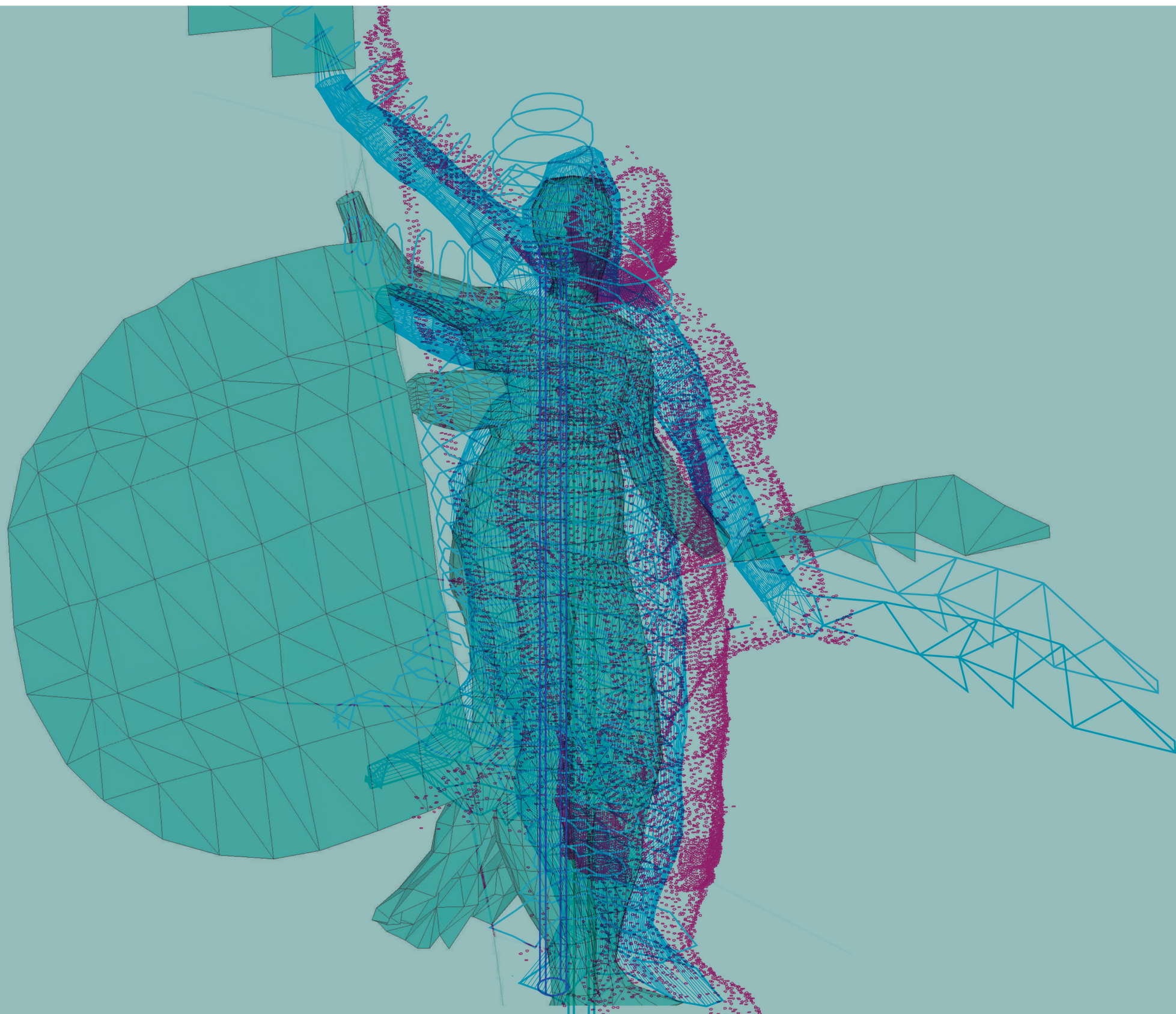


Comportamiento mecánico-resistente



Comportamiento mecánico-resistente

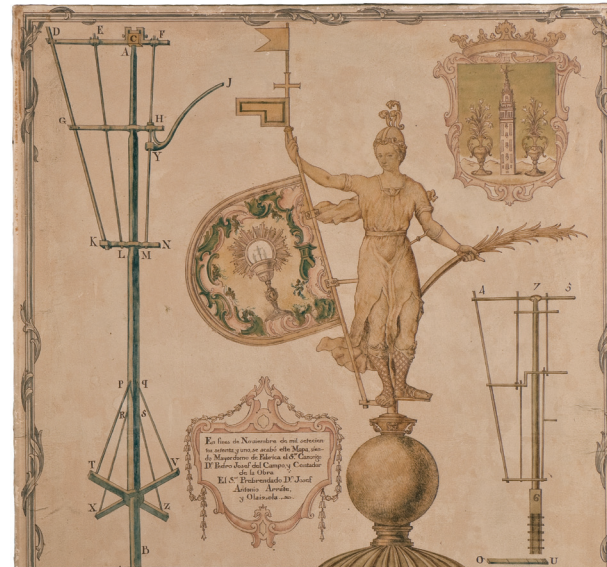
5.1 Introducción

Además de su valor patrimonial, histórico, cultural y artístico, el Giraldillo tiene sin duda un valor añadido desde el punto de vista técnico. Su funcionamiento como Veleta sobre la torre de la Giralda durante más de 400 años le confiere un carácter mecánico imprescindible en su concepción, que ha sido un factor fundamental a tener en cuenta en su restauración.

La escultura de bronce visible en el Giraldillo posee un mecanismo interno formado por barras que le permite acoplarse sobre un eje empotrado en la torre, sobre el cual gira debido a la acción del viento. El Grupo de Estructuras de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla se ha hecho cargo de analizar el funcionamiento de dicho mecanismo interno, valorar su grado de deterioro y llevar a cabo un proceso de restauración desde un punto de vista mecánico, el cual ha llevado finalmente al diseño, construcción y montaje de una nueva estructura interna para el Giraldillo.

Es importante hacer notar que no ha sido la primera vez en la historia que el Giraldillo ha sufrido un proceso de restauración de esta magnitud. En 1770, la estructura original de la Veleta fue sustituida íntegramente por otra nueva, que es la que perduró hasta nuestros días. Además de la intervención de 1770, se encuentran documentadas algunas intervenciones adicionales, que se resumen a continuación destacando los aspectos estructurales de las mismas:

- 1568. Colocación e inauguración de la veleta.
- 1592. El 5 de Marzo un fuerte viento torció el vástago y en Septiembre se sacó el vástago, se bajó al colegio San Miguel y fue enderezado por Juan Barba.
- 1684. Se hizo de nuevo el antebrazo izquierdo, desprendido el año anterior por un huracán. Además, se doró y barnizó la escultura.
- 1751. En la esfera de bronce aparece inscrito “Se doró el año de 1751 por don Bas(ilio) Co(rtes)”



- 1755. Un informe realizado a raíz de un terremoto producido ese mismo año indicaba que el vástago se había deformado. El arquitecto Manuel Núñez se hizo cargo de las reparaciones.
- 1770. Hasta la fecha, es la obra de restauración de mayor envergadura llevada a cabo sobre la escultura. El arquitecto Manuel Núñez diseñó el andamio para desmontar la escultura completa con peana, tinaja y perno incluidos. Se sustituyó el tramo superior del perno, la cruceta superior del cuerpo del Penacho, la bandera, la palma (por una de menor peso, al igual que la bandera) y la estructura interna de barras de hierro. Los nuevos elementos estructurales quedaban bastante bien descritos en la leyenda que acompañaba al dibujo del documento sobre la restauración, y se incluía además una representación de la estructura antigua, pero de ésta no se realizó una descripción escrita.

Además se practicó una portezuela en la cadera derecha que permite observar en parte el interior de la escultura.

José Domínguez Abascal
Mario Solís Muñiz
*Escuela Técnica Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla*

Figura. 5.1. Imagen del documento relativo a la intervención de 1770 (detalle). A la derecha aparece la estructura original y a la izquierda la que se colocó en la intervención

(Foto: José Manuel Santos)

- **1843.** Tras un fuerte vendaval que tuvo lugar en 1842 se realizaron diversas obras de restauración, que debieron incluir también alguna intervención sobre la veleta.
- **1886.** El arquitecto Fernández Casanova dirigió una restauración del edificio y, como él mismo describió en un documento, cambió uno de los tramos del vástago
- **1980/81.** Trabajos de restauración del Giraldillo englobados dentro de la obra de conservación de la Giralda llevadas a cabo entre 1979 y 1988, que fueron dirigidas por el arquitecto D. Alfonso Jiménez Martín. Se prescindió de gran parte de los 39 apósitos de cobre, sujetos por roblones y tornillos, que ocupaban grietas y agujeros, cubriendo éstos con soldadura y con compuesto de unión de base epoxídica. En el pecho, en el punto de unión de uno de los extremos del travesaño superior de la estructura interna de barras, que iba de pecho a espalda, había un gran agujero que se tapó con un apósito para la unión entre el hierro y el bronce, y que se pudiera quitar de forma que el agujero se aprovechara como ventana de registro.

Los efectos de la corrosión provocada por la formación de pares galvánicos entre bronce y hierro resultaron muy alarmantes. Para evitar, o al menos mitigar, estos fenómenos de corrosión, se limpiaron los elementos férreos que resultaron accesibles y se cubrieron, al igual que la superficie interior del bronce de la escultura, con tres manos de antióxido de minio. Además, se soldaron a la estructura de hierro varios ánodos de sacrificio, de cinc, del tipo empleado en la industria naval.

En el lábaro se sustituyó la barra de refuerzo que va paralela al mástil, y se restauró la unión de dicha barra con la chapa de bronce, que estaba muy deteriorada. A los dos travesaños de refuerzo que tenía el lábaro, perpendiculares a la barra anterior, se añadieron otros dos.

La bandera más alta fue sustituida por otra de cobre de igual forma.

También se reconstruyeron la unión de la mano con la palma y el pie derecho, del cual se había desprendido un trozo.

El anterior resumen histórico ilustra la necesidad de llevar a cabo operaciones de restauración o mantenimiento periódico del Giraldillo para garantizar su conservación. En la vida futura del Giraldillo, sería deseable que se llevase a cabo un mantenimiento en sentido estricto. Es decir, que no se tratase de reparar daños acumulados en el momento que éstos se hicieran palpables o parecieran lo suficientemente graves, como ha sido a lo largo de su historia, sino que se tratase de un proceso de mantenimiento preventivo y programado que precisamente evitase en la medida de lo posible la aparición de estos daños.

En el proceso de restauración que ocupa el presente libro, antes de abordar el proceso de desmontaje de la estructura interna de 1770 y el diseño, construcción y montaje de una nueva estructura que la sustituyese, se analizó numéricamente el comportamiento mecánico de la Veleta. Para ello, se construyó un modelo numérico del conjunto de la Veleta, el cual sirvió para estudiar computacionalmente como se comportaba la escultura y su estructura interna ante las distintas sollicitaciones mecánicas que ha de soportar.

Este modelo, junto con el estudio *in situ* de la pieza, serviría para evaluar la importancia de los distintos daños o imperfecciones que presentaba el Giraldillo de cara a mantener su integridad y buen estado de conservación.

En el presente capítulo se describirá el proceso de construcción de este complejo modelo matemático, su análisis y las conclusiones más importantes que se pudieron extraer y que servirían para afrontar la restauración integral del Giraldillo desde un punto de vista mecánico, ofreciendo plenas garantías para su conservación.

Previamente, se realizará una descripción de la estructura interna del Giraldillo antes de su restauración y su estado de conservación, con el objetivo de permitir una mejor comprensión del resto del capítulo.

5.2 Estado mecánico antes de la restauración

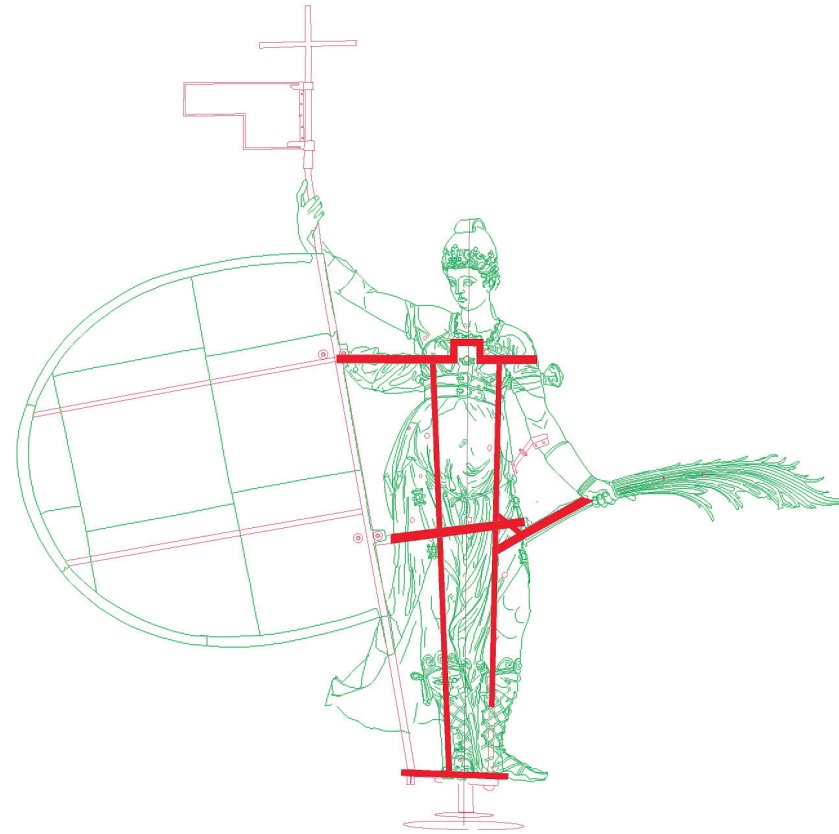
Como ya se ha comentado, la escultura de bronce que conforma la imagen externa de la famosa Giganta de Sevilla se encuentra sustentada por una estructura interna de barras que le da consistencia y que le acopla a un eje o vástago empotrado en la torre sobre el que gira el conjunto, haciendo la función de veleta.

Este vástago, formado por varias piezas de distintas épocas unidas entre sí, recorre realmente los últimos cuerpos de la torre, uniéndose en su parte inferior a la campana del cuerpo del Reloj y atravesando después los cuerpos del Pozo, Redondo y del Penacho. En su recorrido, el vástago se une en diversos puntos a la fábrica de la torre mediante una serie de elementos que sirven de arriostramiento transversal, compuestos por tamboretas que abrazan a la torre y se unen al vástago mediante crucetas. El tramo que queda por encima del tamborete situado a mayor altura, que abraza el cuerpo del Penacho, es el que realmente interesa de cara a la sustentación del Giraldillo. Los esfuerzos que éste transmite al vástago son absorbidos por la torre a través de este último tamborete.

El tramo de vástago que queda comprendido entre la campana del cuerpo del Reloj y el tamborete superior cumple una doble misión. En primer lugar, aporta rigidez a los últimos cuerpos de la torre, y en segundo lugar, cumple la importante misión, gracias a los pates de que dispone, de constituir el único medio de acceso a los últimos cuerpos de la torre sin necesidad de recurrir a otros medios auxiliares.

Así pues, de cara a analizar el comportamiento mecánico del Giraldillo, éste se podrá considerar sustentado por un eje que se encuentra empotrado en la torre. La longitud de este eje o vástago de sustentación será la comprendida entre el citado tamborete superior y la punta del eje, que es de 5,4m.

El eje sale de la torre y atraviesa la tinaja y la peana del Giraldillo, que son partes fijas del conjunto, es decir, no giran bajo la acción



del viento. Por encima de la peana, el eje entra finalmente por los pies del Giraldillo y se acopla con su estructura interna.

Como ya se dijo anteriormente, la estructura interna del Giraldillo al inicio del proceso de restauración era la que se colocó en 1770, y es la que se describirá a continuación, por ser la situación de partida en el proceso de análisis que ocupa el presente capítulo.

Dicha estructura interna formaba una especie de percha de la que colgaba el Giraldillo. Estaba compuesta fundamentalmente por tres elementos aproximadamente horizontales (*travesaños*) que atravesaban el cuerpo de la escultura a distintas alturas, y tres elementos aproximadamente verticales (*tirantes* internos y mástil de la bandera) que conectaban a los anteriores entre sí.

Los travesaños se encontraban situados a la altura de los pies, muslos y pecho del Giraldillo, respectivamente. El eje atraviesa

Figura. 5.2. Esquema de estructura de barras del Giraldillo



Figura. 5.3. Detalle de unión entre barra de la palma y tirante izquierdo (vista interior del Giraldillo)

estos elementos y acaba en forma de punta ojival, que encaja en la pieza central de bronce del travesaño superior, a la altura del pecho, siendo éste el único punto de apoyo vertical y cojinete de giro de la escultura y su estructura interna.

El eje entraba por los dos travesaños inferiores a través de los aros que tenían estos elementos en su parte central, dejando una holgura de 1cm aproximadamente. De esta forma se conseguía mantener la escultura centrada sobre el eje.

Sobre el elemento horizontal inferior apoyaban parte de los pies del Giraldillo, y en uno de sus extremos se une la barra que hace de mástil del lábaro o bandera.

El travesaño intermedio presentaba una trayectoria descendente de izquierda a derecha. Se unía al bronce en el muslo izquierdo de la escultura y lo atravesaba por la derecha llegando finalmente al elemento que lo unía al mástil y a la bandera por medio de un par de tornillos.

A esta altura se unía la barra proveniente de la palma al *tirante* interno izquierdo, por medio de una triangulación que se une al tirante justo por encima y por debajo de la unión entre el *travesaño* y el *tirante*. Esta triangulación y su detalle constructivo era una de las deficiencias que presentaba esta estructura de 1770. Los extremos de la triangulación de la barra de la palma estaban constituidos por un par de argollas por los que pasaba el tirante izquierdo. Esto quiere decir que la transmisión de esfuerzos verticales al tirante sería prácticamente nula, y por el contrario el diseño de esta unión le transmitiría un momento flector al tirante, lo cual resulta indeseable para un elemento de sus características. Así pues, la barra de la palma no cumplía correctamente con la función de transmitir el peso de la palma y la fuerza del viento actuando sobre ella a la estructura interna, sino que estos esfuerzos eran realmente transmitidos a la escultura a través de su mano izquierda, con la consecuente sobrecarga del brazo izquierdo.

El travesaño superior se encontraba a la altura del pecho y tenía, como ya se ha dicho, un hueco en su parte central donde se alojaba el cojinete de bronce en el que se acoplaba la punta del eje, formando así el cojinete de giro de la Veleta. Este elemento se unía al bronce de la escultura en el hombro izquierdo, y por el lado derecho atravesaba el pliegue de tela que hay bajo el brazo derecho de la escultura. Justo por debajo del brazo la escultura se apoyaba sobre el travesaño por medio de cuñas. El travesaño acababa finalmente en una unión atornillada con el mástil de la bandera y la estructura del lábaro, del mismo tipo que la del travesaño intermedio.

Este travesaño superior era el único elemento de la estructura que le confería a la misma un cierto carácter tridimensional, ya que el resto de los elementos se encontraban todos sobre un mismo plano. Este carácter tridimensional venía dado por una unión que tenía este elemento con el pecho y la espalda de la escultura, formando una especie de cruceta a la altura del pecho. La unión frontal con la escultura estaba seriamente deteriorada, según se recoge en las observaciones realizadas durante la intervención de 1980. Finalmente, durante los trabajos previos a la restauración que ocupa este libro, dirigidos por D. Alfonso Jiménez, esta unión con el pecho de la escultura se eliminó. En su lugar se soldaron dos pletinas de acero inoxidable a cada uno de los tirantes verticales y a un muñón de la barra que originalmente se unía al pecho de la escultura.

La unión con la espalda también se encontraba deteriorada, aunque en menor medida. La explicación del mal estado de estas uniones se llevará a cabo durante el análisis del modelo de cálculo desarrollado.

Los elementos transversales ya descritos eran conectados entre sí mediante los tirantes internos y el mástil de la bandera. El estado de conservación de estos elementos era bastante satisfactorio salvo en el tramo inferior del tirante izquierdo, sobre el que había tenido lugar un espectacular proceso de corrosión. Este tramo, situado en el interior de la pierna izquierda del Giraldillo, había desaparecido por completo por efecto de la corrosión. Esto hacía

que no hubiera una correcta transmisión de esfuerzos entre el travesaño inferior e intermedio, favoreciendo el desequilibrio y mal funcionamiento del conjunto.

Además de los elementos de la estructura interna hasta ahora descritos, la escultura disponía de una serie de refuerzos internos en forma de duelas que recorrían su geometría interna. Estas duelas o flejes se unían a la escultura mediante roblones y fueron colocados durante la intervención de 1770, seguramente con la idea de reforzar algunas zonas deterioradas que presentaban grietas o falta de material.

Esta misma función cumplían los distintos parches o apósitos externos que presentaba la escultura, aunque éstos tenían en muchos casos una funcionalidad más estética (cubriendo defectos de la figura) que estructural, dado su pequeño espesor.

Una vez descrito a grandes rasgos el estado del Giraldillo desde un punto de vista mecánico al inicio del proceso de restauración, se puede decir que su estado de conservación era en gran medida incierto en aquel momento del proceso, y había suficientes motivos para pensar que era lo bastante deficiente como para ser necesaria una intervención integral desde el punto de vista estructural, tal y como se confirmaría a lo largo del proceso de restauración.

5.3 Generación del modelo de elementos finitos

Para el análisis del comportamiento mecánico del Giraldillo se construyó un modelo matemático aplicando el método de los elementos finitos. Este método numérico permite simular por ordenador lo que le ocurre a una pieza o estructura ante distintas situaciones de carga (peso propio, viento, acciones térmicas, sismos, etc.). El método es bien conocido y su empleo está muy extendido en múltiples y diversas ramas de la ingeniería, y en particular en la Mecánica de Sólidos y el Cálculo de Estructuras.

La generación de un modelo de este tipo supone en primer lugar una aproximación geométrica de la pieza en cuestión: la geometría real de la pieza se representa por medio de pequeños elementos de geometría sencilla. En este caso se escogieron elementos planos de forma triangular y un cierto espesor para la escultura, mientras que la estructura de barras se representaría mediante elementos lineales.

Sobre esta geometría se deben aplicar una serie de propiedades mecánicas asociadas a los materiales de los que están compuestos realmente (rigidez, densidad, coeficiente de dilatación, etc.)

Finalmente, se pueden introducir los datos relativos a las distintas acciones que se quieren considerar sobre la pieza, para posteriormente visualizar los resultados obtenidos ante las distintas situaciones de carga consideradas (campos de desplazamientos, esfuerzos, tensiones mecánicas, etc.).

El modelo de cálculo elaborado para el análisis del comportamiento mecánico del Giraldillo fue tremendamente laborioso en su construcción, análisis y desarrollo, dada la complejidad de la pieza real en cuanto a geometría, composición, detalles, uniones, etc. Pero es precisamente esta complejidad, unida a la peculiaridad de los objetivos marcados y el contexto en que se desarrolla, lo que confiere un carácter singular y aporta un valor añadido al trabajo desarrollado desde un punto técnico.

Es importante señalar que un modelo de cálculo de este tipo no puede ser considerado nunca como definitivo. Es decir, se trata de un modelo que pretende simular el comportamiento real de la pieza para analizar y sacar conclusiones prácticas sobre su comportamiento, pero no reproduce fielmente y con total exactitud lo que le ocurre a la pieza en cualquier punto y ante cualquier situación. Evidentemente, se pueden generar modelos con mayor o menor precisión, que normalmente se traducen en una mayor o menor complejidad y dificultad en su elaboración.

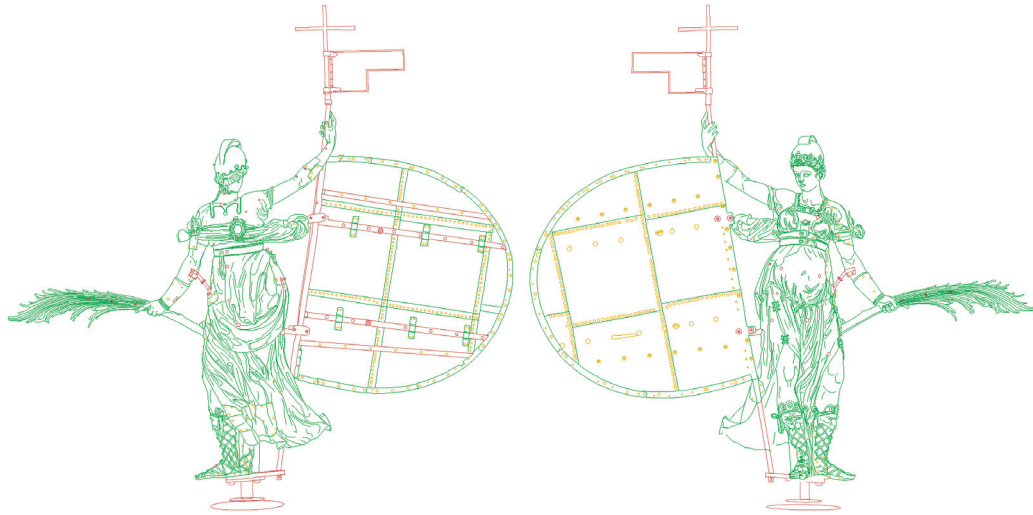


Figura. 5.4. Fotogrametría del Giraldillo realizada por A. Almagro (Escuela de Estudios Árabes, Granada)

Figura. 5.5. Levantamiento tridimensional de la figura del Giraldillo aplicando técnicas de topografía

Por tanto, una decisión fundamental en cualquier análisis de este tipo es llegar a una situación de compromiso entre el grado de precisión en los resultados a obtener, el tiempo requerido para construir y analizar el modelo, y el volumen de datos manejados, que debe estar dentro de los límites del equipo empleado y, sobre todo, de lo que pueda trasladarse al diseño. Esta situación de compromiso se suele alcanzar después de la generación de un primer modelo, su análisis, y posteriores modificaciones y mejoras del mismo con sus correspondientes análisis.

Todo este proceso se pretende describir en este capítulo y el correspondiente al diseño de la nueva estructura interna del Giraldillo, siguiendo además un orden cronológico. Con esto se pretende ilustrar y ayudar a comprender todo el trabajo desarrollado desde el punto de vista del análisis numérico, así como el alcance de las conclusiones a las que se pudo llegar gracias a este análisis.

En este capítulo se distinguirán dos modelos de cálculo distintos: un primer modelo que recibirá el calificativo de “sin daños”, y un segundo modelo “con daños”. Ambos establecidos sobre la geometría y materiales existentes tras la última gran intervención (1770).

La diferencia entre uno y otro radica en que en el primero no se incluyen los defectos o daños que presentaba el Giraldillo antes de su restauración (grietas, agujeros, apósitos, etc.), mientras que

el segundo sí los incluye. Evidentemente, el segundo se realizó a partir del primero y supone una mejora en cuanto a la capacidad de reflejar el comportamiento real de la Velea antes de ser desmontada para su restauración.

El análisis y la presentación de los resultados obtenidos con uno y otro modelo resultan de interés ya que sirvieron para evaluar en qué medida los daños que presentaba el Giraldillo podrían ser debidos a los esfuerzos mecánicos a los que se ha visto sometido a lo largo de su historia.

5.3.1 Geometría del modelo

Para determinar geoméricamente el modelo se emplearon tres fuentes de información diferentes:

Fotogrametría: se disponía del resultado de realizar una fotogrametría sobre la imagen del Giraldillo (Figura. 5.4). Ésta fue llevada a cabo por Antonio Almagro, de la Escuela de Estudios Árabes de Granada. Mediante esta representación la geometría del Giraldillo se definía por una serie de líneas distribuidas en el espacio. Este conjunto de líneas daban una información detallada de la figura en muchos aspectos pero resultaba insuficiente en cuanto a la representación volumétrica de la pieza, debido seguramente a que se realizó a partir de imágenes tomadas del frente y la espalda de la Velea, pero no del perfil.

Levantamiento topográfico: La información dada por la fotogrametría necesitaba ser completada, por lo que se realizó un levantamiento geométrico del Giraldillo aplicando técnicas de topografía, mediante teodolitos láser. Así se obtuvo una nube de puntos que representaba con una densidad suficiente las zonas visibles del Giraldillo (fig. 5.5). Esta representación fue llevada a cabo gracias a la colaboración del Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla.

Mediciones directas: la información obtenida mediante las dos representaciones anteriores se completó con la observación di-

recta de la pieza, sobre la que se tomaron algunas medidas, principalmente de la estructura de barras.

Las representaciones derivadas de la fotogrametría y del levantamiento topográfico se ensamblaron para complementar la información de ambas. A partir de esta representación conjunta se realizó una representación geométrica simplificada que daría lugar posteriormente al modelo de elementos finitos.

Para ello, se procedió a dividir la representación en rebanadas perpendiculares al eje del Giraldillo. Sobre cada una de estas rebanadas y a una cota intermedia de la misma se trazaba un contorno representativo de ella (fig. 5.6). Posteriormente, cada par de contornos sucesivos se unieron mediante una serie de superficies triangulares.

En las zonas de geometría más compleja estos elementos triangulares se generaron directamente a partir de los puntos de la representación de partida.

Esta primera representación geométrica del modelo aparece en la figura 5.7.

La disposición de los elementos tipo barra (estructura interna y duelas internas unidas a la escultura) se estableció a partir de la representación de la escultura y de la observación y medición directa sobre la pieza completa.

Así pues, se tenía por un lado modelada la lámina de bronce y por otro la estructura de barras, cada una con sus propios nodos y elementos, por lo que quedaba acoplar ambas entre sí y con el eje de sustentación del conjunto para obtener un modelo geométrico completo del Giraldillo.

La forma en que se realiza este acoplamiento es importante desde un punto de vista estructural, ya que determina cómo puede ser la transmisión de esfuerzos entre la escultura, su estructura interna y

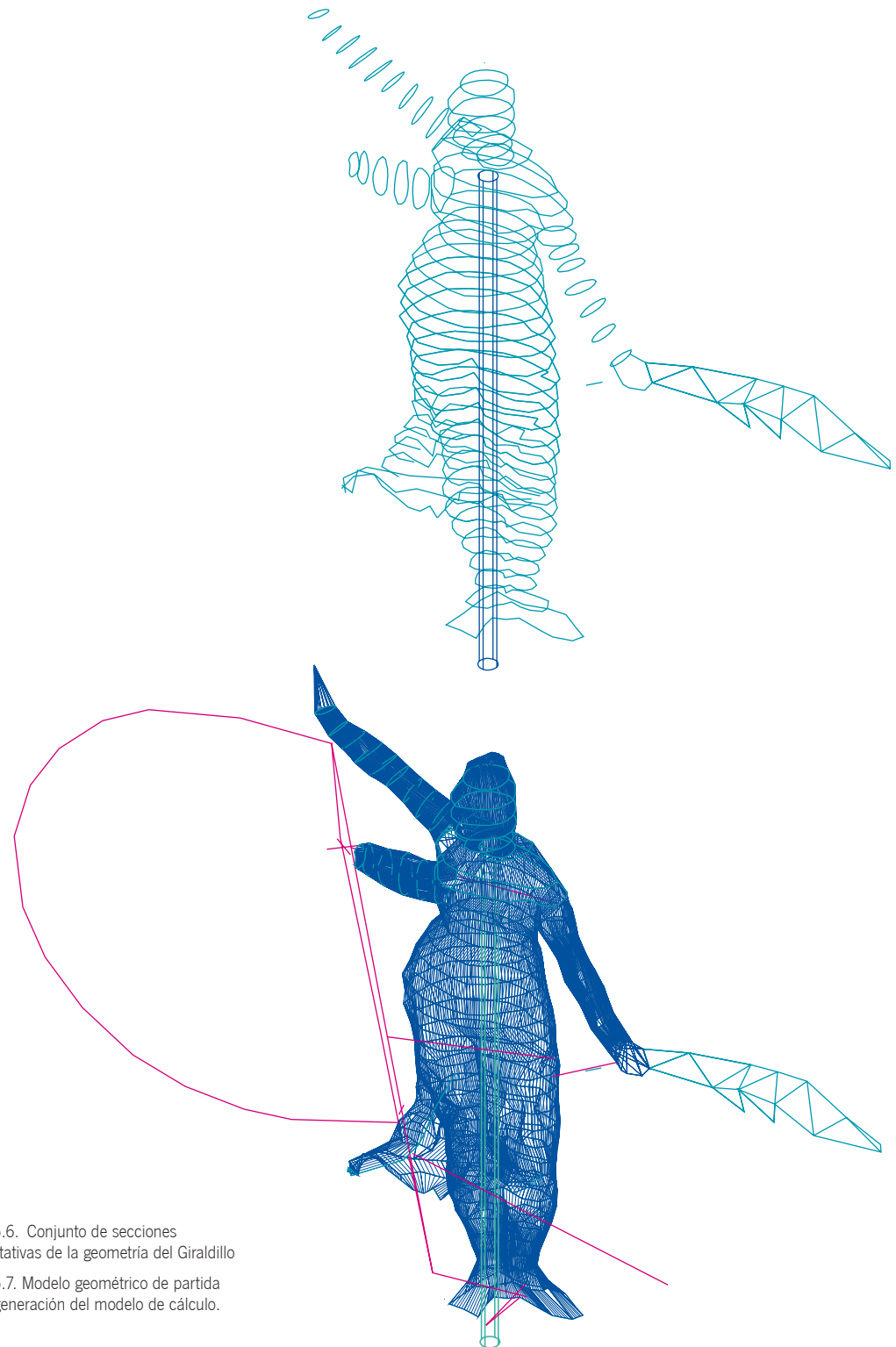


Figura. 5.6. Conjunto de secciones representativas de la geometría del Giraldillo

Figura. 5.7. Modelo geométrico de partida para la generación del modelo de cálculo.

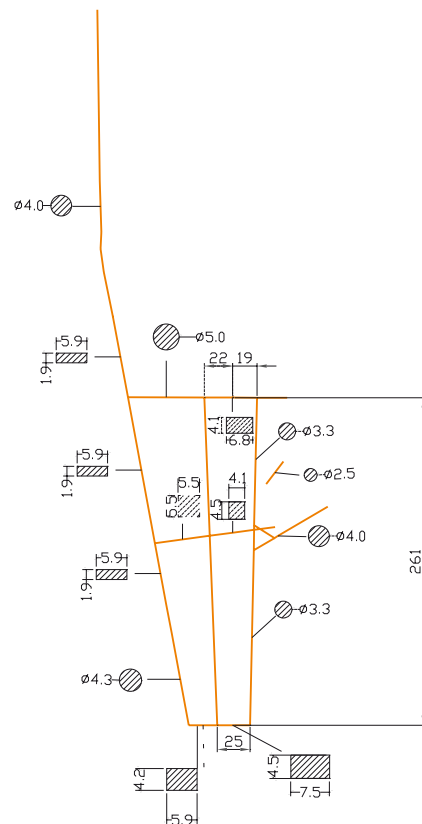


Figura. 5.8. Medidas tomadas sobre la estructura interna para completar la información geométrica necesaria para la construcción del modelo de cálculo

el eje que sustenta el conjunto. El modo en que se unían realmente estos elementos resultaba incierto antes de que se procediera al desmontaje de la estructura interna, por lo que estas uniones se modelaron de la forma que parecía más lógica a la vista de lo que se podía observar en aquel momento.

En líneas generales, se puede decir que los puntos de conexión entre la escultura y su estructura interna se consideraron como uniones flexibles (acoplamiento sólo en desplazamientos, lo cual supone una transmisión de fuerzas pero no de momentos flectores y torsores). Estos puntos de conexión eran los siguientes:

- apoyo de los pies sobre el travesaño inferior
- unión entre el manto y el mástil del lábaro
- travesaño intermedio con muslo izquierdo y derecho
- mano izquierda con la barra de la palma

- pieza de apoyo entre el antebrazo y la cadera izquierda
- travesaño superior con hombro izquierdo, parte interior del nudo de tela existente bajo el brazo derecho, espalda y pecho (este último se eliminaría posteriormente)
- mano derecha con mástil del lábaro
- flejes o duelas internas con la escultura en los puntos correspondientes (conexión mediante roblones)

Evidentemente, para el posterior diseño de la futura estructura interna estas uniones se proyectarían de la forma más adecuada desde un punto de vista estructural, a la vista de los resultados obtenidos con el modelo del Giralddillo correspondiente a su estado al inicio del proceso de restauración.

5.3.2 Propiedades de los elementos del modelo de cálculo

Elementos de la escultura

Los elementos que representan a la escultura son elementos tipo lámina. Para determinar su rigidez es necesario especificar su espesor. Se hacía por tanto imprescindible la determinación del espesor de la lámina de bronce de la escultura para construir un modelo de cálculo que representase con suficiente aproximación su comportamiento mecánico.

La medición de estos espesores se realizó mediante ultrasonidos y fue llevada a cabo por el Grupo de Metalurgia de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, que forma parte de la Comisión Técnica del Giralddillo, tal y como se describe en el capítulo 3.

Como era de esperar, la determinación de estos espesores no resultó sencilla, dada la compleja geometría, falta de homogeneidad, porosidad, presencia de otros materiales, etc. Como resultado de estas mediciones se obtuvo un mapa de la escultura con los valores de los espesores medidos en una gran cantidad

de puntos. Estos valores oscilaban de forma significativa de unas zonas a otras. Para su aplicación sobre el modelo de elementos finitos se aplicaron valores promedio en distintas zonas, procurando estar siempre del lado de la seguridad, es decir, asegurando que la pieza tuviera realmente espesores mayores (lo cual supone mayor resistencia) a los considerados en el cálculo. Los valores aplicados oscilan entre los 2mm (para las zonas en las que se observa una falta de material) y los 60 mm en las zonas más masivas.

Elementos de la estructura interna

Para definir la rigidez de un elemento tipo barra es necesario especificar la geometría de su sección. En la figura 5.8 se recogen las secciones tipo de los distintos elementos que componían la estructura interna del Giralddillo. Estas secciones son aproximadas ya que se trata de elementos de forja, contruidos artesanalmente, por lo que no presentaban una sección constante ni una geometría regular.

5.3.3 Propiedades mecánicas de los materiales

Para terminar de definir el modelo de cálculo queda aplicar las propiedades mecánicas de los dos materiales que intervienen (bronce y hierro), considerando para ambos un comportamiento elástico, lineal e isótropo. Las propiedades de los materiales que intervendrían posteriormente durante la restauración se detallarán más adelante.

Las propiedades fundamentales que hay que tener en cuenta para analizar el comportamiento mecánico de la Veleta son las siguientes (entre paréntesis aparecen las abreviaturas empleadas en las tablas de propiedades):

- Módulo de elasticidad (E): define la rigidez del material
- Módulo de elasticidad transversal (G): define la rigidez del material ante esfuerzos tangenciales

- Coeficiente de dilatación térmica (α): define la deformación del material ante cambios de temperatura
- Densidad (ρ)
- Límite elástico del material (σ_E): valor de tensión que puede alcanzar el material sin sufrir deformaciones permanentes
- Límite de rotura (σ_R): valor máximo de tensión que puede soportar el material antes de romperse

El límite elástico del material (σ_E) y su límite de rotura (σ_R), son dos propiedades fundamentales a la hora de analizar los resultados y evaluar el peligro de plastificación del material o incluso de rotura, si se llegase a hacer un cálculo plástico.

Hay que tener en cuenta que, para cualquier material, no se pueden definir unos valores exactos para el conjunto de las propiedades definidas anteriormente, dado que tienen un cierto carácter aleatorio. Por tanto, desde un punto de vista práctico lo que se hace es determinar unos valores característicos para estas propiedades sobre una base estadística. Estos valores son los que finalmente se utilizan a la hora de realizar cualquier tipo de análisis en el que intervengan estas propiedades.

En el caso del Giralddillo la determinación de estas propiedades resultaba complicada dada la imposibilidad de realizar ensayos mecánicos sobre probetas de estos materiales. Además, dada su falta de homogeneidad, se necesitarían un gran número de probetas para realizar la caracterización mediante estos ensayos. Por otro lado, estos materiales eran singulares por su antigüedad y proceso de fabricación, sin una composición controlada y normalizada como ocurre en los materiales que hoy día se manejan en ingeniería.

Así pues, se adoptaron unos valores para estas propiedades en función de otras características que sí se pudieron determinar como la composición química, estructura metalográfica o dureza superficial. Esta información fue facilitada por el Grupo de Metalurgia de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

Propiedades del bronce

La composición química del bronce era conocida en varios puntos gracias a una serie de metalografías de las cuales se desprendería que el bronce que constituye el Giraldillo es una aleación ternaria de cobre, estaño (alrededor del 1%) y plomo (entre el 7% y el 20%, con una proporción típica del 12%). Las propiedades de este bronce se han estimado basándose en los datos existentes sobre este tipo de aleaciones en la literatura especializada y sobre ensayos mecánicos realizados sobre probetas extraídas de placas de bronce fundido con unas características lo más parecidas posibles al bronce del Giraldillo.

El límite elástico y de rotura para este material, según los datos de la literatura, debían ser de al menos 80 y 150 MPa, respectivamente. Sin embargo, en los ensayos realizados sobre probetas fabricadas con un bronce similar se obtuvieron valores menores. En los cálculos se adoptaron finalmente valores que permitieran asegurar que serían superados por el material original, y que se recogen en la tabla 5.1.

Tabla 5.1.
Propiedades del bronce del Giraldillo consideradas en los cálculos

Módulo de Elasticidad	(GPa)	70
Módulo de Poisson		0,35
Módulo de cizalladura	(GPa)	26
Límite elástico	(MPa)	50
Límite de rotura	(MPa)	80
Densidad	(kg/m³)	9.000
Coef. de dilatación térmica	(°C ⁻¹)	18 · 10 ⁻⁶

Propiedades del hierro

La estructura interna del Giraldillo fabricada y colocada en 1770 estaba compuesta por hierro pudelado o forjado. Para la determinación de sus propiedades se partió de unos ensayos de dureza superficial que arrojaron un resultado de 35 Rockwell B. Los valores de las distintas propiedades se han obtenido de la literatura para hierros de similares características.

En los casos del módulo de elasticidad, modulo de elasticidad transversal y coeficiente de dilatación, los valores son muy similares a los del acero convencional de hoy día. La determinación del límite de rotura y el límite elástico fue más compleja porque dependiendo del tipo de hierro los valores oscilan mucho. El límite elástico se puede encontrar entre 130 MPa y 260 MPa, y el límite de rotura entre 260 MPa y 380 MPa. El límite de rotura se puede correlacionar con la dureza superficial (dureza Brinell) mediante la siguiente expresión aproximada:

$\sigma_R \text{ (MPa)} = 3,45 \cdot HB$

Dada la equivalencia entre la dureza Rockwell B y la dureza Brinell, se obtiene una dureza Brinell de 75 HB y por consiguiente un límite de rotura de 260 MPa. Según los valores mencionados anteriormente y para aumentar el nivel de seguridad se decidió adoptar un valor de cálculo de 130 MPa para el límite elástico y 260 MPa para el límite de rotura; pero teniendo siempre en cuenta que estos valores son los menores de entre los posibles encontrados y con toda seguridad las características mecánicas del material sean mejores.

Tabla 5.2.
Propiedades del hierro de la estructura interna del Giraldillo consideradas en los cálculos

E	ν	G	σ_E	σ_R	Dens.	α
(GPa)		(GPa)	(MPa)	(MPa)	(kg/m³)	(°C ⁻¹)
210	0,3	81	130	260	7.870	12 · 10 ⁻⁶

5.4 Análisis del modelo de cálculo

5.4.1 Acciones consideradas

Para el análisis del comportamiento mecánico del Giraltillo es necesario considerar las distintas solicitaciones que pueden afectarle a lo largo de su historia. Éstas son de varios tipos: peso propio, variaciones térmicas, viento y sismos.

La consideración de estas acciones en los cálculos se ha realizado teniendo en cuenta la normativa vigente en el momento de llevarlos a cabo: Norma Básica en la Edificación, Acciones en la Edificación (NBE AE-88), y siguiendo las recomendaciones de ésta se ha considerado la acción sísmica mediante la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-94.

Además, se han tenido en cuenta valores experimentales y algunos modelos de cálculo para evaluar algunos parámetros necesarios para esas acciones, tal y como se verá más adelante.

Con todo esto se obtienen unos valores característicos para cada una de las cargas consideradas (gravitatorias, térmicas, de viento y sísmicas). Estas acciones características pueden actuar simultáneamente, lo cual se tiene en cuenta mediante una combinación ponderada de las mismas (acción combinada de distintas cargas multiplicadas por sus correspondientes coeficientes de mayoración), dando lugar a lo que se conoce como hipótesis de carga. Estas hipótesis y los correspondientes coeficientes de ponderación para cada acción se han configurado según lo estipulado en la Norma Básica de la Edificación, Estructuras de Acero (NBE EA-95).

Se han considerado 3 tipos de acciones térmicas, 2 tipos de acciones debidas al viento y 2 tipos de acción sísmica. Así, las acciones consideradas son las siguientes:

1. peso propio
2. acción térmica de calentamiento uniforme hasta una temperatura de 55°C
3. acción térmica de enfriamiento uniforme hasta una temperatura de -5°C
4. acción térmica de radiación solar
5. acción del viento incidiendo frontalmente sobre la Veleta
6. acción del viento con el Giraltillo orientado (viento lateral)
7. acción sísmica frontal
8. acción sísmica lateral

Tal y como se verá en el apartado correspondiente al análisis de resultados, en primer lugar se estudia el efecto de cada acción por separado, después se obtienen y analizan los resultados obtenidos con las distintas hipótesis de carga combinada, y finalmente se analiza el conjunto de resultados para sacar conclusiones acerca del comportamiento mecánico del conjunto, los efectos y resultados más desfavorables, etc.

Esto se resume fundamentalmente en analizar una serie de condiciones que ha de cumplir toda estructura y que sirve para garantizar la seguridad de la pieza:

- El conjunto como estructura ha de ser estáticamente estable
- En ningún caso se puede llegar a la condición de agotamiento del material. Por tratarse de un análisis lineal y elástico esta condición se reduce a que la tensión mecánica en cualquier punto (tensión equivalente de Von Mises) no supere el límite elástico del material. Es importante señalar que la superación de este valor no supone en absoluto el agotamiento real de la capacidad resistente del material, sino que supondría una plastificación del mismo, lo cual podría ser admisible en la mayoría de los casos.
- Los desplazamientos se deben mantener dentro de unos niveles que mantengan a la estructura en condiciones de servicio.

En el caso del Giralddillo, esta condición es difícil de establecer y no es relevante ya que se puede considerar que la condición de resistencia es la que realmente condicionará el análisis.

A continuación se explica brevemente la forma en que se ha considerado cada una de las acciones que intervienen en el análisis.

5.4.1.1 Peso propio

Como peso propio se denomina al efecto de la gravedad sobre cada uno de los elementos que componen la Veleta (la lámina de bronce de la escultura, lábaro, palma, estructura interna, duelas y eje que sostiene el conjunto). La peana y la tinaja no se consideran ya que apoyan sobre la piedra de la torre.

Evidentemente, esta carga gravitatoria actúa permanentemente, por lo que aparece en todas las hipótesis de carga. La consideración de su efecto se tiene en cuenta a través de la densidad de cada uno de los materiales que intervienen, cuyos valores se dieron anteriormente.

5.4.1.2 Acciones térmicas

Como es bien sabido, los materiales se deforman por efecto de la variación de temperatura. Cuando una pieza puede deformarse libremente bajo la acción de una distribución uniforme o lineal de temperatura en su interior, la pieza no sufre tensiones mecánicas. Por el contrario, si tiene restricciones a su libre deformación aparecerán dichas tensiones.

Las variaciones de temperatura sobre el Giralddillo producen esfuerzos mecánicos sobre la escultura y su estructura interna, debido fundamentalmente a los diferentes coeficientes de dilatación de los materiales que lo componen ($1,8 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para el bronce y $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para el hierro). Esta diferencia hace que ambos materiales reaccionen de forma distinta ante variaciones de temperatura, y la unión entre la escultura y su estructura interna supone

una restricción a la deformación de ambos, con la consecuente aparición de esfuerzos mecánicos.

La acción de las variaciones de temperatura sobre el Giralddillo vendrá dada por la distribución de temperaturas que se produce en todos sus puntos y en cada momento. Como esta información es imposible de conocer y difícil de manejar aún en el caso de disponer de ella, además de resultar poco práctico, lo que se hace es considerar una serie de distribuciones de temperatura que sean las más desfavorables y características que puedan producirse, cubriendo de esta forma todos los casos posibles de la forma más segura.

Así, se han considerado tres situaciones extremas:

- 1: *calentamiento uniforme*.
- 2: *enfriamiento uniforme*.
- 3: *soleamiento* (distribución variable teniendo en cuenta la radiación solar).

El primer caso se daría en verano a mediodía, cuando se ve sometido a la mayor temperatura del aire y a la mayor radiación solar incidiendo sobre El Giralddillo. Esto produciría un incremento de temperatura uniforme y cuyo valor sería el mayor que se produciría en todo el año.

El segundo caso se daría en invierno de madrugada, cuando la temperatura del aire es la más baja del año y la noche es despejada de forma que el Giralddillo pierde energía por radiación hacia la atmósfera.

Para el tercer caso, de las distintas distribuciones de temperatura no uniformes que se pueden dar sobre el Giralddillo, se ha considerado la más desfavorable posible desde un punto de vista mecánico.

Éste se daría al mediodía en invierno, cuando la temperatura del aire es baja pero si el día es despejado puede haber una fuerte radiación solar, por lo que en la parte orientada hacia el sol habría

temperaturas altas y en la orientada a la sombra las temperaturas serían bajas. Esto produciría una dilatación en la zona de sol y una contracción en la zona de sombra.

Para establecer la distribución de temperaturas en los tres casos mencionados se han usado tres fuentes distintas:

- **experimental:** registros de un sistema de control realizados entre abril de 1999 y junio de 2000 por la empresa *Kinesia Ingeniería de Auscultación*. Se registraron, entre otras, las siguientes variables: temperatura ambiente en la cumbre de la Giralda y temperatura en varios puntos de la Réplica del Giraldillo, tanto en su superficie como en el eje.
- **analítica:** resolución analítica del problema térmico en un modelo simplificado. Esta solución sólo pretende dar un orden de magnitud para apoyar los valores experimentales.
- **normativa:** recomendaciones de la norma NBE AE 88 sobre los incrementos térmicos a considerar en las acciones térmicas.

Para determinar algunos datos relativos a la radiación se ha consultado bibliografía especializada, según la cual la radiación térmica puede encontrarse en valores próximos a 1000 W/m^2 para estas latitudes como valor característico, y se puede estimar que la *temperatura de la atmósfera* puede alcanzar los -6°C como valor mínimo. Para el valor de la emisividad superficial del bronce oxidado se han consultado tablas de propiedades estimándose que un valor de 0,8 puede ser aceptable.

Los coeficientes de película exteriores e interiores se han obtenido de la Norma Básica de la Edificación, Condiciones Térmicas en los Edificios (NBE CT 79) en su Anexo 2 (Cálculo de coeficientes de transmisión de cerramientos). Para el coeficiente de película exterior se estima un valor de $17 \text{ W/(m}^2\cdot^\circ\text{C)}$ y para el coeficiente de película interior de $9 \text{ W/(m}^2\cdot^\circ\text{C)}$.

Las temperaturas exteriores se han obtenido consultando las normas *UNE 100001:1985 Condiciones climáticas para los proyec-*

tos y UNE 1000014 Condiciones exteriores de cálculo. Utilizando los datos meteorológicos obtenidos con un nivel percentil del 1% se ha estimado una temperatura de $37,8^\circ\text{C}$ como máxima y de $0,4^\circ\text{C}$ como mínima. Para el caso del soleamiento se ha considerado una temperatura exterior de 15°C típica en un día de invierno soleado.

Con toda esta información, se calcularon las distintas distribuciones de temperatura que se debían aplicar al modelo para considerar el efecto de las distintas acciones térmicas: temperatura superior uniforme, temperatura inferior uniforme y soleamiento. Estos cálculos se resumen a continuación para cada caso.

Calentamiento uniforme

En esta situación, la temperatura será superior a la máxima exterior de $37,8^\circ\text{C}$ debido a la incidencia del sol, dependiendo su valor de la cantidad de radiación recibida. Al resolver un sencillo balance térmico se obtuvo una temperatura de la superficie de 55°C . Los datos registrados experimentalmente dan una temperatura en torno a los 50°C , mientras que la Norma recomienda un incremento de 30°C sobre la temperatura de referencia para una estructura metálica a la intemperie y expuesta a la radiación solar directa, lo cual supondría también considerar una temperatura de 55°C dado que la temperatura de referencia adoptada es de 25°C . Así pues, parece razonable considerar una temperatura de 55°C tal y como recomienda la Norma, estando además del lado de la seguridad respecto a los valores experimentales.

Enfriamiento uniforme

En este caso la temperatura será inferior a la mínima exterior de $0,4^\circ\text{C}$, debido a la radiación del Giraldillo hacia la atmósfera. La diferencia de temperaturas dependerá de la diferencia de temperatura entre la atmósfera y la superficie del Giraldillo. Al resolver el balance térmico se obtuvo una temperatura de la superficie de -1°C , mientras que los datos registrados experimentalmente dan una temperatura mínima en torno a 1°C y la Norma recomienda

un decremento de 30°C sobre la temperatura de referencia para un metal que está expuesto a la radiación solar sin ninguna protección. Como la temperatura de referencia adoptada es de 25°C, se obtendría según la Norma una temperatura mínima de -5°C, por lo que parece razonable considerar ésta como valor mínimo de temperatura en el Giraldillo y así estar del lado de la seguridad.

Soleamiento

Como ya se comentó, la situación más desfavorable en cuanto a la existencia de gradientes de temperatura, podrá tener lugar al mediodía en invierno, cuando la temperatura del aire es baja pero si el día es despejado puede haber una fuerte radiación solar.

Así, se ha considerado una temperatura exterior de cálculo de 15°C, que será la temperatura de la zona que no reciba radiación solar (zona *a la sombra*) mientras que en la zona sobre la que incida la radiación solar habrá un calentamiento cuyo valor dependerá de la cantidad de radiación incidente. Al resolver el balance se obtuvo un incremento de temperatura de 25°C con respecto a la ambiental, mientras que los registros de temperatura dan una diferencia máxima entre la temperatura frontal y dorsal en torno a los 20°C. Según estos valores, se optó por tomar un incremento de 25°C, ya que resulta más seguro, y por tanto introducir 40°C en la zona irradiada por el Sol y 15°C en la zona en sombra.

Otro factor a tener en cuenta al calcular la distribución de temperaturas era la posición del Giraldillo con respecto al Sol. Para ello, se ha considerado en principio la situación más desfavorable, que por otro lado es también la más probable según la dirección dominante de los vientos de Sevilla. Así, se ha considerado que la radiación solar incide directamente sobre la parte frontal de la imagen, con una inclinación de 45° respecto a la horizontal, dada la latitud de Sevilla y la inclinación de la Tierra con respecto al plano de la eclíptica.

Así, la temperatura será de 40°C en una zona angular de 90° en la que está incidiendo el sol frontalmente y de 15 °C en una zona angular de 90° que está en la espalda y está completamente en sombra, mientras que entre estas dos zonas habrá otra intermedia a cada lado en la que hay una transición lineal entre 40°C y 15°C. A cada uno de los elementos tipo lámina del modelo que representan a la escultura se le aplica por tanto una temperatura determinada que se calcula en función de su posición y orientación con respecto al Sol.

A las barras de la estructura se les ha impuesto una temperatura de 35°C en caso de que reciban radiación solar (incluida la barra que está embebida en la palma), ya que en ellas la convección será más importante que en el caso de la lámina y por tanto su temperatura será inferior. En las barras interiores se ha considerado una temperatura de 27°C (intermedia entre los 15°C de la parte dorsal y los 40°C de la frontal). Los flejes internos, por estar junto a la lámina tendrán una temperatura similar a la de ésta aunque menos extrema, por lo que se ha considerado que los situados en la parte frontal puedan estar a 35°C, los de la parte dorsal a 20°C, y el del costado derecho a 25°C.

5.4.1.3 Acción del viento

Cuando incide el viento sobre un cuerpo produce una distribución de presiones sobre su superficie, provocando una presión en la cara sobre la que incide la corriente (barlovento) y succión en la cara en la que la corriente se desprende del cuerpo (sotavento). Entre estas dos zonas hay otra en la que se pasa de presión a succión y la corriente se empieza a desprender de la superficie. La magnitud y localización de las presiones y succiones depende de la velocidad y dirección del viento y de la forma de la superficie sobre la que incide.

Para el cálculo de la distribución de presiones que el viento puede producir sobre el Giraldillo se ha utilizado la Norma NBE AE88, que tiene en cuenta distintos factores como la altura del objeto,

situación topográfica, velocidad característica del viento, tipo de superficie, esbeltez. Según estos factores se obtiene la presión estática que ejerce el viento a partir de una serie de coeficientes que multiplican a la presión dinámica del viento. Esto equivale a modelar el hecho de que una corriente de aire moviéndose con cierta velocidad tiene una presión dinámica que se convierte en estática al frenarse cuando impacta con una superficie.

Para el estudio del efecto de la acción del viento sobre el Giraldisillo, se han considerado dos casos atendiendo al comportamiento observado al someter a un ensayo con un ventilador a la Réplica que sustituyó al Giraldisillo original (ensayo realizado por *Kinesia Ingeniería de Auscultación S.A.*). Se observó que la copia no giraba hasta que el viento no soplaba con velocidades entre 10 y 40 km/h, según la posición de la Veleta, de forma que se generaban pares de giro entre 26 y 61 kpm, que eran capaces de iniciar el movimiento de rotación de la Veleta sobre el eje. Valores muy similares de velocidad del viento y pares de giro fueron recogidos por esta misma empresa cuando analizó el movimiento del Giraldisillo original cuando aún se encontraba sobre la Giralda, lo que ha llevado a considerar dos casos distintos para analizar la acción del viento:

1. Viento máximo que puede incidir frontalmente a la imagen antes de iniciar el giro. Para esta situación, y según la información anterior, se ha considerado una velocidad del viento de 40 km/h (11 m/s), con lo que se estará considerando así la situación más desfavorable que pueda darse mientras el Giraldisillo no esté orientado en la dirección del viento.
2. Viento máximo de cálculo incidiendo lateralmente sobre el Giraldisillo. En esta situación se considera la velocidad del viento que especifica la normativa correspondiente, que es de 45 m/s (162 km/h). Evidentemente, bajo la acción del viento con tal intensidad, el Giraldisillo estará orientado según la dirección de dicho viento, y por tanto éste incidirá lateralmente sobre la imagen.

5.4.1.4 Acción sísmica

Para la evaluación de las acciones sísmicas se empleó la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE94. Esta norma define el tipo de excitación dinámica que se debe considerar en el cálculo de una estructura para tener en cuenta el posible efecto de un terremoto excitando la cimentación de dicha estructura.

Este tipo de excitación se modela en función de la localización geográfica (Sevilla), importancia de la construcción (en este caso se trata de un monumento histórico), tipo de terreno (se ha tomado el caso más desfavorable), etc.

Además, hace falta conocer el amortiguamiento de la estructura en cuestión. Para ello, se ha tenido en cuenta los resultados de los ensayos dinámicos realizados sobre la réplica del Giraldisillo que fueron llevados a cabo por *Kinesia Ingeniería de Auscultación S.A.* En estos ensayos se observó que, para la primera frecuencia natural registrada (1,37 Hz), el amortiguamiento era del 0,84% del crítico. Tomando como base este resultado se adoptó un valor del amortiguamiento del 1% del crítico para todo el rango de frecuencias.

En el caso de la acción sísmica hay que tener en cuenta que el modelo de cálculo debía ser sensiblemente distinto al del resto de casos de carga. La razón es que para considerar el efecto de estas acciones sobre la Veleta, tan solo se hace necesario considerar al Giraldisillo apoyado sobre su eje, y éste a su vez empotrado en la torre, lo que se modela sencillamente empotrando la base del eje. Esto es así porque la torre de la Giralda no afecta en absoluto en estos casos. Sin embargo, a la hora de considerar el efecto de un terremoto, es evidente que éste excitará la base de la torre y será el movimiento de ésta lo que produzca el movimiento del empotramiento del eje del Giraldisillo, que se traduce a su vez en un movimiento de la Veleta.

Para representar a la Giralda tan solo era necesario realizar un modelo sencillo de la misma que sirviera para representar

correctamente la transmisión de movimientos desde su base a la veleta.

En este modelado de la torre se emplearon datos sobre la geometría y el peso de las distintas partes de la torre que se pudieron encontrar en el libro *Turris Fortísima* (Jiménez, 1988). Así, se abordó el problema de hallar analíticamente la frecuencia natural del sistema de dos grados de libertad formado por el primer cuerpo de la torre (conocido como Caña, que va desde el suelo hasta la Azotea de las Azucenas) y el conjunto de los cuerpos superiores. Para ello se hizo uso de expresiones aproximadas que permiten hallar el valor de la frecuencia natural de cada una de estas partes en función de su geometría, y con estas frecuencias y las masas de cada una se obtuvo la rigidez.

Con estos valores de rigidez y masa se construyeron las matrices de masa y rigidez del sistema y a partir de ahí se obtuvo la primera frecuencia natural, que resultó ser de 0,93 Hz, lo que equivale a un período de 1,08 s.

El valor real de este periodo debe ser en torno a un 25% mayor debido a la interacción suelo-estructura, por lo que se obtendría un valor final del periodo del sistema de 1,44 s (frecuencia 0,694 Hz).

Este valor obtenido se aproxima bastante al recogido en la tesis doctoral de A. Jaramillo (1983). En esta tesis se incluyen datos experimentales sobre las primeras frecuencias naturales y la amortiguación de los modos de la Giralda (obtenidos con las medidas de dos sismógrafos). Según este trabajo, el mayor periodo era de 1,55 s y su amortiguación el 3,5% del amortiguamiento crítico.

El valor del período calculado era por tanto aceptable, y en cuanto al amortiguamiento se decidió suponer un 1% del crítico en lugar del 3,5% que daba dicha tesis, ya que así se realizaría un cálculo más seguro.

Así pues, partiendo de este valor de la primera frecuencia natural de la torre, su masa y su geometría, se incluyó en el modelo una viga en ménsula empotrada en el terreno y unida en su extremo a la base del eje del Giraldillo. Este elemento en ménsula serviría para modelar la Giralda como transmisor de los movimientos sísmicos desde su base hasta el Giraldillo.

5.4.2 Primeros resultados: modelo “sin daños”

Como ya se explicó al inicio del apartado correspondiente a la generación del modelo de cálculo, en primer lugar se generó un modelo del Giraldillo en el que no se incluía ninguno de los daños o defectos que presentaba la escultura y su estructura interna. Este modelo fue analizado sometiendo a los distintos tipos de cargas y sus combinaciones, y sirvió para obtener unos primeros resultados y conclusiones sobre el comportamiento del Giraldillo y sobre el modelo utilizado. Éste necesitaría lógicamente algunas modificaciones, dado que un modelo de tal complejidad siempre requiere sucesivas fases de prueba y análisis para perfeccionarlo, y llegar finalmente a un modelo que se juzgue adecuado para el grado de aproximación que se desea.

Por otro lado, al no incluir ningún tipo de defecto, su análisis sirvió para determinar si las acciones a las que se ha visto sometido el Giraldillo podrían justificar alguno de los daños que presenta en la actualidad.

La descripción de resultados que se realiza en este apartado es poco detallada, ya que fueron sólo provisionales y más adelante se presentarán otros con mayor validez, sirviendo estos primeros para dar una idea de cómo fue el largo proceso de validación y análisis del modelo.

Tras este primer estudio del comportamiento de la Veleta se pudo concluir que las cargas que producían mayores tensiones en la escultura eran el sismo y el calentamiento uniforme (o enfria-

miento, ya que al ser un medio elástico lineal la respuesta es la misma solo que cambiada de signo). El sismo producía un valor mayor de la tensión pero de forma muy concentrada en los apoyos de la cruceta intermedia, mientras que el calentamiento producía tensiones importantes en zonas más extensas. El peso propio producía también tensiones apreciables pero mucho menores que en los casos anteriores. Lo más sorprendente fue que el viento producía un efecto leve, sobre todo cuando el Giraldillo estaba orientado según la dirección del viento, situación en la que las tensiones producidas en la lámina eran insignificantes.

En la estructura interna las cargas de sismo y variación térmica uniforme eran también las más desfavorables, pero la acción del viento era más significativa que en la lámina, sobre todo en las barras rigidizadoras del lábaro y en la cruceta superior.

Combinando las distintas acciones características con los coeficientes de ponderación correspondientes, se observó que la combinación más desfavorable era la de peso propio con viento frontal y con incremento o decremento térmico, según la parte del Giraldillo que se tratase.

En cualquier caso, se comprobó que las tensiones eran lo suficientemente bajas como para creer que el Giraldillo estaba sobradamente dimensionado para soportar los distintos tipos de carga, ya que las mayores tensiones no superaban el 50% del valor del límite elástico considerado, y éstas además se encontraban muy localizadas en los puntos de unión de las piezas de hierro con la lámina de bronce, por lo que podían ser debidas a la forma de modelar estas uniones y no corresponderse con los valores reales, que serían inferiores.

La conclusión más importante que se pudo sacar de este primer análisis, es que los niveles de tensión calculados llevaban a pensar que la mayoría de los daños que presentaba la figura de bronce debían provenir de la construcción original o de las manipulaciones sufridas a lo largo de su historia, fundamentalmente

durante su intervención de 1770. Estos daños no parecían ser debidos a la acción directa de las distintas solicitaciones mecánicas a las que se ha visto sometida la Veleta mientras ha estado en lo más alto de la Giralda. Por otro lado, se confiaba en que las futuras mejoras del modelo, incluyendo el modelado de los defectos que presentaba, no harían sino corroborar el margen de seguridad que presentaba el Giraldillo.

5.4.3 Mejoras en el modelo: modelo “con daños”

Una vez analizado el modelo descrito anteriormente, se realizaron una serie de mejoras encaminadas a obtener un mayor grado de precisión en los resultados y a reflejar de una manera fiel el comportamiento mecánico del Giraldillo en el estado en que se encontraba al inicio del proceso de restauración.

Así, se pueden distinguir entre algunas modificaciones realizadas para mejorar el modelo anterior y el modelado de los distintos daños o defectos que presentaba el Giraldillo.

Entre las primeras cabe destacar la obtención de una mejor representación de la distribución de masas en el Giraldillo y un mejor modelado de las conexiones de la escultura con su estructura y refuerzos internos.

La mejora de la distribución de masas se explica con detalle en el apartado sobre resultados obtenidos bajo la acción del peso propio, ya que es la consideración de esta acción de cálculo la que sirvió para analizar en profundidad este aspecto.

En cuanto a la consideración de daños, defectos, discontinuidades, etc. que presentaba el Giraldillo al inicio del proceso de restauración, se incluyeron los siguientes:

- Agujero del pecho con tapa atornillada
- Portezuela del costado derecho

- Grietas en el abdomen
- Grieta horizontal en lado derecho del pecho
- Grietas que parten del apoyo de la espalda
- Apósito de la cadera izquierda
- Apósito en la cintura, por la parte trasera, y grietas por debajo suya
- Apósitos sobre unión de la cruceta intermedia al muslo izquierdo y grieta por debajo de ellos que llega hasta la parte anterior del muslo.
- Apósitos delantero y trasero ubicados entre las piernas (por encima de los pies)
- Apósito de la parte posterior del cuello y grietas que parten de él por ambos lados
- Apósito y grietas del brazo derecho
- Grieta interna a la altura de la pelvis
- Apósito y grieta en el lado izquierdo del pecho
- Apósitos en el hombro izquierdo sobre la unión de la cruceta superior
- Apósito del brazo izquierdo
- Pérdida de material en la parte superior del saliente de tela del lado derecho
- En la estructura interna: pérdida de la parte inferior del tirante izquierdo de la estructura interna, desaparición del brazo de la cruceta superior que iba al pecho y sustitución de éste por una serie de pletinas inoxidables que unen el núcleo del cojinete con los dos tirantes de la estructura y con los dos flejes delanteros.

Todas estas irregularidades o imperfecciones que presentaba la Velea se tuvieron en cuenta en base a lo que se conocía sobre su estado en aquel momento, tal y como se recoge en los capítulos 3 y 4. Es decir, el desmontaje de la estructura y refuerzos internos, así como de los apósitos externos permitiría posteriormente com-

probar realmente cuál era el estado de conservación de cada uno de los elementos, incluyendo la lámina de bronce de la escultura. En cualquier caso, se mantuvo el criterio de estar siempre del lado de la seguridad, realizando un modelo de cálculo que fuese menos resistente que la figura real.

5.4.4 Resultados obtenidos

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos con un modelo lo suficientemente realista como para poder sacar conclusiones acerca del comportamiento mecánico del Giraldirlo en el estado en que se encontraba antes de su restauración. Aún así, el modelo sufriría posteriormente modificaciones para depurar su funcionamiento de cara al futuro diseño de la nueva estructura interna, pero este hecho no invalida los resultados que aquí se van a presentar.

Las solicitudes sobre la Velea que se han tenido en cuenta para el análisis son las que se describieron en el apartado correspondiente: peso propio, calentamiento y enfriamiento uniforme, soleamiento, viento frontal, viento lateral, y sismo. En primer lugar se ha estudiado el efecto de cada una por separado para saber como responde el Giraldirlo ante la acción de cada una de ellas, y después se ha pasado a analizar las distintas hipótesis de carga, derivadas de la combinación de estas acciones, como se describió también anteriormente.

Del análisis del efecto de cada acción por separado se pudo concluir que el viento lateral apenas tiene efecto sobre la Velea, siendo más significativo el viento frontal, por lo que no se han considerado las hipótesis de carga en las que se combinaba el viento lateral en vez del frontal, ya que las combinaciones con éste último darían lugar con seguridad a situaciones más desfavorables.

Para los comentarios que siguen, hay que aclarar que cuando se hable de tensiones en la lámina de bronce se estará haciendo

referencia, salvo que se indique lo contrario, a las tensiones de comparación según el criterio de Von Mises, que son las que se comparan directamente con el límite elástico del material para predecir su plastificación (el límite elástico considerado para el bronce es de 50 MPa). Para el caso de la estructura de barras, las tensiones máximas de cada elemento habrán de compararse con el límite elástico considerado para el hierro (130 MPa).

También es muy importante tener en cuenta que los valores que aparecen en las leyendas de las figuras que se mostrarán estarán en las correspondientes unidades del sistema internacional (Pa para las tensiones y m para los desplazamientos), y hay que tener siempre presente la relación entre estos valores de la leyenda y sus correspondientes colores que los representan para realizar un análisis adecuado de cada figura.

También hay que decir que se harán pocas referencias a los desplazamientos y formas de las deformadas que se hayan obtenido, ya que el interés radica en la resistencia del conjunto, sin que tenga especial importancia cómo son las pequeñas deformaciones que sufre en cada caso. A pesar de ello se harán comentarios sobre los aspectos más relevantes, que puedan servir para comprender cómo funciona el conjunto.

A continuación se pasa a exponer las observaciones y conclusiones más importantes que se han extraído del análisis sobre el efecto de cada acción o hipótesis de carga, realizando el esfuerzo de síntesis necesario para explicar los resultados de forma comprensible y sencilla. Al final de este capítulo se resumirán las conclusiones más importantes del mismo, resaltando los factores que habría que tener en cuenta a la hora de restaurar la estructura interna.

5.4.4.1 Peso propio.

Análisis de distribución de masas

La respuesta del conjunto de la Velea ante la acción de la gravedad sirve para comprender por un lado el comportamiento de

su estructura de sustentación y, por otro lado, estudiar la distribución de masas del Giraldillo. Esto permite estimar el desequilibrio que presenta la figura, que ha sido un tema de preocupación a lo largo de su historia (construcción en 1567, intervención de 1770 y construcción de la Réplica en 1998), y más aún desde la intervención de los años ochenta, cuando se empezó a plantear que el desequilibrio de la figura podría ser una de las causas de su deterioro y mal funcionamiento como Velea.

Para analizar este aspecto, se han tomado como referencia valores experimentales sobre el peso de distintos elementos, comprobando su correcta consideración en el modelo de cálculo, el cual ha servido a su vez para estudiar la distribución de masas en el conjunto de la Velea.

Durante el proceso de restauración se midió el peso de la escultura con su estructura interna de 1770, sin palma, ni lábaro, ni estandartes. Para ello se emplearon cuatro células de carga que se colocaron sobre los apoyos del soporte sobre el que descansaba la figura en posición horizontal durante el proceso de restauración. Con cada una de estas células de carga se midió el peso que soportaba cada uno de los apoyos del soporte en vacío y con la escultura descansando sobre él. De esta forma se pudo medir el peso de la escultura y estimar la posición de su centro de gravedad en sentido lateral, que es en el que se ha observado históricamente un cierto desequilibrio en el Giraldillo, como es lógico dada su geometría y los elementos que lo componen (en sentido antero-posterior resultaba imposible medir el desequilibrio dado que la escultura descansaba sobre su espalda durante la operación de pesaje).

Así pues, el peso de la escultura con su estructura interna de 1770, sin palma, ni lábaro, ni estandartes resultó ser de 1384 kg, mientras que el centro de gravedad de este conjunto se encuentra localizado lateralmente a 2 cm de la posición del eje de la Velea. Esto indica que la escultura con su estructura interna está muy bien equilibrada.

Sin embargo, para analizar el desequilibrio que realmente presentaba la Veleta hay que averiguar la posición del centro de gravedad del Giraldillo completo, incluyendo lábaro y palma y estandartes. Es decir, una vez comprobado que la escultura con su estructura interna presenta un equilibrio de masas más que satisfactorio, habría que comprobar en qué medida el peso del lábaro y estandartes, ubicados en el lado derecho del Giraldillo, compensaban el peso de la palma, ubicada en el lado contrario.

El peso de la palma (la parte de palma con su barra interna que fue separada del resto previamente a la bajada en el año 1997) resultó ser de 96 kg, mientras que el lábaro pesa 190 kg y los dos estandartes superiores 38 kg.

Estos valores coincidían de manera muy aproximada con los que se tenían en el primer modelo de cálculo generado, salvo el de la escultura con su estructura interna, que resultó ser en principio sensiblemente menor que el obtenido experimentalmente. Esto era debido a dos motivos:

En primer lugar, y tal y como se comentó durante la descripción del proceso de construcción del modelo de cálculo, los espesores de la lámina medidos experimentalmente arrojaban valores muy dispares entre unas zonas y otras, y su medición podía resultar poco precisa en algunos puntos, por lo que a la hora de aplicar espesores a la escultura en el modelo se consideraron siempre valores que estuvieran con seguridad por debajo de su valor real. De esta forma se estaría del lado de la seguridad, al estar considerándose en los cálculos una lámina de bronce menos rígida y con menor resistencia que la real. Esto sin embargo daba lugar a una subestimación del peso propio de la escultura, es decir, la escultura resultaría más ligera en el modelo que en la realidad. Para solventar este inconveniente, pero manteniendo el nivel de seguridad en los cálculos, lo que se hizo fue aumentar la densidad del bronce a efectos de cálculo. Concretamente, se aumentó en un 15% con respecto a su valor real.

La segunda causa por la que se construyó en primer lugar un modelo de cálculo excesivamente “ligero” fue el no haber considerado el relleno de plomo existente en el brazo izquierdo. Dada la geometría de este brazo, y teniendo en cuenta la elevada densidad del plomo (11000 kg/m^3) se puede estimar que el brazo izquierdo del Giraldillo pesa unos 200 kg. Este hecho se consideró en el modelo de cálculo mediante la aplicación del aumento necesario en la densidad de los elementos tipo lámina con que se modelaba el brazo.

El hecho de que este brazo hubiese sido rellenado con plomo indica claramente que la preocupación sobre el desequilibrio del Giraldillo existió ya en alguna intervención histórica, en la que se intentó corregir la inclinación que adoptaba la Veleta hacia el lado del lábaro. Este relleno de plomo no resulta suficiente para equilibrar la figura, pero resulta fundamental para mantener la figura en una situación relativamente equilibrada.

Una vez realizadas las modificaciones antes citadas sobre el modelo de cálculo generado, y validado éste por su capacidad de reproducir los resultados experimentales antes citados, se obtuvieron los resultados que se representan en la tabla 5.3 en cuanto a la distribución de masas de los elementos que componen el Giraldillo. Estos resultados han de entenderse, al igual que los demás que se presentan a lo largo de este capítulo, como algo aproximado, en la medida en que el modelo de cálculo es capaz de reproducir una realidad tan compleja como es el comportamiento del Giraldillo.

Las coordenadas denominadas como *lateral* y *vertical* que aparecen en la tabla tienen el siguiente significado:

- Coordenada *lateral*: Coordenada en sentido transversal del Giraldillo, contenida en el plano de la estructura, medida desde su eje y con sentido positivo hacia su costado izquierdo
- Coordenada *vertical*: Coordenada vertical, con origen en el apoyo de los pies del Giraldillo.

No se considera el desequilibrio en sentido frontal ya que éste tiene una importancia mucho menor, dada la geometría de la Veleta, y resulta lo suficientemente pequeño como para poder dar cifras con suficiente fiabilidad. No obstante, se comprobó que la Veleta tiende a volcarse ligeramente hacia su espalda, fundamentalmente debido al peso del manto y zona de las nalgas de la escultura. En base a los resultados numéricos se puede estimar que el centro de gravedad de la Veleta puede encontrarse a unos 2 cm de su eje en sentido antero-posterior.

Tabla 5.3. Resumen de resultados sobre distribución de masas de El Giraldillo.

Elemento	Peso (kg)	Coordenadas del centro de gravedad (en m)	
		lateral	vertical
Palma	96	1,53	1,86
Lábaro	190	-1,54	1,97
Escultura con estructura interna	1.384	-0,02	1,73
Estandartes superiores, incluido mástil	35	-1,14	4,3
Conjunto Veleta	1.705	-0,12	1,81

Según se desprende de los resultados anteriores, la Veleta presentaba un desequilibrio que le hacía inclinarse del lado del lábaro, además de la ligera inclinación hacia su parte posterior antes comentada. Sin embargo, este desequilibrio resulta realmente pequeño si se tiene en cuenta la complicada geometría del conjunto, su época y proceso de construcción. Es decir, desde un punto de vista técnico, se puede decir que su diseño como Veleta fue acertado y su construcción precisa.

Mediante un sencillo equilibrio de fuerzas y aplicando ecuaciones básicas de Resistencia de Materiales, se pueden sacar conclusiones importantes sobre el efecto que este desequilibrio pudiera haber tenido en el comportamiento del Giraldillo.

En primer lugar, debido a que el apoyo sobre el cojinete del pecho es incapaz de absorber momentos flectores, la Veleta pivota sobre este punto y se equilibra mediante una fuerza horizontal que aparece entre el travesaño inferior de su estructura interna y el vástago. Mediante un sencillo equilibrio de fuerzas se puede estimar que el valor de esta fuerza horizontal es unos 75 kg, lo cual resulta evidenciado por el hecho de que se podía hacer cabecear manualmente y con facilidad sobre su posición de equilibrio, así como el hecho de que con un peso aproximado de 80 kg colgados del extremo de la palma, la Veleta corregía en gran medida su desequilibrio.

Esta fuerza horizontal es clave a la hora de evaluar la dificultad de la Veleta para girar sobre su eje y funcionar como veleta, ya que esta fuerza supone un rozamiento adicional entre la estructura y el vástago, además del rozamiento en el cojinete del pecho, que hay que vencer para que la Veleta gire.

Dada la geometría del eje que sustentaba al Giraldillo, y las fuerzas del peso de la Veleta antes halladas, se pueden estimar los desplazamientos que sufría el eje bajo la acción del peso de la Veleta. Esto resulta de interés ya que parece claro que cuanto mayor sea la inclinación que pudiera sufrir el vástago, mayor sería el desequilibrio efectivo de la Veleta con respecto al vástago, y mayor sería por tanto la fuerza horizontal equilibradora que aparece entre el travesaño inferior de la estructura interna y el vástago. Así, se obtiene que el desplazamiento horizontal relativo de la punta del eje con respecto al desplazamiento a la altura de los pies de la escultura es de unos 2 mm. Es decir, la inclinación que sufre el vástago bajo la acción del peso de la Veleta es muy pequeña.

Todos estos valores hallados llevan a la conclusión de que el desequilibrio del Giraldillo no justifica en sí mismo su mal funcionamiento como Veleta antes de su restauración. Es cierto que este desequilibrio supone un rozamiento adicional en su movimiento de giro, pero en principio mucho menor que el rozamiento que tiene lugar en su punto de apoyo. Otra cuestión es

que los materiales que intervienen en el rozamiento son distintos en el cojinete del pecho y a la altura de los pies. En el cojinete se produce rozamiento entre la punta del eje de hierro y el propio cojinete que es de un bronce diseñado para soportar esfuerzos de fricción, mientras que a la altura de los pies se produce un contacto hierro-hierro. Evidentemente, este segundo tipo de contacto es mucho menos adecuado, produciendo además un deterioro progresivo de los materiales, que da lugar a su vez a un mayor rozamiento entre ambos. Por su parte, el sistema de cojinete de giro del pecho también sufre su correspondiente deterioro, pero en menor medida.

Todo esto hace que efectivamente el rozamiento existente a la altura de los pies, debido al desequilibrio de la Veleta, pudiera haber ido aumentando a lo largo de la historia del Giralddillo y pasar a ser un serio impedimento a su movimiento de giro. Sin embargo, parece claro que el desequilibrio en sí mismo no es una razón que impida su restauración o que obligue a realizar un equilibrado perfecto de la Veleta. Bastará con disponer los medios adecuados para hacer que este rozamiento sea vencido sin demasiada dificultad por la acción del viento.

En el capítulo referente a la restauración desde un punto de vista estructural se volverá a tratar este tema y se describirá la solución adoptada.

En este apartado no se ha comentado nada acerca del peso de otros elementos que componen el conjunto del Giralddillo, como son la bola o tinaja, la peana y el propio vástago de sustentación del conjunto. El peso de estos elementos no afecta al comportamiento mecánico del Giralddillo, por ser elementos que se apoyan sobre la estructura de la torre. Tan sólo la masa del vástago tiene cierta influencia en el comportamiento dinámico de la Veleta. Sobre el peso de estas piezas no se dispone de datos precisos, pero sí estimados a partir de su geometría y materiales que lo componen. El vástago de hierro sobre el que se apoyaba el Giralddillo, desde la cruceta superior del cuerpo del Penacho hasta su

extremo superior, pesaba unos 500 kg. La tinaja pesa unos 280 kg y la peana unos 50 kg.

Efecto del peso propio sobre la escultura y estructura interna

Una vez analizada la distribución de masas en el conjunto del Giralddillo, queda analizar cómo se comporta la escultura y su estructura interna bajo la acción del peso propio.

De la distribución de masas se desprende que la estructura interna ha de soportar más peso del lado izquierdo (palma y relleno de plomo de brazo izquierdo) que del derecho (lábaro y estandartes), pero en el lado derecho la resultante de la carga se encuentra más próxima al eje, por lo que el resultado final es que el conjunto se encuentra bastante bien equilibrado.

Estos pesos son transmitidos a la estructura interna de la escultura, que finalmente los transmite al eje que sustenta el conjunto a través del cojinete alojado en el travesaño superior. La forma en que la estructura soporta estas cargas no es tan simétrica como la distribución de masas del conjunto.

La estructura recibe por su lado derecho el peso del lábaro, que transmite la carga vertical de su peso fundamentalmente a través de su anclaje superior (130 kg frente a 60 en el inferior). El peso del lábaro queda equilibrado además por un par de fuerzas horizontales de unos 140 kg que traccionan el travesaño superior y comprimen el inferior. Estos esfuerzos axiales en estos elementos son de poca importancia en comparación con la flexión que sufren por la acción de cargas verticales.

El peso de la palma es transmitido a la estructura interna de una forma muy poco adecuada. Uno de los mayores defectos que presentaba el diseño de la estructura interna colocada en 1770 es la unión de la barra de la palma con el resto de la estructura. Esta unión se realizaba a través de un par de argollas por las que pasaba el tirante izquierdo de la estructura, justo por encima y por debajo de la unión de este elemento con el travesaño intermedio.

Este tipo de unión resultaba inadecuada para que la estructura interna recibiera el peso de la palma, el cual era realmente transmitido íntegramente al brazo izquierdo de la escultura, que ya estaba bastante solicitado de por sí con el peso del plomo que contiene en su interior.

Este deficiente diseño tenía una consecuencia añadida, y es que el defectuoso estado en que se encontraba la zona de la unión del travesaño superior con la escultura, hacían que la carga soportada por el brazo no se transmitiese a la estructura a través de esta unión, sino que fuese transmitida por el costado izquierdo de la escultura (que quedaba comprimido) hacia la unión del muslo izquierdo.

Esta sobrecarga en el brazo izquierdo pudiera parecer una justificación del mal estado en que se encontraba la unión del hombro izquierdo. Sin embargo, el hecho de que las grietas y pérdidas de material se encontrasen bien cubiertas por apósitos hacen pensar que ya fueron producidas en el proceso de construcción original o, más probablemente, en el proceso de desmontaje de la estructura original y montaje de la estructura de 1770. En dicho proceso debió abrirse el agujero necesario en esta zona para practicar la unión del hombro, ya que la estructura anterior se unía a través del *moño* existente en esa zona, que todavía aloja lo que debiera ser el extremo de la barra de la estructura original.

El mal estado de esta unión hacía también que la escultura apenas descansase sobre dicho punto. El peso de la escultura se repartía fundamentalmente entre los apoyos del hombro derecho (apoyo en el interior del *nudo de tela*), muslo izquierdo y pies.

El apoyo de la espalda que todavía mantenía el Giraldillo cuando fue desmontado, apenas recibe carga alguna, lo cual es lógico por condición de equilibrio de la escultura, porque es el único punto de apoyo que se encuentra fuera del plano de la estructura. Sin embargo, cuando se analizó el comportamiento del modelo “sin daños” (con la estructura de 1770 íntegra) se comprobó que

los apoyos de pecho y espalda eran los que soportaban la mayor parte del peso de la escultura. Esto quiere decir que estos apoyos solo trabajan en caso de existir los dos (se equilibran el uno con el otro), pero son irrelevantes a efectos de peso propio en el momento que desaparece uno de ellos.

La acción de peso propio es muy útil para estudiar la distribución de masas de la Veleta y comprender de forma más o menos intuitiva cómo funciona la estructura interna, aunque los esfuerzos y tensiones que se producen sobre ella no sean significativos.

Las mayores tensiones que aparecen en la estructura interna por la acción del peso propio tienen lugar en la parte central del travesaño superior (37 MPa) y en la parte superior del tirante izquierdo (36 MPa). Estos valores se encuentran muy alejados de los 130 MPa estimados como valor mínimo del límite elástico del hierro del que se compone la estructura interna de 1770.

El relativamente alto valor de la tensión en el tirante es debido a que se trata de un elemento que no debiera sufrir esfuerzos de flexión, ya que no tiene una sección adecuada para ello, pero ha de soportar esfuerzos de este tipo debido al mal diseño de su unión con la barra de la palma, que apenas le transmite esfuerzos verticales pero sí horizontales.

En el resto de la estructura no se alcanzan valores superiores a los 25 MPa, estando la mayoría de los elementos por debajo de 10 MPa.

Respecto a la escultura de bronce, lo más reseñable es que el costado izquierdo es la zona más cargada, debido a la carga que le llega del brazo y que transmite al apoyo del muslo izquierdo, y que se acentúa por la presencia de apósitos y grietas en esa zona. También aparecen zonas relativamente solicitadas, como son la parte cercana a la zona de apoyo de los pies, especialmente la zona entre las piernas cubierta con apósitos. En cualquier caso, las tensiones que aparecen en estas zonas no superan nunca los

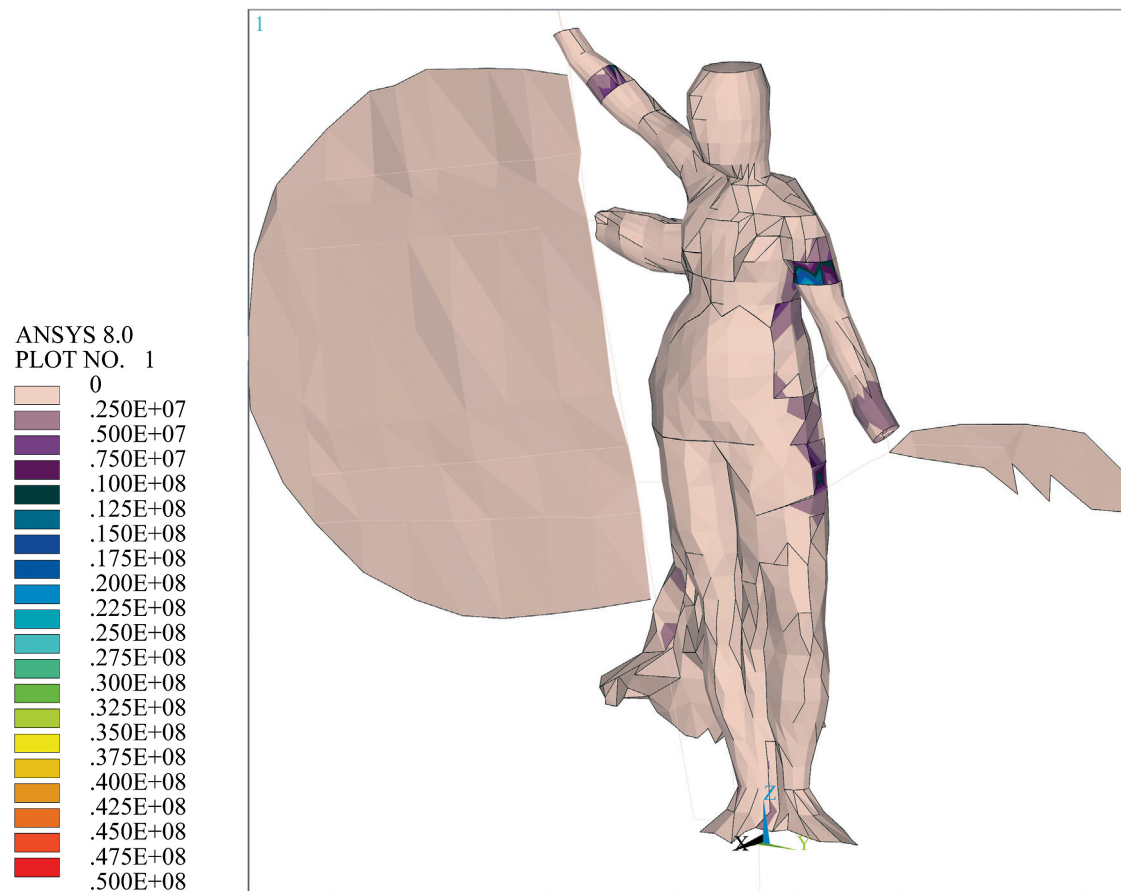


Figura. 5.9. Mapa de tensiones (0-50 MPa) bajo la acción de peso propio.

6 MPa, que es un valor muy por debajo del límite elástico considerado para el bronce de la escultura.

Aparte de estas zonas, se producen algunas concentraciones localizadas en las uniones con el travesaño intermedio y en los apósitos de ambos brazos. En estos casos se trata de zonas concretas en las que el mejor conocimiento de la situación de estos elementos que se tendría al desmontar la estructura interna, permitiría precisar la validez y consideración que merecen estos valores.

Respecto a la deformada del conjunto de la Veleta bajo la acción de peso propio (fig. 5.10) se observa un giro hacia el lado del lábaro, debido al desequilibrio existente, pero los desplazamientos son muy pequeños. Hay que recordar que en la representación de la deformada los desplazamientos se muestran de un modo amplificado ya que esto resulta imprescindible para apreciar cualitativamente como se deforma la estructura.

5.4.4.2 Calentamiento uniforme

Al aplicar esta carga se impone que todo el conjunto esté a 30°C por encima de la temperatura de referencia a la cual se supone que la acción de la temperatura es nula, según se explicó en el apartado relativo a la consideración de acciones térmicas. Esta variación térmica produce tensiones mecánicas en los distintos elementos de la Veleta debido a la interacción entre la estructura interna y refuerzos de hierro y la escultura de bronce. Estos materiales poseen distintos coeficientes de dilatación ($1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ del hierro frente a $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ del bronce), lo que impide que se deformen libremente y consecuentemente aparezcan tensiones mecánicas.

Al someter todos los elementos a un incremento de temperatura uniforme, el bronce tenderá a dilatarse más que el acero. Por tanto, la estructura interna y refuerzos de hierro restringirán la dilatación de la escultura, que soportará principalmente esfuerzos de compresión. La estructura interna recibirá el empuje de la lámina, de forma que los travesaños, tirantes y refuerzos internos sufren esfuerzos de tracción. A estos esfuerzos hay que añadir esfuerzos de flexión en los travesaños por recibir cargas verticales en sus uniones con la escultura.

Estos esfuerzos verticales son hacia arriba en las uniones superiores e intermedias siendo de menor magnitud en las intermedias, por equilibrarse en gran medida el empuje entre la parte superior e inferior de la escultura, resultando casi nula en el muslo izquierdo, mientras que son hacia abajo en el apoyo inferior.

Los travesaños sufren esfuerzos axiales del orden de 1000 N y esfuerzos cortantes del orden de 6000 N, que dan lugar a una tensión máxima de 46 MPa en la zona central del travesaño superior, el cual no es un valor excesivamente elevado.

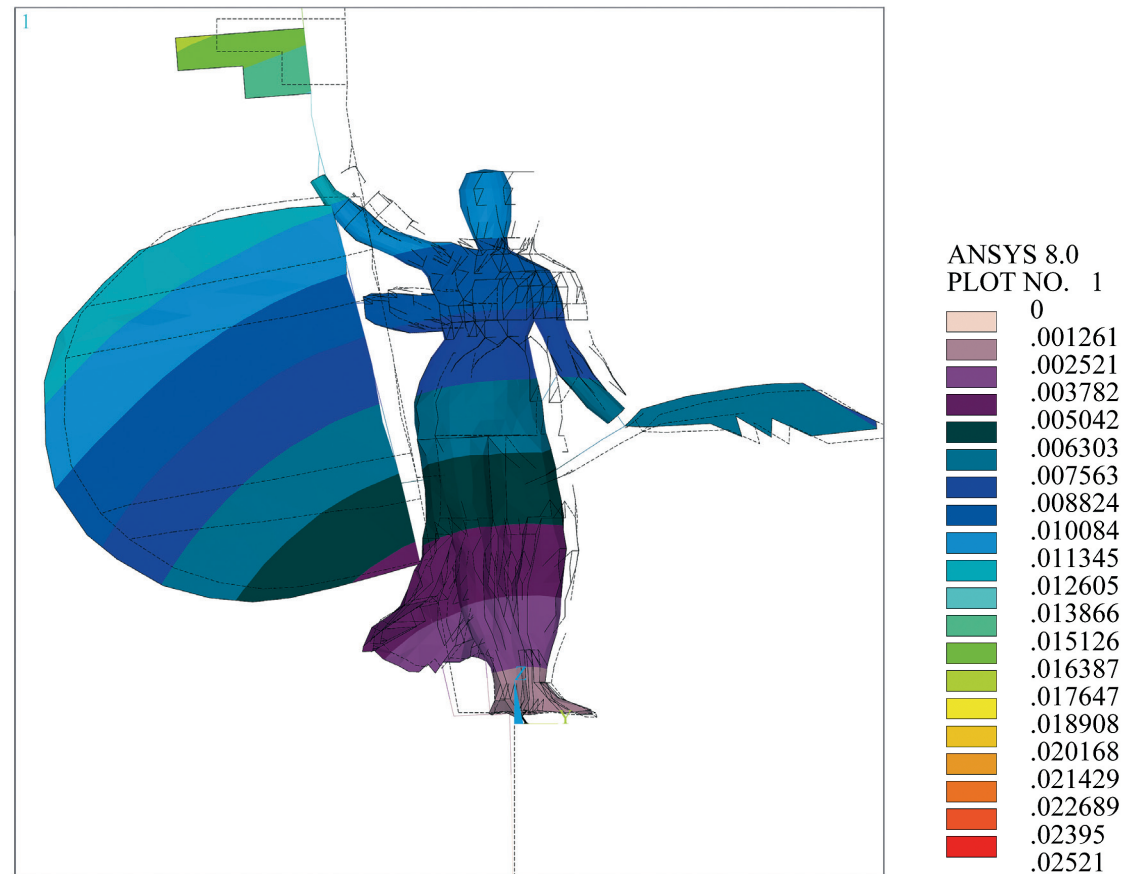
El tirante derecho sufre esfuerzos de tracción de hasta 10000 N, que junto con esfuerzos de flexión que le puede transmitir el travesaño intermedio llegan a producir tensiones de 27 MPa. El tirante izquierdo apenas trabaja, por haber desaparecido su parte inferior y por no transmitirse apenas esfuerzos verticales en el apoyo del muslo izquierdo.

Mención especial merecen los refuerzos internos para este tipo de acción térmica, ya que debido a la restricción que suponen a la libre dilatación de la lámina, y su complicada geometría, llegan a registrar tensiones de hasta 78 MPa en los refuerzos del brazo derecho, y de entre 30 y 50 MPa en el resto.

Con respecto a las tensiones mecánicas que aparecen en la escultura (fig. 5.11), se puede observar en el mapa de tensiones correspondiente que se encuentran localizadas en aquellas zonas o puntos donde los elementos de hierro impiden su deformación. Así, es significativo que aparecen unas zonas con mayor nivel de tensión siguiendo la trayectoria de los refuerzos internos de hierro, llegando a valores de 10 MPa. También aparecen zonas cargadas en la pierna derecha (la escultura apoyaba en el travesaño inferior sobre su pie derecho pero no sobre el izquierdo), puntos de unión con la estructura y apósitos. En estas zonas se alcanzan valores de hasta 16 MPa. También es significativo cómo aparecen tensiones en el lábaro por la restricción que le ofrecen los rigidizadores de hierro que poseía.

5.4.4.3 Enfriamiento uniforme

Esta carga consiste en considerar sometido todo el conjunto a una variación térmica de signo contrario a la anterior, según se explicó en el apartado correspondiente a la consideración de acciones térmicas.



En este caso, al tender a contraerse el bronce más que el hierro, ocurrirá que la estructura interna y refuerzos internos restringen la contracción de la escultura, que sufrirá en este caso esfuerzos de tracción.

Figura. 5.10. Representación de desplazamientos totales (en m) sobre la posición deformada bajo la acción de peso propio, superpuesta sobre el contorno de la posición indeformada. Se observa el desequilibrio del lado del lábaro.

Considerando que los materiales tienen un comportamiento elástico, lineal e isótropo, se tendrían bajo la acción de enfriamiento uniforme una solución en desplazamientos, esfuerzos y tensiones igual pero de signo contrario que para el caso de calentamiento uniforme. Sin embargo, en el modelo de cálculo generado, y también en la realidad, la presencia de grietas hace que el

comportamiento de la escultura sea no lineal, ya que grietas que estén abiertas en un caso podrán estar cerradas en otro, y el comportamiento del material en esas zona será muy distinto de una situación a otra.

A pesar de este comportamiento no lineal, se comprobó que la respuesta del conjunto de la escultura y su estructura interna ante un enfriamiento uniforme era muy similar a la que tiene lugar cuando se considera un calentamiento uniforme, sólo que cambiada de signo. Por tanto, no merece la pena entrar en el detalle de los resultados obtenidos para este tipo de acción. Tan sólo resulta significativo el hecho de que, en general, se produce una cierta relajación de tensiones con respecto al caso anterior, tanto en la estructura interna como en la escultura, por lo que la acción de calentamiento resulta ligeramente más desfavorable.

5.4.4.4 Soleamiento

Como ya se explicó en el capítulo sobre acciones, esta carga sirve para considerar el efecto de la radiación solar sobre el Giralddillo, en un típico día soleado de invierno en el que su efecto puede ser mayor, al poder existir una mayor diferencia entre la temperatura de la superficie de la Velea directamente irradiada y la que se encuentra *a la sombra*, que se considera que estaría a temperatura ambiente. También se argumentó el motivo por el que se consideró que el Sol incidiera frontalmente sobre el Giralddillo, que no era otro que considerar la situación más probable según las orientaciones preferentes de la Velea.

Con todo esto se tenía una distribución de temperaturas que variaba desde 40°C en la parte frontal hasta 15°C en la parte de la espalda, teniendo las barras de hierro valores intermedios que variaban según se tratase de barras externas o internas a la escultura.

Esta situación hace que la parte frontal de la figura tienda a dilatarse y la parte trasera a contraerse, lo que le hace empujar hacia

detrás a la estructura en los apoyos de la cruceta superior y de los pies, mientras que la intermedia se produce un empuje hacia delante. Es decir, la lámina y las crucetas flectan en el plano perpendicular a la estructura. Este es el efecto más significativo de este tipo de situación, ya que con las cargas anteriores la flexión dominante era en el plano de la estructura, que no deja de producirse en este caso ya que también se transmiten algunas fuerzas verticales en los puntos de unión de la lámina con su estructura. De todas formas, los esfuerzos que tienen lugar son del orden de dos a tres veces menores que los producidos con las acciones consideradas anteriormente, aunque se llega a obtener tensiones de 23 MPa en la cruceta superior, mientras que en el resto de los elementos apenas se alcanzan tensiones del orden de 10 MPa.

Los flejes internos, al igual que en los casos de variación térmica anteriores, también se cargan bastante debido a la diferencia de coeficientes de dilatación entre el bronce y el hierro, pero se alcanzan menores valores de la tensión (en cada pieza se alcanzan valores máximos entre 20 y 30 MPa).

En la lámina se produce un mapa de tensiones similar a las situaciones de calentamiento y enfriamiento uniforme en cuanto a la distribución de zonas con mayor tensión, pero éstas son menores que en aquellas situaciones. Los valores más significativos se producen puntualmente en el brazo izquierdo (24 MPa), acoplamientos con las crucetas superior e intermedia en el lado izquierdo (10 MPa) y uniones con los flejes (6-8 MPa). En el resto de uniones con piezas férreas las tensiones son muy bajas.

Otro rasgo distintivo de esta situación de carga es que en las zonas laterales de transición entre zonas frías y calientes, en el manto y en la zona del cuello se producen zonas con tensiones de hasta 10 MPa que no aparecían en los otros casos de acciones térmicas.

Para concluir, se puede decir que se han obtenido resultados bastante similares con respecto los casos de calentamiento y enfriamiento uniforme en cuanto a distribución de tensiones, aunque

los valores de éstas sean en general menores, como también lo son los valores extremos de temperatura que se alcanzan en comparación con los otros dos casos. Estos resultados hacen pensar que la temperatura tiene, en cada zona, un efecto que depende de su valor en ella, sin afectar demasiado los valores que se den el resto de la figura, siempre que se tenga una distribución realista de temperaturas y gradientes.

5.4.4.5 Viento frontal

El análisis de la respuesta de la escultura ante la acción del viento frontal era uno de los más esperados dada la importancia que tiene sobre su funcionamiento como veleta y su supuesta influencia sobre el proceso de deterioro de la figura, más aún cuando se había comprobado experimentalmente que ésta no giraba bien y que era necesario un viento frontal de entre 10 y 40 km/h, según su posición, para hacer cambiar su orientación. Sin embargo, y tal y como ya se observó analizando el primer modelo “sin daños” con el que se obtuvieron los primeros resultados, resultó que la acción del viento es mucho menos relevante de lo que cabría esperar en un principio.

Aquí hay que decir que se dispuso de unos datos importantes para corroborar la validez del modelo y de la forma en que se introdujo la carga de viento. Estos datos son los valores del par torsor y flector que se producen cuando sobre el Giraldillo sopla un viento frontal de 40 km/h sin que llegue a moverse, que fueron obtenidos por la empresa *Kinesia Ingeniería de Auscultación, S.A.* mediante instrumentación del vástago de la torre, cuando el Giraldillo original todavía se encontraba sobre la Giralda.

Según estas mediciones, el par torsor máximo necesario para mover el Giraldillo era de 600 Nm, mientras que el flector en la base del vástago que se producía en esta situación era de 2747 Nm. Con el modelo desarrollado se obtuvieron unos valores de 579 para el torsor y 2581 para el flector, lo cual supone una diferencia con respecto a los valores experimentales del 4 y el 6% respectivamente, que es un grado de acuerdo muy satisfactorio.

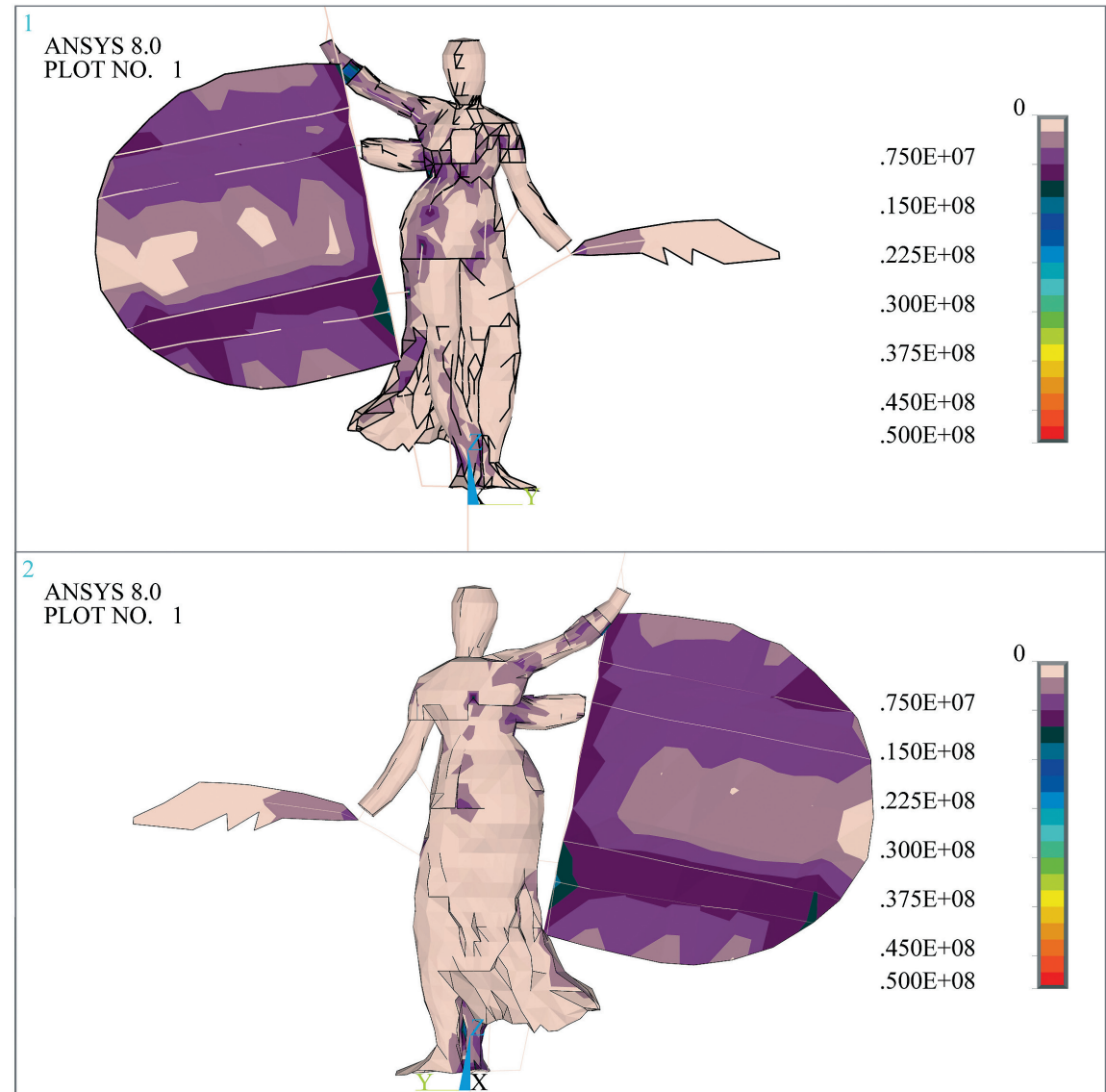


Figura. 5.11. Tensiones mecánicas (0-50 MPa) bajo un calentamiento global uniforme

Pasando ya a analizar los resultados sobre el modelo, hay que decir que la incidencia del viento se recoge fundamentalmente en el lábaro y, en menor medida, en la palma, que transmiten los esfuerzos correspondientes a la estructura de barras, siendo muy pequeñas las fuerzas de interacción entre la escultura y su estructura interna. Las tensiones en la escultura son muy bajas, alcanzando apenas los 2 MPa en los puntos más desfavorables. Representando el mapa de tensiones obtenido para esta acción (fig. 5.12) con la misma escala (0-50 MPa) que para el resto de acciones, se puede observar como la escultura apenas sufre esfuerzos mecánicos.

Esto quiere decir que los esfuerzos que es necesario transmitir a la escultura para hacerla girar son mínimos, mientras que los que se producen en la estructura también son muy poco significativos.

El lábaro transmite un momento flector a la cruceta superior e intermedia, siendo ambos del mismo orden. El de la cruceta intermedia se transmite a lo largo de ella y se compensa con el que recibe proveniente de la palma. En la cruceta superior, el momento se transmite a lo largo de ella hasta ser equilibrado por el par de rozamiento del cojinete, que se supone que aún no se ha vencido. El resto de esfuerzos en la estructura son muy bajos. Los niveles de tensión más significativos son de 18 MPa en la cruceta superior y 9 MPa en la intermedia, estando el resto de elementos prácticamente descargados, salvo los rigidizadores horizontales del lábaro que alcanzan tensiones de hasta 52 MPa.

5.4.4.6 Viento lateral

El efecto del viento lateral es todavía menor que el del viento frontal, aún cuando se ha considerado la acción de un viento de 45 m/s (162 km/h), que solo podría tener lugar bajo una situación climatológica extrema en la ciudad.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede decir que el Gi-

raldillo presenta una forma muy aerodinámica cuando se orienta correctamente, ya que las acciones y tensiones que se aprecian sobre la estructura son despreciables, al igual que las tensiones que se producen en la lámina, que están por debajo de 1 MPa.

Por este motivo, al considerar las distintas hipótesis de carga, en las que había que incluir la acción del viento, sólo se ha tenido en cuenta la combinación del resto de acciones con el viento frontal y no con el lateral, ya que el primer tipo siempre dará lugar a una situación más desfavorable, aunque su efecto tampoco sea demasiado importante.

5.4.4.7 Sismo

Para estudiar el efecto de un posible terremoto sobre el Giraldirlo, se ha analizado el modelo de elementos finitos considerando una acción sísmica según contempla la normativa vigente en el momento de realizar los cálculos (Norma sobre Acciones en la Edificación NBE AE-88, en su apartado sobre construcción sismorresistente NCSE-94), tal y como se explicó en el apartado sobre las acciones de cálculo consideradas.

En primer lugar, se realizó un análisis modal del modelo considerado para el resto de cargas, es decir, el modelo de la Veleta con el tramo de su eje que se puede considerar empotrado en la torre. Este estudio permitió identificar modos y frecuencias naturales de vibración del Giraldirlo y su eje aislados de la torre de la Giralda.

Con esto se comprobó que la Veleta presentaba dos modos fundamentales de vibración, uno que consistía en una oscilación frontal de todo el conjunto y otro en una oscilación lateral. Las frecuencias asociadas a estos modos de vibración son 1,09 y 1,14 Hz respectivamente. Estos resultados estaban en coherencia con los resultados experimentales obtenidos sobre la Réplica del Giraldirlo por la empresa *Kinesia Ingeniería de Auscultación S.A.* Estas mediciones concluyeron que la Réplica presentaba una primera frecuencia natural de 1,37 Hz, mientras que se presumía

que el original pudiera tener una frecuencia natural en torno a 1 Hz. La diferencia ente este valor experimental para la Réplica y el obtenido con el modelo numérico que representa el Giraldillo, está justificada fundamentalmente por diferentes propiedades en el eje de sustentación. En el caso de la Réplica fue un eje de sección tubular, mucho más ligero que el eje macizo del original, y además de menor longitud, ya que se encontraba empotrado a la altura de la peana con lo que tendría una longitud de unos 3m frente a los más de 5 que tiene el del original, considerado empotrado en la torre.

Así pues, el valor de 1,09 Hz encontrado para la primera frecuencia natural a través del modelo de cálculo resulta bastante aproximado, y sirve como una muestra más de la validez de dicho modelo.

Para la consideración de una acción sísmica se hacía necesario modificar el modelo anterior, ya que el sismo supondrá un movimiento de la base de la torre de la Giralda y ésta transmitirá estos movimientos al Giraldillo, con lo que se hace necesario considerar la torre de la Giralda en los cálculos. Para ello sólo se hacía necesario modelar la Giralda de la forma más sencilla posible, bastando con que permitiese aproximar la transmisión de movimientos desde el terreno hasta la base del vástago del Giraldillo.

Para realizar este modelo sencillo de la Giralda se emplearon datos sobre la geometría, peso y materiales de las distintas partes de la torre recogidos en el libro *Turris Fortísima* (Jiménez, 1988). También se tuvieron en cuenta los resultados experimentales sobre primera frecuencia natural de vibración de la Giralda (0,65 Hz) y su amortiguamiento (3,5 %), recogidos en la tesis doctoral de A. Jaramillo (1983), titulada “Método probabilístico de estimación de las acciones sísmicas”.

A partir de toda esta información se construyó un sencillo modelo de la Giralda que permitiese reproducir sus primeros modos de vibración, que son los que interesaban para el análisis sísmico del Giraldillo, ya que son los únicos que quedan dentro del rango

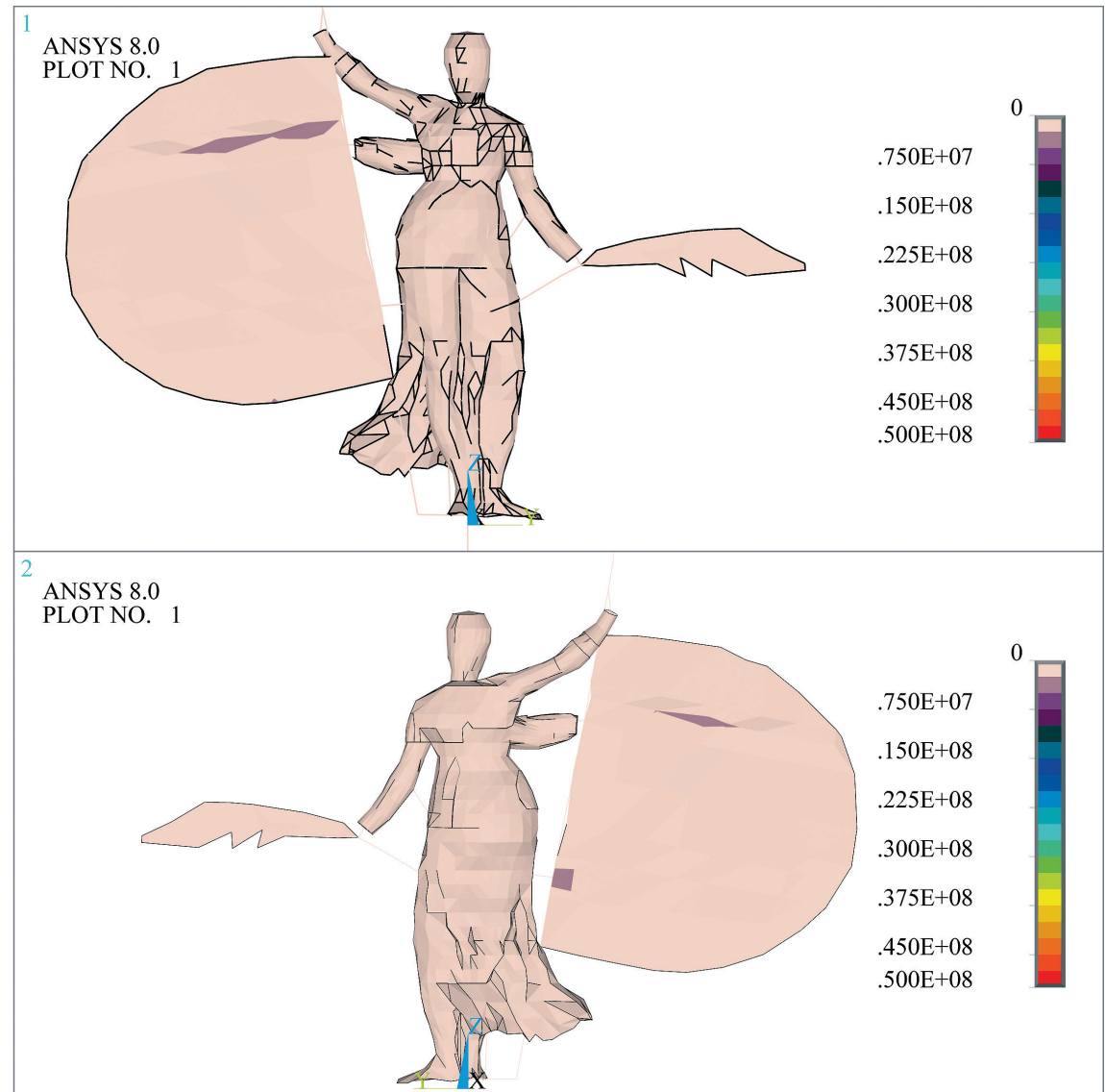


Figura. 5.12. Tensiones mecánicas (0-50 MPa) bajo la acción de viento frontal de 11 m/s

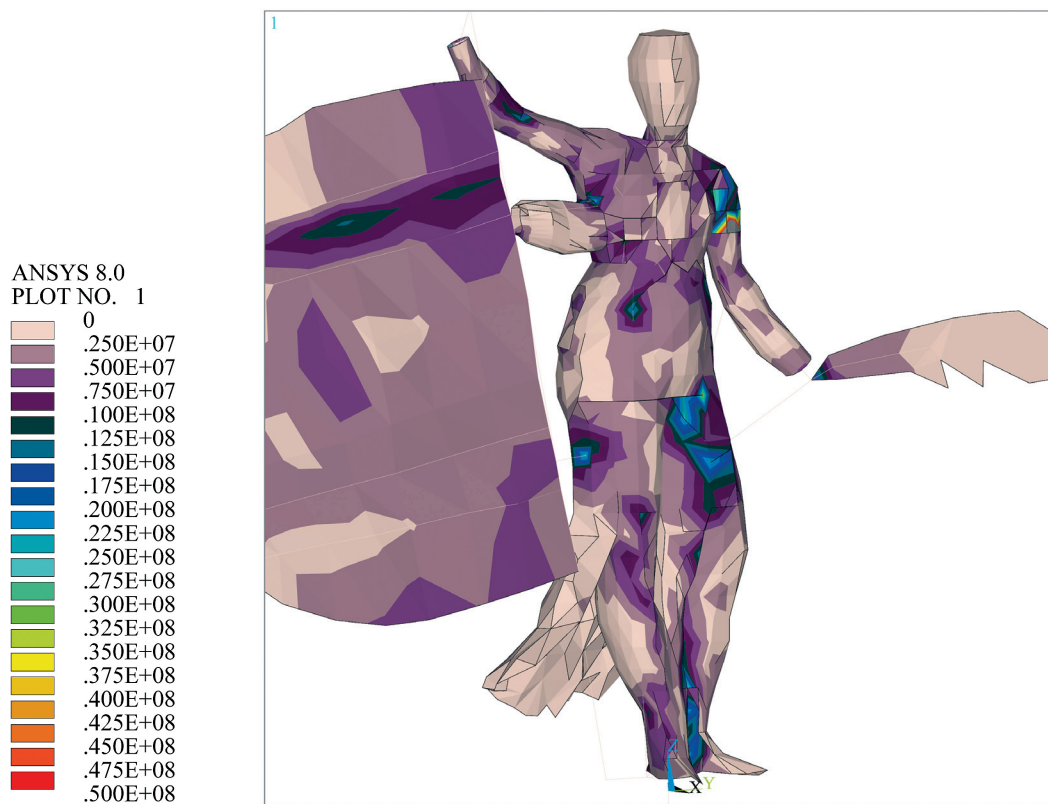


Figura. 5.13. Tensiones mecánicas (0-50 MPa) bajo la acción de excitación sísmica frontal a la imagen

de frecuencias excitadas significativamente por un movimiento sísmico. Este sencillo modelo presentaba una frecuencia de 0,68 Hz, valor muy próximo al medido experimentalmente por Jaramillo. El análisis conjunto Giralda-Giraldillo mostraba que los modos de vibración de la Giralda y el Giraldillo se encontraban desacoplados.

Para el análisis modal-espectral realizado para hallar la respuesta ante un sismo según recomienda la normativa, se tomó un valor de amortiguamiento tanto para el Giraldillo como para la Giralda de 1%. En el caso del Giraldillo este valor está por encima del valor medido para la Réplica, pero es de esperar que la figura original, con sus defectos y uniones menos rígidas, presentase un

mayor amortiguamiento. En el caso de la Giralda, la consideración de un 1% frente a un 3,5% supondría una mayor seguridad en los cálculos realizados, cubriendo así las incertidumbres en cuanto a la estimación del comportamiento de la Giralda.

Se consideraron dos direcciones posibles de excitación sísmica, una en dirección antero-posterior del Giraldillo y otra en dirección lateral, cubriendo con ello las distintas posibilidades que se pudieran dar.

Ante una excitación sísmica frontal, aparecen en la escultura tensiones elevadas (fig. 5.13), siendo las mayores las que aparecen en el apósto del brazo izquierdo (95 MPa). Estos valores están por encima del límite elástico y de rotura considerados para el bronce, pero se trata de valores puntuales, que podrían dar lugar a plastificaciones locales y redistribuciones de tensiones que podrían ser absorbidas por la escultura. Además, en el modelo en cuestión la consideración de este tipo de apóstos está excesivamente del lado de la seguridad, al considerar tan sólo las delgadas chapas como único elemento resistente en esas zonas, y unidas al resto de la escultura solamente en los puntos donde hay roblones. De todas formas, este resultado indica que sería necesario un mejor conocimiento del estado de conservación real en estas zonas, que habrían de ser objeto de estudio detenido durante el proceso de restauración.

Existen otras zonas de la escultura que aparecen bastante solicitadas (hasta 30 MPa), como zonas en torno a la grieta situada a la altura de la pelvis, apoyos de los muslos, costado izquierdo y apósto del brazo derecho.

En la estructura de barras también aparecen tensiones que en principio serían inadmisibles en algunos elementos, como son los rigidizadores del lábaro y refuerzos internos del brazo derecho (hasta 250 MPa). En este caso hay que recordar que el límite elástico considerado para el hierro es probablemente mucho mayor que los 130 MPa considerados en principio y, por otro lado,

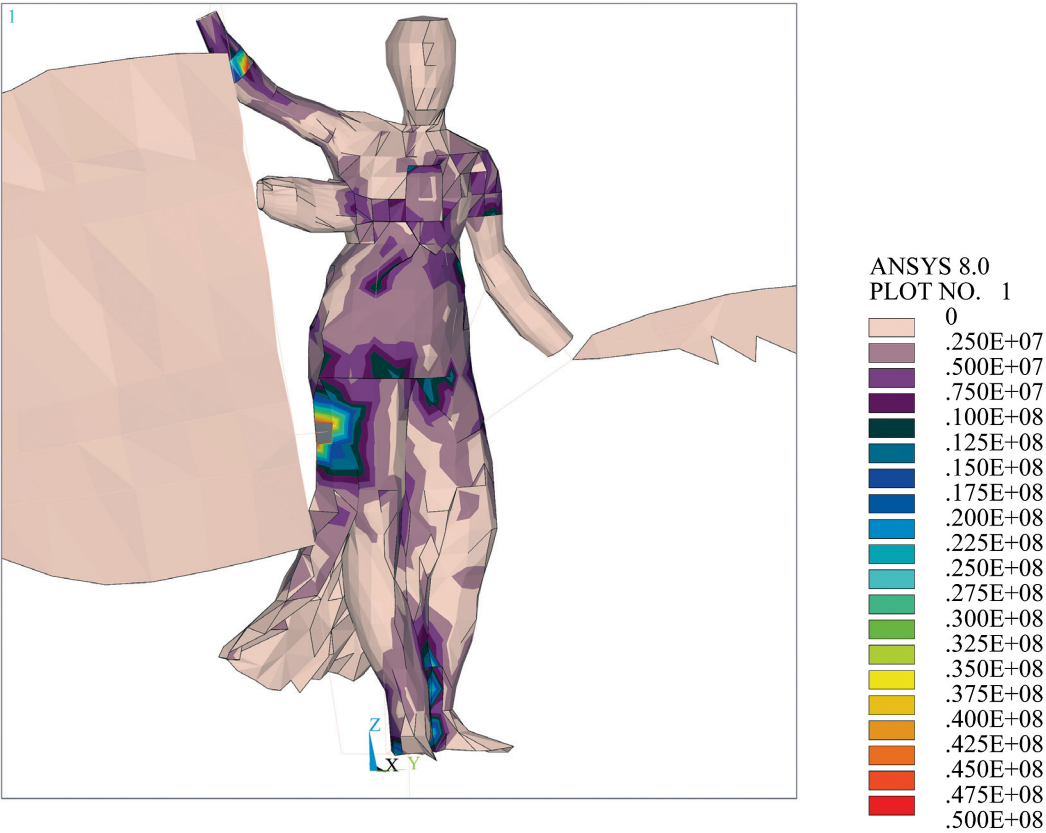
no se trata de elementos fundamentales de cara a asegurar la integridad del conjunto. En cualquier caso, estos resultados serían tenidos en consideración a la hora de afrontar la restauración estructural.

En el resto de la estructura aparecen tensiones elevadas en algunas zonas, pero con un valor máximo de 80 MPa que se obtiene en la zona central de la cruceta superior.

Cuando se considera que el sismo excita el movimiento de la Veleta en dirección lateral (fig. 5.14), se obtiene que la escultura en general se encuentra poco solicitada (tensiones menores de 10 MPa). Sin embargo, aparecen picos de tensión más elevados que en el caso anterior, resultando valores de 160 MPa en los apoyos de los muslos. Pero al igual que en el caso anterior, se trata de valores puntuales, que pueden ser absorbidos por la escultura y que pueden estar sobreestimados por una inadecuada consideración en el modelo de las uniones.

En la estructura interna aparecen de nuevo tensiones elevadas y en principio inadmisibles en los refuerzos internos del brazo derecho, que merecen la misma consideración que en el caso de vibración frontal. En el resto de la estructura las tensiones se encuentran por debajo de los 30 MPa.

Una última consideración sobre la respuesta ante una acción sísmica es que en el modelo de cálculo se impide a la Veleta al giro sobre su eje (de otra forma parecería un mecanismo que imposibilita la obtención de una solución para el modelo), mientras que en la realidad la Veleta posiblemente sufriese un giro oscilante alrededor de su eje con motivo de la vibración inducida por el sismo y la inercia de la figura. Este giro supondría una disipación de energía considerable y una disminución de las fuerzas de inercia que redundarían en una menor sollicitación mecánica tanto sobre la escultura, como su estructura interna y eje de sustentación. Esto quiere decir que en este sentido el modelo de cálculo es conservativo.



5.4.4.8 Hipótesis de carga

El análisis del comportamiento mecánico del Giraldillo ante las distintas acciones características, sirve para comprender su respuesta ante cada una de ellas por separado, evaluar su importancia y reflexionar sobre el tipo de actuación necesaria de cara a su restauración.

Además del análisis de la respuesta ante cada acción por separado, se deben considerar el efecto de su actuación simultánea, ponderándolas además con unos coeficientes de mayoración que permitan asegurar unos márgenes de seguridad de cara al mantenimiento de la integridad de la estructural del conjunto. Así, se

Figura. 5.14. Tensiones mecánicas (0-50 MPa) bajo la acción de excitación sísmica lateral a la imagen

combinan los distintos tipos de acciones siguiendo la normativa vigente en el momento de realización de los cálculos.

Los resultados obtenidos al realizar estas combinaciones son aproximadamente igual a la suma ponderada de los obtenidos mediante cada acción por separado (hay que tener en cuenta el comportamiento no lineal de zonas agrietadas). Por esta razón, y por mantener una mayor claridad en la exposición, no se presentan los resultados pormenorizados de los resultados obtenidos con cada hipótesis de carga. Tan solo se va a realizar una descripción de los aspectos más significativos.

Las hipótesis de carga se construyen combinando la acción de peso propio (siempre presente) con algún tipo de acción térmica, de viento y de sismo.

En cuanto a la consideración del viento hay que recordar que la combinación con el viento frontal daba lugar a resultados más desfavorables que el viento lateral. Además, el viento frontal aporta una flexión en el plano perpendicular a la estructura que no provocan el resto de acciones.

Con la combinación de las distintas acciones térmicas consideradas se obtienen resultados más desfavorables con unas u otras dependiendo del punto que se trate. Lo mismo ocurre con la combinación con sismo en dirección lateral o frontal.

Así, lo que se hace finalmente es hallar una envolvente de los resultados obtenidos, de forma que se obtenga en cada punto el resultado más desfavorable posible de entre todos los considerados.

A partir de esta envolvente se puede concluir que la escultura sufre valores de tensiones mecánicas aceptables, y muy por debajo de los límites de resistencia del material en su mayor parte. Sin embargo, aparecen valores puntuales excesivamente elevados en algunas zonas concretas cuando se considera la acción sísmica,

como son los apóstitos de los brazos y puntos de unión con el travesaño intermedio de la estructura interna.

En la estructura interna también se obtienen valores aceptables, muy por debajo de su capacidad resistente. Al igual que ocurre con la escultura, bajo la acción sísmica se obtienen algunos resultados excesivamente elevados en los refuerzos internos del brazo derecho y del lábaro.

Los altos valores de tensión que aparecen tanto en la escultura como en la estructura interna merecen la consideración que ya se hizo en su apartado correspondiente y sobre la que se insistirá en el apartado siguiente.

5.5 Conclusiones.

Líneas generales de actuación para la restauración estructural del Giraldillo

Tras resolver los distintos tipos de situaciones de carga a los que se puede ver sometido el Giraldillo, se pueden sacar conclusiones importantes sobre su comportamiento real, en el estado en que se encontraba al inicio del proceso de restauración, y también sobre el del modelo que lo representa.

Estas conclusiones servirían para afrontar la restauración definitiva de su estructura, con un diseño previo de la misma que se realizaría sobre el modelo ya construido. Este modelo sufriría también modificaciones de cara a discernir con mayor precisión las posibles diferencias entre los resultados numéricos y los que se pueden dar en la realidad, solventado estas diferencias con el mayor grado de seguridad posible.

Como ya se vio en los apartados anteriores, un posible terremoto sería la causa de unos mayores valores máximos de tensión en el Giraldillo. Sin embargo, éstos se dan en unos puntos de la lámina

y unos elementos de la estructura muy concretos, y son en gran parte debidos a la imperfección del modelo en cuanto a la reproducción de la situación real, tal y como se discute más adelante. Así pues, la futura mejora del modelo y de la estructura real haría disminuir este efecto destacado y puntual de la acción sísmica.

Como se ha podido comprobar, los esfuerzos verticales que se transmiten entre la escultura y la estructura son los más importantes. Estos esfuerzos provocan la flexión de la estructura en su propio plano, que da lugar a las tensiones más importantes incluso en elementos que están pensados para transmitir fundamentalmente esfuerzos axiales, como son los tirantes verticales que unen las crucetas o la barra del mástil. A la vista de este hecho, habría que diseñar la nueva estructura con una rigidez adecuada para soportar este tipo de flexión.

El resultado más importante en cuanto a la estructura interna es que tan sólo en el caso de que hubiera tenido lugar un terremoto de gran magnitud se habrían podido llegar dañar algunos de sus elementos, y aún así se trataría de elementos de poca importancia en cuanto a la seguridad e integridad de la Veleta, como son el fleje trasero del brazo derecho y algún rigidizador del lábaro.

Exceptuando este caso, las tensiones en la estructura están siempre muy por debajo del límite elástico del material (90MPa de tensión máxima en toda la estructura, respecto a 130MPa de límite elástico) con lo que en principio no sería necesario realizar modificaciones sustanciales en la misma, y así se estaría consiguiendo el propósito de realizar la mínima intervención posible sobre esta obra de arte. Evidentemente, se sustituirían las piezas que se considerase oportuno para asegurar la integridad de la estructura y se construirían con un material de mejores características mecánicas, pero la estructura no tendría que modificarse conceptualmente respecto al diseño de 1770.

Respecto a los flejes internos, y salvo el efecto catastrófico que pudiera tener un terremoto en alguno de estos elementos, las

cargas térmicas son las que inducen en ellos mayores tensiones, debido fundamentalmente a la diferencia de coeficientes de dilatación entre el hierro y el bronce. Este inconveniente se resolvería sustituyendo estas piezas por otras que fueran también de bronce. Así también se reducirían las tensiones que producen en la lámina como fruto de esta incompatibilidad en la deformación por temperatura, y además se evitarían los problemas de corrosión asociados al contacto de estas piezas de hierro con el bronce de la escultura.

Hay que señalar también que estos elementos rigidizadores de la escultura no tienen una función estructural relevante, según los resultados que se han obtenido al eliminarlos del modelo a modo de prueba. Sin embargo, su presencia está totalmente justificada si se tiene en cuenta que estos flejes se colocaron en la restauración de 1770 con el propósito de coser las grietas y defectos más importantes de la escultura y así dotar de mayor rigidez a estas zonas. Esto era muy razonable teniendo en cuenta que, sin las potentes herramientas de cálculo de que se dispone hoy día, es difícil concluir que las sollicitaciones a las que se ve sometido el Giralddillo son tales que estos defectos no suponen una pérdida preocupante de rigidez del conjunto, y no cabe esperar que se agraven con el paso del tiempo.

Además, a pesar de la relativa poca importancia de estos elementos con respecto al comportamiento mecánico del conjunto, estos refuerzos internos constituyen unos elementos importantes a la hora de asegurar la integridad de la escultura ante alguna situación imprevista, y es por esta razón por la que resultaría conveniente conservarlos en un futuro, aunque con distinto material por las razones que ya se comentaron.

Los apoyos de las barras del pecho y la espalda han sufrido también el efecto de la diferencia entre los coeficientes de dilatación del hierro y el bronce. En estos puntos, la curvatura de la lámina es pequeña y las barras que se unen perpendicularmente a ella tienen un efecto punzante muy dañino. Este hecho queda clara-

mente reflejado en el deterioro del apoyo del pecho, donde llegó a producirse un gran agujero, y en el agrietamiento en torno al apoyo de la espalda.

Una vez que la barra del pecho quedó inservible, la de la espalda no ejerce ninguna función resistente importante, provocando además el efecto negativo ya comentado por acción de la temperatura.

La recuperación de ambos apoyos no parecía recomendable, dado que se comprobó que no son necesarios para la integridad del conjunto. Por el contrario, con su recuperación se podría provocar el deterioro de sus zonas de unión a la lámina, ya bastante deterioradas.

En cuanto a la escultura, hay que decir que las tensiones que se producen en general son también bastante pequeñas en comparación con el límite elástico del material. Esto quiere decir que la lámina resiste holgadamente las distintas sollicitaciones posibles.

Tan sólo un posible terremoto podría producir tensiones inadmisibles en algunos puntos de la escultura como las uniones con la estructura a la altura de los muslos o algún punto de unión de los apóstitos que rodean ambos brazos. Pero, como ya se ha comentado, estos fenómenos son muy localizados y podrían ser tolerables, además de ser debidas en gran parte a la imperfección del modelo en estos puntos, como a continuación se argumenta.

Las mayores tensiones en el modelo aparecen siempre en torno a puntos de acoplamiento de elementos férreos con la lámina, así como en puntos de unión de apóstitos. Estas tensiones se reducen mucho a muy poca distancia del punto en cuestión, lo que hace pensar que se trata de valores de tensión que no se corresponden exactamente con la realidad. En el modelo, las barras son líneas que se conectan con la lámina en un solo punto (nodo), y esto puede producir fácilmente tensiones elevadas al tenerse que transmitir todos los esfuerzos de forma puntual.

En la realidad, las barras tienen una sección determinada y tienen por tanto una superficie de contacto con la lámina a través de la cual se produce la transmisión de esfuerzos de una forma más repartida, de manera que las tensiones en los puntos de contacto será menor que en el caso de existir un solo punto de conexión.

Por este motivo, habría que revisar el modelado de estas uniones de cara al diseño de la nueva estructura por dos razones: por un lado, si se consigue modelar la unión de forma más realista se reducirían los picos de tensión que se producen en estas zonas y se podría confirmar con mayor certeza el nivel de seguridad para la Veleta, y por otro lado, se trata de puntos críticos para los que era necesario disponer de un modelo más preciso de cara a realizar un diseño adecuado de estas uniones, asegurando su buen comportamiento.

La presencia de grietas, agujeros y apóstitos también produce cierto incremento de tensión a su alrededor, como es lógico, pero de una forma menos brusca que en los puntos anteriores y siempre con unos valores máximos menos acusados.

Estos valores son lo suficientemente bajos como para creer que estos defectos son fruto de una fundición original defectuosa y de las manipulaciones que se realizaron en 1770 para cambiar su estructura, y no han sido producidas por las sollicitaciones mecánicas a las que se ha visto sometido el Giraldillo a lo largo de su historia.

No parece posible que las tensiones que se producen puedan dar lugar a un crecimiento de las grietas, ni tampoco que los efectos de fatiga se deban de tener en cuenta, ya que las cargas de viento y térmicas son las únicas de carácter cíclico y su efecto en cuanto a fatiga es despreciable por distintos motivos.

Como ya se ha explicado, el efecto del viento es muy pequeño y los ciclos de tensión a que puede dar lugar son de una amplitud

demasiado pequeña como para producir la fatiga del material, mientras que el calentamiento o enfriamiento uniforme sí producen una variación de tensión significativa, pero estas situaciones tendrán lugar en muy pocas ocasiones, siendo las oscilaciones térmicas de carácter diario mucho menos agresivas (no se alcanzan temperaturas tan extremas) y no lo suficientemente frecuentes, ya que el número de días de historia del Giralddillo es pequeño en comparación con la cantidad de ciclos que se suelen considerar en un análisis de fatiga (del orden de millones de ciclos, que equivaldrían a millones de días, o lo que es lo mismo, a varios miles de años).

Exceptuando los puntos de unión con elementos férreos y las zonas con defectos, el resto de la lámina registra valores de tensión que son siempre muy bajos y no presentan ningún tipo de problema en cuanto a su resistencia.

Así pues, según todas estas consideraciones, se puede asegurar que la escultura de bronce del Giralddillo está en un estado de conservación lo bastante bueno como para poder soportar con garantías las distintas solicitaciones a las que se puede ver sometida al volver a ocupar su posición en lo más alto de la Giralda.

Respecto a la estructura interna colocada en 1770, se puede considerar que su diseño geométrico es bastante acertado, por lo que se podría mantener su morfología original, pero sería necesaria una importante intervención por los motivos que a continuación se argumentan.

Por un lado, el estado de conservación de la estructura, es bastante malo debido fundamentalmente al efecto de la corrosión. Sería conveniente por tanto su desmontaje para comprobar en qué estado se encuentra realmente y proceder a sustituir aquellas piezas sobre las que se apreciase un deterioro importante, así como las que fuese oportuno cambiar para evitar en lo posible las dilataciones diferenciales y los problemas de corrosión, como es el caso de los flejes internos.

El problema de las dilataciones diferenciales es también la causa por la que se considera oportuno prescindir de las barras que anteriormente se alojaban en el pecho y la espalda.

Una vez que resulta clara la necesidad de una intervención para sustituir elementos muy dañados, o que pueden producir daños sobre la escultura, aparece también la conveniencia de rediseñar las uniones de la estructura con la lámina de bronce, ya que éstos son puntos críticos. De esta forma se puede conseguir que se transmitan los esfuerzos de una forma más adecuada y menos dañina para la escultura. Para ello podría ser necesaria una pequeña intervención sobre los agujeros de la escultura en los que se alojan en la actualidad las barras de la estructura, así como alguna modificación en los extremos de las mismas, y sería necesario también el diseño y construcción de unas piezas adecuadas para el tipo de unión que se desee.

De esta forma, la restauración estructural que se propone para el Giralddillo consistiría en mantener la escultura tal y como está, salvo las pequeñas modificaciones a realizar en los agujeros de alojamiento de las barras de la estructura, mientras que sobre la estructura interna sería necesario sustituir sus elementos por otros con mejores características mecánicas, además de eliminar las uniones en el pecho y la espalda.

Resumen de la actuación propuesta

Teniendo en cuenta los resultados de los estudios mecánico-estructurales desarrollados sobre la geometría y condiciones reales del Giralddillo en el estado en que se encontraba antes de su restauración, y siguiendo los principios de mínima intervención y máxima seguridad, se propuso adoptar una solución que respondía a criterios similares a los de las estructuras que históricamente han sustentado el Giralddillo. A continuación se transcribe literalmente el resumen de la actuación propuesta en la reunión de la Comisión Técnica del Giralddillo convocada por el IAPH en noviembre de 2001:

1. Los refuerzos existentes en la escultura propiamente dicha se mantendrán siempre que se encuentren en buen estado y que cumplan su función resistente, lo cual ocurre en buena parte de ellos.
2. Algunos de los apóstitos de chapa de cobre deberán ser sustituidos y algunos reforzados con otros similares en el interior, de manera que se reduzcan tensiones al quedar la lámina comprendida entre dos chapas. Se sanearán los taladros y tornillos cuando sea necesario conservando los actuales siempre que sea posible. Sólo muy excepcionalmente se podrá añadir algún taladro. Especial atención requerirá la zona del hombro donde se inserta el brazo izquierdo.
3. Las pletinas internas de hierro que refuerzan el brazo derecho y el torso, dado su mal estado, serán sustituidas. El brazo será reforzado por una estructura tubular, mientras que en el torso se colocarán pletinas construidas en bronce. Estos nuevos refuerzos se unirán a la escultura en los mismos puntos que lo

hacían los anteriores. Tan sólo excepcionalmente se justificaría la necesidad de practicar algún nuevo taladro.

4. La estructura interna de hierro se mantendrá con forma similar a la de las históricas, pero construida en acero inoxidable
5. Los apoyos del pecho y la espalda se suprimirán dado su mal funcionamiento anterior y el grave deterioro que han producido en sus respectivas zonas de influencia. Se sanearán las zonas de la escultura donde estaban estos apoyos.
6. Se mantendrán los apoyos ubicados a ambos lados de la escultura: dos en los costados y dos en las nalgas. Los orificios de estos apoyos serán regularizados para evitar esquinas que produzcan concentraciones de tensión. Se fabricarán unos elementos de ajuste y transición entre las barras de la estructura interna y la lámina de bronce para así asegurar una suave transmisión de las cargas y un buen ajuste entre estructura interna y escultura.

Bibliografía

- JIMÉNEZ, A., y CABEZA, J.M., Turris Fortísima, Ed. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla, Sevilla, 1988.
- JARAMILLO, A., Método probabilístico de estimación de las acciones sísmicas, Tesis, Universidad de Sevilla, 1983.

Agradecimientos

Los autores de este capítulo desean transmitir su agradecimiento a Javier López Carvajal, que participó activamente en el trabajo aquí presentado, así como a Carlos Cobos, Antonio Romero y Rafael Esteve, del Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla por su colaboración en la digitalización de la geometría del Giraldirlo.