Informes de la Construcción
Vol. 75, 571, e513
julio-septiembre 2023
ISSN-L: 0020-0883
https://doi.org/10.3989/ic.6430

La *Vidriera Hipercúbica* imaginada por Salvador Dalí diseñada por Emilio Pérez Piñero. El Prototipo Digital

The Vidriera Hipercúbica imagined by Salvador Dalí designed by Emilio Pérez Piñero. The Digital Prototype

Martino Peña (*), Katja Wirfler (**), Sebastián Andrés López (***), Henrik Reißaus (***), Thorsten Weimar (****)

RESUMEN

Se presenta una reinterpretación de la Vidriera Hipercúbica pensada por Dalí para cerrar la embocadura del Museo Salvador Dalí en el antiguo Teatro de Figueres. El proyecto es realizado por el arquitecto murciano Emilio Pérez Piñero logrando unificar la piel y el esqueleto en un único sistema desplegable. A través de las patentes que protegen la obra de Piñero se realiza un prototipo durante un seminario con estudiantes en la escuela de arquitectura de la Universidad de Siegen en Alemania. El modelo es una reinterpretación del artefacto original utilizando la fabricación digital para su realización; cortadora laser e impresora 3D. Este prototipo digital es presentado finalmente en la Feria Internacional Glasstec de la industria del vidrio y cristal que se celebra en Dusseldorf en septiembre de 2022. La experiencia adquirida durante el seminario facilita la comprobación de la validez de la geometría y sistema desplegable utilizados para la reinterpretación y fabricación del modelo propuesto.

Palabras clave: Vidriera Hipercúbica; Pérez Piñero; Dalí; estructura desplegable; prototipo.

ABSTRACT

The name `Vidriera Hipercúbica´ describes an interdisciplinary design project of the artist Salvador Dalí and the architect Emilio Pérez Piñero to separate the former stage from the planned inner courtyard of the Salvador Dalí Theatre-Museum in Figueras, which never has been realized. This project had a special significance for Pérez Piñero´s work in that he succeeded in merging skin and skeleton in a single folding system. Together with student of the Universität Siegen, the design principle of a kinetic artefact is analysed, adapted to today´s fabrications possibilities, and optimized in an interactive process of model building and numerical calculations. New methods of digital production are used to produce the digital prototype which is exhibited at the International Trade Fair for glass in Dusseldorf-Glasstec 2022.

Keywords*: Vidriera Hipercúbica; Pérez Piñero; Dalí; deployable structure; prototype.*

(*) Dr. Arquitecto. Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Edificación. ETSAE. UPCT. Cartagena, España.
(**) Dr. Arquitecto. Universität Siegen, Germany.
(***) Ingeniero Civil. Universität Siegen, Germany.
(****) Dr. Ingeniero Civil. Universität Siegen, Germany.
Persona de contacto/*Corresponding author*: martin.pena@upct.es (Martino Peña)
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9382-0283 (M. Peña); http://orcid.org/0000-0001-7690-9892 (K. Wirfler); http://orcid.org/0000-0002-9742-5173 (S.A. López); http://orcid.org/0000-0003-1921-5995 (H. Reißaus); http://orcid.org/0000-0001-5194-6347 (T. Weimar).

Cómo citar este artículo/*Citation:* Martino Peña, Katja Wirfler, Sebastián Andrés López, Henrik Reißaus, Thorsten Weimar (2023). La Vidriera Hipecúbica imaginada por Salvador Dalí diseñada por Emilio Pérez Piñero. El Prototipo Digital. *Informes de la Construcción,* 75(571): e513. https://doi.org/10.3989/ic.6430

Copyright: © 2023 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/*Received*: 23/02/2023
Aceptado/*Accepted*: 07/07/2023
Publicado on-line/*Published on-line*: 02/10/2023

1. INTRODUCCIÓN

La *Vidriera Hipercúbica* imaginada por Dalí y diseñada por Emilio Pérez Piñero que logra unificar la piel y el esqueleto en un único sistema desplegable. El proyecto pensado para cerrar la embocadura del Museo Salvador Dalí en el antiguo Teatro de Figueres nunca fue realizado por falta de presupuesto y la prematura muerte del arquitecto. Si existe un modelo a escala 1:3 que se presenta en el propio Museo y dos patentes donde se explica el funcionamiento de esta. Este trabajo se centra en una interpretación contemporánea de la Vidriera Hipercúbica como parte de un seminario de fabricación digital en la Universidad de Siegen en Alemania. Durante su desarrollo los alumnos aprenden la importancia de combinar habilidades creativas con conocimientos tecnológicos. Inicialmente se transmiten los sistemas desarrollados por el arquitecto Pérez Piñero y el funcionamiento de sus artefactos desplegables. Posteriormente en el seminario se realiza un modelo 1:2 de la Vidriera Hipercúbica, donde se reinterpretan parte de sus componentes que se realizan mediante impresión 3D y cortadora laser. Finalmente, este proceso se abre al estudio de una reinterpretación total del artefacto; estructura portante alternativa, uso innovador de materiales y diferentes procesos de producción, que lo convierte en un proyecto de investigación realizado entre investigadores españoles y alemanes y que se presenta en la Feria Internacional Glasstec de la industria del vidrio y cristal que se celebra en Dusseldorf en septiembre de 2022.

2. LA VIDRIERA HIPERCÚBICA DESPLEGABLE

2.1. Emilio Pérez Piñero: El arquitecto

Emilio Pérez Piñero desarrolla su obra entre 1961 y 1972, año en el que fallece volviendo de Figueras, donde estaba realizando la cubrición del Teatro-Museo Salvador Dalí. No pudo por tanto acudir al congreso de 1972 de la UIA a recoger el premio Auguste Perret a la innovación tecnológica, que años antes habían recibido Félix Candela, Jean Prouvé, Hans Scharoun o Frei Otto, y que en aquella ocasión tuvo que recoger su viuda (1).

En 1961 comienza su reconocimiento internacional cuando gana el primer premio del concurso para estudiantes convocado por la UIA con el título “Teatro Ambulante”. Pérez Piñero propone un sistema inédito de estructura desplegable configurando una cúpula que había desarrollado mediante módulos de tres barras de la misma dimensión. En el jurado se encuentran Félix Candela y Richard B. Fuller, que quedan impresionados con la invención del estudiante español. Con Candela tendría posteriormente una relación de amistad y laboral, que le abriría las puertas del mercado estadounidense. Gracias a dicha relación se producen los encargos de la NASA, con el proyecto de invernadero lunar, y de la Armada Americana con las propuestas denominadas Antártida I y II; estructuras desplegables que iban a ser utilizadas en la conquista del polo sur. Siendo consciente de la importancia de la invención, Pérez Piñero inicia rápidamente la petición de la patente de sus sistemas desplegables. La primera con el título *`Estructura reticular esterea plegable´* en 1961, que será la misma que solicite en la oficina de patentes de Estados Unidos de América que le es concedida en 1965, ya que Fuller no había introducido ninguna invención de estructura desplegable y las de Pérez Piñero se consideraron originales. La primera obra que construye es la realización del Pabellón Transportable para Exposiciones para conmemorar los XXV años de paz del régimen franquista, después de ganar el concurso restringido en el que participan los equipos formados por Corrales-Molezún y Rafael de la Hoz. El pabellón se realiza mediante una estructura desplegable formada por módulos de haces de cuatro barras que se unen en el centro según sistemas explicados en las patentes. A través del Ministerio de Información y Turismo recibe el siguiente proyecto que realiza; el Teatro Transportable para Festivales de España. Debía tratarse de un edificio de rápido montaje y desmontaje ya que se programaban exposiciones itinerantes que debían recorrer la geografía española. El sistema elegido por Pérez Piñero es el conocido como cúpula geodésica, cuya patente americana pertenecía a Fuller, pero en la península ibérica estaba sin protección, por lo que Pérez Piñero introduce la patente *`Sistema de montaje de una Estructura Resistente Esférica Triangulada´* en 1965. La estructura se inaugura en agosto de 1966 en la plaza María Pita de La Coruña. Imágenes de estos proyectos se encuentra en el artículo `Teatro Desmontables´ aparecido en la revista Informes de la Construcción de junio de 1971.

Un aspecto importante en la obra de Pérez Piñero es su relación con Salvador Dalí, que se inicia con la obsesión de Dalí por cerrar la escena del antiguo teatro de Figueras con una cúpula `tipo Fuller´, que es como el artista surrealista conoce la tipología de cúpula geodésica. De esta colaboración nace otro proyecto, el denominado Vidriera Hipercúbica Desplegable, que es el objeto de este trabajo. Este artefacto debía alojar un plano desplegable formado por unidades pintadas por Dalí, para separar el antiguo patio de butacas del espacio escénico del antiguo teatro (Figura 1). Con este proyecto el arquitecto consigue colmatar un proceso iniciado con el primer artefacto con el que gana el concurso de estudiantes de la UIA. En la Vidriera Hipercúbica el elemento portante, o esqueleto, y la cubrición, o piel, comparten los movimientos de plegado y desplegado en una sincronización perfecta.

Figura 1. Situación donde se iba a ubicar la Vidriera Hipercúbica bajo la cúpula geodésica realizada por Pérez Piñero, 1971 (Fuente: autores 2015).

2.2. La Vidriera Hipercúbica Desplegable: El encargo

En octubre de 1971 se produce el encargo de Salvador Dalí a Pérez Piñero, según carta manuscrita que se encuentra en la Fundación Emilio Pérez Piñero:

> *Que me pidierais, Señor, el 19 de octubre en Figueras, una vidriera hipercúbica, plegable, legítima; fue para mí, al tiempo que un desafío, el paso de la levadura que me haría acometer la realización de lo que en principio parecía imposible. La solución `in mentis´ la tuve, tan solo, 12 horas más tarde. He empleado estos 20 días en la ejecución de esta maqueta que ahora os ofrezco como pequeño testimonio de la ilimitada admiración que os profeso. Muchas gracias* (2).

La vidriera debía cerrar la embocadura de la escena del teatro y a su vez alojar un plano vertical vidriado que Dalí pintaría, para posteriormente y mediante un accionamiento mecánico plegarse, encontrándose de nuevo en relación el exterior y el interior, el patio y la escena. La invención del nombre debe atribuirse a Dalí cuando dice:

> *la vidriera del museo de Figueras, que, en el fondo, es una cruz hipercúbica, y que es la primera estructura quinética, porque está calculada de manera que cuando está plegada es un cubo y se diría –como que yo estoy pintando ahora los cristales –abrirá una serie de efectos de lo que hoy se llama "pop art". O sea, de imágenes superpotentes, casi ininteligibles [. . .] En el momento que está completamente abierta, aparecería la Santísima Trinidad, que es uno de mis sueños de la pintura más importantes* (3).

Según documentación aportada por Pérez Piñero a la revista Arquitectura, donde aparece el alzado del proyecto a escala 1/50, la Vidriera Hipercúbica Desplegable tenía 84 paneles de vidrio cuadrados de 1 metro de lado que al plegarse conformaban un cubo en el centro de la abertura de la escena del antiguo Teatro (4). El cerramiento desplegable no llega a materializarse, en su lugar se cerró el paramento con una superficie acristalada fija sobre bastidores metálicos que colmata la superficie de 18 metros altura por 10 metros de ancho. Existe una maqueta del prototipo a escala 1/3 y que se exhibe en el Teatro-Museo Salvador Dalí y es el que Pérez Piñero y Dalí pasean por París como atestiguan algunas de las fotografías que se conservan y a la que el pintor se refiere en la entrevista concedida a la revista Arquitectura con motivo del fallecimiento del arquitecto en 1972 (Figura 2) . De haberse construido la vidriera tendría un carácter permanente, aunque móvil, ya que la superficie vidriada ofrecía dos estados de relación entre el exterior y el interior, en su plegado y desplegado. La estructura no se traslada, queda en el sitio, permitiendo la entrada una vez plegada de forma automática, como ya ensaya en la maqueta. Esta obra es el último eslabón en la investigación de las estructuras desplegables iniciada por Pérez Piñero en 1961, llegando a condensar dos fases en una sola; *Aparecen la piel y el esqueleto en un elemento único, adiestrado ya en combinar cerramiento y estructura en un conjunto plegable* (5). La invención queda protegida con una patente en territorio nacional denominada *`Sistemas de planos articulados cubriendo una estructura reticular esterea desplegable´* y de su homóloga estadounidense que firma su viuda en 1976, ya que Emilio Pérez Piñero fallece volviendo de Figueras, donde realizaba la supervisión de la cúpula retícular, en un accidente de tráfico en Torreblanca.

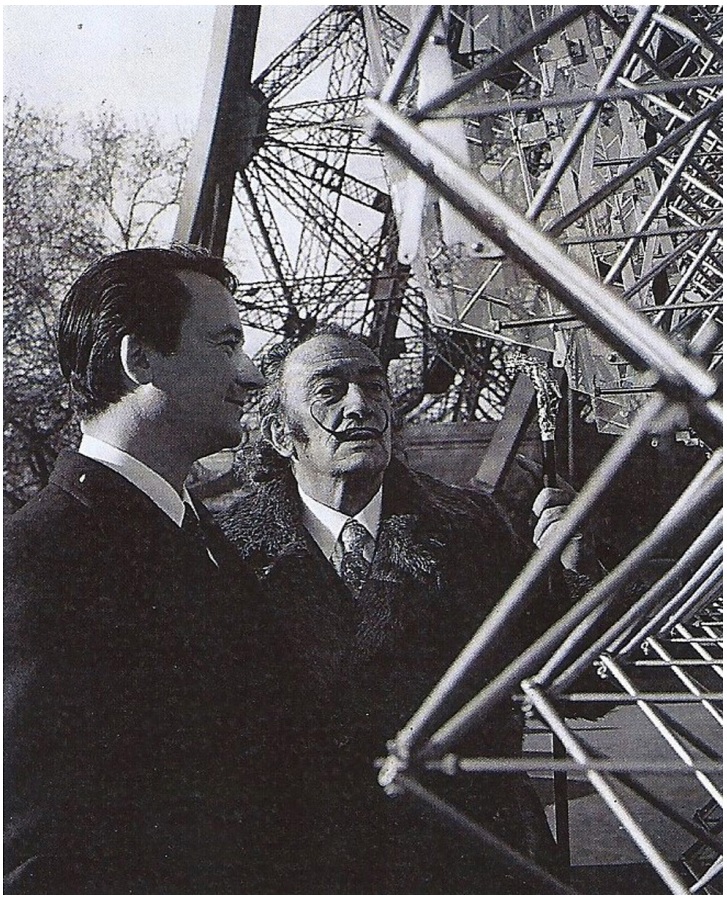

Figura 2. Dalí y Pérez Piñero frente al prototipo de Vidriera Hipercúbica en París, 1971. (Fuente: Fundación Gala-Salvador Dalí).

2.3. Prototipos construidos

El primer prototipo lo construye Pérez Piñero a escala 1/3 y es el que se encuentra en el Teatro-Museo Salvador Dalí (Figura 3). El soporte de la vidriera lo forma una estructura reticular plana tridimensional con un módulo base formado por haces de cuatro barras que se unen en su parte central, conformando contornos rectangulares al unirse unos con otros. Las uniones de las barras forman familias de nudos superiores e inferiores que se alojan en planos imaginarios paralelos. Este sistema de estructura desplegable se encuentra protegido en la primera patente de 1961. Un sistema pantográfico formado por dos pletinas metálicas se utiliza para unir los planos de vidrio con la estructura desplegable de módulos de cuatro barras. En cada brazo articulado se apoya el plano vidriado utilizando uniones articuladas mediante bisagras metálicas en uno de sus extremos. El otro lado del panel vidriado se fija mediante articulaciones con otro panel contiguo, formando agrupaciones de dos a dos, quedando este lado libre de la estructura soporte, lo que permite la compatibilidad de los movimientos relativos de la piel y el esqueleto en los procesos de plegado y desplegado. Se colocan seis filas y seis columnas de paneles de vidrio. El elemento de soporte de este primer prototipo de Vidriera Hipercúbica Desplegable está formado por una cruz vertical con dos brazos realizados con perfiles metálicos en cajón, anclado y atirantado a una base prismática. Como el plegado y desplegado debía ser automático, esta base alberga un motor encargado de realizar este movimiento:

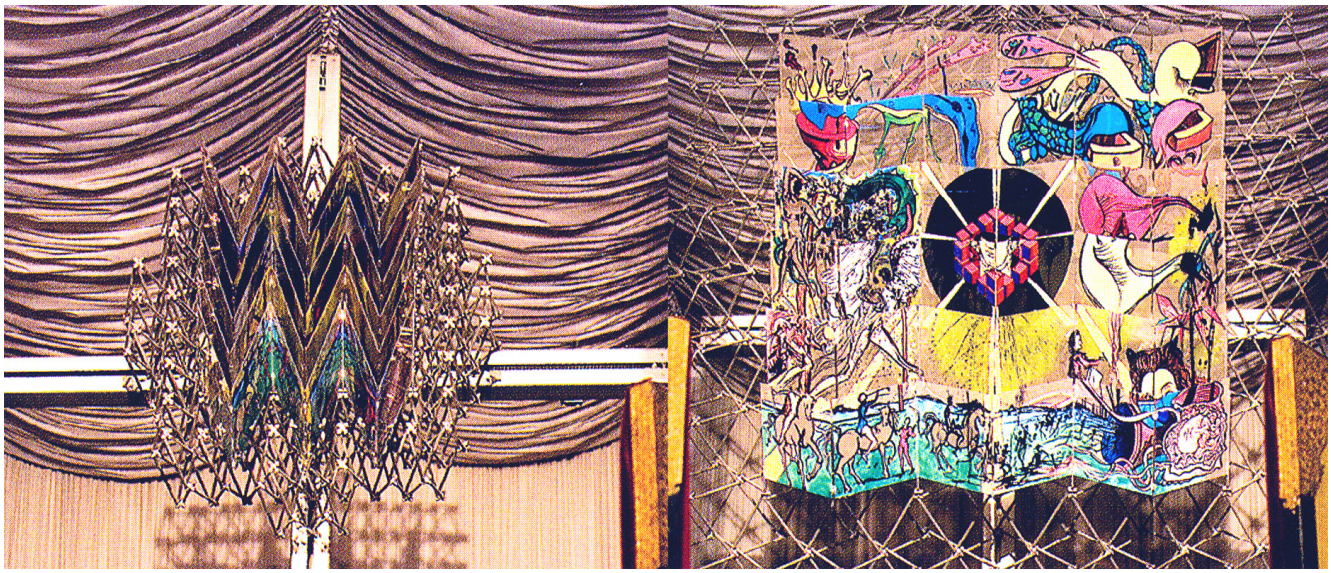

Figura 3. Prototipo de Vidriera Hipercúbica a escala 1:3 exhibido en el Museo Teatro Salvador Dalí. Emilio Pérez Piñero, 1971. (Fuente: Fundación Gala-Salvador Dalí).

> *la transmisión del movimiento es de la siguiente forma: los cuatro nudos de apoyo se atornillan a cuatro cojinetes a bolas dentro de los que gira un tornillo sin fin accionado por el motor; solo el tornillo del brazo inferior de la cruz está accionado por el motor; el movimiento se transmite a los otros tres a través de una caja de engranajes situada en el cruce de la cruz; al giro de los tornillos los cuatro cojinetes se desplazan por los brazos, entre dos topes extremos* (6).

El segundo prototipo construido es el realizado con motivo de la Exposición Universal de Sevilla en 1992 para el Pabellón de Murcia (Figura 4). El lema de la exposición era `Los Descubrimientos´, lo que permitió presentar aquellos realizados por inventores murcianos como el submarino de Isaac Peral, el autogiro de Juan de la Cierva y el prototipo de Vidriera Hipercúbica de Emilio Pérez Piñero que nos ocupa:

> *Se construyó para la ocasión una gran estructura móvil motorizada que se plegaba y desplegaba colgada del techo del gran vacío central del Pabellón. Esta estructura había sido diseñada por Pérez Piñero como vidriera móvil para el Museo Dalí en Figueres, (del que Pérez Piñero ya había construido la cúpula) pero no había llegado a ejecutarse debido a la prematura muerte del arquitecto (7).*

Según fotografías y conversaciones mantenidas con el arquitecto que realiza el proyecto del Pabellón de Murcia, Vicente Martínez Gadea, el prototipo de Vidriera Hipercúbica Desplegable se realiza a escala real, es decir 1/1 y estaba compuesto por una estructura desplegable formada por módulos de cuatro barras de acero que se unen en su centro geométrico siguiendo la patente de 1961. El Sistema Pantográfico era el encargado de alojar los paneles de metacrilato de dimensiones 1 x 1 m. Se colocan 36 paneles transparentes en seis filas y seis columnas unidas a la estructura desplegable que horizontalmente se cuelga del techo del pabellón con un peso de 6 toneladas. Este aspecto es importante ya que originariamente la Vidriera Hipercúbica se iba a colocar de forma vertical, para separar la boca del escenario del antiguo teatro. Posteriormente el prototipo es desmontado, al desmantelarse el Pabellón de Murcia cuando finaliza la Exposición Universal de Sevilla de 1992, no conociéndose su paradero actual.

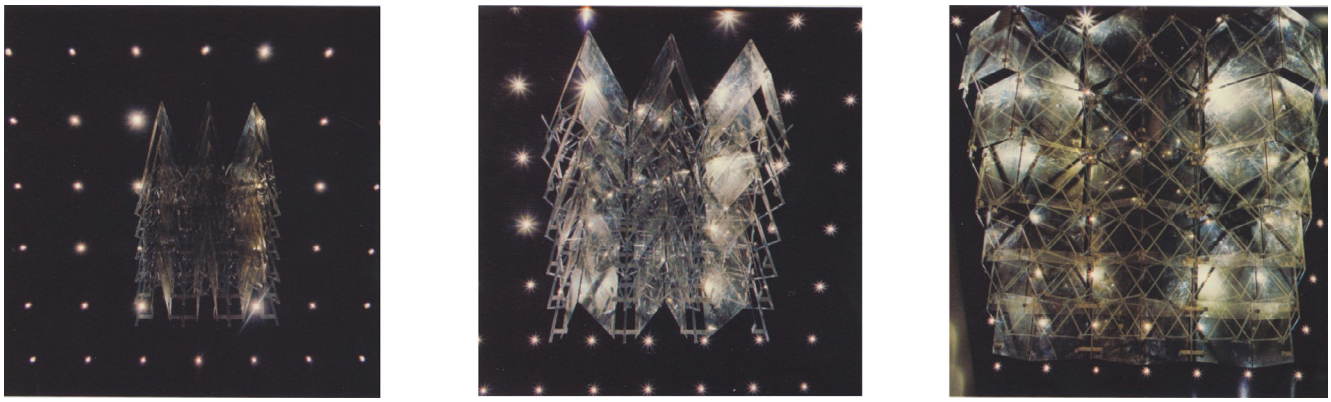

Figura 4. Vidriera Hipercúbica para la Expo 92, Sevilla. Emilio Pérez Belda y Vicente Martínez Gadea, 1992. (Fuente: Vicente Martínez Gadea. Arquitectura 1985/2011: COAMU, Editorial Godoy).

El presente trabajo describe el prototipo realizado por la Universität Siegen para la exposición de la GLASSTEC 2022 celebrada en Düsseldorf en septiembre del mismo año. Se trata de un prototipo a escala ½ que se realiza tras comprobar y mejorar la geometría del artefacto en los seminarios impartidos en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Siegen que se celebran cada año con el nombre Bewegliche Tragwerke. Tras comprobar aspectos geométricos estudiados y recogidos de las patentes del arquitecto Emilio Pérez Piñero, el prototipo se optimiza con un equipo formado por investigadores alemanes y españoles cuyos resultados finales son expuestos en la mencionada Feria Internacional Glasstec de la industria del vidrio y cristal. El objetivo principal de la investigación realizada es la comprobación de la vigencia del artefacto adaptándolo a los nuevos medios de fabricación, entre ellos la impresión 3D y el corte láser. Para ello se realiza un cálculo de estructuras utilizando materiales polímeros, mas adecuados para la impresión 3D.

3. LA INTERPRETACIÓN VIDRIERA HIPERCÚBICA. EL PRIMER PROTOTIPO

En el diseño del prototipo se combinan los principios extraídos en las patentes internacionales de Emilio Pérez Piñero. Concretamente las que introduce en la Oficina de Patentes de Estados Unidos. Por un lado, la estructura reticular desplegable que sostiene la superficie vidriada se describe en la patente denominada `*Three Dimensional Reticular Structure´* (8). Está compuesta con módulos formados por cuatro barras de las mismas dimensiones y sección circular que se unen en su centro geométrico mediante una articulación que permite su giro. Cada barra tiene tres uniones: una central y dos en sus extremos, inferior y superior, cuyo nudo debe permitir igualmente los movimientos de rotación que permitan el plegado y desplegado del sistema. Los módulos se unen mediante las rótulas superiores e inferiores generando un contorno rectangular o cuadrado. Unas barras telescópicas verticales enlazan los extremos superiores de una barra y el inferior de la siguiente para arriostrar el sistema y funcionan como freno del plegado de la estructura.

El sistema de paneles de vidrio plegados se describe a su vez en la patente `*System of articulated planes´* (9) y consiste en una serie de pares de paneles de vidrio que pueden ser plegados horizontalmente. La unión entre los paneles se produce mediante articulaciones y cada extremo de cada par se une mediante un Sistema Pantográfico al nudo superior de la estructura desplegables descrita en la patente (8). El Sistema Pantográfico realiza la transición entre la estructura desplegable y el sistema de planos de vidrio y permite que estos se plieguen verticalmente acompañando y compatibilizando los movimientos de ambos sistemas.

Las dos patentes pueden interpretarse de forma independiente y juntas ayudan a la realización de la Vidriera Hipercúbica al combinarse los sistemas. Los dibujos y diagramas de la primera patente (8) enseñan estructuras horizontales, mientras la segunda patente (9) disposiciones verticales. Ninguno de estos documentos muestra como es el mecanismo en cruz donde se cuelga la vidriera verticalmente en el prototipo a escala 1/3 que realiza el autor en 1971. Existen una serie de dibujos y diagramas realizados en cuartillas de un hotel de París (Figura 5), donde posiblemente se alojaron Pérez Piñero y Dalí, cuando ambos muestran el prototipo en la ciudad como atestiguan las fotografías. Los dibujos a mano se encuentran en la Fundación Emilio Pérez Piñero y también en un anexo de la Tesis Doctoral de Lina Puertas del Río de 1990 (6). Estos esquemas se han utilizado para la interpretación del prototipo realizado para la exposición en la GLASSTEC de 2022.

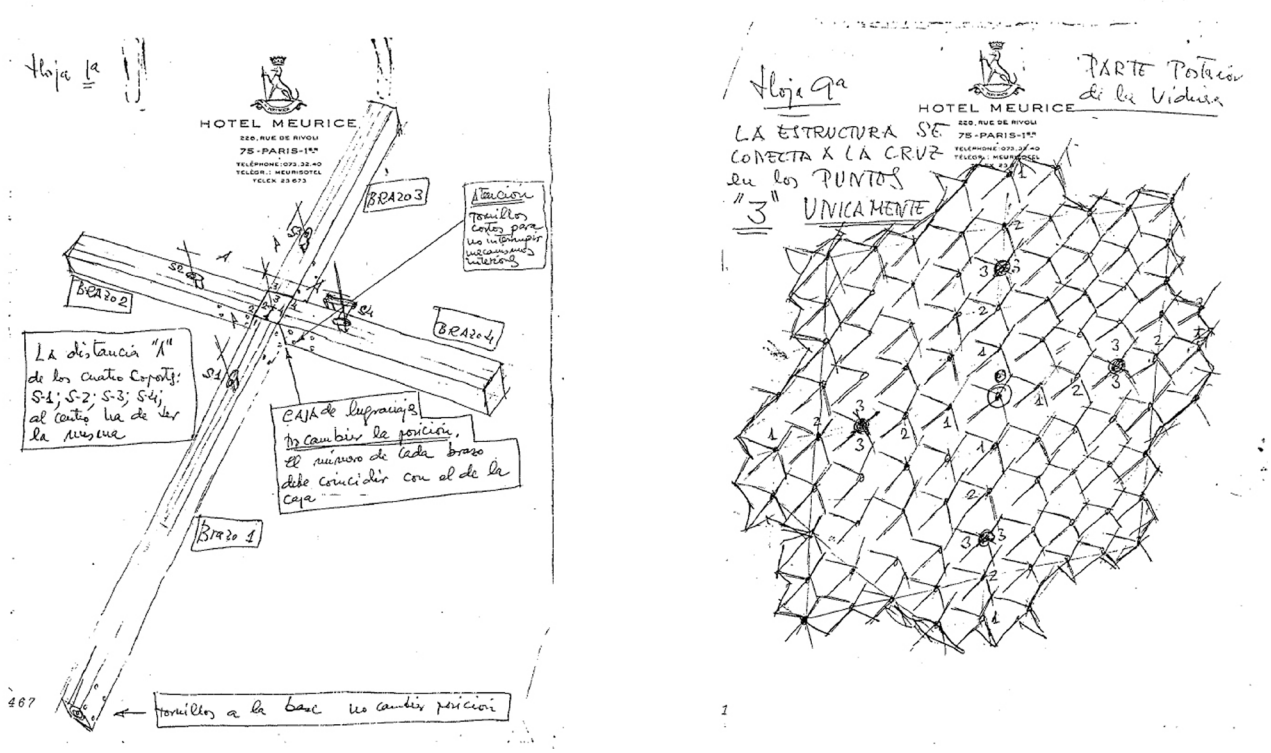

Figura 5. Esquemas y dibujos del sistema en cruz realizados por Emilio Pérez Piñero, 1971. (Fuente: Lina Puertas del Río. *Estructuras espaciales desmontables y desplegables. Estudio de la obra del arquitecto Emilio Pérez Piñero* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid).

3.1. Prototipo de trabajo I. Prueba de concepto

Durante el segundo semestre del año 2020, en plena pandemia, se realiza el seminario Bewegliche Tragwerke, donde los alumnos deben realizar conjuntamente un modelo o maqueta de Vidriera Hipercúbica Desplegable a escala ½ (teniendo como referencia que el panel de vidrio debía tener una dimensión real de 1 metro de lado). Era importante comprobar que la geometría y las leyes de las estructuras desplegables estudiadas de forma teórica en las patentes de Pérez Piñero se cumplían al construir la maqueta. Para ello se decide utilizar materiales de fácil obtención y utilizando herramientas tradicionales para que los costes sean manejables acordes al presupuesto del seminario. De tal manera para las barras de la estructura desplegable se utilizan tubos de PCV huecos de 2 cm de sección. Para realizar los nudos que permiten el plegado y desplegado de las barras de PVC se utilizan perfiles de aluminio, que existen en el mercado, donde es fácil alojar pernos o tornillos que atraviesan las barras. A este nudo base se le añade un elemento diseñado en CAD e impreso con una impresora 3D y PLA como material para ejercer de nudo superior cuando se necesite realizar las transiciones del Sistema Desplegable al Sistema Pantográfico (Figura 7).

El Sistema Pantográfico se simplifica y se utilizan barras d PMMA (metacrilato), cortado de manera mecánica. Para los planos de vidrio se utilizan paneles de DM de 2 mm de espesor por su mejor manejabilidad, trabajabilidad y menor coste.

Estos planos se unen entre ellos para formar pares de planos mediante bisagras, que también se utilizan para fijar los extremos al Sistema Pantográfico. Como se desprende de la patente (9), es necesario diseñar unos elementos, que llamaremos espaciadores y que se diseñan con CAD y son fabricados en PLA con una impresora 3D.

Estos elementos garantizan la suficiente holgura al plegar los paneles, ya que deben estar contenidos unos dentro de otros, tal como se grafía en los esquemas de la patente.

Una vez realizado el prototipo con los estudiantes que participan en el seminario Bewegliche Tragwerke, se comprueba que su geometría es compatible con los movimientos de plegado y desplegado (Figura 6), que era el objeto de dicho prototipo, extrayendo las siguientes conclusiones:

- Es necesario un cálculo estructural para determinar la dimensiones y material de las barras del sistema desplegable, ya que los tubos de PVC no son adecuados para el modelo definitivo.
- El Sistema Pantográfico debe redimensionarse y encontrar el material adecuado, ya que durante el plegado varias pletinas realizadas con PMMA (metacrilato) han colapsado.
- Mientras el desplegado es relativamente sencillo, se comprueba que para realizar el plegado de la estructura se necesita vencer la gravedad e inercia de los paneles de vidrio que interfieren en este movimiento.

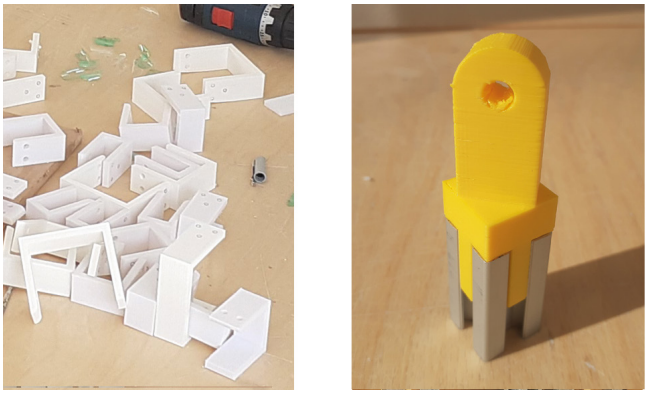

Figura 7. Imagen espaciadores y nudo. Prueba de concepto. Seminario Bewegliche Tragwerke, 2020 (Fuente: autores 2020).

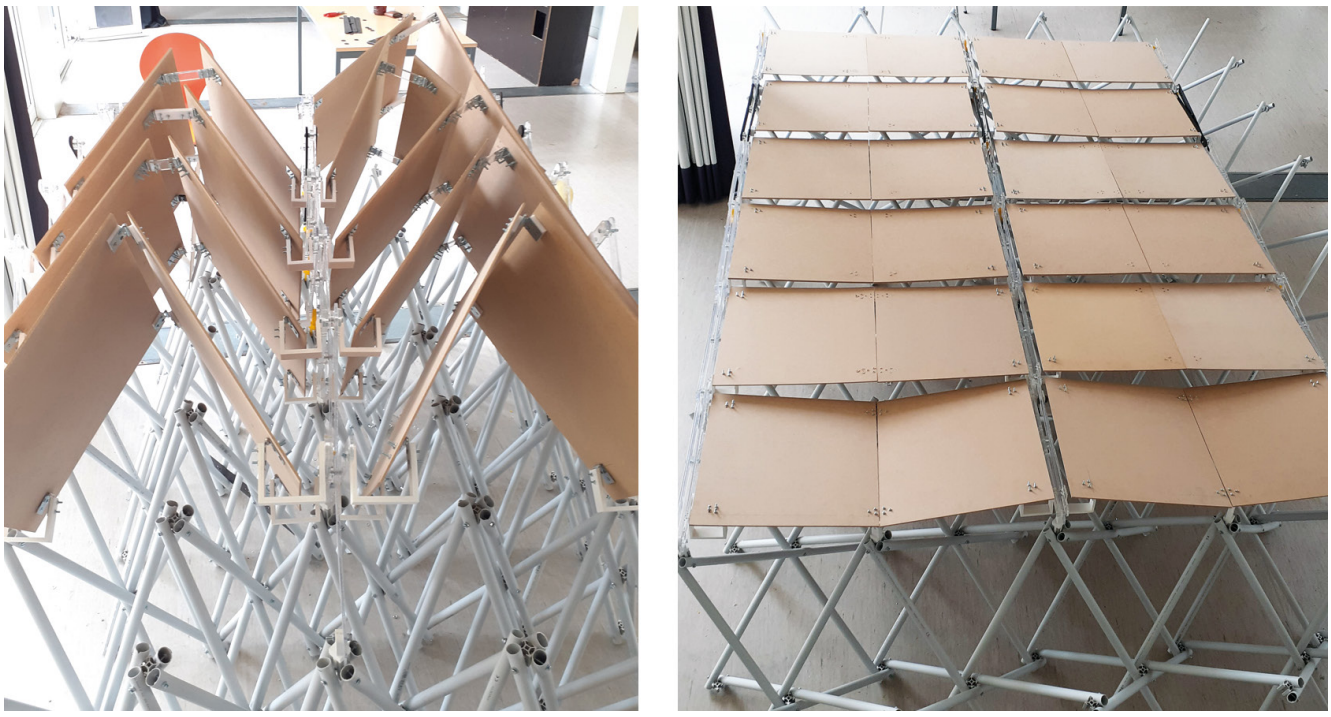

Figura 6. Prototipo de Vidriera Hipercúbica. Prueba de concepto . Seminario Bewegliche Tragwerke, 2020 (Fuente: autores 2020).

4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y DIMENSIONAMIENTO DEL PRIMER PROTOTIPO

Consideramos la Vidriera Hipercúbica Desplegable como un sistema cinético formado por: un Sistema Despelgable como subestructura portante y la que se encarga de los movimientos de plegado y desplegado, un Sistema Pantográfico donde se articulan los planos de vidrio que debe acompañar a los movimientos de plegado y desplegado. La unión entre este Sistema Pantográfico y la estructura desplegable se realiza mediante rótulas que además de garantizar los movimientos deben soportar y transmitir las cargas que les son transmitidas. La finalidad de un primer cálculo estructural basado en la estabilidad estática y elástica es realizar un predimensionado simplificado para establecer valores de la sección resistente y seleccionar el material con el que se realizará el Sistema Desplegable. Posteriormente se comprueban mediante cálculos locales tanto los nudos superiores como el Sistema Pantográfico y los conectores utilizados para unir los paneles de vidrio. Una decisión tomada a priori y que influye en el proceso es la de utilizar el diseño digital en aquellas partes que sean susceptible de ello; principalmente en los nudos estructurales y el Sistema Pantográfico y sus conectores, para que puedan ser materializados mediante fabricación digital. Es un aspecto importante en la interpretación de la Vidriera Hipercúbica Desplegable ya que esta metodología no se conocía en la década de los setenta y nos introduce en el paradigma digital en la fabricación de prototipos.

4.1. Análisis estructural y geométrico del Sistema Desplegable

El análisis de la estructura se comprueba en tres estadios mediante análisis estático y los resultados son analizados y avaluados en un proceso continuo. El dimensionamiento se ha ejecutado con el software Dlubal RFEM 5.24 (10) mediante el método de los estados límite: el estado límite último (ELU) y el estado límite de servicio (ELS). Se consideran como cargas permanentes aquellas derivadas del peso propio gravitatorio de todos los elementos que componen el prototipo que se estima en 0,55 kN /m2 y como acciones variables la carga de viento, que es un requisito impuesto por la organización donde se va a exponer el prototipo que es 0,125 kN/m^2. Otro aspecto importante es el tamaño que va a tener el prototipo definitivo. Aunque en un principio se valora la construcción de un modelo a escala real, el espacio de 3 x 3 metros donde se va a exponer la Vidriera Hipercúbica aconseja un tamaño menor donde se puedan interpretar mejor las características del artefacto. Finalmente se decide realizar un prototipo a escala ½ que es el tamaño realizado en el primer seminario cuando se comprueban las características geométricas de éste. En la modelización se consideran todas las uniones como articulaciones, por lo que los esfuerzos normales y cortantes son absorbidos por las barras y el momento se transmite. No se consideran esfuerzos de torsión. Las barras telescópicas verticales transmiten a su vez compresiones.

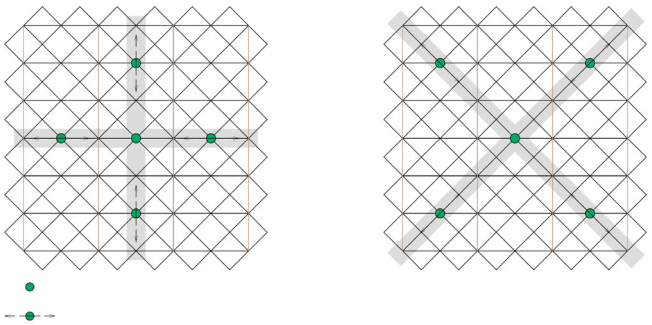

Figura 8. Configuración en diagonal. (Fuente: autores 2022).

En un primer paso se comprueban la cantidad de soportes necesarios que deben apoyar en el sistema en cruz donde finalmente se colocará la Vidriera Hipercúbica y si la disposición de este sistema es vertical o horizontal. Se comprueban los esfuerzos y deformaciones y un primer resultado confirma que la disposición diagonal es más adecuada, porque permite disponer de un menor número de soportes y además la subestructura evita la deformación por voladizo, donde habría que sobredimensionarla.

En los esquemas de la Figura 8 se enseñan las diferencias entre la disposición ortogonal y diagonal tanto vertical como horizontalmente. Mientras que en la disposición vertical las deformaciones por voladizo son significantes, en la disposición horizontales, al ser perpendiculares al plano de vidrio, son más controlables. Por esto se decide continuar analizando la posición horizontal del artefacto. Los materiales con los que se realiza el predimensionamiento para la subestructura son acero estructural S235 (11) y aluminio EN-AW6060 T6 (12). Ambos materiales ofrecen tanto resistencia necesaria como calidad superficial y resistencia a la corrosión adecuadas. Comparando ambos materiales el límite elástico del aluminio es un 40% más bajo y es susceptible de mayores deformaciones con un módulo de Young también más reducido. Sin embargo, la carga relativa al peso propio al utilizar aluminio es tres veces menor que si se utilizara acero estructural. En este primer paso se certifica que la disposición horizontal es más favorable como se comprueba en la Tabla 1, dejando la decisión final del material pendiente de posteriores comprobaciones.

Tabla 1. Comparativa de las propiedades de los materiales.

Propiedades	Acero Estructural S235	Aluminio EN-AW6060 T6
Normativa	DIN EN 1993-1-1.	DIN EN 1999-1-1.
Peso Propio	7,85 g/cm^3	2,70 g/cm^3
Módulo de Young	210.000 N/mm^2	70.000 N/mm^2
Límite elástico	235 N/mm^2	140 N/mm^2

En un segundo paso se comprueban los esfuerzos obtenidos desde el cálculo de estructuras de las diferentes variantes establecidas para así comprobar la idoneidad del material elegido, que es aluminio EN-AW6060 T6. Se establece que, aunque las deformaciones aumentan, están dentro de lo considerado controlable y la verificación de los estados últimos se cumple ampliamente. De tal manera se podrían incluso reducir las dimensiones de las barras de aluminio, pero hay que tener en cuenta otras consideraciones constructivas. Si se reducen las dimensiones de las barras de la subestructura desplegable, habría que por un lado aumentar el número de apoyos a la cruz en disposición diagonal y los nudos superiores verían reducidas sus dimensiones. La primera consecuencia aumenta los puntos de contacto, lo que dificulta el movimiento de la Vidriera Hipercúbica Desplegable y no es conveniente disminuir la sección del nudo ya que se materializa con un polímero de reducida resistencia mecánica como se expondrá posteriormente. Por consiguiente, los elementos

del marco estructural se realizan con aluminio EN-AW6060 T6 con cinco nudos de apoyo colocado en la cruz con disposición diagonal. Las dimensiones obtenidas según cálculo de estructuras son tubos de 20 mm de diámetro y 2 mm de espesor para los elementos diagonales (cuatro por módulo). Las barras que trabajan a compresión y que están colocadas en un mecanismo telescópico, como se describía anteriormente, son así mismo de aluminio y de diámetro 14 mm y espesor de 1 mm. El tercer paso es nuevamente la comprobación de todos los estados estructurales en un nuevo cálculo estructural una vez definidos todos los elementos.

4.2. Análisis estructural y geométrico de los Nudos Estructurales

Los nudos son una parte importante del sistema desplegable, por un lado, deben permitir la correcta transferencia de las cargas a las barras de aluminio y posteriormente a la cruz de disposición diagonal, y por otro lado deben garantizar tanto los movimientos de plegado y desplegado del Sistema Desplegable como los movimientos del Sistema Pantográfico. Partiendo de una tipología base, recogida de las patentes de Pérez Piñero, hay que generar hasta cinco variaciones que den respuesta a todas las situaciones.

Como anteriormente se describía se toma la decisión de realizar el diseño de los Nudos Estructurales mediante herramientas CAD que posteriormente permitan su impresión mediante impresora 3D. El primer nudo recogido en la Figura 9 es el nudo intermedio que debe garantizar la transmisión de cargas y el giro de las cuatro barras de aluminio que atraviesa mediante pernos. El segundo corresponde al nudo superior que realiza la transición con el Sistema Pantográfico, que se inserta y atornilla a éste. También cuenta con cuatro pernos que permiten la inserción de las barras metálicas. En tercer lugar, el nudo superior en las situaciones donde se encuentran dos extremos de planos de vidrio que no están sujetas al Sistema Pantográfico. Aunque deben permanecer libres, el nudo posibilita que los planos descansen sobre él y paraliza el movimiento. El cuarto nudo hace referencia al nudo inferior que recoge la barra que trabaja a compresión, arriostra el sistema y forma parte de un sistema telescópico. El quinto es el que acoplando la barra de compresión posibilita que la Vidriera Hipercúbica Despegable se ajuste a la cruz horizontal que mediante un mecanismo que se describe posteriormente realiza de forma automática los movimientos del sistema.

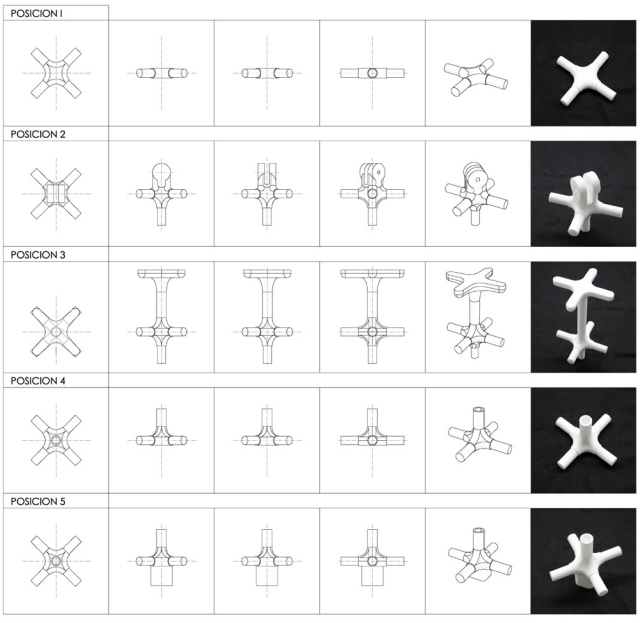

Figura 9. Diferentes posiciones. Nudos Estructurales. (Fuente: autores 2022).

Para el diseño y cálculo estructural de los nudos se utilizan los procesos de Form Finding que intentan adecuar la forma a la manera en que se transmiten las cargas, optimizando por tanto el material utilizado. El objetivo de la modelización es aportar más material a las zonas más tensionadas y crear transiciones suaves para evitar acumulación de éstas, utilizando para ello formas orgánicas. El enfoque de la modelización y de la búsqueda de la forma óptima pone en relieve las ventajas de la fabricación digital y la impresión 3D, que facilitan la realización de las piezas. Se ha utilizado el software Ansys Workbench 2020 que facilita dichos procesos (13). Se calculan los nudos con las cargas utilizadas anteriormente para la subestructura desplegable metálica de barras de aluminio y mediante un proceso de adaptación y proceso de optimización se resuelve la topología y geometría final de las cinco situaciones

En principio los polímeros son los materiales más utilizados en la impresión 3D, aunque el aluminio y el acero también se pueden utilizar, pero aumentan los costes considerablemente. La elección del material será tomada en función de la disponibilidad, el precio y las características del material. En la Tabla 2 se muestra una comparativa entre el acero estructural S235J y el polímero PA12, que es una poliamida utilizada en forma de polvo, teniendo más capacidad resistente. En la tabla se puede apreciar que el valor del módulo de elasticidad de la poliamida es casi 200 veces menor que el del acero y que este es 8 veces más resistente a tracción que el polímero. Sin embargo, el peso propio del termoplástico es mucho menor, lo que disminuye considerablemente las cargas a transmitir y unido a su mayor disponibilidad y menor coste de fabricación lo hacen el candidato idóneo, teniendo en cuenta que las cargas a transmitir no son muy elevadas.

Tabla 2. Comparativa de las propiedades de los materiales.

Propiedades	Acero Estructural S235	NYLON PA 12
Fuente	ANSYS 2019 R2 GRANTA	ANSYS 2019 R2 GRANTA
Peso Propio	7,85 g/cm^3	1,01 g/cm^3
Módulo de Young	210.000 N/mm^2	1.207 N/mm^2
Límite elástico	235 N/mm^2	39 N/mm^2
Resistencia a traccion	428 N/mm^2	49 N/mm^2
Relación coste	10	1

5. *HYPERKUBISCHES GLAS* (HG). EL PROTOTIPO PARA LA GLASSTEC 2022

Una vez evaluado el primer prototipo por el grupo de investigadores de la Universität Siegen y la Universidad Politécnica de Cartagena se decide encargar el material necesario para desarrollar una prueba final del prototipo antes

de su entrega a los técnicos de la universidad alemana para su ajuste final y colocación sobre el sistema en cruz horizontal donde el prototipo se plegará y desplegará accionado por un motor. El montaje de dicha prueba se realiza nuevamente juntamente con los estudiantes en taller en forma de seminario.

Se han realizado los cálculos necesarios para dimensionar la subestructura portante que llamamos Sistema Desplegable, y para dimensionar los Nudos Estructurales. El Sistema Pantográfico se mejora constructivamente al mismo tiempo que se optimizan las piezas denominadas espaciadores y que son las que realizan las transiciones entre los planos de vidrio y el Sistema Pantográfico. Estas piezas se unirán al vidrio mediante un polímero que funciona como adhesivo estructural. Todos los espaciadores son rediseñados para integrar la bisagra y que sean susceptibles de imprimir en 3D. Finalizado el dimensionado se encargan las piezas para su montaje y pruebas finales.

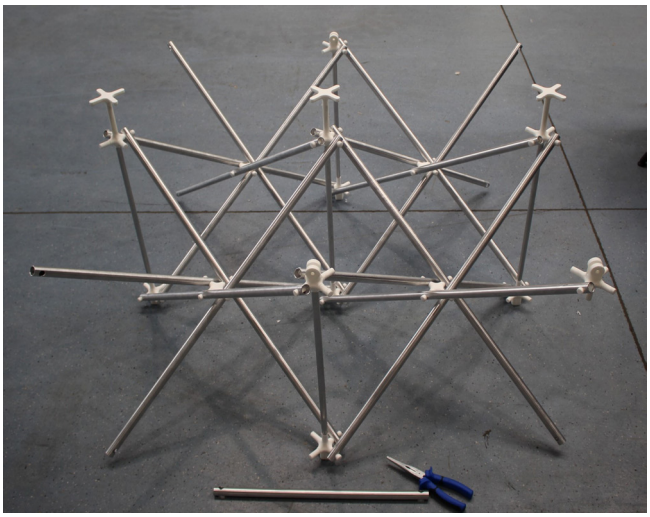

Figura 11. Montaje del Sistema Desplegable del Prototipo HG. (Fuente: autores 2022).

5.1. Partes del Prototipo

De forma resumida los materiales y partes de la Vidriera Hipercúbica son los siguientes (Figura 10):

Sistema Desplegable: el sistema principal está formado por cuatro barras de aluminio de 916 mm de largo 20 mm de diámetro y 2mm de espesor que denominamos RO 20x2. Al sistema desplegable se le incorpora un mecanismo que rigidiza la estructura y transmite cargas a compresión, se trata de una barra de aluminio macizo de 435 mm y 10 mm, que llamamos RD 10 que se introduce en otra barra hueca de aluminio, de 430 mm de largo 13 de diámetro y 1 mm de espesor RO 13x1, funcionando ambas como un sistema telescópico (Figura 11). Este sistema era originariamente utilizado en los prototipos de Pérez Piñero. Alrededor de 36 módulos de cuatro barras cada uno componen el prototipo. Se decide realizar medios módulos en el perímetro que actúen como rigidizadores del sistema ante esfuerzos horizontales. Estas barras son a su vez del tipo RO 20x2 pero con un largo de 483 mm.

Nudos estructurales: Se necesitan cinco variaciones del nudo principal para recoger todas las posiciones necesarias para el plegado de la Vidriera Hipercúbica Desplegable. Como se ha explicado anteriormente por cálculo estructural y por factores económicos y de disponibilidad, se decide imprimir los Nudos Estructurales en Nylon PA 12 y en color blanco. Los nudos que se utilizan están reflejados en la Figura 9.

Sistema Pantográfico: Pertenecen a este sistema las pletinas que se colocan formando tijeras y se encargan por un lado del plegado de los planos de vidrio como de enganchar estos a la estructura desplegable mediante los nudos en posición 2 (Figura 12). Estos dos sistemas tienen que ser compatibles. También pertenecen al Sistema Pantográfico todas las piezas pequeñas que realizan las uniones de los vidrios entre ellos y con las pletinas. Como anteriormente se describe las pletinas se realizan con policarbonato después de optimizar su forma según la investigación realizada, aunque tras una primera comprobación se detecta que este material es muy deformable por lo que se decide su fabricación en aluminio en consonancia

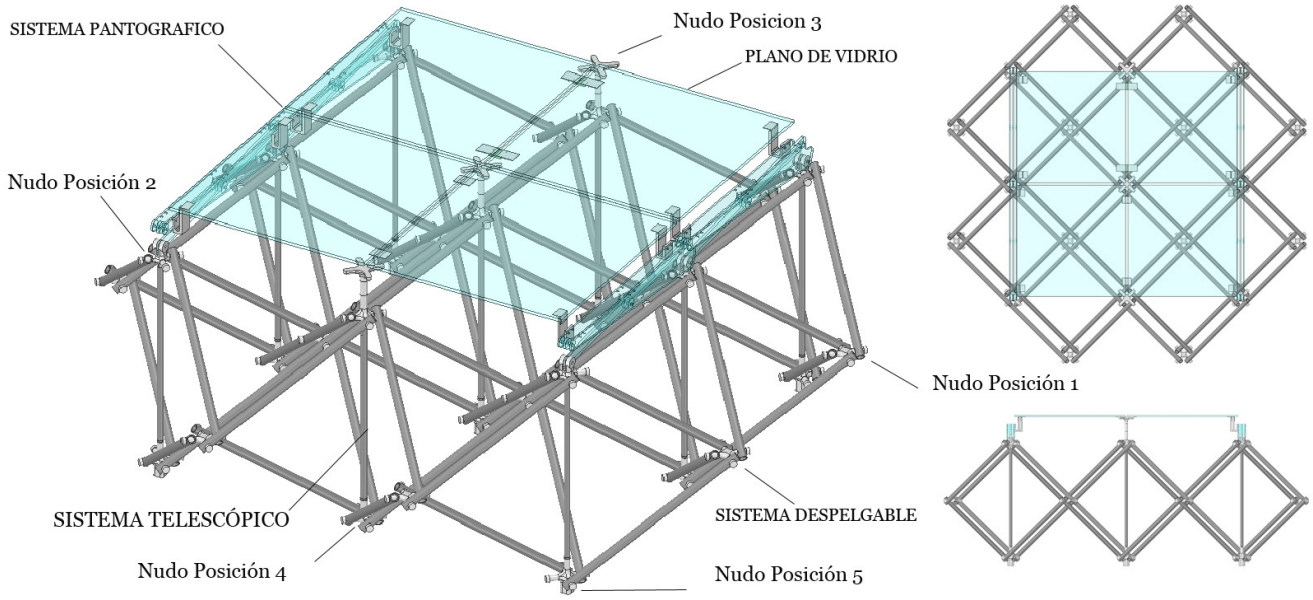

Figura 10. Axonometría, planta y alzado del Prototipo HG. (Fuente: autores 2022).

con el Sistema Desplegable. Las piezas pequeñas se diseñan en CAD y se imprimen en PLA. Los cambios realizados en las pletinas después de estudiar la patente de Pérez Piñero consiguen que cuando el ángulo que forman los planos de vidrio con la horizontal es cero, el ángulo de la pletina con la horizontal se acerca a 5º y se puede ejercer un momento (efecto palanca) para iniciar el plegado de la Vidriera Hipercúbica. Las piezas denominadas espaciadores también se rediseñan con dos acciones: se aumenta la altura de la pieza por uno de sus extremos y se redondean sus esquinas para conseguir que la junta o fuga entre planos de vidrio sea mínima y percibir los planos de vidrio como un solo plano cuando se encuentre desplegado. Al extremo se acopla una bisagra metálica que va atornilla al separador y pegada mediante una cola especial al vidrio.

Planos de vidrio: Por último, para materializar los planos de vidrio se encargan según medida aportada, un vidrio de las siguientes características:2 vidrios laminados de 1 mm de espesor con un núcleo de policarbonato macizo de 5 mm.

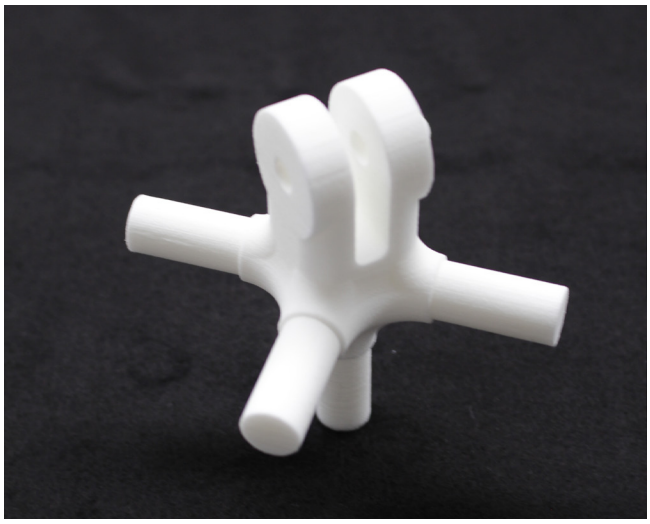

Figura 12. Nudo estructural Posición 2 del Prototipo HG. (Fuente: autores 2022).

Por tanto, tendríamos un espesor total de 7 mm=1+5+1, reduciendo considerablemente el peso propio del material. Estos planos se adhieren a los espaciadores con un polímero estructural.

Una vez se ha recibido el material se procede a el montaje de la prueba del nuevo prototipo para comprobar su. Se realiza la prueba con cuatro módulos y cuatro paneles de vidrio (Figura 13). Una vez montado el prototipo y después de comprobar su correcto plegado y desplegado, se procede a estudiar que mejoras se pueden realizar para el equipo de investigador optimice el proceso último de fabricación con el sistema de fijación en cruz.

5.2. Soporte de la HG. Mecanismo en cruz y disposición diagonal

La prueba del prototipo de cuatro módulos y cuatro planos de vidrio se entrega finalmente al Taller de Metalurgia de la Universität Siegen para su ajuste último, el ensamblaje final de los módulos finales y enganche con el soporte de la vidriera. A continuación, se describen de manera escueta las mejoras realizadas sobre las uniones, el proceso de diseño del soporte en cruz y la decisión final de los planos de vidrio.

Nudos Estructurales: Todos los nudos se ajustan para mejorar su funcionamiento, un manguito de latón rodea los pernos que sobresalen lateralmente para evitar el contacto directo entre el nudo de plástico y el tubo de aluminio. Para garantizar que el tubo no se salga del nudo, se enrosca un tapón en la rosca interior situada en el perno mediante un tornillo. El nudo en Posición 3 incorpora un sistema de aire comprimido escondido en las barras que acciona una plantilla que activa el movimiento de los planos de vidrio, debe vencer por tanto el peso propio de estos. Por otro lado, sigue funcionando como freno cuando los planos se despliegan y vuelven a la posición horizontal. La Posición 5 es la que más se modifica ya que es donde se realiza la transición. El nudo se fabrica de forma aditiva, se inserta una tuerca guía y se monta en un husillo o eje roscado, tal y como se extraía de los dibujos originales de Emilio Pérez Piñero.

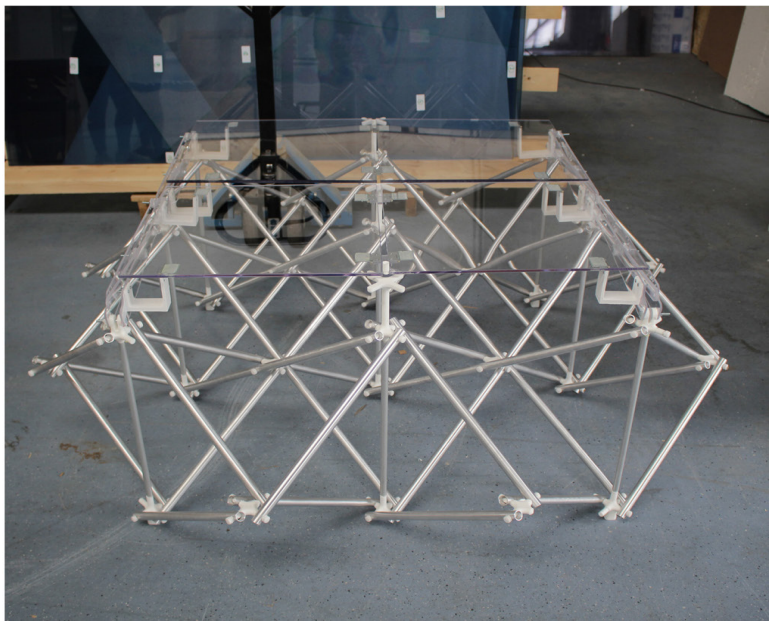

Figura 13. Montaje de cuatro módulos del prototipo de la Vidriera Hipercúbica (Fuente: autores 2022).

Finalmente, el nudo discurre sobre una guía de aluminio. La HG se apoya en cuatro puntos sobre la guía metálica y una posición central que está fija sobre una carcasa metálica y donde se aloja el sistema de los engranajes cónicos que son accionados mediante un motor.

Mecanismo en cruz: Está formado por dos perfiles de aluminio con un carril donde se introduce la guía que se fija a los nudos en Posición 5, y mediante los ejes roscado garantiza los movimientos de plegado y desplegado (Figura 14). Un motor eléctrico conmutable, que parte del centro del expositor, acciona los engranajes cónicos que transmiten el movimiento a la misma velocidad mediante los husillos roscados y tuercas de movimiento a los 4 cojinetes móviles que alojan los cuatro nudos en Posición 5 que transmiten el movimiento al Sistema Desplegables y este al Sistema Pantográfico y a su vez a los planos de vidrio. La unidad de control y la consola son de polimetacrilato de metilo (vidrio acrílico, PMMA) para que los circuitos sean visibles. Al mecanismo en cruz se le incorporan cuatro ruedas con freno, cercanos al sistema de engranajes cónicos, es decir cuando esta plegada para que se pueda desplazar y modificar su ubicación además de facilitar su transporte a la zona de exposición.

Sistema Pantográfico: Finalmente, las pletinas se realizan con aluminio de 4 mm de espesor siguiendo la geometría explicada anteriormente. Los espaciadores se realizan impresos en 3D en Nylon PA 12 y en color blanco. Aunque es posible de realizar todas las piezas de la bisagra conjuntamente, tras diferentes comprobaciones y debido a que genera muchas imperfecciones en el sistema, se decide que los componentes del espaciador se realicen en Nylon PA 12 impreso y luego se unan con un pasador metálico. Las ventajas surgen en la movilidad y también en la posterior sustitución de un panel de vidrio defectuoso, ya que pueden retirarse los pasadores metálicos de la junta y el panel de vidrio puede retirarse individualmente.

6. CONCLUSIONES

La Vidriera Hipercúbica es expuesta en la feria internacional GLASSTEC del 20 al 23 de septiembre del 2022, concretamente en la exposición denominada ` glass technology live´ donde se activa su plegado y desplegado tres veces al día y el público puede comprobar su funcionamiento. Se constata, por tanto, la posible adaptación de la Vidriera Hipercúbica Desplegable, imaginada por Salvador Dalí y diseñada por Emilio Pérez Piñero a los nuevos procesos de producción y fabricación digital. Se comprueba el perfecto funcionamiento de las piezas realizadas con aluminio y aunque el material elegido para la fabricación de los nudos estructurales (Nylon PA 12) es adecuado para la exposición del prototipo y permiten una fabricación adecuada, se recomienda la utilización de acero estructural de mejor capacidad mecánica, pero con unos costes económicos muy elevados en la impresión 3D. Previsiblemente éste es un aspecto que mejorará en los próximos años. Después de un proceso de colaboración e investigación conjunta entre la Universität de Siegen en Alemania y la Universidad Politécnica de Cartagena en España se actualiza el artefacto que se realizan con impresora 3D y cortadora láser, como se pudo comprobar en la GLASSTEC (Figura 14). La investigación realizada sirve para validarla, quedando pendiente en investigaciones futuras sus nuevas y posibles aplicaciones.

Figura 14. Vidriera Hipercúbica expuesta en la Glasstec 2022 (Fuente: autores 2022).

REFERENCIAS

(1) Castro, C. (1972). Entrevista a Emilio Pérez Piñero. *Arquitectura, 162-163*, 25-28.
(2) Pérez Almagro, C. (2013). *Estudio y normalización de la colección museográfica y del archivo de la Fundación Emilio Pérez Piñero* (Tesis Doctoral). Universidad de Murcia.
(3) Dalí, S. (1972). Sobre la obra de Emilio Pérez Piñero, el pensamiento de Salvador Dalí. *Arquitectura, 162-163*, 5-8.
(4) Pérez Piñero, E. (1972). Cúpula Museo Dalí. La Vidriera Hipercúbica Desplegable. *Arquitectura, 162-163*, 22-24.
(5) Churtichaga, J.M. (2004). *La Estructura Veloz. Trayectorias estructurales a propósito de la obra de Emilio Piñero y Félix Candela. Arquitecturas ausentes del siglo XX*. Madrid: Editorial Rueda.
(6) Puertas del Río, L. (1990). *Estructuras espaciales desmontables y desplegables. Estudio de la obra del arquitecto Emilio Pérez Piñero* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
(7) Martinez Gadea, V. (2012). *Vicente Martínez Gadea. Arquitectura 1985/2011*. Murcia: COAMU, Editorial Godoy.
(8) Pérez Piñero, E. (1965). *Three Dimensional Reticular Structure*. Patente nº 3.185.162 de la Oficina de Patentes de Estados Unidos. 25 de mayo de 1965.
(9) Pérez Piñero, E. (1976). *System of Articulated Planes*. Patente nº 3.975.872 de Oficina de la Patentes de Estados Unidos. 24 de agosto de 1976.
(10) Dlubal Software GmbH. RFEM 5 User manual (2019).
(11) DIN EN 1993-1-1. (2010). Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1993-1-1: 2010). Berlin: Beuth.
(12) DIN EN 1999-1-1. (2014). Eurocode 9. Design of aluminium structures. Part 1-1: General structural rules (EN 1999-1-1:2014). Berlin: Beuth.
(13) Ansys Workbench. CADFEM GmbH. Version 2020, Release 2.