

# Diseño estructural de esculturas de bronce con formas orgánicas

## *Structural design of organic-shaped bronze artworks*

Javier Oliva Quecedo<sup>\*, a</sup>, Arturo Ruiz de Villa Valdés<sup>b</sup>, Iñaki Auzmendi Alfaro<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, AR2V Ingeniería, Jefe de Proyecto, [javier.olivaquecedo@ar2v.com](mailto:javier.olivaquecedo@ar2v.com)

<sup>b</sup> Ingeniero de Caminos, AR2V Ingeniería, Director General, [arturo.ruizdevilla@ar2v.com](mailto:arturo.ruizdevilla@ar2v.com)

<sup>c</sup> Ingeniero de Caminos, AR2V Ingeniería, Jefe de Proyecto, [inaki.auzmendi@ar2v.com](mailto:inaki.auzmendi@ar2v.com)

### RESUMEN

Las esculturas de gran porte han de soportar las mismas acciones que las estructuras más comunes como edificios o puentes, aunque las consecuencias de un fallo son menores. El análisis y diseño de estas piezas es un campo que presenta particularidades para los ingenieros de estructuras, tanto referentes al cálculo como al papel que debemos desempeñar en el proceso. En este artículo se presentan varias obras de arte con formas que imitan a seres vivos. Todas ellas han sido materializadas en fundiciones de cobre con diferentes técnicas de fabricación y están ya instaladas. Se trata de un bonsái de 5 metros de altura en California, una orquídea gigante en Bahamas y un olivo colgado en el interior de un edificio en Milán.

### ABSTRACT

Major sculptures must withstand the same actions as other structures like buildings or bridges, although the consequences of a failure are of lesser importance. The structural design of these pieces is an unorthodox field for structural engineers, not only regarding the analysis but also in respect of our part in the process. In this work several success cases in design, fabrication and installation of organic shaped artworks are presented. Namely a 5-m-tall bonsai in California, a gigantic orchid in Bahamas and an olive tree which hangs from the ceiling of a building in Milan. All of them are cast in bronze or brass with different manufacturing techniques and are already installed.

**PALABRAS CLAVE:** esculturas, obras de arte, fundición, bronce, latón, sismo, viento, cables.

**KEYWORDS:** sculptures, artworks, casting, bronze, brass, seismic action, wind, cables.

## 1. Introducción

Las esculturas de gran tamaño son cada vez más habituales, tanto en espacios públicos como privados. Este tipo de obras tienen un efecto positivo en varios aspectos de la ciudad: planeamiento, cohesión social, identidad urbana, sentimiento de lugar, turismo [1-3]. Por ello, es muy frecuente encontrar grandes obras de arte público en las áreas urbanas (**Figura 1**).

Estas grandes piezas han de ser capaces de soportar las mismas acciones y cargas que el resto de las estructuras, por ejemplo, fuertes vientos y sismos. Sin embargo, el análisis de estas obras presenta varias particularidades que hace que sea un campo poco ortodoxo para los ingenieros de estructuras.



**Figura 1. Efecto de la *Cloud Gate* de Anish Kapoor en el urbanismo de Chicago.**

Con objeto de transmitir un determinado mensaje, el artista utiliza la forma, el tamaño, el material o incluso la manera en la que la pieza es sujeta. Es decir, muchos parámetros que estamos acostumbrados a controlar se convierten en el dominio de otros. Sin embargo, esas variables tienen gran influencia en la seguridad de la obra. Así pues, la correcta colaboración entre profesionales se vuelve crítica.

Las particularidades del diseño estructural de esculturas se discuten en el apartado 2. Tres casos de éxito se presentan después: un árbol de bronce en California (elevado sismo) en el apartado 3, una orquídea gigante en las Bahamas (vientos huracanados) en el apartado 4 y un árbol colgado del techo en el interior de un edificio en Milán en el apartado 5.

## 2. Bases de cálculo

Las esculturas monumentales son grandes piezas que deben resistir cargas exteriores significativas. Si las comparamos con otras obras a las que los ingenieros estructurales estamos más acostumbrados, como por ejemplo puentes o edificios, las obras de arte presentan varios aspectos distintivos que hacen que su diseño y análisis sean bastante diferentes.

No existen normas ni códigos específicos para el diseño y evaluación estructural de este

tipo de elementos que traten las características particulares que presentan. Por ejemplo, tipos y magnitudes de sobrecargas o limitaciones de movimientos.

En las construcciones con las que los ingenieros de estructuras tratamos habitualmente, los desplazamientos y flechas producidos por las cargas se limitan con objeto de no afectar a su aspecto (cargas permanentes) y de no limitar su funcionalidad (cargas variables). El empleo de este concepto en esculturas se presta a discusión. La experiencia del usuario de estas piezas no está directamente relacionada con su rigidez, como sí sucede por ejemplo en una pasarela peatonal. Sin embargo, es conveniente limitar su flexibilidad por varias razones: las deformaciones excesivas debidas a cargas permanentes pueden afectar negativamente a la apariencia de la pieza, la existencia de grandes movimientos debidos a cargas variables nunca es deseable y, además, es una manera indirecta de controlar el comportamiento y la robustez de una estructura.

Con respecto a las cargas exteriores, las más importantes son casi siempre el peso propio y las acciones ambientales (viento y sismo habitualmente). En general, no han de soportar cargas de tráfico o peatones. Sin embargo, se ha de considerar de alguna manera las cargas que puedan producirse durante el mantenimiento, por visitantes despistados, escaladores no previstos o incluso vándalos (**Figura 2**).



**Figura 2. Instante en que *Water Whirler* de Len Lye en Wellington es rota por una persona colgada.**

La forma de estas piezas de arte juega un papel muy importante en el mensaje que el artista quiere transmitir. Así, la geometría no va a estar orientada a la resistencia ni dominada por ella y el esquema estructural no será probablemente óptimo. Además, nos encontramos formas que nos son extrañas a la hora de decidir cómo analizarlas o qué coeficientes de arrastre adoptar.

Tampoco los materiales son, en muchas ocasiones, escogidos en términos de resistencia, rigidez, durabilidad o proceso de fabricación. Sino que pueden ser otra parte del sentido de la obra.

Además, el proceso de fabricación de estas esculturas no es en absoluto un proceso industrializado o al menos repetitivo, sino más bien un procedimiento artesanal en el que se produce una única unidad. Así pues, es muy recomendable realizar un cuidado control mediante ensayos del material.

Habitualmente estas piezas son muy diferentes entre sí y esto hace que cada una de ellas sea única. No es infrecuente que el cálculo, el diseño y la fabricación avancen de forma paralela debido a que surgen diversos asuntos durante la producción de imposible previsión. Esto no solo tiene influencia en el comportamiento estructural, también la durabilidad de cada detalle ha de considerarse al resolver cada una de estas situaciones.

Cuando es necesario incorporar modificaciones estructurales, la interacción entre los diferentes profesionales involucrados se convierte en crítica. Necesitamos artistas que entiendan el funcionamiento de las estructuras y nosotros debemos entender el concepto artístico que el autor quiere plasmar. Todas las personas involucradas en el proyecto han de ser capaces de considerar la globalidad de éste.

Puede darse el caso de que los cambios necesarios para que la pieza alcance la resistencia o rigidez suficientes sean incompatibles con el concepto del artista. Hay que alcanzar en ese caso soluciones de compromiso que en una obra pública serían inasumibles. Algunos ejemplos

son: reducción de las cargas actuantes (por ejemplo cubrir la escultura para reducir la acción del viento o evitar que el público pueda acceder a la pieza), reducción de esfuerzos (empleo de cables temporales para arriostrar la obra de arte cuando se prevean fuertes vientos) o aceptar un mayor riesgo de pérdida de funcionalidad e incluso la reparación después de eventos extremos (huracanes o sismos). Por supuesto, estas soluciones de compromiso han de acordarse con la propiedad.

### 3. Bonsai Juniper

#### 3.1 Descripción

Esta obra del artista británico Marc Quinn es una escultura de 5 metros de altura con forma de árbol instalada en California (**Figura 3**). La obra juega con las escalas de una forma particular, el árbol reducido es devuelto a su tamaño original.



**Figura 3.** *Bonsai Juniper* (Marc Quinn).



**Figura 4. Interior del tiesto.**

El tronco de la escultura consiste en una piel de bronce de 8 mm de espesor con una estructura interna de tubos de acero al carbono, ambas se conectan entre sí mediante elementos de acero inoxidable. Ese refuerzo interno de acero consiste en tramos rectos de diferente diámetro, sigue la compleja geometría del tronco y baja hasta la parte inferior del tiesto. Dentro del tiesto, una caja vertical de acero inoxidable de 500 x 500 mm recoge las cargas de la piel del tronco (Figura 4). Tanto esa caja como la tubería interior se sueldan a una placa de base horizontal. El espacio entre la estructura metálica interior y la piel (o la caja en el tiesto) se rellena con mortero de baja retracción.

Las ramas son huecas en su mayor parte. El vacío interior se consigue mediante el uso de tuberías de acero de poco espesor que se colocan en los moldes antes de echar el bronce fundido. Ese sistema interno no se coloca cuando el diámetro de la rama es pequeño y por ello esas regiones son macizas.

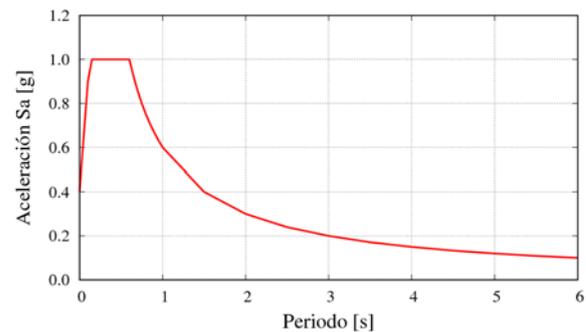
### **3.2 Diseño estructural**

Las tres acciones relevantes en el cálculo de esta pieza son el peso propio, el viento y el sismo.

La velocidad de viento de cálculo es de 176 km/h. La descripción de la acción de viento en la normativa estadounidense [4,5] es diferente a la seguida en nuestra normativa, ya sea española o europea. Por ejemplo, la velocidad básica se describe con una duración de 3 segundos en

lugar de 10 minutos, en ambos casos a 10 m de altura. Además, la carga obtenida no se mayor. Con objeto de hacernos una mejor idea, la velocidad de cálculo con una aproximación similar a la nuestra sería de 120 km/h.

La acción del sismo es dimensionante debido a la localización de esta escultura. Los siguientes parámetros definen esta acción de acuerdo a la ASCE 7-10 [4]:  $S_s=1.5g$ ,  $S_i=0.6g$ ,  $S_{D5}=1.0g$  y  $S_{D1}=0.6g$ . En la Figura 5 se muestra el espectro de cálculo.



**Figura 5. Espectro de respuesta de cálculo.**

El bronce es el material resistente en las ramas y, a pesar de tener una potente estructura interior de acero, también colabora en el comportamiento estructural del tronco, que es por tanto una estructura mixta. Así pues, es necesario conocer las propiedades mecánicas de la aleación empleada que se determinan mediante ensayos; el límite elástico es 124 MPa y la resistencia a tracción 222 MPa.

El mortero que se sitúa entre la estructura interna y la piel tiene un triple objeto: (a) rigidiza el tronco y contribuye a la resistencia de la sección mixta de una manera cualitativa ya que el uso de conectores es lógicamente imposible; (b) impide abolladuras locales de la piel que suceden debido a la complicada geometría de la misma y (c) protege de la corrosión a la estructura interior de acero que no se puede dotar de un sistema de pintura adecuado debido al proceso de fabricación.

El cálculo de las ramas se realiza asimilándolas a vigas en voladizo. Las tuberías interiores se emplean por razones de fabricación y su contribución estructural es despreciable. Llama la atención el hecho de que las ramas,

independientemente de su longitud, tienen un nivel tensional muy similar [6].

El análisis estructural del tronco se lleva a cabo mediante modelos de elementos finitos de la estructura interna y de la piel de bronce (Figura 6). Los tubos interiores de acero se representan con elementos tipo viga y la piel con elementos lámina, en ambos casos con comportamiento elástico lineal. Las acciones que provienen de las ramas se incluyen en esos modelos y también las masas e inercias rotacionales ya que para el cálculo sísmico se utiliza el método del espectro de respuesta.

El estado límite de plastificación completa de la sección [7] se verifica para todas las combinaciones de carga. Sin embargo, bajo la acción de las cargas de diseño pueden aparecer plastificaciones muy localizadas que no comprometen la integridad estructural, pero que aconsejan la inspección de la pieza después de vientos extremadamente fuertes o de terremotos severos.

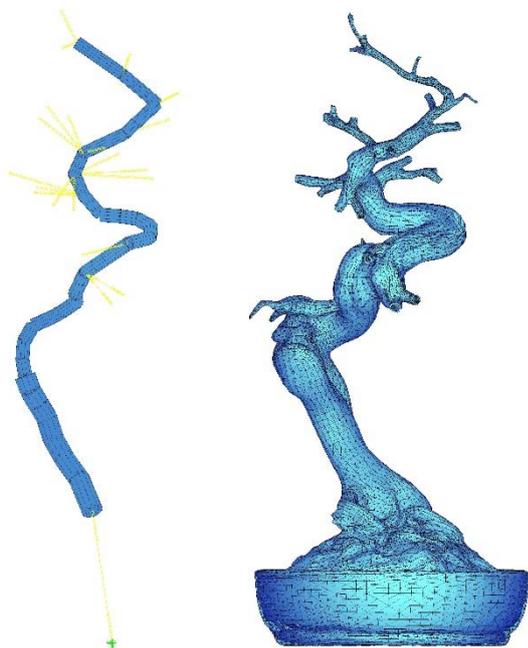


Figura 6. Modelos de Elementos Finitos.

### 3.3 Fabricación y montaje

El proceso de fabricación duró 8 meses. El tiesto y el tronco se crean como un conjunto de cáscaras independientes que se sueldan después

entre ellas. La estructura interna del tronco y el propio tronco se van creando al mismo tiempo en un proceso muy delicado e intrincado en el que la piel se materializa colocando y soldando cáscaras alrededor de la estructura interna a medida que ésta se va formando (Figura 7).



Figura 7. Fabricación del tronco.

Para las ramas, se crean moldes de arena que reproducen su superficie exterior. Para conseguir hacerlas huecas, el sistema interior de tuberías se construye sobre los moldes siguiendo su forma (Figura 8). A continuación se cierra el molde con las tuberías dentro y se vierte el bronce fundido. Las ramas se sueldan al tronco.

El árbol se termina de forma completa en taller. Después, se podan las ramas necesarias para poder meter la escultura en un contenedor. Una vez en su emplazamiento definitivo, la pieza formada por el tiesto y el tronco se coloca con la orientación deseada; doce barras roscadas se dejaron embebidas en la zapata a tal efecto. Las ramas podadas se vuelven a soldar al árbol y se vierte el mortero en el hueco que queda entre la piel de bronce y la estructura interior de acero.



Figura 8. Fabricación de ramas y sección resultante.

## 4. Geography of Desire

### 4.1 Descripción

Esta obra está localizada en una pequeña isla de las Bahamas y su autor es también Marc Quinn. Se trata de una orquídea aumentada hasta un tamaño de 2.0 m de altura y 2.7 m de anchura, materializada en aleación de cobre UNS C87300 y pintada de blanco (Figura 9).



Figura 9. *Geography of Desire* de Marc Quinn.

Está formada por el tallo y cinco grandes pétalos; también se reproducen los filamentos y el estigma (Figura 10). Hay dos pétalos en la parte delantera y tres en la parte trasera. Son de bronce sólido y están soldados a un tallo tubular, también de bronce, pero hueco. La estructura se apoya en tres puntos, el tallo y los puntos bajos de los dos pétalos traseros inferiores, mediante apoyos simples.

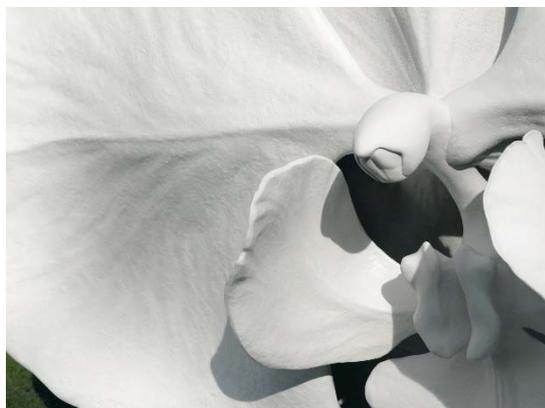


Figura 10. *Geography of Desire* (detalle).

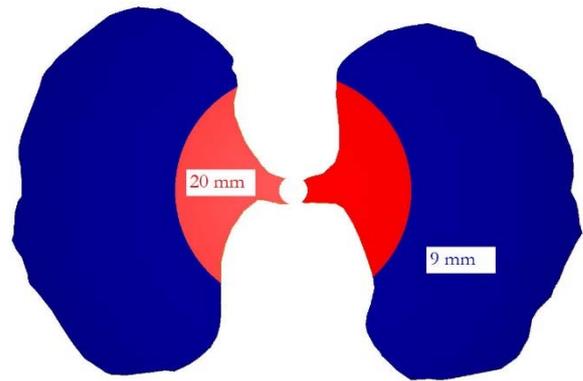


Figura 11. Espesor pétalos delanteros.

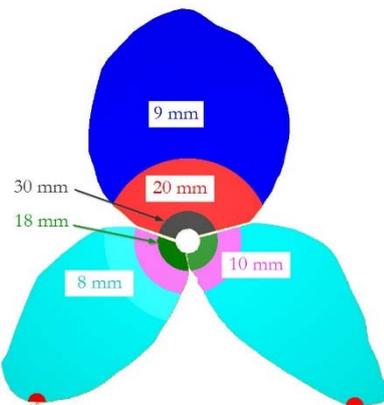


Figura 12. Espesor pétalos traseros.

El espesor de los pétalos es variable con objeto de reducir el gasto de material; crece al acercarnos a la inserción al tallo adaptándose a la ley de esfuerzos. La Figura 11 y la Figura 12 muestran el espesor de cada zona.

El tallo es de diámetro variable con un máximo de 9 cm en la base. Tiene un espesor de bronce constante de 10 mm, excepto en la zona de inserción de los pétalos donde se recrece hasta 20 mm. Se refuerza con un tubo interior circular 60,3 x 5 mm de acero inoxidable 1.4404.

### 4.2 Diseño estructural

La acción del viento es la acción dominante en esta pieza debido a su ubicación en una zona proclive a los huracanes. Se emplea la normativa estadounidense para el análisis [4]. La velocidad básica de viento es de 274 km/h (como se ha mencionado anteriormente el concepto es diferente al de nuestra normativa).

La velocidad máxima con una aproximación europea sería de 209 km/h.

La forma de la escultura hace que se comporte como una vela, con una gran área expuesta al viento. Además, dada la compleja forma de los pétalos, la elección del coeficiente de fuerza (arrastre) no es inmediata. Se adopta un valor de 1.5 comparando valores en la literatura para diferentes formas aproximadas (muro, disco circular, semi-esfera hueca...).

Para el análisis de la pieza se realiza un modelo de elementos finitos con elementos lámina para los pétalos y la zona del tallo cercana a la inserción de estos. El resto del tallo se representa con elementos viga.

Los dos pétalos delanteros tienen mucha área y la inserción al tallo se produce en una zona muy pequeña. Introducir toda la carga que recoge cada pétalo cuando el viento sopla de frente por esas pequeñas zonas requiere un espesor excesivo y poco adecuado para la fundición. Por ello se refuerzan con 3 cartelas de 10 mm de espesor que hacen que las tensiones se reduzcan a valores admisibles con un espesor de bronce de 20 mm. El pétalo superior trasero también ha de soportar la acción del viento como un voladizo, sin embargo, su menor área expuesta y la mayor anchura de la zona de inserción hacen que se pueda resolver con un espesor de 30 mm y sin cartelas.

Bajo la acción del viento de diseño de 274 km/h no se producen plastificaciones de los pétalos; pero sí en el tallo, aunque no se compromete la integridad estructural de la pieza. La acción del viento de diseño corresponde a un huracán de categoría 3.

Esas plastificaciones del tallo no suceden con velocidades de viento menores que 200 km/h. Así pues, después de vientos huracanados ha de inspeccionarse la pieza y, en caso de vientos aún mayores, aparecerán deformaciones permanentes y daños visibles en el tallo que requerirán reparación. Esto puede evitarse cubriendo la pieza cuando se prevean vientos de semejante magnitud. Sin embargo, una

estructura que pueda soportar esa acción será cara y de difícil instalación, por tanto, la opción más razonable es asumir que en caso de eventos tan extremos puede ser necesaria la reparación.

### 4.3 Fabricación y montaje

Para la fabricación de la orquídea se usa la técnica de la cera perdida. Las diferentes piezas así obtenidas se sueldan entre sí. La pieza se puede transportar completa en un contenedor.



Figura 13. Modelo en cera de pétalo frontal.



Figura 14. Pétalo trasero en fundición.

## 5. Olivo colgado

### 5.1 Descripción

Se trata de un olivo de latón a escala real en el que se representan de manera fiel todas sus partes: tronco, ramas, hojas, raíces e incluso aceitunas. El árbol está en el interior del Mercado del Duomo, al lado de la catedral de Milán. Se

sitúa en un gran atrio y cuelga de tres vigas metálicas del edificio mediante cables en espiral de acero inoxidable de 10 mm de diámetro (Figura 15). La altura de la pieza es mayor que 6 metros y cuelga a la altura de un tercer piso.

Las partes de poco espesor (ramas y raíces) son macizas, el resto de la estructura es hueca con un espesor de pared de entre 5 y 10 mm. En el interior de esa zona hueca se aloja una estructura de acero al carbono S275 formada por tubos de sección cuadrada (Figura 16). Esa es la estructura resistente de la pieza y es la que se cuelga con los cables mencionados anteriormente. La piel se une a ella de forma regular para asegurar una transmisión eficaz del peso del latón al acero. El esqueleto de acero está formado por dos partes diferenciadas: una zona esencialmente vertical para el tronco y otra horizontal para la parte que representa la tierra en la que se insertan las raíces.



Figura 15. Olivo colgado en el Mercado del Duomo.

Las raíces alcanzan grandes longitudes en voladizo; en el interior de las más voluminosas se embeben cables de acero que, si bien no aumentan la capacidad resistente de las raíces, sirven como sistema de seguridad que evita la caída de estas en caso de rotura.

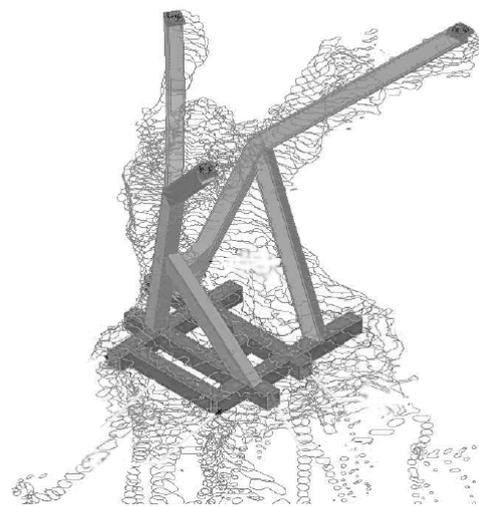


Figura 16. Estructura interna de acero.

## 5.2 Diseño estructural

En el caso de esta pieza, la carga principal es su peso propio. El latón puede garantizar un límite elástico cercano a 70 MPa, lo cual podría ser suficiente para aguantar el peso de la obra sin estructura interna. Sin embargo, el proceso de fabricación requiere de mucha manipulación e incluso doblado de algunas partes; esto podría reducir la capacidad resistente y la ductilidad de forma difícil de cuantificar y con gran incertidumbre. Además, la estructura cuelga a gran altura sobre una zona en la que se produce el paso y la estancia de personas de manera continua. Por ello se refuerza la escultura con la estructura interna de acero.

El análisis de la estructura metálica no presenta particularidades relevantes. Para el diseño de los cables hay que considerar que se trata de una estructura que cuelga solo de tres puntos, los cables se dimensionan de forma que toda la estructura pudiera quedar colgada de un cable por fallo de los otros dos. Esta

aproximación podría parecer excesivamente conservadora; sin embargo, la escasa repercusión económica de la medida y el significativo aumento de la seguridad lo aconsejan.

### 5.3 Fabricación y montaje

El proceso de fundición es complejo, se usan técnicas de cera para algunas partes y otras se encapsulan y funden en un sistema de fundición centrífuga. Para alojar la estructura interior conectada a la piel se sigue un proceso similar al descrito para el *Bonsai Juniper*.

El árbol se fabrica en dos piezas distintas para facilitar el transporte y el montaje. La junta entre ellas se sitúa en la interfaz entre la estructura vertical del tronco y la horizontal de las raíces. Cada una de esas piezas se lleva en un bastidor hasta el emplazamiento definitivo (**Figura 17**).

Una vez allí, la pieza superior se cuelga de sus puntos de anclaje a poca altura. A continuación, se presenta la pieza inferior (básicamente tierra y raíces); la unión entre ambas piezas se realiza atornillando ambas estructuras de acero. La junta resultante en la piel de bronce se rellena y repasa de forma que queda completamente invisible.

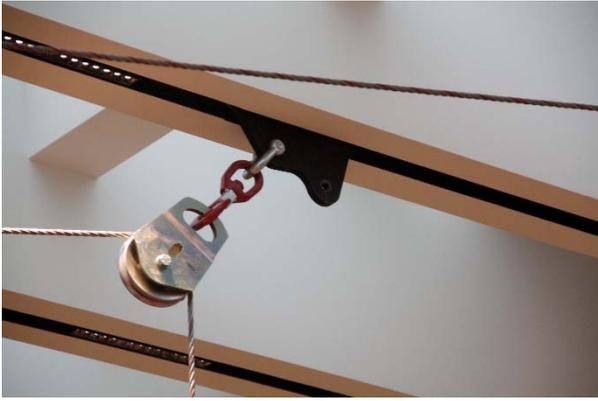


**Figura 17. Transporte de la parte superior.**



**Figura 18. El árbol se termina colgado a poca altura.**

En ese momento la pieza ya está terminada y puede levantarse hasta su posición definitiva. Para todo este proceso es necesario el uso de poleas. Sin embargo, el olivo en su configuración definitiva cuelga de cables de longitud fija. Una vez izada la pieza hasta su posición definitiva se colocan esos cables y se retiran los anteriores. Así pues, son necesarios dos taladros tanto en las cartelas superiores que se sueldan a las vigas del edificio como en las placas de testa de la estructura interna de la escultura. Uno para las poleas de izado y otro para los cables de cuelgue finales. Como resultado, las cartelas tienen una forma algo particular que se consensuó con las diferentes partes implicadas (**Figura 19**).



**Figura 19. Cartelas superiores con poleas de izado y taladro para cables definitivos.**

## 6. Conclusiones

Se presentan varias esculturas de fundición con formas vegetales y en su descripción se enfatizan aspectos particulares que alejan su diseño del de las estructuras convencionales en la ingeniería civil.

Varias de esas particularidades derivan de la forma de las piezas, que no la escoge el ingeniero para optimizar el comportamiento estructural. Los pétalos de la orquídea son velas sujetadas en un área muy pequeña; se refuerza la zona con cartelas que han de ser prácticamente inapreciables para el observador. Otra complicación derivada de las formas es la elección de los coeficientes aerodinámicos; no se encuentran en ninguna normativa y han de realizarse hipótesis para determinar la acción del viento.

La fabricación es bastante artesanal y poco industrializada. Eso impone limitaciones al ingeniero estructural a las que no estamos acostumbrados, por ejemplo, en lo referente al espesor máximo de metal. El espesor de la pared del tronco del bonsái no puede aumentarse y eso impone la incorporación de la estructura interna de refuerzo, cuya fabricación es también muy compleja como se ha explicado. Además, durante el proceso es frecuente que las soluciones propuestas y aceptadas se vuelvan más complicadas de lo esperado. Por ello, la

presencia del ingeniero es necesaria hasta la propia instalación de la escultura.

Otro aspecto que se relaciona con el párrafo anterior es el control del proceso de fundición. No solamente ha de verificarse la resistencia del material resultante, sino también que esos valores se obtienen de manera consistente en las diversas coladas. El olivo de Milán se cuelga de una estructura de acero para evitar las incertidumbres que produce el trabajo del latón.

En ocasiones, las posibilidades de refuerzo estructural compatibles con el aspecto de la pieza, el material y la fabricación pueden agotarse. Es el caso de la orquídea, en la que aparecerán deformaciones permanentes bajo el viento de diseño. Se asume ese riesgo ya que se prevé que será poco frecuente. Sería complicado justificar una solución así en ingeniería estructural común.

## Referencias

- [1] S. Selwood, *The Benefits of Public Art: The Polemics of Permanent Art in Public Places*, Policy Studies Institute, London, UK, 1995.
- [2] M. Miles, R. Paddison, *Introduction: The rise and rise of culture-led urban regeneration*, *Urban Studies*, Vol. 42, pp 833-839, 2005.
- [3] S. Zukin, *The Culture of Cities*, Blackwell Publishers, 1995.
- [4] American Society of Civil Engineers, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-10, 2013.
- [5] American Society of Civil Engineers, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-16, 2017.
- [6] K. Metzger, *Der Wind als maßgeblicher Faktor für das Wachstum der Bäume*, *Mündener Forstliche Hefte*, Springer Verlag, Berlin, 1893.
- [7] American Institute of Steel Construction, *Specification for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 360-05, Chicago, 2005.