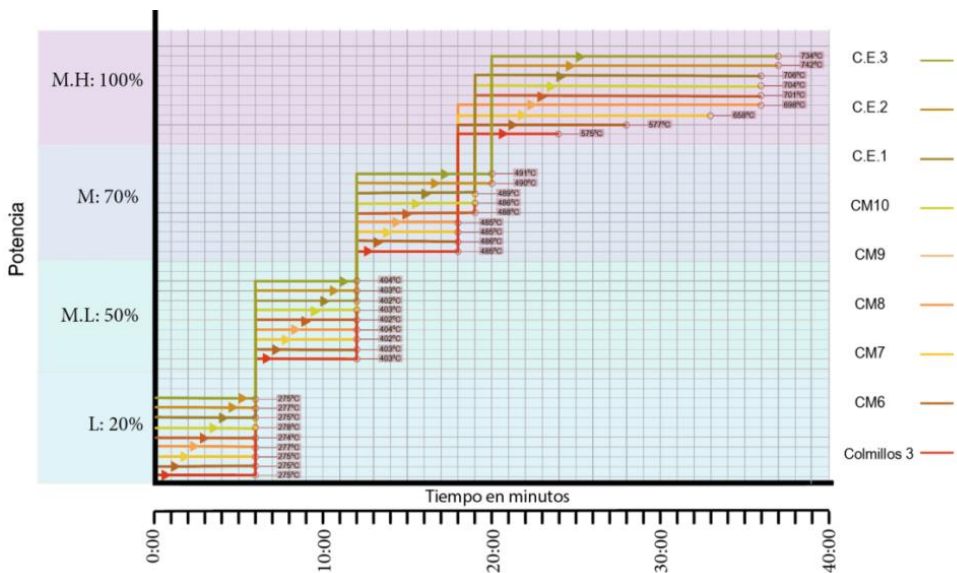
La mufla diseñada y adaptada para este estudio alberga en primera instancia, los grupos de muestras C.M y C.E por separado, con el objetivo de determinar la curva de exposición térmica necesaria para alcanzar la temperatura recomendada por la técnica convencional. En este sentido, se realizan intervalos de variación entre tiempo y potencia, a medida que se va midiendo la temperatura y desarrollándose la deshidratación completa del molde. Los grupos de muestras C.M y C.E fueron desceradas anteriormente, por lo que se introducen secas y sin cera.

En el estudio previo se determina que tras la pérdida de humedad disminuyen notablemente las propiedades dieléctricas del molde, obteniendo una capacidad de calentamiento muy baja transcurridos los primeros 60 minutos. Si se llevara al máximo el rendimiento de potencia del microondas en tiempos más prolongados no solo no se alcanzaría la temperatura requerida sino, también se propiciaría un sobrecalentamiento del que supondrían riesgos para el aparato. Para suplir esta necesidad se emplea la mufla MW que adquirirá la absorción de energía. La alúmina y la sílice que componen el ladrillo refractario se muestran transparentes a la microondas, por el contrario, el carburo de silicio las absorbe (Pozos Osorio, Flores Galindo, Juárez Rodríguez, & Luna Castellanos, 29-31 de octubre, 2012). Debido a las particularidades del molde, es indispensable diseñar una curva de calentamiento progresiva y suficiente para que el susceptible transmita calor al

molde, sin quebrarlo, hasta eliminar totalmente los restos de cera carbonizada y de agua combinada en un tiempo mínimo para el procedimiento. El dispositivo utilizado para este estudio ofrece variantes de emisión de microondas, pudiendo variar su potencia para diseñar las curvas en función de las necesidades siendo: 20%, 50%, 70% y 100% el escalonamiento del rendimiento de la potencia. Se parte de la curva 6-6-6-6min a 20%-50%-70%-100% respectivamente, de manera inicial hasta dar con la curva apropiada. Se procesan, como pruebas de reconocimiento las muestras C.M.5-10 y C.E.1-3 con el objetivo de diseñar una curva eficaz que alcance los 750°C progresivamente, imitando los 100°C por hora y observando el estado de los moldes.



Fig. 4-5. Imágenes del conjunto Mufla/pieza en el interior de la cavidad del microondas con muestra C.M.7 para el quemado. (Fotografía de autor).



Gráfica 1. Curva de temperatura muestras C.M. y C.E.

Aplicadas las curvas, las muestras se someten a la última parte del proceso de fundición, la colada, en este caso de latón a 940°C, con el fin de identificar anomalías en el molde como fisuras, escapes de metal, reacciones que generen llamas o rechazo del metal, además de valorar la calidad de registro del molde a partir del producto obtenido.

Dado que los moldes deben estar calientes para recibir el metal fundido, tras finalizar la meseta de quemado se cuela el metal fundido en cada muestra. En las muestras C.M5 y C.M6 la temperatura resulta insuficiente, generándose reacciones durante la colada. En el caso de la muestra C.M7, como se observa en la gráfica 1, se alcanzó 658°C, pero durante el vertido del metal se genera ignición y se aprecian leves desmoronamientos. Estos datos denotan insuficiencia térmica para la ceramización completa. Por el contrario, es a partir de la muestra C.M9, con 37 minutos de aplicación microondas, cuando se obtiene 742°C, tal como se aprecia en la gráfica, obteniéndose un buen estado tras una colada sin reacciones. La calidad del registro ha sido correcta. A partir de la verificación de esta curva, con vistas a su aplicación, para el grupo C.E, se considera aconsejable un aumento de dos minutos, ya que en la primera de estas muestras vuelven a parecer reacciones. Si bien es cierto, que se trata de reacciones muy leves, y teniendo en cuenta los resultados de las muestras sucesivas, estas han obtenido los mismos resultados que las C.M9 y 10, aplicándose la meseta 6-6-8-19, dos minutos más larga.

Partiendo de la verificación de los resultados obtenidos en los ensayos realizados con la mufla, se aplica la misma metodología a las muestras de morfología completa. En este caso, completando el proceso; descere, secado, quemado y colada del metal con formas acordes al área de aplicación. El objetivo, en este caso, es estudiar los resultados para poder verificar el procedimiento en su aplicación a la microfundición artística.

Muestras	Peso de cera (gr)	Peso inicial del molde (gr)	Peso final de secado (gr)	Curva de exposición microondas	Peso de cera recogida	Humedad final (%)	Tiempo total (min)	Observación
				Temperatura (°C)				
Colmillos 1	15	633	-	25/8/6 -/-	-	-	39	Estalla al minuto 4
Colmillos 2	14,7	670	-	30/10/5 -/-	-	-	45	Estalla al minuto 6
Colmillos 3	15	702	468	30/15/10 82-86-96	12	1,2	55	No estalla, no desmorona
Patas elefante 1	18,5	659	589	30/15/10 89/85/95	18,1	1,0	55	No estalla, no desmorona
Patas elefante 2	17	690	571	30/15/10 67/80/89	17	1,1	55	No estalla, no desmorona
Patas elefante 3	16,7	643	495	30/15/10 76/79/85	16	1,6	55	No estalla, leve desprendimiento
Trompas. P. 1	23	628	354	30/15/10 84/88/99	17,5	1,2	55	No estalla, PVC arde, no desmorona
Trompas. P. 2	22	623	400	30/15/10 77/82/90	19	1,2	55	No estalla, no desmorona
Trompas. P. 3	22	648	394	30/15/10 74/78/86	22	1,2	55	No estalla, no desmorona
Trompas. G. 1	27	968	806	30/15/10/5/5 88/95/89/104	27,1	2	65	No estalla-no desmorona
Trompas. G. 2	26	881	933	30/15/10/5/5 89/89/94/101/107	25,2	2	65	No estalla-no desmorona
Trompas. G. 3	28	927	973	30/15/10/5/5 79/79/83/91/102	27,5	2	65	No estalla-no desmorona
Hipopótamos 1	56	882	682	30/15/10/5/5 69/82/92/104/121	55,7	2	65	Leve desprendimiento
Hipopótamos 2	57	852	632	30/15/10/5/5 67/73/86/91/105	56	1,8	65	Leve desprendimiento
Hipopótamos 3	56	863	659	5-5-5-5-5-5/15/10/5/5 58/67/76/81/92	55,3	1,8	65	No estalla-no desmorona
Trompas con colmillos 1	10	913	-	30/15/10	-	-	-	Estalla minuto 11, 20%desmoronamientos
Trompas con colmillos 2	11,2	822	-	30/15/10	-	-	-	Estalla minuto 15, 20% desmoronamientos
Trompas con colmillos 3	10,4	893	648	5-5-5-5-5-5/15/10/5/5 61/71/77/89/91/103	10,2	1,3	65	No estalla-no desmorona

Tabla 1. Resultados de cocción y secado de las muestras escultóricas.

El interés por testar estas formas viene dado por poner a prueba los moldes al reproducir formas finas y detalladas, ya que el descere y secado del molde es un procedimiento delicado y crítico, sobre todo en los primeros instantes donde el molde va perdiendo la mayor cantidad de agua que contiene, a la vez que se quema la cera. En esta etapa, de 0 a 100 °C puede sufrir desperfectos que no ocurrían en las formas simples. En este caso, como se observa en la Tabla 1, la forma está implicada en la susceptibilidad del molde a los desmoronamientos y, por lo tanto, en el diseño de la meseta. Partiendo de curvas verificadas se determina que no solo el peso de los moldes sino la forma del original en cera repercute en la necesidad de un calentamiento más paulatino en la primera fase de exposición durante 30 minutos a 100W de potencia. Se ha resuelto que es conveniente aplicar intermitencia a intervalos más cortos a la mínima potencia, es decir, una exposición intermitente de microondas, deteniendo la radiación durante 1 minuto cada 5min en el primer escalón de potencia de la curva 30-15-10min, no siendo necesaria en los consecutivos escalones de 15 y 10 minutos con potencias de 240W y 350W aprox. Aunque se han conseguido descerar modelos sin deterioros, sin la aplicación de intermitencia, para formas con convexos pronunciados y paredes finas, tal y como se observa en la Tabla 1, es la manera más segura para el descerado, que apenas ralentiza el proceso, 5 minutos adicionales. Es propio mencionar, que en pesos superiores a 690gr y hasta 970gr del conjunto, debido al mayor grado de humedad, y por lo tanto, el calentamiento más rápido, es aconsejable aplicar intermitencia pese a que la forma no sea exhaustivamente complicada con secciones muy finas de cera, ya que esta metodología no solo ayuda a ralentizar el aumento de temperatura sino también contribuye al control de la condensación de agua dentro de las paredes de la cavidad, puesto que el extractor del aparato sigue funcionando. En este sentido, se plantea la hipótesis de que este fenómeno podría favorecer la deshidratación del molde debido a la consecuente centralización de las microondas en el material de interés. Finalmente, se ha resuelto que la curva 30-15-10min es adecuada para formas complejas de hasta 690gr sin deterioro para el molde, consiguiendo descerarlo y secarlo con un promedio de pérdida de masa de 203gr, suficiente para iniciar el quemado, teniendo en cuenta que en esta fase se alcanzan los 100°C aprox, en primera instancia. Para muestras de mayor tamaño, hasta 970gr, se determina eficaz la curva 30-15-10-5-5min, sin riesgo para el encofrado ni el aparato, subrayando que la intermitencia es un seguro, aplicándose en el primer escalón de la meseta para formas muy complejas o moldes muy húmedos. Esta prolongación permite igualar la deshidratación de un molde más pesado, dejándolo listo para el quemado.



Fig. 6. Muestra C.M. 3 Patas elefante parcialmente en metal. (Fotografía de autor).



Fig. 7. Proceso de vertido del metal. (Fotografía de autor).



Fig. 8. Muestra C.E.1 Trompas grandes en metal. (Fotografía de autor).

Con las muestras que han resultado exitosas del proceso anterior, se procede a las pruebas de verificación del quemado de formas complejas aplicándose, según pesos las rampas 6-6-7-18, con el encofrado de tamaño C.M, tamaño medio y 6-6-8-19 para C.E. tamaño de cilindro extra grande. Estas pruebas están enfocadas a testar los fenómenos producidos en la colada del metal dentro de cavidades internas generadas por el molde por considerarse más susceptibles a los deterioros teniendo en cuenta que se pretende reproducir un negativo de formas irregulares. Se debe hacer constar que obviamente, cualquier resquicio de cera o agua química en el molde, provocaría reacciones muy peligrosas no solo de cara a los resultados de las muestras sino también para el operario. Además, cualquier aumento brusco de temperatura puede generar grietas debido a contracciones térmicas internas. Valorando que la incrustación de residuos de cera en la porosidad del molde puede causar texturas no deseadas en los positivos, y que la reproducción de formas complejas en el negativo puede requerir particularidades en la eliminación de la cera y el agua combinada químicamente, por lo que se estudian los cambios en las formas de las ceras evaluando si el tratamiento térmico repercute dentro de las cavidades internas generadas en el molde.

Muestras	Temperatura del molde	Desmoronamientos	Ignición	Capacidad de registro	Filtraciones o escapes de metal	Llenado de la pieza
<b>Colmillos 3</b>	744	No	No	Media	-	Parcial
<b>Trompas P.1</b>	747	No	No	Buena	No	Parcial
<b>Trompas P.2</b>	748	No	No	Media	No	Total
<b>Trompas P.3</b>	726	No	Leves	Media	No	Parcial
<b>Patas elefante 1</b>	727	No	No	Media	No	Parcial
<b>Patas elefante 2</b>	725	No	No	Media	No	Total
<b>Patas elefante 3</b>	735	Leves	Leves	Media	No	Parcial
<b>Trompas G 1</b>	710	No	No	Buena	Si	Total
<b>Trompas G 2</b>	715	No	Leves	Media	Si	Total
<b>Trompas G 3</b>	710	No	Leves	Buena	No	Total
<b>Hipopótamos 1</b>	722	No	No	Media	No	Total
<b>Hipopótamos 2</b>	712	No	Sí	Buena	Si	Total
<b>Hipopótamos 3</b>	721	No	No	Buena	No	Total
<b>Trompas con colmillos 3</b>	716	Leves	Leves	Media	No	Parcial

Tabla 2. Resultados de colada de las muestras escultóricas.

La Tabla 2 refleja diferentes factores acontecidos durante las coladas. Los desmoronamientos se miden con la observación de desprendimientos del material refractario. La ignición ha determinado la calidad del proceso de quemado, entendiéndose como leve, la aparición de una llama que no impide la continuidad de la colada. Con respecto a la calidad de registro del molde se mide en la comparación del original en cera y la muestra fundida, observando las texturas originales o la presencia de superficies que no lo son, como piel grumosa en la cara externa del metal. De igual modo, la aparición de fisuras o filtraciones de metal se valoran mediante la observación de la pieza fundida. Por último, la consistencia del cuerpo del molde se observa en su integridad tras la



recepción de la colada valorando los escapes metálicos durante el vertido. Con el análisis de estos parámetros se determina que, si el molde no es lo suficientemente estable, caliente y libre de impurezas, no tiene la calidad requerida para su producción. Tal y como se observa en la Tabla 2, en columna “Llenado de la pieza”, se comprueba que el vertido del metal por gravedad no es suficiente en algunas de las fundiciones y requieren de una posterior adaptación a las técnicas de centrifuga o bomba de vacío debido a que sus reducidos tamaños impiden la circulación del metal. Atendiendo al resto de columnas, a excepción de la “Capacidad de registro”, relacionando los sucesos con el quemado, los resultados son óptimos en cuanto al cuerpo cerámico obtenido, sin apenas presencia de desmoronamientos y con 25% de filtraciones de metal. Se obtiene un índice de temperatura de 725,5°C, considerada como suficiente. Teniendo en cuenta que una leve ignición es relativamente común en la fundición, siempre que no repercuta en la continuidad de la colada. Se ha obtenido un 42% de muestras con reacciones muy leves que no han impedido finalizar con el vertido del caldo hasta el llenado de la cavidad. Respecto a la capacidad de registro del molde, se puede considerar que los resultados negativos se deben a la necesidad de utilizar fuerzas asistidas como la centrífuga o el vacío para forzar el recorrido interno de la colada del metal. Lo atestiguan aquellas piezas que presentan geometrías de secciones más gruesas en las que se ha podido analizar el registro de los detalles, ya que el vertido por gravedad ha permitido su producción del metal, pudiéndose afirmar que la calidad del molde es apropiada atribuyéndose así, un valor positivo a la propuesta. Esto se puede apreciar en las fotografías comparativas con el ejemplo del modelo C.E3: Trompas grandes.



Fig.9-10. Muestra C.E.3 Trompas grandes en cera y metal, respectivamente.(Fotografías de autor).

#### 4. Conclusiones

La hipótesis inicial, motor de estas investigaciones, se fundamenta en que la cantidad de agua utilizada en la mezcla de las pastas refractarias para la realización de los moldes cilíndricos de joyería tradicional supone un aliado perfecto en el procesamiento por microondas. Siendo su calentamiento dieléctrico el responsable de llevar a cabo la primera parte del proceso, en el que la cera y el molde deben evacuarse y secarse, respectivamente y gracias al diseño de potencia y tiempo escalonado se determina una curva de temperatura gradiente y estable.

Por otro lado, se ha demostrado que este fenómeno no es suficiente para el quemado, ya que a medida que el molde va deshidratándose, sus propiedades dieléctricas disminuyen proporcionalmente y no aumenta su temperatura. Para ello, se determina que la fabricación de la mufla adulterada de carburo de silicio ha posibilitado su progreso hasta el quemado. Las propiedades dieléctricas de este material son óptimas para absorber microondas e incrementar la temperatura y transmitirla a la pieza gracias al encofrado utilizado. De este modo, con la variable tiempo/potencia, se consigue elevar la temperatura de piezas ya desceradas y secas mediante una curva de 37 minutos en total, escalonada a 6-6-7-18 minutos para moldes cilíndricos de 7x10cm hasta algo más de 500 gr, aumentando la potencia de 20% al 100%, respectivamente, dado las variantes que ofrece el microondas utilizado para esta investigación, y 6-6-8-19 minutos para moldes cilíndricos de 7x15 cm con peso hasta aproximadamente 1000gr.

Por otro lado, se concluye que las características formales del modelo en cera alteran los resultados del calentamiento por microondas, estableciéndose que efectivamente, modelos con los mismos valores de peso en cera pero no de forma, requieren tiempos más prolongados y una meseta más larga y suave, a las que tienen geometrías más simples para conseguir que el molde no resulte con desmoronamientos. Por tanto, al plantearse como objetivo modelos escultóricos que responden a variables formales muy diversas, es primordial tener en cuenta que cuanto más compleja es la forma más progresiva y paulatina debe ser la meseta en el proceso de descere y secado por microondas. Se ha demostrado que, si bien es adecuada una curva de calentamiento de 30-15-10 minutos a una potencia de rendimiento del 20%, 50% y 70% respectivamente, para piezas de pesos en cera entre 15gr y 18gr, en un cilindro refractario de 7cm de diámetro y 10cm de longitud, cuyo peso ronda los 650gr del conjunto total. Para piezas de morfología fina y de composición más compleja, es necesario prolongar la curva aplicando en el escalón inicial de 30 minutos pausas intermitentes de 1min cada 5 minutos a potencia 20% de rendimiento. De este modo, la temperatura del molde se controla, aumentando de manera más suave, asegurando un descere sin riesgo para la estructura del yeso. Esto es debido a la existencia de movimiento

molecular por el propio dinamismo pese a la interrupción del disparo de ondas, pudiéndose afirmar que la aplicación de calentamiento es viable para todo tipo de formas empleando este sistema.

Si bien es cierto que estas fundiciones requieren del uso de las técnicas de centrifuga o bomba de vacío debido a que los reducidos tamaños de los modelos en sección son tan pequeños que no permiten la circulación del metal por las cavidades del molde con inercia natural, se tiene en cuenta que recurrir a técnicas que fuerzan esta circulación es imprescindible para valorar consecuentemente los resultados de registro. Pese a ello, en este estudio, se llega a la última parte del proceso, al vertido del metal fundido, sin el empleo de estas técnicas, concluyendo el estudio con resultados efectivos, sin apreciarse fugas ni reacciones a través del molde, y reflejando, en algunas de las reproducciones en metal, las más gruesas en sección, la excelente capacidad de registro característica de la pasta refractaria. Por esto, es viable procesar térmicamente los moldes para joyería a través de la energía microondas resultando moldes estables y compactos estructuralmente para soportar la presión metalostática y la temperatura del metal fundido. Aunque no se ha podido verificar en consecuencia la calidad del molde en las muestras con reproducciones muy delgadas (2mm), en las piezas con paredes más gruesas (4mm), el registro de los detalles de la pieza se ha podido comprobar con claridad atribuyéndose un valor positivo. No obstante, han aparecido filtraciones de metal en la junta de algunas piezas que son susceptibles de estudio en futuros trabajos.

Con los resultados obtenidos en esta propuesta, se demuestra que esta técnica es apta para realizar el proceso de fundición de moldes cilíndricos de joyería con piezas de autor/a de pequeño formato, prescindiendo de los hornos convencionales, siendo posible aplicar un aumento de temperatura proporcional, minimizando la emisión de gases, contrayendo tiempos y recuperando el 94,98% de la cera utilizada. En esta dirección, se plantean nuevas líneas de investigación para optimizar la adaptación de esta técnica permitiendo contrastar resultados con las técnicas convencionales, incluyendo el procesamiento simultáneo. Propuestas que pretenden sistematizar el procedimiento de producción en joyería fundida en metal a través de la energía microondas. Se propone en futuras investigaciones sistematizar mesetas para desceres con mayor número de moldes y procesar las fundiciones mediante máquinas centrifugas para comprobar estos detalles mencionados característicos de la técnica.

## Referencias

- Albaladejo González, J. C. (2006). Fundición a la cera perdida: Cellini y la magnetita. *BELLAS ARTES*, 4; abril 2006, pp. 13-28, 4, 13-28.
- Benavente, J. (1992). *La fundición a la cera perdida: Microfusión*. Barcelona: ALSINA.
- Buenavente Martínez, R. (2015). *Desarrollo de materiales cerámicos avanzados con altas prestaciones mediante técnicas no convencionales*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Cabral Almeida, A. (2014). *La joyería contemporánea como arte. un estudio filosófico*. UAB Universidad autónoma de Barcelona.
- Corredor Martínez, J. (1997). Técnicas de fundición artística. *Universidad de Granada*, 214.
- Fayos-Fernández, J., Pérez-Conesa, I., Monzó-Cabrera, J. D.-P., & Albaladejo-González, J. C. (September 2017.). Temperature-dependent complex permittivity of several electromagnetic susceptors at 2.45 GHz. Delft,: AMPERE Newsletter Editor.
- Horikoshi, S., Osawa, A., Sakmoto, S., & Serpone, N. (2013). Control of microwave generated hot spots. Part IV: Control of hot spots on a heterogeneous microwave absorbing catalyst surface by a hybrid internal/external heating method,. *Chemical Engineering and Processing*, 73, 52–56.
- Menéndez, J., & Moreno, A. H. (2017). Aplicaciones del calentamiento con energía microondas. En *Secado industrial con microondas* (pág. 85). Cotopaxi: Ed. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Menezes, R., Souto, P., & Kiminami, R. (2007). Microwave hybrid fast sintering of porcelain bodies. *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 223–229.
- Moreno Candel, F., Pérez Conesa, I., Galea, J., & Acosta Hernández, F. (2020). Procesado térmico de moldes cerámicos para fundición artística a través de la energía microondas. *Tecnica cerámica*.
- Peng, Z., Hwang, J. Y., & Andriese, M. (2013). Design of double layer absorbers for microwave heating. *Ceramics International*, 19, 6721-6725.
- Perez Conesa, I. (2017). *Técnica del descere por microondas: identificación, cuantificación y valoración de los susceptores*. San Cristobal de La Laguna: Universidad de La Laguna.
- Pozos Osorio, J., Flores Galindo, F., Juárez Rodríguez, N., & Luna Castellanos, A. (29-31 de octubre, 2012). Análisis multifísico del calentamiento volumétrico con microondas. *SOMIXXVII Congreso de Instrumentación* . Culiacán, Sinaloa, México.

Reid, D. (December 15, 2018 at 12:27 am). "El primer vaciado fundido (en plata) por microondas se realizó en 1993. Se demostró la técnica en una conferencia sobre microondas en el St. Johns College de Cambridge en 1995.". Obtenido de <https://hackaday.com/2005/01/24/microwave-oven-foundry/>

Segura de Jesús, Y., & Carbajal Franco, G. (Junio 2017). El uso de radiación de microondas para la síntesis de Nanopartículas. *Revista de Innovación Sistemática*, 1(2), 46-56.

Valdez Nava, Z. (2005). *Sinterización de manganitas Ni Fe empleando microondas como fuente de energía*. Leon: Universidad Autónoma de Nuevo Leon.