

DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN
DE BIENES CULTURALES

ANÁLISIS DE SISTEMAS MAGNÉTICOS APLICADOS A UNIONES DE FRAGMENTOS



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR

MEDINA AZAHARA RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

DIRIGIDA POR XAVIER MAS I BARBERÀ Y LUCAS PÉREZ GARCÍA

VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2017

Portada. Fotografía Xavier Mas-Barberà.
Edición Medina Azahara Rodríguez Rodríguez.

Universitat Politècnica de València

Departamento de Conservación y Restauración de Bienes
Culturales.

Tesis Doctoral



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Análisis de sistemas magnéticos aplicados a uniones de
fragmentos

Medina Azahara Rodríguez Rodríguez

Dirigida por

Dr. Xavier Mas i Barberà

Dr. Lucas Pérez García

Valencia, Septiembre 2017

A mis padres

A Fran

La Piedra.

El distraído tropezó con ella. El violento la utilizó como proyectil. El emprendedor construyó, con ella. El campesino cansado la utilizó como asiento. Para los niños fue un juguete. David mató a Goliat y Miguel Ángel le sacó la más bella escultura. En todos los casos, la diferencia no estuvo en la piedra, sino en el hombre. No existe piedra en tu camino que no puedas aprovechar para tu propio crecimiento (anónimo).

AGRADECIMIENTOS

Cuando me mudé temporalmente a Valencia para hacer el máster nunca imaginé terminar haciendo una Tesis Doctoral y quería agradecerte a ti, Xavier Mas por sembrar en mí la semilla de la investigación y dirigirme la tesis. Gracias por decirme que teníamos que complementarla con una codirección de un físico porque gracias a eso te conocí, Lucas Pérez. Gracias por explicarme un mundo tan distinto de una manera tan fácil y no solo eso, sino querer aprender arte y restauración e involucrarte como lo has hecho. Los dos me habéis hecho mejor persona, habéis estado años ayudándome, guiándome, enseñándome y dedicándome un tiempo preciado.

Querría agradecer al departamento Conservación y Restauración de Bienes Culturales por tener a mi disposición las instalaciones necesarias. También al departamento de Materiales de la UCM por dejar que sea una intrusa con “macro-cosas”, tratarme como una más y ayudarme en todo lo que he necesitado. Carlos, gracias. Sandra y Bea, os agradezco que me hayáis acogido, interesado e involucrado tanto que esta tesis no podría ser tal cual si no hubiera sido por vosotras. Gracias por ser mis compañeras y amigas.

Muchas gracias a mis padres, porque habéis estado ahí apoyándome e inflándoos de orgullo paternal que eso siempre anima en los momentos de mayor flaqueza. Sin vosotros no habría sido posible. A ti Fran, por ser mi compañero de viaje, mi apoyo, mi aliento. Por querer comprender todo y darme ideas. A mis hermanas, Lara y Ague porque sois mi ejemplo de perseverancia.

Gracias a todos los compañeros y amigos que de un modo u otro me habéis apoyado y ayudado y a llegar hasta aquí, en especial a Luisa y Nuria.

Que el olvido nunca toque el nombre de las personas que nos han ayudado, que nunca nos de amnesia de agradecimiento (Psicólogo Axel Ortiz).

Muchísimas gracias a todos.

M. Azahara Rodríguez

RESUMEN

Desde sus orígenes, el hombre ha tenido la necesidad de reparar utensilios con el fin de seguir usándolos. De igual modo, en las obras de arte esta intención de reparar y devolver la integridad a la pieza ha estado presente a lo largo de la Historia. Los procedimientos de reparación han evolucionado desde la Antigüedad hasta nuestros días. A raíz de estas premisas, la tesis doctoral que se presenta, plantea el estudio y la optimización de un método de unión de fragmentos mediante sistemas magnéticos. En este sentido, se propone un método de unión sencillo de usar que combina principios de Física de Materiales con criterios de Conservación y Restauración de Escultura y Ornamentos. Se planea como una alternativa al empleo de adhesivos estructurales, siendo un método reversible, poco invasivo y respetuoso con la obra de arte original, haciendo viable nuevos criterios de intervención en el ámbito del Patrimonio Cultural. El resultado ha sido el desarrollo de un modelo teórico que posibilita la predicción del comportamiento de las uniones y determina la distribución de las fuerzas magnéticas por la superficie de la junta consiguiendo estabilizarlas. En el cuerpo experimental de esta tesis se señalan los diferentes materiales, los procedimientos e instrumental empleados, aportándose unos resultados aplicables sobre casos reales. Las conclusiones fundamentales extraídas ponen de manifiesto la viabilidad del uso de sistemas magnéticos en uniones de prótesis y/o fragmentos en obras de arte.

RESUM

Des dels seus orígens, l'home ha tingut la necessitat de reparar utensilis amb la finalitat de seguir usant-los. De la mateixa manera, en les obres d'art aquesta intenció de reparar i tornar la integritat a la peça ha estat present al llarg de la Història. Els procediments de reparació han evolucionat des de l'Antiguitat fins als nostres dies. Arran d'aquestes premisses, la tesi doctoral que es presenta, planteja l'estudi i l'optimització d'un mètode d'unió de fragments mitjançant sistemes magnètics. En aquest sentit, es proposa un mètode d'unió senzill d'utilitzar que combina principis de Física de Materials amb criteris de Conservació i Restauració d'Escultura i Ornaments. Es planeja com una alternativa a l'ocupació d'adhesius estructurals, sent un mètode reversible, poc invasiu i respectuós amb l'obra d'art original, fent viable nous criteris d'intervenció en l'àmbit del Patrimoni Cultural. El resultat ha estat el desenvolupament d'un model teòric que possibilita la predicció del comportament de les unions i determina la distribució de les forces magnètiques per la superfície de la junta aconseguint estabilitzar-les. En el cos experimental d'aquesta tesi s'assenyalen els diferents materials, els procediments i l'instrumental emprats, aportant-se uns resultats aplicables sobre casos reals. Les conclusions fonamentals extretes posen de manifest la viabilitat de l'ús dels sistemes magnètics en unions de pròtesis i/o fragments en obres d'art.

ABSTRACT

From ancient times, humans have had the need to repair tools with the aim of keeping using them. In the same way, the need for repairing art work has been present along the History, to return the integrity of the pieces. The repairing procedures have evolved from the antiquity to present time. Following these premises, this doctoral thesis proposes the study and optimization of a joining method of fragments using magnetic systems. In this sense, it is proposed a joining method easy to implement that combines Material Physics and Conservation and Restoration of Sculpture and Ornaments. This method is presented as an alternative to the use of structural adhesives. It is reversible, little invasive and respectful with the original artwork, allowing new intervention criteria, viable in the field of Cultural Heritage. The main obtained result has been the development of a new theoretical model that allows determining the optimal distribution of the magnetic forces in the surface of the joining junction, making possible to stabilize it. In the experimental part of this thesis, the different materials, procedures and instrumental employed, are exposed. The model and results have been applied to real cases. As a main conclusions, the study reveals the viability of the use of magnetic systems in the joining of prosthesis and/or fragments in art pieces.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	19
2. OBJETIVOS	25
3. ESTADO DE LA CUESTIÓN	29
3.1. Uniones desde la Antigüedad hasta el siglo XX	31
3.2. Uniones en la actualidad	40
3.2.1. Adhesivos del siglo XX	41
3.2.2. Varillas de refuerzo que se utilizan en la actualidad	44
3.2.3. Anclajes y pernos especiales en escultura y arquitectura.....	51
3.3. Los imanes en Conservación y Restauración	52
3.3.1. Imanes utilizados como sistema expositivo de obra en papel y textil.....	53
3.3.2. Imanes utilizados como fijación de pintura mural u objetos a un nuevo soporte	55
3.3.3. Imanes utilizados como herramienta/utensilio.....	57

3.3.4. Imanes utilizados como Sistema de unión de fragmentos y de prótesis.....	60
3.4.Principios físicos aplicados a las uniones	67
3.4.1. Mecánica.....	68
3.4.2. Fuerzas	69
3.5.Propiedades fundamentales de los imanes	75
3.5.1. Imanación y fuerza magnética	75
3.5.2. Temperatura de operación máxima y de Curie	76
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	77
4.1.El modelo teórico	79
4.2.Materiales	83
4.2.1. Soportes inorgánicos y orgánicos.....	83
4.2.2. Sistemas magnéticos y polvos metálicos	85
4.2.3. Adhesivos.....	87
4.3.Metodología experimental	88
4.3.1. Preparación de probetas.....	88
4.3.2. Procedimiento de ensayos.....	93
4.3.2.1. Ensayos de tracción.....	93
4.3.2.2. Coeficientes de rozamiento	96
4.3.2.3. Estudios de Estática.....	98
4.3.2.4. Medida de campo magnético	99
4.3.2.5. Reversibilidad del sistema mediante calentamiento controlado	100
4.3.2.6. Simulación de campo magnético	101

4.3.2.7. Ensayo de envejecimiento natural a la intemperie: influencia de la temperatura y la humedad relativa	102
4.3.2.8. Estudios microscópicos	103
4.3.2.9. Ceras magnéticas	104
4.3.3. Instrumentación	105

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 107

5.1. Caracterización de imanes	109
5.2. Ensayos de tracción con adhesivos	115
5.3. Coeficientes de rozamiento	120
5.4. Estudios de estática	122
5.5. Reversibilidad del sistema mediante calentamiento controlado ...	126
5.6. Medida de campo magnético	128
5.7. Simulación de campo magnético	130
5.8. Ensayo de envejecimiento natural a la intemperie: influencia de la temperatura y la humedad relativa	132
5.9. Estudios microscópicos	137
5.10. Ensayo de tracción de imanes oxidados	143
5.11. Ceras magnéticas	144

6. APLICACIÓN EN CASOS DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ELEMENTOS ESCULTÓRICOS 149

6.1. Manual de aplicación de imanes en CR de escultura-ornamentos	151
6.2. Aplicaciones en casos de CR de escultura	159

6.2.1. Caso 1. Mano y brazo de Diadúmeno	159
6.2.2. Caso 2. Brazo de Diadúmeno en cera.....	165
6.2.3. Caso 3. Virgen de los Desamparados de Silvestre d'Edeta (obra real)	171
7. CONCLUSIONES.....	177

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

BIBLIOGRAFÍA



1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Desde sus orígenes, el hombre ha creado utensilios, herramientas y objetos y ha sido consciente de que éstos se rompían, bien por desgaste, por un uso inadecuado o de modo intencionado. Estos hechos han motivado la necesidad de repararlos con el fin de seguir ejerciendo su función.

De igual modo, en las obras de arte esta intención de reparar y devolver la integridad a la pieza ha estado presente a lo largo de la historia. La reparación y reutilización de piezas fracturadas o mutiladas se debe a razones sociales, estéticas, culturales o religiosas. Asimismo, los procedimientos de reparación han presentado diversas controversias a lo largo de la historia tal y como se comentará en el capítulo siguiente.

La Carta de 1987 de la Conservación y Restauración de los Objetos de Arte y Cultura, en su artículo 7 concerniente a las operaciones de restauración que afectan a la naturaleza material de las obras, considera como operaciones admitidas “las inserciones con finalidad estática y conservadora de la estructura interna con tal de que, una vez terminada la operación, no se aprecie en el aspecto ni alteración cromática ni de la materia, que pueda ser percibida en la superficie”. Asimismo, el artículo 8 plantea la intervención sobre la obra que “debe ser realizada de tal manera y con tales técnicas y materias que se pueda tener la confianza de que en el futuro no resultará imposible una nueva y eventual intervención de conservación y restauración”. En el Anexo D sobre instrucciones para la ejecución de intervenciones de conservación y restauración de obras de carácter plástico, pictórico, gráfico y de artes aplicadas, en el apartado de previsiones que hay que tener en cuenta en la ejecución de las intervenciones de conservación y restauración en obras de escultura se expone: “en el caso de esculturas reducidas a fragmentos, el uso de posibles pernos, soportes, etc. deberá estar subordinado a la elección de metales no oxidables”. Sin duda, queda clara la metodología en cuanto a intervenciones de unión de fragmentos en objetos artísticos.

A raíz de estas premisas, esta tesis doctoral plantea el estudio y optimización de un método de unión de fragmentos mediante sistemas magnéticos. Se trata de una técnica que usa imanes, método escasamente tratado en la literatura. En los pocos casos en los que se ha empleado hasta la fecha, el procedimiento a seguir ha sido a criterio intuitivo del restaurador. Con el fin de garantizar la estabilidad plena de la obra de arte y recuperar su lectura estética se propone un método de unión sencillo de usar que combina principios físico-químicos con criterios restaurativos. Es una alternativa al empleo de adhesivos estructurales, es reversible, poco invasiva y respetuosa con la obra de arte original.

La investigación se ha estructurado en dos partes fundamentales. Una primera revisa los sistemas de unión a lo largo de las diferentes etapas de la historia, desde la antigüedad hasta nuestros días destacando las tipologías, características, técnicas de aplicación y usos, para finalmente responder al cómo y para qué se han utilizado los imanes en el campo de la Conservación y Restauración. La segunda parte hace referencia al cuerpo experimental donde se señalan los diferentes materiales, procedimientos e instrumental empleados, los apartados de resultados/discusión y, exposición del método sobre varios casos de conservación y restauración de escultura. Finalmente, se exponen las conclusiones fundamentales extraídas del estudio.

En sí, esta línea de investigación ha combinado la Física de Materiales y los principios de la Conservación y Restauración de Escultura y Ornamentos, viabilizando nuevos criterios de intervención en el ámbito del Patrimonio Cultural. El resultado ha sido el desarrollo de un modelo teórico que posibilita la predicción del comportamiento de las uniones y determina la distribución de las fuerzas magnéticas por la superficie de la junta consiguiendo estabilizarlas. El modelo teórico se ha aplicado a varios supuestos reales y a una obra original: la Virgen de los Desamparados (1954) del artista Silvestre de Edeta (Liria, Valencia).

Los materiales empleados han sido varios pétreos (calcarenita, mármol y yeso), dos materiales leñosos (madera de pino y roble) y, un material ceroso (cera de abejas). Estos materiales han sido ampliamente usados en el campo de la escultura y los ornamentos a lo largo de las diferentes etapas de la creación artística.

Con todo ello, la utilización de sistemas magnéticos en uniones se presenta como una solución alternativa que permitirá colocar prótesis o unir fragmentos en obras originales, tanto en esculturas como en elementos arquitectónicos y ornamentales.



2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

Como se ha venido adelantando en líneas anteriores, uno de los objetivos principales de esta tesis doctoral se ha centrado en estudiar y aplicar sistemas magnéticos en uniones de fragmentos de elementos escultórico-ornamentales en el ámbito de la Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Este objetivo resulta importante cuando se observa la escasez de textos versados sobre este tema.

Como objetivos específicos se plantearon:

- Estudiar las características físicas de los materiales magnéticos en función de las propiedades físico-mecánicas de los diferentes materiales escultórico-ornamentales. Para ello se requiere:

- Caracterizar las propiedades físicas de los diferentes materiales (magnéticos, escultóricos, entre otros).

- Calcular los coeficientes de rozamiento estático de los materiales escultóricos.

- Determinar el comportamiento de los imanes mediante estudios de estática.

- Someter los materiales magnéticos a ensayos de envejecimiento acelerado para conocer su comportamiento tras la aplicación y analizar su posible deterioro.

Asimismo, se consideró también como objetivo principal, desarrollar un modelo teórico que posibilitara la predicción del comportamiento de las uniones y determinara la distribución de las fuerzas magnéticas.

Como objetivos específicos se fijaron:

- Determinar las cualidades óptimas que debe reunir el sistema magnético de cara a la unión ideal.

- Realizar mediciones y simulaciones de campo magnético para optimizar las configuraciones.
- Proponer unas pautas de uso del modelo teórico en procesos de reintegración volumétrica de modo que cualquier usuario pueda acceder a los datos de forma clara y rápida.
- Aplicar el modelo teórico en obra real para corroborar que la aplicación es viable.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Las uniones en las obras de arte se vienen dando desde que existen las mismas. La intención de reparar y devolver la integridad a la pieza está presente a lo largo de la historia ya que se busca subsanar o poder reutilizar una pieza fracturada o mutilada por diversos motivos sociales, culturales o religiosos.

3.1. Uniones desde la Antigüedad hasta el siglo XX.

Desde sus orígenes, el hombre es creador de utensilios, herramientas y objetos varios. Ha sido consciente de que las piezas se rompen, bien por desgaste, por su mal uso o intencionadamente. Estos motivos le han arrastrado a una necesidad por reparar, para que esos objetos, puedan seguir ejerciendo su función. Por tanto es muy común encontrar reparaciones antiguas en piezas arqueológicas de las primeras manifestaciones humanas. Se pueden diferenciar tres tipos de uniones utilizadas para reparar: las mecánicas (como es el atornillado o el cosido), las soldaduras y las adhesivas (Oñoro, 2007).

Desde la Antigüedad han utilizado diversos adhesivos naturales. Los más generalizados son los de origen proteico tales como gelatinas de pescado y colas de animales. También se han utilizado las resinas naturales como la goma laca, cuyo uso se ha prolongado en el tiempo hasta el siglo XIX. Otros materiales empleados son la brea, la albúmina, la cera de abeja, engrudos de almidón, caucho y yesos, entre otros. Todos estos adhesivos se ven sujetos a alteraciones como la oxidación, pérdida de adhesividad e insolubilidad (Koob, 1998, 49-67).



Figura 1. Jarra trilobulada tardo celtibérica (S. I a.C.) con huellas de lañas, procedente de la Necrópolis de Las Ruedas (Padilla de Duero, Valladolid), Museo de Valladolid. (Fotografía extraída de Pátina nº13, 2006. 79 p.)

En cuanto a los sistemas de refuerzo, también su utilización se remonta hasta la Edad de Bronce. Por ejemplo, en material cerámico, se han usado elementos de cosido tales como ramas, tendones o hierbas que, actualmente y en ocasiones, solo queda como testigo de esa intervención los orificios (Echevarría, 2006:75-86). Este sistema de unión mediante grapado se conoce como lañado (figura 1) (Lastras, 2007)¹ y fue evolucionando a otros materiales tales como plomo, cobre, bronce o hierro. Es importante destacar el uso del hierro como sistema de unión ya que se ha utilizado durante toda la historia y, sin embargo, ha ocasionado importantes daños en las obras de arte expuestas a niveles de humedad

¹ El lañado consiste en realizar unos orificios cercanos a las zonas de fractura, sin que se rompa la pieza. Estos orificios permitían el cosido de las fracturas o fisuras. Los orificios del lañado se han venido practicando desde el neolítico hasta nuestros días de forma continua, incluso hoy en día se sigue realizando esta práctica en algunas zonas menos desarrolladas. Evidentemente esta técnica ha provocado una serie de daños irreversibles en las piezas, desde el momento en que se realizaban los orificios y la colocación de las grapas a presión.

elevados². También se encuentran otros tipos de refuerzos como cinchas, abrazaderas y pletinas en objetos tridimensionales, sobre todo en material etnológico cerámico (Dávila, 2011:180-206).

Las primeras manifestaciones humanas con la intención ya no de meramente reparar sino de conservar y restaurar se encuentran en Egipto y Oriente Próximo. La búsqueda de la eternidad y la conservación de la vida eterna se tenían presentes en la elección de los materiales usados para las obras de arte. De hecho, los artistas y en especial los escultores, eran llamados “conservadores de la vida” por la función que tenían las esculturas de unir la vida del representado con la representación y vencer a la muerte con la eternidad del material (Macarrón, 2002: 19).

A medida que se sigue avanzando a lo largo de la historia, se continúan utilizando métodos de unión muy similares, siendo realmente la finalidad la razón del cambio. Así pues, Roma es caracterizada por su imperialismo y conquista, apropiándose de obras de arte y readaptándolas. Esta actitud es determinada por la ideología política y económica en busca de enriquecimiento y poder; también por la religión y una cultura antropológica, híbrida y de fuertes contrastes que reclama dominio y coleccionismo. Un ejemplo de este uso es la intervención datada en el siglo III d.C sobre la *Victoria de Brescia*, escultura en bronce de origen griego que se readapta al gusto romano añadiéndole un par de alas. Para ello, se le practicaron dos orificios que albergaron unos pernos de bronce sobre los que se encajaron unos clavos (Macarrón, 2002:35). En el mismo período también se hallan ejemplos de reutilizaciones de esculturas romanas dado que debían de adaptarse a las nuevas modas y cánones establecidos. En algunos casos, dichas esculturas se destinaban a portar el retrato del nuevo propietario, como se observa en la *diosa Azuara* del Museo de Zaragoza, escultura en mármol que conserva los vástagos de hierro utilizados para unir las manos y

² Este material, al oxidarse, aumenta su volumen y ocasiona fracturas nuevas además de manchas.

la cabeza (Moreno; Escartín, 1996). Asimismo, para embellecer estancias con placas de mármol, los romanos sujetaban éstas a la pared con pernos en forma de “L”, bien de bronce o de hierro y rellenaban las posibles cavidades con mortero (Guiliani, 2006).

Los romanos también practicaban una técnica propia para reparar las partes de esculturas dañadas. Para adaptar el brazo a su lugar, dice M. Lechat, “los escultores horadaban en el codo una profunda muesca, unas veces cuadrada pero más frecuentemente circular; el antebrazo se ajustaba por medio de un sólido vástago de forma también circular; se comprimía en la muesca; se practicaba un agujero de un centímetro aprox. atravesando todo el espesor del mármol, por el centro del vástago, y a través de ese orificio se colaba plomo, disimulando su terminación. A veces se limitaba a la adhesión del vástago en la muesca con una materia blanca, reducida a fino polvo, similar al yeso, aunque podría tratarse de cal” (Arjonilla, 1997:34-41).

Existen textos de carácter jurídico de Sexto Pomponio y Julio Paolo, de la misma época, que tratan de intervenciones de eliminación de partes añadidas en esculturas para destacar otras. Son interesantes las distinciones que se hace de los dos tipos de soldaduras utilizadas en la época, con hierro y con plomo:

[...] “un propietario no puede reclamar lo que “accidentalmente” se ha unido a otra cosa mientras permanezca unido; solo señalarlo para que se separe y luego reclamarlo. Cassio mantiene que lo que estuvo unido por la ferruminatio se funde en la unidad de la parte mayor, y lo que una vez se ha enajenado ya no puede volver a su dueño anterior; la ferruminatio logra una fusión a través de la materia, lo que no ocurre con la unión con plomo (plumbatura). Entonces, si has unido el brazo de tu estatua a la mía, ya no es tu brazo, porque toda la estatua se reúne en un único espíritu” (Macarrón, 2002:44).

La Edad Media comprende una etapa de reutilización y aprovechamiento de materiales para otros fines ya sean defensivos, funcionales o con nuevos significados. Por tanto se encuentran adaptaciones, sustracciones, sustituciones, recomposiciones y destrucciones como las producidas por las invasiones bárbaras que bien, eran un daño colateral o eran producidas para aprovechar el material para otros fines. Se producen muchas fundiciones de obras de metal y calcinaciones de esculturas para obtener otros materiales. De hecho los templos, termas y teatros sirven como canteras de mármol o como hornos para obtener cal usada para argamasas, como es el caso de los hornos que había entre el Capitolio y el Tíber. Si es cierto que se encuentran reparaciones de esculturas en madera en las que se incorporan espigas de madera o de metal y clavos. Durante los siglos XII y XIV con motivo del auge demográfico se produce un aumento en la producción, en los avances técnicos, en el artesanado y el comercio que propicia un arte más humanizado siendo las intervenciones no solo meramente utilitarias sino determinadas por el gusto imperante. El control de los gremios de artesanos, de canteros y albañiles era muy fuerte por lo que los materiales se escogían cuidadosamente por el maestro atendiendo a diversas propiedades como resistencia, dureza, adherencia de los morteros, presencia de pelos y vetas (Macarrón, 2002:45-58), entre otros factores.

En el Renacimiento comienza una nueva forma de pensamiento que se ve plasmada en todas las ramas del conocimiento. Hay que destacar el desarrollo de las matemáticas y las ciencias experimentales. También la filosofía correlacionada con el racionalismo y con el humanismo que exalta una orientación pedagógica. El arte no va a ser una excepción ni tampoco las intervenciones sobre él. El coleccionismo de antigüedades, con su carácter esteticista, da lugar a restauraciones con más hincapié en la parte estética que en la histórica. Las intervenciones sobre las estatuas fluctúan entre una visión iconográfica y fetichista, aunque desde un enfoque bastante más respetuoso (Macarrón, 2002:69). Un gran ejemplo de

intervención de la época y precursora de la restauración tal y como se conoce en la actualidad, son las intervenciones que se llevaron en el conjunto escultórico del *Laocoonte* en este período. Por primera vez se quiso intervenir una obra para restituir elementos faltantes desde el respeto al original y la reversibilidad. De hecho, Miguel Ángel talló un brazo en mármol para *El Padre* que no llegó a colocar, pero si excavó un profundo hueco en forma de “L” en el hombro para tal fin (Martínez *et al*, 2008). Otro ejemplo de unión de fragmentos de esa época es la intervención realizada en *El David* de Miguel Ángel, escultura que fue fracturada tras arrojarle un banco desde el Palacio de la Signoria durante los combates transcurridos para expulsar a los Médicis de Florencia en 1527. Vasari y Salviati recogieron los trozos y, en 1543, Cósimo restauró el brazo utilizando pernos de cobre (Macarrón, 2002:35).

En el siglo XVII y a pesar de que va apareciendo un sentimiento de conservación del original, también siguen presentes las adaptaciones a nuevas modas. Muchísimas obras devocionales en madera fueron remodeladas para incorporar atributos de orfebrería o convertirlas en imágenes de vestir. Estas piezas se incorporaban con clavos y tornillería en la mayoría de los casos (Gañán, 2011).

En época del Barroco se escribieron recetarios de diversos restauradores en las que se narraba cómo hacer reconstrucciones en mármol poniendo cuñas y estuco con cera de carnauba y colofonia en las zonas pequeñas o difíciles. En las zonas más visibles, se adicionaba a esa mezcla polvo de mármol (Macarrón, 2002:94). Las proporciones que Orfeo Boselli proponía eran diferentes a las de otros autores de la misma época como Raffaello Borguini o Agostino Del Riccio. Éste último incorporaba a la mezcla trementina y almáciga. Además, los pernos que Boselli recomendaba eran de hierro mientras que los que Borguini indicaba que se debían utilizar eran de cobre o de bronce. Un ejemplo que ilustra estas recetas es la colección de escultura romana en mármol de Carrara del Palazzo Lancellotti.



Figura 2. Imagen que muestra el perno de hierro de corte cuadrangular en el brazo izquierdo de una de las esculturas de mármol del Palacio Lancellotti. (Fotografía extraída de Materials and techniques used in the 17th century restoration of sculptures from the antiquities collection of the palazzo Lancellotti ai Coronari. 13 p).

Los fragmentos de los dos frisos con escenas de caza están unidos con un compuesto resinoso a base de colofonia y polvo de mármol fijado con pernos de hierro. En *la Estatua de Hombre Desnudo* situada en la ventana norte, los elementos más grandes se fijaron con pernos de hierro de corte cuadrangular, de más de dos centímetros de ancho (ver figura 2). Dichos pernos se fijaron en un extremo con plomo y en el otro con resina de

colofonia. El procedimiento seguido, según la literatura, fue el siguiente: se vertía plomo en la parte a unir donde no había posibilidad de derrame y posteriormente se fijaba el otro extremo con la resina. Las uniones de fragmentos de menor tamaño se realizaban con vástagos de bronce. Además, los relieves fueron sujetos a la mampostería con clavos de hierro y abrazaderas en forma de “L” (Danesi *et al.*, 2008:117-134). Otro caso similar es la intervención que se realizó en esta época a la escultura del *Gladiador Borghese*, mármol griego que posee pernos metálicos y polvo de mármol aglutinado con cera de abeja como masilla (Tapol, 2005:139-153)³. De igual modo se procedió en el conjunto en mármol *Castor y Polux* que, al llegar a España desde Roma, presentaba desprendidas las antiguas intervenciones por motivo del viaje. Felipe V mandó a unos escultores readaptar dichas piezas. Se realizó con pernos de plomo, yeso y mármol (Macarrón, 2002:133). Si había pérdidas de atributos éstos se rehacían, como ocurrió en el caso de *la Virgen del Oratorio*, obra en terracota del siglo XVI que, en 1729, le restablecieron el brazo y el pie del niño en madera y le insertaron varias espigas (Escudero, 2009:183-194). Cabe citar también, el caso de una escultura en mármol del dios *Apolo*, de origen greco-romano, que solo mantenía original la parte del torso. El resto de los miembros fueron añadidos a finales del siglo XVIII y atribuidos al escultor Carlo Albacini que los unió con varillas de hierro ancladas con resina de colofonia y plomo fundido. Como en muchas ocasiones ha ocurrido dicha escultura fue intervenida de nuevo a finales del siglo XIX o principios del XX, insertándole un grillete en la base de forma circular y clavijas de cobre y latón unidas con magnesia y azufre (Fendt, *et al.* 2006:302-309).

En el período romántico, el criterio general fue la no intervención y, en caso de llevarla a cabo, debían tomarse las medidas justas tal y como se señala en el siguiente testimonio ante un proceso de intervención:

³ Se detectaron los pernos con radiografía y las masillas de relleno con luz ultravioleta.

“La restauración de estatuas, principalmente de las antiguas, en mármol, presenta todavía más dificultades que la de los cuadros, y exige no menos escrúpulos. Se restauran o reemplazan fácilmente ciertos fragmentos poco importantes de una figura, tanto por medio de yeso coloreado que se acerque lo más posible al tono general, como por medio de tendones o espigas de cobre. Pero en general, la restauración de estatuas debería circunscribirse a la realización de los trabajos estrictamente necesarios para dar consistencia a la obra” (Martínez, *et al.* 2008).

Como se ha comprobado a lo largo de estas líneas, durante todos estos siglos se han utilizado metodologías muy similares para intervenir rupturas presentes en las esculturas y, obras en general. Sin embargo, será a partir de la Revolución Industrial cuando se produzca un cambio importante en las intervenciones gracias a las nuevas técnicas de registro e inspección. Por ejemplo, el desarrollo de la técnica radiográfica da la posibilidad de explorar por primera vez las obras de arte permitiendo analizar, en el caso de las esculturas, estructuras internas, sistemas de unión, clavos y tornillería o intervenciones de uniones anteriores (Madrid, 2005:15)⁴ (ver figura 3). Además, a finales del siglo XIX surgen varias teorías y criterios en el campo de la conservación y restauración arquitectónica que comprenden tres corrientes significativas: la corriente estilística defendida por Violet le Duc, la antirrestauradora de John Ruskin y, una corriente intermedia defendida por Camilo Boito (Macarrón, 2002:137). Estas tendencias marcarán los modelos a seguir en las intervenciones de conservación y restauración moderna en todos los ámbitos del Patrimonio Cultural.

⁴En 1896 se realiza la primera radiografía sobre una pintura y, un año después, se aplicó al estudio de una obra de Durero.

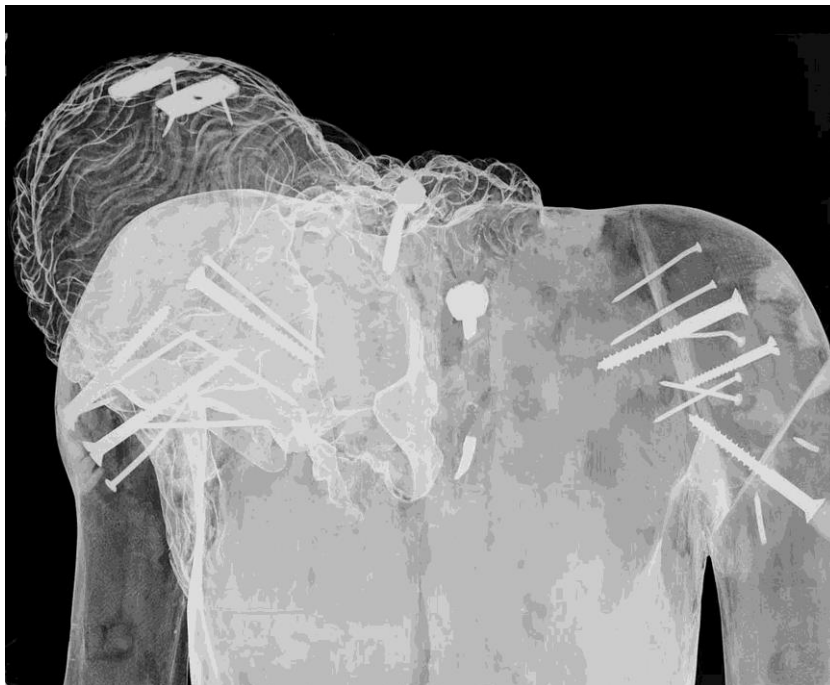


Figura 3. Radiografía digital del Cristo del descenso de los Garrigues. Detalle de las intervenciones en los hombros. (Fotografía extraída de Arché. Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV - Núm. 1. 2006. 99 p.)

3.2. Uniones en la actualidad.

Los criterios de intervención actuales en conservación y restauración establecen como axiomas esenciales la mínima intervención, la acción lenta y controlada, el respeto por el original y la recuperación de la lectura estética en su justa medida y siempre que sea posible. En este sentido, los materiales empleados deben cumplir estos principios dado que, tras incorporarlos en una intervención restauradora, pasan a ser parte de la obra de arte restaurada. Si bien es cierto que, los criterios en restauración de escultura, concretamente en fases de reintegración volumétrica, obedecen a diversas razones más específicas. Desde el punto de vista físico, se ejecuta

cuando es necesario mantener el equilibrio y la estabilidad de la obra. El nivel estético se ve comprometido cuando el volumen reviste un proceso de degradación, dado que es este volumen el que realmente caracteriza a la obra escultórica (Macarrón y González, 1998:124). Un caso particular surge con el proceso de anastilosis, es decir, la recomposición de fragmentos originales a partir de información documentada. Este tipo de intervención es admitida, tanto por la Carta de Venecia de 1964 como por la Carta italiana del Restauo de 1987. En esta última se señala:

“Anastilosis documentada con seguridad; recomposición de obras hechas trozos; sistematización de obras con lagunas, reconstruyendo intersticios de poca entidad con técnica claramente diferenciable a simple vista, o con zonas neutras colocadas en un nivel diferente al de las partes originales; o dejando a la vista el soporte original; en todo caso, no integrando jamás exnovo zonas con figuración, o insertando elementos determinantes para la imagen de la obra”⁵.

En cuanto a las intervenciones en general, la misma Carta del Restauo indica que “toda intervención sobre la obra, o en las proximidades de la misma, [...], debe ser realizada de tal manera y con tales técnicas y materias que se pueda tener la confianza de que en el futuro no resultará imposible una nueva y eventual intervención de conservación y restauración”⁶.

3.2.1. Adhesivos del siglo XX.

Desde bien entrado el siglo XX, los adhesivos sintetizados en laboratorio han evolucionado a pasos agigantados mejorándose los sistemas de refuerzo de tipo pernos y varillas. No hay que olvidar los fines para los que han sido creados puesto que la mayoría de los productos utilizados en la

⁵ Carta de 1987 de la conservación y restauración de los objetos de arte y cultura. Art. 7c.

⁶ *Ibidem*. Art. 8

actualidad en tratamientos de Restauración no son específicos de este campo. De igual modo, subrayar también el gran desconocimiento sobre muchos productos en cuanto a su envejecimiento se refiere, dado que muchas formulaciones están sujetas a patentes y al secretismo de su composición. Aun así, los adhesivos que se utilizan hoy en día confieren una estabilidad y un buen comportamiento siendo cada vez mayor la presencia de estudios técnicos (Fort, 2007:71-83). En este sentido, destacan las resinas epoxídicas, que son las más empleadas en escultura por su resistencia y estabilidad estructural, sin embargo, las resinas acrílicas son bastante más reversibles. Elegir unas u otras viene dado por la resistencia del adhesivo a la tensión y al estrés en la junta de unión (Podany, *et al.* 2001:15-33).

En cuanto a los procesos de encolado de piezas se vienen utilizando desde el siglo pasado diversos tipos de adhesivos (Borgioli, 2006). Los adhesivos poliméricos del tipo nitrocelulósicos y cianoacrilatos entrañan problemas motivados por un inadecuado envejecimiento y, es por ello, que tienden a usarse de manera puntual. Los cianoacrilatos son poco reversibles y pueden colorear la pieza, mientras que los nitrocelulósicos en un primer estadio son bastante estables en cuanto a coloración y reversibilidad al llevar plastificantes pero, se vuelven rígidos y quebradizos conforme envejecen.

Las resinas que se utilizan de forma generalizada para realizar uniones en escultura se pueden dividir en dos grandes bloques atendiendo a su cadena lineal o ramificada, o sea resinas termoplásticas o resinas termoendurecibles, respectivamente. Dentro de las resinas termoplásticas, destacan las acrílicas y las vinílicas. Las resinas acrílicas adquieren distintas características dependiendo de las uniones de sus monómeros. La más utilizada es el Paraloid B72® que es un copolímero de etil y metilacrilato. Se comercializa en perlas y se disuelve en un disolvente orgánico antes de usarse. Aunque no suele emplearse como adhesivo estructural, sí forma

parte como estrato intermedio en determinadas intervenciones dado su alto nivel de reversibilidad. Se trata de una resina cuya temperatura de transición vítrea oscila entre los 35-40 °C y esta propiedad limita su uso en procesos de unión a la intemperie y, más concretamente, en tratamientos de conjuntos de piedra a gran escala (Podany *et al.*, 2001:15-33). Otras resinas acrílicas bien conocidas es el Acril 33® (copolímero acrílico) y el Plextol B500® (butilacrilato y metilmetacrilato). Son dispersiones acuosas, mucho más inocuas para el restaurador.

También, se vienen utilizando en restauración desde la década de 1970 las resinas vinílicas dada su facilidad de manejo. Se presentan en emulsión acuosa lista para ser utilizadas en frío y la posibilidad de diluirse en disolventes. Algunos estudios señalan que cambian cromáticamente, pierdan transparencia, aumentan de pH por liberación de ácido acético y se vuelven más irreversibles conforme envejecen (Campo *et al.*, 2009). Ejemplos de este tipo de adhesivos vinílicos actualmente comercializados son el PVA (homopolímeros de acetato de polivinilo), Mowilith DS 5/2® (dispersión acuosa de acetato de vinilo y éster butílico del ácido maleico) (Mas-Barberà, 2011:136), y Mowital B 60HH® (polímero de vinilbutiral), utilizados para encolados de piezas arqueológicas⁷.

En cuanto a las resinas termoendurecibles o termoestables empleadas en tratamientos de restauración cabe destacar las resinas epoxídicas y las de poliéster. Se trata de resinas utilizadas ampliamente como adhesivo estructural. Las resinas epoxi comenzaron a comercializarse en los años 50 del siglo XX y las de poliéster poco antes. Las características principales que debe reunir un buen adhesivo en el campo de la restauración son buena estabilidad en el tiempo (envejecimiento), elevada adherencia y resistencia a las tensiones, facilidad en la aplicación, mínima contracción y reversibilidad. Sin embargo, esta última queda muchas veces relegada a un segundo plano en favor de las otras. Ciertamente es que cualquier error en el

⁷ CTS EUROPE.

empleo de estas resinas termoestables conlleva peligros sabidos por el profesional donde solo le queda ablandar e hinchar la resina con disolventes bastante tóxicos, debilitando la unión. Todo ello, unido a la tensión aplicada con el fin de separar dicha unión provoca daños volviéndose una intervención de alto riesgo para la obra de arte. Así queda recogido en varios estudios donde desvelan que la mayoría de las resinas epoxis usadas en restauración son más resistentes de lo necesario, incluso por encima de la obra original (Podany, *et al.* 2001:15-33).

3.2.2. Varillas de refuerzo que se utilizan en la actualidad.

Las varillas utilizadas en el ámbito de la conservación y restauración son de dos tipos: varillas metálicas (acero inoxidable o titanio) y varillas de polímeros reforzados con fibra (de ahora en adelante FRP)⁸, que son generalmente las más usadas (Polacek; Jancar, 2008:251-259). Al igual que los adhesivos, la industria que las fabrica no lo hace específicamente para el campo de la restauración, sin embargo su comportamiento en intervenciones estructurales es más que sabido dados los resultados de los ensayos de deformación, resistencia⁹ y durabilidad (Quagliarini *et al.*, 2015:142-150) a los que se someten, aportando seguridad y estabilidad. Independientemente del material de fabricación de las varillas, la tipología de la superficie de éstas puede ser lisas, corrugadas y roscadas¹⁰, de sección circular, rectangular y/o hexagonal. El procedimiento para colocar

⁸ Fibra de plástico reforzado o polímero reforzado con fibra. Las fibras que se utilizan en restauración son generalmente de vidrio o de carbono pero existen de basalto o de aramida e, incluso de fibras tales como papel, madera o asbesto. El polímero es generalmente es una epoxi, viniléster o poliéster, plástico termoendurecible, y resinas como el fenol-formaldehído que todavía están en uso.

⁹ Equipos de ensayo para la industria de la construcción.

¹⁰ Son preferibles las varillas corrugadas o roscadas frente a las lisas, ya que al presentar mayor superficie específica aumenta la adherencia. Criterios de intervención en materiales pétreos. Proyecto COREMANS 2013.

una varilla consiste en realizar un agujero hueco en ambas partes a unir tomando las medidas necesarias y se inserta la varilla impregnada con un adhesivo. Las intervenciones estructurales de este tipo plantean un conflicto de criterios puesto que el hecho de conferir de nuevo estabilidad y devolver la lectura estética a la obra se contraponen con la reversibilidad y la mínima intervención. Una vez unidas ambas partes el acceso a dicha intervención es prácticamente improbable y, por tanto, también su reversibilidad.

Las varillas usadas de forma generalizada en uniones de fragmentos que requieran refuerzo son las varillas de acero inoxidable y FRP adheridas con resina epoxi. Un ejemplo de este tipo de intervenciones es la efectuada en la escultura *Amazona Herida*, talla romana en mármol datada en el siglo IV d.C, que consistió en proporcionar a la escultura resistencia y estabilidad para poder ponerla en pie. Los fragmentos se unieron con varillas de acero inoxidable de distintos diámetros adheridos con resina epoxi bicomponente de alta resistencia (IAPH, 2002). De igual modo, en la restauración de la escultura de *San Martín y el Pobre* del s. XVII, escultura con soporte de piedra arenisca, se introdujeron varillas roscadas de acero inoxidable en las roturas más críticas¹¹. Otro caso de este tipo de intervención es la realizada en *Santa Bárbara* de la Real Basílica de los Desamparados de Valencia, talla del siglo XVIII en madera de conífera, con pérdidas de los dedos de la mano derecha. Para reponer esos faltantes, se insertaron unos vástagos de acero inoxidable que sirvieron para modelar a modo de armadura, en varias sesiones, los dedos con una resina epoxi termoestable (Bosch, 2001). También, en el proceso de reconstrucción de la escultura del *Capite Velato* (Calle Adarve, Cartagena, Murcia), escultura en mármol, se introdujeron vástagos de fibra de vidrio en un orificio practicado de 15 cm de profundidad (Mendiola y Galán-García, 2003-2004:157-166). Es destacado reseñar también el caso de unión con refuerzos del fragmento lítico más grande de la muestra *Dinastía y Divinidad* (Arte Yoruba) que se cosió con varillas de

¹¹ Intervención realizada por Luis Salazar y financiada por el Ayuntamiento de Medina del Campo. Museo de las Ferias. 1998-2000.

fibra de vidrio y resina epoxi (Díaz, 2009:324-333). En las roturas más críticas del conjunto escultórico de los Fondos Artísticos de la Diputación de Valencia (*Mater Dolorosa* y *Niño de la Trompa* de E. Calandín y *Vinatea* de Ignacio Pinazo, todas ellas en yeso de finales del XIX y principios de XX), también se utilizaron este último tipo de pernos de refuerzo (IVC+R, 2012).



Figura 4. Inserción del brazo de la Prudencia con una varilla de acero inoxidable. (Fotografía extraída de Arché. Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV - Núm. 3. 2008. 129 p.)

Otro ejemplo más es la intervención de la reposición de atributos a las esculturas del siglo XVIII de la Real Basílica de los Desamparados de Valencia en yeso, en la que se optó por insertar pernos de acero inoxidable impregnados con resina epoxi como se hizo con *La Caridad*, *la Prudencia* (figura 4) o *El Nuevo Testamento*. Sin embargo, la adición de la representación del *Espíritu Santo* se realizó con una varilla de fibra de vidrio (Grafiá, et al. 2008:127-136).

En otros casos, también se aprecia el uso de varillas distintas en una misma intervención como se reseña en la intervención llevada a cabo en la pila bautismal del siglo XVII de la Iglesia Arciprestal de Santa María de Ontinyent (Valencia), pieza en mármol de Carrara, donde se practicó un sistema mixto de cosidos y anclaje. Por un lado, se intervino sustituyendo la varilla central de hierro forjado por una de acero inoxidable. Por otro lado, las cuatro partes que conformaban el fuste se cosieron con varillas de fibra de vidrio (dos a dos) encoladas con resina epoxi tixotrópica (Mas-Barberà y Duréndez, 2013:113-128).

Aunque es menos frecuente, también hay casos con otros tipos de adhesivos, como se indica en la propuesta de restauración de la *Dama de Baza* llevada a cabo por J.M. Cabrera y, publicada en el Boletín nº 12 del ICR, donde se contemplaba la fijación de pequeños fragmentos con resina de poliéster (Aspa) y los de mayor tamaño con la misma resina incluyendo varillas de acero inoxidable (Gómez *et al.*, 2008:211-222)¹².

Respecto al uso de varillas de carbono en escultura y ornamentos son pocos los casos encontrados. Si bien es interesante la intervención de la *Fuente Lindwurm* en Klagenfurt (Nimmrichter y Wedenig, 1996: 127-134).

En general se puede utilizar cualquier material siempre que sea inerte e inocuo para la obra original. En este sentido, puede referirse la intervención en la espada perteneciente al conjunto arqueológico de la necrópolis de incineración de la Osera (Chamartín de la Sierra, Ávila), cuya empuñadura se reforzó con vástagos de metacrilato (Barrio, 1992:145-178).

¹² Propuesta de los años 70.



Figura 5. Apolo. Detalle del muslo izquierdo con intervenciones del siglo XIX. (Fotografía extraída de Gallery the Restoration of Ancient Bronzes Naples and Beyond. Guetty Museum. 52 p.)

También hay casos donde las varillas de refuerzo se colocaron sin adhesivo, de forma exclusivamente mecánica como suele realizarse en las intervenciones de escultura en metal huecas. De hecho, hay varios ejemplos de escultura antigua que han sido unidas mediante armaduras, remaches, varillas y refuerzos sujetos mediante clavos y tornillería, sobre todo intervenciones de finales del XIX y principios del siglo XX (figura 5). Es el caso de las esculturas de *Trebonianus Gallus* del Metropolitan Museum, *niño con una bulla* en el Louvre, *el nacimiento y la segunda vida de Minerva* de Arezzo, y *Apolo y Diana* de Pompeya (Risser, 2013).

Mención especial merecen las intervenciones en Patrimonio Arquitectónico donde se emplean refuerzos estructurales. La restauración o rehabilitación de estructuras resulta ser uno de los aspectos de mayor interés y más

directamente relacionado con los nuevos materiales compuestos¹³. Estos procesos suelen consistir en la sustitución de soportes corroídos y la colocación de perfilería y cosidos (Recuero, *et al.* 1997:39-50). Estudios muestran qué acciones son las más convenientes, sobre todo en patrimonio arquitectónico antiguo, y buscan las mejores soluciones para reforzar vigas de madera con varillas de fibra de vidrio (Raftery y Whelan, 2013:209-220) o, los trabajos realizados a propósito de las reparaciones de los mármoles del *Second Bank* en Estados Unidos con distintas varillas y adhesivos (Glavan, 2004)¹⁴.

También hay estudios centrados en saber por qué fallan los sistemas de unión y, en consecuencia, se produce el colapso de los materiales (Ivorra, *et al.* 2013:290-301) como ocurrió en un edificio industrial en Alcoy (Valencia). Asimismo, cabe destacar las intervenciones en las Portadas del Sol y de la Cuesta de la Colegiata de Osasuna restauradas con varillas de fibra de vidrio y epoxi de distintos diámetros (Sánchez y Pineda, 2006:20-27). De igual modo, las intervenciones en las Portadas del Nacimiento y del Bautismo de la Catedral de Sevilla donde los fragmentos de piedra desprendidos, se anclaron mediante la inserción de varillas de fibra de vidrio y resina epoxi también (ver figura 6) (Cirujano, 2002:101-120). En la fachada norte del edificio del Senado de España se introdujeron una serie de varillas, entre 10 y 15 cm, con resina epoxi sin estireno para realizar un cosido y poder reanclar las molduras (Monjo y Bustamante, 2015).

¹³ Publicación del Ministerio de e innovación sobre el I+D+i para una cultura sin barreras E2.26 – Cirugía del Bien Cultural. Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural.

¹⁴ Se estudiaron varillas de acero, FRP, cerámicas y tornillería destinada a intervenciones quirúrgicas óseas.



Figura 6. Inserción de varillas de fibra de vidrio con resina epoxi para anclar los fragmentos de piedra desprendidos. (Fotografía extraída de *Proceso de intervención en las portadas del Nacimiento y del Bautismo de la Catedral de Sevilla* 115 p).

En otros casos, las varillas se utilizan no solo como refuerzo de unión sino también a modo de armadura para modelar una reposición, como ocurrió en la *Portada del Sol* de la Basílica de Santa María en Elche (Alicante), donde se configuró un armazón de varillas de fibra de vidrio reforzado en las esquinas de las cornisas con varillas de acero corrugado y se fijó a la piedra con un adhesivo específico para anclajes (Sika Anchorfix-1®). Posteriormente se realizó la reconstrucción volumétrica con mortero pétreo (Martínez-Hurtado, *et al.* 2009).

Para el refuerzo estructural de edificios también se usan las varillas de carbono como se recoge en el caso del Palacio de Viana (Madrid) donde el

apoyo de las columnas de piedra del Patio de Rivas fue reforzado mediante resinas y varillas de fibra de carbono¹⁵.

Los vástagos de titanio se utilizan con mayor frecuencia para intervenir elementos arquitectónicos más que escultóricos, como se ha realizado en la Catedral de Barcelona para mantener unidos los fragmentos de piedra (López, 2011), o en las intervenciones del Museo Nacional de Arte de Cataluña que, en 2009, se fijaron las cornisas al edificio (Bosco, 2008). Finalmente, en el *Partenón de Atenas*, debido al gran problema de oxidación provocado por las grapas de hierro colocadas entre 1898 y 1933 por N. Balanos, éstas fueron en 1983 sustituidas por cementos especiales y refuerzos de titanio (Layuno, 2012:7-22).

3.2.3. Anclajes y pernos especiales en escultura y arquitectura.

En ocasiones, bien por la originalidad de la obra de arte o por la complejidad de su restauración, se necesitan soluciones diseñadas exclusivamente para esa intervención que requiere un procedimiento único. Hay que reiterar que la mayoría de los materiales empleados en restauración proceden del mundo industrial y tienen una finalidad distinta a la de intervenir obras de arte, como pueden ser los diversos tipos de anclajes, como el sistema keil, procedente del campo de la construcción¹⁶. Por eso quisiera subrayar casos, cada vez más frecuentes, en los cuales se realizan estructuras y sistemas de estabilización expreso en la restauración de bienes culturales. Un caso a destacar es *la Estatua de la Libertad*, diseñada por Alexandre Gustave Eiffel. Se ideó con un sistema de armadura de hierro a modo de “esqueleto” cubierta por una “piel” de bronce, lo que ha supuesto grandes problemas galvánicos. El material férreo en mal estado fue sustituido por acero inoxidable que es poco reactivo con el bronce. Además, se

¹⁵ Informe de los trabajos realizados en el palacio de Viana (Madrid).

¹⁶ Es un anclaje para uniones invisibles, que unido a perfilera metálica, se utiliza para revestimientos de fachadas.

intercalaron láminas de teflón a modo de aislante electrolítico (Macarrón; González, 1998:114-115).

Otro ejemplo es el *Hipnos de Almedinilla*, escultura de bronce, que estaba dividida en siete fragmentos. Para montar esta escultura y devolverle la lectura estética, se diseñó un sistema de tirantes de expansión en acero inoxidable, ideado de forma específica para cada una de las uniones. En el interior de cada sección se insertó además un elastómero para que ajustara el sistema de montaje. Este procedimiento resulta, en definitiva, totalmente inocuo y reversible (Baglioni y Bouzas, 1999:43-62).

3.3. Los imanes en Conservación y Restauración.

Hasta la fecha, los imanes se han utilizado con diversas finalidades en conservación-restauración. De acuerdo con el modo de usarlos, pueden clasificarse de la siguiente manera:

- a) Como sistema expositivo en papel y obra textil, puesto que es un sistema no invasivo, reversible y, de manera controlada, inocuo. Este aspecto es fundamental si se desean evitar deformaciones y marcas por la fuerza de la presión magnética.
- b) Como fijación de pintura mural u objetos a un nuevo soporte expositivo.
- c) Como herramienta. Se utilizan en fases de alisado, sentado de color y de limpieza en el ámbito de la conservación y restauración (escultura y arquitectura, pintura de caballete y arqueología).
- d) Como sistema de unión de fragmentos y reconstrucciones de faltantes en tres dimensiones.

3.3.1. Imanes utilizados como sistema expositivo de obra en papel o textil.

Los materiales magnéticos se emplean como solución innovadora, sustituyendo otros tipos de sistemas de exposición ya sean suturas, adhesivos o velcros. Se tiene constancia de su uso en exposiciones desde finales de los años 80 del siglo pasado. Existen recomendaciones sobre las características que debe cumplir el sistema magnético, y son: utilizar una hoja de Mylar® como interfase entre la obra y el imán, tener en cuenta las separaciones entre los imanes para que no se sientan atraídos entre ellos, el espesor y las particularidades de cada obra (Spicer, 2010: 1-5).

Un ejemplo del uso de imanes como sistema expositivo de obra gráfica lo encontramos en la exposición de la obra en papel de gran formato del arquitecto Paolo Soleri. En esta ocasión se utilizaron barras de metal sobre las que se fijaban los grandes formatos con bandas flexibles de imanes protegidos con cinta adhesiva neutra para evitar la interacción directa entre los materiales, amortiguar la fuerza y mejorar el impacto visual (Fiorani, 2006:71-79). Este sistema ya había sido utilizado en la obra de Betty Goodwin en el Montreal Museum of Fine Arts. En este caso, las barras eran de acero y la obra en papel se sujetó con imanes cerámicos en forma de disco (Potje, 1988).

El Rijksmuseum Twenthe ha utilizado imanes permanentes tanto a nivel expositivo como con fines de almacenamiento. Se pueden destacar dos casos: *Raincoat Drawing* de Juan Muñoz (1988) y *Carel Dora op de vlucht* de Visser (1983). El primero es una obra en tela de algodón negro que había estado tensada en un bastidor. Debido a la debilidad y deformación de la tela en la zona que había estado grapada, se decidió colocar una estructura fijada con imanes forrados de fieltro y encajados en copas. La segunda obra se expuso con un sistema magnético puesto que fue concebida para flotar en el muro y no estar fijada a una estructura. Al tratarse de una obra realizada con grafito, se desarrollaron estudios previos

para evitar posibles daños por el campo magnético de los imanes. Los imanes que se utilizaron en esta ocasión estaban forrados con papel japonés (Verberne-Khurshid, *et al.* 2002:363-369). Robert Ryman, artista vivo, no concibió que sus obras fueran expuestas con algún tipo de marco o soporte, de modo que el R. Guggenheim Museum propuso distintas opciones para sus obras *Sin Título* (1993), *Classico 1* (1968) y *Classico 20* (1968-1969). En la primera obra se colocó papel Kozo adherido con almidón de trigo como estrato intermedio para fijar posteriormente placas de acero galvanizado con Beva 371® film. Esta obra se unió a imanes flexibles grapados a la pared. En el caso de las obra *Classico* se utilizó Melinex® como estrato intermedio, las placas de acero se protegieron con Acryloid B72® y los imanes flexibles fueron atornillados a la pared (Keynan, *et al.* 2007:7-16). La restauradora Julie Barth realizó un trabajo similar en la obra *Boxing Painting* de Ushio Shinohara (Barth, 2014). El Museo de Berlín realizó la conservación de una serie de dibujos del s XV y XVI donde la tapa frontal de cada montaje individual fue fijada con imanes (Heidenreich, 2013:6).

En cuanto al uso de imanes en exposiciones de obra textil, se citan los casos de la exposición de textiles de la Corte Imperial China colgados mediante imanes de tierras raras para evitar el uso de pernos o de costuras en las piezas históricas; las polainas en piel Nimiipuu (Hovey, 2012:51-58)¹⁷ o, el caso del portière (cortina de cuero) de la Colección Estatal Bardini en Florencia. En este caso se diseñó un sistema donde la pieza pudo recuperar su condición de ser colgada. La cortina en cuestión pende de una barra que se mantiene en su lugar gracias a un sistema de imanes de neodimio permitiéndole, a su vez, las fluctuaciones dimensiones de la pieza (Paris, *et al.* 2008)¹⁸.

¹⁷ Intervención expositiva llevada a cabo en el Museo de Arte de sant Louis. Los imanes se introdujeron en cartón corrugado, y cuatro de estas piezas sujetaban cada pernera. En el artículo citan tres casos más en que utilizan los imanes como sistema expositivo en el Museo.

¹⁸ Intervención por parte del Istituto Centrale per il Restauro.

3.3.2. Imanes utilizados como fijación de pintura mural u objetos a un nuevo soporte.

El uso de imanes en pintura mural también resulta destacado. Se utilizaron sistemas magnéticos para exponer en el Museo de Prehistoria (Valencia) el conjunto de fragmentos de pintura mural y un friso de mármol procedentes del yacimiento arqueológico de Els Alters, en la Comunidad Valenciana. Se obtuvo como resultado la combinación de imanes de neodimio unidos al original con resina epoxi y placas de acero galvanizado como nuevo soporte. Esta intervención quedó recogida en el trabajo titulado “Un ensayo de mínima intervención en la aplicación de nuevo soporte en pintura mural” (Zincone, 2012). De igual modo, el estudio “Las pinturas murales de la ciudad íbero-romana de Cástulo, Linares (Jaén): Estudio técnico y propuesta de diferentes sistemas de anclaje para su musealización” contempló la posibilidad de exponer los murales mediante imanes y se requirió de un estudio físico químico para conocer su estabilidad (Calabria, 2013).

El Victoria & Albert Museum ha incorporado sistemas magnéticos en la exposición de la colección de retratos miniatura (ver figura 7). Crearon un sistema de anclaje que combina unas sujeciones con alambre a un imán central (Derbyshire, 2005:2-4). También el museo estatal de Maine los ha utilizado para exponer objetos (Spicer, 2010: 1-5). En este caso, los imanes fueron protegidos con papel japonés.



Figura 7. Pruebas para la exposición de retratos en miniatura. (Fotografía de Timea Tallian y extraída de Conservation Journal Autumn 2005 Issue 51. V&A Museum. Disponible en <http://www.vam.ac.uk/content/journals/conservation-journal/issue-51/the-new-miniatures-gallery/>).

También se han utilizado sistemas magnéticos para llevar a cabo uniones a un nuevo soporte, como ocurrió en el caso del Díptico de Murano del Museo de Rávena que, tras liberar la talla en marfil del soporte de madera, se le proporcionó uno nuevo de Plexiglás fijado con imanes aislados con teflón y, adheridos a dicho soporte con silicona (Cristoferi, 1991:34-39). Se trata de un recurso museográfico muy utilizado puesto que también ha sido usado en el museo de Bellas Artes de Limoges fijando varios esmaltes con imanes para su exposición (Musée de Beaux-Arts Limoges, 2011). Incluso, dentro del proyecto museográfico de la Sala de los dibujos y estampas del Museo de Bellas Artes de Córdoba se incorporó en las paredes un sistema de

imanes para fijar las rotulaciones de las obras expuestas (Baglioni, et al. 2002:69-80).

3.3.3. Los imanes utilizados como herramienta/utensilio.

Los imanes se utilizan en tareas de restauración ya que permiten eliminar deformaciones y realizar sentados de color, como por ejemplo en el caso de la pintura de Giacomo Balla donde los bordes de las lagunas de la obra Giardini Romani fueron suavizadas mediante presión controlada usando imanes y placas de metal protegidas con Melinex® (Bestetti, 2005:336-343). El cuadro de la crucifixión de Stephen Kessler fue intervenido in situ, sin perder su verticalidad utilizando imanes y placas de acero galvanizado durante las presiones controladas realizadas (Saccani y Rella, 2007:182-187). El mismo proceso fue llevado a cabo por estudiantes de la Universidad Winterthur en varios lienzos sobre bastidor (Stoner, 2008:114-115). Los sistemas magnéticos también se utilizan en el ámbito del documento gráfico. El alisado con imanes se considera muy útil porque puede usarse sin desmontar la encuadernación en el caso de libros (Escohotado, *et al.* 2012) (figura 8) o pergamino (Plateau, 2014:134-142). Ejemplos de estos usos son las tapas de pergamino de libros del archivo municipal de Pego (IVC+R, 2011), el certificado de reconocimiento como funcionario de la Guerra de la Independencia de EEUU a Nathaniel Leonard en 1785 (Jordan, 2011:47-55), El "*Llibre de lletres e altres actes fet e activat en poder del [honrat] en Anthon de Gudar, justicia de la ciutat [de] Sogorb*" del año 1413 (IVC+R, 2011) y el *Pergamino de elección de Ramón Gastó como obispo de Valencia* (IVC+R, 2012).



Figura 8. Utilización de los imanes como herramienta para eliminar deformaciones en pergamino. (Fotografía extraída de *Innovación y Tecnologías en la Especialidad de Conservación y Restauración de Obras de Arte*. 80 p.)

Con la misma finalidad se han utilizado imanes en el ámbito etnográfico, como solución para reparar rasgados en la piel de foca de un Kayak construido por los Inuit de la región Ivuyivik (Dignard, 1989:159-167) o como sistema de sujeción provisional en un cuero muy deteriorado y arrugado de una parka para poder sacar patrones en Mylar® (Dumka, 2004:5-9).

Los imanes también se usan en sistemas de limpieza para resolver la problemática de la eliminación de los productos de limpieza en obra de caballete. Para ello se incorporan partículas de ferrita a geles de limpieza de manera que, al acercarse un imán, el gel se siente atraído por éste lo que facilita su eliminación (Gómez, *et al.* 2010:43-55). Este sistema controla la penetración del gel de limpieza mediante un ferrofluido compuesto de carga positiva. Así, en soportes porosos no queda retenido en el sistema capilar. Estos geles pueden reutilizarse continuamente al deshidratarlos en cámara de vacío y obtener de nuevo el polvo (Bonini, *et al.* 2007:8681-8685).

En arqueología tiene diversas aplicaciones. Por ejemplo, se ha utilizado para localizar núcleos metálicos en piezas con una corrosión elevada. Se trata de una forma económica de observar el grado de mineralización de una pieza de hierro dependiendo de la reacción que ofrece el imán (Domínguez, 2009:39-46). Se ha usado en los estudios previos a un *Soliferrum*¹⁹ del s. IV a.C encontrado en la necrópolis ibérica de “El Tesorico” (Albacete); y, en el Caballo clásico de bronce del Museo Metropolitano de Arte para determinar la presencia de sedimentos ferrosos y de intervenciones en hierro (Lefferts, *et al.* 1981:1-42). También se ha utilizado para evaluar el estado de conservación de elementos históricos de hierro sumergidos en el Pacific Rim National Park, en la isla de Vancouver (Canadá) (Murdock, 1991: 7-11). Asimismo tras una restauración por baño electrolítico, se han utilizado imanes para separar esquirlas de oro de otros sedimentos magnéticos (Ude-Hansen, 1982:185-188).

Finalmente, los imanes también ofrecen una solución muy apropiada como cierres magnéticos frente a sistemas más tradicionales como lazos, broches, botones o velcros (Schlefer, 1986).

¹⁹Solifeerrum: Soliférrea: Se trata de lanzas hechas completamente de hierro. Se componen de una varilla de sección circular de entre 1 y 2 cm de diámetro y unos 2 metros de longitud, que se engrosa en su punto central para permitir empuñar el soliferrum equilibrando el peso del arma en el momento del lanzamiento. La varilla se remata en punta con una, dos o cuatro aletas. El otro extremo puede terminar también en punta o ser romo. Se considera un arma altamente especializada que evitaba la fragilidad de las astas de madera. Parece que su uso predomina en el siglo IV a. C.

3.3.4. Los imanes utilizados como sistema de unión de fragmentos y de prótesis.

Se tiene constancia del uso de imanes como elemento de unión desde los años 70 del siglo XX. A continuación se detallan algunos ejemplos de intervenciones con este sistema.

El primer caso reportado hace referencia al Cristo en mármol de Andrea Sansovino, situado en primera instancia en el exterior del Baptisterio de Florencia y trasladado con posterioridad al interior (ver figura 9). En 1976 se perdió parte del brazo derecho y se sustituyó por una prótesis de fibra de vidrio unida de forma delicada para no dañar el mármol debilitado. Se usaron imanes con el fin de no castigar la piedra original y facilitando la eliminación de la prótesis en caso de ser necesario.

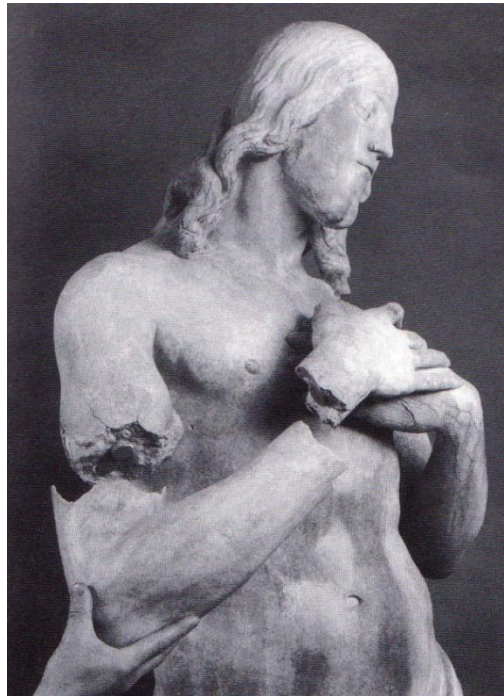


Figura 9. Prótesis de fibra de vidrio unida mediante imanes al Cristo de Andrea Sansovino.
(Fotografía extraída de *Reversibility, does it exist?* 97 p).

Un criterio similar se llevó a cabo en la restauración de dos estatuas de piedra arenisca del siglo XVII (Figura 10). Una de ellas carecía de nariz y fue remodelada con fibra de vidrio para posteriormente ser unida con imanes (Oddy y Carroll, 1999: 96-97).

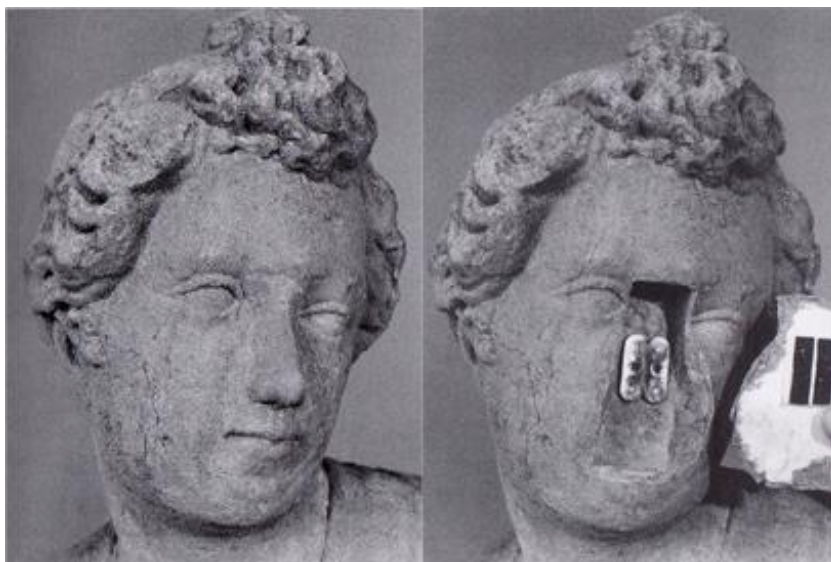


Figura 10. Prótesis de la nariz unida con imanes de una estatua de la Villa di Mondeggi cerca de Florencia. A la izquierda se ve la escultura con la prótesis y a la derecha sin ella. (Fotografía extraída de Reversibility, does it exist? 97 p).

También señalar el caso del grupo escultórico *Venus y Marte* perteneciente al Museo Romano de las termas de Diocleciano y trasladado al Palazzo Chigi (AFP, 2010). En 2010 se restauró y le colocaron una serie de prótesis unidas con imanes. Estas incorporaciones fueron eliminadas en 2013 al regresar el grupo escultórico al Museo Nacional Romano y decidirse que no correspondían a los criterios de la escuela. Sin embargo, en una primera instancia se planteó la intervención como una "oportunidad única de experimentar técnicas de reintegración y de reconstrucción en esculturas" (EFE, 2013).

El Museo del Prado también utilizó los sistemas magnéticos en la intervención realizada en el grupo escultórico *Nerón y Séneca* de Eduardo Barrón. En esta obra de escayola, se fijó la figura de *Minerva* con un sistema magnético²⁰. En la intervención llevada a cabo en una escultura tallada en madera perteneciente al Museo Municipal de Requena (Valencia), las prótesis más grandes se insertaron mediante microimanes (Mas-Barberà y Simón, 2002:23-40). En ninguno de los casos descritos, se ha especificado el adhesivo utilizado para unir los imanes ni el número de imanes usados, simplemente se ha justificado su uso tomando el criterio de la reversibilidad.



Figura 11. Elaboración de la prótesis de la Virgen de Nuestra Señora de LLosar por modelado directo habiendo colocado los imanes previamente. (Fotografía extraída de Anónimo del siglo XV Nuestra Señora del Llosar. Parroquia de Santa María Magdalena Villafranca del Cid. Castellón. 10 p.)

²⁰ 2011. Información citada en el curso El Yeso en la Escultura y en Elementos Ornamentales. Materiales y Técnica para su Intervención, por parte de Sonia Tortajada, restauradora de El Museo del Prado. 14 y 15 de Junio de 2013.

En cambio, sí aparece más información en la intervención realizada a *Nuestra Señora del Llosar* (Valencia), obra en piedra del siglo XV. Las reintegraciones volumétricas se plantearon para poder ser desmontadas. Para ello, se utilizaron imanes unidos con Balsite® y resina epoxi (IVC+R, 2013) (figura 11). En la escultura de *Hermes* de Mahdia, escultura en bronce, se reintegró un faltante con una prótesis de resina epoxi fijada con imanes (Willer, 1994:953-959). Recientemente, una de las esculturas dañadas por yihadistas en Palmira (Siria) fue intervenida por el Instituto Superior para la Conservación y la Restauración de Roma. En este caso concreto, la escultura fue registrada en 3D, posteriormente, los faltantes fueron reconstruidos de modo virtual e impresos con resina y polvo pétreo similar al original, todos ellos unidos con 6 imanes (Squires, 2017) (figura 12).



Figura 12. Escultura siria con su prótesis unida mediante imanes. (Imagen extraída de Imprimalia 3D. Disponible en <http://imprimalia3d.com/noticias/2017/02/17/008750/esculturas-da-das-yihadistas-siria-son-restauradas-ayuda-impresi-n-3d>).

En otros casos, para conservar mejor una obra se decide hacerla desmontable cuando originalmente no lo era. Esto sucedió con la escultura titulada *Tree Sculpture* de Lena Yarinkura (2002) que planteaba una fragilidad extrema a la hora de transportarla y exponerla. Finalmente, se decidió hacer las partes de los animales desmontables uniéndolos con imanes y arandelas (figura 13). Para ello, se envolvieron los imanes en papel japonés y se pintaron del mismo color que la obra, fijándose todo seguido con un polímero de coacetato de etileno de vinilo (VAE), comercialmente conocido como Evasol® y con menor acidez que el PVA (Wild, 2011:11-14).



Figura 13. Sistema de unión mediante imanes de los animales desmontables de la escultura "Tree Sculpture". A la izquierda se ve la escultura completa y a la derecha en detalle. (Fotografía extraída de Ethnographic Conservation newsletter. Num 32. 11-13 p).

Definitivamente, y a raíz de estas líneas, el empleo de imanes como método de restauración en objetos artísticos tridimensionales ha sido escasamente estudiado. A nivel nacional, la Universidad del País Vasco, de la mano de un equipo de conservadores-restauradores, llevaron a cabo unos primeros estudios en el 2001 y que patentaron en 2005 (Barandiarán, *et al.* 2005). El proyecto que proponían consistió en unir un brazo reconstruido de una pieza mediante tres pares de imanes de neodimio con forma de disco adheridos con un adhesivo de cianoacrilato y la pierna de un niño con un par de imanes más (ver figura 14). (Barandiarán, *et al.* 2001:70-75; Barandiarán, 2002:465-474).



Figura 14. Talla de San Antonio. A la izquierda se ve la escultura sin la prótesis y a la derecha la reconstrucción montada tanto del brazo como de la pierna del Niño. (Fotografía extraída de Restauración & Rehabilitación num 52. 75p).

A partir de este trabajo, también surgió un estudio sobre tres pinturas murales realizadas por Gustavo de Maeztu en fibrocemento. Dos de ellas,

Pareja de Carnaval y Familia Vasca, pintadas al fresco, presentaban faltantes en sus esquinas. Tras realizar unas prótesis en poliéster con microesferas y fibras de vidrio, se unieron al original mediante dos microimanes adheridos con cianoacrilato (Venegas, *et al.* 2002).

Finalmente, como uniones de partes originales señalar el caso de la bolsa de cuero de la colección de Ramsey House Collection de la Sociedad Histórica de Minnesota donde la placa de plata desprendida fue tratada con Agateen®. Para no manchar el cuero original utilizaron un imán para separar las partes (Braun, 2001:83-84). De igual modo, es significativo destacar también el trabajo de recomposición y reintegración realizado por parte del Opificio delle Pietre Dure sobre la escultura de *san Juan Bautista niño "san Juanito"* de Miguel Ángel, donde los fragmentos intervenidos fueron unidos mediante imanes para que el proceso fuera reversible y, así poder reincorporar de nuevo los fragmentos originales en el caso que apareciesen (Lorenzi y Sorella, 2014:101-126) (figura 15).



Figura 15. Brazo de San Juanito unido con imanes. (Fotografía extraída de El San Juanito de Úbeda restituido. 118 p).

3.4. Principios físicos aplicados a las uniones.

En este apartado de esta tesis doctoral se presentan los principios físicos que han servido para el posterior desarrollo del modelo teórico de unión utilizando materiales magnéticos. Fundamentalmente, estos principios han sido las leyes de la Estática.

3.4.1. Mecánica.

La Mecánica es la ciencia física que estudia el estado de reposo o movimiento de los cuerpos bajo la acción de las fuerzas. La Mecánica es la más antigua de las ciencias físicas. Los escritos más antiguos que se registran acerca de esta materia son de Arquímedes (287-212 a.C) referentes al principio de palanca y al principio de empuje. A la formulación de las leyes de la combinación vectorial de fuerzas dada por Stevinus (1548-1620), aguardaba un progreso sustancial, y el mismo autor enunció la mayoría de los principios de la Estática. El primer estudio de un problema de dinámica se debe a Galileo (1564-1642) y se refiere a sus experimentos sobre la caída de los cuerpos. La formulación de las leyes de movimiento, incluyendo la ley de la gravitación, fue realizada por Newton (1642-1727), quien también concibió la idea de lo infinito en análisis matemático. También Da Vinci, Varignon, D'Alembert, Lagrange, Laplace y otros han contribuido de manera sustancial al desarrollo de la Mecánica (Meriam, 1978).

La mecánica clásica o newtoniana, es una teoría del movimiento basada en las ideas de masa y fuerza. Las relaciones fundamentales de la mecánica clásica están contenidas en las leyes de Newton (Abad, *et al.* 2012):

1. Todo cuerpo en ausencia de fuerzas permanece en estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme.
2. Toda fuerza ejercida sobre un cuerpo altera su estado de movimiento (vence su inercia), produciéndole una aceleración que resulta ser proporcional a la fuerza aplicada y en su misma dirección y sentido.
3. Cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro (acción), éste ejerce sobre el primero otra fuerza (reacción) de la misma dirección y magnitud, pero de sentido opuesto.

La primera y segunda leyes de Newton pueden considerarse como una definición de fuerza. Una fuerza es la causa capaz de producir en un cuerpo

un cambio de velocidad, es decir, producir una aceleración. La dirección de la fuerza coincide con la dirección de la aceleración causada. Esto se podría decir de forma contraria, que fuerza es toda acción que tienda a modificar el estado de reposo de un cuerpo o de movimiento o lo deforma. La magnitud de la fuerza es el producto de la masa del cuerpo por la magnitud de la aceleración producida (Tipler, 1992).

La estática es la rama de la mecánica que estudia el equilibrio de los cuerpos, estudiando las condiciones que lo rigen y considerando a los cuerpos sólidos como rígidos e indeformables²¹: se supone invariable la distancia entre dos puntos de un cuerpo cuando éste se encuentre sometido a la acción de las fuerzas. Si un objeto está en reposo y permanece en dicho estado se dice que está en equilibrio estático. El objetivo de este trabajo es, por tanto, que las uniones se mantengan en equilibrio estático.

3.4.2. Fuerzas.

En el estudio de los problemas de Estática siempre van a aparecer fuerzas. La fuerza es una magnitud vectorial. Sobre un cuerpo rígido pueden actuar simultáneamente más de una fuerza. El conjunto de las mismas se denomina sistema de fuerzas.

Las fuerzas que se van a considerar son las siguientes:

La fuerza (F) que es la que realiza el objeto contra la superficie de fractura. Va a ser siempre nuestra incógnita ya que corresponde a la fuerza de sujeción que han de realizar los imanes, o a la fuerza de adhesión del adhesivo a utilizar. Es la fuerza que se calculará con el modelo.

²¹ Todos son deformables en mayor o menor medida, pero esas deformaciones en los materiales escultóricos en general, son tan pequeñas que no son tenidas en cuenta.

La fuerza normal (N) es la que realiza una superficie en respuesta a la fuerza ejercida por el cuerpo apoyado en ella.

El peso (P) que corresponde a la fuerza gravitatoria. El peso se representa como un vector aplicado en el centro de masas, perpendicular al suelo. El peso es igual a la masa (de los fragmentos a unir en estos casos de estudio) multiplicada por la gravedad que siempre tiene un valor constante de $9,81\text{m/s}^2$. Por lo tanto, siempre se puede conocer esta fuerza utilizando la ecuación $P=mg$.

Asimismo, la fuerza de rozamiento (F_R) es otra fuerza a considerar. Cuando un cuerpo se mueve o tiende a moverse sobre otro aparece una fuerza que se opone a ese movimiento: es la fuerza de rozamiento. Cuando se aplica una fuerza con una componente tangencial al plano a un bloque en reposo debería iniciar un movimiento. Pero eso no ocurre hasta que supera un cierto valor umbral. La fuerza estrictamente necesaria que es preciso aplicar tangencialmente para iniciar el movimiento es la *fuerza estática de rozamiento*. Las fuerzas de rozamiento son debidas a interacciones muy complejas entre moléculas de los cuerpos en contacto, pero desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas, se comprueba experimentalmente que vienen dadas por $F_R = \mu N$, donde μ es el coeficiente de rozamiento, que es una constante que depende de los cuerpos en fricción, y N es la fuerza normal. El parámetro conocido como coeficiente de rozamiento (μ) da cuenta de la resistencia que presentan dos cuerpos al deslizar uno sobre otro (Tipler, 1992). Este coeficiente es característico de las superficies en contacto, independientes del área de las mismas. Se pueden encontrar calculado en tablas para diversos materiales, pero no existen tablas específicas para materiales empleados en obras de arte ni en restauración.

De acuerdo con la primera ley de Newton, todo cuerpo continúa en su estado inicial de reposo o de movimiento con velocidad uniforme a menos que actúe sobre él una fuerza externa neta o no equilibrada. La fuerza neta que actúa sobre un cuerpo, llamada también fuerza resultante, es la suma

vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre él ($F_{net\alpha} = \Sigma F$). Por tanto, para que un cuerpo no se mueva la suma de todas las fuerzas debe ser nula.

Como ejemplo presentamos el siguiente caso:

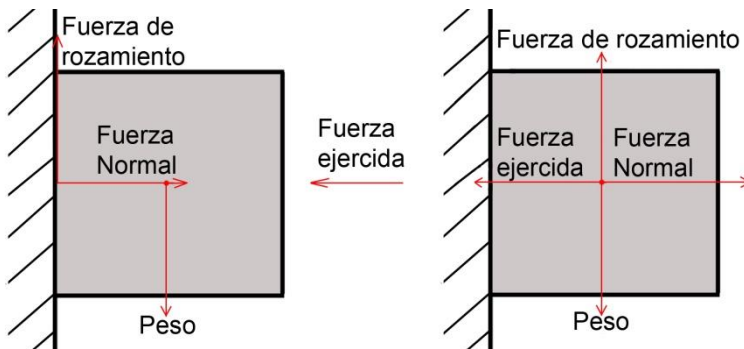


Figura 16. Esquema de equilibrio de fuerzas para las cuatro fuerzas a estudio: Rozamiento, ejercida, normal y peso.

Para sumar las fuerzas se colocan en el centro de masas (Ver figura 16). Como el bloque está en equilibrio, la suma de las fuerzas tiene que ser nula.

Es importante tener en cuenta que hay que sumar las fuerzas componente a componente.

Componentes horizontales: $F - N = 0$. Por tanto $F = N$.

Componentes verticales: $F_R - P = 0$. Por tanto, $F_R = P$

Como ya se había mencionado: $F_R = \mu N$ y $N = F$, se puede deducir que $P = \mu F$, por lo que se puede despejar la condición de la fuerza necesaria que ejercer para que el bloque no se caiga.

$$\text{Fuerza necesaria en las uniones} = \frac{P}{\mu} = \frac{mg}{\mu}$$

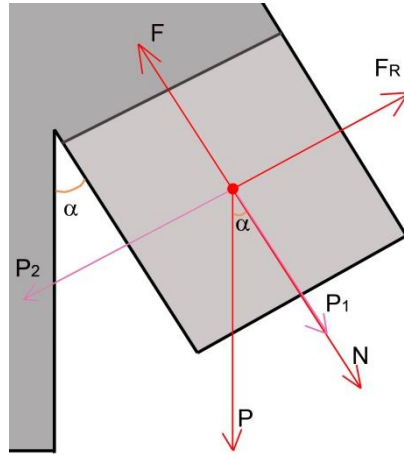


Figura 17. Esquema de equilibrio de fuerzas en piezas que forman ángulos.

Cuando las piezas forman ángulos, es necesario utilizar la trigonometría para descomponer las fuerzas (ver figura 17). En este caso, el peso se descompone en los dos ejes, siendo P_1 y P_2 . Para resolver el equilibrio de fuerzas en este caso:

$$P_1 + N - F = 0$$

$$P_2 - F_R = 0$$

$$P_1 = P \cos \alpha$$

$$P_2 = P \sin \alpha$$

Como F_R es igual a μN siempre y N es igual a $F - P_1$, en este caso podemos decir que P_2 es igual a $\mu(F - P_1)$ y como P_1 es igual a $P \cos \alpha$ y P_2 es igual a $P \sin \alpha$:

$$F - P \cos \alpha = \frac{P \sin \alpha}{\mu}$$

$$F = \frac{P \sin \alpha - P \cos \alpha}{\mu}$$

El equilibrio de fuerzas garantiza la ausencia de movimientos de traslación. No obstante, para garantizar el equilibrio estático también hay que asegurar que no se producen movimientos de rotación. Para garantizarlo es importante estudiar el equilibrio de momentos.

El momento de una fuerza es una magnitud vectorial que relaciona la fuerza con la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje de giro y cuya definición general es: $\vec{M} = \vec{r} \cdot \vec{F}$.

Aprovechando que en los casos que se van a estudiar los posibles movimientos ocurren en un plano, la definición de momento que se va a utilizar es más sencilla: $\vec{M} = F \cdot d \cdot \sin \alpha$, donde d es la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje de giro y α el ángulo entre la dirección de la fuerza y la dirección de esa distancia. Los momentos de las fuerzas son los responsables de que los cuerpos roten con respecto a un eje de giro. Por tanto, para que haya equilibrio los objetos no pueden rotar por lo que en el equilibrio, la suma de todos los momentos tiene que ser nula.

El punto de aplicación del peso siempre es en el centro de masas, que es un punto que no tiene por qué estar situado dentro del cuerpo. Si el cuerpo tiene una forma regular, el centro de masas coincide también con el centro geométrico del objeto. En general, se calcula a través de la siguiente integral:

$$\vec{r}_{CM} = \frac{\int_V \vec{r} \rho(\vec{r}) dV}{m}$$

Resulta interesante presentarlo a través de este ejemplo:

En el primer caso, cuando los dos centros de masas de las dos piezas coinciden en el mismo eje horizontal (figura 18) por lo que el cálculo es sobre las X:

$$X \cdot (m_1 + m_2) = X_1 m_1 + X_2 m_2 \rightarrow X (m_1 + m_2) = X_1 m_1 + X_2 m_2 \rightarrow X = \frac{X_1 m_1 + X_2 m_2}{m_1 + m_2}$$

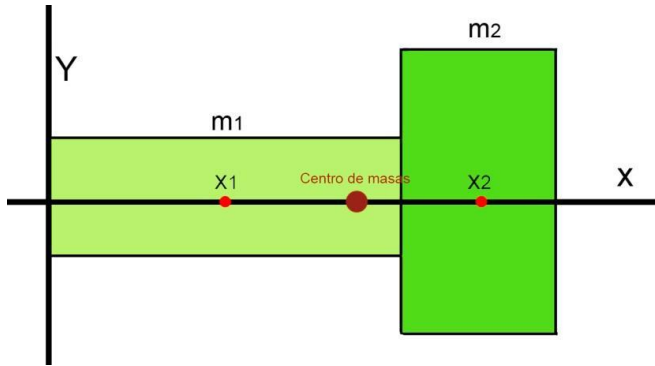


Figura 18. Cálculo de centro de masas de dos piezas con el centro en el eje horizontal.

En el segundo caso, cuando las dos piezas que forman el objeto tienen su centro de masas en distintos ejes Y, X, por tanto (ver figura 19):

$$X (m_1+m_2) = X_1 m_1 + X_2 m_2 \rightarrow X = \frac{X_1 m_1 + X_2 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$Y (m_1+m_2) = Y_1 m_1 + Y_2 m_2 \rightarrow Y = \frac{Y_1 m_1 + Y_2 m_2}{m_1 + m_2}$$

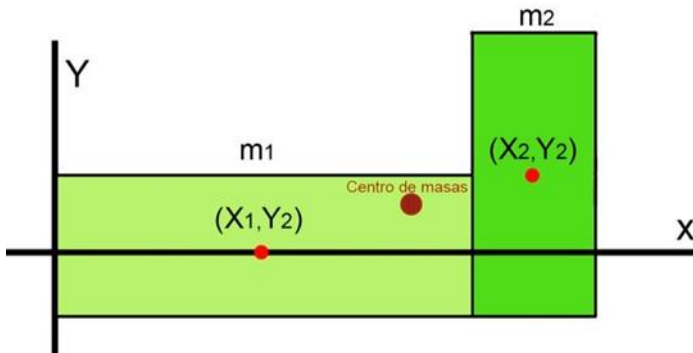


Figura 19. Cálculo de centro de masas de dos piezas con el centro en distintos ejes.

El objetivo de la Estática es, por tanto, determinar las condiciones para que un cuerpo esté en equilibrio. Para ello basta con plantear las condiciones básicas de equilibrio que son:

La suma de las fuerzas es nulo $\Sigma \vec{F} = \vec{0}$.

La suma de los momentos respecto de un punto es nulo $\Sigma \vec{M} = \vec{0}$.

3.5. Propiedades fundamentales de los imanes.

En esta sección vamos a destacar aquellas propiedades de los imanes que necesitaremos para describir los distintos ensayos de esta tesis doctoral.

3.5.1. Imanación y fuerza magnética.

La imanación de un material ferromagnético, en general, depende del campo magnético que actúa sobre él, así como de la historia previa del material. Si se aplica un campo magnético a un material previamente desimanado, su imanación aumentará gradualmente siguiendo una curva conocida como ciclo de histéresis. La imanación aumenta hasta alcanzar su valor máximo, conocido como imanación de saturación. La saturación magnética se alcanza cuando todos los dipolos magnéticos de todos los dominios se alinean con la dirección del campo H aplicado. Al eliminar el campo aplicado, el material no se desimana por completo. Su imanación alcanza un valor conocido como remanencia. Es necesario aplicar un campo en dirección contraria a la imanación – campo coercitivo – para que la imanación del material se anule. Por tanto, son materiales que mantienen su imanación en ausencia de un campo magnético externo.

Los imanes pertenecen al grupo de los materiales conocidos como materiales magnéticamente duros. En estos materiales, el campo coercitivo

es grande (son difíciles de desimantar) y la remanencia también, por lo que presentan un valor elevado de imanación en ausencia de campo magnético.

La fuerza de atracción entre dos imanes es, en primera aproximación, directamente proporcional al producto de la imanación de saturación de ambos e inversamente proporcional a la distancia entre ellos. Por tanto, para maximizar la fuerza de atracción entre ellos es necesario que se sitúen muy cerca y, si es posible, que exista el contacto pleno a la hora de ser insertados en la zona de unión.

3.5.2. Temperatura de operación máxima y de Curie.

Para todos los materiales ferromagnéticos, existe una temperatura por encima de la cual la energía proporcionada por la agitación térmica supera a la responsable del orden magnético. Por encima de ese valor de temperatura característica de cada material, conocida como temperatura de Curie, desaparece el magnetismo permanente y, en particular, los imanes pierden sus propiedades magnéticas características. En la mayor parte de los imanes, además, el fenómeno no es reversible. Cuando la temperatura disminuye de nuevo por debajo de la temperatura de Curie, el imán recupera el orden magnético pero, generalmente, el valor de remanencia y campo coercitivo disminuye apreciablemente.

Es importante además tener en cuenta que esta transición además es suave. Esto es, el imán pierde sus propiedades magnéticas de forma paulatina al aproximarse a la temperatura de Curie. Se define por tanto la temperatura de operación máxima a aquella temperatura máxima de trabajo para la que el imán mantiene sus propiedades. Este parámetro es fundamental ya que, por un lado, va a determinar el tipo de imán a utilizar dependiendo de dónde va a estar ubicada la obra restaurada y, por otro lado, va a ser muy interesante para poder reversibilizar el sistema de unión de una forma poco invasiva o agresiva con la obra de arte.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se exponen los materiales, los procedimientos desarrollados en la preparación de probetas y la instrumentación usada en los diferentes ensayos practicados en esta tesis doctoral.

4.1. El modelo teórico.

Se ha desarrollado un modelo teórico basado en las leyes de la Estática (Rodríguez, *et al.* 2014, 2015). Persigue calcular la fuerza y posición óptima de los imanes en las piezas a unir a partir del estudio del equilibrio de fuerzas y momentos (figura 20).

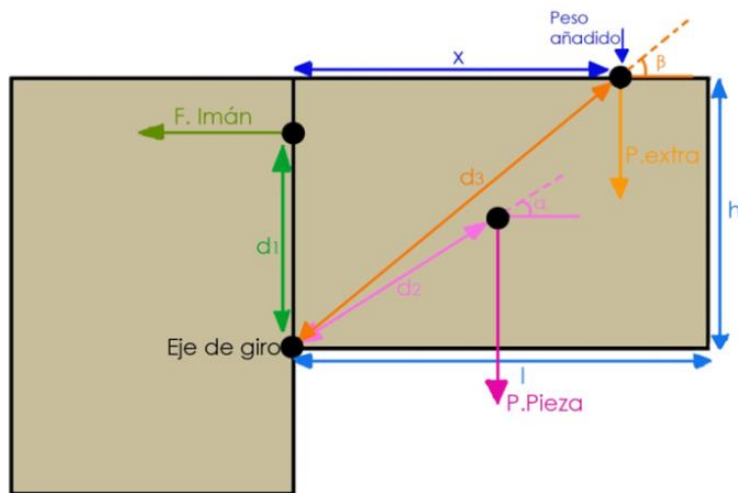


Figura 20. Esquema de desarrollo del modelo teórico.

Para el modelo se han considerado cuatro fuerzas diferentes: el peso (P), el rozamiento (R), la relación entre las piezas (N) y la fuerza magnética (F). Estas fuerzas deben compensarse para fijar la pieza en la posición apropiada. Comenzaremos con el equilibrio de fuerzas:

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{N} + \vec{F} = 0 \text{ (eq. 1)}$$

Considerando la dirección horizontal: $F = N$.

Considerando la dirección vertical:

$$\left. \begin{array}{l} P = R \\ R = \mu N = \mu F \end{array} \right\} \Rightarrow F = \frac{P}{\mu} \text{ (eq. 2)}$$

Por tanto, el peso máximo para cada configuración depende únicamente del coeficiente de rozamiento y de la fuerza de los imanes.

Para asegurar el equilibrio, también debe prevenirse la rotación de la pieza intervenida, es decir, también es importante asegurar el equilibrio de momentos.

$$F d_1 = P d_2 \cos \alpha \Rightarrow F = \frac{P d_2 \cos \alpha}{d_1} \text{ (eq. 3)}$$

Por tanto hay dos regímenes distintos. Cuando el peso (o el centro de masas del sistema) se sitúa lejos del eje de giro, es el equilibrio de momentos el que determina el comportamiento de la unión. Sin embargo, cuando el peso se sitúa cerca de la unión, lo que determina el peso máximo en la unión es el equilibrio de fuerzas.

Siempre se plantea que las piezas a unir son perpendiculares entre sí, paralelas al suelo como “un brazo perpendicular” porque es la situación más comprometida y complicada pero el modelo es aplicable a cualquier situación.

En la figura 21 se puede apreciar que el brazo corresponde al planteamiento del modelo teórico mientras que el segundo, tiene una posición diagonal hacia arriba. Aplicando el modelo con las consideraciones trigonométricas adecuadas, los cálculos son similares en ambos casos.

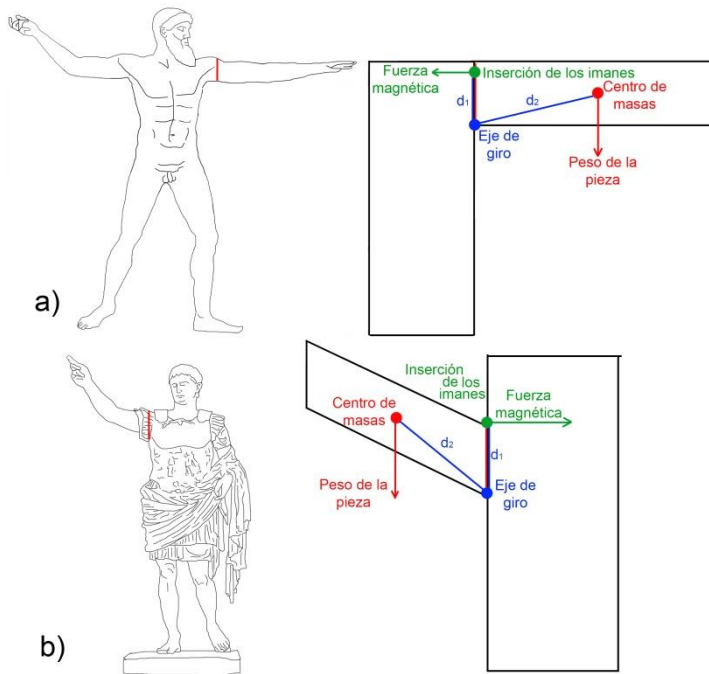


Figura 21. Ejemplos de aplicación del modelo teórico a dos esculturas. a) Posición del brazo perpendicular. b) Posición del brazo en diagonal.

En la figura 22 se plantea el caso donde el centro de masas no se encuentre en el centro geométrico de la escultura. Simplemente hay que hallar su posición para incorporar el dato a los cálculos y poder calcular la distancia del punto de aplicación del peso al eje de giro.

Hay que recordar que el centro de masas es un punto que puede hallarse fuera de la propia escultura (figura 21 b) y que puede calcularse tal y como se ha desarrollado en el punto 3.4.2.

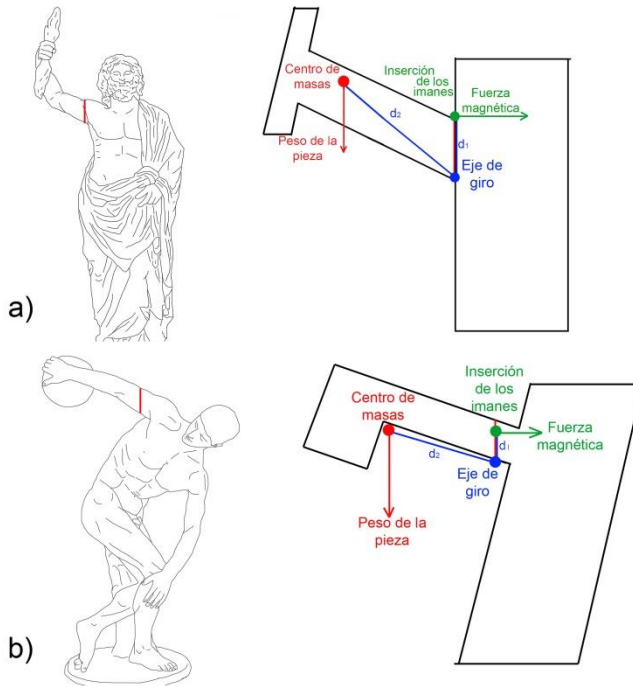


Figura 22. Ejemplos de aplicación del modelo teórico a dos esculturas con brazos en diagonal y atributos.

Finalmente, en la figura 23 se puede apreciar el ejemplo más sencillo del modelo teórico donde no hay eje de giro. En este caso, los imanes han de contener la fuerza necesaria correspondiente al peso de la pieza.

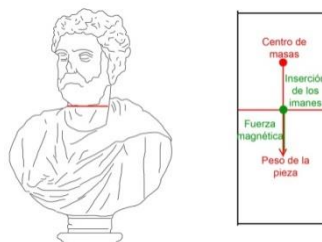


Figura 23. Sección de cabeza paralela al suelo.

4.2. Materiales.

Los materiales utilizados en el apartado experimental se han dividido en tres grupos: a) soportes inorgánicos y orgánicos, b) sistemas magnéticos y polvos metálicos y, c) adhesivos.

4.2.1. Soportes inorgánicos y orgánicos.

Se han diferenciado dos grandes grupos: por un lado, los materiales inorgánicos (materiales pétreos biocalcarenita de Novelda, mármol de Macael y escayola “Álamo 70®”); y, por otro lado, los soportes orgánicos (materiales ligneos –pino Melis y madera de roble- y, las ceras).

La elección de estos materiales se debe a su presencia en multitud de casos de esculturas y ornamentos de nuestro Patrimonio Cultural y, a la idea de cubrir un amplio abanico de posibilidades durante la aplicación de los sistemas magnéticos.

La escayola “Álamo 70®” es un sulfato cálcico hemihidrato con una dureza de 480 kg/cm² (Llauradó, 2011:39). Se trata de un producto ampliamente usado en el campo de la restauración de obras de arte y presenta unas propiedades similares a los yesos antiguos. Es un producto producido por Hebor S.A. y suministrado por AGM (Valencia).

La piedra calcarenita de Novelda, también denominada piedra Bateig, es una roca de naturaleza arenisca formada por la consolidación de arenas calcáreas y fósiles. Concretamente, se trata de una roca cabonática del tipo biocalcarenita (Fort, 2001:20-26), de porosidad alta (entre 12,7 % y 20,4 %) y, de color crema. Se extrae del área de Vinalopó Medio. Su coloración se debe al contenido de hierro y cuarzo de su composición. La piedra utilizada en esta tesis ha sido suministrada por Bateig Piedra Natural (Alicante).

El mármol seleccionado es de Macael (Almería) y de color blanco (Bello, *et al.* 1992:23-30; Saéz-Pérez y Rodríguez-Gordillo, 2008: 2021-2126; Luque, *et al.* 2009: 209-216). Su composición mineral es calcita de tamaño de grano medio, con minerales opacos y cuarzo. Tiene una porosidad total del 2,5 % y una dureza 3 en la escala de Mohs. La piedra utilizada en esta tesis ha sido suministrada por Gonzalo Esteban Fernández (Almería).

La madera de pino Melis es un tipo de madera perteneciente a la familia de las resinosas. Sus características más notables son su duramen amarillo anaranjado o marrón rojizo (Capuz, 2005:37). Es sensible a los hongos y a las termitas. Tiene una densidad aparente al 12 % de humedad de 0,51 kg/m³. Es una madera semiligera, blanda y estable con un coeficiente de contracción volumétrico de 0,41 % y una resistencia a flexión estática de 975 kg/cm².

Por el contrario, la madera de roble es una madera densa que pertenece al grupo de las frondosas. Presenta un color pardo y es una madera dura, resistente, pesada y poco alterable. Es muy estable a los cambios higrométricos. Su peso específico, seco al aire, oscila entre 650 y 800 Kg el m³ (Capuz, 2005:39). Su densidad aparente al 12 % de humedad es de 0,77 kg/m³.

Finalmente, se han seleccionado 3 tipos de ceras: a) cera Lascaux que es una mezcla de cera microcristalina y resina de politerpeno sintético, en formato comercial con un punto de fusión en el intervalo 60 - 68 °C; b) cera de abeja pura de la primera producción de las abejas alimentadas con polen de romero y, c) receta tradicional de cera de modelado para ceroplástica resultado de añadir 6 partes de cera fina, 2 partes de trementina de Venecia y ½ parte de grasa de cerdo.

4.2.2. Sistemas magnéticos y polvos metálicos.

Este apartado se refiere al conjunto de imanes y polvos metálicos (hierro y hierro con níquel-cobre) empleados en el proceso de unión y en la preparación de las diferentes probetas a ensayar.

En este trabajo se han utilizado únicamente imanes de una aleación neodimio, hierro y borro. Llevan un recubrimiento de Ni-Cu-Ni que previene la oxidación. En la tabla 1 se recogen las propiedades de los imanes utilizados en esta tesis doctoral, todos ellos suministrados por la empresa Supermagnete. Son imanes en forma de disco con imanación axial (paralelo al eje del disco). La referencia comercial de los imanes señala la forma de imán, las medidas de éste y la temperatura de operación máxima. Dentro de la ficha técnica de cada uno se puede analizar la calidad del material empleado en la fabricación del imán. Ésta consta de dos partes: primero se les asignan letras que conciernen a la temperatura máxima de operación²² y después números que se corresponden con el valor del producto energético máximo del imán²³.

²² La letra N, M, H o letras SH, UH o EH contienen información acerca de la temperatura máxima de uso que puede ser 80, 100, 120, 150, 180 o 200 °C.

²³ El producto energético máximo define la máxima energía magnética almacenada en un imán. Se trata del producto máximo que puede alcanzar un material a partir de densidad de flujo B e intensidad de campo H.

Tabla 1. Referencia y características de los imanes.

REFERENCIA COMERCIAL	DIÁMETRO	ALTURA	CALIDAD DEL MATERIAL	FUERZA DE SUJECIÓN
S-02-01-N	2 mm	1 mm	N48	aprox. 1,27 N
S-04-1.5-N	4 mm	1,5 mm	N45	aprox. 3,43 N
S-10-05-N	10 mm	5mm	N42	aprox. 23,1 N
S-12-06-N	12 mm	6mm	N45	aprox. 38,2 N
S-15-02-N	15 mm	2mm	N40	aprox. 18,6 N
S-15-03-N	15 mm	3mm	N45	aprox. 31,1 N
S-15-05-N	15 mm	5mm	N42	aprox. 44,5 N
S-20-05-N	20 mm	5mm	N42	aprox. 55 N
S-20-10-N	20 mm	10mm	N42	aprox. 105 N
S-25-05-N	25 mm	5mm	N42	aprox. 86,3 N
S-30-07-N	30 mm	7mm	N42	aprox. 136 N

Para la obtención de probetas magnéticas se han seleccionado dos tipos de polvos metálicos (Ver 4.2.1). Por un lado, se ha seleccionado polvo de hierro de 106 μm de tamaño de partícula obtenido mediante atomización y reducción en horno donde el contenido de hierro metálico mínimo es del 99,5 % y, por otro lado, un polvo de hierro con un 4,3 % de níquel y un 1,63 % de cobre. El proveedor ha sido Pometon²⁴.

²⁴ Pometon Powder. Metal powders and granules. <http://www.pometon.com/>

4.2.3. Adhesivos.

Para unir los sistemas magnéticos a los diferentes soportes se han utilizado diversos adhesivos termoplásticos (Paraloid-B72® y Plextol B500®) y termoendurecibles (Aradit estándar). El criterio de selección de los adhesivos ha sido la búsqueda de una fuerza de sujeción, una estabilidad térmica y química adecuada con vistas a la reversibilidad del sistema. Sin embargo, garantizar la unión en una fractura estructural obliga a seleccionar un adhesivo con una fuerza de sujeción suficiente que mantenga el imán fijado a la estructura.

Las resinas termoplásticas acrílicas Paraloid B-72® y Plextol B500® son ampliamente usadas en el campo de la conservación y restauración por su reversibilidad y baja toxicidad. Estas resinas empezaron a comercializarse en 1927 y a utilizarse en restauración en 1932 (Borgioli, 2002:5). El Paraloid B-72® es una resina acrílica 100% a base de etil-metacrilato, presentada en granos con una dureza 10-11, una temperatura de transición vítrea (t_g) de 35 °C y un pH de 10-11. El Plextol B500® es una resina acrílica pura termoplástica de media viscosidad en dispersión acuosa, con una viscosidad de 1100 - 4500 mPas a 20°C y un pH de 9,5.

Por otro lado, Aradit estándar (resiste fuerzas de tracción de hasta 350 kg/cm²) pertenecen al grupo de las resinas termoendurecibles epoxis. Éstas empezaron a comercializar en 1947 y pasaron a usarse en el campo de la restauración en 1952. Se distinguen por sus excepcionales características mecánicas y de adhesión (Borgioli, 2002:17).

4.3. Metodología experimental.

Este apartado muestra el procedimiento llevado a cabo en la preparación de las diferentes probetas usadas en los ensayos con la finalidad de analizar su comportamiento.

4.3.1. Preparación de probetas.

Se han realizado tres tipos de probetas con diferentes formas y tamaños: a) probetas en forma de placa de $20 \times 20 \times 2 \text{ cm}^3$ utilizadas para el ensayo de rozamiento siguiendo el tamaño referido en la norma UNE-EN 13364; b) de acuerdo al tipo de fragmentaciones se plantaron una serie de ensayos que reprodujeran casos reales, para ello se cortaron probetas en forma de bloque de $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$ y de $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$ truncadas a 45° , ambas utilizadas para los ensayos de unión y, c) probetas en bloque para el ensayo de adhesión cortadas a $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ según el tamaño referido en la norma UNE-EN 13755:2008.

Las probetas han sido referenciadas de acuerdo a un código de clasificación según el tipo de soporte, la forma, el número de pieza y el perfil (ver tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7).

Tabla 2. Código de clasificación de las probetas.

SOPORTE	FORMA
C → Calcarenita	B → Bloque
E → Escayola	T → Bloque trucado
M → Mármol	P → Plaqueta
P → Pino	A → Adhesivo
R → Roble	

Tabla 3. Relación de las masas de las probetas de Calcarenita para las distintas probetas.

CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA
CB1	3657 g	CT1	2515 g	CP1	1551 g
CB2	3562 g	CT2	2382 g	CP2	1457 g
CB3	3516 g	CT3	2355 g	CP3	1567 g
CB4	3708 g	CT4	2444 g	CP4	1556 g
CB5	3511 g	CT5	2454 g		
CB6	3714 g	CT6	2349 g		

Tabla 4. Relación de las masas de las probetas de Mármol para las distintas probetas.

CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA
MB1	4049 g	MT1	2751 g	MP1	2170 g
MB2	4013 g	MT2	2748 g	MP2	2160 g
MB3	4042 g	MT3	2779 g	MP3	2205 g
MB4	4036 g	MT4	2775 g	MP4	2269 g
MB5	4013 g	MT5	2730 g		
MB6	3985 g	MT6	2702 g		

Tabla 5. Relación de las masas de las probetas de Pino para las distintas probetas.

CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA
PB1	713 g	PT1	442 g	PP1	380 g
PB2	688 g	PT2	440 g	PP2	397 g
PB3	777 g	PT3	520 g		
		PT4	454 g		

Tabla 6. Relación de las masas de las probetas de Roble para las distintas probetas.

CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA
RB1	1111 g	RT1	766 g	RP1	683 g
RB2	1113 g	RT2	777 g	RP2	589 g
RB3	1119 g	RT3	753 g		
		RT4	797 g		

Las probetas de escayola se realizaron de acuerdo a la ficha técnica del fabricante. Se prepararon en laboratorio por colada sobre molde rígido con una proporción de agua y escayola de 1:1,86. Una vez fraguadas, se introdujeron en una estufa de aire caliente durante 7 días. Las primeras 48 horas, a 20 °C, su masa disminuyó un 8,87 % de media; las siguientes 48 horas, a 24 °C, un 5,2 % y, las últimas 72 horas, a 26 °C, disminuyeron un 1,38 %. Finalmente, pesaron un 15,45 % menos que antes del secado en la estufa.

Tabla 7. Relación de las masas de las probetas de Escayola para las distintas probetas.

CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA	CÓDIGO	MASA
EB1	1899 g	ET1	1198 g	EP1	1188 g
EB2	1837 g	ET2	1194 g	EP2	1252 g
EB3	1882 g	ET3	1177 g	EP3	1219 g
EB4	1905 g	ET4	1211 g	EP4	1285 g
EB5	1875 g	ET5	1188 g		
EB6	1912 g	ET6	1190 g		

Las probetas de cera metálicas se han realizado usando los dos tipos de polvos metálicos de base hierro descritos anteriormente en el punto 4.2.2. Con el segundo particulado, a base de hierro pero con una baja proporción de níquel y de cobre, se pretende comprobar si éste es más estable a la oxidación frente al primero, solo a base de hierro, prestando las mismas características magnéticas, ya que los componentes minoritarios cambian sus propiedades. En concreto, el níquel aporta protección al particulado ya que se oxida con facilidad. El óxido de níquel es un material duro y estable que protege al hierro ya que éste se mantiene en estado reducido mientras es el níquel el que se oxida. Todas las probetas se realizaron en las proporciones 1:2; 1:3; 1:4; 1:5; 1:6; 1:7 y 1:8 siendo 1 la parte de la cera seleccionada y 2, 3, 4... las partes de carga de polvo de hierro. También se preparó una probeta control de cera sin carga. Cada parte de las proporciones fue de 5 g siendo los siguientes pesos los correspondientes a las probetas de las ceras + carga (ver tabla 8). La temperatura de fusión de la cera fue de 70-75 °C. Una vez mezclada con las cargas metálicas se vertieron a una temperatura entre 62 y 67 °C. En total, se obtuvieron 48 probetas como se aprecia en la figura 24.

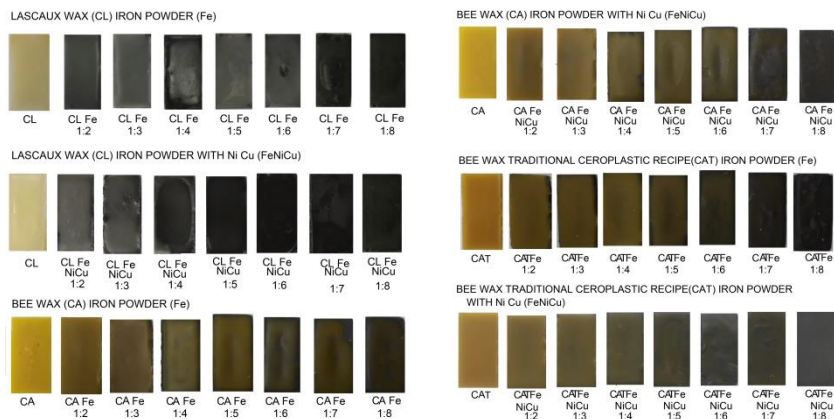


Figura 24. Probetas de ceras magnéticas preparadas.

Tabla 8. Masas de las ceras magnéticas.

PROPORCIÓN	Control	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8
MASA	5 g	15 g	20 g	25 g	30 g	35 g	40 g	45 g

Finalmente, se realizaron ensayos de tracción con el fin de conocer la fuerza de sujeción de las resinas Paraloid B-72®, Araldit estándar® y Plextol B500® y elegir la más apropiada para cada situación. Se prepararon los adhesivos, el Paraloid B72® se disolvió en acetona al 50 % y, en el Araldit® se mezclaron sus componentes al 50 %. Los 75 pares de probetas (pétreas y lúneas) fueron adheridas dos a dos en un área de 1 cm² y sujetadas hasta su endurecimiento mediante pinzas de presión.

4.3.2. Procedimiento de ensayos.

A continuación se detallan cómo se han efectuado los ensayos.

4.3.2.1. Ensayos de tracción con máquina comercial.

Mediante el uso de una máquina de tracción/compresión comercial se han estudiado a tracción tres estados de los imanes (figura 25):

- a) caracterizando los imanes nuevos suministrados por el fabricante,
- b) aplicándoles calor para comprobar cómo les afecta la temperatura,
- c) tras el ensayo de envejecimiento a la intemperie, para comprobar si se habían deteriorado y cuánto.

Además, con el ensayo de tracción se comprobó la resistencia de tres adhesivos (Paraloid B-72®, Araldit estándar® y Plextol B500®).

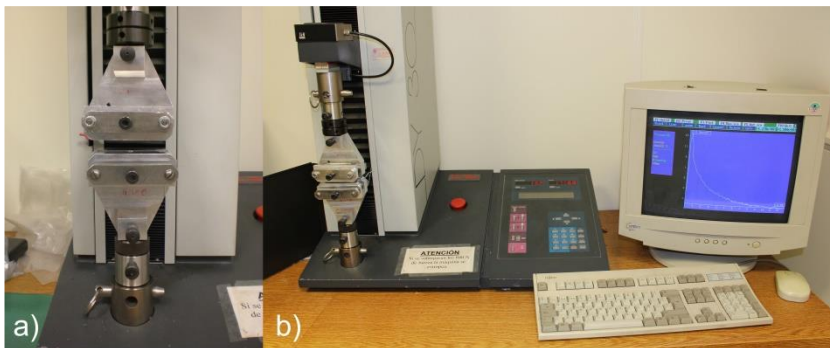


Figura 25. Máquina de tracción. a) Detalle de las mordazas. b) Plano general de la máquina. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

En primer lugar, para aplicar el modelo teórico ha sido necesario caracterizar previamente los imanes. De acuerdo con la información suministrada por el fabricante, la fuerza de sujeción que aparece en las fichas técnicas es la fuerza de atracción entre el imán y una pieza

ferromagnética. Sin embargo, en el modelo de unión que se propone, las uniones son del tipo imán-imán. Por ello se ha realizado un ensayo de tracción entre pares de imanes iguales. Se han colocado las parejas de imanes en la máquina de tracción sujetos cada uno a una mordaza y se ha comenzado el ensayo (figura 25 a y b).

En segundo lugar, para poder determinar el comportamiento de los imanes en distintos rangos de temperatura, estimar la temperatura de operación máxima y saber si son óptimos para destinarlos a la intemperie, se han realizado ensayos de tracción con temperatura variable. Para ello se ha colocado un termopar tipo K para controlar la temperatura y un sistema para calentar los imanes durante la medida de tracción (ver figura 26). Las temperaturas ensayadas han sido: a temperatura ambiente (25° C) y se ascendió hasta los 60 °C, se procedió al ensayo de tracción y se dejaron enfriar de nuevo a los 25 °C. Se ascendió a 80 °C y se dejó enfriar. De nuevo, se ascendió a 100 °C. Se realizó en mismo procedimiento hasta los 120 °C y una vez más hasta los 140 °C. Todo ello para poder determinar la máxima temperatura de trabajo de los imanes y el poder de recuperación una vez enfriados.



Figura 26. Ensayo de tracción de imanes a distintos rangos de temperatura. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

También se realizó un ensayo de tracción a los imanes S-12-06-N después de pasar por el ciclo de envejecimiento a la intemperie.

Finalmente, en el caso de los ensayos de resistencia a la tracción de los adhesivos se prepararon un total de 150 probetas de los cinco materiales escultóricos a estudio (yeso, calcarenita de Novelda, mármol de Macael, pino melis y roble), unidas con tres tipos de adhesivos: Paraloid B72® al 50 % en acetona, Plextol B500® y Araldit® estándar (figura 27) formando 75 parejas a estudio. El ensayo consistió en un ensayo de tracción obteniendo el dato de esfuerzo y rotura.



Figura 27. Algunas de las probetas con los adhesivos aplicados antes del ensayo de tracción. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

4.3.2.2. Coeficientes de rozamiento.

Uno de los parámetros que es necesario introducir en el modelo teórico es el coeficiente de rozamiento estático para los materiales utilizados. Este coeficiente da cuenta de la fricción de los mismos. En general, el coeficiente de rozamiento está tabulado para una gran cantidad de materiales. No obstante, consultando distintas tablas y bases de datos, se ha encontrado que los distintos materiales pétreos o lígneos se engloban generalmente dentro de un mismo grupo llamado piedra o madera respectivamente. Se ha considerado necesario, por tanto, realizar medidas experimentales del coeficiente para los grupos de materiales pétreos a estudio, Calcarenita de Novelda, escayola y mármol, de los soportes leñosos: roble y pino melis, respectivamente y finalmente de la cera.

El ensayo para conocer esos valores de coeficiente se realiza calculando el ángulo α que es el que forman dos materiales justo antes del deslizamiento de la pieza móvil sobre la pieza fija. Puede demostrarse que el coeficiente de rozamiento es $\mu = \tan \alpha$, siendo α el ángulo a partir del cual comienza el deslizamiento. El coeficiente de rozamiento depende mucho del estado de

pulido de las piezas. Por eso, se ha estimado realizar un estudio con piezas pulidas y obtener, de este modo, una medida inferior. El ensayo para calcular los coeficientes de rozamiento de los diferentes materiales consistió en inclinar una parte fija (la plaqueta) hasta que deslizase la parte móvil (el bloque). Como se puede ver en la figura 28, una vez hecho eso, se medía la altura h a la que había ascendido la plaqueta de lado l cuando el bloque comenzaba el movimiento. Para poder obtener el coeficiente de rozamiento a partir del ensayo y sabiendo que $\mu = \tan\alpha$, aplicamos:

$$\mu = \frac{h}{d} \rightarrow \mu = \frac{h}{\sqrt{l^2 - h^2}}$$

El estudio se ha realizado con distintas probetas, haciendo deslizar cada una de ellas, un mínimo de 10 veces por cada una de sus cuatro caras, sobre una plancha del mismo material. Para la combinación bloque con plaqueta se han obtenido un total de 40 medidas y para bloque trucado con plaqueta se han obtenido 50 medidas por cada material.

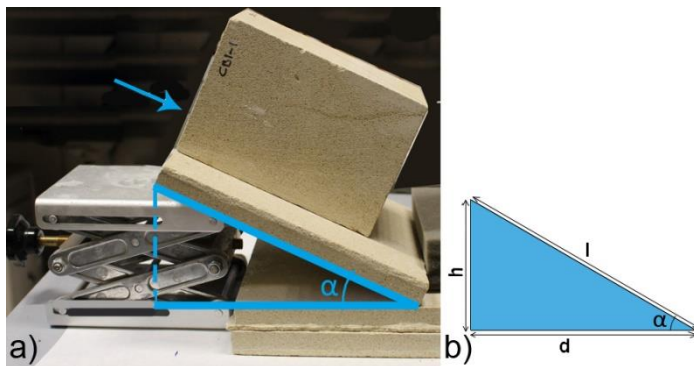


Figura 28. Cálculo de coeficiente de rozamiento. a) Ensayo real. b) Esquema de cálculo del coeficiente: l : lado de la plaqueta y h : la altura medida. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

4.3.2.3. Estudios de estática.

Con el fin de poder establecer un modelo que permita predecir la configuración necesaria de imanes para realizar una unión entre fragmentos, se han realizado diversos ensayos en probetas modelo. Se han realizado uniones con imanes en estas probetas y se han colocado pesos en distintos lugares de las piezas para valorar cómo depende la unión en cuanto a la fuerza y al momento de torque. Se han seleccionado dos configuraciones para los sistemas modelo a ensayar. La primera configuración (que se ha denominado configuración 1, ver figura 29), une un bloque de $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$ con un bloque de las mismas medidas pero truncado. En el segundo caso (configuración 2, ver figura 30) se unen dos bloques con la misma forma y dimensiones ($10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$). En todos los casos, se han utilizado dos imanes colocados a 3 cm de la parte superior y, a 2 cm de cada lado de modelo S-10-05-N.

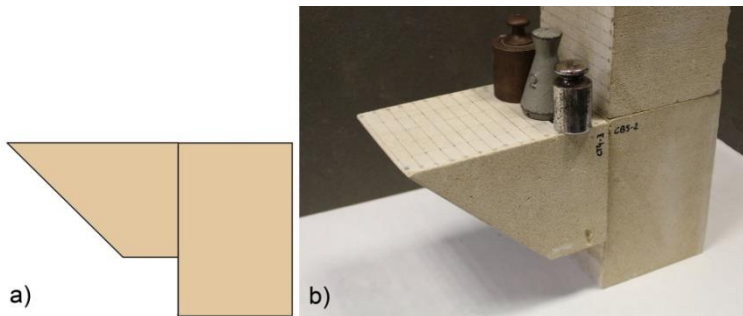


Figura 29. Ensayo de estática para la configuración 1. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

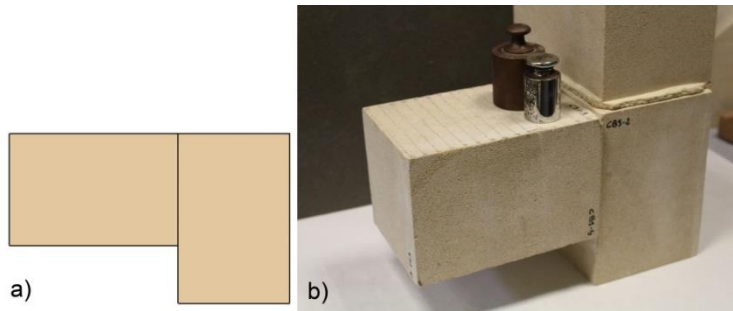


Figura 30. Ensayo de estática para la configuración 2. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

Para realizar los ensayos se han ido colocando pesas de valor normalizado sobre la pieza sujeta por los imanes, variando en cada ensayo la distancia entre las pesas y la unión (de centímetro en centímetro). De esta forma, se aumenta en cada ensayo tanto la masa total de la pieza soportada como la distancia del centro de masas del conjunto al eje de giro, lo que es equivalente a tener piezas más pesadas y/o más largas.

4.3.2.4. Medida del campo magnético.

Para conocer el campo magnético producido por los imanes fuera de las piezas unidas se han realizado medidas a distintas distancias de la unión. Se han medido las componentes longitudinal y transversal del campo (figura 31).



Figura 31. Mediciones de campo magnético con sonda. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

4.3.2.5. Reversibilidad del sistema mediante calentamiento controlado.

Uno de los aspectos importantes a considerar, desde el punto de vista de la restauración, es el principio de reversibilidad del sistema. Ser capaces de separar la unión magnética con una mínima fuerza mecánica garantiza, por un lado para no dañar la obra original en su exterior y, por otro, para poder acceder al adhesivo para disolverlo o reblandecerlo. Por ello, dado que la fuerza magnética entre los imanes depende de la temperatura, hemos estudiado cómo afecta ésta a la unión. El ensayo ha consistido en acoplar un sistema calefactor a la unión, estudiando para qué valor de temperatura se separan las piezas (figura 32). Como sistema de calefacción se ha utilizado una cinta resistiva conectada a un voltaje variable. Con el fin de homogeneizar la temperatura y de proteger la pieza, ésta se ha recubierto con papel de aluminio. La temperatura interior (junto a los imanes) y exterior (en el borde de la pieza) se ha monitorizado con termopares tipo K. Este sistema se ha aplicado en mármol y escayola excluyendo la madera, cera, o superficies policromas que son más susceptibles de ser dañadas por la temperatura.

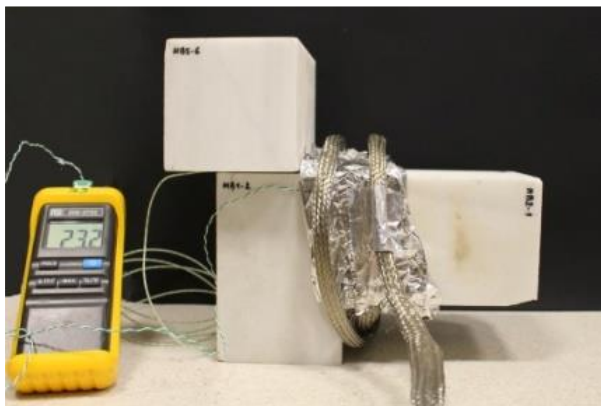


Figura 32. Reversibilidad del sistema mediante la aplicación de temperatura. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

4.3.2.6. Simulación del campo magnético.

Simular el campo magnético creado por los imanes utilizados en Restauración es fundamental ya que un campo magnético considerablemente alto fuera de la pieza puede producir la adhesión de partículas contaminantes magnéticas y derivar en un problema estético. La simulación además permite estudiar distintas configuraciones de colocación de los imanes sin tener que manipular la obra original. Las simulaciones se han realizado utilizando el software Comsol Multiphysics® que realiza simulaciones utilizando un método de elementos finitos. Teniendo en cuenta que la permeabilidad magnética relativa de los materiales pétreos, lígneos y cerosos es prácticamente 1, se han calculado los campos creados en el vacío por distintas configuraciones de imanes. Los cálculos son, por tanto, válidos para cualquier material de los ensayados (figura 33).

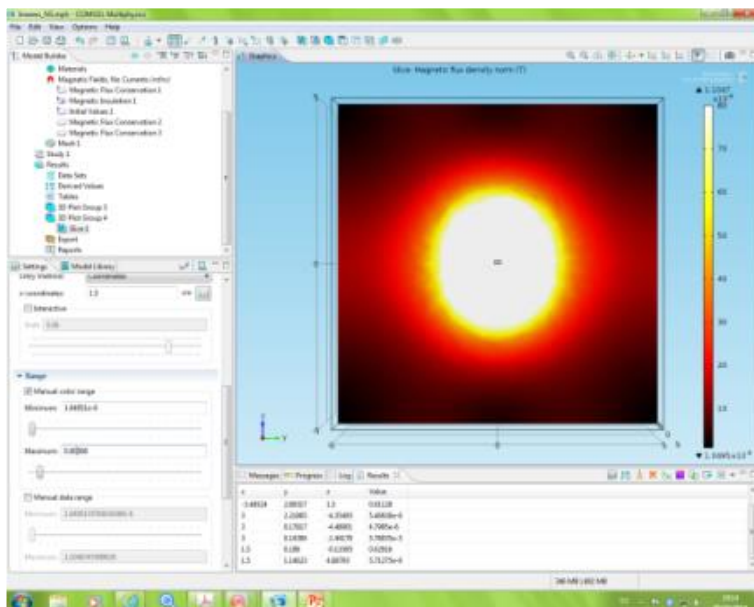


Figura 33. Programa de simulación de campo magnético. (Fotografía Sandra Ruiz-Gómez).

4.3.2.7. Ensayo de envejecimiento natural a la intemperie: Influencia de la temperatura y la humedad relativa.

Con el fin de estudiar si los imanes son apropiados para intervenciones destinadas a espacios exteriores o si por el contrario, habría que protegerlos o encapsularlos, se decidió colocar en un espacio abierto y ventilado, a la intemperie, tres probetas con distintas configuraciones de imanes: a) S-10-05-N unido a una estructura de acero inoxidable, b) dos imanes S-10-05-N unidos y a su vez también a la estructura de acero y, c) dos probetas de mármol de Macael unidas por tres pares de imanes S-10-05-N (figura 34). El ensayo se realizó durante 3000 horas, entre los meses de marzo y julio de 2015. La elección de estos meses permite valorar la influencia de temperaturas altas y de humedad. Paralelamente, se ha realizado un seguimiento diario de Temperatura (T) y humedad relativa (hR) a través de los datos extraídos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Posteriormente, se realizó un segundo estudio de 3000 horas, colocando a la intemperie 3 parejas de imanes del modelo S-12-06-N, durante los meses de octubre 2015 y enero 2016, para observar cómo afecta la humedad y la corrosión a la resistividad de la capa protectora.

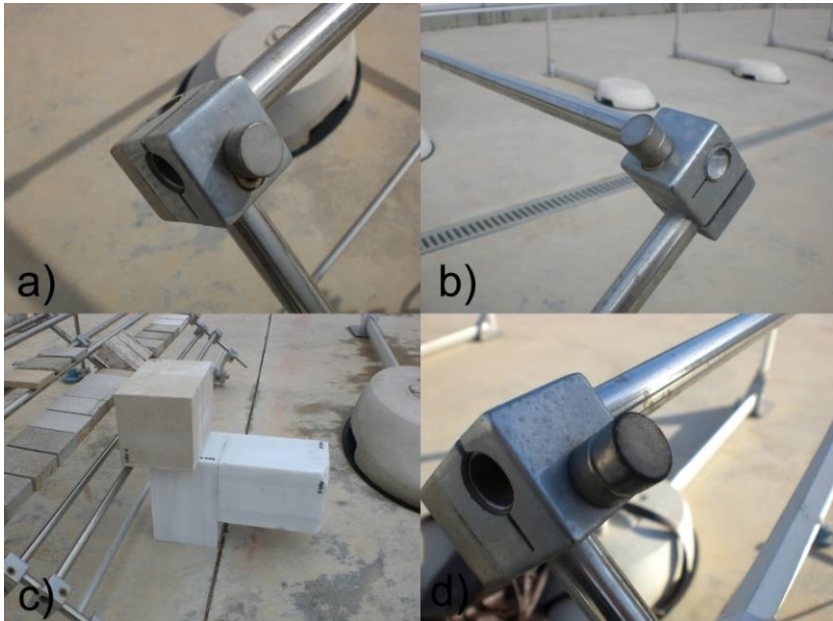


Figura 34. a) Imán S-10-05-N unido magnéticamente a la estructura, b) pareja de imanes S-10-05-N unidos a la estructura metálica. c) Bloques de mármol de Macael unidos por imanes S-10-05-N a la intemperie. d) Imanes S-12-06-N. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

4.3.2.8. Estudios microscópicos.

Los sistemas magnéticos sometidos a ensayo de envejecimiento natural fueron observados con la lupa binocular, y con el microscopio de fuerza atómica (AFM) con el fin de determinar la existencia en superficie de posibles cambios morfológicos. También se realizó microscopía electrónica de barrido (SEM) con análisis de composición por dispersión de energía de rayos X (EDX).

Los imanes fueron observados antes y después del proceso de envejecimiento sin requerirse preparación alguna de las muestras para la lupa y el AFM. Para el SEM se recubrieron de carbono antes del análisis.

4.3.2.9. Ceras magnéticas.

La finalidad de las ceras magnéticas es la creación de prótesis para escultura de ceroplástica. Los 3 tipos de ceras (con la adición de los particulados metálicos) seleccionadas para los ensayos son, a) cera Lascaux (CL) en formato comercial, b) cera de abeja pura (CA) y, c) cera con la receta tradicional (CAT), se sometieron a ensayo de tracción. Para ello, se unieron las probetas de cera con propiedades magnéticas a un imán S-10-05-N y se fueron añadiendo pesas estandarizadas hasta que la unión magnética sufría el fallo (figura 35 a).

De igual modo, las propiedades magnéticas de las mezclas resultantes de combinar cera y polvo magnético se estudiaron utilizando un magnetómetro de muestra vibrante (VSM) (Figura 35 b).



Figura 35. Ensayos realizados sobre ceras magnéticas. a) Ensayo de tracción con pesas. b) Ensayo en VSM. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

4.3.3. Instrumentación.

El conjunto de aparatos e instrumentos empleados en los análisis y ensayos durante todo el trabajo experimental se especifican a continuación:

Los ensayos mecánicos se realizaron con una máquina de tracción ADAMEL LHOMARGY modelo DY 30 configurado con el software Autotrac. Para los ensayos de tracción en función de la temperatura se incorporó al sistema una decapadora Steinel HL 1910E electronic que calentaba las piezas mediante aire caliente. La medida de temperatura se realizó con un lector RS 206-3722.

Las medidas de campo magnético se realizaron con una sonda Hall FH 55 de la marca Magnet-Physik.

El control de las oscilaciones termohigrométricas de los imanes a la intemperie se tomaron de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) teniendo su estación meteorológica situada en latitud: 39° 28' 50" N - longitud: 0° 21' 59" O y altitud 11 m, a unos 2,5 km del lugar de ensayo.

Los análisis de la superficie de los imanes se realizaron con una lupa binocular marca LEICA modelo MZ APO con los siguientes parámetros: luz abierta e intensidad media/ elevada. Asimismo, se utilizó un microscopio de fuerza atómica (AFM) marca BRUKER modelo Multimode 8 en modo Tapping que mide la topografía tocando intermitentemente la superficie de la muestra con una punta oscilante. Se eliminan las fuerzas laterales y de presión que pueden dañar las muestras blandas y reducir la resolución de la imagen, y, por último, un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL y modelo JSM 6300 que ofrece la típica imagen en blanco y negro de la topografía de la superficie examinada. Es la señal más adecuada para la observación de la muestra por ser la de mayor resolución. Además el detector de rayos X recibe los rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Como la

energía de cada rayo X es característica de cada elemento, podemos obtener información analítica cualitativa y cuantitativa de áreas del tamaño que deseemos de la superficie.

La temperatura de la cera se controló con un termómetro láser IR (Flash III. TFA)

Las curvas de histéresis se realizaron en un magnetómetro de muestra vibrante LakeShore Modelo 7304.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se exponen los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados.

5.1. Caracterización de los imanes.

Como se ha expuesto en la introducción, el conocimiento de la fuerza de atracción entre imanes es fundamental para realizar uniones magnéticas. Además, es importante conocer la relación entre la fuerza máxima de atracción entre imanes – la que aparece en el modelo teórico desarrollado – y el valor que proporciona el fabricante en su ficha técnica – que no necesariamente se ha medido en una unión imán-imán. Establecer esta correlación entre fuerza máxima y ficha técnica es fundamental ya que un restaurador solo dispondrá, en la mayoría de los casos, de lo segundo para decidir cómo realizar una unión con imanes. El objeto de este capítulo es establecer esta correlación.

En primer lugar se realizaron medidas de curvas fuerza – distancia para una pareja de imanes S-10-05-N. Como se ha explicado en el apartado 4.3.2.1, las medidas se realizaron mediante un ensayo de tracción en una máquina de compresión/tracción comercial, repitiendo cada uno de los ensayos dos veces para cada una de las cuatro parejas del mismo modelo de imán.

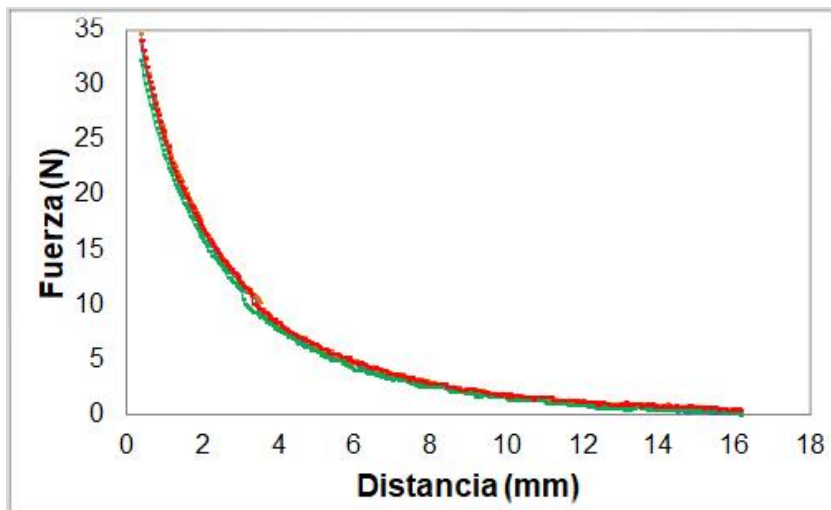


Figura 36. Variación de la fuerza de atracción entre una pareja de imanes S-10-05-N en función de la distancia entre ellos. Por claridad, la figura incluye únicamente dos curvas representativas, ya que el comportamiento fue similar en todos los ensayos.

La figura 36 representa la fuerza de atracción entre los imanes en función de la distancia entre ellos. El comportamiento de las 4 parejas de imanes es el mismo para cada repetición (se repitió el ensayo 2 veces por pareja para comprobar que se obtenía el mismo dato para cada par). Por ello, en la gráfica solo se han representado algunas de las medidas. Como es esperable, el valor de la fuerza es máximo cuando los imanes están en contacto. Cuando los imanes comienzan a separarse, la fuerza disminuye de forma inversamente proporcional a la distancia. En este ensayo estamos interesados en conocer la fuerza máxima de atracción, i.e. la fuerza entre ambos imanes justo antes de separarse. La fuerza de atracción máxima medida para este tipo de imanes es de $33,6 \pm 1,0$ N. Si comparamos con el valor proporcionado por la ficha técnica, que es de 23,1 N, el valor medido es un 45,5 % mayor.

Con el fin de comprobar si esta discrepancia entre fuerza máxima y ficha técnica es común a todos los imanes, es interesante realizar el mismo experimento para el resto de imanes utilizados en esta tesis doctoral. No obstante, la máquina de tracción solo permite introducir piezas de tamaño inferior a 20 mm. Por tanto hemos realizado estudios de tracción únicamente en los imanes S-12-06-N, S-15-02-N, S-15-03-N y S-15-05-N, de 12 y 15 mm, medidas que se recogen en la figura 37:

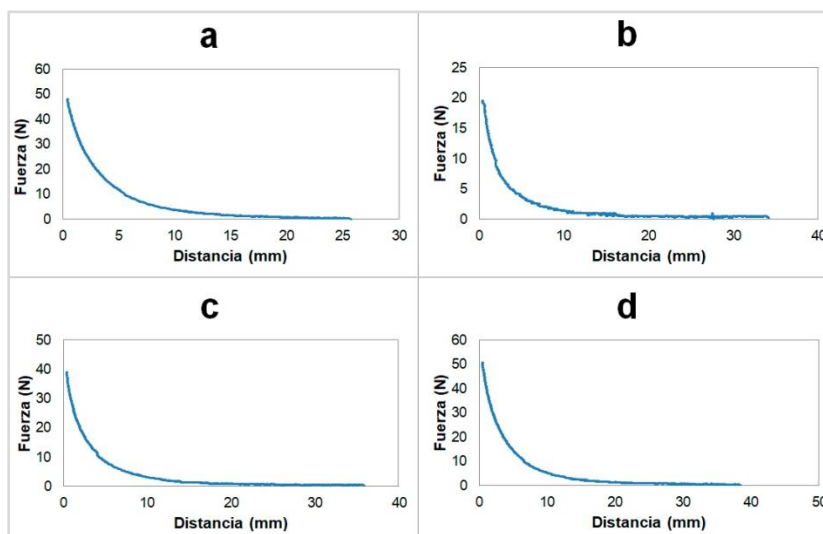


Figura 37. Variación de la fuerza entre dos imanes en función de la separación entre los mismos para imanes del tipo a) S-12-06-N, b) S-15-02-N, c) S-15-03-N y d) S-15-05-N.

De las curvas anteriores, se pueden obtener los valores máximos de la fuerza de atracción entre imanes. Se recogen en la tabla 9, donde se comparan con los valores de referencia que proporciona el fabricante.

Tabla 9. Fuerza máxima medida en los ensayos de tracción para las parejas de imanes y desviación de este valor con respecto al valor de fuerza de atracción proporcionado por el fabricante.

IMÁN	FUERZA MÁXIMA	FUERZA FICHA TÉCNICA	DESVIACIÓN
S-10-05-N	33,6 N	23,1 N	45,5 %
S-12-06-N	48,6 N	38,2 N	28,8 %
S-15-02-N	19,5 N	18,6 N	4,9 %
S-15-03-N	39,0 N	31,1 N	25,5 %
S-15-05-N	50,9 N	44,5 N	14,3 %

En todos los casos el valor medido es superior al proporcionado por el proveedor por lo que tomando el valor de la ficha técnica de los imanes como referencia, tenemos un margen de seguridad en los valores calculados de fuerza en la unión. El margen de seguridad aporta una reducción del riesgo que puede surgir de la manipulación de la pieza después de la intervención. Por este motivo, este exceso de fuerza que proporcionan los imanes se une al margen de seguridad que ya se considera en la aplicación del modelo teórico tal y como se desarrolla en el punto 6.1.

La temperatura máxima de operación de los imanes de NdFeB utilizados en este trabajo es de 80 °C, de acuerdo con los datos proporcionados por el proveedor. Para confirmar este dato, se han realizado ensayos de tracción en función de la temperatura en el intervalo entre 25 °C y 140 °C. Tras calentar a cada una de las temperaturas estudiadas, hemos realizado una medida a temperatura ambiente para comprobar si el imán recupera o no las condiciones de trabajo. Para ello hemos incorporado a la máquina de

tracción un sistema calefactor y un termopar para medir la temperatura. La figura 38 recoge los resultados de los experimentos realizados en una pareja de imanes S-10-05-N.

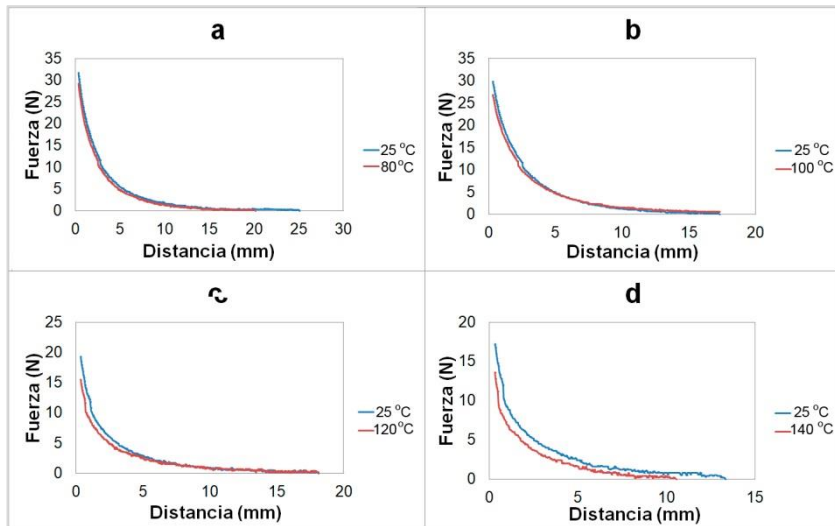


Figura 38. Comportamiento de los imanes S-10-05-N tras los intervalos de: a) de 80 °C y de 25 °C, b) de 100 °C y de 25 °C, c) de 120 °C y de 25 °C y d) de 140 °C y de 25 °C de temperatura.

La figura muestra el proceso de calentamiento y posterior enfriamiento para comprobar la pérdida y la recuperación ulterior.

Las curvas de tracción medidas a 25 °C y 60 °C son muy similares. De hecho, tras calentar a 60 °C no se observa pérdida de fuerza máxima en los imanes. A partir de 80 °C se empiezan a observar cambios en la curva de tracción (Figura 38.a), que presenta ligeras variaciones en la fuerza máxima. Además, en la tabla 10 se aprecia que la fuerza es un 15 % inferior al dato obtenido en el ensayo de tracción pero sigue siendo un 26 % superior a la que recoge la ficha técnica. No obstante, los imanes recuperan prácticamente sus propiedades magnéticas al enfriarse, como puede observarse en la curva de tracción medida a temperatura ambiente tras el

calentamiento y en la tabla: la fuerza solo es un 1 % inferior. Sin embargo, a partir de 100 °C los imanes empiezan a perder sus propiedades magnéticas de forma permanente (ver. Figura 38.b). Tras calentar a esta temperatura y enfriar a temperatura ambiente, la fuerza disminuye un 25 % con respecto a la medida en los ensayos de tracción. Tras calentar a 120 °C, la fuerza es inferior al de la ficha técnica, siendo un 49 % menos (ver también la figura 38.c). Finalmente, tras someter a los mismos a un tratamiento de 140 °C, la fuerza máxima se reduce drásticamente siendo un 70 % inferior al dato proporcionado por el fabricante (figura 38.d). Los datos de pérdida se pueden comparar en la tabla 10.

Por tanto, se puede considerar que la temperatura de trabajo máxima de estos imanes es de 80 °C, temperatura más que suficiente para el tipo de aplicaciones que se persiguen en este trabajo, tanto para ambientes exteriores como para interior. Este dato coincide con el proporcionado por el proveedor.

Tabla 10. Comparación en porcentajes de los datos obtenidos a distinta temperatura. En la fila “comparación con ficha” se hace el balance entre el dato de tracción tras el calentamiento y la ficha técnica y en la fila “comparación con ensayo de tracción” entre el estudio de tracción inicial y el del calentamiento.

	80 °C	25 °C	100 °C	25 °C	120 °C	25 °C	140 °C	25 °C
Comparación con ficha	+26%	+45%	+16%	+29%	-49 %	-20%	-70 %	-34%
Comparación con ensayo de tracción	-15%	-1%	-25 %	-13 %		-74%		-95%

5.2. Ensayos de tracción con adhesivos.

Además de considerar la fuerza imán-imán, es necesario estudiar los adhesivos utilizados para fijar los imanes y el material escultórico. La fuerza de adhesión ha de ser superior a la fuerza magnética para poder utilizar dicho adhesivo en restauraciones con imanes. Con este fin se realizaron ensayos de tracción combinando distintos materiales escultóricos con diversos adhesivos considerados estructurales. En las probetas preparadas según se describió en el apartado 4.3.2.1, se aplicó una superficie de 1 cm^2 del adhesivo seleccionado y se unieron por parejas del mismo material aplicando la misma fuerza mediante pinzas de presión. Se aplicaron los mismos 3 adhesivos a los 5 materiales escultóricos bajo estudio. Una vez polimerizado el adhesivo, se realizó un ensayo de tracción para estudiar la fuerza de adhesión del adhesivo.









Tras el ensayo de tracción se han observado distintos tipos de ruptura en la unión.

- a) Verde para el fallo cohesivo del adhesivo. La fractura de la unión adhesiva se produjo en el propio material adhesivo. Se pueden observar restos de adhesivos en ambas superficies del sustrato. Esto ocurre cuando se expone la unión adhesiva a un esfuerzo superior al cual se ha diseñado.
- b) Azul para el fallo del adhesivo: solo se encuentra adhesivo en uno de los lados. La fractura de la unión adhesiva se ha producido en la zona de adhesión entre el adhesivo y el sustrato, y en dicha fractura el adhesivo se encuentra totalmente o parcialmente separado de la superficie del sustrato. El motivo principal es una incorrecta selección del adhesivo, que no genera adhesión sobre la superficie del sustrato.
- c) Naranja para el fallo mixto: cuando se encuentran partes de fallo cohesivo y de fallo del adhesivo.

- d) **Amarillo para el fallo estructural:** cuando la unión del adhesivo no ha fallado y sin embargo se ha producido la fractura de la unión adhesiva en alguno de los 2 sustratos. Esto ocurre cuando la resistencia del sustrato es menor que la resistencia de la unión adhesiva. Lo que ocurre es que se rompe la probeta.

A cada uno de los tipos de ruptura se le ha asignado un color, que servirá como código en las tablas siguientes (tablas 11 y 12).

Tabla 11. Explicación de los tipos de ruptura y de los códigos de color asignados.

	TIPO DE RUPTURA	EXPLICACIÓN	CÓDIGO DE COLOR
	FALLO COHESIVO DEL ADHESIVO	Se aprecia en ambas partes de los materiales	
	FALLO MIXTO	Entre el fallo cohesivo y del adhesivo	
	FALLO DEL ADHESIVO	El adhesivo se queda en una de las partes	
	FALLO ESTRUCTURAL	Se rompe la probeta	

Los resultados pueden verse en las tablas 12 y 13, que muestra la fuerza media a la que se han sometido las probetas hasta que se han separado. De las 75 probetas iniciales, solo se han ensayado 47. Hubo varias probetas, en especial las de escayola, que no se ensayaron debido a su fragilidad. En numerosos casos se registraba fallo estructural con la mera manipulación de las probetas para colocarlas en la máquina de tracción. Además, sobre todo en calcarenita, hubo algunas probetas que presentaron

fallo del adhesivo, posiblemente por no mojar bien la superficie, y tampoco se ensayaron porque rompieron durante la manipulación para colocarlas en la máquina de tracción.

Además de estos datos, en la tabla 12 se ha realizado una clasificación de las roturas registradas en cada repetición. En las probetas de materiales lígneos unidas mediante resinas acrílicas, el tipo de rotura fue en todos los casos el fallo del adhesivo. Este mismo tipo de fallo también se observa en las pruebas de estas resinas en mármol. En calcarenita sin embargo, para las resinas acrílicas se encuentra tanto fallo adhesivo, como fallo mixto y estructural. Hay que destacar que el Araldit estándar® provocó fallo estructural: se rompieron todas las probetas de todos los materiales y no se separó ninguna junta de unión. Esto significa que se asegura una estabilidad estructural en el adhesivo que garantiza la adhesión. Por eso, a pesar de su irreversibilidad, las resinas epoxi destacan como por ser adecuadas como adhesivo estructural.

Tabla 12. Ensayo de tracción de los adhesivos Paraloid B72®, Plextol B500® y Araldit estándar®. Fuerza máxima, elongación del adhesivo antes de la ruptura de la unión, tipo de ruptura y número de veces en materiales pétreos.

MATERIAL	ADHESIVO	FUERZA MÁXIMA	ELONGACIÓN MÁXIMA	TIPO DE ROTURA
CALCARENITA DE NOVELDA	PARALOID B72	72 N	0,38 mm	1
				2
	PLEXTOL B500	84 N	0,81 mm	1
				2
	ARALDIT ESTÁNDAR	241 N	1,14 mm	1
				2
3				
ESCAYOLA ÁLAMO 70	PARALOID B72	112 N	0,45 mm	1
	ARALDIT ESTÁNDAR	151 N	0,62 mm	2
				3
MÁRMOL DE MACAEL	PARALOID B72	285 N	1,21 mm	1
				2
				3
				4
	PLEXTOL B500	191 N	1,11 mm	1
				2
				3
	ARALDIT ESTÁNDAR	440 N	1,27 mm	1
				2
3				
4				
5				

Tabla 13. Ensayo de tracción de los adhesivos Paraloid B72®, Plectol B500® y Araldit estándar®. Fuerza máxima, elongación del adhesivo antes de la ruptura de la unión, tipo de ruptura y número de veces en materiales ligneos.

MATERIAL	ADHESIVO	FUERZA MÁXIMA	ELONGACIÓN MÁXIMA	TIPO DE ROTURA POR ENSAYO
PINO MELIS	PARALOID B72	206 N	0,64 mm	1
				2
				3
				4
	PLEXTOL B500	198 N	0,75 mm	1
				2
				3
				4
				5
	ARALDIT ESTÁNDAR	262 N	0,60 mm	1
				2
				3
				4
				5
	ROBLE	PARALOID B72	347 N	0,67 mm
2				
3				
PLEXTOL B500		240 N	0,72 mm	1
				2
				3
				4
				5
ARALDIT ESTÁNDAR		604 N	1,08 mm	1
				2
				3

Desde el punto de vista de la fuerza máxima soportada por el adhesivo, el Paraloid B72® y el Plextol B500® presentan un comportamiento similar cuando se usan en calcarenita. Sin embargo, la unión realizada con Plextol B500® es más elástica, presentando una elongación máxima antes de ruptura de 0,81 mm, más del doble de la observada al realizar la unión con Paraloid B72®.

En mármol, destaca el comportamiento del Paraloid B72®, que presenta un buen comportamiento en tracción, con una fuerza máxima soportada por la unión de 285,10 N.

Al igual que ocurrió en calcarenita, Paraloid B72® y Plextol B500® presentan resultados de fuerza máxima muy similares en pino siendo de 206 N y de 197,88 N respectivamente. Sin embargo, el Plextol B500® tiene un valor de elongación más elevado denotando una conducta más elástica que el Paraloid B72®. En roble sin embargo, los dos adhesivos acrílicos tienen una elongación máxima similar (de 0,67 y 0,72 mm respectivamente). No obstante, la fuerza máxima medida con Paraloid B72® es de 347 N mientras que la del Plextol B500® es considerablemente inferior siendo de 240 N.

5.3. Coeficientes de rozamiento.

Como se ha descrito en el punto 4.3.2.2, uno de los parámetros que es necesario introducir en el modelo teórico es el coeficiente de rozamiento estático de los materiales escultóricos. En la tabla 14 se recogen los coeficientes de rozamiento medidos para cada material. Con el fin de obtener una buena estadística, se ha realizado el experimento para distintas caras del material, realizando distintas medidas en cada cara.

Tabla 14. Coeficientes de rozamiento medidos. En cada columna de la tabla se recoge la media de los coeficientes de rozamiento calculados para cada cara y su desviación.

ESCAYOLA $\mu = 0,86$. Desv. 0,09									
Media	0,81	0,87	0,97	0,92	0,92	0,87	0,87	0,88	0,67
Desv.	0,03	0,03	0,04	0,06	0,02	0,02	0,02	0,01	0,06
CALCARENITA $\mu = 0,57$. Desv. 0,04									
Media	0,58	0,55	0,66	0,52	0,57	0,58	0,60	0,52	0,54
Desv.	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02
MÁRMOL $\mu = 0,78$. Desv. 0,02									
Media	0,72	0,79	0,77	0,79	0,78	0,79	0,77	0,80	0,79
Desv.	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02
PINO $\mu = 0,57$. Desv. 0,05									
media	0,57	0,52	0,51	0,57	0,61	0,59	0,63	0,50	0,64
Desv.	0,04	0,08	0,06	0,04	0,01	0,02	0,01	0,04	0,03
ROBLE $\mu = 0,30$. Desv. 0,04									
media	0,28	0,27	0,35	0,29	0,32	0,28	0,35	0,34	0,26
Desv.	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,05	0,05	0,03
CERA $\mu = 0,77$. Desv. 0,01									
Media	0,84	0,77	0,72	0,79	0,71	0,84	0,73	0,75	0,77
Desv.	0,05	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,05	0,01

Puede verse que los valores de la tabla presentan una gran dispersión, agrupándose en torno a $\mu = 0,86$ para la escayola, $\mu = 0,57$ para la Calcarenita de Novelda y $0,78$ para el mármol de Macael. A pesar de ser todos materiales pétreos, el coeficiente de rozamiento varía considerablemente de un material a otro. Algo similar puede apreciarse en los materiales lígneos, obteniendo un valor de $\mu = 0,57$ para el pino y de $\mu = 0,30$ para el roble. Finalmente, la cera obtiene un valor de $\mu = 0,77$. Es importante por tanto, a la hora de desarrollar un modelo, determinar el coeficiente de rozamiento que más se aproxima al tipo de material a utilizar.

En los valores recogidos en la tabla destaca la dispersión de valores, a pesar de que el coeficiente de rozamiento debería ser único para cada material. Esto es así porque el coeficiente de rozamiento depende en gran medida del estado de las superficies (pulido y homogeneidad, entre otras propiedades). Aunque las superficies se han pulido antes del ensayo, claramente la microestructura sigue afectando a la dispersión de los valores.

Es importante tener en cuenta esta dispersión a la hora de definir los valores necesarios de fuerza en la unión y utilizar siempre un margen de valores de μ en los cálculos que garantice un margen de seguridad razonable.



5.4. Estudios de estática.

En este ensayo, descrito en el apartado 4.3.2.3, se unen dos piezas de forma perpendicular con dos imanes S-10-05-N a 3 cm de la parte superior y a 2 cm de cada lado y se añade masa a distancia controlada de la unión. El objetivo es establecer las condiciones de equilibrio de la unión tanto en tracción como en rotación. Este ensayo se ha reproducido para distintas probetas de calcarenita, de escayola, de pino y de roble en distintas configuraciones, con las mismas posiciones de imanes. Se ha descartado el mármol, dado que la unión de dos piezas de este material no se podía

estabilizar con los mismos imanes ya que su peso era considerablemente mayor que el de los otros materiales a ensayar.

En cada una de las configuraciones hemos medido la fuerza máxima que soporta la unión en función de la distancia a la que colocamos las distintas pesas calibradas (ver figuras 39 y 40). En las curvas experimentales que presentamos a continuación aparece únicamente la masa de las pesas y no la de la propia pieza. Recogemos esta última en la tabla 15 para cada uno de los materiales y configuraciones.

Tabla 15. Masa de las distintas piezas utilizadas en los ensayos de estática.

	ESCAYOLA	CALCARENITA	PINO	ROBLE
 CONFIGURACIÓN 1	1198 g	2444 g	442 g	766 g
 CONFIGURACIÓN 2	1837 g	3657 g	688 g	1111 g

La figura 39 recoge el comportamiento de las uniones realizadas en materiales pétreos (escayola y calcarenita) y la figura 40 las realizadas en materiales lígneos (pino y roble). El comportamiento es muy similar para todos los materiales y uniones: a medida que las masas se van alejando de la unión, cada vez es necesaria una masa menor para que la unión falle.

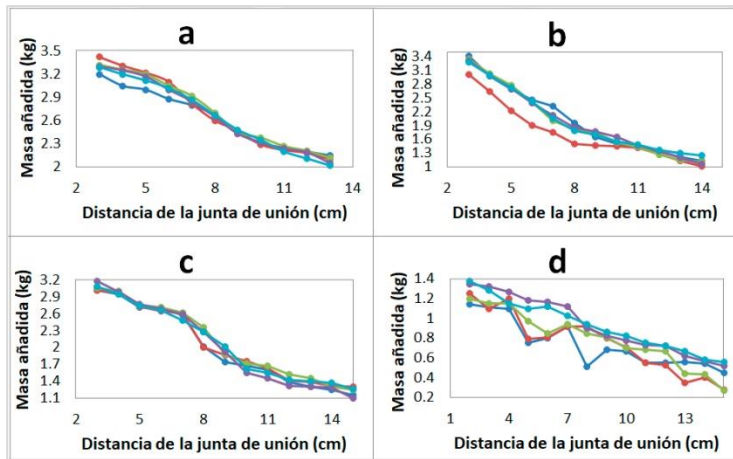


Figura 39. Gráfica de los resultados del ensayo de estática en los materiales pétreos escayola y calcarenita. Las 5 series corresponden a las 5 repeticiones del ensayo. El eje y es la masa añadida que produce el fallo de la unión. Y el eje x es la distancia que hay entre la unión de las dos piezas y el lugar donde se añaden las pesas en los siguientes casos: a) Escayola configuración 1. b) Escayola configuración 2. c) Calcarenita configuración 1. d) Calcarenita configuración 2.

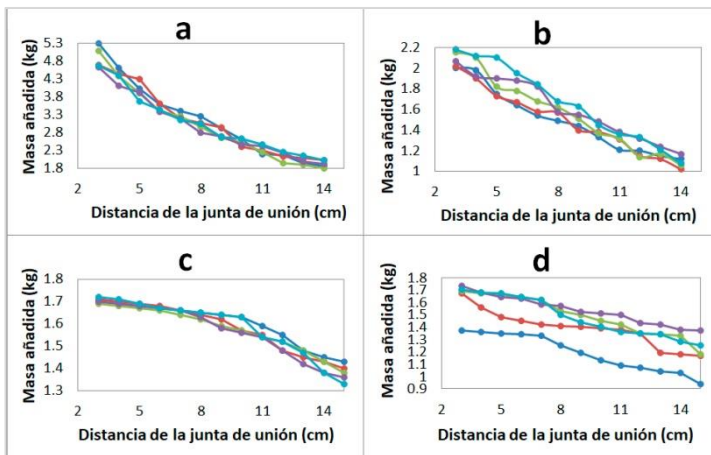


Figura 40. Gráfica de los resultados del ensayo de estática en los materiales lígneos pino y roble. Las 5 series corresponden a las 5 repeticiones del ensayo. El eje y es la masa añadida que produce el fallo de la unión. Y el eje x es la distancia que hay entre la unión de las dos piezas y el lugar donde se añaden las pesas en los siguientes casos: a) Pino configuración 1. b) Pino configuración 2. c) Roble configuración 1. d) Roble configuración 2.

Es interesante analizar también el peso máximo que soporta la unión en cada uno de los ensayos, que se corresponde con el valor obtenido al colocar las pesas en el lugar más próximo a la unión. Sumando la masa de la probeta a la masa de las pesas añadidas y convirtiendo el valor a peso ($P=mg$) se obtiene el peso máximo que soporta la unión. Los resultados se recogen en la tabla 16.

Tabla 16. Peso máximo que soporta la unión para cada material ensayado y en las dos configuraciones.

	ESCAYOLA	CALCARENITA	PINO	ROBLE
PESO MAX. CONFIGURACIÓN 1	45,3 N	55,2 N	58,7 N	24,4 N
PESO MAX. CONFIGURACIÓN 2	51,6 N	49,4 N	25,7 N	27,9 N

Se puede observar en los datos que, en el caso de los materiales pétreos, el peso máximo se encuentra en todos los casos en torno a 50 N independientemente de si el material es escayola o calcarenita. En el caso de los materiales lígneos, a excepción del valor obtenido en el pino en configuración 1, los valores son bastante inferiores situándose en torno a 26 N. Esto está en claro acuerdo con el modelo teórico desarrollado en la sección 4.1. En la ecuación 2 del modelo – la que da cuenta del equilibrio de fuerzas – queda claro que la fuerza máxima soportada por la unión en condiciones de deslizamiento depende únicamente de la fuerza magnética de sujeción (la fuerza proporcionada por los imanes) y del coeficiente de rozamiento entre las piezas a unir. Las medidas del coeficiente de rozamiento recogidas en la tabla 14 mostraban una gran dispersión de valores pero, en general, eran muy similares para todos los materiales

pétreos. Teniendo en cuenta que los imanes usados en todas las uniones son los mismos, queda justificado el hecho de que el peso máximo soportado por la unión sea muy similar para escayola y calcarenita. El coeficiente de rozamiento para los materiales lígneos, y en especial para el roble, es inferior, lo que resulta en un valor inferior para el peso máximo soportado por la unión.

A medida que se aleja el peso de la unión, las condiciones de estática y, por tanto, el fallo de la unión viene determinado por el equilibrio de los momentos de las fuerzas, recogido por la ecuación 3 del modelo teórico. En este caso, añadir peso a distancias mayores del eje de giro es equivalente a tener piezas con el centro de masas a una mayor distancia del citado eje. Observando la ecuación 3, es esperable un comportamiento hiperbólico de la fuerza con la distancia – ya que la dependencia es el tipo $1/d$ que es, cualitativamente, el comportamiento observado en los ensayos.

Por tanto, los ensayos realizados en piezas modelo verifican lo predicho por el modelo teórico desarrollado en la sección 4.1. Tenemos por tanto dos regímenes distintos. Cuando el peso se sitúa cerca de la unión, lo que determina el peso máximo en la unión es el equilibrio de fuerzas y existe un peso máximo que soporta la unión. Sin embargo, cuando el peso (o el centro de masas del sistema) se sitúa lejos del eje de giro, es el equilibrio de momentos el que determina el comportamiento de la unión y el peso que soporta la unión es considerablemente inferior.

5.5. Reversibilidad del sistema mediante calentamiento controlado.

Para garantizar la reversibilidad del sistema es importante separar la unión magnética realizando la mínima fuerza mecánica. Aprovechando que, como hemos descrito anteriormente, la fuerza magnética de los imanes disminuye al aplicar temperatura, hemos diseñado un ensayo consistente en aplicar

temperatura de manera controlada hasta conseguir separar la unión. Hemos realizado el ensayo para dos piezas de escayola y para dos piezas de mármol en configuración 2. Los resultados de los ensayos se muestran en la tabla 17.

La temperatura necesaria para que la unión se separe es, en todos los casos, cercana a 63 °C en el exterior de la pieza, temperatura fácil de lograr para hacer que el sistema sea reversible. Para esta temperatura, la temperatura en el interior de la pieza, en la zona donde se encuentran los imanes es aproximadamente 12 °C inferior.

Tabla 17. Ensayo de reversibilidad con temperatura controlada. Parámetros establecidos y temperaturas registradas en el interior y en el exterior de la pieza.

CICLO	MATERIAL	VOLTAJE	TIEMPO	T° EXTERIOR	T° INTERIOR	IMANES
1	Escayola	200 V	1h 10'	60,0 °C	53,1 °C	S-10-05-N
2	Escayola	200 V	2 h	60,5 °C	54,0 °C	S-10-05-N
3	Escayola	200 V	1h 30'	65,2 °C	53,4 °C	S-10-05-N
1	Mármol	200 V	1 h	62,5 °C	51,5 °C	S-15-05-N
2	Mármol	200 V	1h 15'	60,9 °C	50,5 °C	S-15-05-N
3	Mármol	200 V	1h 10'	62,5 °C	48,0 °C	S-15-05-N
4	Mármol	200 V	1h 30'	65,2 °C	50,0 °C	S-15-05-N
5	Mármol	200 V	1h 35'	67,5 °C	47,8 °C	S-15-05-N

Una vez enfriadas las piezas se repitieron los ensayos de tracción para comprobar si los imanes recuperan sus propiedades magnéticas. En las piezas sometidas a los ciclos de calentamiento/enfriamiento no se observaron cambios apreciables en la fuerza de atracción entre los imanes. No obstante se recomienda no reciclar los imanes más de dos veces tras separar la unión con aplicación de temperatura por seguridad para con la obra de arte.

Es importante destacar que no se observó ningún cambio o alteración en el material pétreo tras los ciclos de calentamiento/enfriamiento. Por tanto, este método es idóneo para conseguir sistemas de unión reversibles.

5.6. Medida de campo magnético.

No solo es importante que la unión sea estable. Dado que estamos utilizando imanes en la unión, es importante que el campo magnético en el exterior de la pieza sea mínimo, para evitar que se adhieran a la obra partículas ferromagnéticas suspendidas en el aire que producirán contaminación de la misma en la zona de la unión.

Para estudiar este efecto se ha medido, con la ayuda de una sonda Hall, el campo magnético en el exterior de dos piezas unidas en las condiciones del ensayo de estática: imanes situados a 3 centímetros de la parte superior y a 2 cm de cada lado. En particular, el ensayo de medida de campo magnético se ha realizado en dos bloques de escayola en configuración 1 (bloque-bloque truncado) y dos bloques de calcaenita también en configuración 1 unidos con dos imanes del modelo S-10-05-N. Se han tomado las medidas con una sonda colocada en posición paralela y perpendicular a la pieza con lo que se medirá la intensidad de las componentes de campo magnético en estas dos posiciones.

Como se puede ver en las figuras 41.a y 41.c, la componente del campo paralela toma valores de entre 4 y 6 mT cuando los imanes están situados a 2 cm de la superficie de la pieza. A 3 cm del imán, los valores de campo disminuyen, como es de esperar, obteniendo valores de campo en torno a 2 mT. El campo medido en la dirección perpendicular es menos intenso (ver figuras 41.b y 41.d). Cerca del imán alcanza un valor de aproximadamente 2 mT. El campo es prácticamente nulo a 2 cm del imán.

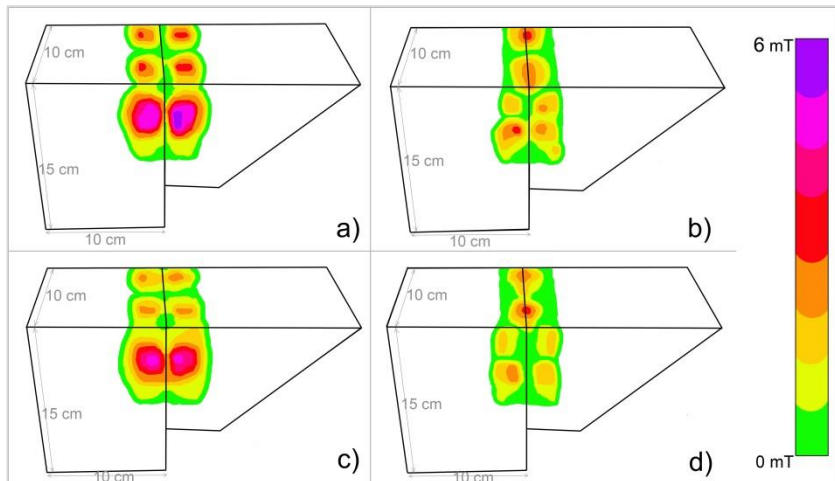


Figura 41. Gráfico que representa la intensidad del campo registrado con la sonda de medida de campo magnético. a) Escayola medida con la sonda en posición paralela a la pieza. b) Escayola medida con la sonda en posición perpendicular a la pieza. c) Calcarenita medida con la sonda en posición paralela a la pieza. d) Calcarenita medida con la sonda en posición perpendicular a la pieza. La imagen muestra cómo las mediciones paralelas a la pieza son más intensas que las mediciones perpendiculares.

Los valores de campo magnético medidos en el exterior de las piezas son muy superiores al campo magnético terrestre. Es necesario por lo tanto explorar qué configuraciones de imanes son más adecuadas para minimizar el campo magnético en el exterior de la pieza. Dado la dificultad

experimental que conlleva la realización experimental de todas las configuraciones posibles, es necesario recurrir a la simulación.

5.7. Simulación de campo magnético.

El campo magnético en el exterior de las piezas se puede estimar mediante simulaciones. En particular, en esta sección mostramos cómo es posible realizar estos cálculos utilizando simulaciones por el método de elementos finitos, utilizando el módulo AC/DC del software COMSOL Multiphysics.

Como hemos visto anteriormente, si la configuración de los imanes no es la adecuada, los valores de campo magnético medidos en el exterior de las piezas pueden ser muy superiores al campo magnético terrestre. Es necesario por lo tanto explorar qué configuraciones de imanes son más adecuadas para minimizar el campo magnético en el exterior de la pieza.

La figura 42 muestra una comparación del campo creado por dos parejas de imanes en dos configuraciones distintas (paralela - N/S-N/S y antiparalela N/S-S/N), en dos planos distintos y a distintas distancias del sistema magnético. El código de colores de la figura es un código "térmico", donde el color blanco corresponde a una mayor intensidad del campo magnético (1,08 T) y el negro al menos intenso ($4,2 \times 10^{-5}$ T). Comparando ambas configuraciones puede verse como el campo en la configuración antiparalela se atenúa de manera mucho más rápida con la distancia, siendo muy pequeño en torno a 5×10^{-4} T a 3 cm del imán.

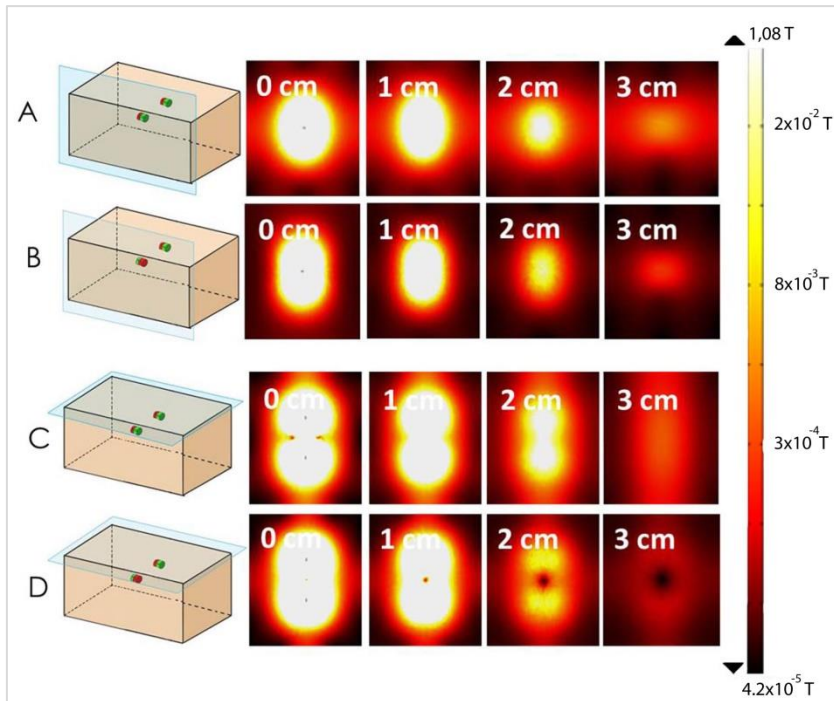


Figura 42. Simulación de campo magnético para dos imanes S-10-05-N comparando su colocación paralela o antiparalela. Medidas en Tesla. Estudio realizado en los planos yz y xy.

La imagen muestra cómo se atenúa el campo magnético cada centímetro hasta los 3 centímetros.

Teniendo en cuenta que con ambas configuraciones se obtiene la misma fuerza de sujeción, la configuración antiparalela es una configuración mejor ya que reduce el campo externo a la pieza y, por tanto, reduce las posibilidades de contaminación ambiental de la misma. Este tipo de cálculos de elementos finitos, que habitualmente se pueden realizar mediante software comercial, son un complemento esencial para este tipo de restauraciones magnéticas, como se ha mostrado con el ejemplo anterior.

5.8. Ensayo de envejecimiento natural a la intemperie: influencia de la temperatura y la humedad relativa.

Con el fin de evaluar el comportamiento de los imanes a la intemperie y valorar su viabilidad para ser utilizados en procesos restaurativos de uniones en esculturas que van a ser destinadas a espacios expuestos a las condiciones climatológicas, se realizó el ensayo de envejecimiento descrito en el apartado 4.3.2.7.

En el primer ciclo de envejecimiento, de 3000 horas de duración, se colocaron a la intemperie tres sistemas magnéticos distintos: un solo imán S-10-05-N unido a una estructura ferromagnética, dos imanes S-10-05-N juntos y unidos a su vez a la misma estructura ferromagnética y seis imanes S-10-05-N insertos dentro de dos bloques de mármol. Estos últimos imanes se unieron a los bloques con resina epoxi Araldit estándar®. La junta de unión de los bloques no fue sellada, por lo que la lluvia pudo penetrar.

En la figura 43 se representa la evolución de la temperatura y la humedad relativa a lo largo de 122 días, entre el 24 de marzo de 2015 y el 23 de julio de 2015. La gráfica recoge los valores máximos, mínimos y la media de cada uno de los días. En el gráfico puede verse que la temperatura osciló en este período entre los 3 °C de mínima (26-03-2015) y los 44 °C de máxima (14-05-2015). La humedad relativa en este período registró valores de entre 15 % (el 14 de mayo de 2015, coincidiendo con el día de mayor temperatura) y de 100 % en 17 ocasiones a lo largo de todo el período de ensayo.

Se hizo un seguimiento visual mensual de la evolución de la superficie libre de los imanes. El día 29 de abril de 2015, 36 días después de comenzar el ensayo, ya presentaban el aspecto que tenían al final: mates, de color pardo y con los bordes ennegrecidos. Desde ese día, hasta el final del ensayo, el aspecto aparentemente fue el mismo.

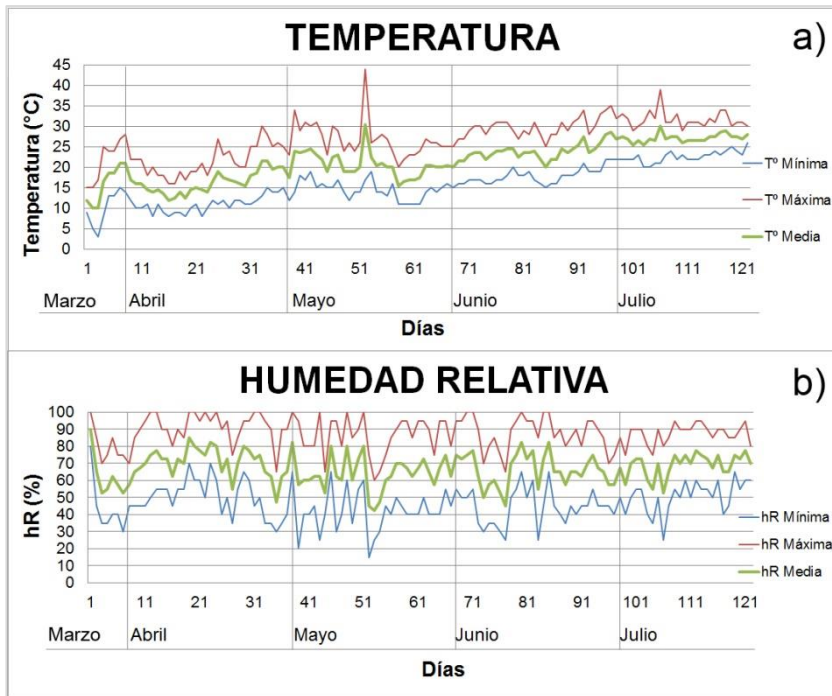


Figura 43. Representación de a) la temperatura y b) humedad relativa registrada en el ciclo 1 del ensayo a la intemperie entre los meses de marzo y julio de 2015. Las gráficas muestran los valores máximos, mínimos y la media.

Con respecto a las dos piezas de mármol unidas por imanes, falló la unión del adhesivo, por lo que a los 42 días de ensayo (04-05-2015) fueron retiradas las piezas para proceder a sanear el adhesivo defectuoso y volver a pegar los imanes a las piezas. Como se puede apreciar en la figura 44 se reinició el ensayo el día 94 correspondiente al día 25 de junio de 2015 y se tuvieron a la intemperie hasta el día 174 del ciclo (13-09-2015), aproximadamente 1900 horas.

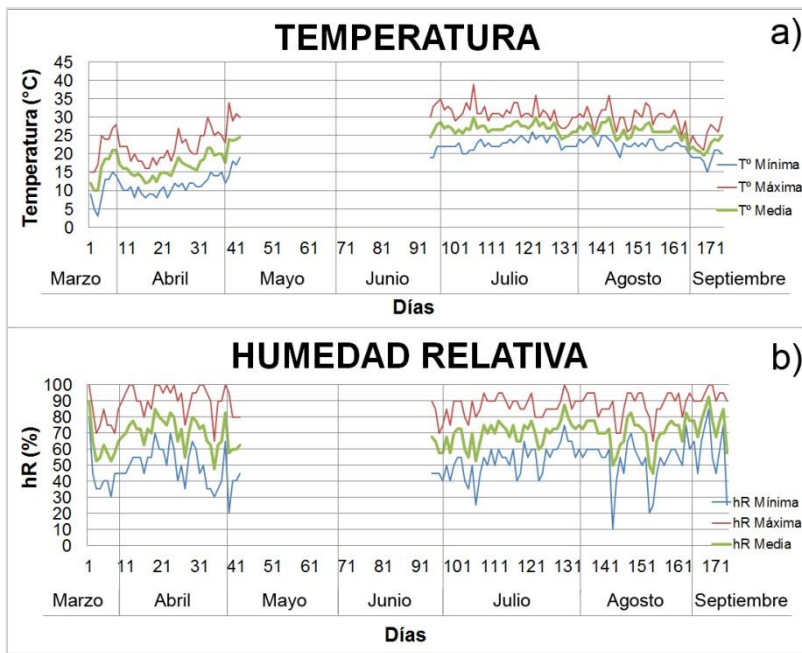


Figura 44. Representación de a) la temperatura y b) humedad relativa registrada en el ciclo de los imanes insertos en mármol entre los meses de marzo y septiembre y la suspensión temporal realizada entre mayo y junio. Las gráficas muestran los valores máximos, mínimos y la media.

Una vez finalizado el ensayo, no se observa degradación macroscópica del recubrimiento en los imanes que forman parte de una unión entre piezas de mármol, a diferencia de aquellos imanes que tienen su superficie directamente a la intemperie. Parece que el hecho de formar parte de una unión protege al imán de los efectos de la intemperie.

En la figura 45 se puede observar el estado de los bloques tras el fallo del adhesivo, su colocación de nuevo tras la suspensión temporal del ensayo y el estado en el que se encontraban cuando fueron retirados del ensayo de forma definitiva.

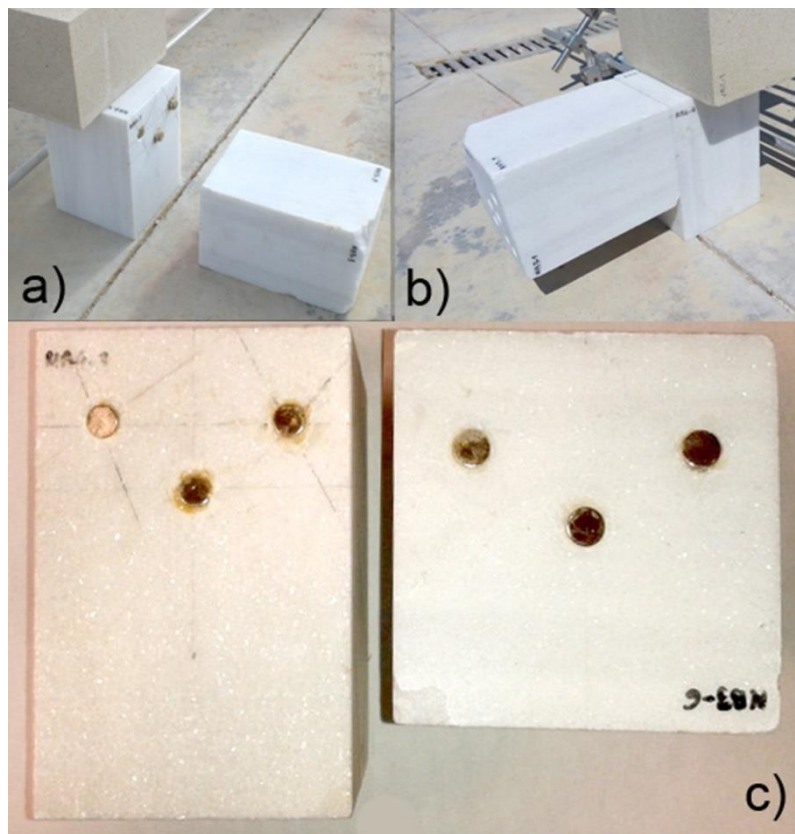


Figura 45. Ensayo de los imanes S-10-05-N insertos en bloques de mármol. a) Caída de la pieza tras el fallo del adhesivo. Los imanes se quedaron unidos. b) Colocación tras el reinicio del ensayo. c) Estado final de los imanes tras el ensayo a la intemperie. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

Tras analizar los resultados de estos ensayos se decidió realizar un nuevo ciclo de ensayos de otras 3000 horas. Para ello se seleccionaron 3 parejas de imanes S-12-06-N situados en la misma estructura metálica utilizada en el ciclo anterior.

En la figura 46 se representa la evolución de la temperatura y la humedad relativa a lo largo de 125 días, entre el 7 de octubre de 2015 y el 8 de febrero de 2016. La gráfica, al igual que en el ciclo anterior, recoge los

valores máximos, mínimos y la media recogidos de cada uno de los días. En la figura puede verse que la temperatura osciló en este período entre los 3 °C de mínima (17-01-2016) y los 26 °C de máxima (los días 7 y 12 de octubre de 2015). La humedad relativa en este período registró valores de entre 20 % (el 16 de enero de 2016) y de 100 % en 36 ocasiones a lo largo de todo el período de ensayo.

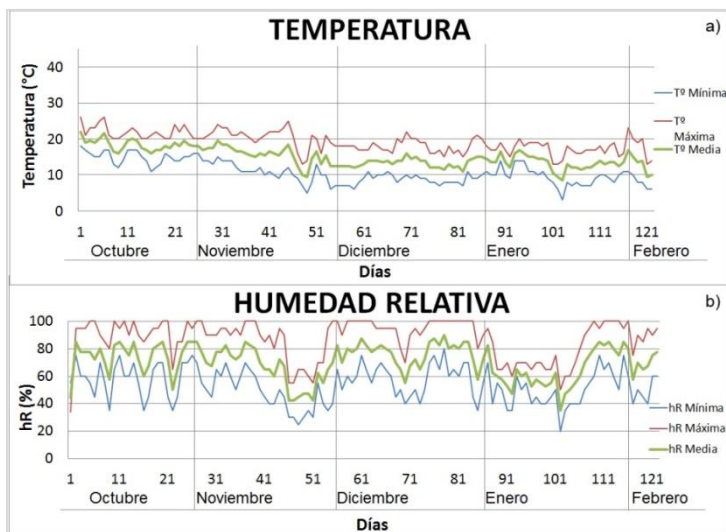


Figura 46. Representación de a) la temperatura y b) humedad relativa registrada en el ciclo 2 del ensayo a la intemperie entre los meses de octubre de 2015 y de febrero de 2016. Las gráficas muestran los valores máximos, mínimos y la media.

La temperatura media del ciclo 1 ha sido de 26,9 °C mientras que la del ciclo 2 ha sido de 19,2 °C. Además, en el ciclo 1 se aprecian picos de temperatura alta muy acusados mientras que en el ciclo 2 las temperaturas son más uniformes. En cuanto a la humedad relativa se han medido valores medios muy similares de 87,7 y 87 % de hR respectivamente.

Los imanes S-12-06-N presentan un aspecto similar a los imanes S-10-05-N ensayados en el ciclo 1. Como se puede ver en la figura 47, los imanes han perdido el brillo para tornar en un color pardo, mate y con un oscurecimiento

más acusado en la periferia. El cambio superficial de los imanes a ensayo en el ciclo 2 y su fuerza de sujeción han sido estudiados en las siguientes secciones (5.9 y 5.10).

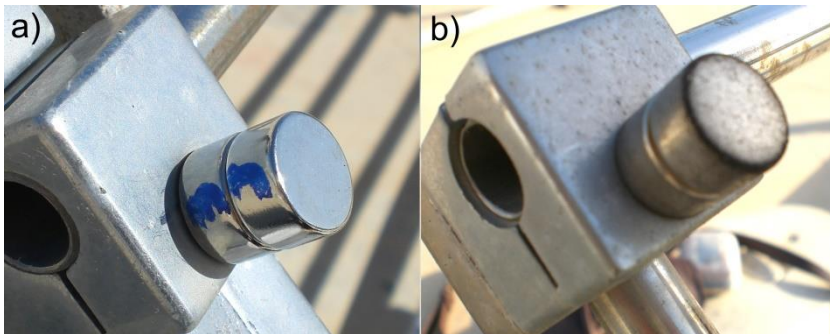


Figura 47. Comparación de los imanes S-12-06-N expuestos a la intemperie para el ensayo de envejecimiento. a) Imanes nuevos. b) Imanes el día de la retirada tras el ensayo de 3000 horas. La imagen muestra cómo ha cambiado macroscópicamente la superficie del imán después de 3000 horas de ensayo. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

5.9. Estudios microscópicos.

La primera aproximación al análisis de la superficie de los imanes pudo obtenerse mediante un análisis organoléptico de la misma. El objetivo de realizar microscopía óptica fue obtener mayor precisión de esas primeras observaciones mediante análisis visual. La microscopía óptica aportó información cualitativa de la superficie dando información sobre su morfología, color y textura.

Se realizó una comparativa de la superficie de los imanes S-12-06-N antes y después del ensayo de envejecimiento en la intemperie. En las imágenes de microscopía óptica, las diferencias entre los imanes nuevos y los imanes sometidos al ensayo de envejecimiento son evidentes. Las imágenes de los imanes nuevos antes del ensayo de envejecimiento (Figuras 48.a y 48. b)

muestran una superficie azulada, con una serie de líneas que pueden deberse por un lado a la textura propia del recubrimiento del imán y por otro unos arañazos más gruesos debidos a la manipulación de dicho imán.

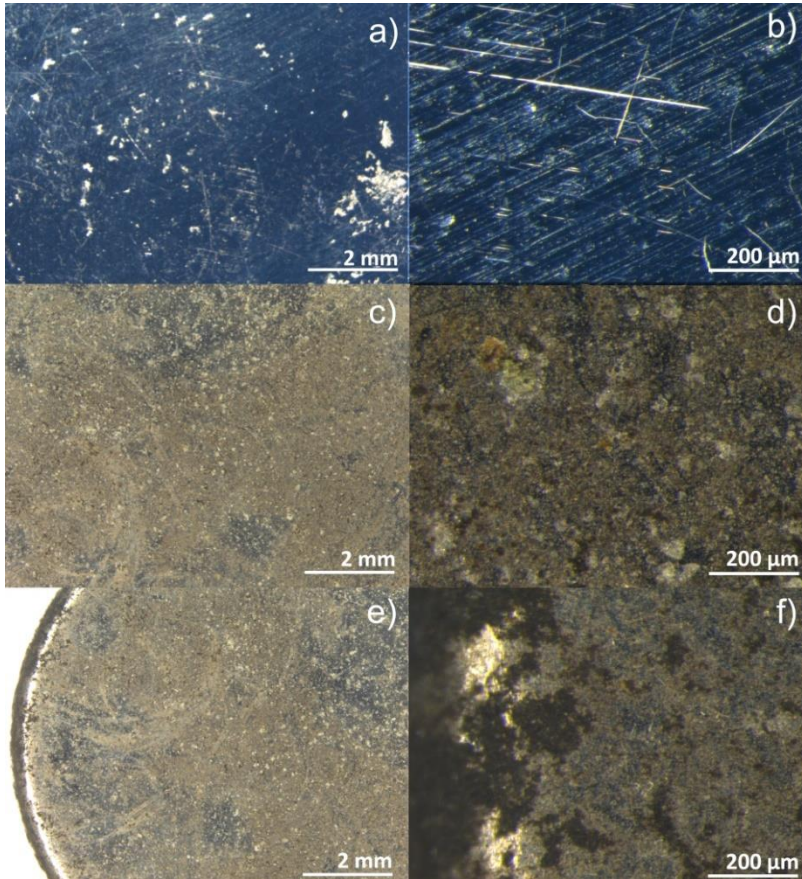


Figura 48. Microscopía con lupa. a) y b) imán nuevo a 8x y 80x respectivamente. c) y d) Imán tras el ensayo de exposición a la intemperie a 8x y 80x respectivamente. e) y f) Detalle del borde del imán tras el ensayo de envejecimiento al natural a 8x y 80x respectivamente.

(Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

Después del ensayo de envejecimiento, la superficie tiene un aspecto amarronado, aparentemente rugoso y mate, como se puede ver en los paneles c y d de la figura 48. Este estado de la superficie se debe muy

probablemente a la oxidación superficial. Este efecto es más acusado en los bordes que tornan a un tono ennegrecido como se puede ver en los paneles e y f de la figura 48.

Posteriormente se procedió a analizar la superficie de los imanes con microscopía electrónica de barrido (SEM). El microscopio lleva incorporado un detector que permite analizar la composición mediante Espectroscopía de Dispersión de Energías de rayos-X (EDX). El SEM-EDX sirve para caracterizar los elementos que se encuentran en la superficie y realizar un examen cuantitativo de los mismos. Antes del análisis, se aplicó a los imanes un recubrimiento de carbono para evitar la posible carga electrostática de las muestras, reducir el daño térmico y mejorar la emisión de los electrones secundarios.

En la figura 49 se ve la superficie de un imán nuevo en la que se aprecia una superficie lisa, con algunas líneas finas paralelas.

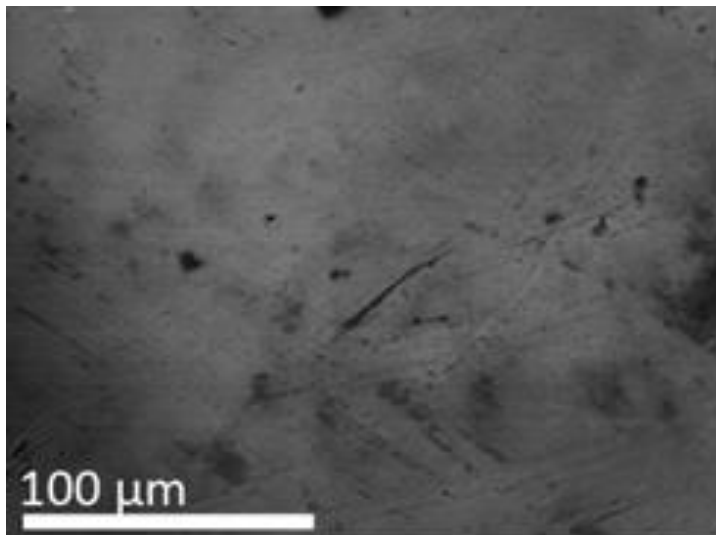


Figura 49. SEM a 500x de la superficie de un imán nuevo. La imagen muestra una superficie lisa con un patrón de líneas y algún arañazo. (Fotografía Xavier Mas-Barberà. Edición M.Azahara Rodríguez).

En cuanto al análisis EDX, cuyo espectro se muestra en la figura 50, aparecen fundamentalmente níquel y oxígeno en una proporción de 42% y 58% respectivamente. Tal y como es esperable, la superficie del recubrimiento de níquel se encuentra oxidada por una capa de óxido de níquel, muy resistente a la corrosión.

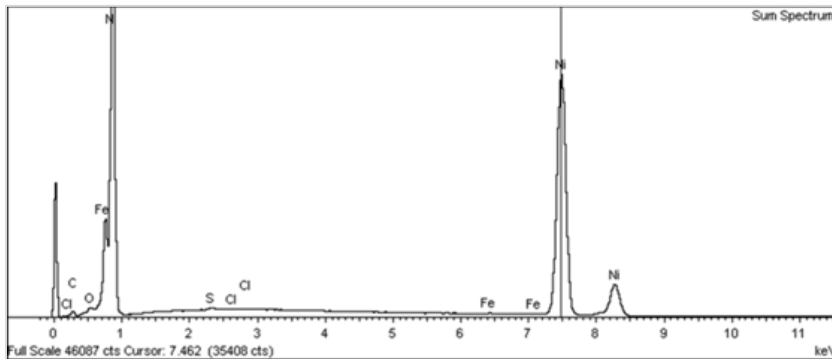


Figura 50. EDX asociado al SEM del imán nuevo. El gráfico muestra mayoritariamente níquel.

En la figura 51 se muestra la superficie del imán a estudio después del ensayo de intemperie de 3000 horas. En la imagen se ven una serie de concreciones, de forma irregular, distribución heterogénea y de distinto tamaño. Las de mayor dimensión, son de en torno a 80 μm de largo, pero mayoritariamente se aprecian otras de tamaño bastante menor dispersas por toda la extensión.

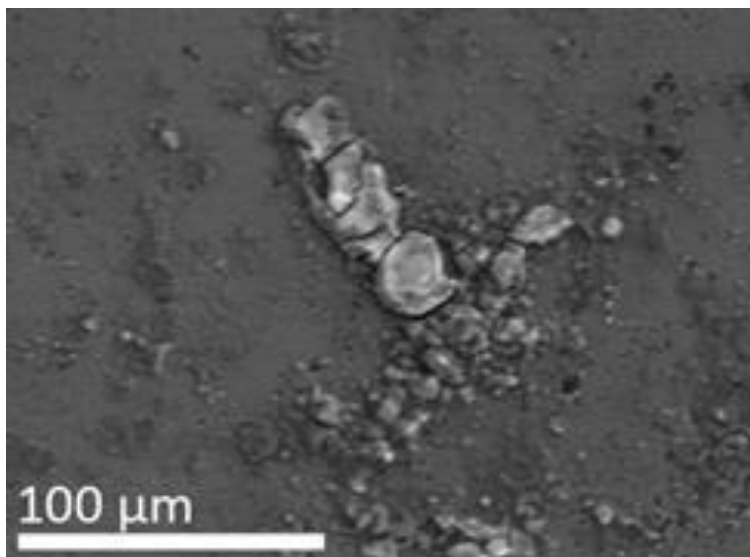


Figura 51. SEM a 500x de la superficie tras el ensayo de envejecimiento. La imagen muestra las concreciones de la superficie del imán. (Fotografía Xavier Mas-Barberà. Edición M.Azahara Rodríguez).

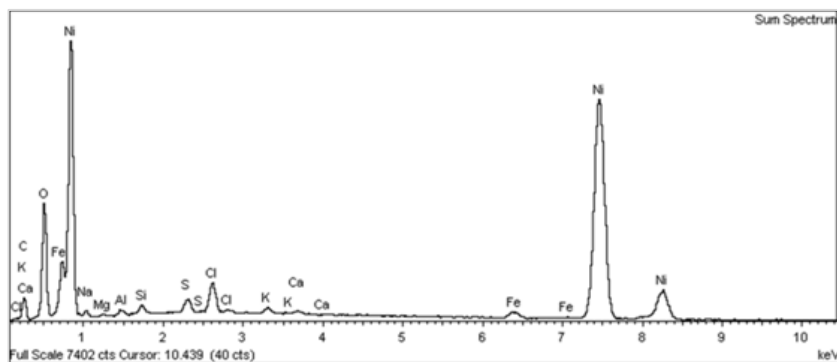


Figura 52. EDX asociado al SEM del imán tras el ensayo de envejecimiento a la intemperie. El gráfico muestra mayoritariamente níquel pero aparecen también una serie de elementos minoritarios.

En el análisis EDX sigue apareciendo mayoritariamente el níquel, como se puede ver en el espectro de la figura 52, pero la proporción de níquel con respecto a oxígeno ha disminuido considerablemente (un 26 % frente al 42 % que se observaba anteriormente). Se observan además trazas de otros elementos (azufre, sodio, aluminio, silicio, cloro y hierro), que muy probablemente provengan de contaminantes ambientales. El aumento del oxígeno podría deberse probablemente a una oxidación mayor del níquel, así como a la presencia de otros óxidos superficiales. La ausencia de cobre y de una cantidad apreciable de hierro parece indicar que el recubrimiento de Ni-Cu-Ni, a pesar de los arañazos y del óxido después del ensayo, ha formado una capa estable y protege al imán de la corrosión y esos elementos minoritarios son de contaminación ambiental.

Finalmente, se ha realizado un análisis mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) en modo tapping, para medir cuantitativamente la rugosidad superficial. Este análisis ha proporcionado información morfológica complementaria a la obtenida mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

El AFM ha permitido la observación, con una gran magnificación, de la superficie de los imanes y la evaluación de los cambios morfológicos experimentados tras las 3000 h de envejecimiento natural. Estos cambios morfológicos son evidentes cuando se compara con el imán control. La figura 53 muestra los diagramas de altura en 3D y los diagramas topográficos obtenidos del imán S-12-06-N antes y tras el ensayo. Se aprecia, de manera evidente, como la superficie del imán envejecido sufre un aumento de la rugosidad a escala micro y nanométrica. Este resultado confirma los valores obtenidos por EDX de modo que el ambiente interactúa con la superficie produciendo la modificación de la película de protección del imán. Además, es significativo el mayor número y tamaño de partículas originadas tras el envejecimiento que pasan de ser de 122,6 nm a 490,7 nm (Figuras 53.a y 53.c) siendo muy evidente la presencia de grietas más grandes y amplias (Figura 53.d). Este estudio pone de manifiesto que

pequeños arañazos y partículas en superficie, aparentemente inocuas, podrían ser realmente el principio de los cambios en la superficie del imán que, no solo alterarían el aspecto visual y la percepción a nivel macroscópica, sino que además facilitarían los procesos de degradación físico-químicos.

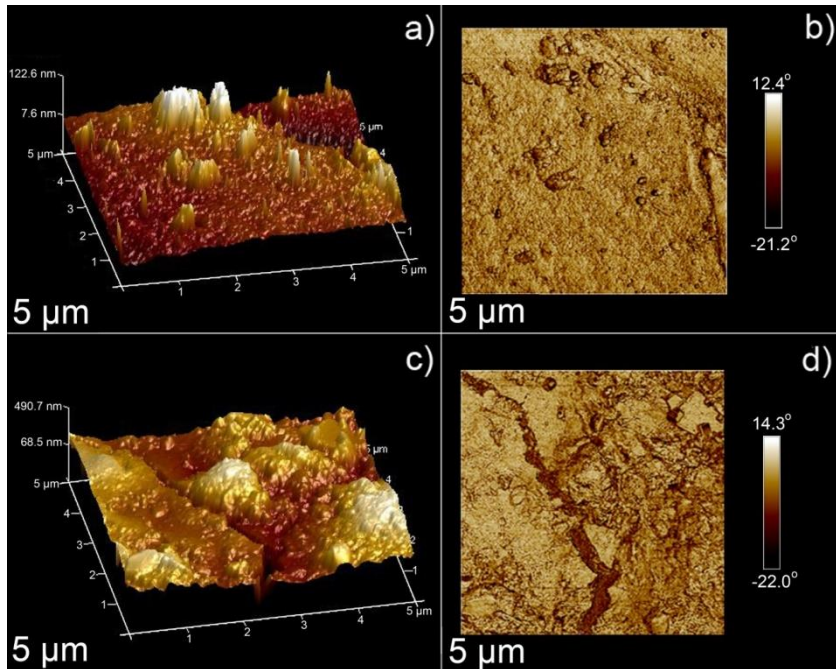


Figura 53. Diagrama de altura en 3D y diagrama topográfico de la superficie del imán S-12-06-N antes (a-b) y tras el ensayo de envejecimiento natural (c-d). (Fotografía servicio de Microscopía UPV. Edición M.Azahara Rodríguez).

5.10. Ensayo de tracción de imanes oxidados.

Con el fin de comprobar la idoneidad de la utilización de este tipo de imanes en obras restauradas que tengan que estar a la intemperie, se repitieron los experimentos de tracción tras el ensayo de envejecimiento.

Tal y como se ha descrito anteriormente en la sección 5.1, en los ensayos de tracción realizados a los imanes S-12-06-N antes del proceso de envejecimiento, se determinó que la fuerza media de atracción entre imanes era de 48,6 N un 27,3 % superior al valor proporcionado por el fabricante. En este caso, la fuerza media de atracción entre imanes fue de 44,8 N. Por tanto, la fuerza de atracción ha disminuido en un 8,6 %, pero sigue siendo un 17,4 % superior a lo indicado en la ficha técnica. Por tanto, sigue existiendo un margen de seguridad cuando se trabaja con el dato del fabricante.

5.11. Ceras magnéticas.

Debido a la fragilidad de la cera como material escultórico, en el que dos imanes pueden suponer una tensión al material, se ha buscado un método alternativo para realizar uniones magnéticas.

En relación con las probetas de cera en las que se incluyeron partículas magnéticas (en adelante “ceras magnéticas”), se realizaron dos tipos de ensayo: un ensayo de tracción efectuado uniendo las distintas probetas a un imán S-10-05-N y un estudio de las propiedades magnéticas de las probetas.

En correlación con el ensayo de tracción, los datos recogidos aparecen en la siguiente figura 54:

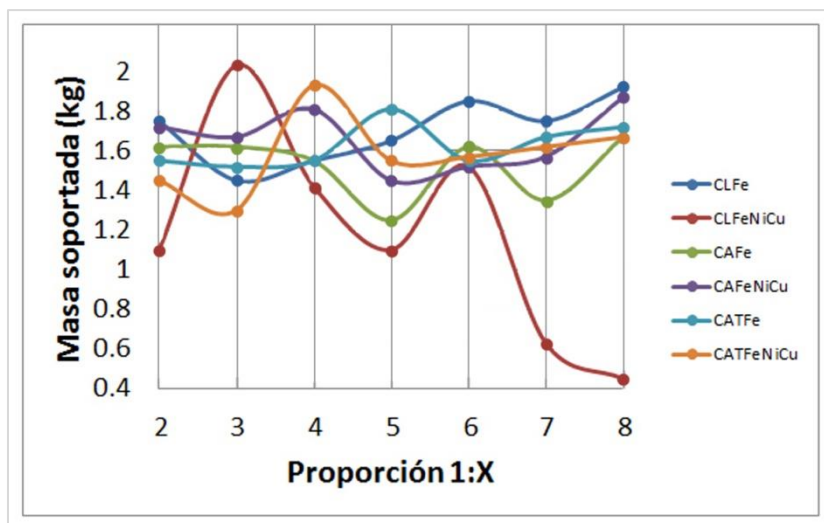


Figura 54. Comportamiento a tracción de las probetas de cera magnética unidas a un imán S-10-05-N. Las curvas representan el comportamiento constante a lo largo de las 7 mediciones.

El peso máximo soportado por las distintas ceras magnéticas no presenta una tendencia clara al variar el tipo de cera o el tipo de particulado de carga. Los valores obtenidos para el peso soportado se han registrado en la tabla 18:

Tabla 18. Peso máximo soportado por las probetas de ceras magnéticas.

CLFe	CLFeNiCu	CAFe	CAFeNiCu	CATFe	CATFeNiCu
1,7 kg	1,2 kg	1,5 kg	1,7 kg	1,6 kg	1,6 kg

Se pudo observar que las probetas con una cantidad menor de particulado de hierro se flexionaban a medida que se le añadían pesas antes de producirse el fallo de la unión. Las probetas con mayor proporción de carga se mantenían rígidas hasta que se producía el fallo como puede observarse en la figura 55. Por lo tanto dependiendo de la cantidad de particulado, la flexibilidad de la cera magnética será mayor o menor.

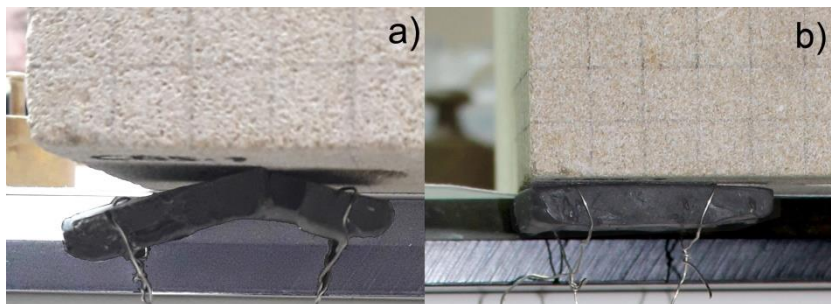


Figura 55. a) Detalle del ensayo de tracción a una cera magnética con proporción 1:4. Se aprecia cómo se flexiona antes de separarse. b) Detalle del ensayo de tracción a una muestra de cera magnética en proporción 1:8. Puede verse cómo se mantiene rígida durante el ensayo. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

Para determinar las propiedades magnéticas de los composites cera-partícula se realizaron medidas de ciclos de histéresis en un VSM. Para ello, se prepararon probetas de 5 x 5 mm, que se midieron a temperatura ambiente con un campo máximo aplicado de 5400 G.

En todos los casos, tras la primera curva de imanación se llegó hasta la saturación y se obtuvieron las medidas que se muestran en la tabla 19. Al decrecer la imanación, la curva volvió a pasar por el origen del sistema de coordenadas, correspondiéndose todos los ciclos de histéresis con curvas estrechas, propias de los materiales magnéticamente blandos.

Tabla 19. Muestras de ceras magnéticas medidas en el VSM.

REF	M (emu)
CL FeNiCu 1:2	18,63 emu
CLFe 1:2	39,22 emu
CLFe 1:3	57,06 emu
CLFe 1:5	85,77 emu
CLFe 1:8	166,61 emu

Como se observa en la figura 56, el valor de M_s aumenta según aumenta la proporción de la carga del composite. Hay que destacar los valores obtenidos para la proporción 1:2. En el caso del Fe, es más del doble que el composite que lleva como carga FeNiCu.

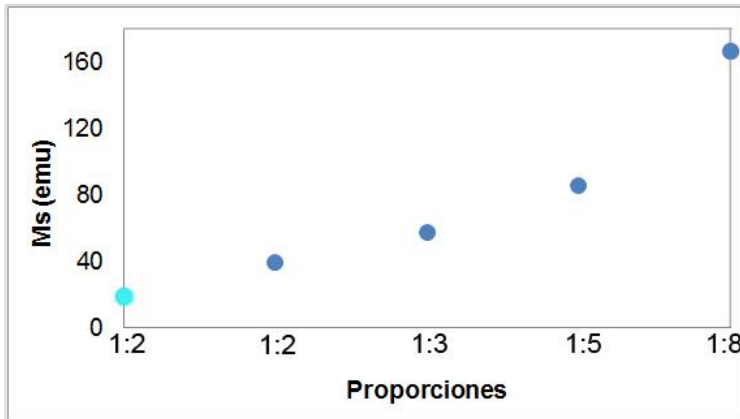


Figura 56. Valores de M_s en función del contenido en partículas. Se aprecia cómo los valores van escalando a medida que aumenta la proporción de particulado de hierro en su composición.

Como era esperable, la imanación aumentó con la carga de partículas magnéticas. Además, las ceras magnéticas son magnéticamente muy blandas. Por tanto, son materiales muy interesantes para fabricar uniones magnéticas. Además, con la configuración adecuada de imanes, cerrarán el flujo de campo magnético, lo que minimizará el campo magnético en el exterior de las piezas.



6. APLICACIÓN EN CASOS ESCULTÓRICOS

6. APLICACIÓN EN CASOS DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ELEMENTOS ESCULTÓRICOS

En este capítulo de esta tesis doctoral se va a desarrollar, por un lado, una serie de recomendaciones para el futuro restaurador que necesite utilizar esta metodología de manera que sepa tanto utilizar el modelo teórico, como utilizar correctamente los sistemas magnéticos. Además, se muestra una serie de casos prácticos en los que se ha utilizado para demostrar la viabilidad del modelo teórico y de la metodología de unión de partes con imanes.

6.1. Manual de aplicación de imanes en CR de escultura-ornamentos

La unión de fragmentos en obras de arte supone, como se ha comentado, un proceso muchas veces irreversible. El uso de espigas y adhesivos ayuda a mantener unidas partes de las obras. Sin embargo, su empleo pocas veces es justificado. El tratamiento de unión de fragmentos en escultura y ornamentos obliga al restaurador a desarrollar un estudio previo sobre las partes a unir, la elección de materiales y los procesos a realizar. Se trata de una fase que exige experiencia y profesionalidad puesto que, cualquier descuido en la manipulación puede acarrear nuevos daños.

El método de intervención mediante el uso de sistemas magnéticos aumenta los niveles de exigencia de la intervención al precisar de conocimientos sobre propiedades físicas y principios magnéticos.

Este apartado aborda un conciso manual para orientar sobre el uso de sistemas magnéticos en elementos escultórico-ornamentales. En este sentido y, como se ha señalado anteriormente, deben atenderse dos aspectos bien diferenciados, por un lado la aplicación del modelo teórico y,

por otro lado, la inserción práctica de los imanes en las zonas de fractura de la obra.

La aplicación del modelo teórico requiere conocer varios parámetros:

- a) peso, longitud, ancho y ángulo que forma la pieza a unir y el tamaño de la sección de la fractura,
- b) el coeficiente de rozamiento entre las dos superficies a unir para poder aplicar el modelo y proporcionar la fuerza necesaria que evite el fallo de la unión y, por consiguiente, la separación de las partes,
- c) el centro de masas de la pieza a unir para conocer cómo va a estar repartido el peso.

Primeramente se calculan la fuerza máxima de sujeción de los imanes tanto para el equilibrio de fuerzas como para el equilibrio de momentos, utilizando el modelo descrito en el capítulo 4.1.

Los cálculos para ambas fuerzas señalan que, si el valor resultante del equilibrio de fuerzas es superior al obtenido aplicando el equilibrio de momentos se considera que la pieza tiende a caer, mientras que a la inversa, la pieza tiende a rotar. De los dos valores obtenidos, siempre hay que tomar como referencia el valor de fuerza que sea superior y descartar la menor ya que esa fuerza no será suficiente para estabilizar la unión.

Asimismo, se recomienda que la fuerza resultante se multiplique por dos, es decir, que los imanes elegidos sumen el doble de la fuerza necesaria. Con ello, se aplica un margen de seguridad que evita colapsos derivados de manipulaciones, labores de conservación y limpieza, entre otros.

De igual modo, los dos imanes deben situarse a la misma altura, paralelos a la cota del suelo y con una configuración magnética opuesta o antiparalela (ver figura 57). Es decir, si en la parte de la izquierda se une un polo magnético positivo con negativo, en la parte de la derecha se debe unir un polo magnético negativo con positivo. La fuerza magnética resultará la misma,

pero el campo magnético en el exterior de la pieza se reducirá enormemente dado que se cierran las líneas de campo.

Se recomienda poner un tercer imán (o dos más pequeños) en la parte inferior para estabilizar la unión y evitar que pueda moverse. En caso de insertar dos imanes deben colocarse en configuración magnética opuesta, tanto entre ellos como con los de arriba (ver figura 57). La distancia de colocación de los imanes respecto al perímetro de fractura debe considerarse para que se minimice el campo externo.

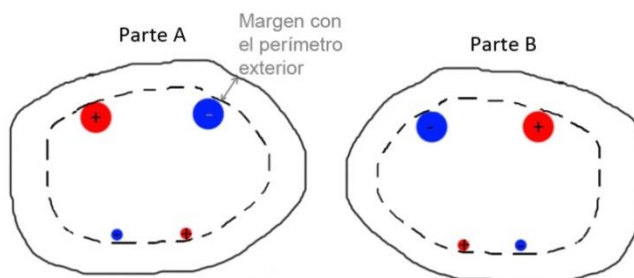


Figura 57. Configuración magnética opuesta o antiparalela para aplicar correctamente los imanes en la sección.

El uso de sistemas magnéticos obliga también a tener presentes una serie de consideraciones desde el punto de vista de la manipulación. La fuerza de atracción de los imanes, cuando es considerable, pueden acarrear riesgos para la seguridad de quien los manipula. Es importante prescindir de herramientas metálicas, utilizar gafas y guantes de protección, situarlos de forma aislada y a una cierta distancia unos de otros. La repentina atracción puede producir contusiones, hematomas y pellizcos agudos. Además, los imanes de NdFeB, usados en el campo de la conservación y restauración, son frágiles y, si se golpean, se rompen con facilidad. De igual modo, el campo magnético que se forma puede alterar el funcionamiento de marcapasos o estropear equipos electrónicos.

Finalmente hay que tener en cuenta que las intervenciones con imanes deben de tener un seguimiento a posteriori de la intervención para comprobar que todo el funcionamiento del sistema es correcto.

Una vez conocidas las particularidades de los imanes y sus consideraciones físicas, resulta también muy importante la práctica de inserción del imán en la obra real. Como se ha comentado, el proceso de implantar un elemento de unión entre dos fragmentos de una obra de arte exige de experiencia y profesionalidad. Se trata de una actuación quirúrgica y de precisión donde el conocimiento de la técnica de aplicación y el manejo de herramientas es fundamental.

Por tanto, la realización de los orificios o huecos, donde se albergarán los imanes, obliga al restaurador a tener en cuenta el gran abanico de herramientas y utensilios que el mercado pone a su disposición.

La primera herramienta a considerar es el taladro que sirve para la realización de los orificios. Se distinguen varios tipos, el taladro común, entendiéndose como el taladro eléctrico, multiherramienta rotativa o microtaladro (conocido comercialmente como Dremel®) y, el taladro percutor (taladro eléctrico y, a su vez, percutor, tipo Hilti®). Además, los taladros poseen diferentes potencias, marchas, percusiones y acoples de brocas. Hay taladros que incorporan un sistema más versátil llamado SDS (Slotted Drive System; sistema de encaje rápido) que condiciona la adquisición de los accesorios.

La elección del tipo de broca también será destacada y va a depender de las características del material a perforar. Así, habrá que valorar el tipo y la dureza del material diferenciando si son brocas para metal, madera o piedra. Por un lado, las brocas para metal están hechas en acero rápido (HSS) y dependiendo de la calidad de fabricación de la aleación sirven para unos metales u otros. Son interesantes las HSS rectificadas que sirven para metales como el aluminio, cobre o latón, entre otros. Las HSS de titanio

rectificadas, que incorporan un recubrimiento de titanio, son más precisas y se pueden utilizar con todos los metales, aunque necesitan refrigeración. Por último, las HSS de cobalto rectificadas son las de máxima calidad y apropiadas para todos los metales, incluso los más duros sin necesidad de refrigeración. Por otro lado, las brocas para piedra son laminadas con placa de carburo de tungsteno (widia). El cuerpo es laminado y dichas brocas están indicadas para yeso, cemento, ladrillo, piedra arenisca y piedra caliza. Existen también de alto rendimiento indicadas para todo tipo de piedra, excepto el granito, que se suele trabajar con brocas con recubrimiento de diamante. Existen de varios diámetros y longitudes. Finalmente, las brocas para madera son de tres puntas y/o de pala, dependiendo del diámetro del orificio precisado. Las brocas de tres puntas son las más utilizadas para taladrar madera y suelen estar hechas de acero al cromo-vanadio. Se utilizan para todo tipo de maderas: duras, blandas, contrachapados, aglomerados, entre otras. En el caso de brocas de pala se recomienda el uso de soporte vertical para una mayor precisión.

En el caso de orificios de gran diámetro, se utilizan coronas o brocas de campana. Existen para todo tipo de materiales (metales, piedra, madera y cristal) y poseen una corona dentada en cuyo centro suele haber fijada una broca convencional que sirve para el centrado y guía del orificio. Por el contrario, si se precisa de orificios de poca profundidad, se suelen usar fresas duras adaptadas a un microtaladro.

En cuanto a la técnica de aplicación referida al marcado y horadado se muestra de la siguiente manera (ver figura 58):

- a) En primer lugar, debe elegirse el fragmento de menor tamaño y marcar el punto donde se realizará el orificio (ver figura 58.a).
- b) Seguidamente se traza un aspa que cruzará dicho punto por el centro. El marcado se lleva hasta el perímetro haciéndose visible en la superficie de la pieza (ver figura 58.b).

- c) Se une este fragmento marcado al resto de la obra y, sobre ésta, se marcan de nuevo los puntos señalados en el perímetro. Por tanto, resultará otra aspa al trazar y cruzar estas cuatro marcas del perímetro resultando, en definitiva, el centro del orificio de la otra pieza (ver figura 58.c).

Esta operación de marcado debe repetirse tantas veces como orificios hagan falta (ver figura 59). De igual modo, existen varios accesorios de marcaje o técnicas que pueden ser útiles para señalar el lugar dónde perforar buscando la mayor coincidencia de puntos. Pueden citarse los marcadores pincho (su uso común es en madera), las plantillas flexibles de acetato y las hormas de escayola. También son importantes los topes de profundidad que se instalan, generalmente, en la broca para ajustar el horadado.

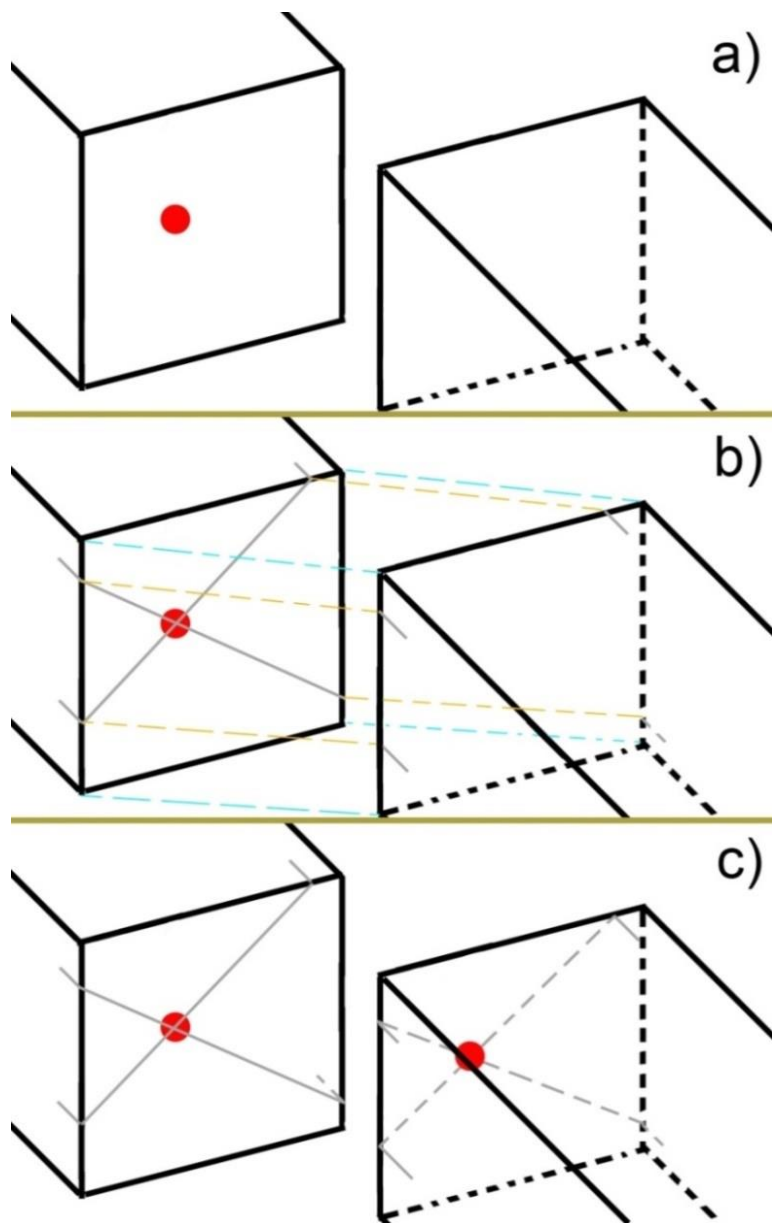


Figura 58. Esquema de cómo marcar un agujero por simetría de aspas.

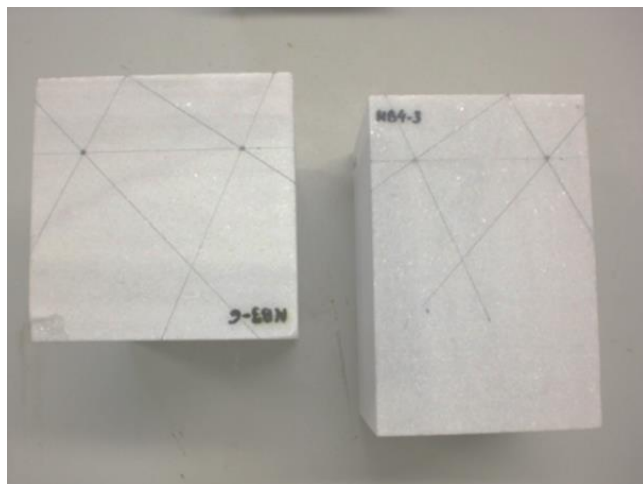


Figura 59. Imagen de dos bloques con las marcas para hacer los agujeros por el sistema de espas. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

El horadado de la pieza debe realizarse con las piezas sujetas con herramientas de apriete a una bancada y, el usuario ha de utilizar el equipamiento de protección adecuado (guantes, gafas y mascarilla de polvo). Se recomienda perforar el fragmento más pequeño en primera instancia para que, ante cualquier error, la corrección se haga sobre el fragmento de mayor tamaño.

La realización de los orificios tiene dos maneras de presentarse: por un lado, los agujeros realizados paralelos al plano de referencia y, por otro lado, los agujeros con una dirección diferente al plano de referencia. El primer caso es el más sencillo pues se marcan los puntos a ambos lados de las piezas y se horadan a la profundidad necesaria. En cambio, cuando los agujeros tienen una dirección diferente al plano de referencia debe representarse el punto del orificio en diédrico (alzado, planta y perfil). Para ello se hace servir la falsa escuadra que marca el plano de referencia (paralelo a la bancada) y la inclinación (el ángulo) lo señalaría la parte móvil

de la escuadra. Esta falsa escuadra guiará al restaurador a la hora de realizar el orificio y señalándole visualmente la inclinación de la broca.

Por último, cabe señalar también la técnica de cosido superficial. Se trata del método más preciso pero, a su vez, más agresivo. Supone realizar orificios visibles en la superficie material del original con brocas de cierta longitud preuniendo directamente las partes separadas con pernos, varillas o imanes. Posteriormente, los agujeros son retapados y reintegrados con diferentes morteros, masillas y/o materiales afines.

En cuanto a superficies irregulares, se aconseja mejor realizar los agujeros por fresado, así se puede aprovechar la irregularidad de la misma fractura para ir encajando los imanes, y los posibles recovecos que puedan quedar se rellenen con el adhesivo escogido para fijar el imán a la zona de fractura. Lo que es importante que los imanes creen un contacto pleno ya que, como se ha comprobado en el apartado 5.1, los imanes pierden fuerza de sujeción de manera proporcional a la distancia entre ellos.

6.2. Aplicación en casos de CR de escultura.

Una vez desarrollado el modelo teórico expuesto en el apartado 4.1 y analizados los materiales, se ha aplicado a casos reales para comprobar su efectividad. Se ha calculado tanto la posición de los imanes como sus características magnéticas. Los diferentes parámetros de fuerza y posición de los imanes y coeficientes de rozamiento necesarios en el modelo se han extraído de los ensayos previos de laboratorio.

6.2.1. Caso 1. Mano y brazo de Diadúmeno.

En el primer caso de aplicación se tomó como referente la escultura clásica del Diadúmeno. La pieza en cuestión se seleccionó dado que el brazo izquierdo tiene una posición comprometida y, la fragmentación a la altura del

hombro y de la mano ofrece uno de los casos más controvertidos para el modelo experimental desarrollado. No obstante, se forzó la postura aún más para que las piezas a unir se quedaran perpendiculares a la zona de fractura. En primera instancia, se obtuvo la reproducción de la extremidad superior izquierda a partir de un molde de silicona y, posterior vaciado a imagen de una piedra arenisca (ver figura 60). Las propiedades de textura, color y peso propios de una piedra natural se consiguieron mediante un mortero predosificado *Cotegran TXT®*, suministrado por la empresa Parex group y pigmentos inorgánicos.

Las características principales de la pieza se resumen en:

- a) la mano que debía unirse al brazo: peso de 1,1 kg, 18 cm de longitud, sección de 6x8 cm, y ángulo de 90 °, aproximadamente (ver figura 61).
- b) el brazo que debía unirse al hombro: peso de 9,7 kg, 40,5 cm de longitud, sección de 16x13 cm, y ángulo de 90 °, aproximadamente.

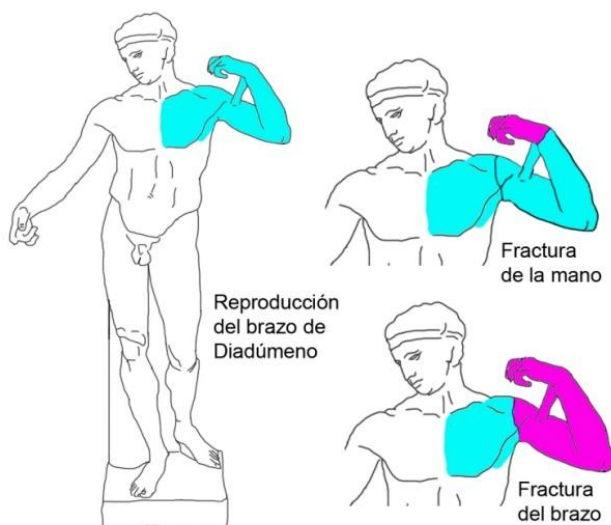


Figura 60. Zonas de Diadúmeno en donde se realizaron los moldes para obtener los vaciados utilizados como caso de estudio.

Los parámetros a tener en cuenta para la aplicación del modelo teórico fueron:

El coeficiente de rozamiento estimado para ambos casos era afín a las propiedades de textura y peso de la piedra calcarenita ($\mu = 0,57$).

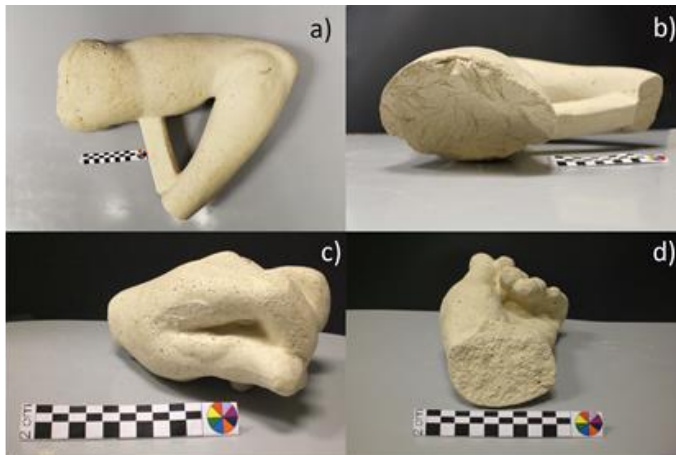


Figura 61. Caso a estudio: mano de Diadúmeno. Distintas vistas del brazo fracturado a la altura de la muñeca y de la mano.

De acuerdo con el modelo teórico anteriormente expuesto se obtuvo en el caso de la mano (ver figura 62): para la ecuación 2:

$$F = \frac{P}{\mu} = \frac{1,1 * 9,81}{0,57} = 18,93 \text{ N}$$

Para la ecuación 3:

$$F = \frac{P d_2 \cos \alpha}{d_1}, \text{ el centro de masas está en el centro geométrico por lo que se simplifica en } F = \frac{\frac{P}{2} l}{d_1} = \frac{\frac{1,1 * 9,81}{2} 18}{5,5} = 17,66 \text{ N}$$

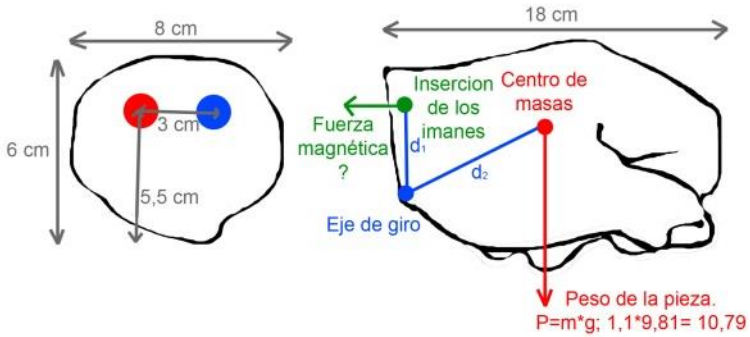


Figura 62. Aplicación del modelo teórico a la mano.

Teniendo en cuenta la geometría de la pieza, los resultados determinaron que era necesario aplicar como mínimo una fuerza de 18,93 N para que la unión fuese estable. Se decidió colocar la mano con dos imanes S-15-02-N de 18,6 N cada uno para aportar un margen de seguridad. En el caso de la mano, los imanes fueron adheridos con Araldit estándar®.

En el caso de estudio del brazo la dificultad la comprendía su elevado peso y que el centro de masas no se encontraba en el centro geométrico de la pieza (ver figura 63).



Figura 63. Caso a estudio: brazo de Diadúmeno. Distintas vistas del brazo fracturado a la altura del hombro, deltoides y pectoral.

La aplicación del modelo teórico, en el caso del brazo fue la siguiente (figura 64):

Para la ecuación 2:

$$F = \frac{P}{\mu} = \frac{9,7 * 9,81}{0,57} = 166,94 \text{ N}$$

Para la ecuación 3:

$$F = \frac{P d_2 \cos \alpha}{d_1} = \frac{95,16 * 30 * 0,55}{8,5} = 186,39 \text{ N}$$

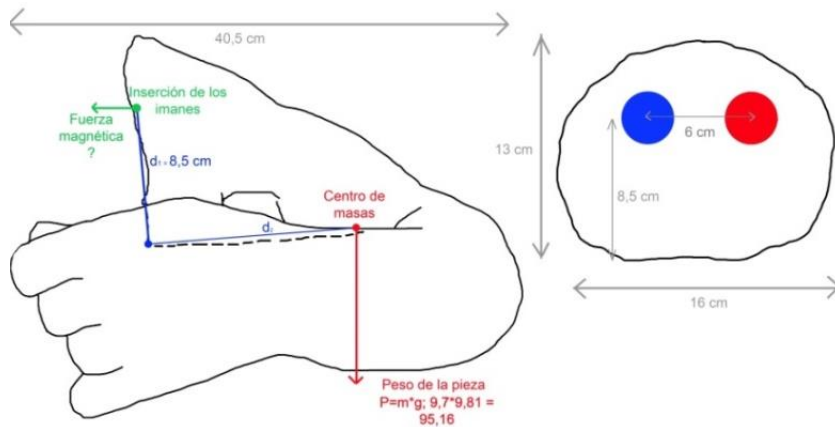


Figura 64. Aplicación del modelo teórico al brazo.

Era por tanto necesario, para lograr el equilibrio de la unión, una fuerza total de 166,94 N (eq. 2) para evitar el deslizamiento y de 186,39 N (eq. 3) para evitar la rotación. Tomando como referencia este último dato de 186,39 N y teniendo en cuenta los imanes disponibles y los valores obtenidos, se decidió colocar dos pares de imanes S-30-07-N de 136 N a 4,5 cm de la parte superior con el fin de contrarrestar el torque, lograr el equilibrio de momentos y aportar el margen de seguridad.

Los agujeros se hicieron coincidir mediante una plantilla transparente y se perforaron mediante fresado. De este modo, se consigue profundizar de manera controlada, aprovechando la irregularidad de la zona de fractura

para insertar de manera plana los imanes. Los imanes que unían el brazo al hombro se pegaron con resina epoxi. Se buscó garantizar la estabilidad de la unión.

Como resultado final se consiguió el equilibrio de la unión (ver figuras 65-67). Las dos partes encajaban perfectamente y se consiguió unir dos partes fracturadas de una forma reversible y poco invasiva.

En estos dos primeros casos de estudio se colocaron solo dos imanes para comprobar la eficacia del modelo teórico.

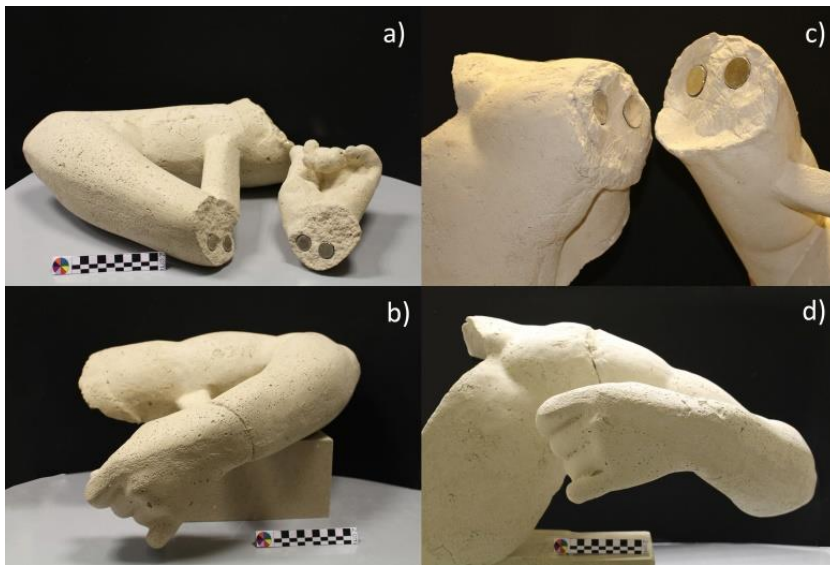


Figura 65. Resultado final. a) y b) unión de la mano. c) y d) unión del brazo.

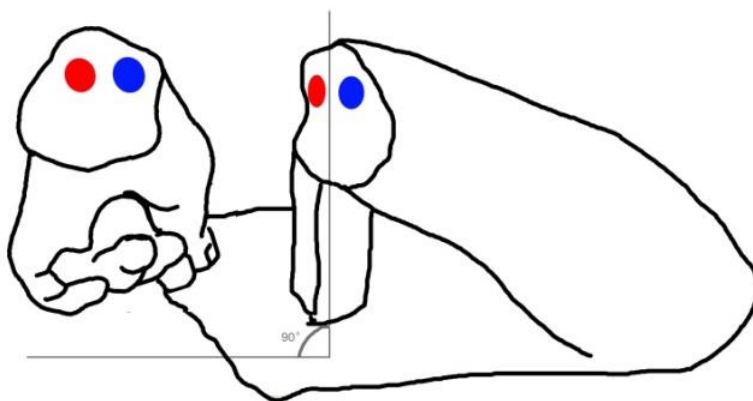


Figura 66. Esquema de la unión de la mano con el antebrazo.

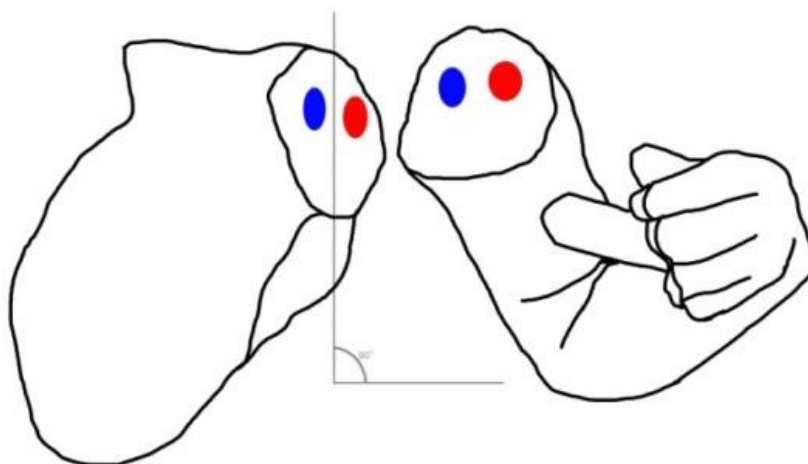


Figura 67. Esquema de la unión del brazo con el hombro.

6.2.2. Caso 2. Brazo de Diadúmeno en cera.

Para el caso de la pieza en cera se ha utilizado de nuevo el brazo del Diadúmeno. El material empleado en la reproducción fue, en este caso, una mezcla de cera de abejas con resina de colofonia al 20% en peso y, reforzada internamente mediante el uso de estopa natural, siguiendo la técnica tradicional de la ceroplástica (ver figura 68).

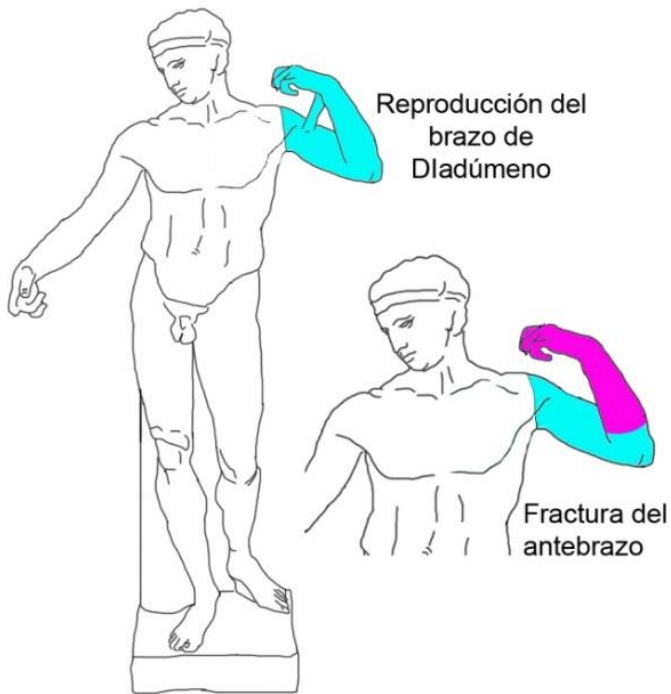


Figura 68. Zonas de Diadúmeno en donde se realizaron los moldes para obtener los vaciados utilizados como caso de estudio del brazo de cera.

En general, el proceso de vaciado se realizó del siguiente modo: con el molde abierto, primero se pinceló con brocha la cera fundida hasta obtener el grosor de 2-3 mm de forma homogénea a lo largo de toda la superficie (figura 69). Posteriormente, se colocaron los refuerzos de estopa y se cerró el molde. Finalmente, se engrosaron las paredes de la pieza mediante el volteo con cera. El montante de cera empleada fue de 3,5 kg.



Figura 69. Proceso de realización del vaciado en cera del brazo del Diadúmeno. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

El caso en cuestión presentaba una fractura en el antebrazo, después del codo (figura 70). La parte a unir tenía un peso de 1,38 kg, 36 cm de longitud, una sección hueca de 10 x 12 cm y, un ángulo de 90 °, aproximadamente. El coeficiente de rozamiento fue $\mu = 0,77$.



Figura 70. Imagen del vaciado de cera como caso de estudio. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

De acuerdo con el modelo teórico se obtuvo en el caso del antebrazo de cera (ver figura 71): para la ecuación 2:

$$F = \frac{P}{\mu} = \frac{1,38 * 9,81}{0,9} = 15 \text{ N}$$

Para la ecuación 3:

$F = \frac{Pd_2 \cos \alpha}{d_1}$, el centro de masas no está en el centro geométrico ya que se encuentra fuera de la pieza debido a la morfología de la misma:

$$F = = \frac{13,54 * 19 * 0,94}{9} = 27,01 \text{ N}$$

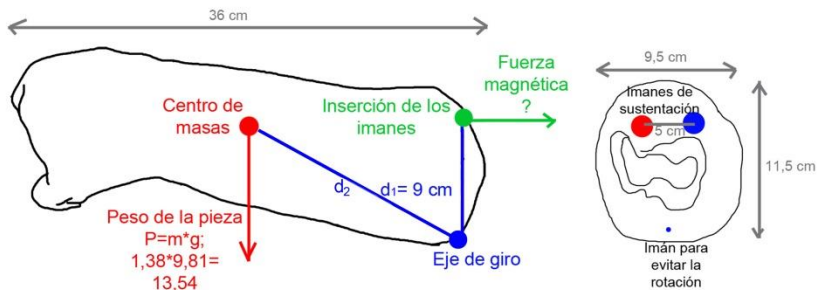


Figura 71. Aplicación del modelo teórico al antebrazo de cera.

Los resultados del modelo fueron 17,58 N (eq. 2) y 27,01 N (eq. 3). Se seleccionaron dos imanes S-15-02-N de 18,6 N que se situaron a 3 cm de la parte superior para estabilizar la unión y un imán S-04-1.5-N en la parte central inferior para evitar la rotación de la pieza, aportando un 38 % más de fuerza y de margen de seguridad sumado a los 3,43 N que aportan los imanes inferiores.

La principal dificultad encontrada fue la inserción de los imanes en la cera. Debido a la naturaleza del material (flexible y blando) se declinó el uso de adhesivos y además se comprobó que la unión imán-imán resultó ser más resistente que la unión cera-imán. Con el fin de mantener el imán ajustado en la cera, se diseñó un sistema de perno liso hueco de 3 cm de longitud con rosca en su interior, donde fue roscado el imán a modo de “implante” (ver figura 72). Este sistema permitió una mayor área de contacto del sistema magnético con el original ya que el área de contacto del imán es de $2,71 \text{ cm}^2$ que aumenta hasta $7,62 \text{ cm}^2$ con el uso del cilindro. Además, el roscado del imán posibilitó la profundidad deseada teniendo un margen de trabajo de unos 5 mm, garantizándose el contacto pleno entre las partes.

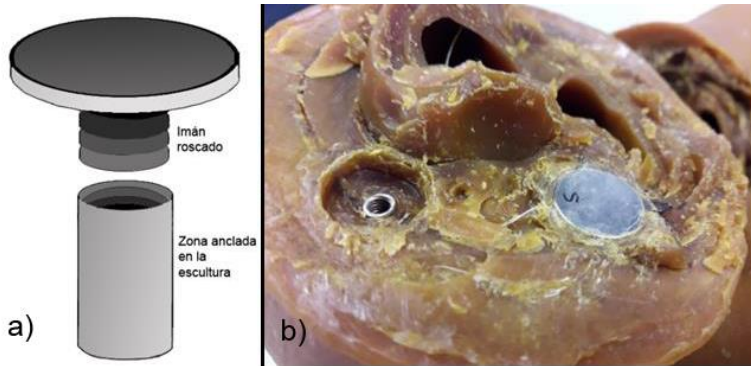


Figura 72. a) Prototipo diseñado para insertar en esculturas de cera. b) Inserción del prototipo tipo “implante”. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

En este caso particular hemos desarrollado un sistema mediante el cual se prescinde de adhesivos. El sistema es muy reversible porque mediante una ligera aplicación de temperatura el perno es extraído con una mínima fuerza mecánica. Además los imanes pueden ser sustituidos en cualquier momento desenroscándolos del perno (ver figura 73).

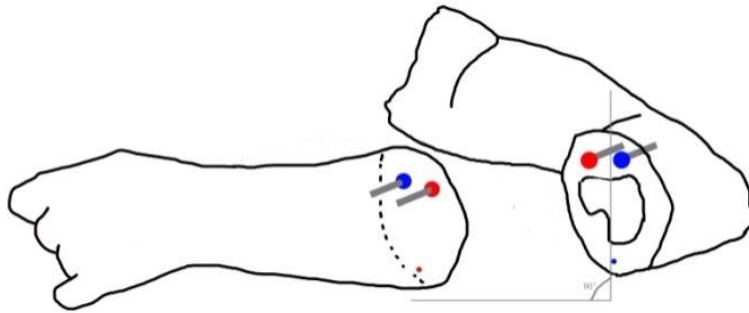


Figura 73. Esquema de la unión del antebrazo al brazo.

El resultado final es que la unión ha permitido devolver la lectura estética de esta pieza como se aprecia en la figura 74.

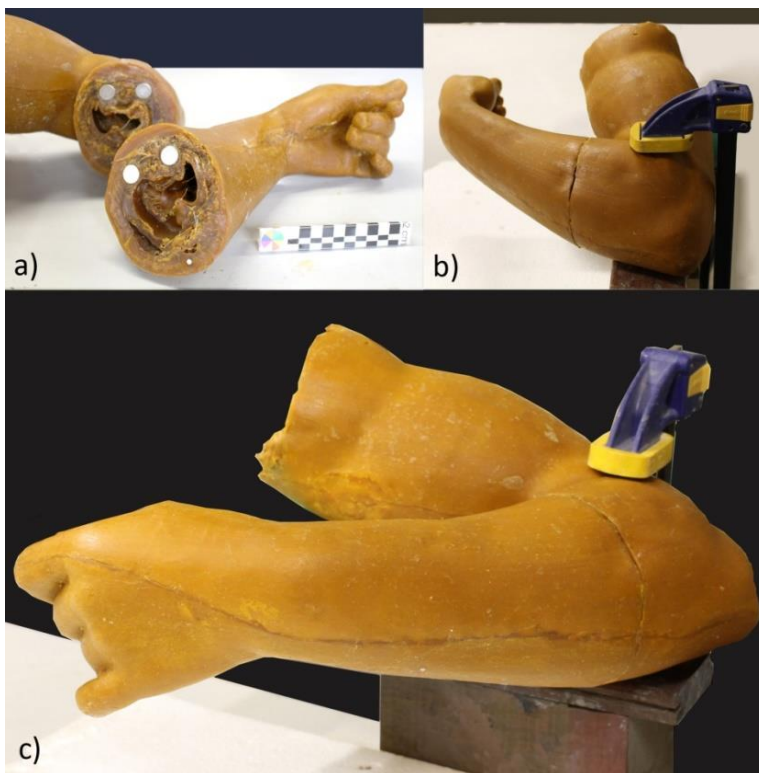


Figura 74. Resultado final. a) Sección abierta mostrando los imanes. b) y c) unión del antebrazo. (Fotografía y edición M. Azahara Rodríguez).

6.2.3. Caso 3. Virgen de los Desamparados de Silvestre d'Edeta (obra real).

El tercer caso de investigación se refiere a una escultura, Virgen de los Desamparados (1954), del prestigioso escultor valenciano Silvestre d'Edeta. Se trata de una pieza en piedra artificial realizada con un mortero inorgánico a base de arena y cemento, con propiedades físicas similares a la piedra arenisca. La obra tenía unas dimensiones generales de 75 x 47 x 23 cm³ (alto x ancho x profundo) y, 80 kg de peso. La casuística que presentaba esta pieza era un faltante de 13 cm de alto por 5 cm de ancho localizado en la parte de la testa, como se aprecia en la figura 75.

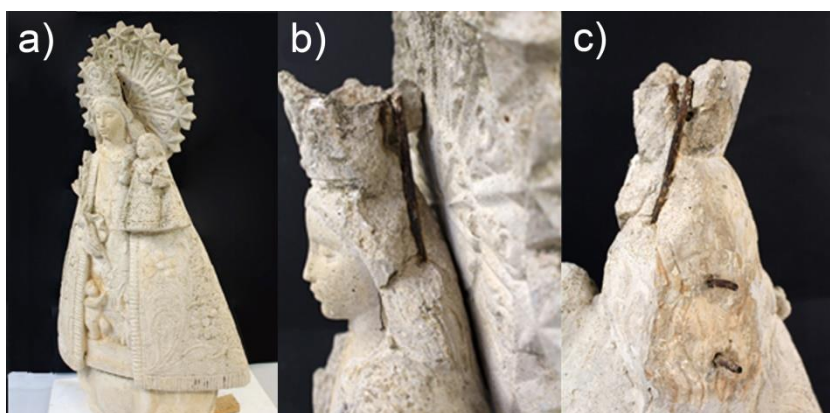


Figura 75. Estado de conservación de la obra antes de la intervención. (Fotografía Xavier Mas-Barberà. Edición M. Azahara Rodríguez).

La intervención se dividió en dos partes: por un lado el proceso de restauración (limpieza y consolidación) y, por otro lado, la obtención de la prótesis adherida mediante sistemas magnéticos. (En este apartado solo se expondrá el proceso que afecta al uso de sistemas magnéticos empleados en la adhesión de la prótesis).

Concretamente, en la fase de obtención de la prótesis se siguieron varios pasos. En primer lugar, se registró la pieza por fotogrametría y se modeló el faltante en 3D. Así resultó el volumen del fragmento y se calculó el peso de acuerdo al uso de un mortero predosificado afín al original, siendo el valor en peso de 200 g. En segundo lugar, se aplicaron las ecuaciones. En este sentido, considerando $\mu=0,57$ (valor medido en materiales de piedra similares) se obtuvo (ver figura 76):

Para la ecuación 2:

$$F = \frac{P}{\mu} = \frac{0,2 * 9,81}{0,57} = 3,44 \text{ N}$$

Para la ecuación 3:

$F = \frac{P d_2 \cos \alpha}{d_1}$, el centro de masas está en el centro geométrico por lo que se

simplifica en $F = \frac{P l}{d_1} = \frac{0,2 * 9,81 * 5}{12} = 0,41 \text{ N}$

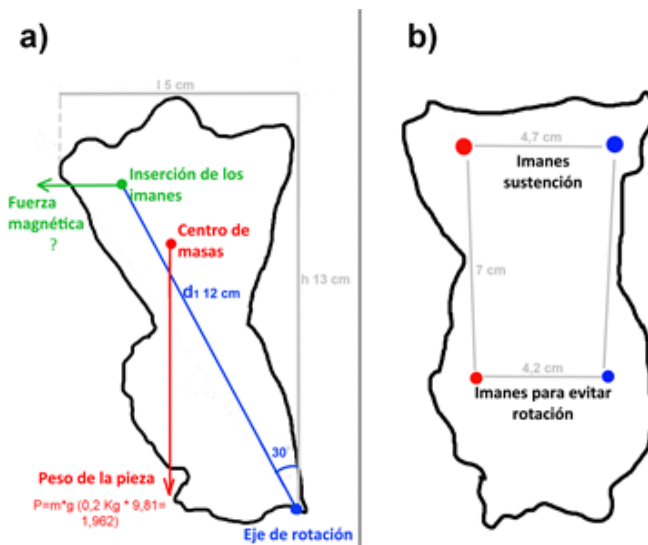


Figura 76. Aplicación del modelo teórico a la prótesis.

Este valor se debe principalmente a la forma de la prótesis dado que el centro de masa está muy cerca del eje de rotación, lo que dificulta el volteo. La fuerza magnética necesaria mínima para asegurar el equilibrio fue, por tanto, de 3,44 N. Por razones de seguridad, como se ha venido desarrollando, se consideró importante aportar un margen de seguridad aumentando esta fuerza. Así se seleccionaron dos imanes modelo S-04-1.5-N de Supermagnete, que proporcionaban una fuerza de 3,5 N cada uno, lo que duplicaba la fuerza necesaria. Se pusieron los dos imanes en configuración magnética antiparalela u opuesta (ver figura 77) para reducir el campo magnético en el exterior de la prótesis, cerrándose así el flujo magnético. Además, también se añadieron dos imanes más pequeños (modelo S-02-01-N) para aumentar la estabilidad.

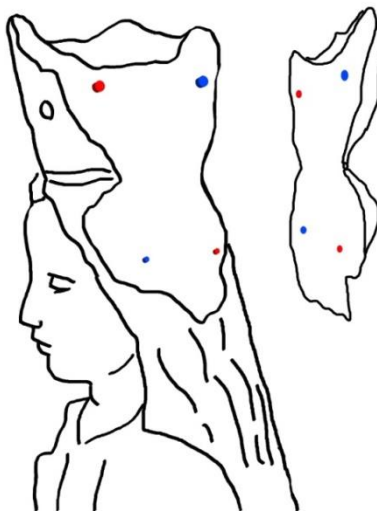


Figura 77. Esquema de la unión de la Virgen con la prótesis.

El campo magnético generado por los imanes colocados en las posiciones seleccionadas se calculó utilizando el software Comsol Multiphysics. La figura 78 muestra el campo magnético calculado en diferentes planos paralelos a la fractura. Si se compara con el campo magnético de la Tierra

(25 μT), el campo cercano a los imanes era 10 veces el campo magnético de la Tierra. Sin embargo, a 5 cm de distancia, y dentro de la prótesis, el campo magnético está por debajo del campo de la Tierra y, por tanto, no es esperable contaminación debido a partículas atmosféricas ferromagnéticas del ambiente.

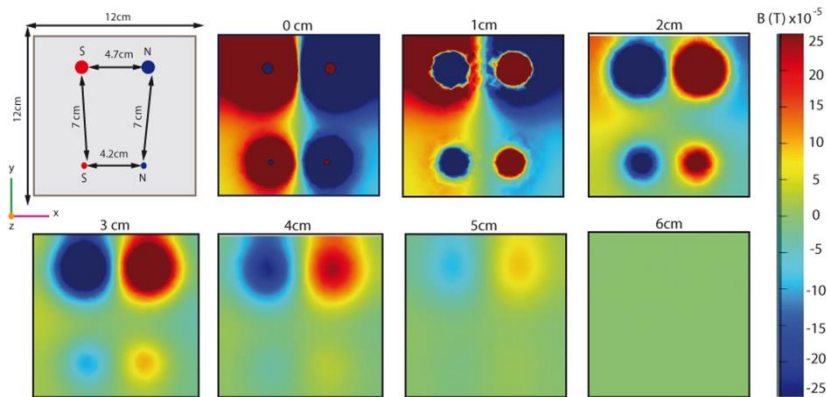


Figura 78. Aplicación del simulador de campo magnético.

En tercer lugar, los trabajos se centraron en la preparación de probetas de mortero con el fin de preparar una prótesis de color y textura superficial afín al original. A partir del análisis morfológico del mortero del original se seleccionaron varios materiales que conformaron el mortero empleado para el tratamiento del volumen (la testa y de la corona). Para ello se empleó un conglomerante hidráulico Ledan C30®²⁵, áridos de composición carbonatada (0,5-2 mm), aditivos (pigmento inorgánico tierra sombra natural y siena natural) y agua. La dosificación empleada conglomerante:árido fue 1:2, a peso (figura 79).

²⁵ Sus características más destacables son: elevada tixotropidad y poder de adhesión. Es indicado para estucar estructuras monumentales. Está compuesto de caolín y calcáreas blancas junto con aditivos que mejoran sus propiedades físicas. Es mineralógicamente puro por un proceso especial de cocción, enfriado mediante endurecimiento y mezclado con pozzolana blanca.



Figura 79. Proceso de modelado directo de la prótesis. (Fotografía y edición M.Azahara Rodríguez).

Finalmente, como adhesivo de unión entre los imanes y, entre la obra y la prótesis, se utilizó el Paraloid B72® dados los parámetros ambientales controlados a los que iba a estar expuesta la obra. El proceso de aplicación de los imanes fue el siguiente:

- a) Se colocaron los cuatro imanes en la zona de fractura de la obra original adheridos con Paraloid B72®.
- b) Se insertó un film a modo de separador entre la obra original y el mortero de prótesis.
- c) Se unieron magnéticamente los imanes y se les aplicó una capa de Paraloid B44® para aislarlos de la humedad del mortero. La aplicación de éste se realizó por modelado directo, in situ. Una vez fraguado el mortero se retiró cuidadosamente el film transparente y, los imanes albergados en la prótesis fueron adheridos con Paraloid B72®.

Con esta intervención se ha buscado principalmente el respeto por el original. Por eso se ha evitado la perforación en la testa de la Virgen, haciendo que la prótesis albergue volumétricamente los dos pares de imanes (ver figura 80). Se ha devuelto la lectura estética de la Virgen, factor fundamental cuando es una imagen de culto. Finalmente, se ha escogido un adhesivo muy reversible y aunque es sensible a la temperatura, se ha atendido a que la escultura va a ser expuesta en una zona interior.



Figura 80. Resultado final. (Fotografía Xavier Mas-Barberà y M.Azahara Rodríguez. Edición M.Azahara Rodríguez).

7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las conclusiones extraídas de esta tesis doctoral tras ensayar y analizar diversos sistemas magnéticos susceptibles de emplearse en uniones de fragmentos y prótesis de obras de arte.

El modelo teórico desarrollado permite plantear el sistema magnético idóneo para conseguir la unión de forma óptima a partir de las características estructurales de los materiales (como son la morfología, el peso y el tamaño) dado que predice el comportamiento de las uniones y por tanto con él se puede calcular cuál ha de ser configuración ideal para que las uniones sean estables tanto desde el equilibrio de fuerzas como desde el equilibrio de momentos.

La fuerza de sujeción de los imanes analizados S-10-05-N, S-12-06N, S-15-02-N, S-15-03N y S-15-05-N es superior a los valores indicados en la ficha técnica, entre un 4,85 y un 43 %. En este sentido, las uniones imán-imán proporcionan una fuerza de sujeción mayor a la que indica el fabricante. Ese exceso de fuerza puede considerarse como margen de seguridad.

La aplicación de distintos rangos de temperatura durante el ensayo de tracción sobre los imanes S-10-05-N determinó que 80 °C era la temperatura de trabajo máxima. A partir de 100 °C los imanes pierden propiedades magnéticas de forma permanente. La temperatura de 80 °C es un valor más que suficiente para el tipo de aplicaciones que se persiguen en esta investigación, tanto para ambientes exteriores como para espacios de interior.

El Paraloid B72® y el Araldit estándar® son, desde el punto de vista de la fuerza de sujeción y estabilidad de la unión, los adhesivos que mejores propiedades mecánicas ofrecen durante la unión de los sistemas magnéticos con los diferentes materiales escultóricos (piedra y madera).

Concretamente, el Paraloid B72® resulta óptimo en piezas pequeñas ubicadas en interiores con una temperatura controlada y, las resinas epoxi son idóneas en uniones estructurales de mayor envergadura y, en espacios exteriores.

El coeficiente de rozamiento de los materiales escultóricos estudiados, agrupados en “piedra”, “madera” y “cera”, presentan diferencias considerables en sus coeficientes resultando valores para la escayola de $\mu=0,86$, en calcarenita de $\mu=0,57$, en mármol de Macael de $\mu=0,78$, en pino Melis de $\mu=0,57$, en roble de $\mu=0,30$ y en cera $\mu=0,77$. Estos datos confirman la necesidad de calcular los coeficientes de rozamiento para cada material dada la disparidad que se aprecia para un mismo grupo de materiales.

Los estudios de estática han señalado dos regímenes para el comportamiento de la unión. Por un lado, cuando el peso se sitúa cerca de la unión, es el equilibrio de fuerzas, con la fuerza de los imanes y el coeficiente de rozamiento los que indican la fuerza máxima soportada. Por otro lado, y a medida que se aleja el peso de la unión, las condiciones de estática y, por tanto, el fallo de la unión se determina por el equilibrio de momentos de las fuerzas. En este sentido, las piezas de menor longitud tienden a caer o deslizar y las de mayor longitud tienden a rotar.

Las simulaciones de campo magnético desarrolladas en la investigación permiten predecir las configuraciones de los imanes que producen valores de campo magnético pequeños en el exterior de las piezas, lo que previene la contaminación por partículas magnéticas suspendidas en el ambiente. El simulador de campo magnético resulta una herramienta muy útil que no implica manipulación alguna sobre la obra de arte.

Los estudios de reversibilidad desarrollados sobre piezas de escayola y de mármol, mediante un proceso de calentamiento controlado, demuestran que la aplicación de una temperatura moderada ($63\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) permite separar

las uniones magnéticas ejerciendo una mínima fuerza mecánica, sin dañar la pieza original, convirtiéndolo en un sistema de unión reversible.

Los imanes S-10-05-N y S-12-06-N sometidos a ensayos de envejecimiento natural a la intemperie durante 3000 h muestran la formación de una capa de corrosión en superficie, lo que evidencia su sensibilidad ante los factores ambientales directos. Sin embargo, en los casos que los imanes se sitúen insertos en una unión, la capa de oxidación resultante es mínima, considerándolos apropiados en uniones al exterior. Asimismo, al ser analizados los imanes S-12-06-N (control y tras ensayo de envejecimiento natural a la intemperie) mediante el microscopio óptico se observa un cambio de color y textura evidentes que se derivan de las concreciones de óxido de níquel originadas por la degradación del recubrimiento de los imanes. El microscopio de fuerza atómica ha confirmado los cambios morfológicos de la superficie del imán envejecido a escala nanoscópica, señalando el aumento de la rugosidad a raíz de la interacción con el ambiente.

De igual modo, los imanes S-12-06-N pierden un 8,8 % de fuerza de atracción tras el ensayo de envejecimiento natural; sin embargo, este valor sigue siendo un 17,4 % superior al dato proporcionado por el proveedor.

Las ceras magnéticas desarrolladas en la investigación han sido sometidas a ensayos de tracción donde, el peso máximo soportado por las distintas ceras magnéticas no presenta una diferencia al variar el tipo de cera o el tipo de partícula de carga, siendo de $1,55 \pm 0,3$ kg de fuerza media. Asimismo, las ceras mostraron unas propiedades óptimas y previsibles. En este sentido, la imanación de las ceras aumenta con la carga de partículas, siendo la proporción 1:8 la más magnética. También, son magnéticamente muy blandas y resultan materiales apropiados para realizar uniones magnéticas.

La aplicación de los sistemas magnéticos en casos reales en el ámbito de la conservación y restauración de escultura y ornamentos prevé actividades poco invasivas y respetuosas con el original.

En definitiva, el uso de sistemas magnéticos en uniones de fragmentos y prótesis de obras de arte resulta viable, reversible y eficaz.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A lo largo del desarrollo de esta tesis doctoral son varias las líneas de investigación que han quedado pendientes. Por eso, antes de cerrar este trabajo de investigación, se enumeran algunos aspectos a retomar en el futuro:

- Continuar con los estudios de las ceras magnéticas caracterizando sus propiedades.
- Morteros magnéticos. Preparar morteros inorgánicos y composites con partículas magnéticas para la fabricación de prótesis.
- Prototipos de ensamblaje en esculturas huecas, para resolver problemas específicos no solo de unión de las piezas, sino de inserción de los imanes.

BIBLIOGRAFÍA

ADSIT, Kristen Watson. An Attractive Alternative: The Use of Magnets to Conserve Homer by John Chamberlain. *WAAC Newsletter*, 33. (2): 16-21, May 2011.

ISSN 1052-0066.

AENOR, Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la carga de rotura para anclajes. UNE-EN 13364: 2002, Madrid, 2002. 20 p.

AENOR, Natural stone test methods. Determination of water absorption at atmospheric pressure. UNE-EN 13755:2008, Madrid, 2008. 12 p.

AFP. Berlusconi decide devolver a dos esculturas clásicas su pene y sus brazos. *El Mundo* [en línea]: Roma, Italia, 9 Noviembre 2010. (Cultura). [fecha de consulta 20 Mayo 2017].

Disponible en:

<http://www.elmundo.es/elmundo/2010/11/18/cultura/1290103370.html>

ARJONILLA Álvarez, María. La Colección arqueológica de la Casa de Pilatos. Consideraciones técnicas y Estado de Conservación del grupo escultórico romano situado en la logia oeste. *Cuadernos de Restauración*, (0): 34-41, 1997.

ISSN 1138-1299

ARJONILLA Álvarez, María. La Conservación del Patrimonio Cultural; Puesta en Valor. *Cuadernos de restauración*, (7): 3-4, 2009.

BAGLIONI, Raniero, GARCÍA DE LA TORRE, Fuensanta y GUZMÁN Espinosa, Isidoro. Proyecto museográfico de la Sala de dibujos y estampas del Museo de Bellas Artes de Córdoba. *PH*, (39): 69-80, 2002.
ISSN 1136-1867

BAGLIONI, Raniero y BOUZAS Abad, Ana. El Hypnos de Almedinilla: metodología y proceso de Investigación, intervención y montaje. *PH*, (28): 43-62, 1999.
ISSN 2340-7565

BARANDIARÁN, M., Reintegración volumétrica dirigida a la restauración de objetos artísticos tridimensionales. Criterios y aplicación. En: XIII Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (13: 2002: Lleida) 465-474 p.

BARANDIARÁN, Marta, BAZETA, Fernando, LEGORBURU, Pilar, GOIKOETXEA, Enrique H. y VENEGAS, Carlos. Objetos tridimensionales. Distintos sistemas de anclaje para prótesis. *Restauración y Rehabilitación*, (52): 70-75, 2001.
ISSN 1134-4571

BARANDIARÁN Landín, Marta, BAZETA Gobantes, Fernando, LEGORBURU Escudero, Pilar, VENEGAS Garcia, Carlos y MARTINEZ Goikoetxea, Enrique. Método de restauración de objetos artísticos tridimensionales con partes desaparecidas. España, 2.203.272. 20 de Junio de 2005. B44C3/06 (Escultura). 6 de Abril de 2001.

BARDELL, P.R. Los materiales magnéticos en la industria eléctrica. Bilbao: Urmo, 1970. 351 p.

Barras de acero estirado en frío, barra cuadrada de acero, barra hexagonal
<<http://www.steelpipessupply.es/11-cold-drawn-square-steel-bar.html>>

BARRIO Martín, Joaquín. El proceso de restauración y conservación de un conjunto de armas de hierro, aproximación a su estudio tecnológico y cultural. *Cuadernos de prehistoria y arqueología*, (19): 145-178. 1992.

ISSN 0211-1608

BARTH, Julie. Installation d'une toile libre à l'aide d'aimants: une approche globale de conservation. En: congrès et atelier (40: 2014: Quebec) 66 p.

BELLO, M.A., MARTÍN, L. y MARTÍN, A. Identificación microquímica de mármol blanco de Macael en varios monumentos españoles. *Materiales de construcción*, 42 (225): 23-30. 1992.

ISSN 0465-2746

BESTETTI, Roberto. Risarcimento strutturale trattamento delle lacune il caso del dipinto giardini romani di Giacomo Balla. En: IGIC lo stato dell'arte (3: 2005: Palermo) ICC Congresso Nazionale. 336-343 p.

BONINI, Massimo, LENZ, Sebastian, GIORGI, Rodorico, and BAGLIONI, Piero. Nanomagnetic Sponges for the Cleaning of Works of Art. *Langmuir*, (23): 8681-8685, 2007.

ISSN 0743-7463

BORGIOLI, Leonardo. Polimeri di sintesi per la conservazione della pietra. Padova: Il Prato, 2006. 127 p.

ISBN: 8887243387

BOSCO, Roberta. La última reforma del MNAC. El museo reestructura las cornisas y termina la urbanización del perímetro exterior. *El País* [en línea]: Barcelona, España, 8 Diciembre 2008. (Reportaje). [fecha de consulta 20 Mayo 2017].

Disponible en:

http://elpais.com/diario/2008/12/08/catalunya/1228702045_850215.html

BOSCH Reig, Ignacio. Real basílica de los Desamparados de Valencia. Restauración de los fondos pictóricos y escultóricos. 1998-2001. Valencia: Fundación para la Restauración de la Basílica de la Mare de Déu dels Desamparats, D.L. 2001. 259 p.

ISBN: 8460734862

BRAUN, Tom. Using Magnets as a Temporary Adhesive. En: AIC Paintings Specialty Group, Postprints, (2001: Dallas, Texas) AIC. Paintings Specialty Group. 2005. 83-84 p.

CALABRIA Salvador, Irene. Las pinturas murales de la ciudad íbero-romana de Cástulo, Linares (Jaén): Estudio técnico y propuesta de diferentes sistemas de anclaje para su musealización. Trabajo final de máster (máster oficial universitario en conservación y restauración de bienes culturales). Valencia, España: Universitat Politècnica de Valencià. 2013. 151 p.

CAPUZ Lladró, Rafael. Materiales orgánicos. Maderas. Valencia: Editorial UPV, 2005. 279 p.

ISBN: 8497058399

CAMPO, G.; RUIZ, C.; ALCOBÉ, M.; NUALART, A; ORIOLA, M.; MASCARELLA, M. Identificación de patologías causadas por el pvac en bienes culturales. En: Congreso Iberoamericano y VIII Jornada Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio (1: 2009: La Plata, Buenos Aires, Argentina).

ISBN: 9789872166571

CARTA de Venecia, 1964.

CARTA de 1987 de la conservación y restauración de los objetos de arte y cultura.

CIRUJANO, Concha. Proceso de intervención en las portadas del Nacimiento y del Bautismo de la Catedral de Sevilla. El Plan de Catedrales. *Revista Bienes Culturales. IPHE* (1): 101-120, 2002.

ISBN: 8436936426

CRISTOFERI, Elena. Il Restauro del Dittico di Murano. Studio per la Ricomposizione strutturale de un avorio del Museo Nazionale di Ravenna. *Kermes. Arte e tecnica del restauro*, 4 (12): 34-39, Settembre/dicembre 1991.

ISSN 1122-3197

CRITERIOS de intervención en materiales pétreos. Revisión 2013 por Ana Laborde Marqueze [et al.]. En: VVAA. Proyecto COREMANS: «Criterios de intervención en materiales pétreos». Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2013. pp. 39-108.

ISBN: 9788481815627

CTS EUROPE. Helios Group S.p.A. <<http://www.ctseurope.com/es/>>

DANESI, Alessandro Y GAMBARDELLA, Silvia. Il restauro come mezzo di ricerca storica. La conservazione delle sculture di palazzo Lancellotti ai Coronari. En: BARBANERA, Marcello y FRECCERO Agneta. Collezione di Antichità di Palazzo Lancellotti ai Coronari. Archeologia, Architettura, Restauro. Roma: L'erma di Bretschneider, 2008. 117-134 p.

ISBN: 9788882654856

DÁVILA Buitrón, Carmen. Estudio, clasificación y criterios para la intervención en los elementos metálicos de las reparaciones-restauraciones antiguas de cerámica. En: Congreso Latinoamericano de Conservación y

Restauración de Metal (IV: Madrid: 2011). Ministerio de Cultura. 2011. 180-206 p.

DERBYSHIRE, Alan. The new miniatures gallery. *V&A Conservation Journal*, (51): 2-4, Autumn 2005.

ISSN 9670-2273

DÍAZ Martínez, Soledad. La hierática mirada del arte yoruba: analítica, conservación y restauración. *Patrimonio Cultural de España nº 2.- 2009. El Patrimonio Mundial en España: una visión crítica*, (2): 324-333, 2009.

ISSN 1889-3104

DIGNARD, Carole. La réparation des peaux d'un kayak. En: Actes du Congrès annuel de l'IIC-CG (14:1989: Ottawa, Canada). 159-167 p.

ISSN 0898-0128

DOMÍNGUEZ Pérez, Ieff. Restauración de un *soliferrum* de época ibérica. *Informes y trabajos*, (2): 39-46, Mayo 2009.

DUMKA, Heather. Conservation of a Beaded Skin Parka. En: Interim Meeting/Réunion intermédiaire Working Group "Leather and Related Materials" Groupe de Travail "Cuir et Matériaux Associés" (2004: Atenas). 5-9 p.

ECHEVARRÍA Alonso-Cortés, Enrique. Arqueología y etnografía de la laña y de la conservación de cerámicas. *Pátina*, II (13-14): 75-86, Mayo 2006.

ISSN 1133-2972

ELTRABAJONUMEROTRECE. Restauración de óleos sobre lienzo del retablo de Monsalupe en Ávila. A fine WordPress.com site. Blog. <<https://eltrabajonumerotrece.wordpress.com/pintura->

painting/pintura/restauracion-de-oleos-sobre-lienzo-del-retablo-de-monsalupe-en-avila/>

EFE. Marte pierde el pene de Berlusconi. *El Diario de León* [en línea]: Roma, Italia, 29 Marzo 2013. (Cultura). [fecha de consulta 20 Mayo 2017].

Disponible en:

http://www.diariodeleon.es/noticias/cultura/marte-pierde-pene-berlusconi_782225.html

ESCOHOTADO Ibor, María Teresa, BAZETA Gobantes, Fernando y RODRÍGUEZ López, Ahinoa. Innovación y Tecnologías en la Especialidad de Conservación y Restauración de Obras de Arte [en línea]. País Vasco: Servicio editorial de una Universidad del País Vasco, 2012 [fecha de consulta: 16 Mayo 2017]. Capítulo 4. Nuevas tecnologías en la Conservación y Restauración de Obras de Arte sobre Papel.

Disponible en:

<http://nuevamuseologia.net/wp-content/uploads/2016/01/Innovacionynuevas.pdf>
ISBN: 9788498606898

ESCUADERO, Cristina. La virgen del oratorio (terracota), restauración y sistema de presentación de la información: articulación de los sedimentos antrópicos de carácter histórico que concurren en la obra. En: La Restauración en el Siglo XXI. Función, Estética e Imagen (2009: Cáceres) 183-194 p.

ESTUDIO patológico. Palacio Viana. Madrid. Patologías y procedimientos generales de ejecución. [en línea] 11 p. [fecha de consulta 21 Mayo 2017].

Disponible en:

http://aparejadoresacc.com/wp-content/uploads/Extracto_Estudio.pdf

FENDT, Astrid, KUNZE, Gerhard y RÖHL, Sebastian. Apollstatue für Ausstellung in Brasilien restauriert. Bildhauerstil und Restaurierungsgeschichte der Skulptur von Carlo Albacini neu erforscht. *Restauero*, (5): 302-309, Julio/Agosto 2006.

ISSN 0933-4017

FIORANI, Fabio. Il montaggio con bande magnetiche dei disegni architettonici di Paolo Soleri. *Bolletino ICR*, (12):71-79, 2006.

ISSN 1594-2562

FORT González, Rafael. Polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos. En: VVAA. Ciencia y Tecnología para una conservación sostenible del patrimonio pétreo. Madrid: Ayuntamiento de San Sebastián de los Reyes, 2007. pp. 71-83

ISBN: 8495710412

FORT, R., BERNABEU, A., GARCÍA DEL CURA, M.A., LÓPEZ de AZCONA, M.C., ORDÓÑEZ S. y MINGARRO, F. La Piedra de Novelda: una roca muy utilizada en el patrimonio arquitectónico. *Materiales de Construcción*, (266): 19-32, 2002.

ISSN 0465-2746

GAÑÁN Medina, Constantino. Técnicas y evolución de la imaginería polícroma en Sevilla. Sevilla: Universidad de Sevilla, 1999. 284 p.

ISBN: 8447205312

GLAVAN, John R. An Evaluation of Mechanical Pinning Treatments for the Repair of Marble at the Second Bank of the United States. Trabajo final de máster (Master of Science in Historic Preservation). Pennsylvania, USA: University of Pennsylvania. 2004. 155 p.

GÓMEZ González, María Luisa, JUANES, David, NAVARRO, Jose Vicente, MARTÍN DE HIJAS, Carmen y ALGUERÓ, Montse. Revisión y actualización de los análisis de la policromía de la Dama de Baza. Comparación con la Dama de Elche. *Bienes culturales revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, (8): 211-222, 2008.

ISSN 1695-9698

GÓMEZ Villalba, Luz Stella, LÓPEZ Arce, Paula, FORT González, Rafael y ÁLVAREZ DE BUERGO Ballester, Mónica. La aportación de la nanociencia a la conservación de bienes del patrimonio cultural. *Patrimonio cultural de España*, (4): 43-55. 2010

ISSN 1889-3104

GRAFIÁ, José Vicente, MAS, Xavier, PÉREZ, Eva y. BOSH, Luis. Ideología y metodología en los procesos de intervención en las esculturas y ornamentos del espacio central y acceso sur de la Basílica de los Desamparados de Valencia. *Arché*, (3): 127-136, 2008.

ISSN 1887-3960

GRUPO Centurión. Sistemas de anclaje para fachadas ventiladas. Anclajes Keil. [en línea] 26 p. [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en: http://www.alcalagres.es/webroot/files/files/Keil_Spanish_0_60991800_1361953571.pdf

GRUPO Controls. Acero y otros. Equipos de ensayo para la industria de la construcción. Máquinas de ensayo universales. [en línea] 332-361 p. [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en: http://www.heelt.com.ar/catalogos/70_es.pdf

GIULIANI, Cairolí Fulvio. L'edilizia nell'antichità. Con CD-ROM. 2ª ed. Roma: Carocci editore, 2006. 311 p.

ISBN 9788843037094

HEIDENREICH, Svenja. The "Kleiner Klebeband" of the Fürsten zu Waldburg-Wolfegg. Concept for the preservation of old master drawings mounted in an album. *ICOM-CC Working Group Graphic Documents Newsletter*, November 2014. 6p.

HERNÁNDEZ Álvaro, Juan y TOVAR Pescador, Joaquín. Fundamentos de física: mecánica. 3ª. ed. Jaén: Universidad de Jaén, 2012. 363 p.
ISBN: 9788484396253

HOVEY, Deanna. Short Communication: Simple and invisible solutions using rare earth disc magnets in mountmaking. *JAIC* (51): 51-58, 2012.
ISSN 0197-1360

IAPH. Amazona Herida. Écija, Sevilla. En: Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Consejería de Cultura [en línea]. Sevilla, 2002 [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en:
http://www.iaph.es/web/canales/conservacion-y-restauracion/catalogo-de-obras-restauradas/contenido/Amazona_Herida_de_Ecija

IVC+R. Anónimo del siglo XV. Nuestra Señora del Llosar. Parroquia de Santa María Magdalena. Villafranca del Cid. Castellón, 2013. En: Instituto Valenciano de Conservación y Restauración [en línea]. Castellón [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en:
<http://www.ivcr.es/media/descargas/monografia-restauracion-vilafranca-llosar-w.pdf>

IVC+R. Fondos artísticos de la Diputación de Valencia. Emilio Calandin. Mater Dolorosa, Niño de la trompa. Ignacio Pinazo. Vinatea. En: Instituto Valenciano de Conservación y Restauración [en línea]. Valencia [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en:
<http://www.ivcr.es/media/descargas/monografia-valencia-fondos-diputacion-ivcr.pdf>

IVC+R. Libros del archivo municipal Pego, Alicante. En: c+r material de archivo. Instituto valenciano de conservación y restauración [en línea]. Valencia, 2011 [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en: http://www.ivcr.es/media/descargas/restauracion_ivcr_libros_archivo_pego_w.pdf

IVC+R. Llibre de lletres e altres actes fet e activat en poder... en Anthon de Gudar, justicia de la ciutat... 1413. Archivo Municipal Segorbe. En: Instituto Valenciano de Conservación y Restauración [en línea]. Valencia [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en: http://www.ivcr.es/media/descargas/restauracion_ivcr_llibre_lletres_segorbe_w.pdf

IVC+R. Pergaminos y libros restaurados. Archivo de la Catedral Metropolitana. Valencia. En: Instituto Valenciano de Conservación y Restauración [en línea]. Valencia [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en: http://www.ivcr.es/media/descargas/monografia_valencia_catedral_pergaminos-libros-ivcr.pdf

IVORRA, S., GARCÍA BARBA, J., MATEO, A.M., PÉREZ-CARRAMIÑANA, C. y MACIÁ, A. Partial collapse of a ventilated stone façade: Diagnosis and analysis of the anchorage system. *Engineering Failure Analysis*, (31): 290-301, Febrero 2013.
ISSN: 1350-6307

JORDAN, Tammy. Using Magnets as a Conservation Tool: A New Look at Tension Drying Damaged Vellum Documents. *The Book and Paper Group Annual* (30): 47-55, 2011.
ISSN 0887-8978

JAKUBOVICS, J.P. Magnetism and magnetic materials. 2a. ed. London: Institute of Materials, 1994. 165 p.

ISBN: 0901716545

KEYNAN, Daria, BARTEN, Julie and ESTABROOK, Elizabeth. Installation methods for Robert Ryman's wall-mounted works. *The paper conservator*, 31, (1): 7-16, September 2007.

ISSN 0309-4227

KOOB, Stephen. Obsolete fill materials found on ceramics. *Journal of the American Institute for conservation*, 37 (1): 49-67, Spring 1998.

ISSN 0197-1360

LASTRAS Pérez, Montserrat. Investigación y análisis de las masillas de relleno para la reintegración de lagunas cerámicas arqueológicas. UPV. 2007. Tesis (doctor en conservación y restauración de bienes culturales) Valencia, España: Universitat Politècnica de Valencià. 2007. 438 p.

LAYUNO Rosas, María de los Ángeles. Historia de la conservación del patrimonio arquitectónico. En: La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio (Enero 2012: Madrid, España). CSIC. 2012. 7-22 p.

ISBN: 9788461576609

LEFFERTS, Kate C., MAJEWSKI, Lawrence J., SAYRE, Edward V., MAYERS, Pieter, ORGAN, RM., SMITH, CS., BRILL, Robert H., BARNES, I. Lynus, MURPHY, Thomas J. y MATSON, Frederick R. Technical examination of the classical bronze horse from the metropolitan museum of art. *JAIC* 21 (1): 1-42, 1981.

LLAURADÓ Pérez, Nuria. Vaciados de escayola y corridos de terraja en obras de restauración. Trabajo final de máster (máster oficial universitario en

técnicas y sistemas de edificación). Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. 84 p.

LÓPEZ, María-Paz. La restauración de la catedral descubre imágenes insólitas de las alturas del templo. *La Vanguardia*: 09 Octubre 2011. (Vida).

LORENZI, Paola Franca y SORELLA, Franca. Il San Giovannino restituito. El San Juanito restituido. En: IMPRONTA, Maria Cristina. Collana problemi di conservazione e restauro. Il San Giovannino di Ubeda restituito. El San Juanito de Ubeda restituido. Firenze: Edifir, 2014. 101-126 p.
ISBN: 9788879706582

LUQUE, A., CULTRONE, G., MOSCH, S., SIEGSMUND, Sebastian y LEISS, B. Anisotropic behaviour of White Macael marble used in the Alhambra of Granada (Spain). The role of thermohydric expansion in stone durability. *Engineering Geology*, (115): 209–216. 2010.
ISSN: 0013-7952

MACARRÓN, Ana María. Historia de la Conservación y la restauración desde la Antigüedad hasta el siglo XX. 2a. ed. Madrid: Tecnos, 2002. 267 p.
ISBN: 8430937706

MACARRÓN, Ana María y GONZÁLEZ Mozo, Ana. La conservación y la restauración en el siglo XX. Madrid: Tecnos, 1998.
ISBN: 8430931651

MADRID, José Antonio. Aplicación de la Técnica Radiográfica en la Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Valencia: Editorial UPV, 2005. 86 p.

MARTÍNEZ-HURTADO, Sofía, MAS-BARBERÀ, Xavier, KRÖNER, Stephan y NOEMA RESTAURADORES, S. L. La reposición como medio de

reconocimiento histórico-estético y funcional. El caso de la portada del sol de la basílica de Santa María, Elche (Alicante). En: Congreso del GEIIC (4: 2009: Cáceres).

MARTÍNEZ Justicia, M^a José, SÁNCHEZ-MESA Martínez, Domingo y SÁNCHEZ-MESA Martínez, Leonardo. Historia y Teoría de la Conservación y restauración Artística. 3a. ed. Madrid: Tecnos, 2008. 467 p.
ISBN: 9788430947775

MAS-BARBERÀ, X., RODRÍGUEZ, M.A., PÉREZ, L. y RUIZ-GÓMEZ, S. Development of a methodology for the restoration of stone sculpture using magnets. En: International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, (13: 2016: Paisley). 871-878 p.
ISBN: 978-1-903978-57-3.

MAS i Barberà, Xavier. Conservación y Restauración de materiales pétreos. Diagnóstico y tratamiento. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2010. 190 p.
ISBN: 9788483635834

MAS, Xavier y DURÉNDEZ Hernández, María. La restauración en situaciones límite de pérdida estructural. La imponente pila bautismal renacentista de la Iglesia de Santa María de Ontinyent (Valencia). *ge-conservación*, (2): 113-128, 2011.
ISSN 1989-8568

MAS i Barberà, Xavier y SIMÓN, J.M. Proceso de Conservación y Restauración de la Escultura tallada en Madera. Museo Municipal de Requena. Oleana: Cuadernos de Cultura Comarcal, (17): 23-40, 2002.
ISSN 1139-4943

MECÁNICA y electromagnetismo por Abad Toribio, Laura [et al.]. Madrid: García-Maroto Editores, 2012.
ISBN: 9788415475491

MENDIOLA Tebar, Eva María, GARCÍA-GALÁN Ruiz, María Isabel. Restauración de la escultura del Capite Velato de la calle Adarve, Cartagena (Murcia). *Anales de prehistoria y arqueología*, (19-20): 157-166, 2003-2004.
ISSN 0213-5663

MERIAM, James L. Estática. 2a. ed. Barcelona: Reverté, 1978. 452 p.
ISBN: 8429141286

MINISTERIO de Ciencia e Innovación. Patrimonio Accesible: I+D+i para una cultura sin barreras E2.26. Cirugía del Bien Cultural. Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural. 54 p.

MONJO, J. y BUSTAMANTE, R. Consolidación y restauración de la fachada norte del Senado de España mediante reanclados, armados, sellados y coberturas. *Revista Informes de la Construcción* [en línea]. 2015, Vol. 67 no. 539. [fecha de consulta 21 Mayo 2017].

Disponible en:

<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4430/5117>

MORENO Cifuentes, M^a Antonia y ESCARTÍN Aizpurura, Esther. Restauración de una escultura en mármol del Museo de Zaragoza. En: Congreso de Conservación y Restauración de Bienes culturales. Castellón (11: 1996: Castellón).

ISBN: 8486895790

MUSÉE des Beaux-Arts. Meeting of the French GROUPE EMAIL at the musée des Beaux-Arts d Limoges (BAL). *ENAMEL Group ICOM-CC Glass & Ceramic + Metals WG. Newsletter*, (6): 10-11, 2011.

MURDOCK, Lorne D. Conservation assessment of submerged historic resources at pacific rim national park, Vancouver island, British Columbia, Canada. *ICOM Committee for conservation working group on wet organic archaeological materials newsletter*, (20): 7-11, January 1991.

NIMMRICHTER, Johan y WEDENIG, Klaus. Methoden zur Armierung gebrochener Steinskulpturen. Zum Thema zwanzig Jahre Steinkonservierung 1976-1996 En: Bilanz und Perspektiven. (1996: Austria) 127-134 p.

ISBN: 3901025618

ODDY, Andrew y CARROLL, Sara. Reversibility, does it exist? Londres: British Museum, 1999. 180 p.

ISBN: 0861591356

OÑORO, Javier. Adhesivos, el arte de unir todo con todo. Universidad Politécnica de Madrid. [en línea] 14 p. [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en:

www.sistemamid.com/download.php?a=82314

OÑORO López, Javier. Adhesivos y uniones adhesivas. *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, (64): 128-133, 2007.

ISSN 0034-8708

PARIS, Maribinaca, JERVIS, Anna Valeria and RISSOTTO, Lidia. The Restoration of a gilt leather portiere of the 16th century: study of the magnet-

based support structure. En: triennial conference (15: 2008: New Delhi) Preprints Volume I. ICOM. 57 p.

ISBN: 9788184243444

PENSA, Francesca; RIGGIARDI, Davide. La chiesa dei santi Fermo e Rustico a Quinto Stampi di Rozzano. Italian: Biblion Edizioni, 2010. 97 p.

ISBN: 978889177242

PLATEAU, Morgane. L'apport des aimants en néodyme parmi l'éventail des techniques d'aplanissement du parchemin. *Support/Tracé*, (14): 134-142, 2014.

ISSN 1632-7667.

PODANY, Jerry, GARLAND, Kathleen M., FREEMAN, William R. y ROGERS, Joe. Paraloid B-72 as a structural adhesive and as a barrier within structural adhesive bonds: evaluations of strength and reversibility. *Journal of the American Institute for Conservation*, 40 (1): 15-33, 2001.

ISSN 0197-1360

POLACEK, Petr y JANCAR, Josef. Effect of filler content on the adhesion strength between UD fiber reinforced and particulate filled composites. *Composites Science and Technology*, (68): 251–259, Mayo 2007.

ISSN 0266-3538

POTJE, Karen. Papel conservador in Montreal Museum of Fine Arts. A Traveling Exhibition of Oversized Drawings Montreal. *Revista The Book and Paper Group Annual* [en línea]. Vol 7, 1988. [fecha de consulta 17 Mayo 2017]

Disponible en:

<http://cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v07/bp07-09.html>

QUAGLIARINI, Enrico, MONINI, Francesco, BONDIOLI, Federica y LENCI, Stefano. Basalt fiber ropesandros: Durability tests for their use in building engineering. *Journal of Building Engineering*. (5): 142-150, Diciembre 2015. ISSN 2352-7102

RAFTERY, Gary M. y WHELAN, Conor. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. *Construction and Building Materials*, (52): 209-220, 2014. ISSN 0950-0618

RECUERO, Alfonso, GUTIÉRREZ, José Pedro, MIRAYETE, Antonio y CUARTERO, Jesús. Refuerzo de estructuras con composites avanzados. *Informes de la Construcción*, 49(452): 39-50, noviembre/diciembre 1997 ISSN 1988-3234

RISSER, Erick [et al.]. The Restoration of Ancient Bronzes. Naples and Beyond [en línea]. Getty Publications Virtual Library. Los Angeles: 2013, 147 p. [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en: <http://d2aohiyo3d3idm.cloudfront.net/publications/virtuallibrary/1606061542.pdf>
ISBN: 9781606061541

RODRÍGUEZ, M. Azahara. Análisis de sistemas magnéticos aplicados a uniones de fragmentos. En: II Encuentro de Estudiantes de Doctorado de la UPV [en línea] (2: 2015: Valencia) Universitat Politècnica de Valencià. [fecha de consulta 21 Mayo 2017] 11 p. Disponible en: <http://www.upv.es/contenidos/ENCD/OC/info/U0690349.pdf>

RODRÍGUEZ, M. Azahara. Análisis de sistemas magnéticos aplicados a uniones de fragmentos: Ensayos de tracción en adhesivos y probetas magnéticas a la intemperie. En: Resultados académicos 2014/2015

Conservación y Restauración de Bienes Culturales. 3a. ed. Valencia: UPV, 2016. 66 p.

ISBN 978-84-15453-41-3

RODRÍGUEZ, M. Azahara. Análisis de sistemas magnéticos aplicados a uniones de fragmentos: Exposición a intemperie. En: Resultados académicos 2015/2016 Conservación y Restauración de Bienes Culturales. 4a. ed. Valencia: UPV, 2017. 70 p.

ISBN: 9788416717439

RODRÍGUEZ, M.A., MAS-BARBERÀ, X. y PÉREZ, L. Optimización de sistemas magnéticos en la restauración de esculturas y elementos ornamentales. En: XIII Congreso Nacional de Materiales, (13: 2014: Barcelona). 75 p.

ISBN 13978-84-617-0054-7

RODRÍGUEZ, M.A., MAS-BARBERÀ, X. y PÉREZ, L. Estudio para optimizar las uniones de fragmentos en escultura y ornamentos mediante sistemas magnéticos. En: Jornadas Emerge 2014 (2014: Valencia). 471-478 p.

ISBN 978-84-9048-317-6

RODRÍGUEZ, M.A., MAS-BARBERÀ, X., PÉREZ, L. y RUIZ-GÓMEZ, S. Estudio de sistemas magnéticos a base de imanes para uniones de fragmentos y prótesis a la obra original escultórica. En: La Ciencia y el Arte V. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio, (5: 2015: Madrid). 121-135 p.

ISBN 978-84-608-4003-9.

SACCANI, Lucia y RELLA, Luigi. Die Restarierung eines großformatigen Leinwandgemäldes. Umsetzung innovativer Lösungsansätze. *Restauratio. Forum für Restauratoren, konservatoren und denkmalpfleger*. 113 (3): 182-187. april/mai 2007.

ISSN 0933-4017

SÁEZ-PÉREZ, M.P. y RODRÍGUEZ-GORDILLO, J. Structural and compositional anisotropy in Macael marble (Spain) by ultrasonic, x-rd XRD and optical microscopy methods. *Construction and Building Materials*, (23): 2121-2126. 2008.

ISSN 0950-0618

SALAZAR Rabasa, Luis. Restauración. San Martín y el pobre. En: Fundación Museo de las Ferias [en línea]. Medina del Campo [fecha de consulta 21 Mayo 2017]. Disponible en:

<http://www.museoferias.net/restauracion-san-martin-y-el-pobre/>

SÁNCHEZ Carrión, María del Mar y PINEDA, Miguel. Intervenciones en las portadas del Sol y de la Cuesta de la Colegiata de Osuna. *Cuadernos de los Amigos de los Museos de Osuna*, (8): 20-27, 2006.

ISSN 1697-1019

SCHLEFER, Elaine R. Wrappers with Magnetic Closures. *Revista Abbey Newsletter* [en línea]. Octubre 1996 vol. 10, no. 4. [fecha de consulta 17 Mayo 2017].

Disponible en: <http://cool.conservation-us.org/byorg/abbey/an/an10/an10-5/an10-509.html>

SHEESLEY, Samantha. Vortices and Reveries: An Innovative Treatment of Oversized Three-Dimensional Paper Objects. *The Book and Paper Group Annual* (27): 2008, 79-88

ISSN 0887-8978

SPICER, Gwen. Defying Gravity with Magnetism. *AIC News*, 35 (6): 1-5, Noviembre 2010.

SQUIRES, Nick. Stone sculptures smashed by Isil in ancient city of Palmyra restored to former glory by Italian experts. *The Telegraph* [en línea]: 16 Febrero 2017. [fecha de consulta 20 Mayo 2017].

Disponible en:

<http://www.telegraph.co.uk/news/2017/02/16/stone-sculptures-smashed-isil-ancient-city-palmyra-restored/amp/>

STONER, Joyce Hill. Mending tears vertically on large paintings using magnets. En: AIC Paintings Specialty Group Postprints (2007: Richmond, Virginia) 114-115p.

TAPOL, Benoit Vincens de. Ciencias y Humanidades al Servicio de la Conservación Preventiva. *Museo: Revista de la Asociación Profesional de Museólogos de España (ejemplar dedicado a las VIII Jornadas de Museología)*, (10): 139-153, 2005.

ISSN 1136-601X

TIPLER, Paul Allen. Física. Tomo I. 3a. ed. Barcelona: Reverté, 1992. 595 p. ISBN: 842914367X 8429143661 (O.C.)

UDE-HANSEN, Peter. Et eksperiment med guldekorationen pa en dragtkarde fra 1700-tallet. *Meddelelser om konservering*, 3 (5): 185-188, Abril, 1982.

ISSN 0106-469X

VENEGAS, Carlos, BARANDIARAN, Marta, BACETA, Fernando, LEGORBURU, Pilar, MAGUREGUI, Itxaso y SAN SALVADOR, Beatriz. Investigación y tratamiento de tres obras del pintor Gustavo de Maeztu. *Restauración & Rehabilitación*, (106): 68-73, 2002.

ISSN 11344571

VERBERNE-KHURSHID, F., SMIT, I.y VAN DER STERREN. The attraction of magnets as a conservation tool. En: ICOM Committee for Conservation Preprints. (13: 2002: Río de Janeiro). 363-369 p.
ISBN: 1902916301

WILD, Liz. Tree Sculpture. Conservation and Exhibition Preparation of a Contemporary Indigenous Australian Artwork. *ICOM-CC Ethnographic conservation newsletter*, (32): 11-14, April 2011.
ISSN 1036-6210

WILLER, Frank. Die Restaurierung der Herme. *Das Wrack: der antike Schiffsfund von Mahdia*. (1): 953-959, 1994.
ISBN: 3792714426/ 978-3792714423

WOOD, Robert. Magnetismo. De la brújula a los imanes superconductores. Madrid: Mc Graw Hill de divulgación científica, 1991. 208 p.
ISBN 0830627723 / 8476157312

ZINCONE, Paola. Un ensayo de mínima intervención en la aplicación de nuevo soporte en pintura mural arqueológica. Trabajo final de máster (máster oficial universitario en conservación y restauración de bienes culturales). Valencia, España: Universitat Politècnica de València. 2012. 30 p.

