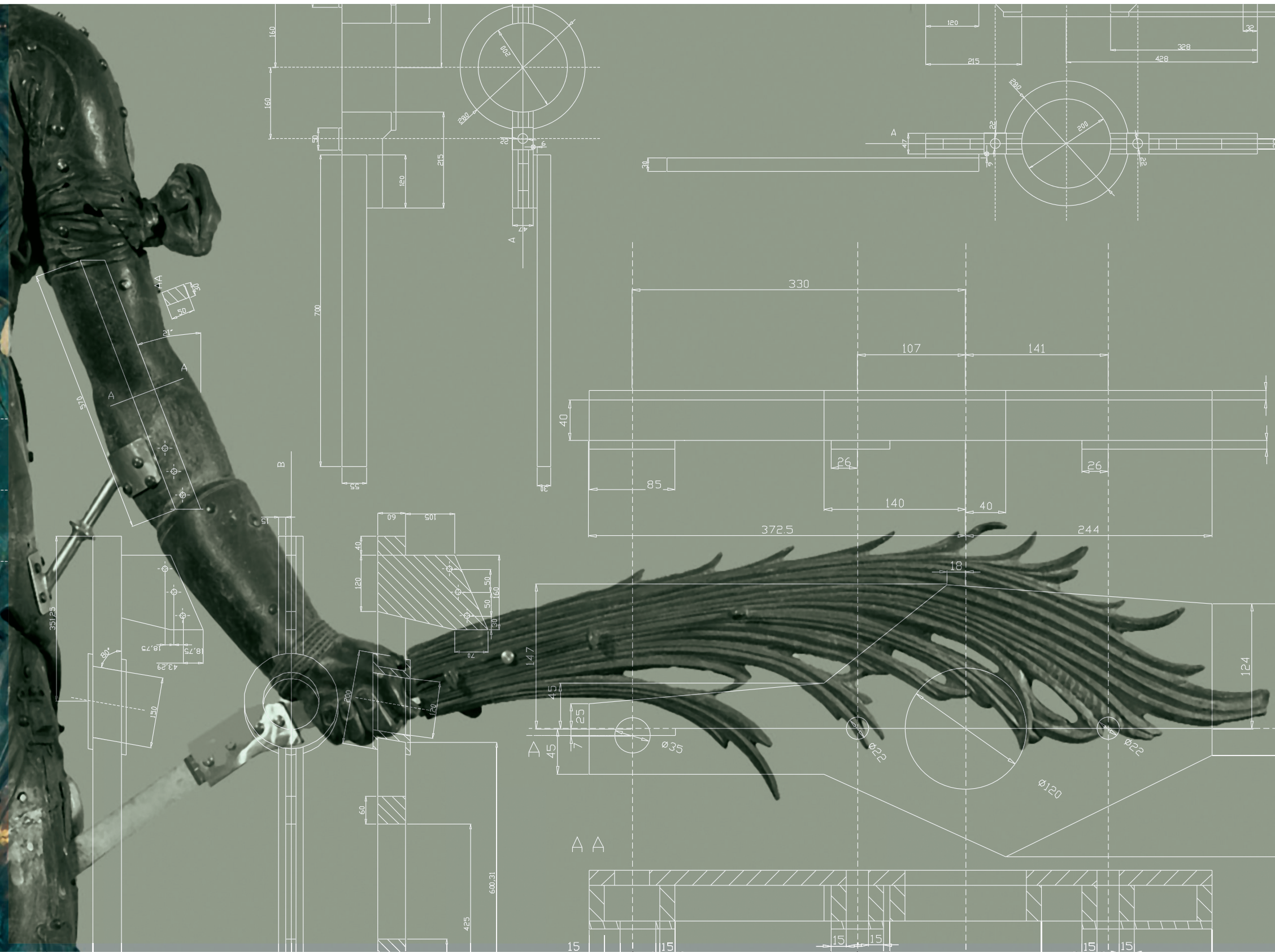


7

Intervención mecánica



Intervención mecánica

En este capítulo se describe el proceso de restauración del Giralddillo desde un punto de vista estructural, iniciado tras el minucioso estudio al que previamente fue sometido desde diferentes puntos de vista, según se ha descrito en los capítulos precedentes.

En el capítulo 5 se analizó numéricamente el comportamiento mecánico de la Veleta, en su estado al inicio del proceso de restauración, ante las distintas acciones mecánicas que ha de soportar. Dicho análisis concluyó que el Giralddillo necesitaba ser sometido a una profunda restauración desde el punto de vista de su resistencia estructural, que permitiese su reposición sobre la Giralda con plenas garantías de seguridad y conservación.

El primer paso de este proceso consistió en desmontar la estructura interna del Giralddillo y su sistema de refuerzos, con vistas a analizar con mayor profundidad su estado de conservación y poder sustituir los elementos que se considerase oportuno por otros nuevos con un diseño adecuado.

En el presente capítulo se describirá en primer lugar este proceso de desmontaje, para afrontar posteriormente el diseño, cálculo, construcción y montaje de la nueva estructura.

7.1 Desmontaje de la estructura de 1770

A pesar de que los diseñadores de la estructura interna del Giralddillo de 1770 concibieron ésta como un conjunto desmontable, según se recoge en el documento coetáneo que describe aquella restauración, su desmontaje fue un proceso muy laborioso. Al deficiente estado de conservación en que se encontraban las uniones entre las distintas piezas, se añadía la atención y cuidado necesarios para que en las distintas operaciones y manipulaciones mecánicas que se debían realizar, la figura no se viese en ningún caso dañada.

Por otro lado, hay que reseñar que en intervenciones posteriores a la de 1770 se habían sustituido apósitos atornillados, y por tanto fácilmente desmontables, por soldaduras con gran aporte de material. El hecho de que trozos de la escultura del Giralddillo se encontrasen soldados no solo dificultaba su desmontaje, sino que obligaba a identificar cómo y en qué lugares habían de separarse estos trozos, que aparentemente eran solidarios y parte de un sistema continuo.

La descripción del proceso de desmontaje se dividirá en tres partes: desmontaje de los apósitos o refuerzos externos, extracción de las duelas o flejes de refuerzo internos y desmontaje de la estructura de barras.

7.1.1 Desmontaje de apósitos externos

Se retiraron todos los apósitos externos que tapaban grietas, agujeros e imperfecciones en la lámina de bronce, que se pudieron por fin estudiar en su verdadera magnitud. De esta manera se comprobó que el modelado de estas zonas para el análisis numérico del comportamiento del Giralddillo (capítulo 5) estaba muy del lado de la seguridad, ya que la mayoría de apósitos tapaban en realidad zonas que estaban en gran parte sanas, mientras que en el modelo se habían considerado como si no hubiera ningún material debajo de los apósitos, los cuales constituirían por tanto el único elemento resistente en estas zonas. Además, el espesor considerado para estos elementos en el modelo era menor que el que tenían realmente, lo cual era otro factor que jugaba a favor de la seguridad del Giralddillo.

A modo de resumen, se muestran algunas imágenes que ilustran este proceso, sobre todo aquellas zonas que resultaron estar más dañadas y que serían después objeto de un completo diseño para su refuerzo interno.

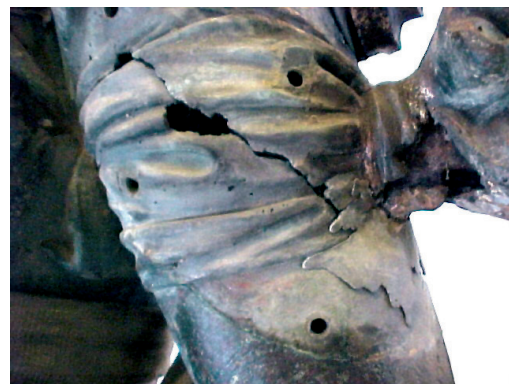
José Domínguez Abascal

Mario Solís Muñiz

Escuela Técnica Superior de Ingenieros

Universidad de Sevilla

Figura 7.1. El desmontaje de apósitos permitió apreciar con claridad el estado de conservación de la lámina de bronce en esas zonas



7.1.2 Desmontaje de duelas de refuerzo interno

El siguiente paso en el desmontaje de la estructura interna del Giraldillo fue la extracción de las duelas de hierro que reforzaban interiormente la escultura. Al extraerlas se pudo comprobar el alto grado de corrosión que presentaban la mayoría de ellas, lo que justificaba una vez más la necesidad de construir los nuevos refuerzos con distinto material.

Para extraer estos elementos fue necesario cortar los roblones que no habían desaparecido por efecto de la corrosión y que los unían a la lámina de bronce. Una vez liberados se sacaron del interior del Giraldillo a través del agujero del pecho o de la portezuela de la cadera derecha.

El estudio de estas piezas de forma aislada, es decir, sin estar en contacto con el Giraldillo, sirvió para valorar su complejidad geométrica y apreciar el buen trabajo realizado en su complicado proceso de fabricación. Con esta dificultad habría que enfrentarse de nuevo a la hora de fabricar el nuevo sistema de refuerzo.



7.1.3 Desmontaje de la estructura de barras

Como ya se ha comentado anteriormente, la estructura colocada en 1770 pretendía ser desmontable, según la documentación coetánea relativa a su construcción. Efectivamente, la mayoría de elementos se encontraban roscados y unidos entre sí mediante tuercas, pero el efecto de la corrosión a lo largo del tiempo había hecho que éstas quedasen bloqueadas e inservibles. En cualquier caso, el corte de los extremos roscados resultaba relativamente sencillo y permitiría la separación entre los distintos elementos de la estructura en la forma en que previeron sus constructores. Las piezas cortadas, una vez desmontada al completo la estructura interna, serían soldadas de nuevo para que la estructura interna de 1770 pudiera ser contemplada en su conjunto.

El primer paso antes de proceder al desmontaje de la estructura propiamente dicho fue quitar las piezas que servían de unión entre las barras de la estructura y la escultura, que funcionaban a modo de casquillos y cuñas. De esta forma se pudo comprobar que estas uniones no eran rígidas en ningún caso, lo cual estaba de acuerdo con las hipótesis realizadas en el modelo de cálculo realizado.

Una vez desprovistas las barras de sus piezas de apoyo sobre la escultura, se pudo proceder al corte de las partes superiores roscadas de los elementos longitudinales internos o tirantes, así como su desvinculación de las barras transversales intermedia e inferior. Lo mismo se hizo con el mástil del lábaro, de tal forma que quedaban desvinculadas dichas piezas transversales y los elementos longitudinales de la estructura.



Figura 7.2. Desmontaje de refuerzos internos de hierro,

Figura 7.3. Conjunto de refuerzos internos de hierro una vez desmontados. Se puede apreciar su compleja geometría y alto grado de corrosión en algunas zonas.

Figura 7.4. Desmontaje de casquillos y cuñas de acoplamiento entre las barras de la estructura interna y la escultura.

(Autor: José Manuel Santos)

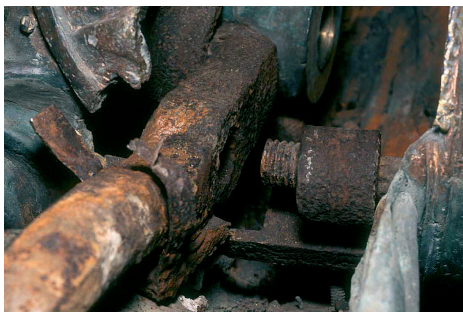


Figura 7.5. Corte de tirante derecho en su parte superior y desvinculación de elementos transversales

Figura 7.6. Reapertura del hueco del pecho eliminando el material de aporte de las soldaduras realizadas en intervenciones anteriores, que se aprecian claramente en las imágenes

(Autor: José Manuel Santos)

Una de las decisiones más importantes que se debieron tomar durante el proceso de desmontaje de la estructura fue la necesidad de reabrir el hueco que se le practicó en 1770 en la parte derecha del pecho y que se prolongaba a lo largo de la parte que representa un trozo de tela y que envuelve a la parte derecha de la cruceta superior. No cabía duda de que esto debía ser así, ya que era físicamente imposible el montaje o desmontaje de la parte superior de la estructura sin reabrir este hueco.

Para ello, se cortó manualmente con una sierra por los cordones de soldadura de latón aportados en las últimas intervenciones de los años ochenta y noventa. De esta forma se reabrió el hueco sin dañar en ningún momento el bronce original de la escultura.

A través de este hueco se pudo observar claramente la curiosa forma del elemento transversal superior de la estructura interna, compuesto por cuatro barras en forma de caballete que se unen en la zona central, dejando un hueco donde se alojaba el cojinete de bronce que se apoya sobre la punta del eje del Giraldillo.

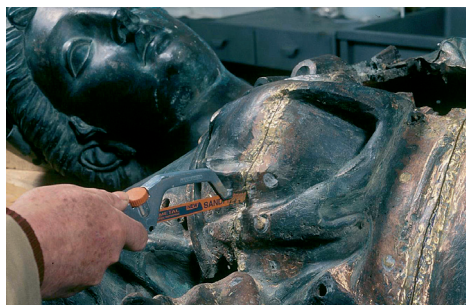
El desmontaje de la estructura interna de 1770 permitió examinar en detalle sus características y su verdadero estado de conservación. Además del diseño inadecuado de algunos elementos, que ya se comentó en el capítulo 5 y sobre el que se volverá más adelante, se pudo comprobar el elevado nivel de oxidación alcanzado

en todo el conjunto. Si bien es cierto que la corrosión no había llegado a un estado crítico en la mayor parte de la estructura, sin embargo había zonas en las que su efecto había sido espectacular, hasta el extremo de elementos que habían desaparecido por completo, como es el caso del tramo inferior del tirante izquierdo, tal y como se puede observar en la imagen correspondiente al conjunto de la estructura de 1770.

También se pudo apreciar la complejidad de la geometría y magnífica ejecución de la misma, no sólo por la forma de cada elemento por separado (con quiebras en su trayectoria, cambios de sección, forma de las uniones, etc.), sino también por la disposición del conjunto: hay una ausencia absoluta de paralelismo u ortogonalidad en las trayectorias de los elementos, que están condicionadas como es lógico por la forma de la escultura.

7.2 Diseño y cálculo de la nueva estructura interna y sistema de refuerzo

El diseño de la nueva estructura y sistema de refuerzo interno se realizó en principio a partir de las conclusiones y directrices recogidas en el capítulo 5. Sin embargo, el desmontaje de apóstitos externos, refuerzos internos y estructura interna de 1770 permitió conocer con mayor detalle el estado de conservación del Giraldillo



al completo, y por tanto realizar un diseño más detallado y un análisis más preciso.

Este análisis se realizaría por medio del modelo de cálculo presentado en el capítulo 5, realizando las modificaciones oportunas de acuerdo con el diseño previo de estructura y refuerzos internos, y serviría para validar dicho diseño, según el cual se construirían posteriormente las nuevas piezas.

7.2.1 Modificaciones respecto al diseño de 1770

Materiales

Como ya se apuntó en el capítulo 5, la elección de los materiales a emplear para los refuerzos internos de la escultura y para la estructura interna era sumamente importante de cara a evitar en la medida de lo posible los efectos de las dos acciones más perjudiciales para el Giraldillo a lo largo de su historia: la corrosión y las dilataciones diferenciales entre los distintos materiales.

Los estudios realizados por el Grupo de Metalurgia de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla llevaron a la conclusión de que lo más apropiado sería construir los refuerzos internos mediante piezas fundidas en bronce, mientras que la estructura debería ser de acero inoxidable. Estos nuevos refuerzos se consideraron en el modelo con las mismas propiedades mecánicas que las que se presentaron en el capítulo 5 para el bronce de la escultura. Esto está muy del lado de la seguridad ya que los ensayos realizados sobre muestras del bronce de las nuevas piezas indicaban que su resistencia podía ser de hasta 5 veces la del bronce de la escultura.

El acero inoxidable empleado en la construcción de la estructura es un acero inoxidable AISI 316L, con las siguientes propiedades mecánicas:



Figura 7.7. Extracción del cojinete de bronce

Figura 7.8. Detalle del alojamiento del cojinete en el travesaño superior.
(Autor: José Manuel Santos)

Módulo de Elasticidad	(GPa)	193
Módulo de Poisson		0,3
Módulo de cizalladura	(GPa)	74,2
Límite elástico	(MPa)	175
Límite de rotura	(MPa)	470
Densidad	(kg/m³)	7.870
Coef. de dilatación térmica	(°C ⁻¹)	16 · 10 ⁻⁶

Estos materiales son perfectamente compatibles con el bronce de la escultura en cuanto a la corrosión, pero lo más importante desde el punto vista estructural es que los coeficientes de dilatación de estos tres materiales son muy parecidos. Esto hace que prácticamente desaparezcan los efectos dañinos provocados por las acciones térmicas.

Uniones estructura-escultura

El análisis del modelo de cálculo anterior concluía que los puntos donde se producían mayores niveles de tensión en el bronce eran las uniones entre la estructura interna y la escultura, por lo que para estas zonas se deberían construir una serie de piezas que asegurasen una correcta transmisión de esfuerzos que evitara la aparición de elevados niveles de tensiones mecánicas.



Figura 7.9. Extracción del travesaño superior

Figura 7.10. Estructura interna de 1770 tras ser desmontada

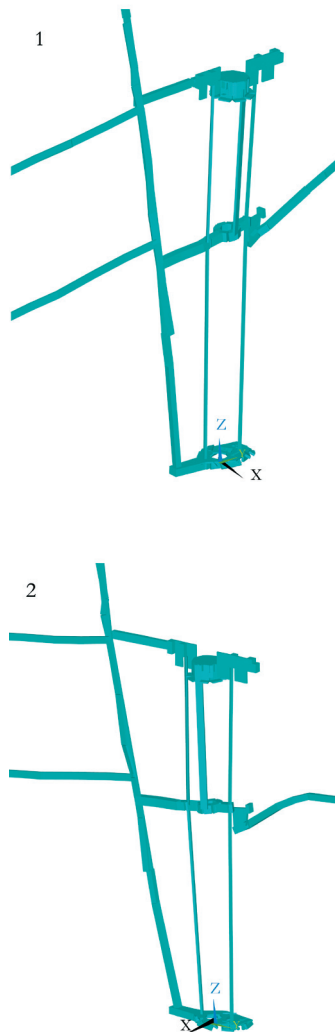


Figura 7.11. Diseño de la nueva estructura

Barra de la palma

La barra de la palma se desvincularía de la mano izquierda del Giraldillo, de forma que su brazo izquierdo quedase liberado de esta carga. Además, se modificaría la forma de unión de dicha barra al resto de la escultura. Si antes se realizaba a través de una triangulación con el tirante izquierdo de la estructura, ahora se pasaría a unir directamente a la barra transversal intermedia, de forma que ésta recibiese todo el peso de la palma y se eliminase la flexión provocada sobre dicho tirante. De todo esto se deduce que tanto la barra de la palma como la barra transversal intermedia de la estructura debían ser lo suficientemente resistentes para soportar esta carga.

Desvinculación de la mano derecha

La mano derecha se desvincularía del mástil del lábaro, de forma que éste no le pudiera transmitir esfuerzos debidos a la presión del viento incidiendo sobre el lábaro o fuerzas de inercia en caso de vibración frontal. De esta forma se conseguiría descargar el brazo derecho, que se encontraba en mal estado de conservación.

Travesaño inferior

La forma del travesaño inferior se modificaría con respecto a la de 1770 con el objetivo de que la transmisión de esfuerzos entre los pies de la escultura y dicho elemento de la estructura resultara más eficiente.

Travesaño intermedio y superior

Las secciones originalmente macizas de los elementos transversales superiores se modificarían por otras que ofreciesen la rigidez adecuada y permitiesen una correcta unión con los elementos longitudinales o tirantes, así como la unión entre la barra de la palma y el travesaño intermedio.

En el travesaño superior, el alojamiento del cojinete se diseñó en forma de tambor cilíndrico, al cual se unirían rigidamente las

barras que van hacia el hombro izquierdo por un lado y hacia el nudo de tela y unión del mástil del lábaro por el lado derecho.

Del análisis de la situación anterior se concluyó que los apoyos que originalmente tenía la estructura de 1770 en el pecho y la espalda tenían efectos negativos para la escultura, por efecto fundamentalmente de la temperatura, por lo que se decidió prescindir de estos apoyos. Sin embargo, para conferir un cierto carácter tridimensional a la estructura que aportase rigidez ante movimientos o vibraciones frontales, así como ante la torsión de las crucetas debida a una posible excentricidad de las cargas verticales transmitidas por la escultura y el lábaro, se añadiría un elemento que uniese la parte frontal del tambor de alojamiento del cojinete con la parte frontal del aro central del travesaño intermedio. Es decir, se trataría de un elemento paralelo al eje de giro y contenido en el plano perpendicular a la estructura.

Tirantes

Las uniones de los elementos longitudinales de la estructura interna con los elementos transversales se diseñaron como uniones articuladas, ya que es deseable que estos elementos no estén sometidos a flexión, cosa que no ocurría en la estructura anterior.

Mástil y refuerzos del lábaro

El mástil y refuerzos del lábaro no sufrirían modificaciones en su diseño salvo el cambio del material y la reducción del número de rigidizadores del lábaro por la eliminación de los refuerzos colocados en la intervención de los años ochenta, con lo que el lábaro volvería a tener tan solo dos rigidizadores horizontales.

Refuerzos internos

Los refuerzos internos de hierro contruidos en 1770 debían ser sustituidos por otros similares pero contruidos en bronce fundido, similar al bronce de la escultura, y con una sección algo mayor. También se añadiría algún refuerzo adicional con el objeto

de sustituir los apósitos externos, mejorando la imagen de la escultura y aportando un mayor nivel de refuerzo.

Se consideró la posibilidad de colocar unos refuerzos internos adicionales en forma de aro que abrazasen interiormente a la escultura y uniesen entre sí los refuerzos longitudinales, pero finalmente se descartó esta idea porque de esta forma se crearía un sistema de refuerzo interno excesivamente rígido e innecesario, ya que la mayoría de grietas y fisuras que presenta la escultura están en sentido transversal, por lo que se pueden reforzar bien con refuerzos longitudinales.

En el caso del brazo derecho, debido a su mal estado de conservación, se decidió sustituir los refuerzos anteriores en forma de duela por un refuerzo tubular que se uniese en vario puntos a la escultura y en su extremo inferior se uniese a otros refuerzos internos longitudinales. De esta forma, los esfuerzos que hubiera de soportar el brazo se transmitirían a zonas más rígidas y sanas de la escultura, quedando liberado prácticamente de cualquier esfuerzo mecánico.

Para la zona del hombro izquierdo, que se encontraba seriamente agrietada, se diseñó un complejo sistema de refuerzo interno. Hay que tener en cuenta que esta zona de la escultura, aunque no tuviera que soportar el peso de la palma gracias al nuevo diseño de la estructura interna, debía de seguir soportando sin embargo el peso del brazo izquierdo relleno de plomo. Para la transmisión de estos esfuerzos se diseñó un refuerzo unido al hombro en su parte superior y al brazo izquierdo por debajo de las grietas del brazo (justo por encima del relleno de plomo). Este refuerzo se ramificaría además en otros dos: uno iría hacia el pecho y otro hacia la espalda. Además, se colocaría un pequeño refuerzo adicional en la parte trasera del brazo, cosiendo la misma grieta que el anterior. Con este sistema se conseguiría que la zona agrietada del hombro izquierdo quedase liberada de tensiones mecánicas fundamentalmente debidas al peso del brazo izquierdo.

El sistema de refuerzos interno se completaría con una serie de elementos laminares, contruidos en el mismo material que el resto, que servirían para sustituir apósitos y refuerzos externos anteriores. Este sería el caso por ejemplo de la zona del costado izquierdo comprendida entre el acodamiento del brazo y la barra de la palma. Esta zona se encontraba anteriormente oculta tras un gran apósito, que escondía la importante falta de material que había en esa zona.

Cabe reseñar que el nuevo sistema de refuerzo, aunque más completo y robusto que el anterior, se diseñó de tal forma que su unión a la escultura de bronce se realizaría aprovechando los agujeros que ésta presentaba, de forma que no hubiera que practicar ningún nuevo taladro a la escultura.

7.2.2 Análisis del comportamiento mecánico del nuevo diseño estructural

Partiendo del modelo para el análisis numérico del comportamiento mecánico del Giraldillo en su estado al inicio del proyecto de restauración, presentado en el capítulo 5, se realizaron las modificaciones oportunas para analizar como sería su respuesta mecánica con una nueva estructura y refuerzos internos contruidos según el diseño antes detallado.

Además de recoger el nuevo diseño se realizaron algunas modificaciones sobre el modelo con el objeto de poder obtener información más precisa en algunas zonas, como eran por ejemplo las uniones entre estructura y escultura, que resultaban ser además las zonas más delicadas desde un punto de vista mecánico. El modelo de cálculo con la estructura de 1770, aunque del lado de la seguridad, era algo impreciso para la correcta evaluación de los niveles tensionales en estas zonas. Esta imprecisión se corrigió de forma que se pudieran analizar de una forma más precisa y clara los niveles de tensiones mecánicas que se alcanzarían en esas zonas, distinguiendo entre las barras, los nuevos casquillos de unión y el bronce de la escultura.



Figura 7.12. Esquema del diseño del nuevo sistema de refuerzo interno (vista delantera y trasera)

También se mejoró la consideración en el modelo de los distintos agujeros y grietas que antes quedaban ocultos tras los apósitos y que ahora se podían observar con claridad.

Así, con el nuevo modelo de cálculo generado, se analizó el comportamiento mecánico del Giraldillo con el nuevo diseño de estructura y refuerzos internos, estudiando su respuesta ante las mismas acciones mecánicas y posibles combinaciones de éstas que se consideraron en el capítulo 5.

Se comprobó que la respuesta cualitativa del conjunto ante las distintas acciones mecánicas era bastante parecida a la obtenida con el modelo anterior. Incluso la distribución de masas del Giraldillo resultó prácticamente idéntica, ya que la nueva estructura y refuerzos internos presentan una masa y una distribución muy parecida a la anterior, lo cual se corroboró siguiendo la misma metodología que en el capítulo 5. Además, la distribución de masas viene condicionada fundamentalmente por la escultura, lábaro, palma y relleno de plomo del brazo izquierdo, que son elementos que no han sufrido modificaciones.

Sin embargo, comparando cuantitativamente los resultados obtenidos con ambos modelos, se comprobó que los niveles de esfuerzos mecánicos y tensiones se redujeron considerablemente por varias razones: mejor distribución de esfuerzos debido a la desvinculación de ambas manos con respecto a la estructura de barras y a un mejor diseño en el sistema de refuerzos, mejor compatibilidad térmica entre los nuevos materiales, y la disposición de un modelo de cálculo más realista y menos conservativo en zonas críticas.

En el caso de las acciones térmicas, hay que destacar que si bien antes las acciones de calentamiento o enfriamiento uniforme eran más desfavorables que la acción denominada como soleamiento, con el nuevo modelo ocurría lo contrario. Es decir, más que un calentamiento extremo en un día de verano o un enfriamiento extremo en un día de invierno, resulta más perjudicial una situa-

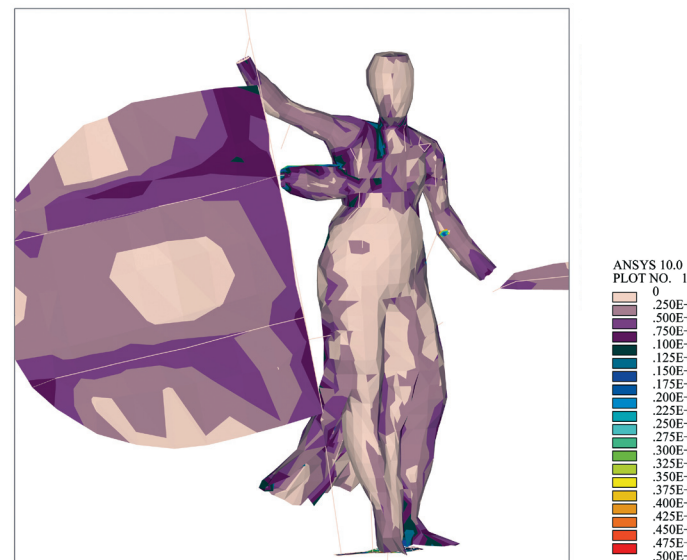
ción en la que una parte de la figura esté a una temperatura baja (temperatura ambiente de un día de invierno) y otra parte esté a temperatura elevada debido a una intensa radiación solar.

Esto es debido a que la estructura de acero inoxidable presenta un coeficiente de dilatación térmica muy similar al del bronce de la escultura. Esto hace que apenas aparezcan tensiones mecánicas producidas por restricciones a la libre deformación de ambos materiales cuando son sometidos a variaciones de temperatura uniformes. En el caso de soleamiento, se produce una distribución de temperatura no uniforme, que sí produce tensiones mecánicas por los gradientes térmicos que tienen lugar. Con el nuevo modelo, las tensiones del caso de soleamiento, aún siendo mayores que en los casos de variación de temperatura uniformes, son menores que las tensiones que se producían con el modelo anterior para la misma distribución de temperaturas. Esto quiere decir que el efecto de las acciones térmicas, que era uno de los más preocupantes según el análisis del modelo anterior, se había reducido de manera muy significativa. En términos generales se puede decir que las tensiones de origen térmico en la nueva situación son unas 5 veces menores que las que se producían anteriormente.

A modo de resumen, a continuación se presentan los resultados obtenidos con las hipótesis de carga más desfavorables, con el objeto de indicar los valores de tensión más significativos y comparar con la situación anterior.

Peso propio, acciones térmicas y viento

Con el modelo anterior, este tipo de hipótesis de carga era la más desfavorable en líneas generales para la escultura. Con el cambio de material de la estructura de barras y refuerzos internos, las concentraciones de tensión prácticamente desaparecen. Si en la situación anterior los máximos niveles de tensión que aparecían en puntos críticos llegaban a los 23 MPa, ahora el valor máximo pasaba a ser de 16 MPa. Esta reducción es aún más significativa



en la mayor parte de la escultura, la cual se encuentra en general con niveles de tensión muy bajos.

En cuanto a la estructura interna, la distribución de esfuerzos es más uniforme que en el caso de la estructura antigua. Toda la estructura presenta ahora valores relativamente bajos de tensión, estando por debajo de 40 MPa (frente a los 175 del límite elástico del material). El travesaño intermedio y la barra de la palma son los únicos elementos que aparecen más cargados que anteriormente, debido a que ahora reciben todo el peso de la palma por un lado y se equilibran soportando parte del peso del lábaro por el otro. Estos elementos soportan en cualquier caso tensiones máximas del orden de 100 MPa, aunque puntualmente se obtengan valores mayores (también por debajo del límite elástico) debido a efectos numéricos locales propios del modelo de cálculo.

También aparecen mayores tensiones en los rigidizadores del lábaro, que ahora son dos en lugar de cuatro, pero se comprueba que están también por debajo de su límite elástico.

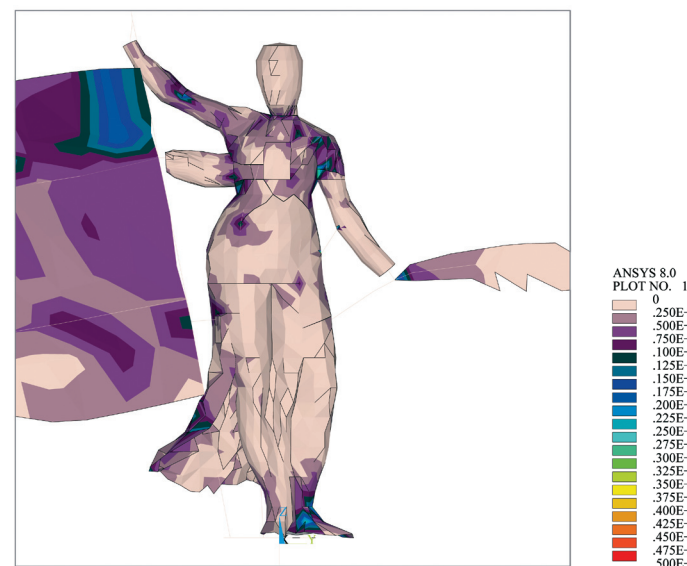


Figura 7.13. Mapa de tensiones en la estructura interna bajo la acción del peso propio, acciones térmicas y viento

Figura 7.14. Mapa de tensiones en la escultura bajo la acción del peso propio, acciones térmicas y viento

Figura 7.15. Mapa de tensiones en la escultura bajo la acción del peso propio, sismo, acciones térmicas y viento

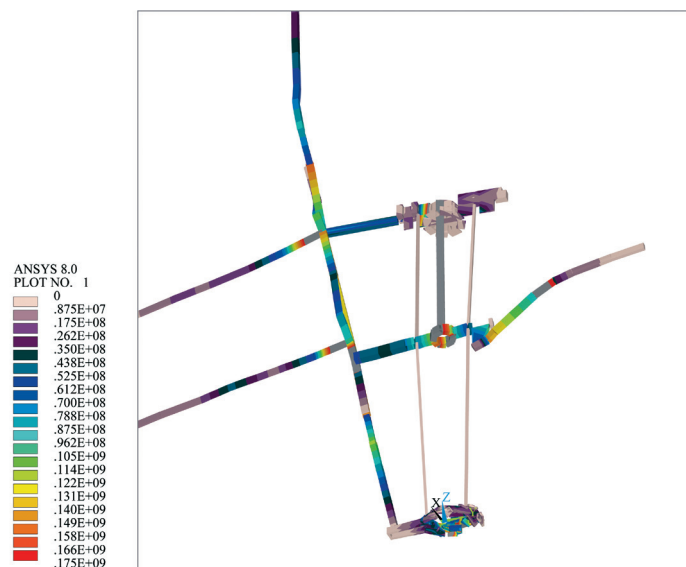


Figura 7.16. Mapa de tensiones en la escultura bajo la acción del peso propio, sismo, acciones térmicas y viento

Peso propio, sismo, acciones térmicas y viento

En esta hipótesis de carga, eran las uniones entre la escultura y su estructura interna a la altura de los muslos donde se alcanzaban unos niveles de tensión más preocupantes en caso de considerar una excitación sísmica en sentido lateral. Con las modificaciones realizadas sobre el modelo y el nuevo diseño estructural estos niveles de tensión pasaron de 170 MPa a 30 MPa, lo cual es un valor más que aceptable, que garantiza que ni siquiera se producirá una plastificación localizada en estas zonas en caso de producirse una sollicitación de este tipo. En el resto de uniones se tienen tensiones aún menores, y en general la escultura se encuentra con tensiones por debajo de los 8 MPa.

En cuanto a la estructura interna, son de destacar los grandes esfuerzos a los que se ve sometida la unión tridimensional entre los travesaños superior e intermedio. Esta pletina de unión aporta rigidez a la estructura ante oscilaciones frontales producidas por el viento o un sismo, lo cual favorece el mejor reparto de esfuerzos en la estructura con respecto a la situación considera-

da con el modelo anterior. En la hipótesis de carga considerada, este elemento soporta esfuerzos que seguramente producirían su plastificación o incluso su rotura. Esto sin embargo no ha de resultar alarmante por dos motivos. Por un lado, esta pieza no es relevante de cara a mantener la estabilidad del conjunto, es decir, el Giraldillo se mantendría en buen estado de funcionamiento incluso sin esta pieza. Por otro lado, ante una acción sísmica del tipo considerado, este elemento puede aportar una ductilidad adicional a la estructura y suponer un eficaz mecanismo de disipación de energía durante un posible terremoto, lo cual puede resultar muy positivo. Hay que tener en cuenta además que, tras un terremoto del tipo que se considera en los cálculos, parece razonable pensar que no pasaría un periodo de tiempo excesivamente largo hasta que el Giraldillo fuese sometido al menos a un proceso de inspección para valorar los posibles daños causados.

En el resto de la estructura los valores se encuentran por debajo del límite elástico del material, en torno a 50 MPa como máximo. Tan sólo se dan mayores valores que pudieran incluso suponer una plastificación localizada del material en la unión de la barra de la palma al travesaño intermedio y los extremos de los rigidizadores del lábaro. Hay que tener en cuenta que estas plastificaciones podrían ser incluso beneficiosas en el sentido de que constituyen un medio de disipación de energía, al igual que en el caso anteriormente mencionado.

7.2.3 Conclusiones sobre el diseño de la nueva estructura y refuerzos internos

La conclusión más importante extraída del análisis del modelo de cálculo para la nueva estructura, que antes se ha resumido, es que se pudo corroborar que el Giraldillo podría soportar con garantías las acciones mecánicas a las que se pudiera ver sometido cuando se encontrase sobre la torre de la Giralda. Con el diseño de estructura interna propuesto, así como con un completo sistema de refuerzos internos, se podría conseguir que los

niveles de tensiones mecánicas en la escultura no provocasen el deterioro de la figura.

Se comprobó que el diseño propuesto para afrontar la restauración estructural del Giraldillo permitiría reducir en gran medida el efecto dañino que pudieran haber tenido las distintas acciones, fundamentalmente la temperatura o movimientos sísmicos.

Hay que reseñar que el sistema de refuerzos propuesto permitiría reducir al mínimo los esfuerzos mecánicos en zonas muy deterioradas, especialmente en el hombro izquierdo y el brazo derecho.

Además, se comprobó que este sistema de refuerzos permitiría prescindir de los apósitos externos que presentaba la figura al inicio del proceso de restauración. Esto no supone una mejora desde un punto de vista estructural pero tiene una gran importancia desde el punto de vista de la restauración artística de la figura. Estos apósitos resultaban antiestéticos e impedían apreciar en su totalidad la belleza escultural del Giraldillo.

Ahora bien, la aparente facilidad con que se puede afirmar que la restauración del Giraldillo ofrecería plenas garantías para su seguridad siguiendo el diseño validado mediante su análisis numérico, no se traduce en absoluto en facilidad para la construcción y montaje de la nueva estructura, refuerzos internos y detalles constructivos, que fueron operaciones realmente complicadas de llevar a cabo.

7.3 Construcción y montaje de la nueva estructura interna y sistema de refuerzo

Es evidente que la particular geometría de la escultura, su difícil acceso, la disponibilidad de medios materiales y sobre todo, su condición de Bien de Interés Cultural, con lo que ello conlleva en cuanto a criterios conservativos, de mantenimiento y de cuidado en general, dificultarían el proceso e impondrían ciertos condicio-

nantes a la hora de construir la estructura definitiva y el sistema de refuerzo interno previamente diseñados. En cualquier caso, se tendría siempre presente que cada uno de los elementos debería ser al menos tan rígido y resistente como los diseñados originalmente, de forma que se estuviera siempre del lado de la seguridad.

Si el desmontaje de la estructura de 1770 resultó un proceso laborioso, más aún lo fue la construcción de la estructura nueva por los motivos antes mencionados. Y si con dicho desmontaje se pudo tomar conciencia del admirable trabajo de restauración que se realizó en 1770, más admirable resultó dicho trabajo cuando se hizo palpable la enorme dificultad que conlleva la construcción de una estructura interna y refuerzos que se adapten a la figura del Giraldillo y permitan después su correcta puesta en pie y funcionamiento como Veleta. Es cierto también que en la anterior restauración de 1770 los medios técnicos de que se disponía eran totalmente artesanales, y no industriales como hoy día. Es por ello que resultó de vital importancia para el correcto desarrollo de este trabajo el poder contar con personal capacitado para resolver problemas mecánicos de una manera artesanal, sin renunciar a los medios tecnológicos más avanzados cuando fuera posible su empleo. Sin esta capacidad, el trabajo de restauración estructural del Giraldillo hubiera sido inviable.

A continuación se describirá el proceso de construcción y montaje de los distintos elementos de refuerzo interno y de la estructura de barras, de forma que quede definido finalmente el estado en que quedó el Giraldillo desde un punto de vista estructural.

7.3.1 Construcción del nuevo sistema de refuerzo interno

El refuerzo interno del Giraldillo tiene como misión principal el rigidizar las partes más dañadas de la escultura y evitar que se empeore su estado de conservación. Esta función ya se pretendió cumplir en 1770 por medio de una serie de duelas internas.

Figura 7.17. Duelas de refuerzo interno antes de ser colocadas en el interior de la escultura

Figura 7.18. Sistema de refuerzo interno durante el proceso de colocación. Vista interior desde la parte inferior del Giraldillo y detalle de la zona de refuerzo del hombro izquierdo

(Autor: José Manuel Santos)



Éstas cumplieron a medias con su cometido, ya que por un lado ejercían verdaderamente su función, pero por otro lado, debido a la diferencia importante en el coeficiente de dilatación entre el hierro y el bronce, provocaban la aparición de tensiones mecánicas en la lámina de bronce al producirse variaciones de temperatura. Además, estas tensiones aparecían precisamente en muchas de las zonas que paradójicamente se querían reforzar.

Por este motivo, los nuevos refuerzos internos se construyeron de piezas de bronce fundido, de manera que se redujese al mínimo la diferencia entre los coeficientes de dilatación de escultura y refuerzos. Además, al ser el mismo tipo de material, serían plenamente compatibles desde el punto de vista de la corrosión. Se conseguiría así evitar el proceso de corrosión al que se habían visto sometidos los elementos de refuerzo anteriores.

Siguiendo el diseño previo del sistema de refuerzos, se fabricaron en primer lugar una serie de duelas del estilo de las que tenía anteriormente y con una distribución similar, exceptuando las del brazo derecho, el cual, tal y como se explicará más adelante, se reforzó de distinta manera. Estas nuevas piezas tienen mayor sección que las anteriores, siendo ésta de 60x20 mm aproximadamente.

Estos nuevos elementos de bronce fueron contruidos aplicando la técnica de la cera perdida. En los casos de los refuerzos de mayor longitud, se hacía muy complicada la construcción de moldes de cera tan alargados en el interior del Giraldillo, y sobre todo extraerlos manteniendo su integridad. Por ello, algunas de estas duelas se fabricaron en distintos trozos que después se ensamblaron mediante uniones atornilladas para darles continuidad.

A partir de los moldes de cera extraídos se fundieron las correspondientes piezas de bronce. Se pretendió en todo momento que este material fuese lo más parecido al bronce de la escultura original. En cuanto a sus propiedades mecánicas, los ensayos realizados sobre muestras de la fundición realizada mostraron que la resistencia de este nuevo bronce era mayor que la estima-

da para el de la escultura. Esto quiere decir que tan sólo una de estas nuevas piezas de refuerzo podría soportar con creces el peso de todo el Giraldillo, lo cual da una idea de los márgenes de seguridad con que se ha trabajado.

Con el objeto de respetar la integridad de la figura, los elementos de refuerzo se unirían a la escultura mediante los numerosos taladros que ésta tenía ya practicados para la unión de los antiguos refuerzos y apósitos. La tornillería empleada en la unión de los nuevos refuerzos entre sí y con la escultura es de acero inoxidable (calidad A4.80), con unas propiedades muy similares al elegido para la estructura de barras, que ofrece buena compatibilidad con el bronce en cuanto a corrosión y deformaciones térmicas. Se intentó en un primer momento utilizar tornillería de bronce, para tener aún mejor compatibilidad y buscando una mejor apariencia estética. Sin embargo, este tipo de tornillería resulta demasiado frágil para soportar los pares de apriete necesarios, por lo que se optó finalmente por tornillería de acero inoxidable. Evidentemente, las cabezas hexagonales de estos tornillos, que quedaban visibles por el exterior de la escultura, fueron tratadas mecánicamente y patinadas, de forma que finalmente no resaltasen en absoluto sobre la figura.

Además de estas duelas se fabricaron también una serie de elementos en forma de pequeñas placas de refuerzo para las zonas más dañadas del Giraldillo. Estos refuerzos sustituirían a algunos de los anteriores apósitos colocados sobre la parte externa del Giraldillo, que tenían la misión de reforzar y disimular zonas débiles de la escultura. De esta forma se conseguiría por un lado un mayor refuerzo de estas zonas, ya que los nuevos elementos son más rígidos y resistentes que los anteriores, y, por otro lado, se consigue no tener que añadir elementos externos a la figura del Giraldillo, permitiendo así una mejor apreciación de las formas de la escultura.

Algunas de estas nuevas placas de refuerzo se unieron con los otros elementos en forma de duelas para formar así un sistema de refuerzo más completo.

Una de las zonas más comprometidas en cuanto a su refuerzo interno era el brazo izquierdo. Dicho brazo presenta una grieta casi perimetral a la altura de la axila, que anteriormente había estado reforzada con algunos apósitos externos. Este brazo soportaba anteriormente el peso de la palma, además del plomo que históricamente fue vertido en su interior para equilibrar la Veleta.

Según el diseño de la nueva estructura interna, este brazo izquierdo quedaría libre del peso de la palma, pero no del peso del plomo en su interior. Resultaba por tanto conveniente asegurar con firmeza dicho brazo para evitar que la grieta anteriormente citada se pudiera propagar, y que, incluso en el caso de que el brazo se separase por competo del resto de la escultura, quedase sujeto por medio del nuevo refuerzo de esa zona.

Este refuerzo consiste básicamente en una duela de bronce que conecta la parte del brazo justo por debajo de la grieta con otras duelas de bronce unidas al bronce sano del Giraldillo y ubicadas por encima del apoyo de la estructura interna en el hombro izquierdo, dirigidas hacia la espalda y hacia el pecho, formando entre todas una especie de T, con su parte inferior por debajo de la grieta del brazo. De esta forma, la carga del brazo comprime la parte del hombro por encima de dicho apoyo, lo cual es favorable desde el punto de vista de evitar la aparición de fisuras, y de ahí se transmite la carga finalmente a la estructura.

Por último, queda describir el refuerzo interno de otra zona bastante delicada por el estado en que se encontraba, como era el brazo derecho. Este brazo se mantenía íntegro gracias a la acción de un par de apósitos, que tapaban unos agujeros de gran tamaño, y fundamentalmente a los flejes internos de refuerzo que unían el brazo con el resto de la escultura. Estos flejes sin embargo podían resultar insuficientes en el caso de la hipótesis de carga de acción simultánea del peso propio, sismo, acciones térmicas y viento, como ya se vio en el capítulo 5. Esto llevó a la idea de reforzar este brazo por medio de un tubo de acero inoxidable introducido en su interior, unido a lo largo del brazo en diversos

puntos y en su extremo inferior al bronce sano de la escultura, ejerciendo el mismo efecto que en el caso del brazo izquierdo. Este tubo de acero inoxidable es por sí solo suficientemente resistente para soportar todas las cargas a las que se pueda ver sometido el brazo derecho. Además, estas cargas se reducirán en gran parte al no conectar la mano derecha con el mástil de la bandera, de forma que el brazo no tenga que soportar ningún esfuerzo torsor o flector producido por la acción del viento sobre el lábaro o el movimiento de éste durante un terremoto, lo cual ha podido favorecer históricamente el deterioro de este brazo.

Al prescindir de los apósitos externos, las pérdidas de material y grietas quedarían a la vista, por lo que deberían de ser cubiertas para mejorar la estética de la pieza, siguiendo criterios de restauración desde un punto de vista artístico, pero también realizando al mismo tiempo una mejora estructural. Así, en aquellos lugares donde se encontraban practicados cajeados (seguramente desde la construcción original) se situaron chapas de bronce para reforzar estas zonas. Estas chapas de bronce se unían después rigidamente a la escultura mediante una resina de base epoxídica de gran resistencia mecánica (belzona), que ya se empleó en las intervenciones de los años ochenta dando un buen resultado. El mismo componente se empleó para sellar las grietas que quedaban a la vista. De esta forma, además de estar reforzadas internamente, estas discontinuidades quedaban reforzadas también externamente, pero sin necesidad de apósitos y mejorando la imagen externa de la figura.

7.3.2 Construcción de la nueva estructura interna

El material elegido para la construcción de la estructura de barras interna del Giraldillo fue, como ya se ha dicho anteriormente, el acero inoxidable (AISI 316L). Los motivos de elegir este material fueron los mismos que para el de los refuerzos internos: reducir posibilidad de corrosión y tener un coeficiente de dilatación lo más parecido posible al del bronce de la escultura. La

Figura 7.19. Refuerzo tubular para el interior del brazo derecho

Figura 7.20. Sellado de grietas con resina epoxídica
(Autor: José Manuel Santos)



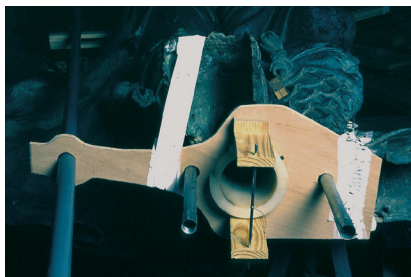
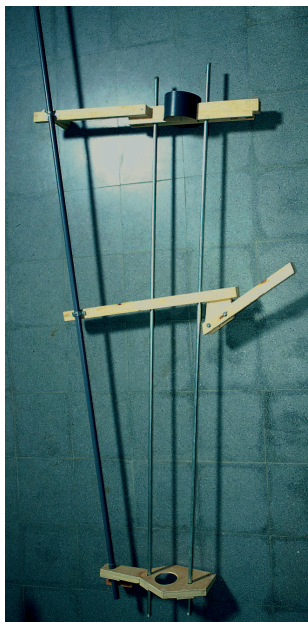
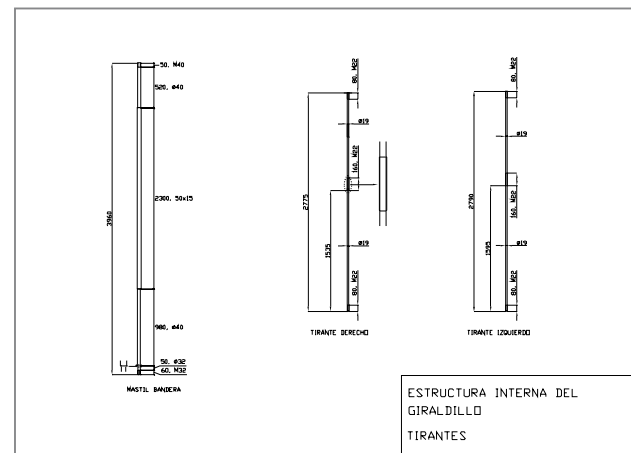
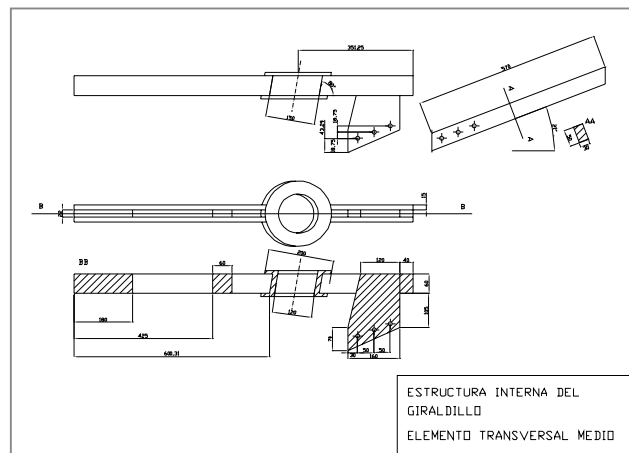
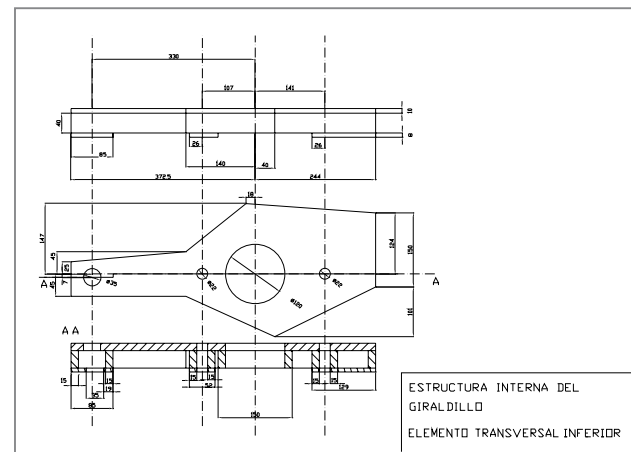
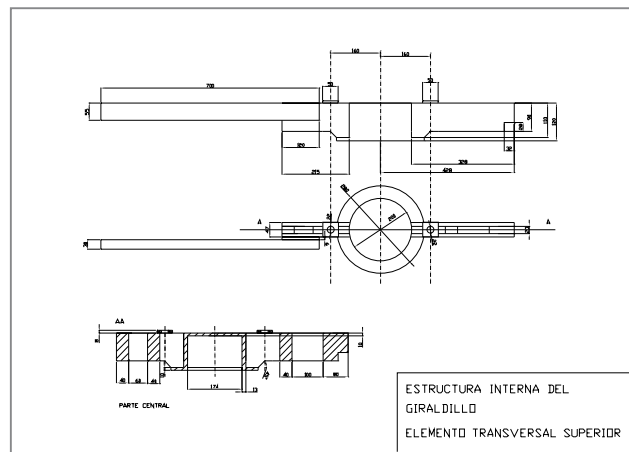


Figura 7.21. Maqueta de la que sería la nueva estructura interna del Giralddillo

Figura 7.22. Planos de construcción de los elementos principales de la estructura de barras, elaborados a partir de las dimensiones de las piezas de la maqueta.

(Autor: José Manuel Santos)



tornillería empleada en las uniones es del mismo tipo que la utilizada para la fijación de los refuerzos internos (acero inoxidable de calidad A4.80).

El diseño geométrico de las piezas era muy complicado debido a la complejidad de la figura. La forma habitual de trabajar en la actualidad, consistente en la elaboración de unos planos a partir de un diseño previo, y la posterior construcción de las piezas correspondientes según estos planos, resultaba de todo punto

imposible en este caso. Por ello, se elaboró artesanalmente una maqueta de las distintas piezas de la estructura con elementos de diversos materiales (madera, PVC, cartón, etc.), ensamblando estos elementos como si de la estructura real se tratara, de forma que sirviesen después como patrón para la construcción definitiva de las piezas en acero inoxidable.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que para desmontar la estructura interna de 1770 hubo que situar al Giralddillo en posición



horizontal, y así tendría que estar hasta el montaje completo de la nueva estructura interna. Esto quiere decir que para la construcción de la nueva estructura interna, la escultura se encontraba sin ningún elemento en su interior (salvo los nuevos refuerzos internos), por lo que no se disponía de referencias inmediatas sobre la posición del eje de giro ni referencias exactas sobre la trayectoria de las anteriores barras, es decir, había que ser cuidadoso en el “replanteo” y posterior ejecución, para que ensamblara correctamente la estructura completa y al poner de nuevo el Giraldirlo en pie éste quedase bien equilibrado sobre su eje.

Una vez que se tuvo construida la maqueta, se pasó a construir las piezas en acero inoxidable según los planos que aparecen en la figura, que fueron generados a partir de la geometría de la maqueta.

Una vez que se construyeron estas piezas se pasó a ensamblarlas sobre la escultura, realizando los ajustes oportunos de ingeniería de detalle sobre la estructura montada. La posición de las uniones era complicada, por lo que algunos cordones de soldadura o

taladros para uniones atornilladas necesitaban ser realizados in situ en el propio taller de restauración, con una referencia clara de su posición sobre la escultura.

Como ya se ha comentado y justificado en los análisis previos, la forma de la nueva estructura sería básicamente la misma que la de 1770, pero con algunas modificaciones para corregir algunas deficiencias y mejorar su interacción con la escultura. Las modificaciones más importantes sobre el diseño de 1770 se resolvieron de la siguiente manera:

- Las secciones de los travesaños superior e intermedio y tirantes internos de la estructura varían con respecto a la estructura de 1770. Las secciones originalmente macizas de los elementos transversales superiores se cambiaron por barras compuestas por un par de pletinas de 50x15 mm separadas una distancia de 22 mm y unidas por presillas macizas, con espacio suficiente para que los tirantes verticales (de 20 mm de diámetro) pudieran pasar entre las pletinas sin constituir una unión rígida con ellos y manteniendo estos tirantes constituidos por una sola pieza. La construcción del travesaño superior fue compleja

Figura 7.23. Elementos de la estructura interna antes de ser introducidos y montados sobre la escultura

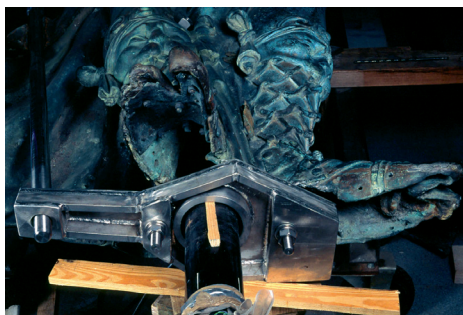
Figura 7.24. Detalles de la unión entre barra de la palma y travesaño intermedio en la estructura de 1770 y en la nueva estructura.

(Autor: José Manuel Santos)

Figura 7.25. Pieza transversal inferior de la estructura sobre la que apoyan los pies de la escultura

Figura 7.26. Extremo izquierdo de travesaño intermedio. Se aprecia el taladro donde después se atornillaría la tapadera o casquillo correspondiente.

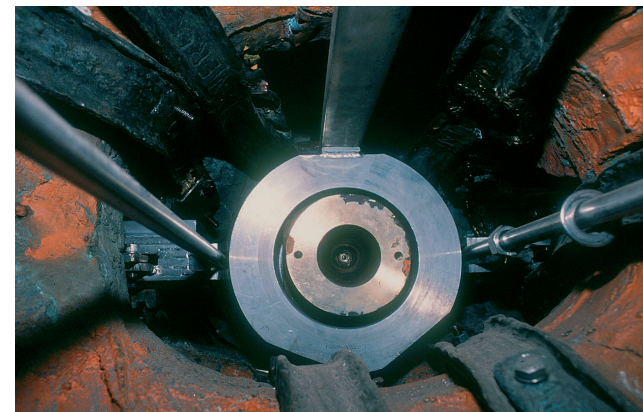
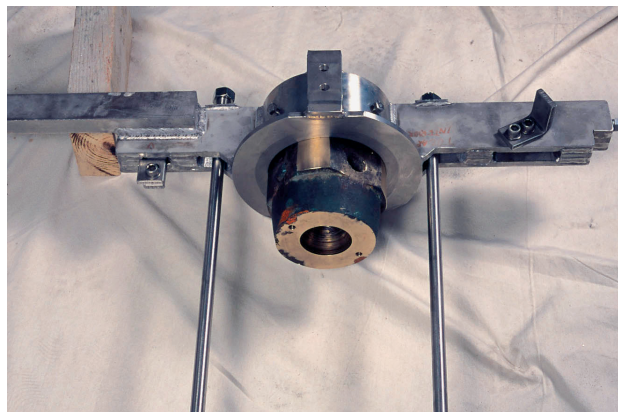
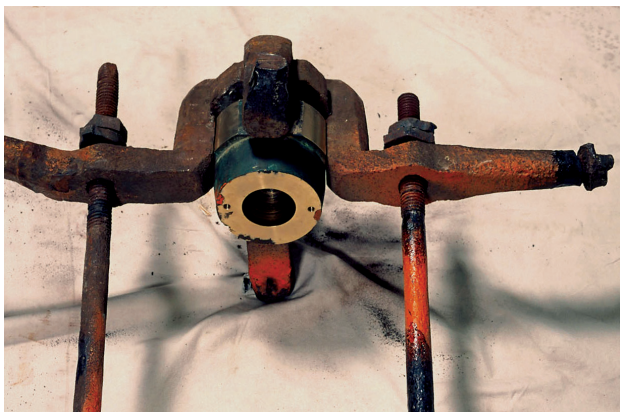
(Autor: José Manuel Santos)



debido a su irregular geometría, ya que su trayectoria debía de ser tal que se uniera con la escultura en el hombro izquierdo, quedase su zona central en forma de tambor centrada con el eje, se apoyase en la parte del bronce sano del nudo de tela de la escultura que había sido separado de la misma, tuviera un quiebro en esa zona para poder quedar dentro de dicho nudo de tela, y finalmente ofreciera en su extremo izquierdo un buen punto de anclaje para el lábaro.

- El elemento de unión entre los travesaños superior e intermedio, que se diseñó para dotar de cierto carácter tridimensional a la estructura y absorber así las excentricidades de las cargas en los extremos de estos elementos con respecto al plano de la estructura, se construyó a partir de una pletina de acero inoxidable de 50x15 mm. Esta pletina se atornilla a la parte frontal del tambor de cada uno de los travesaños por los que pasa el eje.
- La barra de la palma se une ahora directamente al travesaño intermedio en vez de al tirante derecho y descarga toda la carga de la palma sobre dicha barra, ya que el brazo izquierdo queda libre de esta carga. La unión entre el travesaño y la barra de la palma se realiza por medio de una pequeña placa de unión. Esta placa se inserta en el hueco entre las pletinas que componen la sección principal del travesaño, descolgándose de él y estando rígidamente unido a él mediante soldadura. Sobre esta placa de unión se solapa la barra de la palma, que se une rígidamente mediante tres puntos de unión atornillados.
- La trayectoria no lineal que necesita seguir la barra de la palma se consiguió mediante la división de esta barra en dos elementos rectilíneos, que se unen en la parte comprendida entre la mano izquierda y el cuerpo mediante un corte sesgado en cada uno de sus extremos. De esta forma se consigue el cambio de trayectoria necesario para que la barra entre en el interior de la escultura por el hueco destinado a ello y por el otro lado entre con la trayectoria correcta en la mano y palma. La unión entre ambos elementos de la barra de la palma se realiza mediante dos bridas rectangulares que se atornillan entre sí en cuatro puntos, abrazando ambas barras y formando una unión rígida.

- Se aseguran uniones articuladas entre los tirantes y los elementos transversales para evitar la flexión de estos elementos. Los tirantes atraviesan cada uno de los travesaños, estando roscados en estas zonas para colocar tuercas que asienten sobre éstos. Así, se coloca una tuerca con arandela en su extremo inferior, que asienta sobre la cara inferior del travesaño o placa de apoyo inferior, y otra tuerca con arandela en su extremo superior, que asienta sobre la cara superior del travesaño superior. A su paso por el travesaño intermedio hay una tuerca en la cara superior y otra en la inferior. De esta forma se consigue crear un sistema que permite pretensar los tirantes de forma independiente en su tramo inferior y superior. Esto resulta de utilidad ya que permite jugar con una posible precompresión de la escultura (que resulta favorable para retrasar la apertura de grietas y fisuras y aumentar su rigidez), así como conseguir que la escultura descansase en mayor medida sobre sus pies en lugar de colgar de los hombros y muslos. El efecto de esta precompresión de la escultura se comprobó con el modelo de cálculo y resultaba favorable para su comportamiento ante su peso propio y acciones térmicas. Una vez que el Giralddillo se puso en pie con su nueva estructura se comprobó que el sistema funcionaba a la perfección, pudiendo conseguir que la escultura descansase casi al completo sobre sus pies (liberando los apoyos de los hombros) o bien al contrario, que colgase plenamente de hombros y muslos. Como es lógico, ninguna de las dos situaciones extremas resulta conveniente, y se buscó la situación más favorable, en la que trabajan todos los apoyos pero la escultura se encuentra comprimida por su peso propio, descansando en gran medida sobre sus pies, y no a tracción por estar colgada fundamentalmente de los hombros.
- El travesaño inferior se construyó de forma que sirviera de una especie de plataforma donde se produzca un buen apoyo de los pies. Esto resultaba fundamental además para conseguir el efecto de precompresión de la escultura. Para asegurar este apoyo se fabricó una pieza fundida en bronce que se adapta a la geometría del final de la lámina en los pies y transmite la carga



a dicha plataforma. Esta pieza se fundió a partir de un molde extraído de la parte inferior de apoyo de los pies de la escultura.

- Los puntos de unión con la escultura se realizaron mediante casquillos de bronce con una forma similar a la de las piezas antiguas, pero elaboradas con mayor precisión y asegurando una transmisión de esfuerzos adecuada entre la escultura y los extremos de las barras. En el muslo y hombro izquierdos, se construyeron una especie de tapaderas para el extremo de los travesaños, uniéndose a éstos mediante un tornillo. Estas tapaderas encajan perfectamente en los huecos que tiene la escultura en esas zonas. En el muslo derecho se tiene un casquillo que es atravesado por el travesaño intermedio y sirve de transición entre este elemento y el agujero de la escultura que lo rodea. En el apoyo superior derecho, ubicado en la axila de la escultura, hay una pequeña pieza de acero inoxidable unida al travesaño que encaja sobre el perfil interior de la escultura en esa zona.
- El mástil del lábaro respeta la forma del original, incluso en los cambios de sección (cilíndrico en su parte inferior, rectangular en la parte intermedia de solapamiento con el lábaro, y de nuevo cilíndrica). Estos cambios de sección se consiguieron con distintas piezas de la forma correspondiente soldadas entre sí. En la parte superior tiene un cambio de trayectoria,

pasando de estar inclinada a estar vertical. En este cambio el mástil queda dividido en dos partes que se unen mediante un casquillo unido rigidamente a la parte inferior y sobre el que se rosca la parte superior, que tiene forma de cruz y en el que se inserta el estandarte superior. La construcción de este casquillo, con dos roscas sesgadas que permitan la correcta orientación del tramo superior, es uno de los detalles de complicada y meritoria ejecución que pasan normalmente desapercibidos. El estandarte superior, además de su carácter simbólico, cumple la función de Veleta auxiliar, para lo que es necesario que el tramo superior del mástil se encuentre en posición vertical. Conseguir esto con el Giraldillo en posición horizontal es tremendamente complicado. Resulta curioso que las referencias tomadas, incluido el interés por reproducir el mástil de 1770, llevaron finalmente a cometer la misma pequeña desviación que debieron cometer los restauradores de 1770. Este tramo superior quedó finalmente con una ligera inclinación hacia la parte delantera del Giraldillo, solo perceptible cuando éste se puso en pie y se colocó su estandarte, que en ausencia de viento tiende a apuntar hacia la parte frontal del Giraldillo, tal y como ocurría con la estructura de 1770, según se desprende de las imágenes tomadas durante intervenciones anteriores.



Figura 7.27. Cojinete alojado sobre el travesaño superior de la estructura de 1770 y en la nueva estructura (parcialmente introducido en su alojamiento con la estructura antes de ser montada y visto desde el interior de la escultura con la estructura ya montada)

(Autor: José Manuel Santos)

Figura 7.28. Cojinete de fricción de bronce entre el vástago y el travesaño inferior de la estructura del Giraldillo.

Un aspecto que no cambió con respecto a la estructura de 1770 y que precisamente por ello es digno de mención, es el cojinete de bronce que tan buen resultado dio durante más de 200 años. Es cierto que desde los años ochenta se advertía que el Giraldillo no funcionaba correctamente como Veleta, es decir, no giraba bien. Sin embargo, ya se argumentó en el capítulo 5 que entre los motivos por los que el Giraldillo no funcionaba correctamente no se encontraba el posible deterioro de su cojinete de giro. Este cojinete es una pieza maciza de bronce, con forma prismática y con una cavidad en su parte inferior donde se aloja la punta del eje de giro de la Veleta. Al desmontar la estructura interna de 1770 se comprobó su buen estado de conservación y sus buenas propiedades mecánicas. Se trata evidentemente de un sistema básico de cojinete, basado exclusivamente en el buen rozamiento entre éste y la punta del eje, pero no se creyó conveniente acudir a diseños más modernos para cojinetes, como son los de bolas o rodillos, ya que éstos dependen de un correcto mantenimiento que garantice la presencia de lubricación en su interior, o de otra forma su funcionamiento puede ser muy deficiente. También hay cojinetes modernos de fricción, del tipo empleado en la Réplica del Giraldillo, con un principio de funcionamiento idéntico al de 1770 y con unas prestaciones no necesariamente mejores. Por tanto, se creyó admisible desde un punto de vista mecánico el mantenimiento del cojinete de 1770. Esta decisión se engloba además dentro del criterio de mínima intervención marcado en el conjunto del proceso de restauración. No cabe duda que resulta de gran valor simbólico que el mecanismo de giro, elemento clave del Giraldillo, se mantuviera activo.

También hay que tener en cuenta que no es deseable que el Giraldillo “gire demasiado bien”, es decir, si ofreciera muy poca resistencia al giro podría sufrir movimientos erráticos bajo la acción del viento, que podrían conllevar importantes efectos dinámicos no deseables en su respuesta mecánica.

En cualquier caso, para mejorar el diseño del sistema de giro con respecto al de 1770, se diseñó una pieza de bronce de fricción

para ser colocada entre el eje y el hueco del travesaño inferior. Esta pieza se encuentra dividida en dos mitades para poder ser montada y desmontada con el Giraldillo en pie sobre su eje. Presenta una serie de surcos, de forma que la superficie de contacto es discontinua y deja así una serie de claros entre el eje y la pieza que permitan la salida de agua, restos de suciedad, etc.

Una vez que todos los elementos estuvieron contruidos y ensamblados, se pudo proceder a la puesta en pie del Giraldillo en el taller de restauración, por primera vez con su nueva estructura interna, incluyendo el montaje del lábaro y palma. La operación sirvió para realizar la misma operación de pesaje que se llevó a cabo cuando todavía estaba montada la estructura de 1770. Se obtuvo como resultado que con las modificaciones realizadas la escultura con su estructura interna pesaba tan solo 30 kg menos. La nueva estructura de barras resultaba más ligera que la anterior, pero sin embargo el nuevo sistema de refuerzos aporta más peso que las antiguas duelas, por lo que finalmente ambos efectos se compensan y el resultado global es que el Giraldillo apenas modificaría su peso y distribución de masas con respecto a la situación anterior.

Con el Giraldillo en pie se pudo comprobar que el diseño, construcción y ensamblaje de los distintos elementos era correcto. La Veleta quedaba así preparada desde un punto de vista mecánico para afrontar con garantías su reposición sobre la Giralda.

7.4 Conclusiones sobre la intervención mecánica

Sirva este apartado de breve resumen del trabajo descrito en el capítulo 5 y el presente, donde se han mostrado el detalle, dedicación y responsabilidad con que se llevó a cabo la restauración del Giraldillo desde un punto de vista estructural, atendiendo a los principios de máxima seguridad para mantener la Veleta en buenas condiciones, y respetando en todo momento

los criterios de conservación que se deben aplicar a una obra de arte de esta relevancia.

En primer lugar, se comprobó mediante un modelo numérico que el estado de conservación en que se encontraba el Giraldillo era lo suficientemente bueno para afrontar una restauración con plenas garantías. Este modelo sirvió además para descubrir los posibles puntos débiles tanto de la escultura como de su estructura interna.

En base a este análisis se plantearon unas líneas de actuación para mejorar algunos aspectos de la estructura y del sistema de refuerzos internos, pero sin cambiar en lo sustancial el diseño de la estructura original y de la que se le colocó en 1770, de forma que se pueda decir que la obra se conserva también desde un punto de vista mecánico. El cambio más importante sería el uso de nuevos materiales para los refuerzos de piel y la estructura interna, lo cual reduce en gran parte los problemas estructurales del Giraldillo, además de los asociados a la corrosión.

Llegado este punto se pasó al desmontaje de la estructura interna de 1770 y, simultáneamente, se realizó el diseño de una nueva estructura y sistema de refuerzos partiendo del modelo numérico ya construido.

Dicho desmontaje sirvió para conocer en profundidad el estado de conservación de la escultura y su estructura interna, los sistemas de apoyo, uniones, etc., lo cual ayudaba a comprender y madurar las ideas que debieran quedar plasmadas en el diseño y construcción de la nueva estructura.

Agradecimiento

El trabajo presentado en este capítulo ha sido posible gracias a la excelente labor como mecánico y artesano desarrollada con tesón por Claudio Fernández Llerena.

Una vez finalizado el desmontaje y realizado un diseño de estructura y refuerzos internos, se pasó a la construcción de éstos. La complejidad geométrica de la escultura hizo que este proceso necesitase de un trabajo mecánico complejo, preciso y laborioso. Como es lógico, esto condicionó algunos aspectos del diseño final de las piezas, aunque siempre fueron cambios hacia un mayor nivel de seguridad con respecto a lo que previamente se había diseñado y calculado.

El resultado final ha sido la construcción de un completo sistema de refuerzos internos fundidos en bronce, que aseguran la integridad de la escultura ante cualquier tipo de acción. Se colocan sobre la cara interna de la escultura y así evitan el uso de apósitos externos que estropean la imagen del Giraldillo. El sistema escultura-refuerzos se apoya finalmente sobre una estructura construida en acero inoxidable, con un diseño adecuado para su correcto funcionamiento, robusta y minuciosamente construida, que es capaz de sustentar a la escultura someténdola a los mínimos esfuerzos posibles, y permitiendo su funcionamiento como Veleta.

A título casi anecdótico se puede decir que tan sólo se ha practicado un nuevo taladro para anclar uno de los nuevos refuerzos. Por lo demás, el bronce de la escultura original ha sido respetado por completo y no ha sufrido ningún tipo de daño en todo el proceso.

Como resultado del trabajo desarrollado se puede afirmar que permite la vuelta del Giraldillo a lo más alto de la Giralda con plenas garantías para su conservación y seguridad.