

DESCERE Y COCCIÓN POR MICROONDAS DE REVESTIMIENTOS REFRACTARIOS PARA JOYERÍA FUNDIDA EMPLEANDO MÁQUINA CENTRÍFUGA.

Francisco Moreno Candel¹, Itahisa Pérez-Conesa², Fátima F. Acosta Hernández³, José Antonio Aguilar Galea⁴

1: Doctorando Universidad de La Laguna, Calle Radio Aficionados, s/n, 38320 San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, España.

2: Profesora Ayudante Doctor, Universidad de La Laguna. Campus de Guajara, Calle Radio Aficionados, s/n, 38320 San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, España.

3: Profesora Titular, Universidad de La Laguna. Campus de Guajara, Calle Radio Aficionados, s/n, 38320 San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, España.

4: Profesor Titular Universidad de Sevilla. Calle Laraña, 41003, 3 – Sevilla, España.

*email: pacomorenocandel@gmail.com



RESUMEN

En esta investigación se desarrolla una metodología concreta para descere y cocer moldes de revestimiento refractario para la obtención de piezas de joyería fundida mediante la tecnología microondas. Estos procesos, en la técnica tradicional, requieren de curvas térmicas lentas y progresivas con una duración de 7 a 12 h utilizando muflas eléctricas. La hipótesis de esta propuesta se basa en que el 40 % de agua necesaria para la elaboración de las pastas refractarias es un aliado perfecto para un efectivo calentamiento dieléctrico por microondas y, por consiguiente, esta tecnología sería viable para la producción de joyería en metal. Para llevar a cabo el estudio fue necesario diseñar un método basado en rampas de tiempo/potencias apropiadas para que estos negativos pierdan paulatinamente el agua contenida, sin que la expansión térmica genere fisuras ni desmoronamientos del molde a causa de perfiles no uniformes de humedad. En la investigación se determina que el calentamiento con microondas es efectivo para estos compuestos, sin embargo, avanzada la deshidratación, se devalúa exponencialmente su capacidad de absorción de microondas, haciéndose imprescindible el uso de un susceptor que posibilite aumentar su temperatura. Para ello se fabricó una mufla dopada con SiC para someter las muestras a un calentamiento híbrido por microondas tras su descere, posibilitando diseñar curvas térmicas graduales hasta completar la cocción. La calidad del procesamiento térmico se evaluó sometiendo las muestras a esfuerzo mecánico empleando una máquina centrífuga para la inyección del metal fundido. Finalizado el estudio, se obtiene un 99 % de recolección de cera y una calidad de registro efectiva para modelos artísticos con una reducción del 66 % respecto al tiempo que se emplea en la técnica tradicional. Con los resultados de esta investigación se demuestra que la viabilidad de las microondas como una fuente de energía contribuye a simplificar y economizar la producción de joyería en metal.

Palabras clave: Descere Microondas, Revestimientos Refractarios, Joyería, Susceptores.

MICROWAVE DEWAXING AND FIRING OF REFRACTORY LININGS FOR CAST JEWELRY USING A CENTRIFUGAL MACHINE.

ABSTRACT

This research develops a specific methodology for de-waxing and firing refractory lining molds to obtain cast jewelry pieces using microwave technology. These processes, in the traditional technique, require slow and progressive thermal curves with a duration of 7 to 12 h using electric muffles. The hypothesis of this proposal is based on the fact that the 40 % of water necessary for the elaboration of refractory pastes is a perfect ally for an effective dielectric heating by microwaves and, therefore, this technology would be viable for the production of metal jewelry. In order to carry out the study, it was necessary to design a method based on appropriate time/power ramps so that these negatives gradually lose the contained water, without the thermal expansion generating cracks or crumbling of the mold due to non-uniform humidity profiles. In the research it was determined that microwave heating is effective for these compounds, however, with advanced dehydration, their microwave absorption capacity is exponentially devaluated, making it essential to use a susceptor that makes it possible to increase their temperature. For this purpose, a muffle doped with SiC was fabricated to subject the samples to hybrid microwave heating after dehydration, making it possible to design gradual thermal curves until the firing was completed. The quality of the thermal processing was evaluated by subjecting the samples to mechanical stress using a centrifugal machine for the injection of the molten metal. At the end of the study, 99 % wax collection and effective recording quality for artistic models were obtained with a reduction of 66 % with respect to the time used in the traditional technique. The results of this research demonstrate that the viability of microwaves as an energy source contributes to simplify and economize the production of metal jewelry

Keywords: *Dewaxing Microwave, Firing Refractory, Jewelry, Susceptor.*

1. INTRODUCCIÓN

La técnica más utilizada en el sector de la fundición artística es la “cera perdida”. Su proceso consiste en colar metal fundido en la cavidad de un molde refractario donde antes había un modelo de cera. En la técnica de joyería tradicional, para la elaboración del molde, se vierte el material refractario en estado líquido dentro de un encofrado con forma cilíndrica que alberga el modelo a reproducir. La pasta refractaria se compacta alrededor del árbol de cera registrando, fielmente, los detalles de su forma. Una vez fraguado el molde, se debe hornear, tanto para evacuar la cera, como para cocer el refractario [1]. Si los negativos no finalizan su proceso de cocción adecuadamente, se pueden manifestar reacciones por ignición durante la operación de inyección del metal fundido y, por consiguiente, se deterioraría, irreversiblemente, el molde. Estos revestimientos refractarios, al estar confeccionados con un alto porcentaje de agua, requieren que la aplicación térmica sea gradual para no quebrarse durante su calentamiento. Las curvas térmicas empleadas tienen una duración de 7 a 12 horas según los tamaños de los moldes y se realizan con muflas eléctricas hasta alcanzar 750 °C y 850 °C para eliminar cualquier resquicio de cera y agua química combinada en el compuesto [2].

La hipótesis de esta investigación es que este alto contenido en agua utilizado en la confección de los moldes es un factor determinante para el calentamiento por microondas, permitiendo incluir esta tecnología en las áreas afines. Las ventajas de utilizar MW (microondas) están orientadas a reducir el intervalo de tiempo de cocción, simplificar la infraestructura y contribuir a paliar la emisión de CO₂, CO y cenizas generadas en la técnica tradicional. Las investigaciones en torno a los procesos térmicos por MW están poniendo mucho empeño en el área concreta del secado y la sinterización por presentarse como un método de procesado rápido, económico y flexible [3]. Cárdenas et al. [4] lograron una reducción de tiempo de procesamiento del 33 %, empleando esta fuente de energía en el secado de materiales cerámicos. La rápida polarización y despolarización en una muestra expuesta a las microondas, genera un calor instantáneo dando lugar al calentamiento volumétrico. El campo electromagnético interactúa con todo el volumen a

diferencia de un horno convencional, donde el calor se produce desde su exterior [5]. Esta condición hace que el descere y secado de revestimientos refractarios con microondas sea muy eficaz, alcanzando ambos objetivos en un tiempo más breve que con una mufla eléctrica.

Dado que la operación del curado en estos moldes, en cualquiera de sus técnicas, requiere de una aplicación de temperatura paulatina y controlada. Este estudio recae en diseñar programas MW apropiados a las condiciones ligadas al proceso de descere y sinterizado, salvaguardando su integridad y transformando su estructura a un compuesto compacto, resistente y eficaz para colar el metal fundido [6]. La tecnología microondas permite operar con aplicaciones térmicas a bajas temperaturas dado que se puede controlar la emisión de irradiación y, por lo tanto, secuenciar el aumento de la temperatura. Esto permite trabajar a temperaturas constantes apropiadas para los procesos de secado poco tolerantes a aumentos térmicos demasiado rápidos [5]. Esta ventaja permite efectuar el descere y secado inicial con temperaturas bajas, tal como exige la seguridad o integridad de este tipo de molde.

A medida que el negativo está expuesto a la radiación por microondas, se desarrolla su deshidratación y con ello, la pérdida de sus propiedades dieléctricas. Las partículas del compuesto refractario quedan más separadas, generando espacios que aumentan su transparencia a las MW y, por consiguiente, repercutiendo en la absorción energética de la muestra [7]. Se conoce que los materiales que tienen una alta conductividad y permeabilidad presentan una baja profundidad de penetración para una frecuencia dada, no penetrando las microondas en el material y permaneciendo la energía en la superficie [7]. Una estrategia eficaz para paliar la deficiencia energética de los materiales transparentes a las microondas es el uso de susceptores, es decir, materiales eléctricamente activos que absorben la energía microondas y, por tanto, propician un calentamiento más rápido y eficaz [8]. En este sentido, con el fundamento de que las MW son absorbidas por el material susceptible que contiene mayores pérdidas dieléctricas que el objeto de estudio, la energía pasa por conducción al elemento con menores fugas y gracias a la conductividad térmica entre ambos, se transmite la temperatura necesaria hacia la muestra de interés [3]. De esta forma, el material comienza su proceso de sinterización, donde llega a la temperatura necesaria

para la última parte del proceso térmico. En este caso, 750 °C. La sinterización por MW está dando muy buenos resultados, consiguiendo densidades del 99.9 % con grano de 1.9 μm al sinterizar, dopando con MgO hasta los 1700 °C durante 12 minutos de MW, tal y como lo presenta Benavente [3]. Por otro lado, Chhillar et al. [9] llevaron a cabo sinterizaciones de polvo de molibdeno al 98 % de densidad en tan solo 5 minutos de MW.

En esta investigación, la compactación de la pasta tras la sinterización se evaluó por medio del esfuerzo mecánico al que son sometidos los moldes cuando se introducen en la máquina centrífuga, donde deben soportar la presión que ejerce la misma, además de la propia de la inyección del metal fundido. Para que la evaluación dé buenos resultados, la operación de sinterización de los moldes requiere de una aplicación térmica muy progresiva, que debe respetar las condiciones de un molde de relativo grosor y con alto grado de humedad, por lo tanto, susceptible de fracturarse de no aplicar la energía de manera paulatina. Jayavabushana et al. [10] concluyen que utilizar esta tecnología en los procesos de descere para fundición puede ser una alternativa útil para los métodos profesionales por ofrecer ventajas mostrando resultados de alta calidad y mínimo gasto de tiempo en comparación con los métodos convencionales. El molde debe cumplir los objetivos de reproducción de modelos complejos y, por lo tanto, no contener fisuras que originen escapes de metal ni desmoronamientos internos que alteren su capacidad de registro. Para generar estas condiciones y hacer uso del suscepter controladamente, se fabricó una mufla dopada con SiC, aislado con componentes refractarios con bajas pérdidas térmicas.

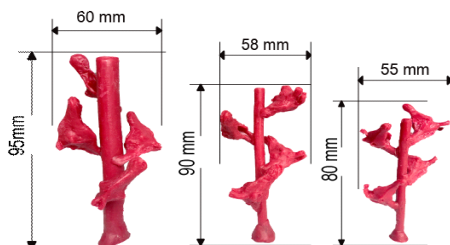


Figura 1. Medidas de los tres formatos procesados.

Para llevar a cabo la operación de descere, el cilindro de acero que se emplea en la técnica

Concretamente se recurrió a ladrillos de baja densidad compuestos de Al_2O_3 y SiO_2 , materiales transparentes a las microondas que permiten focalizar la irradiación MW en el suscepter manteniendo la energía que este genera en el habitáculo. Este diseño permitió la absorción calorífica en los moldes de manera progresiva, logrando sinterizar estos compuestos de $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ y SiO_2 en 2 horas, aproximadamente.

La presente investigación lleva a cabo un estudio de revisión y optimización de un método experimental ya reportado [11], apoyado en el diseño de un procedimiento de precisión que consigue una producción artística que acredita buena calidad y acortamiento del procesado térmico con respecto al tratamiento tradicional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación se estudian tres formatos diferentes de molde que albergan modelos de cera con morfologías similares a las empleadas en joyería. Estos modelos que son descritos en la Figura 1, representan árboles con cabeza de jirafas huecas producidas con molde de silicona, utilizando cera roja de modelar de *Iberceras* (Ref:1950) para preparar 45 árboles agrupados en los tres formatos (Figuras 1 y 2).

- 15 cilindros tamaño de encofrado medio, nombre dado (CM), que alberga un árbol de jirafas pequeñas, muestras "A".
- 15 cilindros tamaño de encofrado grande, nombre dado (CG), que alberga un árbol de jirafas grandes, muestras "B".
- 15 cilindros tamaño de encofrado extragrande, nombre dado (GE), que alberga un árbol de jirafas extragrandes, muestras "C".

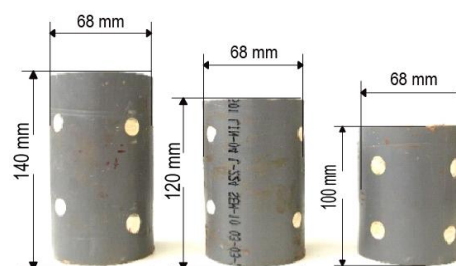


Figura 2. Encofrados de PVC de los tres formatos procesados

original, el cual se utiliza como encofrado para la distribución de la pasta alrededor del modelo en cera,

fue sustituido por PVC (Figura 2) ya que es un material efectivo en el proceso, mostrándose transparente a las microondas y resistente al tratamiento térmico hasta el momento de evacuación de la cera [6]. Dado que al secarse el molde se devalúa su interacción con las microondas y se aumenta su transparencia a las mismas, se fabricó una mufla de carburo de silicio con forma cilíndrica, aislado por dos lechos compuestos de alúmina y sílice para continuar elevando la temperatura de los moldes. Este sistema retiene la energía y propicia mejor conductividad térmica hacia el molde situado en el interior del habitáculo (Figura 3). Por tanto, para desarrollar el procedimiento con efectividad, el sistema de aplicación térmica de la técnica se ha dividido en dos partes. La primera supeditada al secado inicial del molde y a la evacuación de la cera mediante su derretimiento. La segunda, tras retirar el PVC e introducir el molde desecado en la mufla, consignada a cocerlo y curar la pasta refractaria. Finalizado el tratamiento térmico, se evalúa su

resultado *encamisando* el molde en un cilindro de acero e inyectando metal fundido mediante fuerza centrífuga. El proceso térmico MW propuesto, se describe gráficamente en la Figura 3.

La proporción de la mezcla utilizada para la elaboración del molde es 40:100 de agua/yeso, utilizando polvo refractario *PRIMA WISH CAST* y agua entre 20 °C a 25 °C de temperatura. La mezcla de la pasta se preparó con batidora eléctrica a 20.000 rpm sin aplicación de bomba de vacío, dejando un tiempo de reposo de dos horas. El descere se practica con un microondas del fabricante *OK OMW 2214 B 700W* de 850 W de potencia nominal máxima con un magnetrón a 2,45 GHz con cinco rangos de potencia (105w-210w-350w-525w-700w) y una cavidad de 360x362x247mm dispuesto con plato giratorio de 300 mm de diámetro. Para el registro de temperaturas de los moldes, se empleó un pirómetro láser *F-62 Max-plus* (rango medición -30 °C a 600 °C) posicionado a 350 mm de las muestras en un ángulo de 90° (Figura 4 ilustración de la izq.).

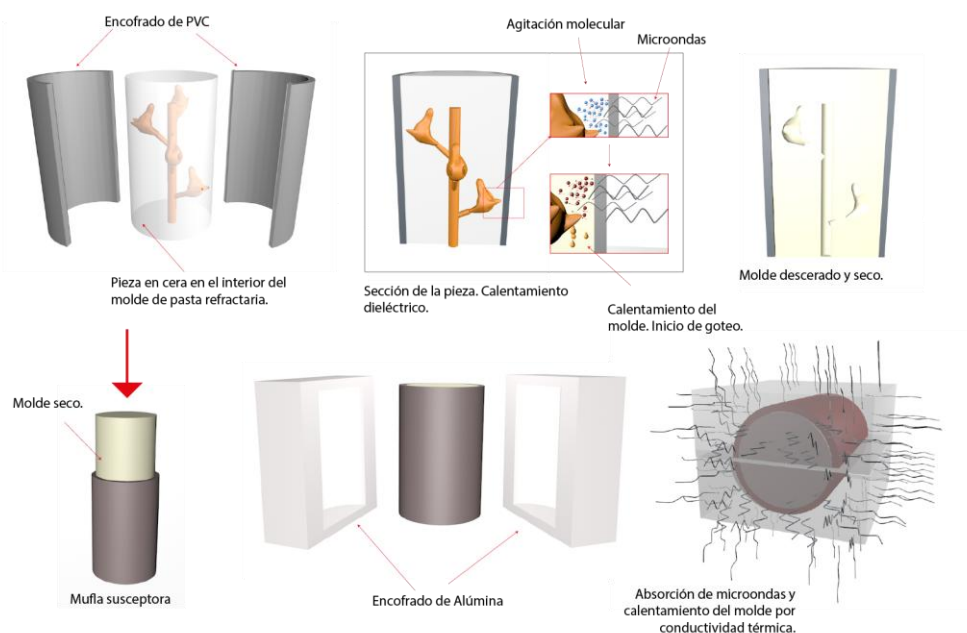


Figura 3. Mecanismo de las dos etapas de calentamiento. Descrito de izquierda a derecha en dos filas, descere y cocción en la mufla microondas, respectivamente.

Paralelamente se realizaron análisis termogravimétrico (TGA) sobre muestras de 0,5 g de cera roja para confrontar su estabilidad térmica en diferentes rangos de temperatura, utilizando un

analizador HITACHI STA7200RV (TG-DTA simultáneo) TA INSTRUMENTS TRIOS V5.0.0.44616, bajo flujo de nitrógeno (50 ml min⁻¹). Concretamente, la cera se calentó en un porta

muestras de aluminio de 25 °C a 600 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C min⁻¹.

En la etapa de cocción se empleó un microondas del fabricante *Panasonic NN-GT45KW 1000 w* de 1100 W de potencia nominal máxima con un magnetrón a 2,45 GHz con siete graduaciones de potencia (100w, 270w, 300w, 440w, 600w, 800w y 1000 w) y una cavidad de 360x362x247mm con plato giratorio de 300 mm de diámetro.

Las temperaturas se registraron por medio de una sonda tipo (k) instalada en el interior de la cavidad de la mufla en contacto con el molde a una profundidad de 5 mm y conectada a un termopar *RS-42 PRO* (rango de funcionamiento de -50 a

1.300 °C) (Figura 4 ilustración de la dcha.).

El vaso cilíndrico susceptor se construyó con SiC verde de granulometría 400 mm, adulterado con un 15 % de bentonita. Su altura es de 160 mm, 93 mm de diámetro exterior y una sección de 10 mm de espesor, con un peso de 680 g. El aislamiento consiste en dos ladrillos refractarios de Al₂O₃ 67% y SiO₂ 33% de 230 mm x 75 mm x 115 mm, cuyos huecos practicados conforman dos camas semicilíndricas para acomodar el vaso susceptor. Las dimensiones globales comprenden una altura de 190 mm por 96 mm de ancho, ambos ladrillos suman un total de 2628 g de peso (Figuras 5 y 6).



Figura 4. Sistemas de medición de temperatura. Pistola láser F-62 y termopar Tipo K de izq. a dcha. Respectivamente.

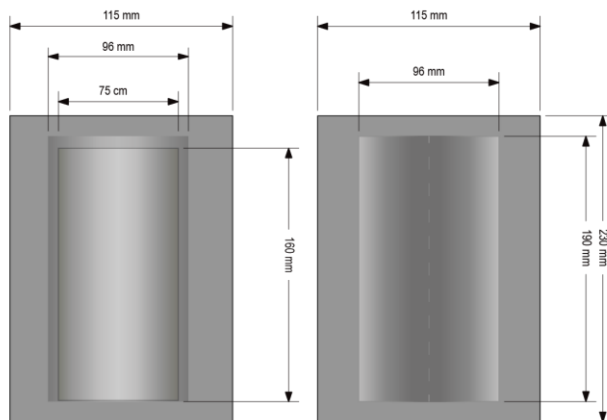


Figura 5. Planos de construcción de la “Mufla susceptor”.



Figura 6. Fotografía de la mufla microondas abierta con el molde dentro

La efectividad del descere y secado inicial se evalúa principalmente cuantificando el peso de cera extraída y la pérdida de masa del molde por deshidratación. Los programas de cocción se determinan a partir de la temperatura y la

observación de la eficiencia de aspectos concretos, tales como: desmoronamientos de polvo, combustión, aparición de fisuras o zonas grises. Atribuyéndose al cuerpo homogéneo y blanco un quemado adecuado para la recepción de la colada.

La prueba concluyente del éxito de la cocción se realiza inyectando metal fundido en el interior del molde empleando cinco segundos en una máquina centrífuga tipo C86 modelo 900 ref:2886 (fabricante: Chamorro y Moreno, S. A). La calidad del proceso se analiza con la comparación del modelo en metal obtenido y el modelo primitivo en cera. El registro fotográfico de la presencia aparición de texturas no concordantes con el modelo original o desprendimiento de la capa de registro del negativo. El análisis de estos parámetros desde el descere al centrifugado determina si el molde es apto para fundición.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Verificación del descere.

En el proceso de descere y secado inicial se introdujeron los moldes individualmente en la cavidad MW aplicando las curvas tiempo/potencias estudiadas para estos formatos de encofrado en una investigación anterior [6]. Tras la aplicación, se capturó la temperatura máxima alcanzada por los moldes, y posteriormente, se pesó la cera recolectada y cada negativo descerado. De este modo se analizó la efectividad de la meseta para continuar con el proceso (Tabla 1).

De los cilindros formato CM (muestras A) se obtuvo un descere del 98,36 %. La pérdida de peso promedio de estas muestras relacionada con el secado inicial fue de 10,79 %. Del formato CG (muestras B), se descereó el 100 % de la cera según los pesos calculados y se observó un descenso de peso por secado del 17,45%.

Por último, de los resultados de las muestras con mayor formato, CE (muestras C), se obtuvo un descere del 99,02 % y una pérdida peso del 21,90 %. En ninguno de los grupos de muestras se experimentaron fisuras, desprendimientos de polvo, ni deterioros en los encofrados de PVC. Tanto el índice de éxito en las muestras como los porcentajes de cera recolectados fueron óptimos. Se considera que la interacción molecular de las microondas con el agua contenida en los moldes genera una evaporación de agua instantánea la cual derrite la cera evacuando la cavidad del negativo antes de producirse la dilatación térmica de la cera hacia su porosidad.

Tabla 1. Datos promedios obtenidos de las mesetas de descere y secado inicial en los grupos de muestras “A”, “B” y “C” encofradas en formatos CM, CG y C.E, respectivamente.

Muestras peso promedio	Tiempo/potencia	Peso modelo cera	Pérdida de peso del molde	Temperatura alcanzada	Pérdida de masa secado	% de descere	Fisuras /desmoronamientos
A1-15 (694g)	25' (105w)	7.8 g	89.40 g	88°C	10,79%	98,36%	no
	8' (210w)						
	6' (350w)						
B1-15 (847g)	30' (105w)	12.36 g	145,46 g	104, 7 °C	17.45 %	100%	no
	15' (210w)						
	10' (350w)						
C1-15 (969g)	5' (525w)	17.3 g	212,33 g	108.5 °C	21,90%	99.02 %	no
	30' (105w)						
	15' (210w)						
	10' (350w)						
	5' (700w)						

3.2.- Diseño de curva de cocción.

En la segunda etapa de calentamiento, con los moldes libres de cera y semi-secos, se retira el PVC, y se introducen en la mufla MW para proceder a su cocción. Para diseñar las rampas de tiempo/potencia

más adecuada para el proceso, se recurrió como referencia, a las temperaturas comprendidas entre 280 °C y 470 °C en los ensayos TGA. En los resultados de estos termogramas (Figura 7) se acredita una reducción de masa de un 0,5 % en el rango de temperatura señalado de 0 a 100 °C,

asociándose ésta al proceso de descere en esta investigación. Seguidamente, hasta 300 °C la cera roja muestra una estabilidad remarcable (3,25 %) en comparación con la siguiente horquilla de temperatura donde pierde el 95 % de su masa hasta los 600°C.

El conocimiento de la resistencia a la volatilización de la cera -según la temperatura- se empleó para alargar el tiempo de mantenimiento en las temperaturas que indica el termograma con la exposición microondas buscando eliminar cualquier

resto de ésta. La Tabla 2 indica los porcentajes TGA obtenidos en cinco horquillas de temperatura. Este análisis termogravimétrico de la cera roja no se encuentra reportado en la literatura de joyería fundida y resulta de interés para la investigación relacionada con la eliminación de cera en moldes cerámicos.

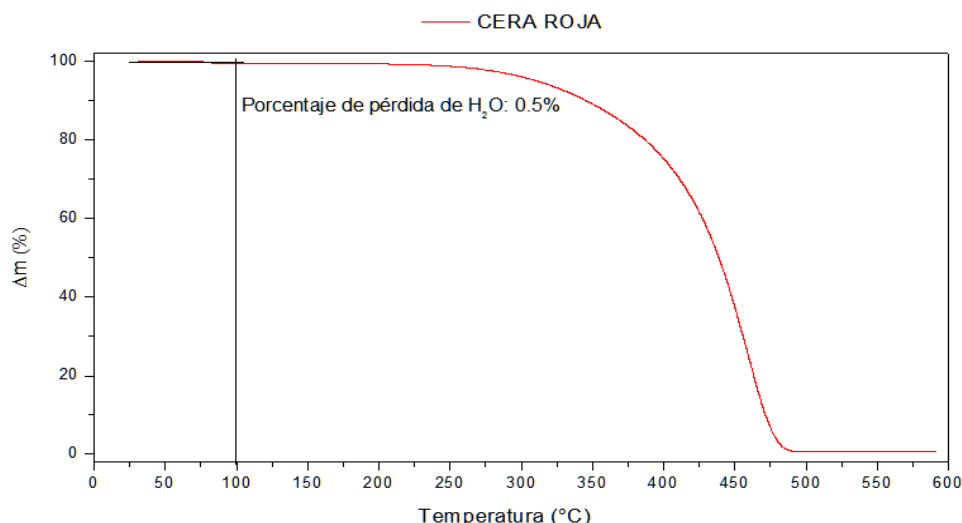


Figura 7. Ensayo TGA de cera sintética roja de modelar Iberceras 1950 en un rango de temperatura de 0 a 600 °C.

Tabla 2. Estabilidad térmica de la cera sintética de modelar Iberceras 1950 en cinco etapas de calentamiento

Muestra	Pérdida de peso (%)				Total
	25-100°C	100-200°C	200-300°C	300-600°C	
Cera Roja	0.50	0.15	3.25	95.48	99.38

Para el diseño del tiempo y potencia microondas adecuado a la cocción de los moldes en la mufla MW se partió del programa de la figura 8, donde la temperatura fue registrada por una sonda termopar instalada dentro de la cavidad. Con la selección de esta meseta se alcanzan temperaturas progresivas mediante 4 escalones de 6 minutos con potencias de 100 W a 440 W y otros 2 escalones de 8 minutos de 600 W y 800 W para incidir entre los 280 °C y 470 °C, relacionadas con la volatilización de la

cera. El escalón de 18 minutos a 1000 W logra alcanzar los 700 °C. Temperatura ligada al objetivo de eliminar el agua química combinada en los revestimientos [12]. Seguidamente, para evitar la “avalancha térmica” en el suscepto, se reduce la potencia a 800 W y 600 W en 2 escalones de 8 minutos buscando una progresión de temperatura entre 700 °C y 600 °C, que es el rango adecuado para llevar a cabo la inyección del metal fundido, en este caso, latón.

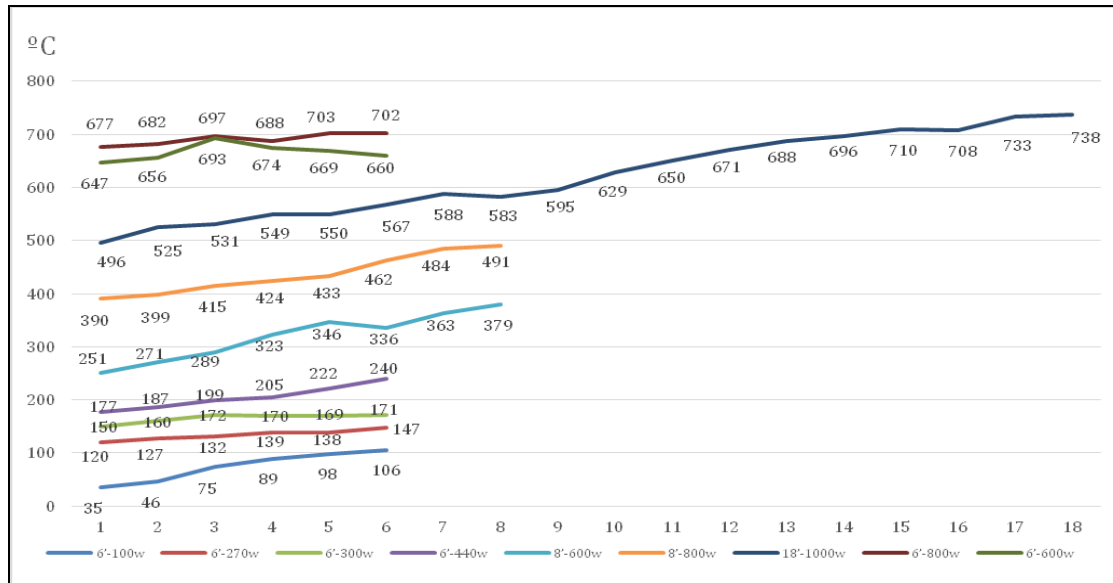


Figura 8. Registro de temperaturas de la meseta inicial en 5 muestras preliminares, formato C.M forma “A”.

A partir de la meseta indicada en la Figura 8, se buscó la más adecuada, prolongando el tiempo hasta conseguir que la transformación estructural de las pastas refractarias superara los indicadores (mostrados en la Tabla 3). Tal y como se observa en la columna “meseta” de esta tabla, el factor tiempo y potencia se ajustó a los indicadores estipulados en la metodología, como la ausencia de fisuras, la calidad del registro y el soporte termodinámico del molde. Concretamente la columna de “fisuras / filtraciones”, establece los datos más concluyentes para la determinación de una meseta adecuada en la obtención de un molde estructuralmente compacto que soporte las tensiones termodinámicas bajo la presión metalostática durante el centrifugado sin provocar movimientos dispares que generen grietas y desestabilice la integridad de mismo.

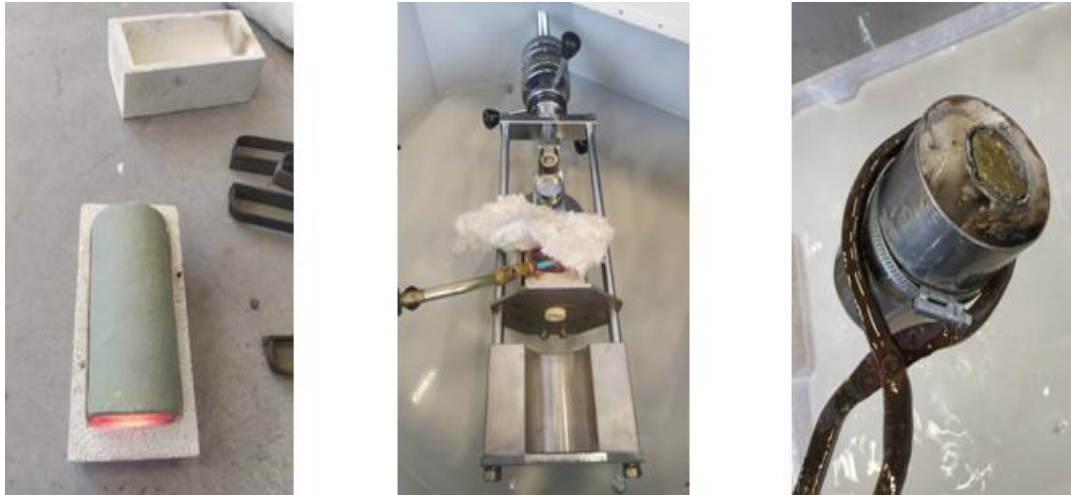
De las muestras A1 hasta A3, la presión ejercida durante el encamisado del encofrado de acero, necesario para operar en la máquina centrífuga, provocó que el molde se deteriorase y aparecieran fisuras graves que comprometen la fundición. A partir de la muestra A4, se precalentó el encofrado de acero para detectar si un posible choque térmico fuera el causante de estas fisuras, medida que minimizó su aparición, pero no supuso una solución determinante. Dado que el daño se

produjo durante la manipulación del molde desde la mufla susceptible al encamisado de acero, necesario para el aparato centrífuga, se optó por reforzarlo. Para ello, se incluyó en la mezcla de la elaboración de la pasta, tejido de vidrio como material preventivo. Esta solución resultó eficaz para dar continuidad a la investigación, concediendo resistencia y seguridad al resto de los moldes.

Estando dentro de los parámetros de temperatura requerida, pero no habiendo logrado los objetivos, se prolongaron las mesetas hasta mitigar los inconvenientes mencionados. El programa 6’ 100 W-6’270 W-6’ 300 W-6’440 W -8’600 W-10’800 W-25’1000 W-12’800 W-10’1000 W aplicado a partir de la muestra A8 (C.M) resultó eficaz tal y como demuestran los indicadores representados en la Tabla 3. Lo verifican las muestras comprendidas entre la A9 y hasta la A13 (Figuras 9, 10 y 11 que ilustran el proceso mencionado) donde se obtuvieron moldes compactos capaces de soportar la fuerza centrífuga, dando como resultado fundiciones con alta calidad de registro, (véase columna de “calidad de registro del molde” en la Tabla 3). Se estableció, de esta forma como adecuada, la meseta que tiene una duración total de 1h 29 min para figuras de 75 g de latón.

Tabla 3. Resultados de muestras de árbol jirafas “A” (encofrado CM.).

Nº muestra	Meseta (100 w-270w- 300w-440w-600w- 800w-1000w- 800w-600w)	Fisuras / Filtraciones	Zonas grises	Fundición	Calidad de registro del molde	Encofrado utilizado
A1	6'-6'-6'-6'-8'-8'- 18'-6'-6'	si/si	si	no	no	acero
A2	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 18'-10'-6'	si/si	si	no	no	acero
A3	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 18'-12'-6'	si/si	si	no	no	acero precalentado
A4	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 20'-12'-6'	si/si	si	no	no	acero precalentado
A5	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 20'-12'-8'	si/si	si	no	no	acero precalentado
A6	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 20'-12'-8'	no/si	si	incompleta	bajo (con texturas no deseadas)	fibra de vidrio + acero precalentado
A7	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 22'-12'-8'	no/si	leves	completa	medio (con filtraciones de metal)	fibra de vidrio + acero precalentado
A8	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 25'-12'-10'	no/si	leves	incompleta	medio (con zonas incompletas)	tejido de vidrio + acero precalentado
A9	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 25'-12'-10'	no/no	no	completa	alto	tejido de vidrio + acero precalentado
A10	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 25'-12'-10'	no/no	no	completa	alto	tejido de vidrio + acero precalentado
A11	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 25'-12'-10'	no/no	leves	completa	alto	tejido de vidrio + acero precalentado
A12	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 25'-12'-10'	no/no	no	completa	alto	tejido de vidrio + acero precalentado
A13	6'-6'-6'-6'-8'-10'- 25'-12'-10'	no/no	no	completa	alto	tejido de vidrio + acero precalentado



Figs. 9, 10 y 11 (De izq. a dcha.): Máquina centrífuga utilizada, enfriamiento en agua tras la colada, cilindro de acero con el árbol de fundición en latón de la muestra A9.

Tabla 4. Árbol de jirafas “B” encofrado (C.G).

Nº muestra	Meseta (100w-270w- 300w-440w- 600w-800w- 1000w-800w- 600w)	Fisuras / Filtraciones	Zonas grises	Fundición	Calidad de registro del molde	Encofrado
B1	6°-6°-6°-6°- 8°- 10°-25°-12°-10°	si/no	si	no posible	fisurada	tejido de vidrio + acero precalentado
B2	6°-6°-6°-6°- 8°- 10°-28°-12°-10°	no/si	si	incompleta	medio	tejido de vidrio + acero precalentado
B3	6°-6°-6°-6°- 8°- 12°-30°-12°-10°	no/si	si	incompleta	medio	tejido de vidrio + acero precalentado
B4	6°-6°-6°-6°-10°- 15°-30°-12°-10°	no/si	si	incompleta	medio	tejido de vidrio + acero precalentado
B5	6°-6°-6°-6°- 10°- 15°-35°-15°-10°	no/no	no	incompleta	medio	tejido de vidrio + acero precalentado
B6	6°-6°-6°-6°-10°- 15°-38°-15°-10°	no/no	si	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado
B7	6°-6°-6°-6°-10°- 15°-38°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado
B8	6°-6°-6°-6°-10°- 15°-38°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado
B9	6°-6°-6°-6°-10°- 15°-38°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado
B10	6°-6°-6°-6°-10°- 15°-38°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado
B11	6°-6°-6°-6°-10°- 15°-38°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado

Tabla 5. Árbol de jirafas “C” encofrado (C.E).

Nº muestra	Meseta (100w-270w-300w-440w-600w-800w-1000w-800w-600w)	Fisuras / Filtraciones	Zonas grises	Fundición	Calidad de registro del molde	Encofrado
C1	6°-6°-6°-6°-10°-15°-38°-15°-10°	no/no	leves	incompleta	medio	tejido de vidrio + acero precalentado
C2	x	Desechada	durante	el	descere	x
C3	6°-6°-6°-6°-10°-15°-40°-15°-10°	no/si	leves	completa	medio	tejido de vidrio + acero precalentado
C4	6°-6°-6°-6°-10°-15°-43°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	tejido de vidrio + acero precalentado
C5	6°-6°-6°-6°-10°-15°-43°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	tejido de vidrio + acero precalentado
C6	6°-6°-6°-6°-10°-15°-43°-10°-10°	no/no	si	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado
C7	6°-6°-6°-6°-15°-25°-43°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado
C8	6°-6°-6°-6°-15°-25°-43°-15°-10°	no/no	no	completa	alto	fibra de vidrio + acero precalentado



Figura 12. Comparativa de registro superficial del modelo de cera y su reproducción en latón de una “cabeza” perteneciente al árbol de jirafas “C8”.

Partiendo de los resultados anteriores, se sometieron al mismo procedimiento las muestras forma “B” (encofrado C.G). El calibrado de la irradiación microondas a un formato superior se fundamentó en detectar fisuras y zonas grisáceas en

el refractario por una aplicación MW demasiado corta para el formato. El tiempo necesario para este cometido se estableció con el programa 6°100 W-6°270 W-6°300 W-6°440 W-10°600 W-15°800 W-38°1000 W-15°800 W-10°600 W, cuya duración total

es de 1h52 min. Esta meseta fue verificada sobre 6 muestras (B6-B11) de 120 g de latón con una calidad de registro fiel a los modelos de cera (Tabla 4).

La meseta para el formato de encofrado C.E se estableció en 117' de exposición. La similitud con el tamaño anterior permitió obtener el objetivo a partir de la muestra C4 hasta la C8, descartando únicamente las 3 primeras unidades del grupo (Tabla 5).

Tal y como se aprecia en la Figura 12, *cabeza jirafa* perteneciente al árbol jirafas C8, se obtuvo una calidad de registro fiel al modelo primitivo de cera. Una vez resueltos los aspectos técnicos requeridos en la adaptación microondas para el primer formato (C.M) se demostró en los formatos siguientes (C.G y C.E) que la capacidad de la mufla utilizada era apta para todos ellos, debiendo únicamente ajustar el tiempo de exposición al tamaño de los moldes.

Las mesetas aplicadas en los dos procesos térmicos MW, es decir descere y cocción de las pastas, mostraron tener una continuidad adecuada para imitar el proceso al completo, sin detección de enfriamiento en los negativos. Al finalizar la fase de descere se calculó una temperatura media de 112 °C en todos los negativos, temperatura cercana a la registrada al finalizar el primer escalón de 100 W durante 6' en el interior de la mufla MW, donde se registró una temperatura media de 106 °C. La sincronía entre ambas temperaturas permitió compatibilizar las operaciones sin perjuicios para el molde. Este ajuste entre ambos procesos se considera crucial para no registrar fisuras graves y poder seguir con la cocción de la pasta.

Los resultados del ensayo verifican las mesetas de aplicación como adecuadas para diseñar el calentamiento gradual en tres formatos distintos de molde, llevando a cabo 45 desceres con éxito y recuperando el 99% de la cera sin desperfectos en los negativos. Concretamente, los programas efectivos para los formatos especificados bajo la denominación A, han sido: 25'(105 W), 8' (210 W), 6' (350 W); para las piezas B: 30'(105 W), 15' (210 W), 10' (350 W) 5'(525 W) y C: 30'(105 W), 15' (210 W), 10' (350 W), 5'(525 W), 5' (700 W). Comprendiendo para el descere de los tres formatos (A, B o C), el tiempo mínimo necesario es la horquilla de 39' a 65'. La eficacia óptima se asocia a la humedad característica contenida tras el fraguado del yeso refractario. Por otro lado, una

vez deshidratado el molde, el proceso térmico se completó con la mufla MW que permitió elevar la temperatura hasta la cocción gracias al excelente calentamiento del susceptor y su conveniente aislamiento. Por tanto, se genera un diseño de conductividad térmica controlada, situada en esta investigación en valores temporales de entre 89' y 117' según los formatos. La solución empleada con el uso de tejido de fibra de vidrio ha subsanado el inconveniente acontecido por la incompatibilidad de las microondas con el encofrado de acero, resultando eficaz como encofrado permanente para ambas etapas de procesado MW. Los 15 ejemplares de latón obtenidos están ligados a programas MW de corta duración para árboles de fundición de entre 75 g y 185 g. El cómputo de ambas, descere y cocción acredita una reducción comparable a los resultados obtenidos en investigaciones aplicadas a procesos de secado y sinterizado por microondas.

4. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en esta investigación, el proceso de descere de revestimientos refractarios empleados en joyería fundida a la cera perdida tiene una efectividad óptima con tecnología microondas debiéndose ajustar la potencia de irradiación al volumen de los moldes. La eficacia microondas en las operaciones de secado genera sincronías con el objetivo de descere en la técnica a la cera perdida. El efecto de evaporación de agua produce el derretimiento del árbol de cera sin combustión obteniendo una recuperación del 99% de la misma. Dato relevante en la aportación de esta alternativa, ya que en los procesos tradicionales se quema casi el total de la cera o en ocasiones de recupera del 30 al 40%. Los programas microondas empleados en este estudio han conseguido valores óptimos para la integridad de las muestras en el mínimo tiempo necesario. No obstante, desarrollada la deshidratación de las pastas, en esta primera etapa de descerado, se pierden exponencialmente sus propiedades dieléctricas, comportándose estos moldes como una cerámica transparente a las microondas. Sin embargo, con el empleo de la mufla susceptora diseñada y construida en esta investigación se ha logrado completar el tratamiento térmico hasta su cocción superando los 700 °C, con una potencia microondas convencional. La calidad de la cocción por microondas ha resultado adecuada para culminar el proceso con la fundición, siendo evaluada mecánicamente inyectando metal

con fuerza centrífuga. Este sometimiento térmico confirma una estructura compacta en los negativos, condición necesaria para garantizar la circulación del metal en la técnica de joyería, dado que se precisa reproducir geometrías con secciones de metal ínfimas y detalles superficiales muy sutiles. Finalizada la investigación, se determina una reducción temporal del 66 % en confrontación con el tiempo de procesado que se emplearía con una mufla eléctrica. Los resultados mencionados mejoran la accesibilidad de la fundición artística contribuyendo a la reducción de infraestructuras, tiempos, costes y emisión de agentes nocivos en los talleres profesionales y docentes del sector.

5. AGRADECIMIENTOS

Los equipos utilizados en este trabajo fueron financiados por el Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia en torno a dos proyectos en esta línea “Alternativas al descere en la fundición de cascarilla cerámica (ceramic shell casting): técnica por microondas”, HAR2010-17570 (Fecha inicio 01/01/2011 - finalización: 30/04/2014) y “Alternativas al descere en la Fundición de cascarilla cerámica (ceramic shell casting): Técnica por microondas (II)”, referencia: HAR2016-77203-P (Fecha inicio 30/12/2016 - finalización: 29/12/2019). Los ensayos se realizaron en colaboración con el Servicio de Caracterización de la Universidad de Sevilla dentro del *VI Plan Propio de Investigación y Transferencia* mediante la obtención de ayudas para el uso de los Servicios Generales de Investigación (Referencia: VIPPIT-2021-I.5). Especialmente, se agradece al catedrático Juan Carlos Albaladejo, como investigador principal del proyecto inicial y pionero en la investigación en torno a la inclusión de la tecnología microondas en la fundición artística.

6. REFERENCIAS

- [1]. Groover. Fundamentos de manufactura moderna. México, 1997, p. 243.
- [2]. Corredor Martínez J. Técnicas de fundición artística, Universidad de Granada, 1997.
- [3]. Benavente Martínez R. Desarrollo de materiales cerámicos avanzados con altas prestaciones mediante técnicas no convencionales de sinterización: microondas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2015
- [4]. Cárdenas C, Restrepo R, García-Sucerquia J, Marin J, García C. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 2009; S1(1): 427-432.
- [5]. Menéndez Díaz JA, Hernández Moreno AS, “Secado industrial con energía microondas”. En: Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas, 2017. Ecuador. Ed. Universidad Técnica de Cotopaxi, p. 315.
- [6]. Moreno Candel F, Pérez Conesa I, Acosta F, Aguilar JA, ArDin, Revista de Arte, Diseño e Ingeniería, 2021; 10: 217-237
- [7]. Pérez Conesa I. Técnica del descere por microondas: identificación, cuantificación y valoración de los susceptores, Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2017.
- [8]. Segura de Jesús Y, Carvajal G. Revista de Innovación Sistemática. 2017; 1 (2): 46-56
- [9]. Chhillar P, Agrawal D, Adair JH. Powder Metallurgy. 2008; 51(2): 182-187.
- [10]. Jayavabushana V, Shashank K, Venkatesh, Gayathri R. European Journal of Molecular & Clinical Medicine, 2020; 7: 1668-1672
- [11]. Moreno F, Acosta F, Pérez-Conesa I, Aguilar JA. Revista Bellas Artes, 2021; 15: 89-107.
- [12]. Alsina Benavente J, La fundición a la cera perdida: Microfundición, Barcelona: Alsina, 1992. p. 286.

7. MINIBIOGRAFÍA DE AUTORES



FRANCISCO MORENO CANDELA está finalizando su doctorado en Arte y Humanidades en la Universidad de La Laguna dirigido por Fátima Acosta, Itahisa Pérez y José Antonio Aguilar donde, además, colabora en tareas docentes y de investigación. Realizó un máster de Profesorado en la misma universidad, ha trabajado como profesor en enseñanzas medias 2017-2019. Desde que se licenció en Bellas Artes por la Universidad Politécnica de Valencia en 2014, ha orientado su trabajo a la investigación de materiales escultóricos

(ORCID: 0000-0001-5275-2982).



ITAHISA PÉREZ CONESA. Docente e investigadora de La Universidad de La Laguna desde 2017. Doctorado dirigido por Juan Carlos Albaladejo, Soledad del Pino y José Fayos. Su actividad investigadora se fundamenta en la innovación de procesos en torno a la Fundación Artística. Forma parte del grupo de investigación TCFER. Trabaja en la producción y divulgación científica. Ha formado parte de los proyectos Alternativas al descere en la fundición de cascarilla cerámica (CERAMIC SHELL...): Técnica por microondas (I) y (II) (HAR2016-77203-P).

(ORCID: 0000-0003-4267-4903).



FÁTIMA FELISA ACOSTA HERNÁNDEZ. Docente e investigadora de La Universidad de La Laguna desde 1990. Recibió su doctorado en 1995 bajo la dirección del Profesor D. Jose M^a Herrero Gómez. Becada para cursar estudios en el Instituto Superior de Amberes, Bélgica, (1989-1992). Es Profesora Titular desde 1997. Es la investigadora principal del Proyecto Alternativas al descere en la fundición de cascarilla cerámica (CERAMIC SHELL CASTING): Técnica por microondas (II) Referencia: HAR2016-77203-P.

(ORCID: 0000-0003-3573-9967).



JOSE ANTONIO AGUILAR GALEA. Docente e investigador y actual vicedecano de La Universidad de Sevilla desde 1995. Doctorado en 2001 bajo la dirección del D. Olegario Martín Sánchez. Investigador principal de Grupo de Cooperación US: "Arte y Desarrollo". Trabaja investigando entorno a la fundición es muy dilatada. Cuenta con numerosas publicaciones y forma parte del grupo de investigación Proyecto Alternativas al descere en la fundición de cascarilla cerámica (CERAMIC SHELL CASTING): Técnica por microondas (II) Referencia: HAR2016-77203-P.

(ORCID: 0000-0002-1966-6190).