

Escultura suspendida de composite laminado con resina y fibra de vidrio en la Universidad de Nueva York

Glass Fiber Reinforced Polymer composite sculpture suspended at the University of New York

Arturo Ruiz de Villa Valdés^a, Javier Oliva Quecedo^b, Iñaki Auzmendi Alfaro^c

^a Ingeniero de Caminos, AR2V Ingeniería, Director General, arturo.ruizdevilla@ar2v.com

^b Dr. Ingeniero de Caminos, AR2V Ingeniería, Jefe de Proyecto, javier.olivaquecedo@ar2v.com

^c Ingeniero de Caminos, AR2V Ingeniería, Jefe de Proyecto, inaki.auzmendi@ar2v.com

RESUMEN

La Universidad de Nueva York (NYU) seleccionó a la reconocida artista japonesa Mariko Mori para la instalación de un conjunto escultórico suspendido en el atrio del Science Building del centro NYU Langone. La pieza, de nombre Ekpyrotic String VI, es una esbelta escultura espacial con formas orgánicas cuya cáscara se fabricó en un composite multicapa laminado mediante resina reforzada con fibra de vidrio. Está suspendida del techo del atrio mediante cables de acero inoxidable. En este artículo se expondrán los aspectos clave del diseño estructural de la obra, los retos en la aplicación de la tecnología de composites en la fabricación de obras de arte y su seguridad en un entorno urbano.

ABSTRACT

The University of New York (NYU) commissioned the well-known Japanese artist Mariko Mori for the installation of a sculpture suspended from the ceiling at the New York University Science Building Atrium. The piece, named as Ekpyrotic String VI, is a slender swirling sculpture with an organic shape consisting of a laminated composite void shell made of multiple glass fiber layers. It is hanging from the ceiling of the atrium by means of stainless steel cables. In this paper key issues of the structural design of the work, the technology of composites applied to the manufacturing of artworks as well as their safety are presented.

PALABRAS CLAVE: composite, GFRP, escultura, arte, ingeniería, cables, acero inoxidable, fibra vidrio, resina epoxi

KEYWORDS: composite, GFRP, sculpture, artworks, engineering, cables, stainless steel, fiber glass, epoxy resin

1. Introducción

Las esculturas de gran formato presentan un campo de aplicación de la ingeniería estructural [1] [2] [3] en el que se encuentra una gran variedad de técnicas constructivas, materiales,

procedimientos de análisis y cálculo, conceptos estructurales e incluso criterios de seguridad estructural que, siendo comunes a los de las estructuras convencionales de obra civil y

edificación, presentan una riqueza de matices no exentos de dificultad para el ingeniero.

En la escultura que nos ocupa se aplicaron técnicas de fabricación de composites laminados con fibra de vidrio y resina expoxi que son propios del mundo industrial, náutico y aeronáutico. No obstante, lejos de ser un proceso completamente industrializado, hubo una gran labor artesanal, propia de la tradición escultórica, combinada con técnicas de CAD/CAM de modelado 3D: aplicación a mano del composite (hand-lay), modelado 3D de la geometría con Rhino, corte 3D de moldes negativos con fresadora de seis ejes, análisis estructural por elementos finitos, etc.

Es un campo en el que el ingeniero estructural debe encontrar esquemas estructurales válidos compatibles con recursos generalmente limitados para piezas que únicamente se fabrican una vez.

En este tipo de trabajos se plantea un concepto de seguridad no tan reglado como en otro tipo de estructuras [4]. Una escultura no es estrictamente un edificio, pero forma parte de él; no debe resistir acciones para cumplir una función o satisfacer un uso (salvo la ornamental de sostenerse a si misma), pero está sometida a cargas climáticas, sísmicas y ocasionalmente a vandalismo; y la valoración de los daños sobre la misma no siempre está acotada a su valor pecuniario o al de los objetos o personas susceptibles de ser afectados (caída de pieza colgada), por lo que la intervención para reforzarla puede modularse.

Estos conceptos se manejan durante el desarrollo del proyecto junto con los artistas y artesanos con objeto de garantizar una cierta robustez en la escultura y conducir las necesidades de refuerzo a una geometría compatible con el concepto artístico buscado.



Figura 1. Vista general de la escultura

2. Bases de diseño

2.1. Entorno

La escultura está emplazada en el interior del Science Building de la Universidad de Nueva York, en el Centro NYU Langone. Cuelga del techo del atrio de entrada y por tanto es susceptible de afectar al funcionamiento y a la seguridad de las personas del edificio en caso de algún incidente de origen estructural.

A tal efecto se desarrolló un proyecto de ingeniería en paralelo a la fabricación en el que se hizo un análisis estructural y unos planos constructivos acordes a la normativa local.



Figura 2. Atrio del Science Building

2.2. Código de diseño: Acciones

La estructura se calculó según normativa americana de edificación. Se aplicó el código ASCE/SEI 7-16 [5], [6] en el que se especifican las combinaciones de diseño de los diferentes estados de carga. Los coeficientes de seguridad aplicados son los propios de estructuras

convencionales y no se hizo ninguna consideración y/o reducción de los mismos.

La acción dominante en el diseño de esta estructura es la producida por el viento. Al ser una estructura localizada en el interior del edificio se discutió con los ingenieros locales (Eckersley O'Callaghan) y los artistas la necesidad de asumir cierta carga de viento sobre la misma. Esta carga cubre posibles corrientes de aire por apertura de puertas y ventanas y en general confiere robustez a la pieza. La normativa de Nueva York sobre edificios públicos establece una mínima carga sobre elementos interiores que fue la que se consideró en proyecto (0.25 kN/m^2).

2.3. Código de diseño: Materiales

La verificación estructural de la lámina de composite se realizó según guías de diseño europeas. Se aplicó la guía de diseño de composites Structural Design of Polymer Composites [7]. Se verificó la estructura mediante el Métodos de los Estados Límites Últimos con aplicación de coeficientes de seguridad parciales para los materiales y las acciones.

En relación con estos coeficientes, es de interés destacar que la normativa establece un coeficiente parcial de seguridad para los materiales que es el producto de tres factores ($\gamma_m = \gamma_{m,1} \gamma_{m,2} \gamma_{m,3}$), a diferencia de otro tipo de materiales en los que se emplea un único material (hormigón y acero).

El primer factor $\gamma_{m,1}$ considera la desviación estadística de las propiedades del material en función de cómo se hayan obtenido (teóricamente o mediante ensayos). En este caso se hicieron ensayos para garantizar las resistencias esperadas y poder confirmar que el sistema de laminación empleado en el taller de artistas era suficientemente adecuado.

El segundo factor $\gamma_{m,2}$ recoge el método de fabricación empleado, que fue por laminación manual con rodillo (hand lay-up).

El tercer factor $\gamma_{m,3}$ refleja la influencia de la temperatura de servicio de la obra. El interior del edificio es un ambiente controlado, por lo que se adoptaron los valores más bajos (0-25 °C). Este último factor se ve influenciado por la duración de la carga, por lo que finalmente se plantearon dos escenarios de verificación: para acciones a corto plazo ($\gamma_m = 1.61$) y para acciones a largo plazo ($\gamma_m = 4.03$).

Las partes metálicas de la estructura se verificaron de acuerdo con la normativa americana de acero ANSI/AISC 360-05 [8].

3. Ekpyrotic String VI

3.1. Descripción

La Universidad de Nueva York (NYU) seleccionó a la reconocida artista japonesa Mariko Mori para la instalación de un conjunto escultórico suspendido en el atrio del Science Building del centro NYU Langone [1] [2] [3].

Su diseño está inspirado en las últimas teorías astrofísicas, particularmente en el “Ekpyrotic Universe”, que postula un universo cíclico sin final en el que la vida y la muerte se repiten eternamente [4].



Figura 3. Alzado

AR2V INGENIERÍA fue responsable del proyecto de ingeniería de la escultura, que incluyó el análisis estructural de la pieza mediante elementos finitos, la definición de los sistemas de conexión entre los distintos

segmentos y la supervisión del proceso de instalación.

La pieza, de nombre *Ekpyrotic String VI*, es una esbelta escultura espacial con formas orgánicas cuya cáscara se fabricó en un composite multicapa laminado mediante resina reforzada con fibra de vidrio. Está suspendida del techo del atrio mediante cables de acero inoxidable dispuestos vertical y diagonalmente y conectados a seis puntos de anclaje en su superficie.

La escultura presenta unas dimensiones de 5132 mm largo x 4270 ancho x 2573 mm alto que impedían su transporte desde el lugar de fabricación a Estados Unidos por medios convencionales, así como su introducción en el edificio. Por ello se segmentó en varias piezas fácilmente manipulables que se interconectaban in situ mediante un complejo sistema de conexión diseñado ex profeso.

La cáscara es un composite laminado en siete capas biaxiales de fibra de vidrio que suman un espesor nominal de 3.5 mm. Se fabricaron cuatro segmentos aptos para el transporte que se laminaban de una pieza y que acababan en una conexión metálica. Se hicieron modelos a escala reducida y pruebas de fabricación del material.



Figura 4. Maqueta reducida y probeta de prueba

La conexión metálica entre segmentos consiste en chapas atornilladas de testa en acero S-275 con pletinas metálicas pegadas a la piel de composite. La tornillería se seleccionó en acero inoxidable A2-80 para garantizar una

durabilidad adicional. En la superficie de la pieza se dejaron pequeños accesos para el apriete de tornillos que fueron convenientemente sellados tras la instalación.

Se hicieron diversos modelos a escala 1:1 con el fin de verificar la idoneidad del diseño y poder refinarlo.



Figura 5. Conexión metálica

Los cables de cuelgue de acero inoxidable son trenzados y tienen una estructura 1x19 con un diámetro nominal de 3 mm. Sus terminales son en horquilla en la conexión con el punto de anclaje al techo y con varilla roscada en la escultura. En esta zona se dispusieron refuerzos interiores con pletinas metálicas que facilitaban una transferencia suave de cargas del cable a la piel de composite.



Figura 6. Cable vertical de cuelgue

Los cables diagonales presentan una longitud ajustable con tensores, mientras que los verticales son fijos.

3.2. Diseño estructural

Tal y como se ha mencionado, las dos acciones relevantes son el peso propio y el viento. La

acción sísmica es despreciable debido a la ligereza de la pieza (6 kN) y al hecho de que está colgando y por tanto actúa como un péndulo.

La acción de viento se limitaba a una presión de 0.25 kN/m². Esta carga, aunque pequeña para una estructura exterior, condicionó el diseño de la escultura, pues el concepto inicial del artista era el de una superficie orgánica levitando en el espacio con una mínima suspensión con cables verticales. Se tuvo que diseñar un sistema de estabilización horizontal.

La solución consensuada entre los ingenieros y los artistas fue el de un sistema de cuatro puntos de anclaje al techo del que descienden otros tantos cables verticales hasta la pieza. Así mismo, se añadieron dos puntos de anclaje adicionales en la lámina del que salen sendos haces de tirantes diagonales hasta los mencionados anclajes en el techo.

Esta combinación de cables diagonales permite arriostrar la escultura frente acciones horizontales y limita eficazmente los movimientos.

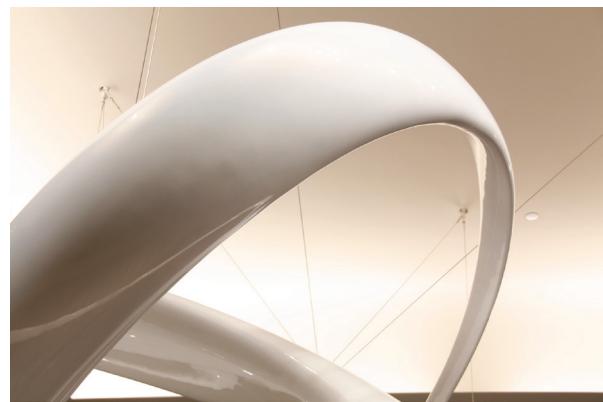


Figura 7. Sistema de arriostramiento diagonal

El comportamiento estructural de la cáscara de composite se simuló mediante un Modelo de Elementos Finitos tipo lámina. El análisis de la acción del viento se realizó mediante un cálculo geométrico no lineal en diferentes direcciones. Esta acción conduce a grandes movimientos laterales (300 mm), que se consideraron aceptables dado el carácter

excepcional de dicha acción dentro de un edificio y sobre un elemento ornamental.

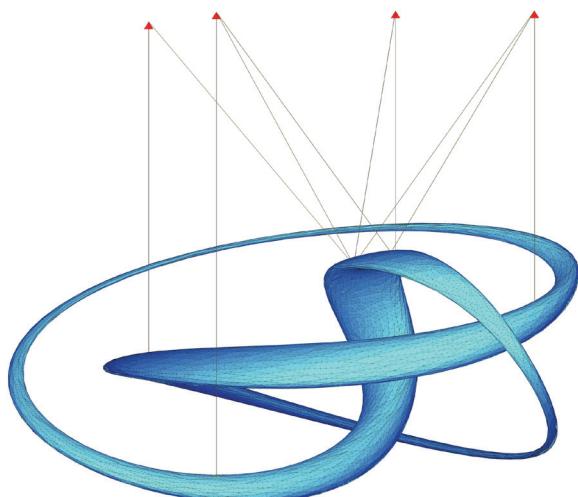


Figura 8. Modelo de Elementos Finitos

Las propiedades mecánicas del composite fueron determinadas mediante ensayos. Estos mostraron una resistencia a la tracción de 250 MPa y a la compresión de 125 MPa que, aunque no son valores muy altos en comparación con otras técnicas de fabricación (pultrusión, vacío), se asumieron como suficientemente aceptables dado el carácter artesano de la fabricación de la escultura (laminado a mano, hand-lay).

Los ensayos se realizaron en las tres direcciones de la fibra y mostraron una elevada isotropía.

3.3. Fabricación y montaje

La fabricación de la escultura llevó unos cinco meses.

La cáscara se modeló en 3D en el estudio de la artista Mariko Mori en Nueva York y posteriormente fue fresada en poliestireno mediante una máquina de corte de seis ejes. A partir del molde positivo en poliestireno se moldeó un negativo en fibra en los talleres de Factum Arte. La piel de GFRP se laminó a mano con rodillo (hand-lay) y fue sucesivamente pulida y rellenada hasta que se obtuvo un acabado perfecto.



Figura 9. Posicionamiento y cuelgue de moldes

Las conexiones metálicas se insertaron, pegaron y laminaron contra la piel de composite para permitir el montaje en los cuatro segmentos en los que se dividió la pieza.

Finalmente se pintó con spray en los talleres de pintura de Airbus y se roció con una pintura holográfica especial fabricada por Lechter.

Se realizó un montaje cero en los talleres en los que se practicaron diversas maniobras de instalación y se verificó que todas las piezas encajaban adecuadamente. Esto permitió ajustar la longitud de los cables y corregir las piezas de conexión antes del envío.



Figura 10. Cuelgue de segmento y conexión

La escultura se dividió en cuatro segmentos que se introdujeron en contenedores fletados por vía marítima. Cada uno de ellos se tuvo que introducir en el atrio del edificio a través de las puertas de paso de personas mediante complejas maniobras que se ensayaron previamente en taller.



Figura 11. Instalación

La instalación de la escultura se ejecutó en menos de cinco horas sin incidencias.

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] Arturo Ruiz de Villa, Javier Oliva, Iñaki Auzmendi: Design of structural systems for artworks fabrication and installation in urban areas, 2019 IABSE Congress New York City, 2019

[5] American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-10, 2013.

[6] American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-16, 2017.

[7] The European Structural Polymeric Composites Group, Structural Design of Polymer Composites, EUROCOPM Design Code and Handbook, 1996.

[8] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-05, Chicago, 2005.

