

FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA: CELLINI Y LA MAGNETITA

Juan Carlos Albaladejo González e Iván Rodríguez González
Universidad de La Laguna

RESUMEN

Trabajo de investigación del Departamento de Pintura y Escultura de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de La Laguna, dentro del programa de doctorado «Materiales, técnicas y procedimientos en la Plástica y el Diseño», y que se encuentra adscrito a la línea de investigación «Medios de Control Térmico en la Microfusión», dirigida por Juan Carlos Albaladejo, catedrático de Escultura de esta facultad. En esta experimentación se ha desarrollado, en modo de pruebas, un sistema de descere alternativo para moldes de cascarilla cerámica de tamaño pequeño y medio (microfusión), basado en el uso de la magnetita como molécula bipolar y su reacción magnetocalórica a la radiación producida por un horno microondas convencional. Los objetivos de la investigación se orientan hacia la necesidad de simplificar cada vez más los distintos procesos de fundición artística en los talleres de bellas artes y en los pequeños talleres particulares.

PALABRAS CLAVE: microfusión, magnetita, horno microondas, cascarilla cerámica, Bellas Artes.

ABSTRACT

«Lost Wax Casting: Cellini and Magnetite». Research project by the Painting and Sculpture Department of the La Laguna University Fine Arts Faculty, as part of the PhD programme on «Plastics and Design Materials, Techniques and Procedures», attached to the research on «Means of Thermal Control during Microfusion», directed by Juan Carlos Albaladejo, the faculty's Professor of Sculpture. The project has developed a test module for an alternative de-waxing system for small and medium-sized ceramic shell moulds (microfusion), based on using magnetite as a bipolar molecule and its magnetocaloric reaction to radiation produced by a conventional microwave oven. The objective of the research is to find simpler solutions for the various artistic casting processes used in fine arts studios and small private workshops.

KEY WORDS: Microfusion, Magnetite, Microwave Oven, Ceramic Shell, Fine Arts.

1. INTRODUCCIÓN

Fundir a la cera perdida, en cualquiera de sus técnicas, supone el perder la cera de la forma más eficaz posible. Todo lo demás son problemas comunes a cualquier tipo de fundición. Eso que le caracteriza es lo que le enuncia. Un proceso anti-



guo y variado que encontramos en culturas distantes con técnicas distantes. También o por el contrario asombrosamente parecidas, y todas tratarán, a su manera, de colar metal fundido en una cavidad donde antes había un modelo de cera. Si esa cavidad alojara la más mínima partícula de humedad, el contacto con el metal caliente produciría una gasificación tan violenta que destruiría todo el negativo, por no hablar del fundidor. Si lo que se encuentra el metal es cera, la gasificación de ésta, al ser combustible, incrementaría el efecto devastador. Esto lo sabemos todos y es por ello que empleamos tiempo y energía en asegurar que un molde esté bien «quemado».

Ni que decir tiene que el fuego y luego la electricidad se ocuparon de esta tarea. En la técnica Italiana o de la Chamota se llega a la perfección técnica. Podremos fundir más rápido o más barato, pero no mejor, y aunque no fundimos como Cellini, sí «quemamos» como Cellini. Se ha avanzado mucho en cuanto a la fusión del metal desde el horno de reverbero renacentista hasta los hornos de Inducción, pasando por crisoles, quemadores, resistencias eléctricas, etc. Pero una mufla sigue siendo una mufla. Claro que han mejorado en diseño y economía, pero leña o electricidad, gas o gasoil, el concepto de quemada sigue siendo el mismo. Esto es, meter un molde refractario en un horno, subir lentamente la temperatura en una curva cuidadosamente controlada, y esperar que primero el agua y luego la cera hayan desaparecido por completo. Así fue siempre y así es ahora, aunque en los últimos veinte años ha irrumpido un nuevo tipo de molde y su técnica correspondiente. La «Ceramic Shell Casting» o Cascarilla Cerámica.

Desde luego es un molde cerámico, y eso es muy antiguo, pero es una cerámica muy especial. El Cardón es una planta endémica canaria que vive como un cactus, tiene forma de cactus y pinchos de cactus, pero no es un cactus. Sólo lo imita. La cascarilla cerámica tiene forma, material y constitución cerámica, pero no es una cerámica, sino un híbrido final entre cerámica y vidrio.

Sería largo y fuera de lugar explicar la Técnica de la Cascarilla, pero es pertinente decir que si tratáramos el molde de la misma manera que al resto de los moldes que en el mundo son y han sido, seguramente encontraríamos un montón de escombros allí donde pusimos un molde perfectamente construido.

Siempre supimos que la expansión de la cera rompe irremisiblemente un molde que no está sinterizado, siendo apenas un aglomerado de refractario seco y apelmazado por la acción de diminutas partículas de sílice. Si partimos de un horno frío en curva ascendente, como parece ser lo evidente, nos encontramos el efecto expansivo de la cera sin que la cáscara haya todavía modificado lo más mínimo su estructura y resistencia. Por esta razón el descere no industrial de la cascarilla cerámica se hace por un procedimiento simple pero eficaz: el Choque Térmico o Flash Dewaxing.

En los últimos tiempos se le viene perdiendo el miedo a esta nueva técnica, experimentando y adaptándola cada cual a su propia medida. Y esto es bueno. Muy bueno, aunque se corre ciertos riesgos. El primero es equivocarse, y esto es consustancial a la investigación, así que es un buen riesgo. Pero hay otro que no es tan bueno y es el de enmascarar la verdad con resultados aparentemente correctos.

Es posible descere una cascarilla cerámica en un horno convencional, de frío a curva ascendente sin que el molde se rompa. Ya está, lo he dicho, pero tam-



bién diré que esto es a costa de eliminar o alterar gran parte de las características del molde de cascarilla.

Es evidente que si aumentamos el grosor del molde, también aumentaremos su resistencia a la expansión de la cera, y además esta expansión podremos disminuirla disminuyendo también la sección de la cera. Así que alterando la proporción sección molde-sección cera podremos descerear en cualquier horno cerámico. Pero habremos disminuido la porosidad del molde e incrementado el riesgo de rechupes. Aunque nada de esto es determinante para un tamaño medio, sí algo más inquietante en piezas pequeñas, y funesto en microfusión.

La microfusión de cascarilla cerámica no es la mejor de las opciones para joyería, pero es muy útil en determinados casos y, desde luego, la única posible para la mayoría de nosotros por su rapidez y economía. Mantener un equipo convencional de microfusión sólo compensaría en talleres industriales.

Durante mucho tiempo hemos tratado de perfeccionar y minimizar los inconvenientes de la microfusión de cascarilla. Uno de estos inconvenientes, el principal, es la enorme dureza del molde respecto a las piezas coladas. De nada sirve conseguir secciones ínfimas de metal si se rompen al descascarillar. Algo muy frustrante.

Podemos debilitar la cascarilla de dos maneras. Aumentando la concentración de sílice en la solución coloidal o disminuyendo el número de baños, con lo que haremos un molde más delgado. La primera solución no es buena, pues a la fragilidad estructural añadiremos una enorme pérdida de porosidad y con ello tendremos que aumentar la sección de la pieza. Perdemos lo que por otro lado supuestamente ganamos. La segunda solución es la correcta. Si eliminamos grosor sin modificar la proporción del coloide (30%) conservamos la dureza estructural y disminuimos la resistencia mecánica en el descascarillado. Solucionado. Pues me temo que no, porque no se habrá aumentado considerablemente la porosidad, y aunque esto mejora la colada y posibilita secciones mínimas, también aumentará la oxidación. La oxidación es la principal causa de «enganche» en el descascarillado. Una pesadilla para superficies texturizadas.

Desde hace tiempo llevamos trabajando en este problema con una línea de dos frentes. Conseguir una mezcla reductora para la capa de registro y que a la vez sea refractaria y blanda. Esto lo logramos a base de una «papilla» de grafito y talco, con lo que mejoramos considerablemente los resultados (fig. 1).

Sin embargo seguimos descereando por choque térmico. Y más nos vale, porque con cáscaras de apenas un baño, es desastroso en el 100% de las pruebas calentadas en curva.

David Reid tiene un sistema experimental de microfusión con microondas. Se basa en la capacidad de absorción de la magnetita a las microondas. Incorporando magnetita a la composición del molde consigue calentarlo lo suficiente para fundir pequeñas piezas de plata en un horno microondas doméstico.

Nuestro problema seguía siendo el descere sin humos, fuegos ni sobresaltos y tras desechar la experimentación con un pequeño autoclave, decidimos probar la magnetita. Es evidente que podía calentar un molde y descerear su contenido, pero tenía que hacerlo muy rápidamente. Sólo la superficie de contacto de la cera debía



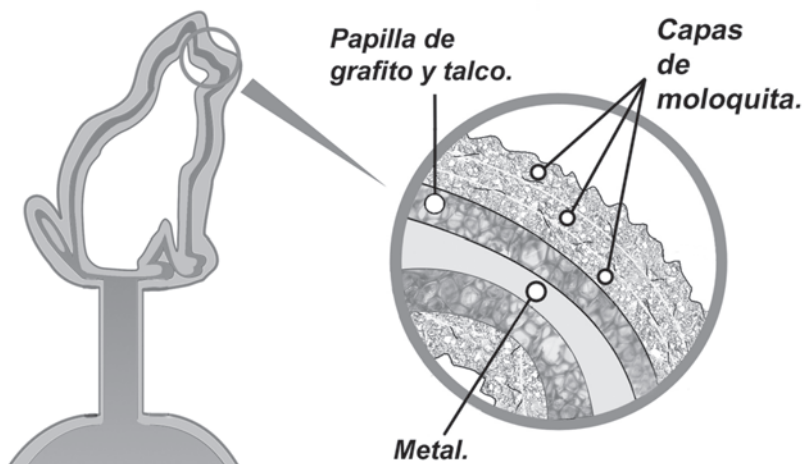


Figura 1.

licuarse para con ello dejar una junta de dilatación segura para la expansión posterior de la cera.

El resultado final es que se puede descerear en un horno microondas doméstico con total seguridad, sin llama ni humos, y recuperando la totalidad de la cera.

Éstas son, a grandes rasgos, las pautas de nuestra experimentación

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL DESCERE POR MICROONDAS

Al utilizar un horno microondas convencional los alimentos se calientan gracias a que las microondas excitan las moléculas de agua que son las que, por conducción, producen el calor. Esta reacción o acumulación de calor se produce de manera progresiva, ya que si bien es posible gracias a la naturaleza magnética de la molécula de agua, ésta no es suficientemente potente para provocar un aumento de temperatura inmediato. Por ello, si queremos calentar un alimento hasta una temperatura determinada, debemos contar con el factor tiempo.

Si introducimos un material de naturaleza orgánica como es la cera, conseguiremos derretirla gracias a las moléculas de agua que posee. Debemos observar que un cilindro de cera de 10 cm de altura, 2,5 cm de diámetro y 40 grs de peso, colocado perpendicularmente a la cavidad de horneado, tarda 24 min en derretirse por completo a la máxima potencia, y lo hace comenzando siempre por la parte superior (fig. 2)

El descere con microondas no es posible utilizando el procedimiento de la cascarilla cerámica tal y como hasta ahora se viene realizando, ya que al calentarse la cera de manera gradual y heterogénea, el aumento de volumen de la cera acaba por

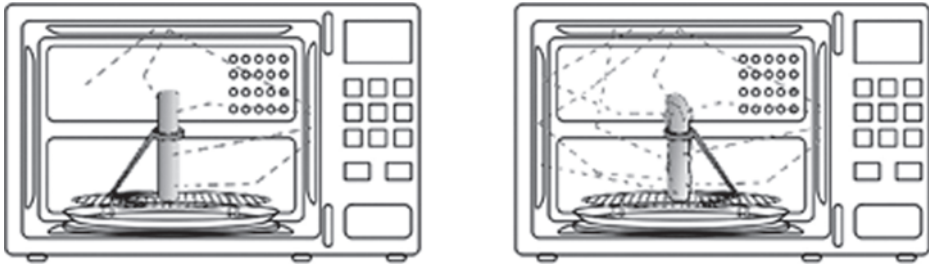


Figura 2.

quebrar el molde cerámico. Esto ocurre porque los componentes del molde, al ser cerámicos, no se ven afectados por las microondas, siendo la capa superficial de cera la que las recibe (fig. 3).

La magnetita y la pirrotita son los únicos minerales corrientes atraídos por un pequeño imán de bolsillo. Se consideran ferromagnéticas aquellas sustancias fuertemente susceptibles a los campos magnéticos transformándose en verdaderos imanes inducidos. Como ejemplos se citan el hierro, cobalto o el níquel. Según la aleación considerada y el tipo de campo magnético exterior aplicado, la imantación provocada será temporal (aleaciones ferromagnéticas blandas) o permanente (aleaciones ferromagnéticas duras).

Los materiales ferromagnéticos, como la magnetita, tienen la propiedad de reaccionar a las radiaciones magnéticas. *Basándonos en esto y en la forma en que*

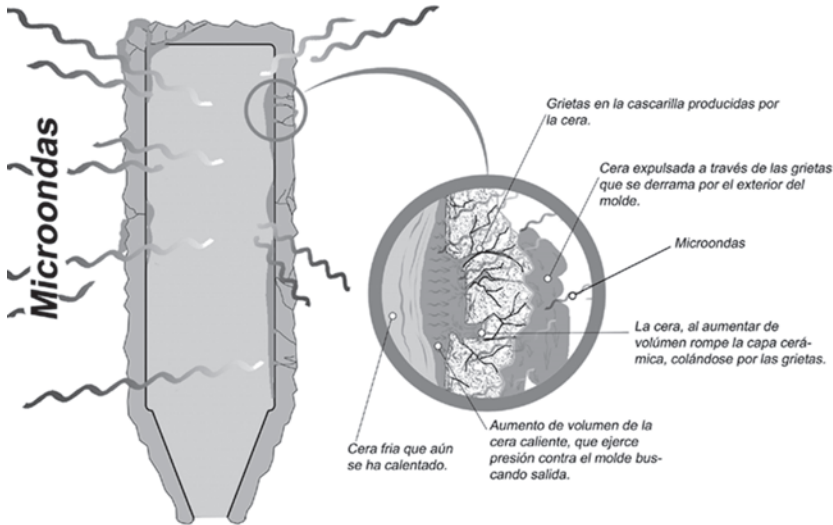


Figura 3.

tienen de calentar los alimentos las microondas, podemos suponer que, de igual manera que se excitan las moléculas bipolares de agua, una molécula de similares características, como la de magnetita, reaccionará de igual manera. Si, además, esta molécula tiene un mayor potencial magnético, el calentamiento y la conducción serán proporcionalmente mayores.

La fundición a la cascarilla cerámica permite incidir directa e independientemente en la composición de cada una de las capas que conforman el molde, por lo que se convierte en el procedimiento perfecto para incorporar una sustancia que haga las veces de molécula bipolar. Además, el uso del sílice coloidal como aglutinante y elemento imprescindible en la cocción de estos moldes cerámicos, nos proporciona un entorno favorecedor para el estudio de la magnetita y sus reacciones. Como es obvio, no es el caso de trabajar a escala molecular, pero sí nos es posible investigar con productos industriales de tamaños ínfimos, cercanos a la molécula, en este caso, magnetita en polvo <5 micras.

Añadiendo magnetita en polvo a la primera capa del molde de moloquita conseguiremos que esta capa se caliente gradualmente pero mucho más rápido que las moléculas de agua de la cera. Además, al ser un material muy conductor, todo el recubrimiento de magnetita se calienta de manera uniforme y en un periodo de tiempo muy corto.

De esta manera se consigue un efecto muy parecido al que se produce en el descere rápido (ing. *flash dewaxing*), bruscamente se ha calentado toda la superficie de la cera, y lo ha hecho lo suficiente para que comience a derretirse y a vaciarse por la boca del molde, evitando así su rotura. Además, el calor irradiado por la capa de magnetita contribuye a la deshidratación del molde.

3. DESCERE POR MICROONDAS

Tomemos como ejemplo un cilindro de cera de iguales características a las citadas anteriormente, seccionado en su parte inferior a modo de estrangulamiento, al que se le ha aplicado un recubrimiento en la primera capa compuesto íntegramente de magnetita aglutinada con sílice coloidal y posteriormente las capas normales de moloquita (fig. 4).

Tras introducirlo en el horno microondas y aplicarle la máxima potencia, tarda 20 segundos en comenzar a gotear cera por la parte inferior, y sólo 2 minutos en vaciarse por completo. Respecto a las mediciones realizadas con el cilindro de cera sin recubrimiento alguno es fácil observar un descenso considerable en cuanto al tiempo transcurrido tanto en comenzar a gotear cera (2'15 min en el caso del primero), como en el tiempo total de fusión del cilindro. La desaparición de la cera se comprueba pesando el cilindro antes y después del descere, confirmando que ha perdido 39'69 gramos de cera, es decir, un 99'22%. El 0'78% de cera restante permanece impregnada en el molde, llegando incluso a «supurar» hasta el exterior produciendo zonas ennegrecidas al aumentar la temperatura del molde.

La diferencia en cuanto al tiempo en que tarda en derretirse por completo la misma cantidad de cera en un caso y en otro se explica por el rápido calentamiento





Figura 4.

to de la magnetita y por el calentamiento del molde. El recubrimiento de magnetita acumula las microondas y despidе calor en ambas direcciones; es decir, calienta tanto el molde como la superficie de la cera, a la misma velocidad y de manera simultánea. Las propiedades refractarias de los componentes del molde favorecen la acumulación del calor y por lo tanto potencian el descere.

Ésta es la principal característica del recubrimiento de magnetita. Las microondas, aunque comiencen a incidir sólo sobre una parte del molde, afectan también al resto de la superficie del molde, ya que las partículas de magnetita transmiten la radiación entre ellas. Esta estupenda conductividad, unida al funcionamiento normal del horno microondas, permite que se derrita en muy poco tiempo y de manera homogénea toda la superficie de la cera, incluida la parte inferior del molde, por donde habrá de evacuarse.

Desde que una primera lámina superficial de cera comienza a derretirse, se precipita por el interior del molde hacia la zona de desagüe, cayendo primero en forma de gotas y luego en caudal a medida que aumenta la temperatura de la magnetita (fig. 5). Tras derretirse la superficie, el cilindro empieza a vaciarse de cera que, en bloque, va modificando su posición a medida que se derrite y aumenta la temperatura. Finalmente el cilindro se vacía de cera, quedando el molde de cascarilla cerámica aún sin cocer pero, gracias al calor aportado por la magnetita, suficientemente resistente a la manipulación. Las mediciones realizadas en cuanto a la tempe-

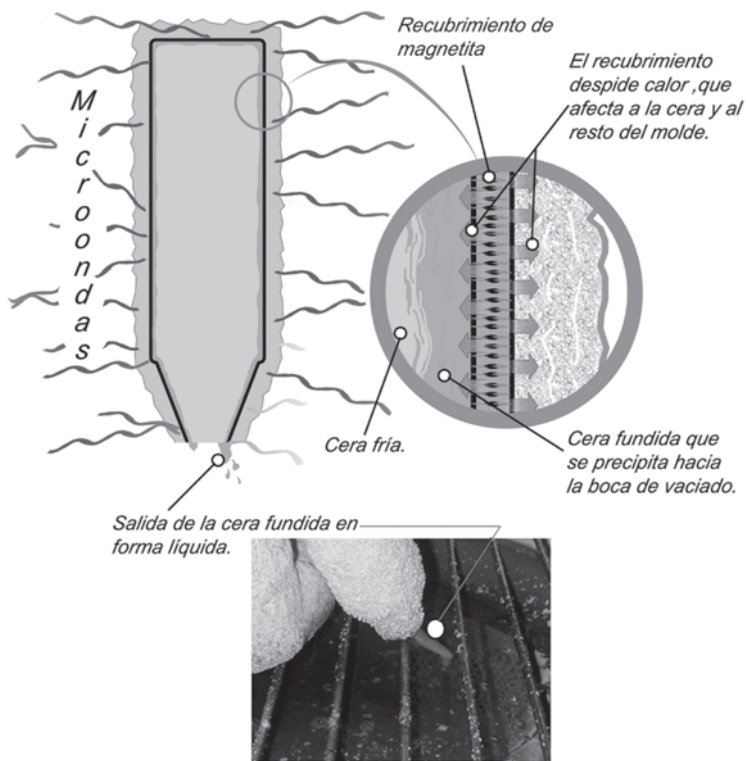


Figura 5.

ratura que alcanza el recubrimiento de magnetita desvelan unos picos de 450 a 500°C, manteniendo el cilindro durante 10 minutos a la máxima potencia en el interior del horno microondas.

4. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

Como ya hemos apuntado, la acotación de las cantidades mínimas necesarias de magnetita para que se produzca un descere correcto ha sido uno de los objetivos primordiales. También es propio llevar hasta sus últimas consecuencias el proceso completo de fundición, por lo que tras unas pruebas iniciales con pequeños cilindros, decidimos aplicar el sistema de descere a auténticos moldes de cascarilla cerámica destinados a la microfusión de bronce.

No introducimos ninguna modificación en el horno microondas, tan sólo lo proveemos de una bandeja para recoger la cera y la parrilla metálica especial para microondas que suministra el fabricante. Para sujetar las piezas verticalmente utilizamos un trípode de cascarilla cerámica, de manera que no se caliente y no influya en el descere (fig. 6).

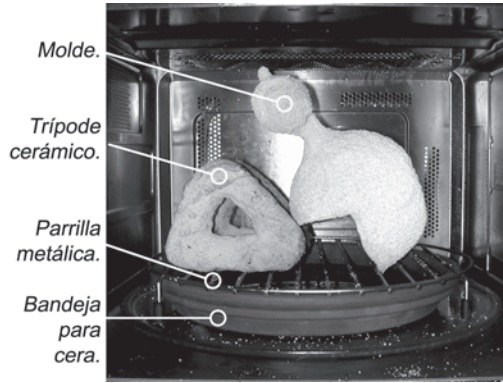


Figura 6.

En las pruebas iniciales aplicamos sobre la cera un primer recubrimiento de magnetita y sílice coloidal y, al igual que con los cilindros, las capas habituales de moloquita, consiguiendo descera en tan sólo tres minutos 105 gramos de cera sin que se produjeran grietas o fisuras en el molde.

Sin embargo, a la hora de la fundida y tras abrir los moldes, las pruebas presentaban una superficie horadada y con burbujeos del metal localizados (fig. 7).

La causa de este fenómeno la encontramos en la propia magnetita. Se trata de un óxido de hierro (Fe_3O_4) que llevamos hasta aproximadamente 1.150°C antes de verter sobre él bronce a la misma temperatura. Además, está en contacto con materiales cerámicos, como la moloquita, altamente refractarios y aglutinados con un potente fundente como es el sílice coloidal. La adición al recubrimiento de un material neutro y mal conductor del calor, a la vez que refractario, podría ser la clave para paliar el efecto burbujeo en el bronce, disminuyendo la proporción de magnetita en la mezcla hasta un límite que nos permitiese descera con seguridad.



Figura 7.

4.1. ADICIÓN DE CARGAS

La magnetita generalmente no tiene un coste excesivamente alto, unos 35 euros medio kilo, pero reduciendo al mínimo posible su uso conseguimos no sólo un considerable ahorro, sino que podemos dotar al recubrimiento de primera capa de otras características favorecedoras que además eviten los fenómenos vistos en las primeras pruebas.

Al ser el grafito y el talco materiales neutros ante la radiación de microondas, además de poseer partículas de tamaño similar al de la magnetita, los utilizaremos en nuestro recubrimiento. El talco actúa de carga, permitiéndonos disminuir la cantidad de magnetita, mientras que del grafito haremos uso desde el punto de vista de la conductividad eléctrica, ya que potenciará las propiedades de la magnetita en el descere, permitiéndonos también disminuir su cantidad en la mezcla.

Las pruebas se numeraron y realizaron siguiendo un esquema triaxial, a fin de normalizar las proporciones de cada componente, comenzando por la adición de talco y luego de grafito, para acabar con la realización de pruebas mixtas de los tres componentes.

4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la tabla I podemos observar un resumen de los resultados obtenidos durante las pruebas. Para cada una de las proporciones se completó una ficha que, acompañada de fotografías en detalle, contemplaba tanto aspectos relativos a la calidad del descere y al tiempo del mismo, como a los resultados en metal y la validez del registro en bronce. Estas fichas se ven reflejadas en la tabla mediante un sistema de símbolos, así como la numeración y las proporciones de cada mezcla.

La adición de talco al recubrimiento de magnetita repercute en una disminución sustancial de las propiedades de esta última. La mayoría de las pruebas se agrietaron o rompieron antes de comenzar a gotear, lo que indica un calentamiento heterogéneo y zonal, sin que se forme la junta de dilatación necesaria para que la cera se precipite hacia el exterior del molde. El descere fue correcto tan sólo a partir de un 80% de magnetita (prueba 221), comenzando el goteo al minuto de empezar a recibir microondas.

En lo que se refiere a la fundición del metal, se recuperaron aquellas piezas que menos se agrietaron (pruebas 126 a 210) a fin de valorar la capacidad de registro de cada proporción. La capacidad de registro del recubrimiento se ve poderosamente afectada a medida que se incrementa la cantidad de magnetita, observándose falta de definición en todos los vértices y cantos de las piezas así como burbujas importantes en algunas (fig. 8).

Observamos en estas pruebas con adición de talco algunos indicios que nos hacen pensar en una pérdida de porosidad de la cascarilla, que presenta brillos metálicos en su parte interna, así como correspondencias con las burbujas del metal (fig. 9) y descolgamientos del material.

Todas las pruebas con adición de grafito se han descerado sin ningún problema, observándose notables diferencias en los tiempos y en la apariencia externa



○	Sin Grietas
◐	Grietas en 25%
◑	Grietas en 50%
◒	Grietas en 75%
◓	Grietas en 100%

Sin Fundir

□	Sin fallos
◑	Fallos en 25%
◒	Fallos en 50%
◓	Fallos en 75%
■	Fallos en 100%

PRUEBA	MAGNETITA (%)	GRAFITO (%)	TALCO (%)	DESCERE	FUNDICIÓN
22	5	95		○	□
23	5	90	5	○	□
24	5	85	10	○	□
25	5	80	15	○	□
26	5	75	20	○	□
27	5	70	25	○	□
28	5	65	30	○	□
29	5	60	35	○	□
30	5	55	40	○	□
31	5	50	45	○	□
32	5	45	50	○	□
33	5	40	55	○	□
34	5	35	60	○	□
35	5	30	65	○	□
36	5	25	70	○	□
37	5	20	75	○	□
38	5	15	80	○	□
39	5	10	85	○	□
40	5	5	90	○	□
41	5		95	○	□

PRUEBA	MAGNETITA (%)	GRAFITO (%)	TALCO (%)	DESCERE	FUNDICIÓN
42	10	90		○	□
43	10	85	5	○	□
44	10	80	10	○	□
45	10	75	15	○	□
46	10	70	20	○	□
47	10	65	25	○	□
48	10	60	30	○	□
49	10	55	35	○	□
50	10	50	40	○	□
51	10	45	45	○	□
52	10	40	50	○	□
53	10	35	55	○	□
54	10	30	60	○	□
55	10	25	65	○	□
56	10	20	70	○	□
57	10	15	75	○	□
58	10	10	80	○	□
59	10	5	85	○	□
60	10		90	○	□
61	15	85		○	□

PRUEBA	MAGNETITA (%)	GRAFITO (%)	TALCO (%)	DESCERE	FUNDICIÓN
62	15	80	5	○	□
63	15	75	10	○	□
64	15	70	15	○	□
65	15	65	20	○	□
66	15	60	25	○	□
67	15	55	30	○	□
68	15	50	35	○	□
69	15	45	40	○	□
70	15	40	45	○	□
71	15	35	50	○	□
72	15	30	55	○	□
73	15	25	60	○	□
74	15	20	65	○	□
75	15	15	70	○	□
76	15	10	75	○	□
77	15	5	80	○	□
78	15		85	○	□
79	20	80		○	□
87	20	40	40	○	□
95	20		80	○	□
96	25	75		○	□
111	25		75	○	□
112	30	70		○	□
126	30		70	○	□
127	35	65		○	□
140	35		65	○	□
141	40	60		○	□

PRUEBA	MAGNETITA (%)	GRAFITO (%)	TALCO (%)	DESCERE	FUNDICIÓN
147	40	30	30	○	□
153	40		60	○	□
154	45	55		○	□
165	45		55	○	□
166	50	50		○	□
176	50		50	○	□
177	55	45		○	□
186	55		45	○	□
187	60	40		○	□
195	60		40	○	□
196	65	35		○	□
203	65		35	○	□
204	70	30		○	□
210	70		30	○	□
211	75	25		○	□
216	75		25	○	□
217	80	20		○	□
218	80	15	5	○	□
221	80		20	○	□
222	85	15		○	□
225	85		15	○	□
226	90	10		○	□
228	90		10	○	□
229	95	5		○	□
230	95		5	○	□
231	100			○	□

Tabla 1

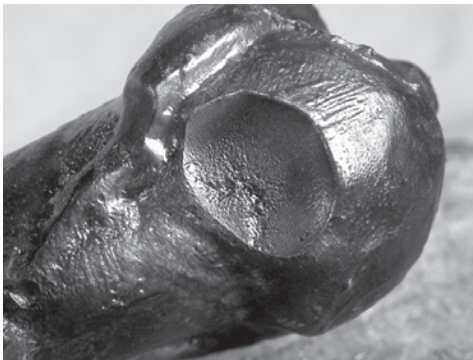


Figura 8.

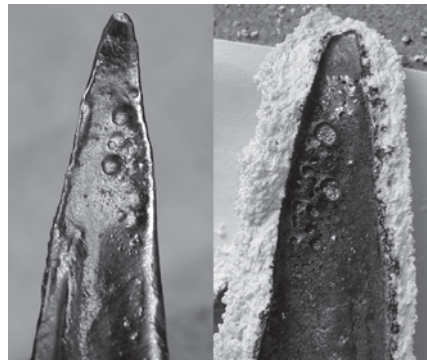


Figura 9.

del molde en función de la proporción de magnetita. Así, podemos comprobar que la cantidad mínima de magnetita necesaria para descere con seguridad se establece en esta serie en un 5% con relación al grafito (prueba 22). Por debajo de esta cantidad, no se han realizado pruebas de descere, aunque sí algunas preliminares con

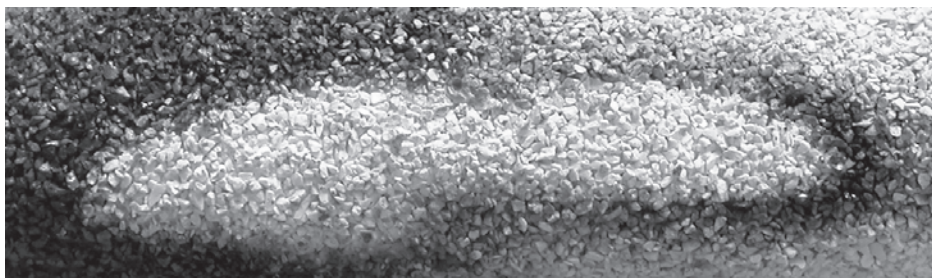


Figura 10.

bebederos, provocándose grietas longitudinales a los 4 minutos de comenzar el proceso, unos valores muy similares a los registrados tan sólo con recubrimiento de moloquita.

Comparando los datos obtenidos con los de la primera serie, se comprueba que aquellas proporciones de magnetita y talco que descendieron sin grietas experimentan un descenso del 30% en el tiempo de formación de la junta de dilatación al sustituir el talco por grafito.

La alta conductividad resultante de la mezcla de grafito y magnetita provoca una disminución drástica en los tiempos de descere, llegando incluso a producirse llamas sobre el molde después de aparecer zonas negras (fig. 10).

Podemos comprobar también que el calentamiento del recubrimiento se ha producido de manera homogénea, ya que no se han provocado grietas, y las zonas negras, cuando aparecen, lo hacen de manera casi uniforme en la superficie del molde.

Al analizar los resultados en metal vemos que no se producen los mismos errores que con la adición de talco, al menos no de la misma manera. Aunque aparecen burbujas, éstas sólo son patentes a partir de la prueba 112, resultando las anteriores pruebas limpias de fallos o errores en el registro.

Sin embargo, a partir de la prueba 217 se incrementa notablemente la cantidad de burbujas sobre el metal, llegando incluso a provocar burbujeos de considerable tamaño que ocasionan carencias muy importantes de metal (fig. 11).

El primer análisis que podemos extraer de las tres series en las que se aplicaron los tres componentes nos viene dado por las proporciones que no han superado el descere. En los tres casos las pruebas con proporciones por encima de un 65 % de talco se han agrietado lo suficiente como para no poderse fundir.

Estas grietas se deben a que, con proporciones superiores de talco, es necesario un mayor aporte de material magnético, como ya hemos visto en la primera serie, donde las pruebas se agrietan a partir del 25 % de talco. Comparando estas series con la primera, observamos que la aportación de grafito, efectivamente, potencia las propiedades del recubrimiento hasta tal punto que se incrementa en un 40% su poder de calentamiento.

En lo que se refiere a la capacidad de registro, observamos que en todas las pruebas aparece algún tipo de burbuja o deformación de las formas por la aparente

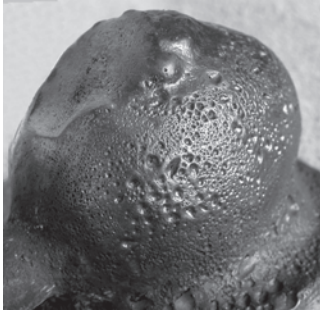


Figura 11.

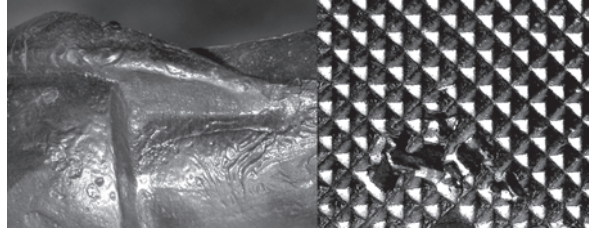


Figura 12.

fusión del recubrimiento. Aunque se trata de deformaciones menos evidentes que en las anteriores series, podemos observar algunas pruebas que presentan graves fallos en la superficie del metal (fig. 12).

4.3. CONCLUSIONES A LAS PRUEBAS

La cascarilla cerámica elaborada con moloquita presenta unas características que la hacen especialmente adecuada para la fundición de precisión: una baja y uniforme expansión térmica, la forma angular y textura rugosa de los granos y la variedad de tamaños de la partícula. Estas características influyen directamente en una propiedad que diferencia los moldes de moloquita del resto de moldes utilizados en fundición: su alta porosidad.

Es importante destacar el papel que estos aspectos desempeñan en uno de los grandes logros de la cáscara cerámica elaborada con moloquita: su fuerza y resistencia unida a su extremada porosidad, tan eficazmente probada que ha permitido la eliminación de respiraderos en piezas de cualquier tamaño, pero de sección segura¹.

Sin embargo, esta extrema porosidad se pierde al aplicar el recubrimiento de magnetita, eliminándose casi por completo al añadir talco y grafito. Puesto que no hemos modificado en ningún sentido la aplicación de la moloquita, debemos buscar en los materiales que incorporamos las causas de esta modificación.

Todas las pastas y arcillas cerámicas, hasta las más puras, se ablandan, se deforman, se derriten y forman un material cristaloides a cierta temperatura.

¹ MARCOS MARTÍNEZ, Carmen. *Fundición a la cera perdida: Técnica de la Cascarilla Cerámica*. Tesis Doctoral dirigida por el Dr. D. Juan Carlos Albaladejo. Universidad Politécnica de Valencia, 2000, p. 263.

Se comprueba con ensayos metódicos que algunas pastas llegan a vitrificarse al aumentar gradualmente la temperatura, descendiendo la porosidad en un amplio margen de temperaturas pasado este punto, mientras que otras pasan de un estado relativamente blando y poroso a otro de deformación y fusión súbitas con poca variación de temperatura².

Llamamos *mezcla eutéctica* a un compuesto en el que una proporción dada de dos o más óxidos u otras materias se funden a una temperatura más baja que la mezcla en otras proporciones de la misma materia.

Esto pasa con los materiales que utilizamos en nuestro recubrimiento; por separado, tanto la magnetita como el grafito y el talco son infusibles e insolubles, mientras que al interactuar en una solución de sílice se comportan de manera distinta, fundiéndose y dando lugar a una especie de vidriado como los que se producen en cerámica.

En cerámica se utiliza la magnetita para la decoración a pincel cuando se quiere obtener un color más vivo y matizado que el que daría el óxido de hierro corriente. En atmósfera reductora de horno nos da un aspecto metálico brillante como la plata, conocido de la cerámica japonesa, si se aplica sobre un barniz para loza³.

Extrapolando estos conocimientos de cerámica a los resultados que se observan en el interior del molde de cascarilla, podemos intuir, por ejemplo, que el punto eutéctico de la mezcla de magnetita, sílice y talco se encuentra por debajo del punto de fusión del bronce. Funde por debajo de los 1.127°C y en una proporción cercana al 85% de magnetita. Esto se comprueba porque al aumentar la proporción de talco en la mezcla aumentamos el punto de fusión de la misma. Algo parecido ocurre con la mezcla de magnetita, sílice y grafito, aunque en este caso la moloquita juega un papel importante, ya que si bien no se llega a producir la fusión del recubrimiento, sí que se produce una vitrificación localizada en la interfaz de la mezcla y la moloquita. Probablemente, el punto eutéctico en el caso de permitir una mezcla homogénea de magnetita y moloquita sea muy cercano al de la mezcla de talco y magnetita. Sin embargo, al mezclar sílice con magnetita, grafito y talco, no parece que se modifique mucho el punto eutéctico de la mezcla, aunque es obvio que sigue estando por debajo del punto de fusión del metal.

Como no podemos reducir el punto de fusión del bronce, tendremos que utilizar una mezcla en nuestro recubrimiento que se encuentre suficientemente alejada de las proporciones de mezcla eutéctica; es decir, que comience a fundirse por encima de los 1.127°C.

² COLBECK, John. *Materiales para el ceramista. Composición, preparación y empleo*. Ed. Ceac. Barcelona, 1989, p. 12.

³ LYNNGAARD, Finn. *Tratado de Cerámica*. Ed. Omega, S.A. Barcelona, 1992, p. 130.

5. CONCLUSIONES

El descere por microondas se presenta como una alternativa más que fiable al descere tradicional o descere rápido de la cascarilla cerámica, ya que son muchas las ventajas que presenta respecto a éste y respecto a la mayoría de sistemas de descere actuales.

Esta fiabilidad viene dada por la utilización de la magnetita como partícula bipolar en la capa de contacto del molde y la cera. En esta investigación se ha estudiado este uso mediante el desarrollo de un sistema de pruebas que nos ha permitido establecer unas cotas en la proporción de magnetita a utilizar en combinación con otros productos utilizados habitualmente en fundición, el talco y el grafito.

Y es precisamente en referencia a uno de estos productos que debemos señalar una de las primeras conclusiones. Descartamos totalmente la utilización de talco en cualquier forma y proporción, incluso en capas anteriores al recubrimiento de magnetita y grafito, puesto que aunque hay proporciones que permiten un descere en condiciones fiables, en el momento de la fusión del metal produce una capa impermeable que impide la salida de gases.

Este fenómeno se explica desde la cerámica, ya que la magnetita (Fe_3O_4), al ser un óxido de hierro, en combinación con el talco y el sílice que utilizamos como aglutinante, produce un efecto similar al de un vidriado, llegando incluso a formar una pasta cerámica que se descuelga por el interior del molde antes de que se vierta el metal.

De las pruebas extraemos también una proporción totalmente fiable, tanto para el descere como para la fusión del metal. Es la compuesta por un *95% de grafito* en polvo y un *5% de magnetita*, también en polvo. Corresponde a la número 22 de las pruebas.

Con esta proporción se han descerado y fundido con éxito tanto pequeñas piezas de joyería, como diversas microfusiones de tamaño medio, crisoles fusibles y piezas para fundición con crisol.

El descere por microondas resulta especialmente aconsejable para el descere de pequeños crisoles fusibles, ya que dependiendo de la capacidad de cada horno microondas podemos descerar piezas de hasta 5 kilos en bronce, con lo que reducimos considerablemente el espacio necesario para un pequeño taller; tan sólo necesitaríamos un espacio para el horno de fundición, una zona para el trabajo de la cera y una zona de secado de moldes, ya que el microondas lo podemos instalar en cualquier lugar cercano a una toma de corriente.

Como nos vemos limitados por el tamaño del horno microondas, estas conclusiones se han redactado en base a la experimentación realizada con pequeñas piezas que pudiéramos introducir en la cavidad de nuestro horno microondas doméstico, pero no es descabellada la idea de utilizar microondas industriales de gran capacidad (hasta 25 litros), ya que no es necesario hacer ninguna modificación.

Las pruebas de esta experimentación han sido realizadas y diseñadas por Iván Rodríguez González, alumno de doctorado y colaborador del proyecto, y han sido presentadas como trabajo de investigación para la obtención del DEA, transcurriendo la investigación en el Taller de Fundición de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de La Laguna.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBALADEJO, Juan Carlos. «Fundición a la cera perdida: Técnica del Crisol Fusible». Ed. Departamento de Pintura y Escultura. Universidad de La Laguna. Santa Cruz de Tenerife, 2003.
- ALSINA BENABENTE, Jorge. «La Fundición a la cera perdida (Microfusión)». Ed. Alsina. Barcelona, 1992.
- CODINA, Carles. *La Joyería*. Ed. Parramón. Barcelona, 2001.
- COLBECK, John. «Materiales para el ceramista. Composición, preparación y empleo». Ed. Ceac. Barcelona, 1989.
- DUPONCHELLE, J. *Manual del fundidor de metales*. Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 1960.
- KOZLOU, Yu. «Ciencia de los Materiales». Ed. Mir. Moscú, 1986.
- LE BRETON, H. «Defectos debidos a la forma de solidificación de aleación colada». Ed. Urno. Bilbao, 1975.
- LYNGGAARD, Finn. *Tratado de cerámica*. Ed. Omega. Barcelona, 1992.
- MALISHEV, A. «Tecnología de los Metales». Ed. Limusa. México, 1994.
- MARCOS MARTÍNEZ, Carmen. «Fundición a la cera perdida: Técnica de la Cascarilla Cerámica», Tesis Doctoral dirigida por Dr. D. Juan Carlos Albaladejo. Universidad Politécnica de Valencia, 2000
- MATTHES, Wolf. «Vidriados cerámicos. Fundentes, propiedades, recetas, métodos». Ed. Omega. Barcelona, 1990.
- PERO-SANZ ELORZ, José Antonio. «Ciencia e ingeniería de los materiales: Metalurgia Física: Estructura y Propiedades». Ed. Dossat. Madrid, 1992.
- ZOLOTOREUSKI, Vadim. «Pruebas mecánicas y propiedades de los metales». Ed. Mir. Moscú, 1976.

