

Intervenciones estructurales en la rehabilitación de la Puerta de Alcalá (Madrid)

Structural Interventions in the Rehabilitation of the Puerta de Alcalá (Madrid)

Jacinto R. Carmona^{*,a}, Juan Rey-Rey^b, Antonio Bueno^c y Luis Marcos^d

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Mecanismo Ingeniería. Director Técnico. Univ. Politécnica de Madrid. Prof. Asociado

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Mecanismo Ingeniería. Director. Univ. de A Coruña. Prof. Asociado.

^c Arquitecto. Máster Estructuras de Edificación. Mecanismo Ingeniería. Jefe de equipo

^d Arquitecto. Mecanismo Ingeniería. Coordinador BIM

RESUMEN

Durante el año 2023 se llevaron a cabo las labores de restauración y rehabilitación de la Puerta de Alcalá de Madrid. Durante el desarrollo de las obras y dentro de un amplio equipo multidisciplinar, que contemplaba entre otros arquitectos, restauradores, arqueólogos, herreros y escultores, Mecanismo Ingeniería ha realizado una asistencia técnica en materia de estructuras. Las labores fundamentales han sido por un lado (1) la evaluación de la seguridad por la disposición de los apoyos sobre la puerta de los andamios/jaulas que debían sujetar las estatuas durante las labores de restauración, y por otro (2) el propio análisis de estabilidad de las diferentes esculturas en su estado definitivo.

ABSTRACT

During the year 2023, restoration and rehabilitation works were carried out on the Puerta de Alcalá in Madrid. Throughout the development of the project, within a large multidisciplinary team that included, among others, architects, restorers, archaeologists, blacksmiths, and sculptors, Mecanismo Engineering provided technical assistance in the field of structures. The primary tasks involved were, on one hand, (1) the evaluation of safety regarding the placement of supports for the scaffolding/cages that were to hold the statues during the restoration work, and, on the other hand, (2) the analysis of the stability of the different sculptures in their final state.

PALABRAS CLAVE: Puerta de Alcalá, anclajes a piedra, emplomados, estabilidad estatuas.

KEYWORDS: Puerta de Alcalá, stone anchors, lead reinforcements, statue stability.

1. Introducción

La Puerta de Alcalá fue proyectada por el arquitecto Francisco Sabatini, quien resultó ganador del concurso convocado en 1769 por el rey Carlos III, para el cual presentó tres propuestas. La solución arquitectónica finalmente ejecutada consta de cinco vanos: los tres vanos centrales se resuelven con arcos de medio punto, alcanzando 9,28 metros de altura,

y decorados con casetones en el intradós; los dos vanos laterales, de menor tamaño, presentan un diseño adintelado y miden 6,10 metros de altura.

La estructura completa del monumento tiene una altura de 23,79 metros, con un ancho de 43,07 metros y una profundidad de 11,74 metros. Sabatini se inspiró en la Fontana dell'Acqua Paola (también conocida como el

Fontanone del Gianicolo) de Roma, construida a principios del siglo XVII, para concebir este diseño. En cuanto a las columnas y sus capiteles, adoptó como referencia los modelos creados por Miguel Ángel para el Capitolio de Roma. La obra pertenece al estilo neoclásico, aunque exhibe influencias barrocas, y se considera el primer arco de triunfo moderno en Europa [1].

El conjunto arquitectónico está coronado por un entablamento continuo que soportan unos pedestales, alineados con las columnas inferiores, que delimitan los arcos y vanos. En la fachada oriental, (cara Este), estos pedestales sostienen esculturas alegóricas de las cuatro virtudes cardinales, conforme a la clasificación de Platón: Fortaleza, representada con casco y lanza; Templanza, con un bocado o freno de caballo; Justicia, que originalmente sostenía una balanza (hoy desaparecida); y Prudencia, acompañada de un espejo y una serpiente, símbolos de autoconocimiento.

El lado occidental (cara Oeste) de la puerta está decorado con panoplias (conjuntos de armaduras y armas) dispuestas sobre los cuatro pedestales del entablamento corrido. El cuerpo central superior se culmina con un frontón triangular de estilo sobrio, adornado con un par de panoplias adicionales recostadas. Esta iconografía militar simboliza el espíritu protector y vigilante de la puerta, extendido a la monarquía y su relación con el pueblo, mientras que las cornucopias ubicadas en los vanos adintelados representan la prosperidad garantizada bajo esta protección. El conjunto se culmina en su cara Oeste con la escultura denominada “La Fama” que es el conjunto alegórico más emblemático del monumento.

El estado de estos once conjuntos escultóricos era tan preocupante que determinó la declaración del estado de emergencia y desencadenó las obras de la actuación de restauración que se han llevado a cabo durante el año 2023 [2-6]. Los estudios previos concluyeron que las esculturas del lado este estaban mejor conservadas que las del lado oeste

debido a su orientación, siendo éstas últimas más propensas a los condicionantes meteorológicos. Se establecieron, en una primera fase, tres categorías o niveles de afectación en función del deterioro que presentaban y se detalló el estado de cada una de ellas de forma individual, lo que permitió tener una primera idea muy aproximada de su estado para así poder acometer su restauración en orden de urgencia, afectación e importancia en la fase de obra (segunda fase).



Figura 1. La puerta de Alcalá – vista actual tras la rehabilitación realizada.

Si observamos las piezas escultóricas de cerca, desde un punto estructural y no tanto desde el de la conservación de la piedra, observamos que las esculturas están formadas por varias piezas y que, prácticamente, en todas las uniones poseen diferentes elementos metálicos que atan las piezas de piedra caliza. Estos elementos se dividen en dos grandes grupos: elementos a modo de barras que atan las piezas de mayor volumen entre sí introduciéndose en su interior o anclándose a la cubierta; y elementos tipo grapas y de menor entidad que unen piezas entre sí exteriormente. Además, todas ellas disponen de juntas de unión entre piezas y con la cubierta donde se asientan, con multitud de morteros de base cementosa que colmataban los encuentros [7, 8].

El objeto del presente trabajo es mostrar cómo se han desarrollado los análisis estructurales y las actuaciones llevadas a cabo, tanto para el análisis de las estatuas, como de los

elementos auxiliares para realizar estos trabajos (andamios y cimbras). Complementariamente a los trabajos de estabilización y consolidación de las esculturas se han llevado a cabo otras intervenciones que han requerido de un análisis estructural, tales como el anclaje de las nuevas líneas de vida o la fijación de la estructura para la nueva formación de cubierta.

2. Criterios de diseño y análisis del estado de conservación de los grupos escultóricos antes de la rehabilitación

Toda la restauración del monumento se ha guiado por los criterios generales de conservación del patrimonio cultural, consensuados por los diferentes entes participantes en la obra. Entre todos ellos, podemos destacar los siguientes, para entender en particular el proceso de restauración de los grupos escultóricos:

1. Prioridad de conservación frente a la restauración curativa, lo que se tradujo en intervenir los problemas de origen previendo el deterioro, priorizando por tanto acciones de consolidación y estabilización.
2. Trabajo interdisciplinar y aplicación de técnicas científicas. La intervención se fundamentó en los datos objetivos que aportaron los medios científicos y técnicos que se aplicaron.
3. Documentación precisa de toda la intervención mediante la elaboración de registros continuos y de una Memoria Final que ha documentado todo el proceso. Este incluye el método, productos empleados, su justificación y características de los equipos técnicos, profesionales que los compusieron, así como un programa de conservación preventiva, mantenimiento y seguimiento de los bienes restaurados.

Siguiendo estos preceptos, la prioridad en el caso de las esculturas fue estabilizar todas las piezas, especialmente en aquellos grupos escultóricos donde existía un grave riesgo de caída y vuelco. Para conseguir una estabilización efectiva a largo plazo, se entendió que era indispensable comprender cómo se disponían cada una de las piezas entre sí, cómo se unían interiormente, cómo trabajaba cada una de las piezas metálicas que se observaban y si existían nuevas piezas interiores de conexión que pudieran influir en la estabilidad de cada conjunto. En definitiva, fue necesario entender cómo se diseñaron y se montaron las esculturas en origen y cómo a lo largo de los años, tanto el tiempo como las restauraciones habían variado esos condicionantes para llegar al estado actual.

Entender esto implicó la ejecución de ensayos que ayudaran a determinar tales cuestiones. Al comienzo de la obra se dispuso de mayor acceso a todas las esculturas mediante andamios colocados exprofeso y que tuvieron que ser anclados a la propia puerta, con una serie de criterios para no dañar la piedra. Tras la colocación del andamio se realizaron ensayos no destructivos que nos ofrecieron resultados concretos. Destacamos dos:

1. Detección de elementos metálicos, así como su profundidad probable y situación, mediante un detector de armaduras Mini R-Meter R-HR-8000.
2. Medición de la vulnerabilidad a la apertura de fisuras y grietas en cada grupo escultórico mediante un medidor de velocidad de propagación de ultrasonidos Pundit Lab+.

Mediante el primer ensayo se determina si existen elementos metálicos interiores a modo de barras, que unan las piezas de piedra. Se obtuvo para cada figura una primera aproximación que confirmaba la presencia de barras interiores metálicas, con grosores cercanos a los 2 cm de diámetro. La disposición de estas influiría en el cálculo completo de la estabilidad del conjunto, por lo que se incorporó

dentro una modelización en 3D de cada escultura, realizada a partir del modelo 3D de alta resolución de nube de puntos que se llevó a cabo antes de la intervención, para dejar constancia del estado inicial de toda el monumento.

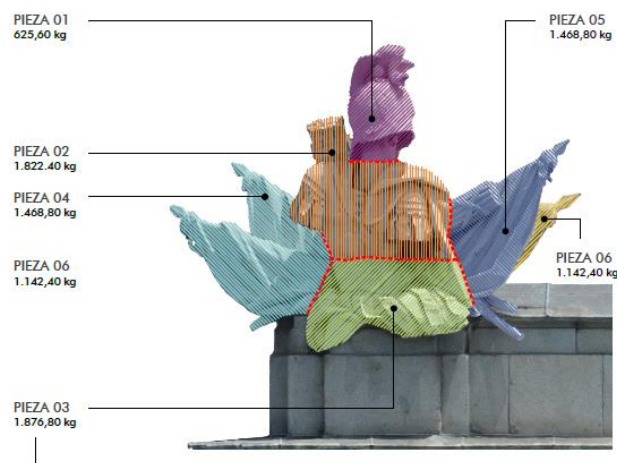


Figura 2. Ejemplo de análisis de las partes que forma un grupo escultórico. El caso mostrado es una panoplia o armero.

El segundo ensayo midió todas y cada una de las fisuras y grietas visibles existentes en las esculturas y estableció los índices de umbrales de normalidad propios de la piedra, es decir, cuándo la fisura está dentro de la normalidad de los valores y no es preocupante o cuándo está fuera y ha de ser considerada como preocupante. Este ensayo fue determinante a la hora de decidir cuáles de los elementos metálicos a modo de grapas exteriores estaba ejerciendo un trabajo correcto y cuáles no.

Si clasificamos las esculturas, se podrían hacer cuatro grandes grupos en función del número de piezas que las forman y como se unen entre sí.

1. Alegorías: en general constan de dos a tres piezas unidas con una media de dos barras interiores metálicas que se apoyan sobre la estructura de granito. No presentaban complejidad ni riesgo estructurales como conjunto, sino como elementos aislados concretos, normalmente en voladizo o de zonas de materiales deficientes de restauraciones anteriores a corregir.

2. Panoplias inferiores o armeros: poseen un cuerpo central (torso y casco) de varias piezas que se unen entre sí por barras interiores y en alguna ocasión con elementos externos que lo unían a cubierta. A ambos lados poseen otro tipo de piezas (banderas) que se unen al cuerpo central mediante piezas exteriores a modo de tirantes y grapas. Las barras interiores no siempre están unidas, evitando de este modo el posible traslado de movimientos perjudiciales entre las piezas.
3. Panoplias recostadas superiores: todas las piezas se disponen sobre un emparrillado metálico anclado a la cubierta inclinada sobre la que se asientan, así como a la pared del tímpano posterior. Las piezas más altas, torsos y cascos, están atadas por nuevas barras tanto al tímpano posterior como a la cubierta, en función de la altura a la que se disponen.
4. Conjunto de “La Fama”. Este grupo escultórico es diferente completamente al resto, y no sólo en tamaño y simbología. Se puede dividir el conjunto en dos partes: por un lado, el escudo central sobre el que se dispone la corona real, y junto a él se dispone la figura de La Fama con sus dos alas desplegadas y las túnica en movimiento debido al aire. El escudo y su entorno son piezas que se asientan sobre el muro de granito e interiormente son pisadas por piezas mayores (como pudimos ver en las catas arqueológicas realizadas en el interior de la bóveda anexa); en su parte superior poseen diversos tirantes metálicos anclados a las piezas de granito de cubierta. Sin embargo, el cuerpo de la figura femenina —con su despliegue de alas, mantos y la propia figura— es un complejo sistema de piezas que se apoyan tanto en el muro de granito como en puntos determinados de la cubierta; todo el sistema se ataba con un complejo sistema de tirantes de hierro.



Figura 3. Ejemplo de análisis mediante ultrasonidos. En azul se representan las grapas visibles existentes, en rojo las fisuras y en verde los puntos de medida.

Se tomaron los datos de cada uno de los elementos metálicos incluidos en las escultura y se estudió cómo intersecaban entre ellos en el interior de las piezas. Se trasladaron estos datos a un modelo 3D de cada escultura partiendo de los datos 3D del modelo de nube de puntos ya mencionado. Es importante conocer y colocar en el modelado los materiales existentes en aras de hacer un cálculo que nos dé un resultado lo más fiable posible de las piezas. Este proceso no es lineal, sino que depende del estado de las propias piezas metálicas. Allí donde estaba muy afectada fue necesario primeramente reforzarla y a partir de ahí seguir descarnando. Por ello la modelización de la figura para su cálculo fue un proceso igualmente intermitente, en el que se iban añadiendo y definiendo los sistemas estructurales y de equilibrio de cada pieza.

3. Andamios y cimbras. Análisis de anclajes y apoyos

“Las Jaulas” era el concepto utilizado para explicar la ejecución de un armazón de perfiles metálicos que permitieran apeaar, apuntalar, desmontar o, en definitiva, realizar las operaciones oportunas para poder llevar a cabo la restauración de las esculturas con la mayor seguridad posible.

Se desarrolló la propuesta de jaula para la intervención en los 7 grupos escultóricos de mayor tamaño y en peor estado (armeros, armeros recostados y grupo de la “La Fama”). Este sistema de jaulas debía dar una solución ágil y versátil adaptada a cada caso, permitiendo además avanzar con el trabajo de estabilización de cada elemento del grupo, llegando incluso a ser necesarias distintas posiciones en las diferentes fases de intervención. De forma simultánea se seguían recibiendo datos del estado de los grupos, de sus despieces y de la existencia de estructuras internas metálicas de unión entre piezas.

A partir de estos datos, la ingeniería de INCYE, Estabilizadores, Acodalamientos y Cimbras SA, encargada del suministro y montaje de andamios y cimbras, realizó un primer diseño, con sus sistemas de elementos metálicos y tensores, de las jaulas, configurando estas a cada caso concreto.

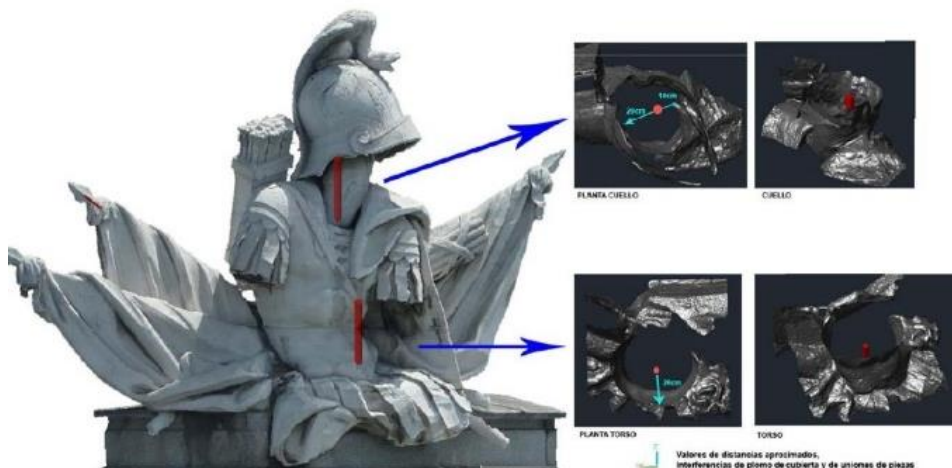


Figura 4. Elementos metálicos interiores que unen las diferentes piezas que conforman las esculturas.

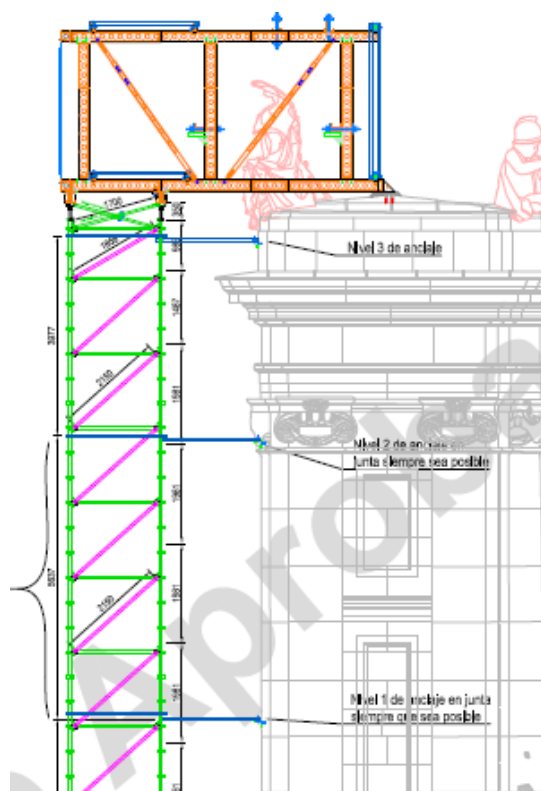


Figura 5: Ejemplo de cimbra de sustentación de panoplia y fotografía del andamio.

Una vez afinado este diseño y solucionados los requerimientos específicos de cada caso, la solución debía pasar por validación de la Asistencia Técnica estructural que desempeñó Mecanismo Ingeniería. Asimismo, Mecanismo se encargó de la evaluación y diseño de los anclajes de andamios y cimbras a la puerta. Para evaluar la resistencia de los anclajes se llevaron a cabo distintos ensayos que permitieran contrastar las hipótesis iniciales y cálculos realizados y de esta forma asegurar la solución

adoptada, tanto en la unión de andamios con los muros como los apoyos de cimbras en la cubierta. Estas pruebas permitieron ajustar y reducir el número de anclajes, lo que claramente reducía la afección a la piedra existente. En general, los anclajes en zonas que posteriormente quedaban vistas se realizaron en juntas entre sillares. Una vez aprobado el sistema, se procedió a la coordinación del montaje de cada jaula. El proceso del montaje de la jaula comienza en la implantación donde se conforman las cerchas, vigas o elementos más pequeños dependiendo de lo ajustado del espacio y zona en la que se realice el montaje. Las cimbras acaban apoyando en la propia puerta por lo que hubo que realizar comprobaciones tanto de los anclajes como de la repercusión de los apoyos sobre la bóvedas que dan forma a la techumbre.

3.1 Análisis de anclajes en la fábrica

Como se ha mencionado, para evaluar la resistencia de los anclajes en la fábrica se parte de los resultados de una campaña experimental de arrancamiento. Con el fin de afectar de forma mínima a la piedra se plantearon los anclajes en las juntas entre sillares. Se realizaron pruebas con diversas longitudes de taco y localizaciones (juntas entre sillares y en las fábricas que conforman las bóvedas). En base a los resultados analizados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. En general la dispersión en los resultados fue muy alta, con la excepción de los anclajes de 8,8 cm y 12 cm en ladrillo.
2. Los anclajes de menor longitud presentan unas dispersiones que no son admisibles. En el caso de 3,5 cm, si tenemos en cuenta los 4 resultados, el índice de variación (cov.) es de un 77%, lo cual no sería admisible. Para poder

determinar una resistencia de cálculo se eliminaron resultados fuera de rango.

- Entre los anclajes de 8,8 cm y 12 cm no se observa una diferencia grande de carga al variar la longitud, pero si en cuanto al material sobre el que anclan. Para los anclajes en fábrica se estima una resistencia de cálculo a tracción de 0,5 kN mientras que en granito se considera una resistencia de 0,2 kN. Los anclajes en granito quedan muy penalizados por la variabilidad en los resultados de los ensayos.

En base a los resultados para la propuesta de anclajes que se realiza no se tiene en cuenta la contribución en el anclaje de la parte de mortero superficial, la cual en los ensayos aparenta ser no despreciable (será del orden de 0,2 kN). Esta consideración se realiza al no poder verificar las condiciones de durabilidad el mortero existente y al considerarlo un elemento protector y no estructural. Por ello, se considera que la resistencia de los pernos a tracción es de 0,3 kN (0,5 kN – 0,2 kN) como límite, valor que se considera también para las comprobaciones a cortante.

3.2 Apoyos de andamios sobre bóvedas

En las calas realizadas para determinar la formación de cubierta, sobre la que apoyan las cimbras y andamios, se observó que bajo el acabado de cubierta de plomo existía una lámina de fibra de vidrio. Bajo esta aparecían dos roscas de fábrica, con un espesor de unos 14 cm cada una. Para formar las pendientes se rellena la parte superior de las rocas a base de arena y áridos graníticos. La lamina de fibra de vidrio, se ha eliminado en la reforma ya que impedía la transpiración de la fábrica y estaba acelerando su degradación.

Se ha realizado un análisis de la repercusión de la carga de cimbras sobre las bóvedas evaluando la línea de empujes y a partir de ellas las tensiones en la fábrica. El

caso más desfavorable es el de una de carga puntual de 20 kN en el centro, provocada por el apoyo de las jaulas sobre la bóveda. En este caso obtenemos unas tensiones máximas en servicio en la clave del orden de 1,3 MPa, las cuales se pueden considerar técnicamente admisibles tras observar el estado de conservación y configuración de la fábrica que conforma las bóvedas.



Figura 6: Cala realizada en cubierta para ver la configuración de la bóveda y apoyo de andamio ya finalizado.

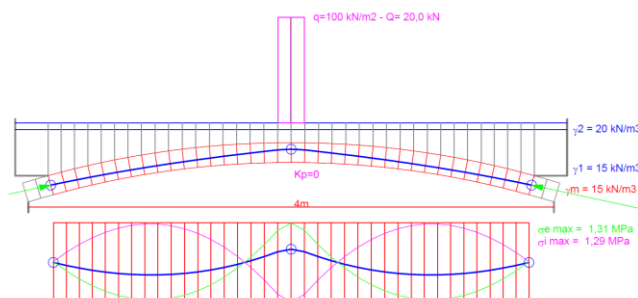


Figura 7: Análisis de línea de empujes y tensiones en la fábrica en los arcos que forman las cubiertas debidas a la carga por el apoyo de los andamios.

4. Análisis de estabilidad de las esculturas y actuaciones complementarias

A partir de los resultados de las nubes de puntos y datos de las inspecciones se realiza un análisis de estabilidad de cada escultura y de cada una de sus partes. Se planteó en un primer lugar un análisis detallado mediante elementos finitos,

pero nos encontramos con el problema de que los datos de entrada tenían una gran incertidumbre y los resultados no eran sencillos de interpretar, ni permitían una toma de decisiones rigurosa. Así pues, finalmente se optó por realizar un análisis probabilista de nivel 2. Este nivel el análisis está asociado a una representación simplificada de las distribuciones de probabilidad, ya que solamente se utilizan para definir las hasta los momentos de 2º orden e inferiores: valor medio, desviación típica y covarianza, con objeto de caracterizar la correlación entre las distintas variables. Así pues, en nuestro análisis utilizamos funciones de distribución normales y funciones de estado lineales. De esta forma se obtienen las probabilidades de fallo nominales. Se toma como base lo expuesto en el Anejo C del CTE DB SE [9-11]. En todo caso, se complementan las comprobaciones con cálculos deterministas para contrastar los resultados al vuelco y al deslizamiento de la esculturas y piezas que las forman.

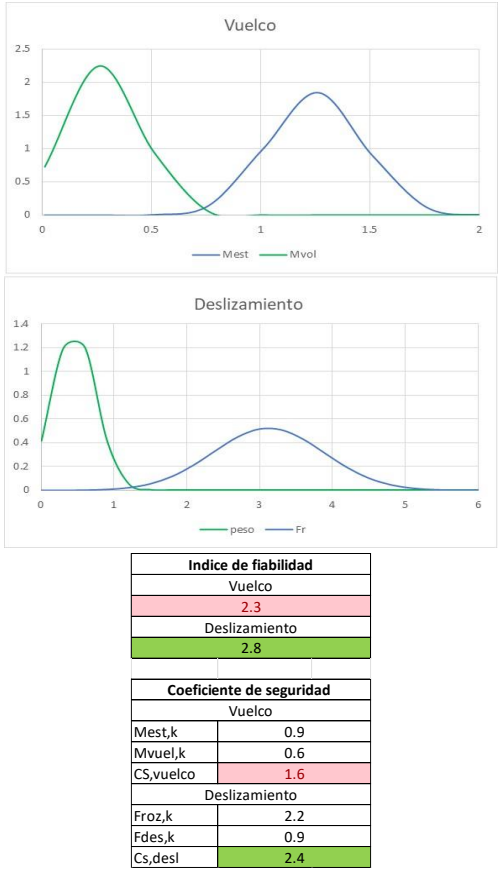


Figura 8: Ejemplo de resultados de cálculo probabilista a vuelco y deslizamiento de una pieza.

En la figura 8 se muestra el resultado de una de una de las comprobaciones de estabilidad realizadas. Se trata del análisis de la estabilidad de la pieza de cabeza de una de las panoplias. Dado el desconocimiento sobre el estado del pasador interior no se tiene en cuenta su estado de forma prudente. En base a los resultados de los análisis se plantean diferentes actuaciones para asegurar a largo plazo la estabilidad de las piezas que conforman las estatuas.

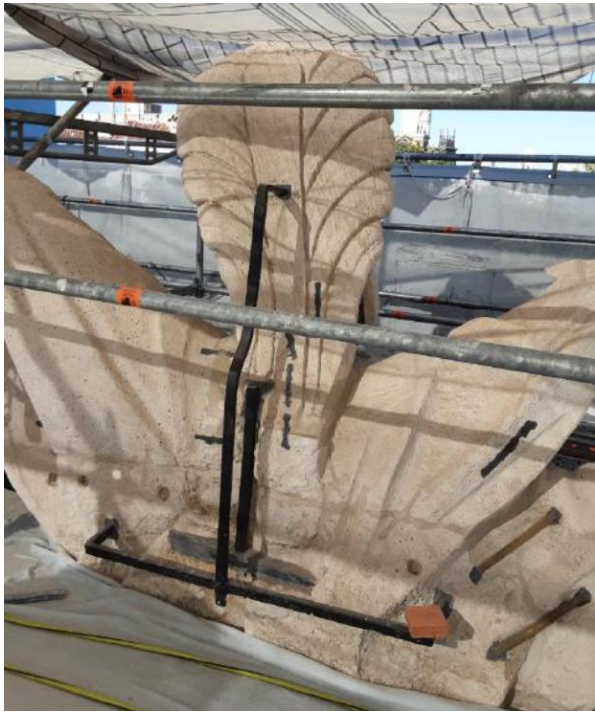


Figura 9: Ejemplo de grapas y elementos metálicos para cosido de piezas y su estabilización.

A modo de ejemplo tras el análisis realizado en la panoplia denominada GE11. Se consideró necesario la fijación de la pieza 01 (cabeza del armero) al resto del grupo escultórico y se procedió a la colocación de una estructura exterior en forma de “T” invertida (véase la figura 9). Esta estructura supone un refuerzo de la zona posterior y la fijación necesaria de las piezas para que trabajen como un conjunto monolítico. Junto con la colocación de la estructura exterior se procedió también a un estudio de los elementos metálicos existentes, tratando y conservando las grapas que se consideraron oportunas y eliminando aquellas que no eran necesarias. Dos grapas de hierro se

sustituyeron por dos nuevas grapas de latón, permitiendo asegurar la unión de todas las piezas y con ello, la estabilidad global del conjunto escultórico. Todas las nuevas conexiones entre piezas metálicas y piedra se realizan mediante técnicas de emplomado. Se adopta como valor de la adherencia la resistencia a tracción estimada para la piedra [12]. La técnica de emplomado se utilizó para todas las conexiones con carácter permanente entre piezas de acero y piedra, para refuerzo de las esculturas.

También, se analizan algunas fisuras existentes dentro de las piezas y se plantean las dimensiones de las nuevas grapas de latón, para unir los lados de la fisura, en función de las fuerzas de desequilibrio entre piezas, para minimizar el impacto visual de las mismas. En estas reparaciones se trabaja junto al equipo de restauradores, véase como ejemplo la Figura 10.



Figura 10: Ejemplo de reparación en el frontal de la panoplia recostada derecha. En la parte izquierda se muestra el frontal antes de la restauración y en la derecha la escultura con la nueva grapa y la reparación de la piedra realizada.

Finalmente, se plantean una serie de actuaciones estructurales para colocar una línea de vida, que sirva para el mantenimiento, y para fijar una serie de rastreles con el fin de realizar una nueva cubierta ventilada, y de esta forma evitar los problemas de conservación en la fábrica de las bóvedas derivados de actuaciones anteriores.

Para disponer la línea de vida se ejecutaron una serie de placas ancladas a la cubierta y sobre ellas se dispuso el elemento de fijación de la línea de vida, soldado a la misma, ya que la placa prevista en el sistema comercial utilizado no era suficiente para poder anclar en la fábrica existente. En cierta forma, el detalle que se propone es similar al indicado para las placas provisionales que se dispusieron para los apoyos de las jaulas de sustentación de los grupos escultóricos. Complementariamente se realiza un análisis de la repercusión de las cargas solicitantes sobre el monumento, determinando que no es necesario realizar refuerzo alguno. En cuanto a los anclajes de fijaciones de cubierta, en base a los ensayos realizados, se evaluó el número de tacos necesarios por m² de superficie según la inclinación y carga de la formación de la cubierta.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se describen las actuaciones de caracterización, análisis y refuerzo que, con carácter estructural, se han llevado a cabo en la rehabilitación de la Puerta de Alcalá, sita en Madrid. Toda la restauración del monumento se ha regido por los criterios generales de conservación del patrimonio cultural consensuados por los diferentes entes participantes en la obra. Se trata de una rehabilitación multidisciplinar, lo que implica un alto grado de colaboración entre los diferentes equipos, tales como arquitectos, restauradores, arqueólogos, artesanos e ingenieros.

Desde el punto de vista estructural el análisis de los apoyos de las cimbras sobre la estructura existente y el análisis de la estabilidad de las esculturas han sido los principales trabajos realizados. También durante la rehabilitación se han realizado otras actuaciones relacionadas con actuaciones estructurales como ha sido la disposición de la nueva línea de vida o fijación de las nuevas cubiertas ventiladas.

El trabajo muestra como la ingeniería estructural tiene cabida dentro de actuaciones patrimoniales y ayuda en la toma de decisiones a arquitectos, restauradores y arqueólogo, para poder definir de forma efectiva los refuerzos necesarios y asegurar la estabilidad de elementos arquitectónicos. La singularidad de la actuación llevada a cabo, fuera del ámbito común de la ingeniería estructural, ha supuesto un reto, dado el proceso de aprendizaje de técnicas constructivas pasadas y su combinación con la aplicación de metodologías de comprobación actuales, adaptando estas a las necesidades que imponía la rehabilitación y estándares de seguridad vigentes.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección Facultativa D^a. Natalia González Pericot, doctora Arquitecta y D. Álvaro Mesa Martín, Arquitecto, sus comentarios durante los trabajos de rehabilitación. Asimismo, agradecemos a la empresa Fernández Molina Obras Y Servicios S.A. contrata principal de la obra de rehabilitación, su apoyo.

Referencias

- [1]AVM. SEC-2-963-1 (1773-1779). Órdenes de S.M. Presidente, y Gobernador del Consejo, sobre los caudales destinados a la construcción de la nueva Puerta de Alcalá.
- [2] Fort R, Varas-Muriel, M. J., Alvarez de Buergo M, Perez-Monserrat EM (2015) Colmenar Limestone, Madrid, Spain: considerations for its nomination as a Global Heritage Stone Resource due to its long term durability. Geological Society, London, Special Publications 407: 121-135.
- [3] Gómez-Heras, M., Fort González, R., (2004). Location of quarries of non-traditional stony materials in the architecture of Madrid: The Crypt of the Cathedral of Santa María la Real de la Almudena. *Materiales de Construcción* 54 (274): 33-49.
- [4] Historic England (2016). *Sourcing Stone for Historic Building Repair*. Edition published by Historic England August 2016. First published by English Heritage March 2006.
- [5] Martínez Otero, S. (2022). El plomo como fijador de metales en la construcción. *Journal of Traditional Building, Architecture and Urbanism* , 3, 253-260.
- [6] Pérez-Monserrat E., Alvarez De Buergo M., Gomez-Heras, M., Varas Muriel, M.J., Fort Gonzalez, R. (2013). An urban geomonumental route focusing on the petrological and decay features of traditional building stones used in Madrid, Spain. *Environmental Earth Sciences*, 69, 1071–1084.
- [7] Tárraga Baldó, M.^a L. (1989). “Esculturas y escultores de la Puerta de Alcalá” En: *El arte en tiempo de Carlos III. IV Jornadas de Arte*. Madrid, 29-30 noviembre, 1-2 diciembre 1988. Madrid: Alpuerto, pp. 267-276.
- [8] La Voz (1929): «Se derrumba un trozo de la Puerta de Alcalá», 31 de mayo, p. 3.
- [9] CTE. (2009). *Código Técnico de la Edificación*. Ministerio de la Vivienda.
- [10] JCSS (2002), *Probabilistic Model Code*. Joint Committee on Structural Safety (JCSS).
- [11] Celorio Barragué L. (2011). Métodos probabilistas de seguridad estructural en el Código Técnico de la Edificación. *XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Huesca*, 6-8 de julio de 2011. Pag 545-554.
- [12] Zaragoza Catalán, A. Marín Sanchez R. (2017). El uso del hierro y del plomo en la arquitectura medieval valenciana. *Actas del Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción: Donostia-San Sebastián, 1759-1770*.