

METALES ARTIFICIALES EN APLICACIONES ESCULTÓRICAS: MATRICES TERMOESTABLES Y CARGAS METÁLICAS

Miquel Herrero-Cortell¹; Mario Culebras Rubio²; Xavier Mas-Barberà³

¹Centre d'Art d' Època Moderna, Universitat de Lleida. Parc Científic i Tecnològic de Gardeny. Plataforma de Serveis Tecnològics de la Universitat de Lleida. Edifici H3 B, 2^a planta, laboratoris 10 i 11

2500, Lleida. Colaborador del Instituto de Restauración de Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia. Correo de contacto: miquelangel.herrero@hahs.udl.cat

² Instituto de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Valencia (ICMUV). C/ Catedrático Agustín Escardino, 9, 46980, Paterna, Valencia. Correo de contacto: mario.culebras@uv.es

³Instituto de Restauración del Patrimonio (IRP) de la Universidad Politécnica de Valencia. Camí de Vera, s/n, 46022 València. Correo de contacto: jamasbar@upvnet.upv.es

Recibido: Agosto 2016; Aceptado: Diciembre 2016

RESUMEN

Los metales artificiales son materiales reforzados obtenidos a partir de la mezcla de resinas termoestables con cargas metálicas, que se utilizan en la consecución de prototipos tridimensionales, esculturas, y objetos ornamentales, en ámbitos industriales, artísticos y de conservación y restauración de bienes culturales. Aunque su uso se conoce desde la década de 1960 se trata de materiales que no han sido bien estudiados para este tipo de aplicaciones. Así, no existe una sistematización alusiva al tipo de cargas, tamaño de partícula y dosificación que se ajuste a los diversos procedimientos de trabajo escultórico. El presente artículo propone una revisión de los mencionados parámetros, utilizando como matrices una resina de epoxi y una resina de poliéster, y atendiendo a las proporciones idóneas de carga para la obtención de materiales compuestos de apariencia metálica.

Palabras clave: materiales reforzados metálicos; metal artificial; cargas; escultura.

ABSTRACT

Artificial metals are composites obtained from the mixture of thermoset resins with metallic fillers. They are used in pursuit of 3D prototypes, as well as in the making of sculptures and decorative objects, in areas such as industrial creation, fine arts, and conservation and restoration of cultural heritage. Although they are widespread materials known since the 1960's they have not been well studied for these applications, especially those concerning to artistic cold-cast reproductions. Thus, there are no systematic studies about the type of fillers, particle mesh size and dosage to fit the various procedures of sculptural work. This article proposes a review of the aforementioned parameters, using epoxy and polyester resins, and focusing in the proper proportions for obtaining composites with a metallic appearance.

Key words: metal composites; cold-casting; fillers, sculpture.

1. INTRODUCCIÓN

El ámbito de las Bellas Artes, y más concretamente el escultórico, se ha servido de numerosos plásticos que, desde inicios del siglo XX, han incrementado las posibilidades estructurales y estéticas, ampliando así los horizontes de los materiales tradicionales de la escultura. Esto ha supuesto, en cierta medida, una gran expansión conceptual y una evidente ruptura de los límites de los materiales tradicionales en lo que respecta a acabados, pesos,

volúmenes y, formas de trabajo, contribuyendo así a una revolución formal en dicha disciplina. [1–3].

Con el nombre de ‘metales artificiales’ se designa, en el ámbito artístico a los diversos materiales reforzados metálicos constituidos por resinas termoestables o termoplásticas con cargas de partículas metálicas que ejercen una función tanto estructural como estética. Aunque se trata de materiales que se conocen en el ámbito de la escultura desde comienzos de la década de 1960 [4], su uso no llegó a popularizarse por las limitaciones que presentaban las resinas y las partículas metálicas en fechas tan tempranas. Asimismo, su alto coste ligado a unos resultados pobres acabó lastrando la reputación de este tipo de materiales reforzados con fines artísticos, a pesar de que hubo ciertas investigaciones sobre el tema [5, 6]. Recientemente, se presentó un estado de la cuestión sobre el uso de los “metales artificiales” para estos propósitos [7], en el que quedaban expuestas las escasas líneas de investigación al respecto, y se abordaban también causas de esta carencia. En el ámbito de la restauración tuvieron una escasa acogida, aunque más recientemente hubo también intentos de normalizarlos como materiales [8–10]; pero aun así seguían sin existir estudios cualitativos y formales sobre estos nuevos compuestos. En cambio, resulta destacado que para el caso de objetos escultóricos o reproducciones arqueológicas de naturaleza pétreas sí existen desde hace unos años soluciones alternativas con materiales compuestos a base de polímeros con cargas minerales, consideradas como muy efectivas y mucho más estudiadas y difundidas [11], de las que se encuentra abundante bibliografía [12–15]. La carencia de este tipo de estudios aplicados a la consecución de reproducciones metálicas resulta paradójica, dada la calidad y funcionalidad de los resultados que en las últimas décadas se han obtenido en la imitación de materiales pétreos, tanto en el ámbito de la conservación como en la producción escultórica y ornamental. En año 2016 se presentó una primera aproximación en el territorio español del uso de los metales artificiales con propósitos de conservación preventiva y divulgación del patrimonio metálico, en la que se expusieron los primeros resultados de la investigación [16].

El objetivo del presente artículo es, por tanto, proporcionar una información empírica y cuantitativa sobre los diversos materiales –así como sus proporciones y mezclas– para la obtención de metales artificiales con fines artísticos (reproducciones ornamentales, escultura y conservación y restauración). En este sentido tanto los materiales seleccionados como su dosificación están pensados para adecuarse a los métodos de trabajo, espacios, infraestructuras y limitaciones comunes en dichos campos, y no tanto para el ámbito industrial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Resinas. Aunque los materiales reforzados metálicos pueden obtenerse con infinidad de matrices poliméricas (resinas acrílicas, epoxi, de poliuretano, viniléster, poliéster, entre otras) se han elegido los dos tipos más frecuentes en el ámbito de la escultura con materiales compuestos: resina de poliéster [17] y resina epoxi [17, 9] que se utilizan con éxito en propósitos escultóricos y de conservación y restauración desde hace décadas, en procesos de estratificación y colada [18]. Pueden encontrarse en suministros de modelismo y prototipados, y en múltiples proveedores de productos de *Bellas Artes Conservación y Restauración*, tanto a nivel nacional como internacional. Las matrices seleccionadas se adquirieron del proveedor internacional CTS¹ y, son las siguientes:

- Resina Epoxi Araldite LY 554 con agente de curado HY 956 a base de aminas (*Diethylenetriamine*, *Triethylenetetramine* y *Propoxylated Triethylenetetramine*) al 20% en peso.
- Resina de Poliéster S 1119 con agente de curado Peróxido de metil etil cetona (MEKP) al 2–3,5% en peso.

2.2 Cargas. Las cargas son las responsables de la estructura y apariencia estética del *composite* metálico. Cualquier caga metálica conglomerada en una resina termoestable es susceptible de producir un material reforzado metálico, pero no un metal artificial. Se trata de un matiz alusivo a su acabado: en usos escultóricos el resultado estético y el resultado estructural comparten protagonismo, por lo que el primero no puede descuidarse, y los metales artificiales se caracterizan por parecer visualmente metales y no materiales reforzados. Hoy en día es sencillo encontrar centenares de cargas metálicas comerciales de todo tipo de metales y aleaciones, con múltiples tamaños y granulometrías (desde granallas y limaduras, por encima de las 500 µm hasta polvos muy finos (< 200 µm) e incluso nanopartículas < 1 µm). También es posible adquirirlas con diferentes formas de partícula (lamelas y escamas, microfibras, partículas esféricas o, partículas irregulares).

Para la elaboración de las probetas de metales artificiales del presente estudio se utilizaron las siguientes cargas metálicas

Partículas esféricas, adquiridas en la casa comercial británica *Tiranti*²:

¹ <http://www.ctseurope.com/es/catalogo.php>

² Estos particulados se han formulado expresamente, según el proveedor, para utilizarse como cargas volumétricas en esculturas realizadas con resinas. No puede seleccionarse el tamaño de partícula de cada una de ellas ni su

- Partículas de bronce esféricas de 325 µm
- Partículas de cobre esféricas de 325 µm
- Partículas de latón esféricas de 240 µm
- Partículas de aluminio esféricas de 250 µm
- Partículas de hierro esféricas de 250 µm

Partículas de atomizadas de morfología irregular, adquiridas en *Pometon España*³:

- Partículas de bronce de 212, 106 y 63 µm
- Partículas de cobre de 212, 106 y 63 µm
- Partículas de latón de 212, 106 y 63 µm
- Partículas de aluminio de 212, 106 Y 63 µm
- Partículas de hierro de 212, 106 y 63 µm

2.3. Experimental. Se realizaron 360 probetas, utilizando las mencionadas resinas para aglutinar en distintas proporciones las cargas metálicas. Inicialmente se trabajó con un cálculo de partes de metal/partes de resina en peso, probando proporciones desde 0,5/1 hasta 8/1 (33,3–88,8% p/p), y utilizando los distintos metales en sus diversas granulometrías. También se probó la mezcla de distintas partículas en una misma probeta, tanto de metales diferentes con partículas de tamaño análogo, como de partículas de diferente morfología, así como partículas de tamaños distintos. De cada mezcla y dosificación se realizaron tres probetas (120 mezclas diferentes) de 3·5·1cm, utilizando un molde de silicona RTS realizado expresamente para este ensayo. Para elaborar todas los materiales reforzados se siguió el mismo orden: matriz de resina a la que se le añadió el agente de curado y se removió para verter finalmente la carga, previamente pesada. Las probetas se realizaron a temperatura ambiente, precisamente porque este factor no suele controlarse en los talleres de escultura, aunque la temperatura promediada del laboratorio fue de unos 20–25° C, y la humedad relativa osciló entre 45–50%.

2.4. Instrumental. Se ha utilizado una balanza de precisión tanto para pesar las diferentes proporciones de cada material, como para comprobar los pesos de los materiales reforzados resultantes, y calcular así su densidad (g/cm³). Para una observación visual de los resultados se ha utilizado una lupa binocular *Leica S8APO*, dotada con un tubo con adaptador

morfología puesto que sólo se venden las anteriormente enumeradas. <http://www.tiranti.co.uk/index.php> (Consultado el 09-03-2015)

³ Por su parte, las partículas de *Pometon* se venden con múltiples tamaños de malla, existiendo además aleaciones ligeramente diferentes, y partículas con características especiales, como desoxidadas o no desoxidadas. Todas los polvos metálicos de esta empresa son de morfología irregular, obtenidos por atomización. <http://www.pometon.net/> y <http://www.pometon.com/> (Consultado el 09-03-2015)

para acoplarse a la cámara fotográfica réflex, en este caso una *Nikon D-5000*. La cámara, además fue conectada a un monitor para el correcto enfoque y visionado de las fotografías capturadas. Adicionalmente se ha utilizado una lupa digital PCE-200, de enfoque variable entre 60 y 200X.

Asimismo, se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido (MEB) para la visualización completa de la morfología de los diversos materiales reforzados y partículas. Las imágenes se obtuvieron con un microscopio *Hitachi S-4800* utilizando un voltaje de aceleración de 20 kV y una distancia de trabajo de 14 mm. Las superficies fueron previamente metalizadas con una deposición de una aleación de oro-paladio mediante un recubrimiento por *sputtering*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Matrices poliméricas. El comportamiento de ambas resinas como matrices poliméricas de cargas metálicas fue bueno. Todas las probetas pudieron desmoldarse tras su polimerización, aunque se evidenció que sus propiedades físicas y formales eran muy diferentes entre sí, como también lo habían sido sus tiempos de trabajo y manipulación.

Por un lado, la resina epoxi tardó 24 horas en completar su ciclo de endurecimiento y en probetas con alto contenido cúprico este proceso se retardó ligeramente llegando en algunas a las 30 horas. La interferencia del cobre en el curado de las resinas ha sido ya advertida por algunos investigadores [19]. Este problema fue corregido incrementando ligeramente la cantidad del agente de curado, del 20 al 23%. El tiempo de trabajo de esta resina es muy largo, y su proceso de gelificación tarda varias horas en comenzar, por lo que es cómodo para trabajar en piezas grandes que requieran una mayor cantidad de tiempo de manipulación. Sin embargo, este factor, unido a su baja viscosidad, puede provocar una progresiva decantación gravitatoria de las partículas del material reforzado hacia los planos más profundos del molde, [20] lo que redunda en un acabado heterogéneo con bolsas de acumulación metálica en algunas partes del positivo, algo que estéticamente puede no ser interesante. Cuanto mayor es la proporción de metal respecto a la resina y, menor tamaño tengan las partículas utilizadas para el material reforzado, la tendencia a decantar será menor, por lo que, de no utilizarse un tixotrópico específico para esta resina, habría que utilizar cargas siempre por debajo de las 100 µm. Por otra parte, esta resina ofreció unos óptimos resultados de registro superficial, pero se comprobó también que tenía tendencia a quedarse pegada al molde, provocando con el tiempo el deterioro del mismo, a pesar que la adición de metales rebaja el pico exotérmico del curado. Conviene señalar que en aplicaciones sucesivas resulta una resina agresiva para el molde, factor que ha de considerarse cuando se contemplan tiradas escultóricas largas y piezas seriadas a partir de una

única horma⁴. Por último, las resinas epoxi mejoran sus cualidades físicas si se someten a un proceso de postcurado, que es viable cuando se trabaja con piezas pequeñas pero que no lo es tanto en formatos mayores. Por ello, en ocasiones, los materiales reforzados metálicos epoxídicos pueden presentar alteraciones en sus propiedades mecánicas, tal y como se observa en una reciente publicación [16]. No obstante, esta deficiencia del curado hace que la pieza sea más fácilmente deformable y menos tenaz, lo que implica que se rompa con mayor dificultad ante un eventual impacto, lo que puede suponer también un obvio beneficio en aplicaciones escultóricas. Entre las principales ventajas de esta resina epoxi destaca el poco olor que desprende.

Por su parte, las resinas de poliéster presentan un tiempo de trabajo muy corto, concretamente, la resina usada era inferior a los 12 minutos, lo que deja poco margen en operaciones con piezas de tamaños grandes, en las que se hace necesario un mayor tiempo de manipulación. El proceso de curado comienza a partir de ese momento, y el endurecimiento de la resina se produce al cabo de una hora aproximadamente, lo que otorga una inmediatez de trabajo que permite simplificar y optimizar los procesos de positivado, que suele redundar en una optimización del tiempo. Además, un proceso de curado tan ágil impide que la lenta decantación de partículas se produzca, por lo que el aspecto de homogeneidad de estos materiales reforzados suele ser siempre mejor que los epoxis. Se ha constatado que este tipo de matrices de poliéster es habitual que las suministren pre-aceleradas y en ocasiones con aditivos tixotrópicos, por lo que dificulta determinadas concentraciones de carga metálica (por encima de 7 partes de metal/parte de resina en peso). La presencia de estos aditivos dificulta una correcta dispersión de la carga metálica en proporciones elevadas, puesto que el material reforzado se vuelve grumoso y apelmazado, aumentando así la posibilidad de que queden partículas sin mezclarse con la matriz de poliéster. En probetas con altos contenidos de partículas de cobre se observó también una ralentización del proceso de curado, problema que de nuevo pudo ser corregido incrementando la cantidad de agente de curado, en este caso MEKP, hasta el 3,5%. A pesar de la exotermia propia de estas resinas, son mucho menos agresivas con el molde que las del grupo epoxi. Los resultados con este tipo de matrices fueron, por lo general, óptimos. El mayor problema que plantea su utilización, además de la velocidad de curado que en ocasiones puede dificultar la labor del escultor, es su desagradable olor y su mayor toxicidad. De todos modos, cualquier trabajo con resinas implica la adopción de unas

⁴ Aunque existen muchos tipos de silicona que se utilizan para la confección de moldes, a lo largo de la investigación se han ido probando elastómeros con diversas durezas en varios tipos de molde, comprobándose que el deterioro por uso continuado de resinas epoxi es común en todos los casos.

medidas de seguridad mínimas que incluyen equipos de protección individual y que deben seguirse de manera sistemática [21].

3.2. Cargas metálicas y su dosificación: pesos, volúmenes y proporciones. En primer lugar, antes de entrar en cuestiones concretas como la granulometría, la forma de las partículas o las proporciones idóneas, hay que advertir que el uso de cada tipo de metal comporta variaciones importantes en lo relativo al peso (Tabla 1). La densidad del metal fundido (expresada en g/cm³) no es la misma que la presentada por las partículas, que vienen a tener densidades entre la mitad y una tercera parte que sus homónimos de fundición. Esto implica, ya de por sí, una notable reducción de peso para un mismo volumen. Considerando, además, las diversas proporciones de uso de cada metal los pesos finales varían notablemente (Figura 1), pudiéndose reducir significativamente respecto al de los metales reales (Tabla 2). Esto supone una infinidad de ventajas en el ámbito escultórico, que en cualquier caso redundan en una importante disminución de costos y en un incremento de la facilidad y comodidad de manipulación de piezas de cierta envergadura.

Tabla 1. Densidades y pesos de los diversos metales utilizados.

<i>Material</i>	<i>Densidad de las resinas g/cm³</i>	<i>Densidad de metal fundido g/cm³</i>	<i>Peso Específico N/m³</i>	<i>Densidad de partículas (10⁶ μm) g/cm³</i>
Hierro		7,87	77.165	3,40
Bronce		7,4	72.520	3,30
Latón		8,6	84.280	3,60
Cobre		8,96	87.810	3,80
Aluminio		2,7	26.460	0,8 – 1,1
Resina Epoxi	1,25	–	–	–
R. Poliéster	1,20	–	–	–

Por otra parte, observando los diversos métodos de cálculo de la proporción de carga metálica empleados según distintos autores, se evidenció la necesidad de unificar criterios. Mientras que algunos autores utilizan proporciones basadas en volúmenes, otros trabajan con partes de metal/partes de resina, y, por último, en literatura científica relacionada con el ámbito industrial, la carga metálica suele ir expresada en porcentaje de metal en peso total del material reforzado (% p/p). Se ha elaborado una gráfica que expresa la relación entre la proporción de partes de metal/partes de resina y su análoga expresada en % de metal en peso final (Figura 2).

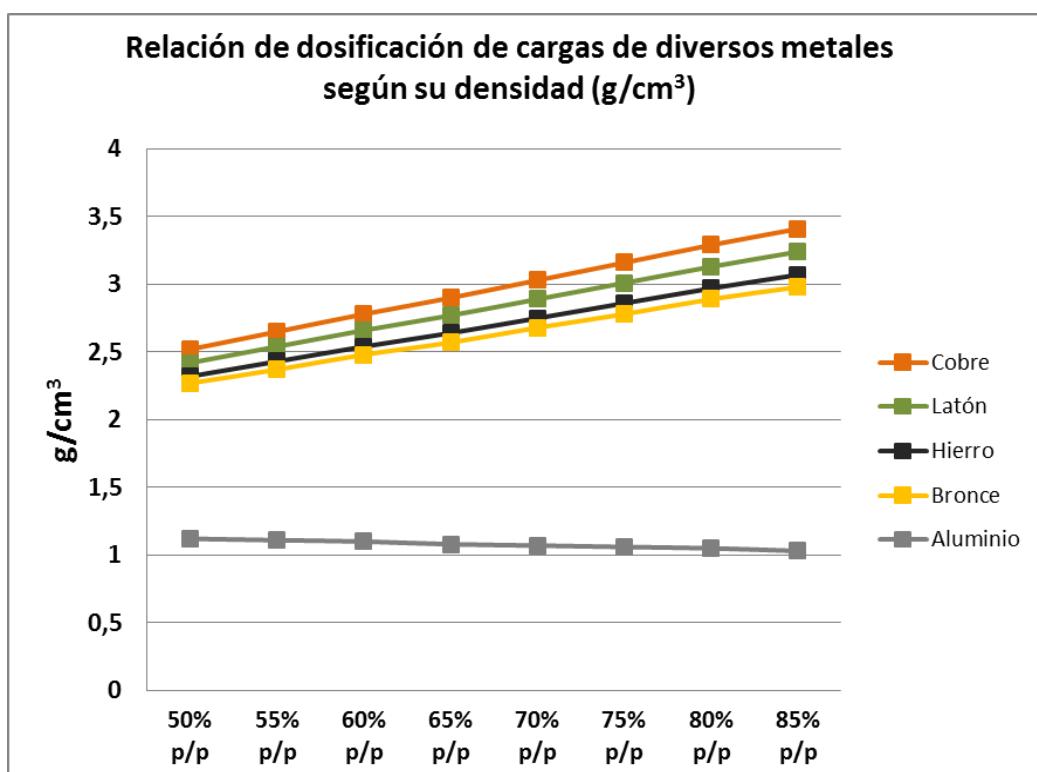


Figura 1. Gráfica que expresa la relación de densidad en función del porcentaje de metal en peso total de diversos materiales reforzados metálicos. Obsérvese como el grupo de aleaciones cúpricas así como el hierro presentan densidades parecidas. La excepción es el aluminio: dado que la densidad de las partículas de metal es menor que la de las propias resinas, a mayor cantidad de metal, menor es el peso del material reforzado.

Tabla 2. Densidad de las mezclas en gramos por cm³ en función de su porcentaje de carga sobre el peso total (valores promedios). Datos obtenidos a partir del termoestable epoxi.

Metal	50% p/p	55% p/p	60% p/p	65% p/p	70% p/p	75% p/p	80% p/p	85% p/p	100% p/p	0% p/p
Cobre	2,52	2,65	2,78	2,90	3,03	3,16	3,29	3,41	3,80	1,25
Latón	2,42	2,54	2,66	2,77	2,89	3,01	3,13	3,24	3,60	1,25
Hierro	2,32	2,43	2,54	2,64	2,75	2,86	2,97	3,07	3,40	1,25
Bronce	2,27	2,37	2,48	2,57	2,68	2,78	2,89	2,98	3,30	1,25
Aluminio	1,12	1,11	1,1	1,08	1,07	1,06	1,05	1,03	1,01	1,25

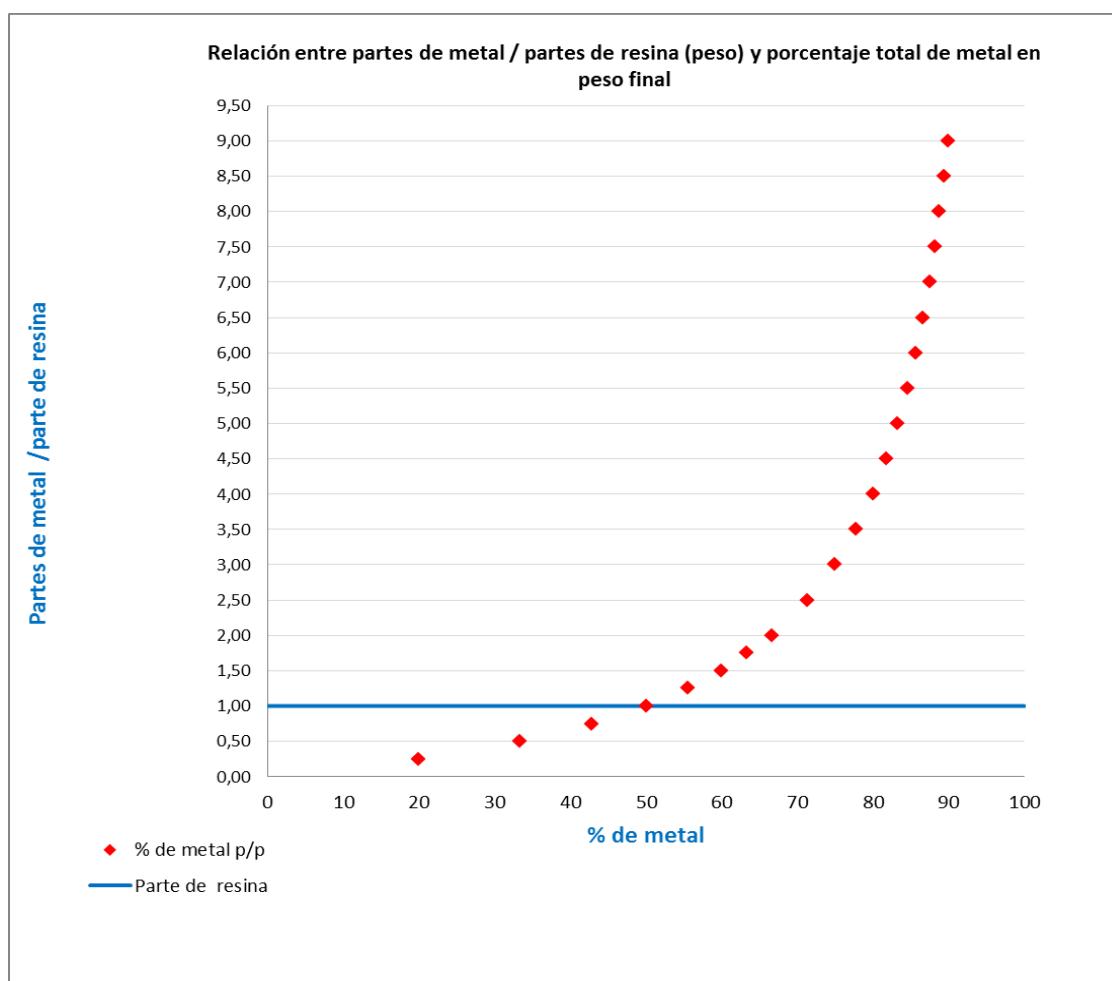


Figura 2. Gráfica que expresa la relación de proporcionalidad entre partes de metal/parte de resina y sus correspondientes porcentajes de metal en peso total (% p/p), aplicable a los diversos materiales reforzados metálicos. Obsérvese la tendencia vertical de la curva cuanto mayor es la proporción de carga metálica.

3.3. Morfología de las partículas metálicas.

3.4. Forma y tamaño de las partículas. Las cargas metálicas pueden tener morfologías muy diversas, ya que se utilizan en aplicaciones industriales muy variadas, con fines muy distintos, por lo que existe en el mercado infinitas tipologías. No hay una carga expresamente pensada para aplicaciones escultóricas, por lo que diversas tipologías pueden ser usadas con éxito en fines escultóricos, aunque siempre debe considerarse que la forma de las partículas afecta tanto a la estética del material reforzado como a su estructura, pudiendo modificar las propiedades mecánicas del mismo. En general, el uso de purpurinas, lamelas, escamas, copos y microláminas [22], no obtiene en ningún caso resultados satisfactorios en la emulación de metales, quedando como conglomerados de láminas que distan mucho de tener un aspecto metálico. Además, por su morfología este tipo de cargas no presenta un buen anclaje entre sí, por lo que no se recomienda su utilización en estos propósitos. Por lo que respecta a la utilización de granallas y limaduras de diversos metales [23, 17] este tipo de cargas es muy

heterogéneo y, en general, sus partículas son demasiado grandes. No obstante si se desea un acabado granulado pueden utilizarse puesto que estructuralmente funcionan bien, siempre que no se desee una apariencia metálica. Las cargas más utilizadas en la consecución de metales artificiales son los polvos metálicos, de partículas esféricas [4, 24–25], o bien, atomizadas de morfología irregular [16] (Figura 3). Ambos tipos ofrecen buenos resultados, tanto estéticos como estructurales, aunque especialmente interesantes resultan las segundas, puesto que su morfología contribuye a una óptima unión entre la matriz y las partículas y, entre la propia carga.

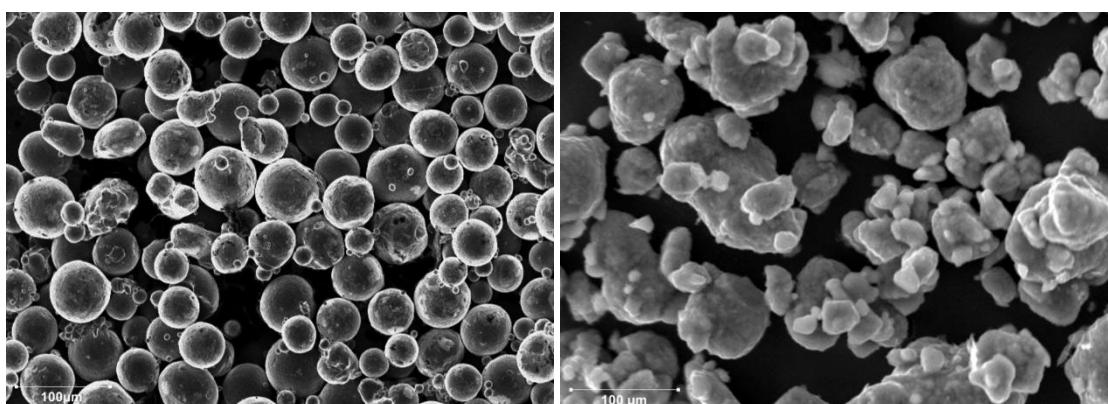


Figura 3. Izquierda: partículas de bronce de morfología esférica. Derecha: partículas de bronce de morfología irregular. Ambas pueden utilizarse con éxito en la consecución de metales artificiales.

La cuestión de la granulometría de las partículas también resulta crucial, y está directamente relacionada tanto con los métodos de trabajo propios de la escultura como la calidad de registro de detalles, la apariencia final del material reforzado, su estructura física y sus posibilidades estéticas de emular un metal real. Por lo general, pueden utilizarse con éxito partículas por debajo de las 300 μm, y preferentemente por encima de las 50 μm. Las partículas de más de 300 μm resultan muy visibles y evidentes, por lo que restan verosimilitud a la capacidad de emulación metálica del material reforzado. Por su parte, las partículas por debajo de 50 μm ofrecen un acabado muy fino que dificulta su posterior brillo, por lo que tiende a un aspecto mate. Pero más allá de este efecto, cuando las partículas son bruñidas después del desmoldado pueden disgregarse por la acción de la fricción, lo que restará cualidades metálicas a la superficie. De todos los tamaños testados en este ensayo los que han resultado óptimos para un acabado de aspecto metálico oscilan entre las 212 y las 63 μm, siendo muy recomendable las partículas cercanas a las 106 μm, sin duda son las que ofrecen los mejores resultados.

La mezcla de diversos tamaños de partículas no suele resultar efectiva con granulometrías superiores a las 100 μm puesto que algunas partículas tienden a manifestarse como muy visibles mientras que otras no. No resulta buena idea, por ejemplo, mezclar

partículas de 300 µm con otras de 63 µm, puesto que se hace difícil conseguir una mezcla homogénea y cada particulado suele tener un color ligeramente distinto, aun siendo de un mismo fabricante. Aunque las partículas pueden mezclarse, a partir de los ensayos realizados se desaconseja este tipo de práctica para evitar parcheos y cambios de color. Ciertamente las partículas más pequeñas amortizan los espacios entre las más grandes pero igualmente cualquier particulado comercial comprende ya partículas de diferentes tamaños en proporciones concretas que realizan esta función. Si finalmente se opta por realizar mezclas de partículas conviene asegurarse de que la dispersión de todas ellas sea homogénea.

3.5. Proporciones de carga metálica en procedimientos escultóricos. Si el tamaño de partícula influye notablemente, más importante todavía resulta la cuestión de la cantidad de metal contenido en un determinado material reforzado. No existe una única proporción maestra que funcione en todos los casos. Aunque algunos autores señalan proporciones del orden de 6 ó 7 partes de carga metálica por cada parte de resina en peso, de ninguna manera puede establecerse esta proporcionalidad sin tener en cuenta el peso del metal, ya que esta proporción cambia drásticamente si se utiliza, por ejemplo, una aleación cúprica o un aluminio. Es más operativo hablar de porcentaje de metal en peso total (% p/p), o bien, calcular el contenido metálico en función del volumen. En general, cuanto mayor es la cantidad de metal contenida en un *composite* mejor es su aspecto. Lógicamente, cantidades muy altas de metal y muy bajas de resina pueden ir en detrimento de las propiedades mecánicas del metal artificial. Por el contrario, proporciones muy bajas de carga redundan en acabados estéticos muy pobres, en los que las partículas quedan visibles por su separación y generan una apariencia moteada y falta del característico brillo del metal.

Cada metodología de trabajo requiere proporciones distintas. Mientras que para la colada [26] se requieren mezclas fluidas capaces de adaptarse a cualquier mínimo detalle del molde, el estratificado [17] precisa una mayor viscosidad sin llegar a comprometer la fluidez y capacidad de registro del material final. En este punto es necesario matizar un aspecto: con anterioridad a cualquier proceso de colada es recomendable depositar electrostáticamente una película fina de partículas sobre la superficie del elastómero, que asegure una mayor y homogénea concentración de las mismas en todos los planos del objeto a reproducir, para proceder a verter la colada después. Esto permite aligerar las cargas y los pesos y abarata considerablemente los costos. En los procesos de estratificado, dada la mayor concentración de carga necesaria para su consecución, puede prescindirse de esta deposición.

Las probetas que mejores resultados ofrecieron, dentro del grupo de las aleaciones cúpricas y el hierro, se encontraban entre el 60 y el 90% p/p, mientras que para el aluminio las

proporciones más idóneas se observaron en casos con contenidos entre el 40 y el 65% p/p. En estos ratios los materiales reforzados metálicos se comportan de manera óptima tanto estructuralmente como estéticamente, y son capaces de alcanzar un registro absoluto de cualquier textura contenida en el molde de elastómero. Para el grupo de aleaciones cúpricas y hierro se evidenció que, en procesos de colada una proporción entre el 70 y el 80% de p/p era la óptima y, si previamente se había efectuado una deposición de partículas sobre el molde, la ratio de 70% p/p resultaba suficiente en todos los casos. Para estratificaciones de este grupo de metales una ratio entre el 80 y el 87% p/p resultó óptima, pudiéndose de nuevo reducir al 80% p/p con la previa deposición electrostática sobre la horma de elastómero. Para el aluminio, por su parte, una proporción de 50 a 60% p/p es adecuada para procesos de estratificación, y una ratio entre 40 y 55 p/p puede utilizarse en procesos de colada. Proporciones por debajo de las aquí recomendadas pueden utilizarse si se realiza la mencionada deposición, mientras que proporciones superiores a las antedichas resultan compuestos altamente viscosos, con grumos generalizados, con escaso poder adhesivo, difíciles de manipular, con un deficiente registro de texturas y, con un notable empeoramiento de sus propiedades mecánicas. Para concluir, se ha elaborado una tabla que incluye las proporciones óptimas para los diversos procesos de colada y estratificado con cada tipo de metal y tamaño de partícula aconsejado, así como sus equivalencias en volúmenes, en partes de resina/partes de metal y su correspondiente porcentaje total de metal en peso (Tabla 3) y que puede servir como orientación para el trabajo con este tipo de materiales en aplicaciones escultóricas, ornamentales y artísticas.

Tabla 3. proporciones óptimas de carga metálica en función de los procesos escultóricos y el uso de cada metal y sus equivalencias en volúmenes.

<i>Metal</i>	<i>Tamaño partícula (μm)</i>	<i>Estratificado (Peso) [partes de resina/partes de metal]</i>	<i>Estratificado (Volumen) [volumen resina/volumen en metal]</i>	<i>Contenido de metal promedio en peso % p/p</i>	<i>Colada (Peso) [partes de resina/partes de metal]</i>	<i>Colada (Volumen) volumen resina/volumen metal]</i>	<i>Contenido de metal promedio en peso % p/p</i>
Hierro	225	1/5,5 – 1/6	1/1,4	85 – 86	1/2,5 – 1/3	1/1,2	71 – 75
	106	1/4,5 – 1/5,5	1/1,3	82 – 85	1/2,2 – 1/3	1/1,1	69 – 75
	63	1/3,5 – 1/5	1/1,2	80 – 83	1/2 – 1/2,5	1/1	66 – 71
Bronce	225	1/5,5 – 1/6	1/1,4	85 – 86	1/2,5 – 1/3	1/1,2	71 – 75
	106	1/4,5 – 1/5,5	1/1,3	82 – 85	1/2,2 – 1/3	1/1,1	69 – 75
	63	1/3,5 – 1/5	1/1,2	80 – 83	1/2 – 1/2,5	1/1	66 – 71
Latón	225	1/6 – 1/6,5	1/1,4	85 – 87	1/4 – 1/4,5	1/1,2	80 – 82
	106	1/5 – 1/6	1/1,3	83 – 86	1/3,5 – 1/4	1/1,1	78 – 80
	63	1/4,5 – 1/5,5	1/1,2	82 – 85	1/3 – 1/4	1/1	75 – 80
Cobre	225	1/6 – 1/7	1/1,4	86 – 88	1/3,5 – 1/4	1/1,2	78 – 80
	106	1/5,5 – 1/6,5	1/1,3	85 – 87	1/3 – 1/3,5	1/1,1	75 – 78
	63	1/5 – 1/5,5	1/1,2	83 – 85	1/2,5 – 1/3	1/1	71 – 75
Aluminio	225	1/1,2 – 1/1,5	1/1,4	55 – 60	1/1 – 1,2	1/1,2	50 – 55
	106	1/1,2 – 1/1,4	1/1,3	55 – 59	1/0,8 – 1/1	1/1,1	45 – 50
	63	1/1 – 1/1,2	1/1,2	50 – 55	1/0,7 – 1/0,8	1/1	41 – 45

3.6 Morfología y apariencia de los metales artificiales. Los metales artificiales conseguidos con las mencionadas proporciones y tamaños de partícula, en resinas epoxi y poliéster resultan óptimos para el trabajo escultórico (Figura 4). Las partículas no son perceptibles a simple vista y la apariencia metálica queda así garantizada. Las piezas obtenidas a partir de moldes tienen una buena consistencia y dureza, su tacto es semifrío y su peso mucho más liviano de lo que cabe esperar desde el punto de vista organoléptico. Si la metodología es la correcta resulta difícil discernir si se trata de piezas metálicas fundidas o de metales artificiales.



Figura 4. Diversas reproducciones artísticas de medallones, obtenidas por colada en molde de silicona RTV, con un contenido metálico del 70% p/p, y un tamaño de partícula de 106 µm. De izquierda a derecha: epoxi-bronce, epoxi-latón, poliéster-hierro, poliéster-aluminio y poliéster-cobre. Obsérvese el acabado metálico, brillante y pulido, que caracteriza una elección óptima de proporción y tamaño de partícula metálica y un correcto trabajo de pulido de la superficie.

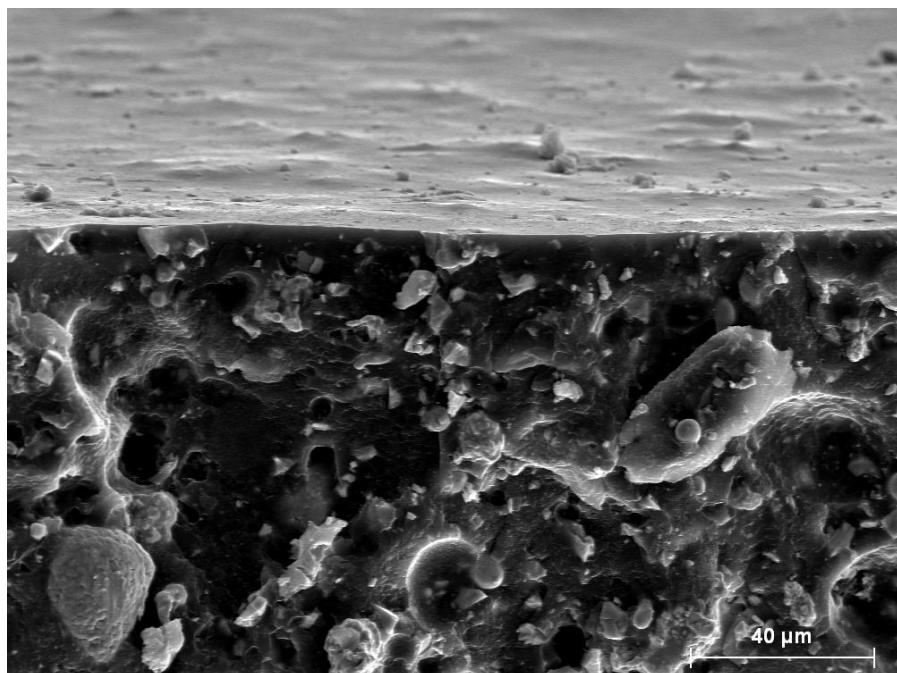


Figura 5. Imagen obtenida con microscopio electrónico de barrido de un hierro artificial con matriz de epoxi, con un contenido del 70% de metal p/p, y partículas atomizadas, de morfología irregular de 106 µm. La fotografía capta un ángulo de rotura, mostrando en la parte superior el perfecto registro de cualquier mínima irregularidad del molde.

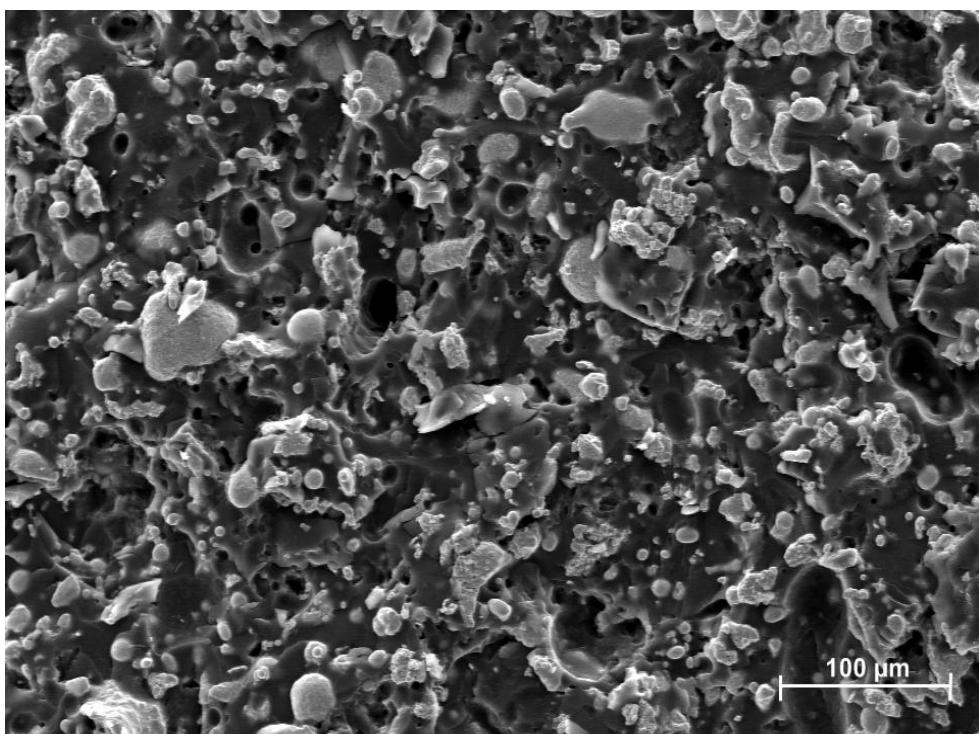


Figura 6: Imagen obtenida con microscopio electrónico de barrido de un bronce artificial con matriz de poliéster, con un contenido del 80% de metal p/p, y partículas atomizadas de morfología irregular de 63 μm . Obsérvese el conglomerado de las partículas irregulares y cómo esta morfología asimétrica contribuye a crear una trama estructural. Obsérvese también la presencia de partículas de tamaños menores contenidas de serie en el mencionado polvo metálico, que ayudan a llenar huecos entre partículas de tamaños mayores.

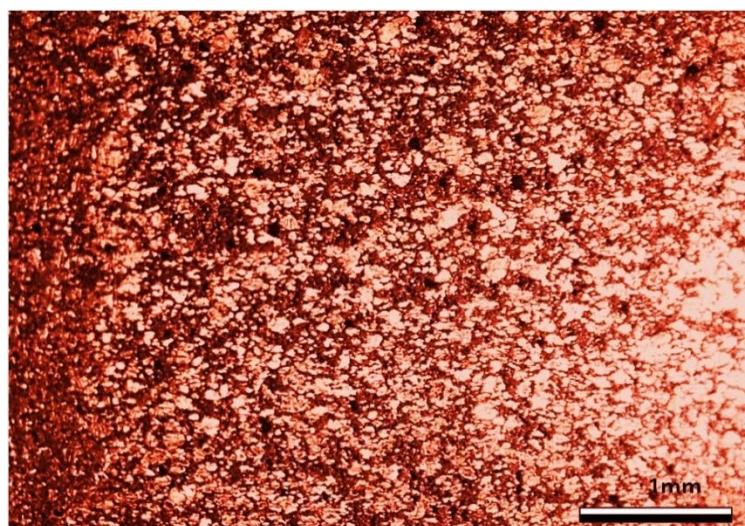


Figura 7. Imagen obtenida con lupa binocular, a 30X de un material reforzado de epoxi-cobre, con partículas de 212 μm en una proporción del 80% de metal p/p.

Cuando se observan los materiales reforzados mediante microscopio electrónico de barrido (MEB), puede apreciarse su morfología estructural y su aspecto formal. De nuevo, fueron las muestras con 70 y 80% p/p y partículas inferiores a 212 µm las que mejores resultados mostraron, conteniendo un equilibrio entre volumen de matriz y carga lo suficientemente elevado como para justificar unas correctas propiedades mecánicas y estructurales y, al mismo tiempo, un buen acabado metalizado (Figuras 5 y 6). En contraposición, los materiales reforzados con partículas de metal superiores a 212 µm fueron observados mediante lupa binocular evidenciándose una excesiva presencia de éstas, siendo más gravosa con el uso de partículas superiores a las 300 µm (Figura 7).

4. CONCLUSIONES

El presente estudio ha tenido por objetivo sistematizar los tipos, tamaños, y proporciones de carga susceptibles de ser utilizados con éxito en metales artificiales; materiales reforzados metálicos a base de polímeros termoestables utilizados para la emulación de metales en propósitos escultóricos y artísticos. Se ha evidenciado que las partículas de morfología irregular y, en segundo lugar las esféricas, ofrecen buenos resultados, con granulometrías entre las 212 y las 63 µm. Ambas resinas han realizado correctamente su función de matriz conglomerante, destacando la resina de poliéster. Se ha constatado que no existe una única proporción válida de carga, y que esta está en función del tipo de metal seleccionado y de la metodología escultórica que deba implementarse. De este modo, los investigadores que se ocupan de este tipo de materiales, los escultores y artesanos, así como los restauradores de patrimonio metálico, y cualquier persona interesada en este tipo de aplicaciones, ya disponen de una base orientativa sobre la cual pueden trabajar en función de necesidades e intencionalidad de resultados.

AGRADECIMIENTOS. Los autores quieren agradecer su colaboración a las doctoras *Carmen Marcos* del *Instituto de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico* (IDM) y a *Montserrat Lastras Pérez*, del *Instituto de Restauración del Patrimonio* (IRP), ambas de la *Universitat Politècnica de València* y miembros de este equipo de investigación. También a los catedráticos *Clara Gómez Clari*, y *Andrés Cantarero* del *Instituto de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Valencia*, por sus consejos y orientación así como por la cesión de espacios para el trabajo experimental. Finalmente, a *Joan Navarra*, de *Pometon España*, que colaboró suministrando muestras de diversos particulados para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- [1] García S “Los primeros polímeros que irrumpen en el panorama escultórico hasta el advenimiento de la segunda guerra mundial”, *Rev. Iberoam. Polímeros*, **8** (3), 182 (2007)
- [2] García S “Referencias históricas y evolución de los plásticos” *Rev. Iberoam. Polímeros*, **10** (1), 71 (2009)

- [3] Fernández-Villa S "Los plásticos en el arte y en el diseño hasta 1945, historia, tecnología conservación e identificación", Tesis doctoral. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid, 2010
- [4] Percy HM "New materials in sculpture", 2^a edición. Londres, Reino Unido: Alec Tiranti, 1965
- [5] Adams F L. *Experiments in cold bronze casting*. Tesis doctoral. Delaware: USA. University of Delaware, 1968
- [6] Spennik R. *Successful cold-casting and mould making*. Northfolk, 1^a edición 1976. Londres, Reino Unido. Stobart Davies Ltd., 1998.
- [7] Herrero M, Culebras M "El metal artificial en la obtención de reproducciones arqueológicas y escultóricas. Breve estado de la cuestión". En *Jornadas de Investigación Emergente en Conservación y Restauración de Patrimonio, EMERGE 2014*. Valencia: Instituto de Restauración del Patrimonio. Universidad Politécnica de Valencia, Universitat Politècnica de València, 461 (2014)
- [8] Gilroy D "The use of metal powder impregnated resins for replica and restoration work". *ICCM bulletin*, 2 (1), 30 (1976).
- [9] Engel G "Die Rekonstruktion eines silbernen Monumentalkreuzes aus der Karolingerzeit (Peterskirche zu Rom)" *Arbeitsblätter für Restauratoren*, 21, p.103–111 (1988).
- [10] Poncelet E, Texier, A "La restauration de la fontaine des Mers, Place de la Concorde, Paris", *Monumental*, 5 p. 138 (2001)
- [11] Negrete A "Las reproducciones de esculturas: del mármol a los materiales imitadores". En *Actas de los XIII Cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico (Reinosa, julio-agosto 2002)* Santander: Universidad de Cantabria, Santander, 2003, p. 77–88
- [12] Lowe A, Ahmon J, Halson, K. *The Dama de Elche*. 1^a edición, Madrid, España: Factum Arte, 2003
- [13] Mas X. *Estudio y caracterización de morteros compuestos para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas de elementos pétreos escultórico-ornamentales*, Tesis doctoral. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- [14] Crasborn J, Orrego M "La elaboración de réplicas: Un instrumento de conservación y protección al patrimonio cultural". En *XX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala 2006*, Ciudad de Guatemala, (Guatemala): Museo Nacional de Arqueología y Etnología, 2007, p. 187–199.
- [15] Martínez S "El dorado. Técnicas procedimientos y materiales", *Ars Longa*, 11, 137 (2002)
- [16] Herrero M, Mas X, Lastras M, Marcos M, Culebras M. "El 'bronze artificial' en la reproducción de objetos arqueológicos, escultóricos y ornamentales. Una solución para la conservación preventiva y la divulgación del patrimonio metálico". En *Actas del II Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico Segovia, Real Casa de Moneda, 1–3 de octubre de 2015*, Madrid: SECYR–UAM & CENIM–CSIC, 2016, p. 139–148.
- [17] Diez S "Técnica de la estratificación manual aplicada a la escultura: moldes y contramoldes". *Rev. Iberoam. Polímeros*, 11 (4), 208 (2014)
- [18] Copnall B "Sculpture in Industry", *Journal of the Royal Society of Arts*, 1966, 114, (5), p. 92–109 (1966)
- [19] De Bueno O "Introducción a los usos de la resina de poliéster y otros materiales". Buenos Aires (Argentina): Instituto Universitario Nacional del Arte, Departamento de Artes Visuales Prilidiano Pueyrredon, 2009
- [20] Bartholomew DA, Coates, B "Cold casting method and apparatus". U.S. Patent No 8,574,482, 5 Nov. 2013.
- [21] García S "Recomendaciones, salud y seguridad en la manipulación de las resinas", *Rev. Iberoam. Polímeros*, 14, (5), p. 233 (2013)
- [22] Wendon G "Developments in metallic pigments", *Pigment & Resin Technology*, , 1 (9), 27 (1972)
- [23] García S "Resinas de poliéster+ cargas de relleno = piezas volumétricas", *Rev. Iberoam. Polímeros*, 14(2), 105 (2013)
- [24] Brooks N "Mouldmaking and Casting". 1^a edición, Londres (Reino Unido), Crowood, 2005

- [25] Brooks N "Advanced Mouldmaking and Casting". 1^a edición, Londres (Reino Unido), Crowood, 2011
- [27] García S "Metodología de la colada directa aplicada a la escultura", *Rev. Iberoam. de Poímeros*, 7 (4), 270 (2006)